

工程

光

字

设计

萧泽新 编著
安连生 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

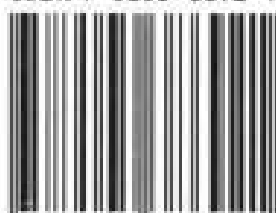
<http://www.phei.com.cn>



- ◆ 像差理论、像差校正与像质评价
- ◆ 光学部件初始结构求解
- ◆ 典型光学部件和光学系统的设计
- ◆ 变焦距光学系统设计
- ◆ 激光光学系统设计
- ◆ 光纤光学系统设计
- ◆ 光学设计CAD软件应用
- ◆ 光学零件和光学制图

本书贴有防伪标志。凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 7-5053-8692-1



9 787505 386921 >



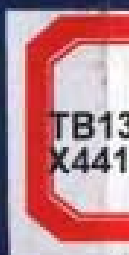
责任编辑：张来盛 杨逢仪

责任美编：欧美尼设计室



ISBN 7-5053-8692-1/TN·1785

定价：26.00 元



工程光学设计

萧泽新 编著
安连生 主审

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

21 世纪的光学不仅成为信息科学中的信息载体和主角之一,而且融合了微电子、自动化、计算机和信息管理等技术,形成了光机电一体化综合性高新技术。本书是在光通信、光机电一体化硕士研究生校内教材的基础上增订而成的,共分 4 部分 10 章,内容包括:光学设计概述,初级像差理论、像差校正与像质评价,代数法求解光学部件初始结构,典型光学部件设计,典型光学系统设计,变焦距(变倍)光学系统设计,激光光学系统设计,光纤光学系统设计,光学设计 CAD 软件应用基础,以及光学零件与光学制图。

本书将理论与实践相结合,融科学性、实用性和可操作性于一体,并列举了大量的设计实例。既可作为高年级本科生、研究生的教材或自学用书,也可供有关的技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学设计/萧泽新编著. —北京:电子工业出版社, 2003.6
ISBN 7-5053-8692-1

I. 工… II. 萧… III. 光学系统—设计 IV. TH740.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 033802 号

责任编辑:张来盛 杨逢仪

印 刷:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:440 千字

版 次:2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:26.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077

序

随着人类进入 21 世纪, 光电信息产业和机械制造产业得到了迅猛的发展。在这两种产业和相关行业中, 工程光学占据了十分重要的地位。工程光学设计的理论与方法已成为相关科技工作者知识结构中的重要组成部分。

在本书中, 作者根据自己多年从事工程光学设计的经验与体会, 阐述了工程光学设计者必备的像差理论、各种类型光学系统的设计方法、评价标准, 给出了大量的设计实例, 其中大部分实例出自作者的科研成果与实践, 体现了作者的探索与创新。本书融科学性、实用性和可操作性为一体, 特别推介了国外著名通用工程光学设计软件 OSLO LT54 (教学版), 介绍了该软件的使用方法, 这些都给读者的学习创造了有利的条件。可以相信, 本书的出版, 一定会使光学专业和非光学专业从事相关工作的科技工作者、工程技术人员得到益处, 并以他们的创造性劳动推动我国光学事业和产业的发展。

近 20 年来, 作者多次来清华大学和北京理工大学进行进修或合作, 他勤奋好学、尊师敬业, 给清华大学精仪系、继续教育学院和北京理工大学留下了深刻的印象。

特祝贺本书的出版, 是以为序。

中国工程院院士
世界光学委员会 (ICO) 副主席
清华大学机械工程学院教授



2002 年 12 月

前 言

现代科技的发展,使古老的光学在 20 世纪末焕发出青春。沐浴着 21 世纪的曙光,光学不仅成为信息科学中的信息载体和主角之一,而且融合了微电子、自动化、计算机和信息管理等技术,形成了光机电一体化综合性高新技术。光机电一体化已开始成为现代制造业的基础和核心,是当今信息业与制造业的最佳结合点和发展方向。发展以光机电一体化为基础的现代制造业将对经济的发展产生巨大的支持、拉动和提升作用。

光学科技和光机电一体化高新技术产业的发展呼唤着大量高素质的复合型人才。培养人才,高校是主要渠道;但不能忽视有志于此道的机电工程师、研究人员甚至理工类大学生、研究生通过自学成为行家里手。本书试图兼顾这两大类的读者群。

本书是在光通信、光机电一体化硕士研究生校内用教材的基础上增订而成的,共分 4 部分(10 章):第 1 部分光学设计基础;第 2 部分光学部件和系统设计;第 3 部分现代光学系统设计;第 4 部分光学设计实务。本书力求理论联系实际,融科学性、实用性和可操作性于一体,且便于自学。通过本书学习,使具有一定的应用光学知识的读者,在较短的时间内学到光学设计理论,掌握一定的设计方法,借助光学设计 CAD 软件能完成大多数典型光学部件和系统的设计工作。

光学设计的理论并非高不可攀,关键在于入门并在设计中将理论与实践相结合,不断地积累经验,提高是指日可待的。学物理的作者有在光学仪器企业从事技术工作的经历,由此打下了光学设计初步基础;更重要的是作者于 20 世纪 80 年代起在清华大学进修、当访问学者期间直到今天,一直有幸得到我国著名工程光学专家王民强教授的谆谆教诲,本书不少资料源于王教授的馈赠。在光学设计方面安连生教授、方仲彦教授曾给予帮助,在此一并致谢!

本书由北京理工大学安连生教授主审。

特别感谢中国工程院院士、世界光学委员会(ICO)副主席、清华大学机械工程学院原院长金国藩教授为本书作序。

唐焱、张应红老师以及卞飞、李凡、邓仕超、王昆、聂琨、吴文兵、杨帆和萧华鹏等同学为资料翻译、插图制作和书稿录入做了大量的工作,特此致谢。

由于作者水平有限,光学设计实践面尚不广,书中缺点、错误难免,恳请批评指正。

电子邮件: XZXin@sohu.com

作 者

2002 年 11 月于桂林电子工业学院

目 录

第 1 部分 光学设计基础

第 1 章 光学设计概述	(2)
§1.1 现代光学仪器对光学系统设计的要求	(2)
§1.1.1 仪器对光学系统性能与质量的要求	(2)
§1.1.2 光学系统对使用要求的满足程度	(2)
§1.1.3 光学系统设计的经济性	(3)
§1.2 光学系统设计概述	(4)
§1.2.1 光学系统设计的一般过程和步骤	(4)
§1.2.2 光学系统总体设计	(4)
§1.2.3 光学系统的具体设计	(4)
第 2 章 初级像差理论、像差校正与像质评价	(7)
§2.1 概述	(7)
§2.2 几何像差	(7)
§2.2.1 球差 (spherical aberration)	(7)
§2.2.2 彗差 (coma;comatic aberration)	(9)
§2.2.3 像散与像场弯曲	(10)
§2.2.4 畸变 (distortion)	(12)
§2.2.5 色差 (chromatic aberration)	(13)
§2.3 薄透镜的初级像差理论	(15)
§2.3.1 薄透镜的初级像差普遍公式	(15)
§2.3.2 由薄透镜初级像差普遍公式引出的重要结论	(16)
§2.3.3 规化条件下的双胶合透镜组的色差	(18)
§2.4 反射光学系统和平面光学系统的像差理论	(18)
§2.4.1 平面反射镜像差	(18)
§2.4.2 球面反射镜的像差	(19)
§2.4.3 棱镜或平面平行板的像差	(21)
§2.4.4 场镜的像差	(22)
§2.5 厚透镜初级像差	(23)
§2.5.1 厚透镜焦距的求法	(23)
§2.5.2 利用弯月形厚透镜消场曲 S_{IV}	(23)
§2.5.3 分析消场曲的弯月形厚透镜的其余像差 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IC}	(25)
§2.5.4 远双分离正负薄透镜组消场曲	(25)
§2.5.5 用同心不晕弯月厚透镜消除球差、彗差及场曲	(26)
§2.5.6 用弯月型厚透镜消除轴上点色差	(26)
§2.5.7 鼓形透镜 (双凸厚透镜)	(26)

§2.6	全对称光学部件的像差	(28)
§2.7	像差校正和平衡方法	(30)
§2.7.1	引言	(30)
§2.7.2	像差校正方法	(30)
§2.7.3	像差校正的一些设计技巧	(31)
§2.8	像差容限与像质评价	(32)
§2.8.1	概述	(32)
§2.8.2	经典光学系统的像差容限	(33)
§2.9	应用光学传递函数校正像差和评价像质	(34)
§2.9.1	光学传递函数概述	(34)
§2.9.2	光学传函理论实质、基本出发点和物理意义	(34)
§2.9.3	用光学传函评价光学系统像质	(36)

第 2 部分 光学部件与系统设计

第 3 章	代数法求解光学部件初始结构	(40)
§3.1	概述	(40)
§3.2	单片薄透镜初始结构设计计算	(40)
§3.3	双胶薄透镜初始结构的设计计算	(43)
§3.3.1	双胶薄透镜物在无限远时的 P^∞ 、 W^∞ 与结构参数的关系	(43)
§3.3.2	对 P^∞ 、 W^∞ 基本关系的分析	(44)
§3.4	两组双胶物镜初始结构设计	(46)
§3.4.1	选型	(46)
§3.4.2	方案选择	(47)
§3.5	小气隙双分透镜	(48)
§3.5.1	双胶合组变小气隙双分透镜的目的	(48)
§3.5.2	小气隙双分透镜能减小高级球差	(48)
§3.6	齐明弯月透镜结构参数求解	(49)
§3.6.1	显微物镜齐明弯月前组	(49)
§3.6.2	聚透镜第一片齐明透镜	(50)
§3.6.3	设计实例	(51)
第 4 章	典型光学部件设计	(53)
§4.1	望远物镜设计	(53)
§4.1.1	望远物镜光学特性与结构类型	(53)
§4.1.2	双胶合、双分离物镜设计	(55)
§4.1.3	摄远物镜设计	(57)
§4.2	显微物镜设计	(59)
§4.2.1	显微物镜概述	(59)
§4.2.2	显微物镜的光学特性	(59)
§4.2.3	显微物镜结构基本类型	(62)
§4.2.4	显微物镜设计时应校正的像差	(65)

§4.2.5	消色差显微物镜设计	(66)
§4.2.6	长工作距离平场物镜设计	(67)
§4.3	目镜设计	(71)
§4.3.1	目镜光学特性与结构类型	(71)
§4.3.2	目镜设计要点	(72)
§4.3.3	普通目镜设计	(74)
§4.3.4	借助价格工程 (VE) 优化广角目镜设计	(77)
§4.3.5	显微摄影光学系统及摄影目镜设计	(79)
§4.3.6	显微电视 CCD 摄录接口的设计	(82)
§4.4	照相物镜设计	(84)
§4.4.1	照相物镜的光学特性和结构形式	(84)
§4.4.2	照相物镜设计的一般方法	(91)
§4.4.3	照相机标准镜头设计	(92)
§4.4.4	新型三片式照相物镜设计	(94)
§4.5	投影物镜设计	(98)
§4.5.1	投影物镜光学特性	(98)
§4.5.2	结构形式与对像质的要求	(99)
§4.5.3	电影投影物镜设计	(100)
第 5 章	典型光学系统设计	(101)
§5.1	概述	(101)
§5.2	普通生物显微镜成像光学系统设计	(101)
§5.2.1	显微镜成像简述	(101)
§5.2.2	显微光学系统的设计方法和要求	(102)
§5.2.3	显微光学系统设计的标准化	(102)
§5.2.4	显微光学系统设计要点	(103)
§5.2.5	设计实例	(104)
§5.3	无限远像距光学系统设计	(111)
§5.3.1	概述	(111)
§5.3.2	无限远像距光学系统设计要点	(112)
§5.3.3	设计实例	(114)
§5.4	照明光学系统设计	(116)
§5.4.1	概述	(116)
§5.4.2	照明系统及其分类	(119)
§5.4.3	照明系统外形尺寸计算	(121)
§5.4.4	聚光镜光学设计	(123)
§5.4.5	照明系统设计中的几个问题	(129)
§5.5	特殊照明系统设计	(133)
§5.5.1	光导纤维落射内照明系统设计	(133)
§5.5.2	不散瞳广角眼底观测仪照明系统设计	(136)
第 6 章	变焦距 (变倍) 光学系统设计	(138)

§6.1 变焦距(变倍)光学系统原理	(138)
§6.2 变焦距物镜	(139)
§6.3 连续变倍显微光学系统设计	(140)
§6.3.1 连续变倍显微光学系统的类型	(140)
§6.3.2 典型的连续变倍显微镜	(141)
§6.3.3 变倍目镜设计	(144)
§6.3.4 设计实例	(149)

第3部分 现代光学系统设计

第7章 激光光学系统设计	(152)
§7.1 激光光学系统设计基础	(152)
§7.1.1 概述	(152)
§7.1.2 设计基础知识	(152)
§7.1.3 激光光学系统的外形尺寸计算	(155)
§7.1.4 通光孔径的选择	(156)
§7.1.5 聚焦高斯光束的焦点位移	(158)
§7.1.6 设计注意事项	(159)
§7.2 高斯光束会聚系统设计	(159)
§7.2.1 激光聚光光学系统设计思想与实例	(159)
§7.2.2 李斯特显微物镜激光会聚系统	(160)
§7.3 高斯光束准直扩束系统设计	(162)
§7.3.1 激光准直扩束系统设计	(162)
§7.3.2 半导体激光器准直系统设计	(164)
第8章 光纤光学系统设计	(166)
§8.1 半导体激光器与光纤直接耦合设计	(166)
§8.1.1 概述	(166)
§8.1.2 直接耦合光纤端面结构形式及其效率	(167)
§8.1.3 尖端光纤耦合理论模型	(168)
§8.2 微光学元件扩束耦合系统设计	(170)
§8.3 光纤-透镜耦合激光会聚系统设计	(175)
§8.4 光天线-光纤耦合系统设计	(177)
§8.4.1 自由空间光通信接收系统前端概述	(177)
§8.4.2 对光天线设计的要求与设计理念	(177)
§8.4.3 光天线设计	(178)
§8.4.4 设计实例	(181)

第4部分 光学设计实务

第9章 光学设计CAD软件应用基础	(184)
§9.1 国内外光学设计CAD软件概述	(184)
§9.1.1 光学设计CAD软件的发展历史	(184)

§9.1.2	有代表性的中外光学设计 CAD 软件简介	(184)
§9.2	OSLO 软件简介	(185)
§9.2.1	OSLO 的特点	(185)
§9.2.2	OSLO 的 3 种版本	(186)
§9.3	OSLO LT 54 基本概念	(187)
§9.4	OSLO 用户界面	(190)
§9.4.1	主视窗 (Main Window)	(190)
§9.4.2	文件管理 (file management)	(195)
§9.4.3	编辑表 (spreadsheets)	(196)
§9.4.4	各厂商的透镜产品目录资料库 (catalog lens database)	(200)
§9.4.5	对话框 (Dialog boxes)	(202)
§9.4.6	图形视窗 (Graphic window)	(202)
§9.4.7	命令输入 (command input)	(204)
§9.4.8	文字编辑器 (Text editor)	(204)
§9.4.9	帮助视窗 (Help Window)	(205)
§9.4.10	打印输出 (Hard copy output)	(205)
§9.4.11	剪切板支持	(205)
§9.5	OSLO LT 54 基本操作要点	(205)
§9.5.1	概述	(205)
§9.5.2	新建镜头	(206)
§9.5.3	调用镜头	(214)
§9.5.4	优化	(214)
§9.6	OSLO LT54 应用实例	(218)
§9.6.1	双高斯型照像物镜设计	(219)
§9.6.2	25 \times 消色差显微物镜设计	(220)
§9.6.3	15 \times 广角目镜设计	(221)
第 10 章	光学零件与光学制图	(223)
§10.1	光学材料	(223)
§10.1.1	光学材料简介	(223)
§10.1.2	光学玻璃	(223)
§10.1.3	激光技术用的光学材料	(224)
§10.1.4	红外、紫外光学材料	(226)
§10.1.5	光学薄膜	(228)
§10.1.6	光学塑料	(228)
§10.2	光学制图 (GB13323—91) 标准的主要内容	(230)
§10.2.1	一般规定	(230)
§10.2.2	图样要求	(232)
§10.3	对光学零件材料的要求	(238)
§10.4	对光学零件的加工要求	(239)
§10.4.1	光学零件的表面误差	(239)

§10.4.2	光学零件外径及配合公差的给定	(241)
§10.4.3	光学零件的中心厚度及边缘最小厚度	(242)
§10.4.4	光学零件的厚度公差	(242)
§10.4.5	光学零件的倒角 (GB1204-75)	(243)
§10.4.6	透镜中心误差 (GB7242-87)	(244)
§10.4.7	光楔	(244)
§10.4.8	光学零件镀膜分类、符号及标注 (JB/T 6179-92)	(245)
附录 A	无色光学玻璃 (GB 903-87)	(247)
附录 B	中、德玻璃牌号对照表	(250)
附录 C	单薄透镜参数表	(252)
附录 D	冕牌透镜在前的玻璃组合	(254)
附录 E	火石透镜在前的玻璃组合	(255)
附录 F	双胶合透镜 P_0 , Q_0 表	(256)
参考文献	(261)

第 1 部分 光学系统设计基础

第1章 光学设计概述

§ 1.1 现代光学仪器对光学系统设计的要求

仪器（或设备）研发的前提是社会的需求。在对社会需求进行分析研究后，设计者把使用者提出的要求转化成仪器的质量指标和设计参数，通过相关技术资料、专利文献的查询和必要的实验验证，然后进入整机的总体设计。任何光学系统不可能是单独存在的，它必然是仪器或设备整机中的一个系统或子系统。尽管现代光学仪器是光学、精密机械、电子学、计算机和计算技术的综合体，但作为子系统之一的光学系统仍然是光学仪器总体设计的关键。

要设计好光学系统，首先要明确它在仪器中的地位与作用，即仪器对光学系统的要求；其次是了解光学系统对这些要求能满足的程度；最后是考虑设计的经济性，即能以最低的成本生产出好产品来。

§ 1.1.1 仪器对光学系统性能与质量的要求

光学仪器的用途和使用条件必然会对它的光学系统提出一定的性能与质量要求。因此，在进行光学设计之前一定要了解对光学系统的要求。

1. 光学系统的基本特性

光学系统的基本特性有：数值孔径（NA）或相对孔径（ $A=D/f'$ ），线视场或视场角（ 2ω ），系统的垂轴放大率（ β ）和焦距（ f' ）；还有与这些基本特性有关的一些特性参数，如入瞳直径（ D ）、出瞳直径（ D' ）、工作距离（ s ）、共轭点距离、座装距离等。

2. 系统的外形尺寸

系统的外形尺寸，即系统的横向尺寸和纵向尺寸。在整体设计时必须把这些外形尺寸要求作为约束条件，进行外形尺寸计算，还必须充分考虑各光组、光瞳之间的衔接。

3. 成像质量

成像质量的要求与光学系统的用途有关。不同的光学系统按其用途可提出不同的成像质量要求。对这些要求，可按用户意见、相应的有关标准以及与同类系统类比进行界定。

4. 仪器的使用条件与环境

根据用户意见和相应的标准，对仪器的使用条件提出一定的要求，如要求光学系统具有一定的稳定性、抗振性、耐热性和耐寒性等；有时还要求仪器在特定的环境下能正常工作。

§ 1.1.2 光学系统对使用要求的满足程度

在对光学系统提出使用要求时，一定要考虑在技术上和物理上实现的可能性，即光学仪器对使用要求的满足程度。下面以显微物镜、望远物镜、照相物镜和投影物镜等四大类物

镜的光学特性为例来阐述这一问题。

(1) 显微物镜的光学特性。显微物镜的特点是短焦距、大孔径、小视场,其光学性能有:放大率 β 和数值孔径NA。 β 与 f' 有如下关系:当共轭距 f' 一定时, $f'=[-\beta/(1-\beta)^2]\cdot L$;对无限远像距系统来说, $f'=-250/\beta$ 。由此可见, β 绝对值越大, f' 越短。 $NA=n\sin U$ (n 为物镜物方折射率, U 为物方孔径角之半)。对于非浸液物镜来说,NA与 D/f' 近似符合以下关系: $D/f'=2NA$ 。显微物镜的视场由目镜视场决定,对无限远像距显微镜来说(辅助物镜 $f'=250\text{ mm}$,物方视场角=物镜像方视场角) $\tan\omega=y'/f'=0.04$, $\omega=2.3^\circ$ 。所以物镜视场角 $2\omega'$ 不大于 5° ,有限像距显微镜也大致相当。此外,生物显微镜的视放大率 Γ 一定要按有效放大率的条件来选取,即满足 $500NA\leq\Gamma\leq1000NA$ 条件。过大的放大率是没有意义的。只有提高数值孔径NA才能提高有效放大率。

(2) 望远物镜的光学特性: $\beta<1/5$, $2\omega<10^\circ$ 。它是一个小孔径、小视场系统。望远镜的有效放大率应该是 $\Gamma=D/2.3$ (式中 D 是入瞳直径),其放大率应该按下式选取: $0.2D\leq\Gamma<0.75D$ 。

(3) 放映物镜和投影物镜在成像关系方面极其相似,放映物镜类似于倒置的照相物镜,两者光学特性用 2ω , D/f' , β 和 f' 表示。 β 与 f' 的关系为: $f'=[-\beta/(1-\beta)^2]\cdot L$ (L 是物或图片到屏幕间的共轭距)。

(4) 照相物镜的光学特性:照相物镜是同时具有大相对孔径和大视场的光学系统,其功能是把外界景物成像在感光底片上。它的主要光学特性有:焦距 f' ,相对孔径 D/f' 和视场角 2ω 。

在设计照相物镜时:为了使相对孔径,视场角和焦距三者之间的选择更合理,应该参照下列关系式来选择这三个参数

$$C_m=(D/f')\cdot\tan\omega\cdot\sqrt{f'/100} \quad (1-1)$$

式中, $C_m=0.22\sim0.26$,称为物镜的质量因数。实际计算时,取 $C_m=0.24$ 。当 $C_m<0.24$ 时,光学系统的像差校正就不会发生困难。当 $C_m>0.24$ 时,系统的像差很难校正,成像质量很差。随着高折射率玻璃的出现、光学设计方法的完善、光学零件制造水平的提高以及装调工艺的完善, C_m 的值在逐渐提高。

式(1-1)是前苏联光学专家Д.С.В.Олосов提出的经验公式,反映了三个基本参数之间相互关联、相互制约的关系。

§ 1.1.3 光学系统设计的经济性

评价一个光学系统设计优劣的主要依据是:①性能和成像质量;②系统的复杂程度。即一个好的设计应是在功能(光学性能、成像质量)能满足用户需求的情况下,结构最简单(成本低)。为此,在光学系统设计中应用价值工程的原理,对提高光学仪器产品质量和降低产品成本有重要的意义。要实现这一目标,依据公式 $V(\text{价值})=F(\text{功能})/C(\text{成本})$,遵循如下5个途径即可奏效:①增加功能,降低成本;②功能略有下降,成本大幅度降低;③功能不变,成本下降;④成本不变,功能增加;⑤成本略增,功能大幅度增加。

笔者的多年实践表明,在新产品研发和老产品改进中应用价值对提高产品质量、降低成本、增加效益的影响十分显著,本书将在§4.3.4、§4.3.5和§4.4.3三小节中具体地介绍应用实例。

总之,在光学设计过程中对光学系统提出的要求要合理,保证在技术上和物理上能够

实现,并且具有良好的工艺性和经济性。

§1.2 光学系统设计概述

光学设计是 20 世纪发展起来的一门学科,在大半个世纪发展的进程中,经历了人工设计和光学自动设计两个阶段,实现了由手工计算像差、人工修改结构参数进行设计,到使用电子计算机和光学自动设计程序进行设计的巨大飞跃。国内外已出现了不少功能相当强大的光学设计 CAD 软件。当今,计算机辅助设计(CAD)已在工程光学领域中普遍使用,从而使设计者能快速、高效地设计出优质、经济的光学系统。然而,不管设计手段如何变革,光学设计过程的一般规律仍然是必须遵循的。下面就这个问题展开阐述。

§ 1.2.1 光学系统设计的一般过程和步骤

(1) 根据使用要求制定合理的技术参数。从光学系统对使用要求满足程度出发,制定光学系统合理的技术参数,这是设计成功与否的前提条件。

(2) 光学系统总体设计和布局。

(3) 光学部件(光组、镜头)的设计。一般分为选型、确定初始结构参数、像差校正三个阶段。

(4) 长光路的拼接与统算。以总体设计为依据,以像差评价为准绳,来进行长光路的拼接与统算。如结果不合理,则应反复试算并调整各光组的位置与结构,直到达到预期的目标为止。

§ 1.2.2 光学系统总体设计

总体设计的重点是确定光学原理方案和外形尺寸计算。为了设计出光学系统的原理图,确定基本光学特性,使其满足给定的技术要求,首先要确定放大率(或焦距)、线视场(或角视场)、数值孔径(或相对孔径)、共轭距、后工作距、光阑位置和外形尺寸等。因此,常把这个阶段称为外形尺寸计算阶段。一般都按理想光学系统的理论和计算公式进行外形尺寸计算。在计算时还要结合机械结构和电气系统,以防在机械结构上无法实现。每项性能的确定一定要合理,过高的要求会使设计结果复杂,造成浪费;过低的要求会使设计不符合要求。因此,这一步骤必须慎重行事。

§ 1.2.3 光学系统的具体设计

光学系统的具体设计一般包括光学部件设计和整个系统的统算。

1. 选型

现有的常用镜头可分为物镜和目镜两大类。目镜主要用于望远系统和显微系统。物镜可分为望远物镜、显微物镜和照相摄影物镜三大类。其主要结构形式详见第 4 章典型光学部件设计。镜头选型时首先应按图 1-1 镜头选择依据的三要素(孔径、视场、焦距)。“对号入座”选择镜头类型,特别要注意各类镜头各自能承担的最大相对孔径、视场角。在大类型选定后,可参阅第 4 章选择能达到预定要求而又结构简单者。图 1-1 表示各种常用类型镜头基本光学特性之间的关系,供选型时参考。从图 1-1 还可看到这样一些大致规律:①同样结构形式者 D/f' , ω 越小,像质越好;② f' 相同时, D/f' 越大, ω 越小;③ f' 相同时, ω 越大, D/f' 越小。选型是光学系统设计出发点,是否合理、适宜是设计成败的关键。若用逐步修

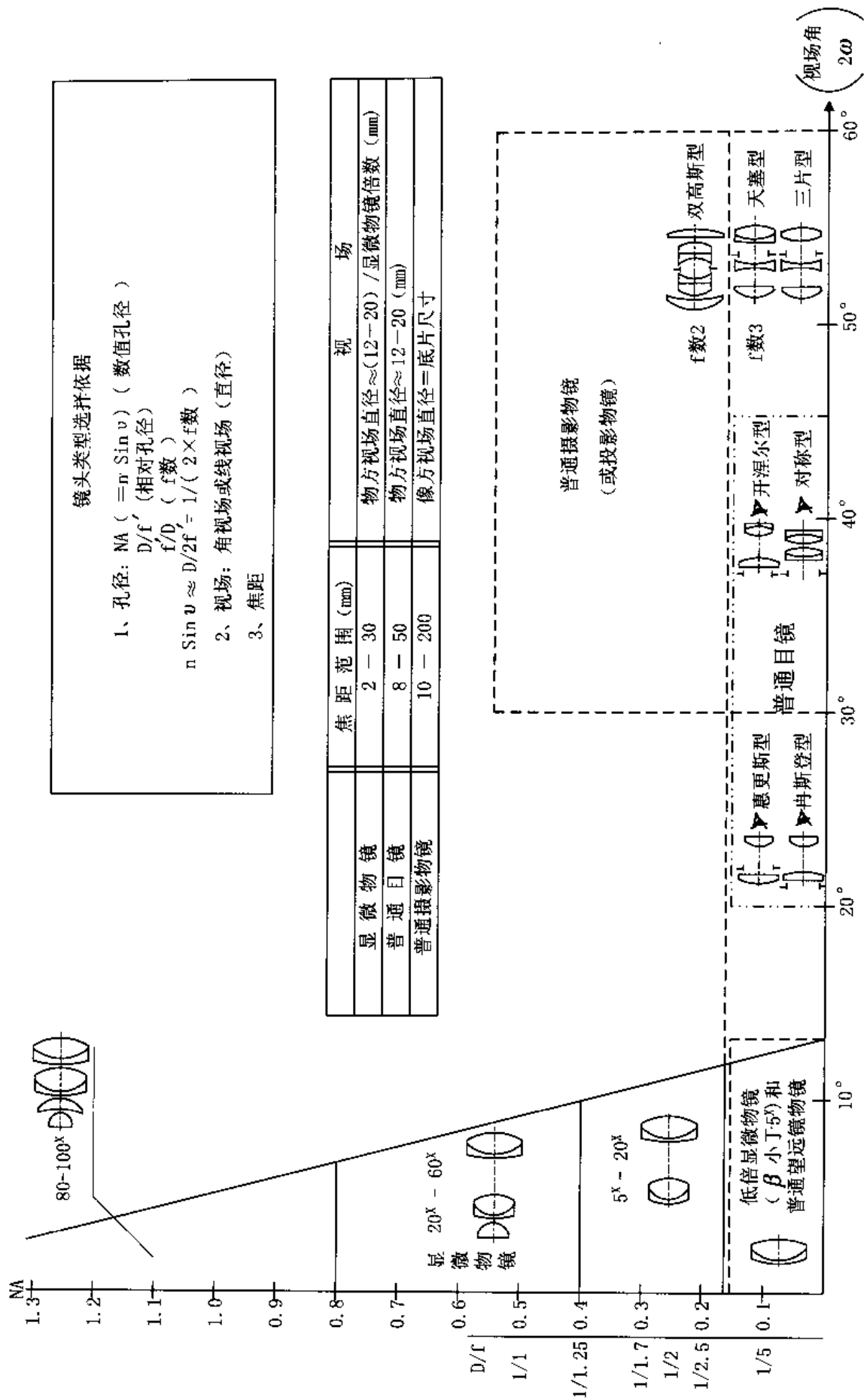


图1-1 镜头类型选择依据以及常用镜头光学特性之间的关系

改法选择初始结构,在选型时应对应国内外相类似技术条件(焦距、视场、相对孔径和工作距离等)的光组结构进行分析,吸取其优点,克服其缺点,提出合理的结构形式。

2. 初始结构的计算和选择

初始结构的确定常用以下两种方法:

(1) 代数法,即根据初级像差理论求解初始结构。这种方法是根据外形尺寸计算得到的基本特性,利用初级像差理论来求解满足成像质量要求的初始结构,即确定系统各光学零件的曲率半径,透镜的厚度和间隔,玻璃的折射率和色散等。

利用初级像差理论求解的初始结构,不仅对小孔径小视场的光学系统非常有效,就是对于比较复杂的光学系统也比任意选择的结构更容易接近所求的解,使设计容易获得成功。这是因为,在求解过程中只要对各种像差进行全面分析,对各种像差之间的关系有了全面了解,在像差校正时就能够做到总体平衡,不必进行像差的局部性校正。

(2) 逐步修改法(试验法)。光学设计从数学角度看,就是建立和求解像差方程组,它的解就是我们要求的结构参数。光学设计最常用的方法之一是逐步修改法,即从已有技术资料 and 专利文献中选出其光学特性与所要求相接近的光学结构作为初始结构,通过像差计算逐步修改,达到满足光学特性要求的成像质量。用电子计算机进行像差自动校正与平衡,实际上是从初始结构出发,建立近似代替像差方程组的像差线性方程组: $A\Delta X=\Delta F$ (A 、 ΔX 、 ΔF 分别为系统的结构参数差商矩阵、每个结构参数相应的改变量矩阵、像差值矩阵)。求出初始解 ΔX 后,按 ΔX_p 对系统进行修改($\Delta X_p=\Delta X \cdot p$, p 为小于1的常数,且足够小),总可获得一个比原系统有所改善的新系统,并不断反复迭代,直到各种像差符合要求为止。这样做只能在初始结构附近找出一个较好的解,无法求得光学系统的总极值,得到的只是局部极值。

对于大视场和大孔径及结构复杂的光学系统(如广角物镜、大孔径照相物镜等),试验法是一种比较实用又容易获得成功的方法。因此,它被广大光学设计者所采用,但要求设计者对光学设计理论有深刻了解,并有丰富的设计经验,只有这样才能从类型繁多的结构中挑选出简单而又合乎要求的初始结构。

综上所述,初始结构的选择是十分重要的。

3. 像差校正、平衡与像质评价

初始结构选好后,要在电子计算机上进行光路计算,或用像差自动校正程序进行像差自动校正。然后根据计算结果画出像差曲线,分析像差,找出原因,再反复进行像差校正和平衡,直到满足成像质量要求为止。

第2章 初级像差理论、像差校正与像质评价

§ 2.1 概述

光学设计在很大程度上来讲就是像差设计。正如在第1章中提到的那样,光学系统的具体设计分三个阶段:选型→初始结构的计算和选择→像差校正、平衡与像质评价。初始结构选好后,逐次修改结构参数,使像差得到最佳的校正与平衡,接着对结果进行评价。这几个阶段都需要设计者掌握较全面和坚实的像差理论。

像差校正与平衡是一项反复修改结构参数逐步逼近最佳结果的工作。在计算机辅助光学设计中,采用像差自动平衡的方法,充分挖掘系统各结构参数的校正潜力,极大地加快了设计进程,且显著地提高了设计质量。值得指出,好结果的取得仍然是相当困难的事,好结果也往往是在结果比较中优中取佳或良莠不齐中选优。

当像差已校正与平衡到良好的状态后,需要借助适当的方法对像质做全面的评价,其判据(或指标)视像差的允差或传递函数的值,决定设计结果是否符合要求;如尚未达到要求,仍需继续做像差平衡工作;如发现再怎样做像质还是提高不大,则可以基本上判定这是“迷宫”中某道路的“死胡同”;应另选结构形式或另定初始参数,重复上述设计步骤继续工作,直到取得满意的结果为止。

§ 2.2 几何像差

为做好光学设计,有必要全面回顾一下像差的知识。

像差(aberration)指在光学系统中由透镜材料的特性或折射(或反射)表面的几何形状引起实际像与理想像的偏差。理想像就是由理想光学系统所成的像。实际的光学系统,只有在近轴区域以很小孔径角的光束所生成的像才是完善的。但在实际应用中,需有一定大小的成像空间和光束孔径,同时还由于成像光束多是由不同颜色的光组成的,同一介质的折射率随颜色而异。因此实际光学系统的成像具有一系列缺陷,这就是像差。像差的大小反映了光学系统质量的优劣。几何像差主要有七种:其中单色光像差有五种,即球差、彗差、像散、场曲和畸变;复色光像差有轴向色差和垂轴色差两种。

用高斯公式、牛顿公式或近轴光线计算得到的像的位置和大小是理想像的位置和大小;而实际光线计算结果所得到的像的位置和大小相对于理想像的偏差,可作为像差的尺度。

在实际的光学系统中,各种像差是同时存在的。它影响了光学系统成像的清晰度、相似性和色彩逼真等,降低了成像质量。

在所有的光学零件中,平面反射镜是惟一能成完善像的光学零件(详见§2.4 反射光学系统和平面光学系统的像差理论)。

§ 2.2.1 球差(spherical aberration)

球差是球面像差的简称。图2-1所示是一个待校正物镜的球差情况。对应孔径角 U_{\max} 的入射光线 a ,高度为 h ,称为全孔径,经光学系统后交光轴于点 A'_1 上,对应一倾斜角 U 的

入射光线 b ，高度为 h_1 ，若 $h_1/h=0.7$ ，则称为 0.7 孔径或 0.7 带，该光线交光轴于点 A'_2 上，对近轴光线 c ，交光轴于点 A' 上。由于不同高度的光线不相交在同一点上，得到的不是一个完善的像点，而是一个边缘模糊而对称的圆斑——弥散圆。球差是轴上点惟一的单色像差，可在沿轴方向和垂轴方向度量，分别称为轴向球差和垂轴球差。轴向球差 (axial spherical aberration) 又称纵向球差 (longitudinal spherical aberration) 是沿光轴方向度量的球差。用符号 $\delta L'$ 表示。垂轴球差 (lateral spherical aberration) 是在过近轴光线像点 A' 的垂轴平面内度量的球差。

图 2-1 中的 $\Delta y'$ 就是垂轴球差，它表示由轴向球差引起的弥散圆的半径 $\Delta y' = \delta L' \cdot \tan U'$ 。对于单透镜来说， $\sin U$ 愈大则球差值愈大，也就是说单透镜自身不能校正球差。单正透镜产生的球差是负值，单负透镜则产生正球差，分别见图 2-2 和图 2-3。因此将正、负透镜组合起来就能使球差得到校正，组合光组称为消球差光组，最简单的消球差光组是图 2-4 (a) 中的双分离透镜组或 (b) 中的双胶合透镜组。光学系统中对某一给定孔径的光线达到 $\delta L' = 0$ 的系统称为消球差系统。

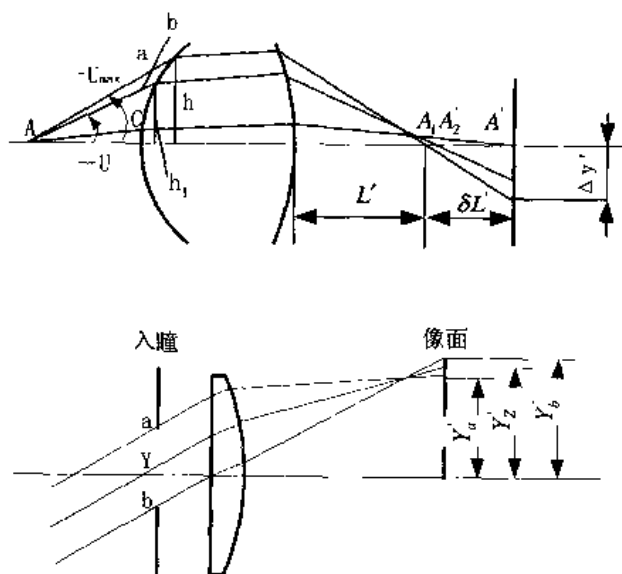


图 2-1 球差

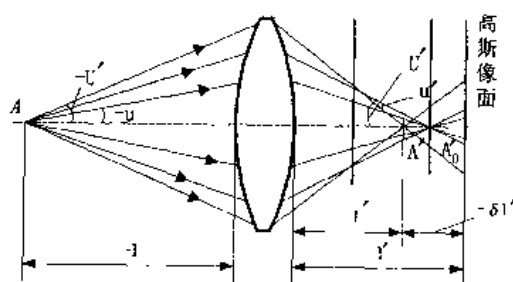


图 2-2 正单透镜产生负球差

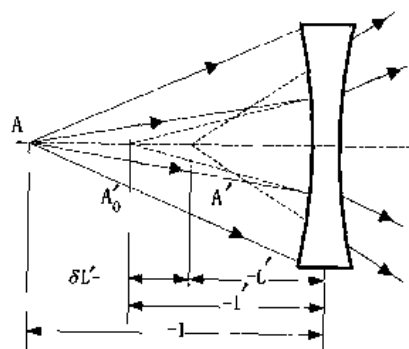


图 2-3 负单透镜产生正球差

图 2-5 所示为一般消球差系统的球差曲线。横坐标为 $\delta L'$ ，纵坐标为 h/h_m ， h 是光线为 U 角时的入射高度， h_m 是光线的最大入射高度。图中， $h=0.7h_m$ 的带区具有最大的剩余球差，孔径中央球差为零。单透镜的球差与焦距、相对孔径、透镜形状及折射率有关。对于给定孔径、

焦距和折射率的透镜，通过改变其形状可使球差达到最小。

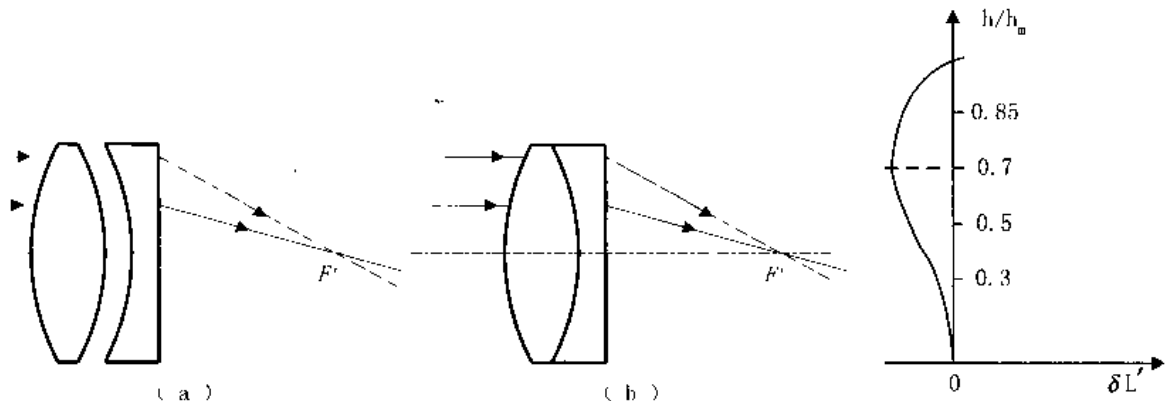


图 2-4 消球差光组

图 2-5 消球差系统球差曲线

§ 2.2.2 彗差 (coma; comatic aberration)

为了掌握成像光束光线的全貌，先介绍两个平面，即子午平面和弧矢平面。

由轴外物点和光轴所确定的平面称为子午平面，子午平面内的光束称子午光束。过主光线且与子午平面垂直的平面称弧矢平面。弧矢平面内的光束称弧矢光束。

彗差是轴外物点发出宽光束通过光学系统后，不会聚在一点，而呈彗星状图形的一种相对主光线失对称的像差。具体地说，在轴外物点发出的光束中，对称于主光线的一对光线经光学系统后，失去对主光线的对称性，使交点不再位于主光线上，对整个光束而言，与理想像面相截形成一彗星状光斑的一种非轴对称性像差。彗差通常用子午面上和弧矢面上对称于主光线的各对光线，经系统后的交点相对于主光线的偏离来度量，分别称为子午彗差和弧矢彗差。

子午彗差 (meridional coma) 指对子午光束度量的彗差，见图 2-6 (a)。子午光线对交点离开主光线的垂直距离 K_T' 用来表示此光线对交点偏离主光线的程度。

弧矢彗差 (sagittal coma) 指对弧矢光束度量的彗差。弧矢光线对交点离开主光线的垂直距离 K_S' 用来表示弧矢光线对交点偏离主光线的程度。

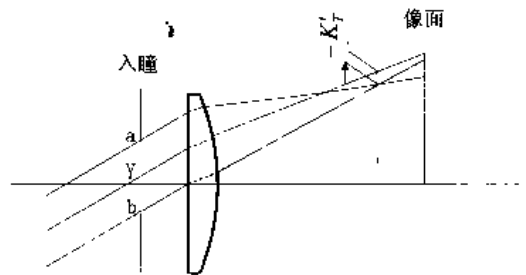


图 2-6 (a) 子午彗差

图 2-6 (b) 是彗差形成示意图。图中，轴外点 B 发出的宽光束在折射以前，子午平面的上光束 BC 、下光束 BD 与弧矢平面上的光束 BE 、 BF ，都对称于光束轴线 BO 。而折射后的成像光束与主光线 OB'_y 失去了对称性。即在折射前主光线是光束的轴线，折射后主光线不再是光束轴线。不同孔径的光线在像平面上形成半径不同的相互错开的圆斑。距离主光线像点 B'_y 越远，形成的圆斑直径越大，这些圆斑相互叠加的结果，形成一个彗星形状的光斑，光斑的头部（尖端）较亮，自尖端至尾部亮度逐渐减弱，称彗星像差，简称彗差。

彗差的形状有两种，彗星状像斑的尖端指向视场中心者，称正彗差；彗星状像斑的尖端指向视场边缘者，称为负彗差。彗差没有对称轴只能垂直量度，所以是垂轴像差的一种。

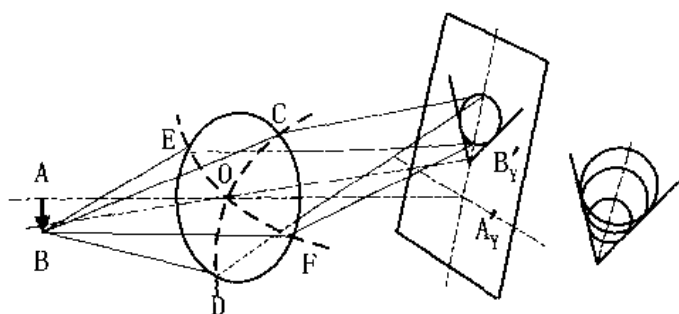


图 2-6 (b) 彗差形成示意图

彗差对成像的影响：物方一点的像成为彗星状弥散斑，损害了像的清晰度，使成像质量降低。

彗差对于大孔径系统或望远系统影响甚大。彗差大小与光束宽度、物体大小、光阑位置、光组内部结构（透镜的折射率、曲率、孔径等）有关。改变透镜的形状或组合，可较好地消除彗差。如能对该透镜消除球差，则彗差亦得到改善。

对于某些小视场大孔径的光学系统（如显微物镜），由于像高本身较小，彗差的实际数值很小，因此用彗差的绝对数量不足以说明系统的彗差特性。此时，常用“正弦差”来描述小视场的彗差特性。正弦差等于彗差与像高的比值，用符号 SC' 表示：

$$SC' = \lim_{y \rightarrow \infty} (K'_s / y') \quad (2-1)$$

§2.2.3 像散与像场弯曲

轴外点细光束成像，将产生像散和场曲，它们是互相关联的像差。

1. 像散 (astigmatism)

像散使轴外物点用细光束成像时形成两条相互垂直且相隔一定距离的短线像的一种非对称像差。如图 2-7 (a) 所示，轴外物点发出细光束，经光学系统后其像点不再是一个点。由子午光束所成的像是一条垂直子午面的短线 t ，称为子午焦线。由弧矢光束所成的像是一条垂直弧矢面的短线 S ，称为弧矢焦线。这两条短线不相交而互相垂直且隔一定距离。两条短线间的沿光轴方向的距离表示像散的大小，用符号 x'_{ts} 表示：

$$x'_{ts} = x'_t - x'_s$$

图 2-7 (b) 很直观地显示了像散形成过程，当轴外物点 B 通过有像散的光学系统成像时，将光屏沿光轴缓慢移动，在不同位置时， B 点的成像光束截面形状会发生变化。在位置 1 时，成像光束截面为一长轴垂直于子午面的椭圆；移至位置 2 时，为一垂直于子午面的短线；位置 3 时又成为一长轴和子午面垂直的椭圆；位置 4 时形成一个圆斑；位置 5 时形成一长轴在子午面内的椭圆；位置 6 时形成一子午面内的短线；位置 7 时又扩散成为椭圆。

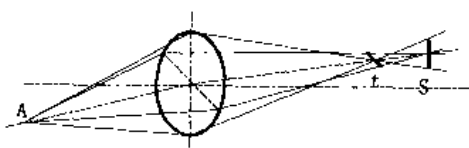


图 2-7 (a) 像散

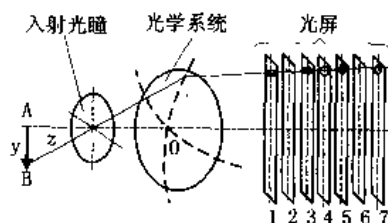


图 2-7 (b) 像散形成过程

缩小光阑，使很细光束通过光学系统，仍有此现象。上述两条短线（焦线）光能量最集中，它们是 B 点的两个像。如果轴外物体是一个“十”字形图案，如图 2-8 所示，通过有像散的光学系统时，在 B'_t 处，“十”字图案上的每一点的像形成一垂直于子午面的水平短线，故水平线的像清晰，垂直线的像模糊；在 B'_s 处，“十”字图案的每一点的像为一垂直的短线，则垂直线的像清晰，水平线的像模糊。

上述现象即光学系统的像散现象。 B'_t 与 B'_s 是 B 点通过光学系统形成的子午像点与弧矢像点，它们沿光轴之间的距离 $B'_t B'_s$ 是光学系统的像散。光学设计中一般以 $B'_t B'_s$ 在光轴方向的投影来量度。通过无限细像散光束的计算可求得沿主光线方向的位置 l' 和 s' ，然后换算成相对于最后一面顶点的轴向距离 l'_t 和 l'_s ，求得像散值 x'_s 为：

$$x'_s = l'_t - l'_s \quad (2-2)$$

当光学系统的子午像点比弧矢像点更远离高斯像面，即 $l'_t < l'_s$ ，像散 x'_s 为负值。反之，像散为正值。

像散是物点远离光轴时的像差，且随视场的增大而迅速增大。

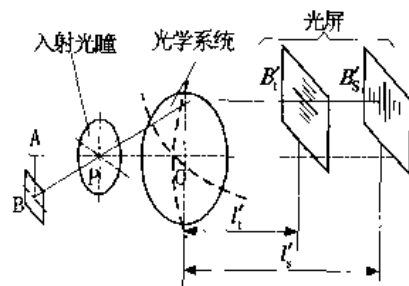


图 2-8 像散

2. 场曲 (curvature of field)

场曲是像场弯曲的简称。场曲是物平面形成曲面像的一种像差。

如果光学系统还存在像散，则实际像面还受像散的影响而形成子午像面和弧矢像面，所以场曲需以子午场曲和弧矢场曲来表征。

(1) 子午场曲 (meridional curvatures of field) 用细光束子午场曲和宽光束子午场曲来度量。

子午细光束交点相对于理想像面的偏离，称为细光束子午场曲，见图 2-9 (a)，用符号 x'_t 表示：

$$x'_t = l'_t - l' \quad (2-3a)$$

子午宽光束交点相对于理想像面的偏离，称为宽光束子午场曲，见图 2-9 (b)，用符号 X'_t 表示：

$$X'_t = L'_t - l' \quad (2-3b)$$

细光束子午场曲与宽光束子午场曲之差为轴外点子午球差。

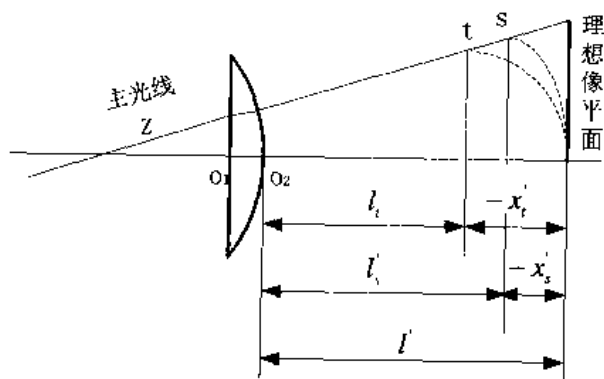


图 2-9 (a) 细光束场曲

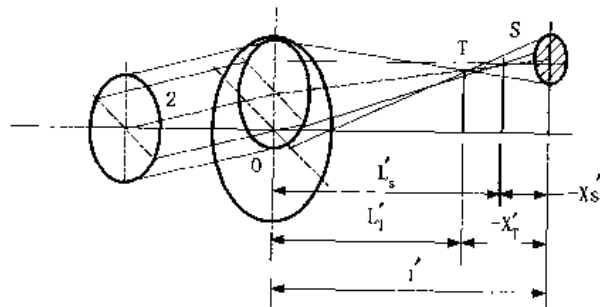


图 2-9 (b) 宽光束场曲

(2) 弧矢场曲 (sagittal curvature of field) 用细光束弧矢场曲和宽光束弧矢场曲来度量。

弧矢细光束交点相对于理想像面的偏离, 称为细光束弧矢场曲。用符号 x'_s 表示, 见图 2-9 (a):

$$x'_s = l'_s - l' \quad (2-4a)$$

弧矢宽光束交点相对于理想像面的偏差, 称为宽光束弧矢场曲。用符号 X'_s 表示, 见图 2-9 (b):

$$X'_s = L'_s - l' \quad (2-4b)$$

细光束弧矢场曲与宽光束弧矢场曲之差为轴外点弧矢球差。

当光学系统不存在像散 (即子午像与弧矢像重合) 时, 垂直于光轴的一个物平面经实际光学系统后所得到的像面也不一定是与理想像面重合的平面。由于 t, s 的重合点随视场的增大偏离理想像面越严重, 所以仍形成一个曲面 (纯场曲)。

像散和场曲既有区别又有联系。有像散必然存在场曲, 但场曲存在时不一定有像散。像散值和像面弯曲值都是对某一视场而言的。

光学系统存在场曲时, 不能使一个较大的平面物体上的各点同时在同一像面上成清晰像。若按中心调焦, 中心清晰, 边缘则模糊; 反之, 边缘调清晰了, 中心又模糊。

§2.2.4 畸变 (distortion)

畸变是横向 (垂轴) 放大率随视场的增大而变化, 所引起一种失去物像相似的像差。由于畸变的存在使物平面内轴外直线形成曲线像。畸变分枕形畸变和桶形畸变。枕形畸变 (pin-cushion distortion) 又称正畸变, 即垂轴放大率随视场角的增大而增大的畸变, 它使对称于光轴的正方形物体像呈枕形。桶形畸变 (barrel distortion) 又称负畸变, 即垂轴放大率随视场角的增大而减少的畸变, 它使对称于光轴的正方形物体像呈现桶形。

例如, 垂直于光轴的方格子, 由于光学系统存在畸变, 将形成一个变形的格子像。见图 2-10。

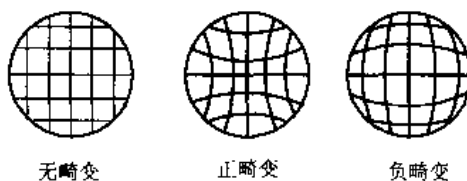


图 2-10 畸变

用符号 $\delta y'_t$ 表示光学系统的线畸变:

$$\delta y'_t = y'_t - y'$$

式中, y'_t 是实际主光线决定的像高, y' 是理想像高。

线畸变 $\delta y'_t$ 与理想像高 y' 的百分比称相对畸变 (relative distortion), 用符号 q 表示, 则

$$q = \frac{\delta y'_t}{y'} \times 100\%$$

畸变与其他像差不同, 它仅由主光线的光路决定, 引起像的变形, 并不影响成像清晰度。对于一般光学系统, 只要眼睛感觉不出像的明显变形 (相当于 $q \approx 4\%$) 则无碍。对十字叉丝成像系统 (如目镜), 由于中心在光轴上, 畸变不会引起十字叉丝像的弯曲, 是可以允许

的。但对某些利用像的大小或轮廓以测定物大小或轮廓的光学系统，如印刷制版专业技术的制版物镜，在复制地图时，畸变则是不允许的严重缺陷。对于计量仪器中的投影物镜、航空测量物镜等，畸变是十分有害的，它直接影响测量精度，必须予以校正。

对于结构完全对称的光学系统，若以-1 倍的放大率成像，所有垂轴像差都能自动消除，畸变是一种垂轴像差，也能自然地消除。单个薄透镜或薄透镜组，当孔径光阑与之重合时，也不产生畸变。这是因为此时主光线通过主点，沿理想方向射出之故。但是单个光组不可能很薄，因此实际上还有小畸变。由此推知，当光阑位于单透镜组之前或之后时即产生畸变，且两种情况的畸变符号相反，如图 2-11 所示。由此，制版物镜的光圈置于诸透镜的中间，能较好地校正畸变。

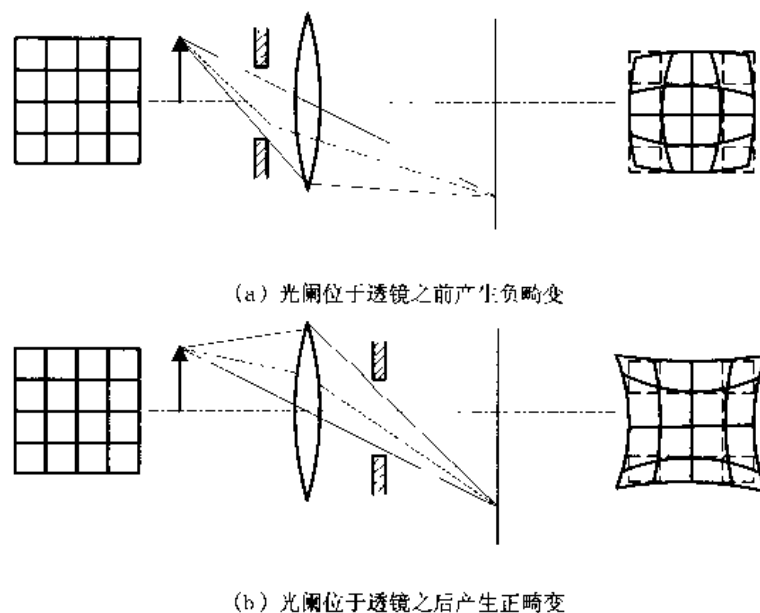


图 2-11 光阑位置对畸变的影响

§2.2.5 色差 (chromatic aberration)

前面所述是各种单色光像差。光学系统大多是白光成像。白光是由各种不同波长（颜色）的单色光组成的。光学材料对不同波长的色光折射率不同，白光经光学系统第一表面折射后，各种色光被分开，在光学系统内以各自的光路传播，造成各色光之间成像位置和大小差异，在像面上形成彩色的弥散圆。复色光成像时，由于不同色光而引起的像差称色差。

色差有纵向色差 (congitudinal chromatic aberration) (又称轴向色差或位置色差) 和横向色差 (lateral chromatic aberration) (又称垂轴色差或倍率色差) 两种，分述如下。

1. 轴向色差——沿光轴量度的色差

白光由各单色光组成，波长愈短折射率愈大。由薄透镜的焦距公式 $(1/f' = (n-1)[(1/r_1) - (1/r_2)])$ 可知，同一薄透镜对不同色光有不同焦距。当透镜对于一定物距 l 成像时，由于各色光的焦距不同，高斯公式可求得不同的 l' 值。按色光的波长由短到长，它们的像点离开透镜由近到远地排列在光轴上，这种现象称为轴向色差。在近轴区，轴向色差同样存在。如图 2-12 所示，若 A 点发出白光，经光学系统折射后，不同色光在像空间光轴上形成位置不同的像点。红光 (C 光) 像点 A'_C 因折射率小，离光学系统最后一个镜面最远，蓝光 (F

光) 像点 A'_F 最近, 黄绿光 (D 光) 像点 A'_D 居中。用光屏分别在 1、2、3 三个位置观察, 在位置 1 屏上呈现镶有红环的蓝色弥散圆。光屏置于位置 3 则为镶蓝环的红色弥散圆。无论哪个位置均不能得到物点 A 的白光像点。

令两色像点 A'_F 和 A'_C 相对于光学系统最后一面的距离为 l'_F 和 l'_C , 则轴向色差 $\Delta l'_{FC}$ 定义为:

$$\Delta l'_{FC} = l'_F - l'_C \quad (2-5)$$

如图 2-12 示, $\Delta l'_{FC} < 0$, 称为色差校正不足; 反之 $\Delta l'_{FC} > 0$, 称为色差校正过度。若 A'_F 和 A'_C 重合, 则 $\Delta l'_{FC} = 0$, 称为光学系统对 F 光和 C 光消色差。消色差系统, 是指对两种色光消轴向色差的系统。

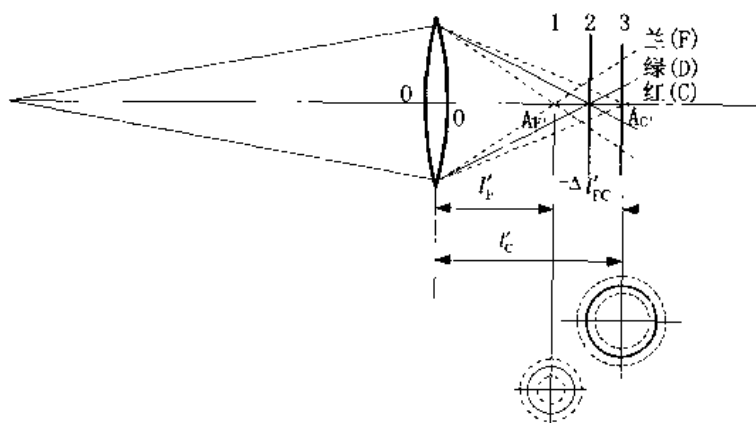


图 2-12 轴向色差

2. 垂轴色差——沿垂轴方向量度的色差

由于光学材料对不同色光的折射率不同, 因而使光学系统对不同色光有不同的焦距。由式 $\beta = -x'/f'$ 知: 不同色光的焦距不等时, 放大率也不等, 因而有不同的像高, 这就是倍率色差, 如图 2-13 所示。图中, 轴外点 B 发出的白光, 经有色差的光学系统后, 不同色光具有不同的像高, y'_{zC} 、 y'_{zD} 、 y'_{zF} 分别是红光、黄绿光、蓝光在理想像面上的像高。其叠加的结果使像的边缘呈现彩色。

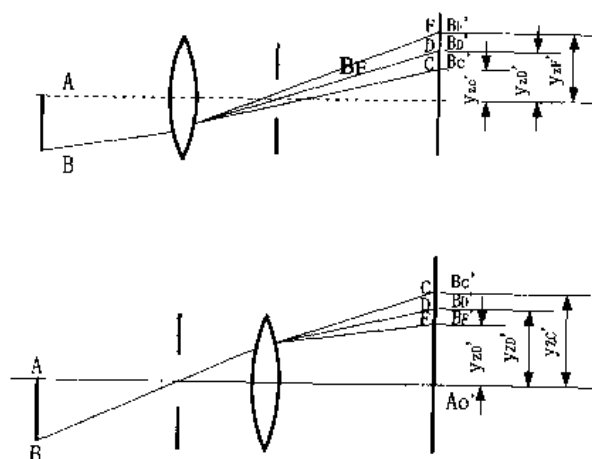


图 2-13 垂轴色差

光学系统的垂轴色差是以两种色光的主光线在高斯面上的交点高度之差度量的，以 $\Delta y'_{FC}$ 表示，即：

$$\Delta y'_{FC} = y'_{ZF} - y'_{ZC} \quad (2-6)$$

垂轴色差使物体像的边缘呈现颜色，影响成像清晰度。

3. 二级光谱 (secondary spectrum)

在像差中，光学系统对于两种色光（如 C 光和 F 光）校正了轴向色差，相对于第三种色光之间的剩余色差称为二级光谱。

在光栅光谱中，当衍射角使两条相邻光线的光程差为 2λ 时的谱线也称为二级光谱，即光栅方程

$$d (\sin i \pm \sin m\theta) = m\lambda \quad (2-7)$$

中 $m=2$ 时的光谱。

当光学系统的像质要求很高时或光学系统焦距很长时，二级光谱对光学系统的成像质量有较大影响，必须予以校正。印刷技术的制版物镜，需要进行照相分色。将彩色原稿通过红、绿、蓝紫、黄等滤光片分别摄制 4 张底版，图像需严格套准，这就要求制版物镜有优良的二级光谱校正。长焦距的航空相机、卫星相机的透射式光学系统，二级光谱必须得到良好的校正。这种对三种及三种以上色光校正位置色差或显著减小了二级光谱的光学系统，称为复消色差物镜。

§ 2.3 薄透镜的初级像差理论

§2.3.1 薄透镜的初级像差普遍公式

依据像差理论，可以导出给出共轴球面光组的初级像差系数为：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{球差和数} & S_I = \sum hn'i'(i' - u)(i - i') \\ \text{弧矢彗差和数} & S_{II} = \sum S_I \frac{i'_p}{i'} \\ \text{像散和数} & S_{III} = \sum S_I \left(\frac{i'_p}{i'}\right)^2 \\ \text{像弯和数} & S_{IV} = \sum \frac{n' - n}{nn'r} J^2 \\ \text{畸变和数} & S_V = \sum (S_{III} + S_{IV}) \frac{i'_p}{i'} \\ \text{位置色差和数} & S_{IC} = \sum hn'i' \left(\frac{\sigma n'}{n'} - \frac{\sigma n}{n} \right) \\ \text{倍率色差和数} & S_{IIC} = \sum C_I \frac{i'_p}{i'} \end{array} \right. \quad (2-8)$$

式 (2-8) 可以用来计算分析一个已知共轴球面光学系统的初级像差。但在实际应用中，我们经常使用的是薄透镜系统的初级像差公式。所谓薄透镜系统，是指整个系统由若干个厚度和间隔可以忽略的薄透镜组成。绝大多数实际光学系统透镜的厚度相对焦距而言并不很大，可近似地看成薄透镜系统，用薄透镜初级像差公式得出的像差和结构参数的关系比一般的初级像差公式更接近实际，因此薄透镜系统的初级像差理论更具有实际的指导意义。

下面，我们给出薄透镜系统的初级像差系数普遍式：

$$\begin{cases} S_I = \sum hP & (i) \\ S_{II} = \sum h_p P - J \sum W & (ii) \\ S_{III} = \sum \frac{h_p^2}{h} P - 2J \sum \frac{h_p}{h} W + J^2 \sum \varphi & (iii) \\ S_{IV} = J^2 \sum \frac{\varphi}{h} & (iv) \\ S_V = \sum \frac{h_p^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_p^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{h_p}{h} \varphi (3 + \frac{1}{n}) & (v) \\ S_{IC} = \sum h^2 C & (vi) \\ S_{IIC} = \sum h_p h C & (vii) \end{cases} \quad (2-9)$$

式(2-9)是薄透镜光组初级像差系数的普遍式，无论对单片、多片、密接、非密接都适用，其中符号意义如下：

$$P = \sum_1^k \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n} \quad (2-10)$$

$$W = \sum_1^k \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right) \Delta \frac{u}{n} \quad (2-11)$$

J 为拉赫不变量， $J = nuy = n'u'y'$ ；

h 为轴上点近轴光的投射高，见图 2-14；

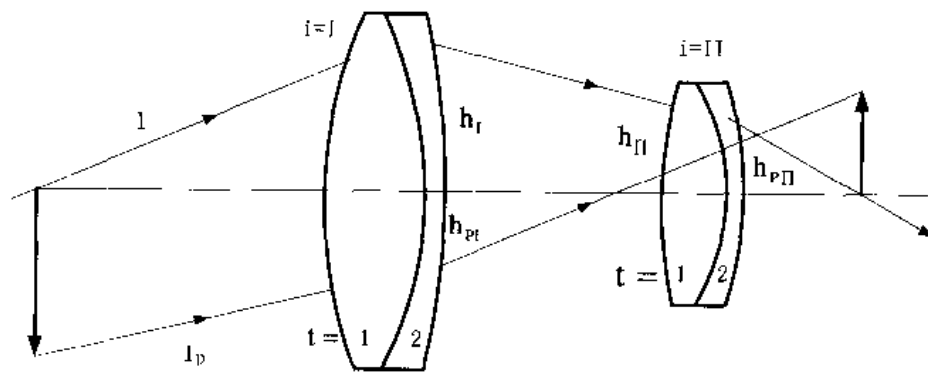


图 2-14 由两个薄透镜组成的薄透镜系统

h_p 为近轴主光线的投射高；

φ 为薄透镜光焦度（焦距的倒数）；

$C = \sum (\varphi/v)$ 。

§ 2.3.2 由薄透镜初级像差普遍公式引出的重要结论

由式(2-9)引出了一些有实用意义的重要结论，下面展开阐述。

(1) 在式 (2-9) 中 h 、 h_p 、 φ 等数值已经由整体设计的轮廓尺寸所决定。当 h 、 h_p 、 φ 等已确定后, 薄透镜光组的全部单色初级像差 ($S_I \sim S_V$) 仅仅取决于 P 、 W 、 $\sum \frac{\varphi}{n}$ 三个量。换言之, 只要抓住了 P 、 W 、 $\sum \frac{\varphi}{n}$ 三个量, 也就抓住了薄透镜光组的全部单色像差。大多数光学材料的折射率 $n=1.5 \sim 1.7$, 对于密接薄透镜光组, 其 $\sum \frac{\varphi_i}{n_i}$ 可以近似地取为 $\frac{\sum \varphi_i}{n_{\text{平均}}} = \frac{\varphi}{n_{\text{平均}}} = (0.6 \sim 0.7) \varphi$, 亦即 $\Sigma (1/n)$ 为一常数 ($\approx 0.6 \sim 0.7$)。于是, 可进一步近似认为薄透镜光组的全部单色初级像差 ($S_I \sim S_V$) 仅仅取决于 P 、 W 两个量。换言之, 只要抓住了 P 、 W 两个量, 就抓住了薄透镜光组的全部单色初级像差。

这一结论是很重要的, 而且有实用意义。过去, 我们研究像差规律时, 需要研究 S_I 到 S_V 五个数值; 现在引入 P 、 W 后, 只要抓住了两个量 P 、 W 就能说明全部五种单色像差。由五个减为两个, 当然更有利于找出像差与结构参数 (n , r) 的内在联系了。

(2) 从式 (2-9) 的 (vi) (vii) 式可见, 当 $h \cdot h_p$ 等等已定后, 两种色差仅仅取决于 C 。

(3) 综合上述两个结论得, 当 h 、 h_p 、 φ 等轮廓尺寸已定后, 全部七种初级像差仅仅取决于 P 、 W 、 C 三个量。值得指出, 引入了新的符号 P 、 W , 可作如下的理解, 以便熟悉它们的含义。例如, 在式 (2-9) 中 $S_I = \Sigma hP$, 故 P 就代表光组的球差系数, 它和 S_I 只差一个 h 的关系。当光组的口径 h 已定后, P 大, 就表示球差 S_I 大; $P=0$, 则 $S_I=0$ 。

再如式 (2-9) 的 (ii) 式, 若光在某一密接薄镜组 i 处, 则该组 $h_{pi}=0$, 如图 2-15 所示。此时该组的 $S_{II} = -Jw_i$ 。换言之, W 代表第 i 组的彗差 S_{II} , 两者是一回事, 只是差一个 J 的关系。

当然, 如果光阑不在该组处 (例如图 2-15 之第 $i+1$ 组), 则 $i+1$ 组的 S_{II} 不仅取决于 W , 还和 P 有关, 亦即须由 P 和 W 合起来构成 $i+1$ 组的 S_{II} 。

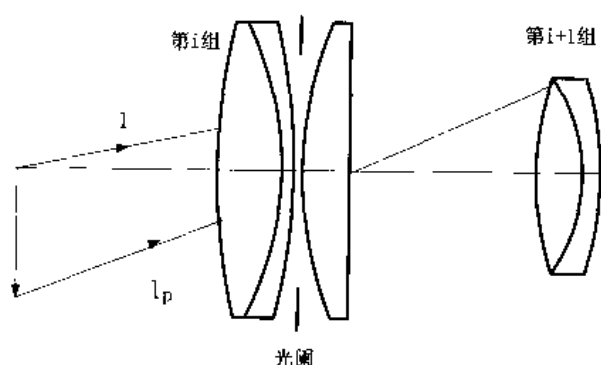


图 2-15 两薄透镜组的像差和数分析

(4) 若光阑位于某一密接薄镜组 i 处 (仍见图 2-15), $h_{pi}=0$, 则第 i 组的初级像差可由式 (2-9) 简化如下。

光阑在密接薄镜处时,

$$\begin{cases} S_I = hp \\ S_{II} = -Jw \\ S_{III} = J^2\varphi \\ S_{IV} = J^2 \sum \frac{\varphi}{n} \\ S_V = 0 \\ S_{IC} = \sum h^2 C \\ S_{IIC} = 0 \end{cases} \quad (2-12)$$

式(2-12)是有实用意义的。从式(2-12)可见,当光阑位于某密接薄镜组本身处时,该组的畸变为零,倍率色差为零(不管视场多大);不管该组的其他像差(球差、彗差等)为何值,该组的像散 S_{III} 必定为定值($S_{III} = J^2\varphi$),场曲 S_{IV} 也永为定值。所以,对于光阑位于物镜本身处的双胶合望远物镜,不管镜头如何“弯曲”,总不能消除像散和场曲,这是限制普通望远物镜视场不能增大的主要像差。

(5) 从式(2-9)还可以看到,对于某一密接薄镜组 i ,若该密接组已消除球差、彗差(即 $S_I=0$, $S_{II}=0$ 或 $P=0$, $W=0$),则不管光阑位置在何处,像散 S_{III} 都为定值, $S_{IV} = J^2 \frac{\varphi}{n}$,不能消除。

(6) 若该密接组已消除轴向色差,即 $S_{IC}=0$,则不管光阑的位置在何处,其倍率色差 S_{IIC} 必为零。

§ 2.3.3 规化条件下的双胶合透镜组的色差

由式(2-9)知,薄透镜的两种初级色差为:

$$\begin{aligned} S_{IC} &= \sum h^2 C = \sum h^2 \frac{\varphi}{v} \\ S_{IIC} &= \sum hh_p C \end{aligned}$$

把上面的公式应用于双胶合物镜(或密接双分离),为使问题简化,取规化条件 $h=1$, $\varphi=1$,得如下联合方程组

$$\begin{cases} C = \frac{\varphi_a}{v_a} + \frac{\varphi_b}{v_b} \\ \varphi_a + \varphi_b = \varphi_{\text{合}} = 1 \end{cases} \quad (2-13)$$

解此方程组,得密接双胶合物镜消色差条件为:

$$\begin{cases} \varphi_a = \frac{v_a(1-Cv_b)}{v_a-v_b} \\ \varphi_b = \frac{-v_b(1-Cv_a)}{v_a-v_b} \end{cases} \quad (2-14)$$

式中, C 为双胶合物镜所要达到的消色差状况,它可以等于零或某个值。

§2.4 反射光学系统和平面光学系统的像差理论

§2.4.1 平面反射镜像差

平面反射和棱镜相比,主要优点是重量轻;缺点是易变形。大口径的反射面由于棱镜

材料困难，多用平面反射镜。

人们在实践中，早就发现当平面反射镜本身没有误差时（即理想的平面时）不产生任何像差；后来，当总结出初级像差理论后，理论分析的结果也说明如此。

在图 2-16 中， $u = -i = -u' = i'$ ，从公式（2-8）可知， $S_I = hn'i'(i' - u)(i - i')$ 中 $(i' - u) = 0$ 。

$$S_{II} = S_I \frac{i'_p}{i'} = 0$$

$$S_{III} = S_I \left(\frac{i'_p}{i'} \right)^2 = 0$$

$$S_{IV} = \frac{J^2(n' - n)}{nn'r} = 0 \quad (\text{因 } r = \infty)$$

$$S_V = (S_{III} + S_{IV}) \frac{i'_p}{i} = 0$$

反射面不产生色差，因为色差是由于各种色光的折射率 n_c 、 n_F 不同而引起的，而反射面没有折射。

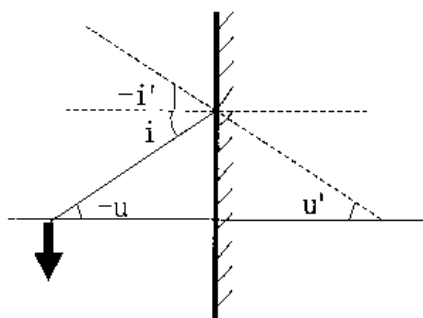


图 2-16 平面反射镜

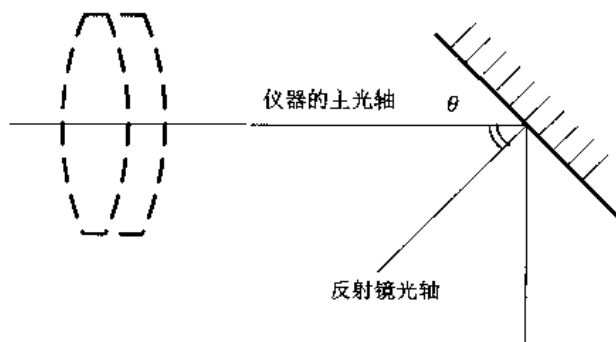


图 2-17 加工或装配误差使平面反射系统产生误差

可见，平面反射镜不产生任何初级像差，从实际光线光路不难直观地看出，此时实际像差也是零。但是由于加工或装配误差，使平面反射镜的反射面不是理想的平面而带有一定的曲率时，则这些曲率将造成单色像差。此时，若整个光组的主光轴和平面反射镜的光轴（即反射面的法线）有一夹角 θ （见图 2-17，这是仪器中常见的情况），则将产生单色像差，其中较显著的是像散。由于存在夹角 θ ，物镜的轴上物点对于反射镜来说已是轴外物点，故轴上物点就有像散。应用可检查像散的方法来控制平面度质量。

§ 2.4.2 球面反射镜的像差

球面反射镜的主要优点是不产生色差。在同样的焦距时球面反射镜的曲率比透镜平缓，故产生的球差较小（与同样的相对口径和焦距的单透镜相比，球面反射镜的球差约为单透镜的几分之一）。

当球面反射镜与正透镜组合在一起时，两者的场曲反号，有利于抵消透镜组的正场曲；反射镜的光能损失比折射透镜小（一般光学材料对紫外，红外波段的吸收很厉害，有的甚至基本上通不过）。反射使光路反向，故利用折射和反射镜的组合（所谓“折反射系统”）能使仪器的筒长缩短，结构紧凑。

球面反射镜广泛地应用在大口径，长焦距的望远物镜、照相物镜中。

球面反射镜的缺点是：反射后光线要反向，这就必然使光线产生中心遮拦，且带有杂光。例如，若球面反光镜的半径为 r （见图 2-18），其焦距 $f' = \frac{r}{2}$ ，对于无穷远物体 $i = \frac{h}{r} = -i'$, $n = -n' = 1$ ，于是，

$$\left\{ \begin{array}{l} S_I = hn'i'(i'-u)(i-i') = -\frac{2h^4}{r^3} \\ S_{II} = S_I \frac{i'_p}{i'} = \frac{2h^3 i'_p}{r^2} \\ S_{III} = S_I \left(\frac{i'_p}{i'} \right)^2 = \frac{2h^2 i_p'^2}{r} \\ S_{IV} = J^2 \frac{n'-n}{hn'r} = \frac{2j^2}{r} \\ S_V = (S_{III} + S_{IV}) \frac{i'_p}{i'} \\ S_{IC} = S_{IIc} = 0 \end{array} \right. \quad (2-15)$$

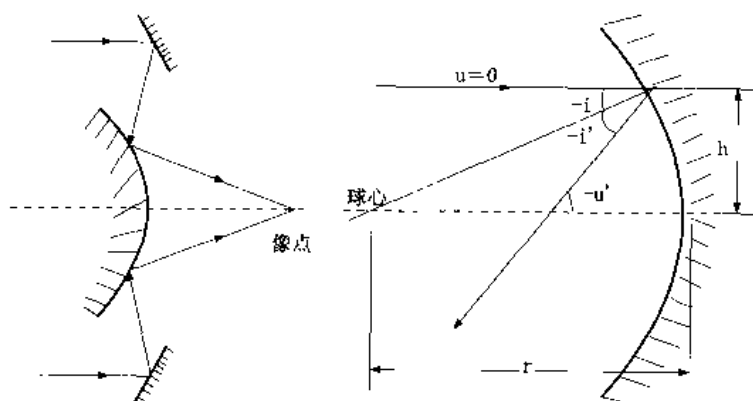


图 2-18 球面反射镜

当物在无穷远，且光阑在球心时（见图 2-19）， $i'_p = 0$ ，则上面各式中，

$$S_{II} = S_{III} = S_V = 0$$

即没有彗差、像散、畸变。当光阑在球面顶点处时（见图 2-20）， $S_V = 0$ ，畸变为零。

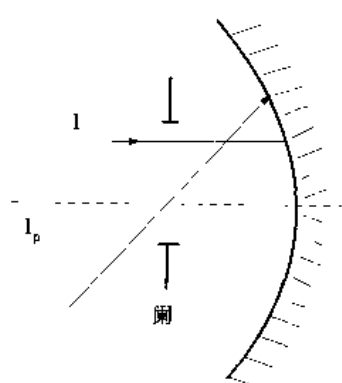


图 2-19 光阑在反射镜球心时

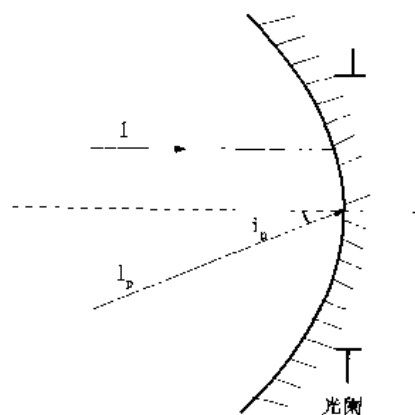


图 2-20 光阑在反射镜顶点

§ 2.4.3 棱镜或平面平行板的像差

下面讨论的是使光路转折、倒像或分光等用的棱镜，它们的共同特点是可以展开成平面平行板。像差情况全同于平行板，至于光谱仪中的分光折射棱镜（不能展开成平行板者）的像差情况，此处暂不分析。

棱镜（平面平行板）的初级像差可以用 l 、 l_p 的追迹求出，这是一种比较直观的方法，但比较麻烦；另一种方法是用下列公式计算，这些公式的实质和 l 、 l_p 的追迹完全相同，只是进一步简化而已，但直观性较差。

(1) 棱镜的初级像差系数（式中符号的含义见图 2-21）。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_I = \frac{d(1-n^2)u_1^4}{n^3} \\ S_{II} = S_I \left(\frac{u_{p1}}{u_1} \right) \\ S_{III} = S_I \left(\frac{u_{p1}}{u_1} \right)^2 \\ S_{IV} = 0 \\ S_V = S_I \left(\frac{u_{p1}}{u_1} \right)^3 \\ S_{IC} = -\frac{d}{v} \frac{n-1}{n^2} u_1^2 \\ S_{IIC} = S_{IC} \left(\frac{u_{p1}}{u_1} \right) \end{array} \right. \quad (2-16)$$

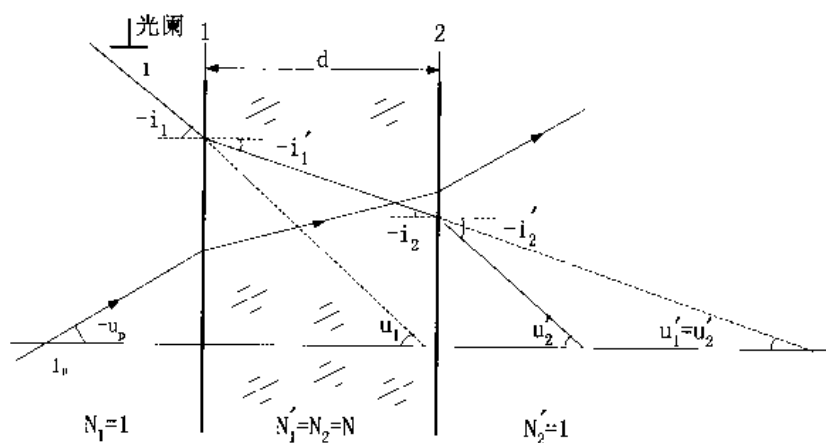


图 2-21 棱镜初级像差和数

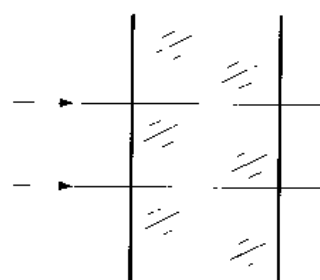


图 2-22 平行光路中棱镜

有些棱镜是对无穷远物体成像（换言之，放在平行光路中的棱镜），例如测距仪管子两端位于物镜之前的五角棱镜（见图 2-22）物距 $l = \infty$ ，因此

$$u_1 = i_1 = i'_1 = u'_1 = u_2 = i_2 = u'_2 = 0$$

此时，不管光阑在何处，式 (2-16) 成为

$$\begin{cases} S_I = 0 \\ S_{II} = 0 \\ S_{III} = 0 \\ S_{IV} = 0 \\ S_V = 0 \\ S_{Ic} = 0 \\ S_{IIc} = 0 \end{cases}$$

即在平行光路中的棱镜（对无穷远物体成像的棱镜）不产生任何像差。

大多数棱镜是在非平行光路中。例如，图 2-23 所示的棱镜位于物镜后面的会聚光路中，此时棱镜虽然产生式（2-16）造成的各种像差，但棱镜所产生的球差、色差、像散等，正好与物镜未消像差时原有的像差反号，亦即棱镜能抵消一部分物镜原有的像差，对设计有利。当然，在设计带有棱镜的光组时，应该预先估计出棱镜的像差，以便和镜头的其余部分互相抵消。

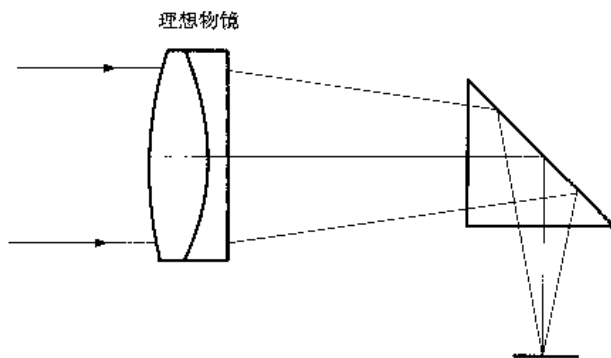


图 2-23 非平行光路中的棱镜

从式 2-16 还可见，当厚度 d 越大时，产生像差的绝对值越大。所以，对分划板等薄玻璃板零件由于 $d \approx 0$ ，产生的像差小可以忽略不计（但当 u 角特大时，薄玻璃板产生的像差也相当大），而对于 d 较大的棱镜，则必须预先估算出棱镜本身产生的像差，以与光路中其余部分抵消。

§ 2.4.4 场镜的像差

场镜（field lens）指位于光学系统中间像面或像面附近的透镜。

从光线光路的观点来看，大多数的场镜的作用是使轴外光线偏折，使前方光组的出瞳与后方光组的入瞳相衔接，起调节出入瞳位置的作用，这样可缩小后方光组横向尺寸并改善像质，场镜通常由单片透镜组成，物（像）距 $= 0$ ，场镜的 $S_I = S_{II} = S_{III} = C_I = C_{II} = 0$ ，只产生场曲和畸变。

当场镜不与物（像）面完全重合时，将产生微量的 S_I 等，但数值不大，某些目镜的“向场镜”就属于这一类；另一类负场镜的作用是放在像面附近，由于 h 很小，它对折光的影响很小，却能产生较大的负 S_{IV} 来校正整个光组的场曲，这类场镜也称“平场曲透镜”。个别望远系统中的负场镜也可以起到加大出瞳距离的作用。

§ 2.5 厚透镜初级像差

透镜的厚度，有的是由于保证透镜外圆不变尖出于强度或保证加工不变形而加入的。此时，一般情况下厚度 d 相对于 r 和 f' 等要小得多，对于物像关系和像差的影响可以忽略不计。所以在初步设计阶段为了简化，可以把透镜的厚度 d 暂不考虑，这就是前面所讨论的薄透镜像差。有时，为了达到消像差目的而故意把透镜做得很厚，把这类透镜称为“厚透镜”。本节就分析“厚透镜”的消像差作用。

§ 2.5.1 厚透镜焦距的求法

前已知，单片薄透镜的焦距为：

$$\varphi_{\text{薄}} = \frac{1}{f'_{\text{薄}}} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (2-17)$$

而单片厚透镜的焦距为：

$$\varphi_{\text{厚}} = \frac{1}{f'_{\text{厚}}} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2}{n} \cdot d \cdot \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2} \quad (2-18)$$

其中 n 为厚透镜玻璃的折射率， d 为厚透镜的中心厚度。当厚度 $d=0$ 时，式 (2-18) 即转化成为式 (2-17)。鼓形厚透镜见图 2-24 (a)。

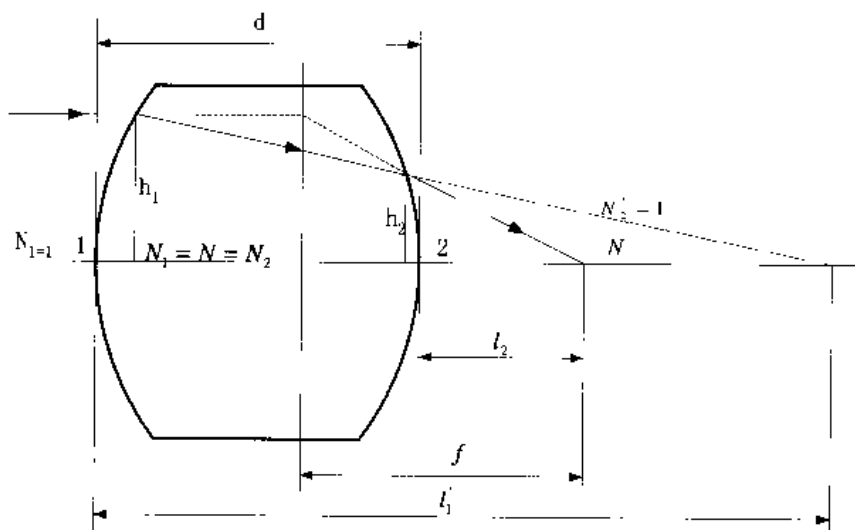


图 2-24 (a) 鼓形厚透镜

§ 2.5.2 利用弯月形厚透镜消场曲 S_{IV}

对于密接的薄透镜光组，

$$S_{IV} = J \sum \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = J^2 \cdot \sum \frac{\varphi_{\text{薄}}}{n} = J^2 (0.6 \sim 0.7) \varphi_{\text{总}} \quad (2-19)$$

所以，对于 $\varphi_{\text{总}} \neq 0$ 的密接薄透镜光组，其场曲总不能消除，不管物距和光阑位置在何处，也不管弯曲形状如何， $\varphi_{\text{总}} \neq 0$ 的密接薄透镜组的 $S_{IV\text{总}} \neq 0$ ；若 $f'_{\text{薄}}$ = 正值（即 $\varphi_{\text{总}}$ = 正值），则场曲 S_{IV} 必为正；若 $f'_{\text{薄}}$ = 负值（即 $\varphi_{\text{总}}$ = 负值），则场曲 S_{IV} 必为负。

采用图 2-24 (b) 所示的弯月形厚透镜，则可以在保证正焦距值的条件下，使 $S_{IV}=0$ 或

等于负值。

图 2-24 (b) 所示的 r_1 、 r_2 全为正值。

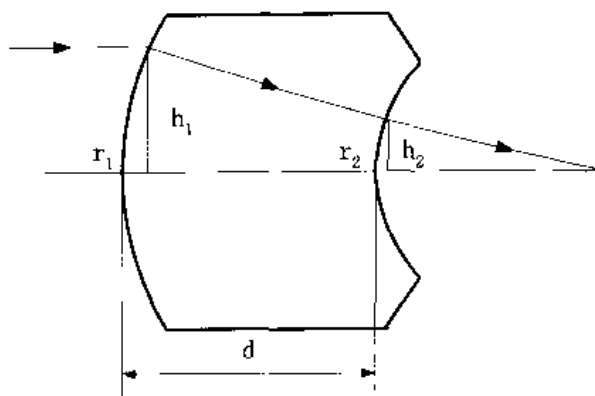


图 2-24 (b) 弯月厚透镜

设 $r_1 > r_2$ 这样两个 r_1 、 r_2 在薄透镜中, $\varphi_{\text{薄}}$ 必为负, 而在厚透镜中则不然, $\varphi_{\text{总}}$ 可能为正。因为从式 (2-18) 可见:

$$\varphi_{\text{厚}} = \frac{1}{f'_{\text{厚}}} = \underbrace{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}_{\text{第一项}} + \underbrace{\frac{(n-1)^2}{n} \cdot d \cdot \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2}}_{\text{第二项}}$$

其中 $(n-1)$ 必为正值, 当 $r_1 > r_2$ 时, 第一项必为负值, 但第二项为正值。当 d 足够大时, 有可能使 $\varphi_{\text{厚}} = 1/f'_{\text{厚}}$ 为正值。我们可以把厚透镜看成是两个薄透镜中间夹一块平板玻璃组合而成。平板玻璃由于两个表面的曲率均为零, 所以光焦度 $\varphi = 0$, 没有场曲, 所以厚透镜的场曲就相当于两个分离薄透镜的场曲。使用公式 $S_{\text{IV}} = J^2 \cdot \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$, 其中 J^2 必为正值。当

$r_1 > r_2$ 时, S_{IV} 得负值; 当 $r_1 = r_2$ 时, $S_{\text{IV}} = 0$ 。

于是, 采用弯月形厚透镜, 有可能使 f' (或 φ) 为正值, 而 S_{IV} 为零或负值。

[实例] 分步相机中有一块镜片, $r_1 = 40 \text{ mm}$, $r_2 = 30 \text{ mm}$, $n = 1.622$, 当 $d = 0$ 时 (薄透镜),

$$\varphi_{\text{薄}} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = -0.00516$$

$$f'_{\text{薄}} = -194 \text{ mm}$$

当 $d = 28 \text{ mm}$ 时 (厚透镜), 由式 (2-18) 得

$$\varphi_{\text{厚}} = \text{第一项} + \text{第二项} = -0.0516 + 0.00556 = 0.00040$$

故 $f'_{\text{厚}} = 2500 \text{ mm}$ 。

此厚透镜 $S_{\text{IV}} = J^2 \cdot \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$, $J = ynu$ 。若 $y = 28$, $u = -0.0588$, 则 $S_{\text{IV}} = -0.0068$ 。

分步相机物镜就利用这样一块弯月形厚透镜来消除 S_{IV} 。这种弯月形厚透镜广泛应用于需要消场曲的物镜和广角目镜中。

为要得一块 $f' = 2500 \text{ mm}$ 的薄透镜 ($n = 1.662$), 可令 $r_1 = 3110 \text{ mm}$, $r_2 = -3110 \text{ mm}$, 此时 $f'_{\text{薄}}$ 也等于 2500 mm , 但比较厚、薄两块透镜可见: 同样是 $f'_{\text{薄}} = 2500 \text{ mm}$, 薄透镜为 $S_{\text{IV}} = +0.00067$, 而弯月形厚透镜 $S_{\text{IV}} = -0.00067$, 即厚透镜不仅产生正光焦度, 还能产生大

量的负 S_{IV} ，可用来消除光组中其余部份的正 S_{IV} 。透镜愈厚，弯月形厚透镜消场曲的作用越强，在许多镜头中都利用弯月厚透镜的这一特性来消场曲。

§ 2.5.3 分析消场曲的弯月形厚透镜的其余像差 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IC}

在通常情况下，消场曲的弯月形厚透镜不能消 S_I ，也不能消 S_{II} 。但是，靠光阑位置（即选择适当的 l_p 值，可以消除 S_{III} （见图 2-25）。

关于弯月形厚透镜的各种像差规律及其设计方法，国内外学者做过相关的研究，并把这些规律编成表格的形式备查。参考这些表格可少走弯路。（“厚透镜表”见附件光盘）

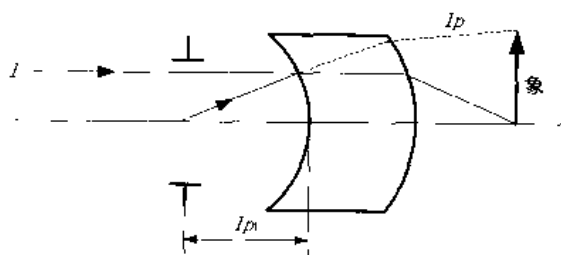


图 2-25 弯月厚透镜消 S_{III}

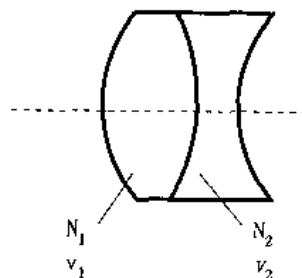


图 2-26 等折射率 v 不等的胶合面

弯月形厚透镜将产生轴向色差，为消除色差，可在其中加一个等折射率，不等 v 值的胶合面（ $n_1 \neq n_2$ ， $v_1 = v_2$ ），图 2-26 所示的胶合面对单色像差不起作用，只消除色差。

§ 2.5.4 远双分离正负薄透镜组消场曲

为了分析方便，我们把正、负薄透镜简化为两块分离较远的正、负薄透镜见图 2-27，也能在保证一定的正 f' 的条件下消除场曲 S_{IV} 。

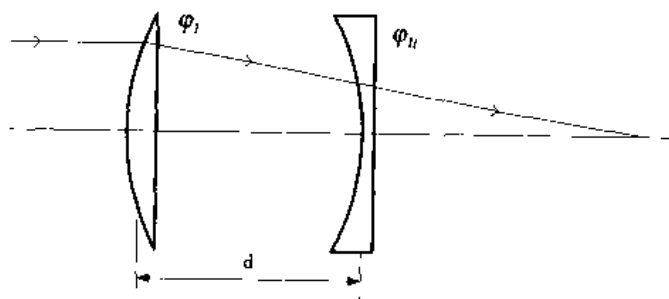


图 2-27 远双分离正负组消场曲

两块正、负薄透镜的合成焦距

$$\varphi_{\text{合}} = \varphi_I - \varphi_{II} - d\varphi_I\varphi_{II} \quad (2-20)$$

其中 φ_I 为正， φ_{II} 为负， d 为正值。如果让 φ_{II} 的绝对值 $|\varphi_{II}|$ 稍稍大于 φ_I 或等于 φ_I ，则式（2-20）恰可得正值（即正 f' ），而此时合成之场曲 S_{IV} 为：

$$S_{IV} = J^2 \sum \frac{\varphi_i}{n} = J^2 (\varphi_I/n_I + \varphi_{II}/n_{II}) \quad (2-21)$$

故适当地选择 φ_I 、 φ_{II} 、 n_I 、 n_{II} ，能使式（2-21）之 $S_{IV} = 0$ 或为负数。

实际上，上述的分离较远的正负薄透镜，就等于一块弯月型厚透镜（见图 2-28）。一块弯月型厚透镜就相当于一块正透镜 I、一块负透镜 II，再加上一块厚平板玻璃。

三片型照相（或投影）物镜中就利用分离较远的正负薄透镜来消除 S_{IV} （见图 2-29）。

三片型中，左右半部基本对称。就其半部（图中阴影部分）来看，相当于正负分离的薄透镜，若半部 $S_{IV}=0$ 则合起来的 S_{IV} 也等于零。

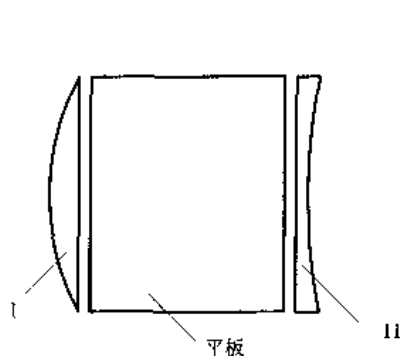


图 2-28 等效厚透镜

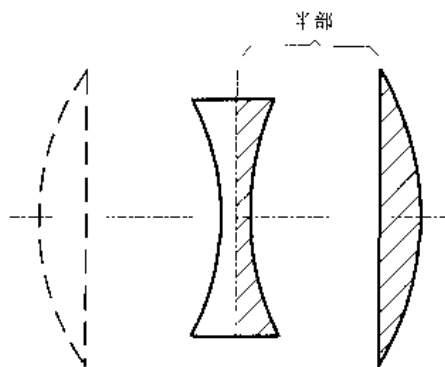


图 2-29 三片型照相物镜 S_{IV}

§ 2.5.5 用同心不晕弯月厚透镜消除球差、彗差及场曲

在某些消除场曲显微物镜（或称平像场显微物镜）中靠近物体的第一片镜片采用“同心不晕弯月厚透镜”（见图 2-30）。

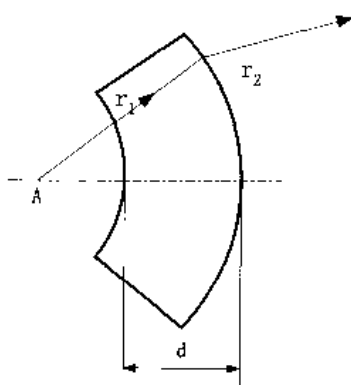


图 2-30 同心不晕厚透镜

物点 A 位于 r_1 的球心，同时位于 r_2 的不晕点处，又可以利用厚度 d 来消除 S_{IV} 。于是 r_1 （同心面）不产生球差、彗差，但有像散。 r_1 、 r_2 （不晕面）不产生球差及彗差、像散，又消除 S_{IV} ，构成一个不产生球差、彗差和场曲的光学零件。至于它所产生的像散、轴上色差等，可由物镜的其余部分来消除。

§ 2.5.6 用弯月型厚透镜消除轴上点色差

单片薄透镜不能消除轴上点色差 $\sum C$ 。但单块弯月型厚透镜（也称马克苏托夫镜）有可能消除 $\sum C$ 。

由式 (2-18)，当 $\frac{d\phi}{dn}=0$ 时，得

$$\frac{r_1 - r_2}{d} = \frac{1 - n^2}{n^2} \quad (2-22)$$

当一块弯月厚透镜的 r_1 、 r_2 、 d 和 n 满足上式条件时，轴上点色差基本消除。

某例满足上述条件的弯月形厚透镜如下：

$$r_1 = -343 \text{ mm}, r_2 = -360 \text{ mm}, d \approx 28 \text{ mm}, n = 1.622$$

§ 2.5.7 鼓形透镜（双凸厚透镜）

在我国电影镜头设计人员所设计的短焦距摄影镜头中，曾采用了过去不多见的鼓形厚透镜，取得了较佳的效果。

利用透镜厚度作为像差校正的变量是早就被人们所注意到的，以弯月形厚透镜作为基本单元的光学系统被应用在各方面。由像差理论可以知道，当用这种光焦度分开的弯月型厚透镜代替正负分离的薄透镜组时，可使 S_{IV} 得到更充分的校正，或者说在校正相同的 S_{IV} 时可以

使结构更紧凑一些。

至于双凸型的所谓“鼓形透镜”，则不但不能像弯月形厚透镜那样可以校正 S_{IV} ，而且还比相同光焦度的薄透镜要大些。这对于特别需要校正 S_{IV} 的光学系统说来显然是一个缺点。正因为有这个缺点，它的一些优点也就被人们所忽视，而几乎很少有什么系统采用这种“鼓形透镜”作为基本单元。当用鼓形透镜代替薄透镜时，当 $u_{p前}$ 相等，且 $F = \frac{u_{p前}}{u'_{p前}}$ 也相等时，

显然含鼓透镜组的主光线所需要的通光口径要比无鼓透镜组的小，当然与此相应的高级像差也要小一些。某含鼓形透镜的系统前片的口径为 32 mm，筒长为 89 mm，而同类的英国柯克镜头前片口径为 55 mm，筒长约为 100 mm 就是很好的例证。

其次，由像差理论的观点，我们可以把这种“鼓形透镜”，看做是同两块平凸透镜夹一平行平板而成，如图 2-31 所示。

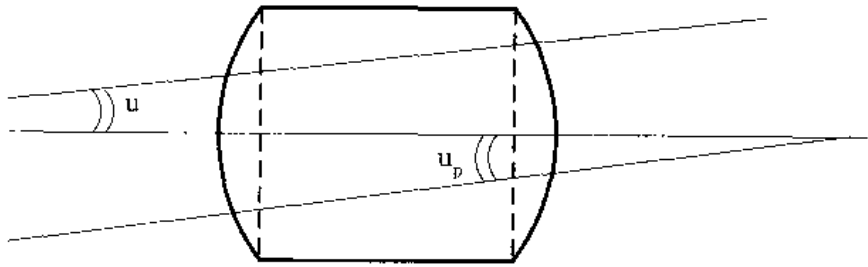


图 2-31 鼓形透镜像差分析

利用这种“鼓形透镜”设计了几个结果，如图 2-32、图 2-33 和图 2-34 所示。其结构都比参数相同的一些系统的结构要小一些。

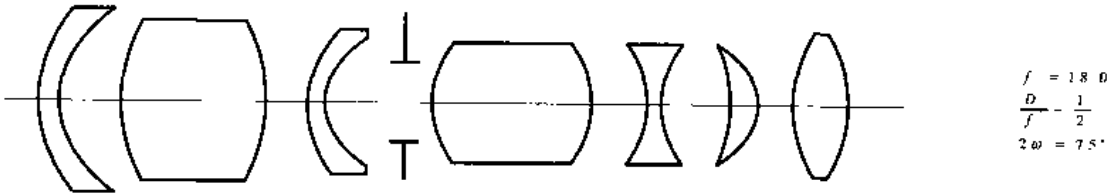


图 2-32 设计结果（一）

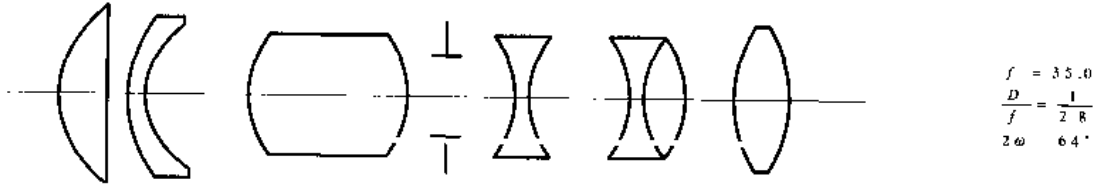


图 2-33 设计结果（二）

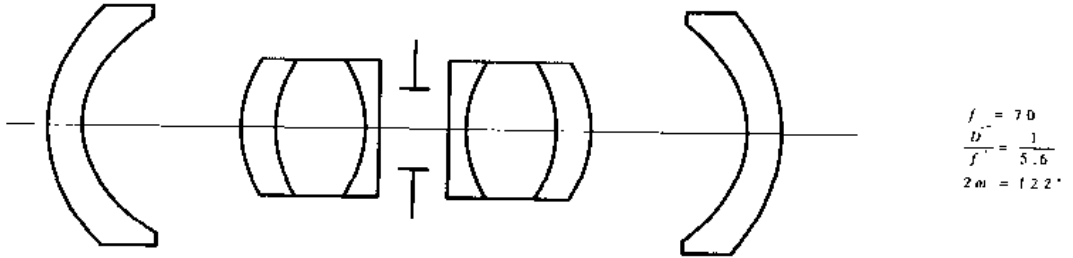


图 2-34 设计结果（三）

§ 2.6 全对称光学部件的像差

1. 全对称光学部件的结构特征

图 2-35 是全对称光学部件的示意图。全对称光学部件（光组）的结构特征如下：

- (1) 结构参数（ r 、 n 、 d ）对中心平面左右完全对称，即 $r_1 = -r_8$ ， $r_2 = -r_7$ ， $n_I = n_{IV}$ ， $n_{II} = n_{III}$ 等；
- (2) 物距和像距完全对称（即 $\beta = -1$ ）；
- (3) 光阑居正中。

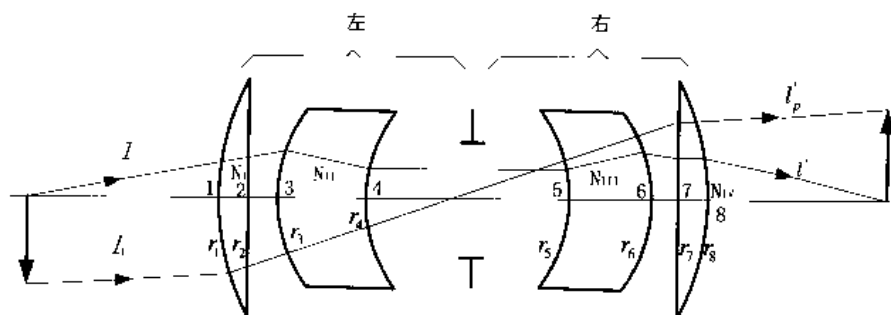


图 2-35 全对称光学部件成像分析

实际上， $\beta = -1$ 的用处不多。在其他倍数时，物、像距失去对称，不能满足上述条件(2)，但基本上仍保留一些“对称”的特性。

由图 2-35 可以看出，由于完全对称，左半部和右半部有下列对应关系：

$$i_{p1}/i_1 = i'_{p8}/i'_8 = -i_{p8}/i_8$$

$$i_{p2}/i_2 = i'_{p7}/i'_7 = -i_{p7}/i_7$$

以球差 S_I 为例，把上列对应关系代入初级像差公式中可得：

$$\sum S_{I左} = \sum hn'i'(i' - u)(i - i') = S_{I右}$$

故

$$S_{I合} = S_{I左} + S_{I右} = 2S_{I右}$$

式中 $S_{I左}$ 为左半部的球差系数， $S_{I合}$ 为左右两半部合成后整个光组的球差系数。亦即全组的球差=半部球差的叠加（=半部球差的两倍）。类似地，可得下列关系：

$$\left. \begin{aligned} \sum S_{I左} &= \sum S_{I右}; & \sum S_{I合} &= 2\sum S_{I半部} \\ \sum S_{III左} &= \sum S_{III右}; & \sum S_{III合} &= 2\sum S_{III半部} \\ \sum S_{IV左} &= \sum S_{IV右}; & \sum S_{IV合} &= 2\sum S_{IV半部} \\ \sum S_{IC左} &= \sum S_{IC右}; & \sum S_{IC合} &= 2\sum S_{IC半部} \\ \sum S_{II左} &= \sum S_{II右}; & \sum S_{II合} &= 0 \\ \sum S_{V左} &= \sum S_{V右}; & \sum S_{V合} &= 0 \\ \sum S_{IIC左} &= \sum S_{IIC右}; & \sum S_{IIC合} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$

在全对称系统中，由结构特征分析可引出如下结论：

- (1) 球差、像散、场曲、轴上色差（即所有的沿光轴方向度量的像差，或称轴向像差），左、右两半部等值同号，故全组合成后的这些像差为半部的两倍。

(2) 彗差、畸变、倍率色差（即所有在垂轴方向度量的像差，或称横向像差、垂轴像差）左、右两半部等值反号，故全组合成后的这些像差为零。

2. 全对称光学部件（系统）的应用

全对称光学部件其左右半部的彗差、畸变、倍率色差自动对消这一特征，广泛地应用于光学设计中，人们就利用这种对称结构来自动消除横向（垂轴）像差。

例如，某摄影物镜结构如图 2-36 所示。

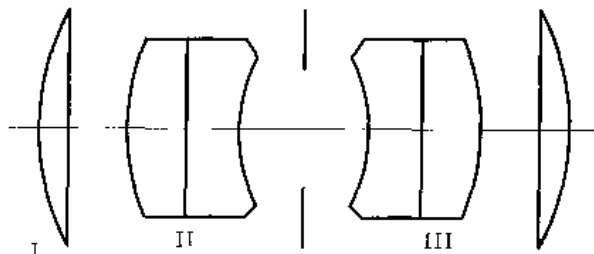


图 2-36 全对称光学部件的应用之一

该结构基本上左右对称，于是彗差、畸变、倍率色差左右对消，厚透镜 II 及 III 用来消除场曲，光阑位置可用来消除像散；II、III 镜的胶合面（即不同的玻璃组合）来消除轴上色差。因此，只要把半部的球差消除掉，就能校正全部初级像差。这种镜头称“双高斯型”或“planar（普兰纳）型”。一般，这种对称结构能做到 $D/f' = 1/2$, $2\omega = 50^\circ$ ，它们广泛应用在摄影物镜和投影物镜中。

又如，常见的三片型（参见图 2-29），也属对称型；再如所谓天塞型（“天塞”是拉丁文“四片”之意）也属于对称型（见图 2-37），它只是在对称三片的基础上再加上一片凹透镜（图中斜线所示），以改善像散轴外像球差。

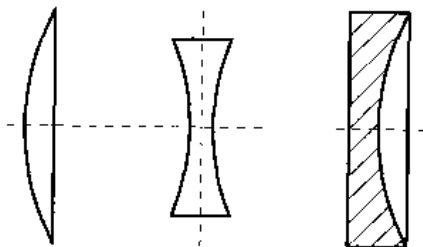


图 2-37 全对称光学部件的应用之二

在光路较长的军用、民用仪器（如潜望镜、瞄准具等）中，经常采用全对称的 $\beta = 1$ 转像系统（见图 2-38）。其作用主要把光路接长，同时也起正、倒像的作用。它能消除场曲以外的全部初级像差（请读者自行分析）。

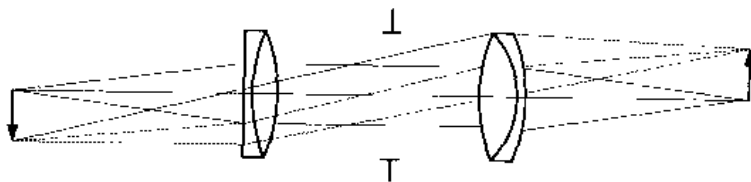


图 2-38 $\beta = 1$ 转向系统

§2.7 像差校正和平衡方法

§ 2.7.1 引言

按第1章介绍的方法选好初始结构之后,要在电子计算机上进行光路计算。算出全部像差,并画出各种像差曲线。从像差曲线上就可以找出主要是哪些像差影响光学系统的成像质量,从而找出改进的办法,开始进行像差校正。在着手进行像差校正之前,要确定一个既满足使用要求,又能使像差达到最佳校正的平衡方案。这样,在像差校正时就有明确的目标,不致于去盲目地校正。

一般说来,光学系统的高级像差是无法校正的,我们只能把它降到允许的范围内,然后改变初级像差的符号和数量,把初级像差和高级像差降到最小,使系统达到尽可能好的成像质量。有时某一种像差无法校正,需要用其他像差来补偿,所有这些做法称为像差平衡。用哪一种初级像差和哪一种高级像差相平衡,它们在数量上应该改变多少,这些问题要根据具体结构、仪器的使用要求、系统的高级像差大小以及像差校正的可能性等因素决定,在像差平衡时,不一定把所有的像差都校正得很小(相对于高斯像面),关键在于各种像差之间要配合好。不仅轴上点像差和轴外点像差要配合好,而且各个视场之间的像差也要互相配合好,各种像差的正负号要配合,这样才会使所有像差对一个统一像面达到最小,整个系统具有最佳成像质量。然后把高斯像面移到这个新的像面位置上,称为“离焦”。有时为了改善轴外点成像质量,把孔径边缘那部分像差较大的光线拦掉,这种做法称为“拦光”。所有这些处理方法称为计算结果处理。

§ 2.7.2 像差校正方法

像差的校正方法很多,最基本的方法有代数法、试验法和像差自动校正法。

1. 代数法

代数法是假定结构参数变化不大时,高级像差和透镜厚度影响很小,并认为是基本不变,而主要是初级像差在改变。

开始先求出希望达到的像差目标值和由光路计算所得到的像差值之差,用 $\Delta\delta G'_k$ 表示。然后对初级像差普遍表示式进行微分,并用有限增量代替微分,则得

$$\Delta\delta G'_k = f(\eta, \xi, y) \Delta S_k$$

式中, $f(\eta, \xi, y)$ 是光线坐标的函数, ΔS_k 是已知量,是初级像差系数 $S_I, S_{II} \dots$ 的增量。可根据 $\Delta\delta G'_k$ 求出 ΔS_k 。再根据 ΔS_k 求 $\Delta P_k, \Delta W_k$, 由 $\Delta P_k, \Delta W_k$ 求出 ΔU_k , 从而求出新的 U_k^* 。最后求出新的结构参数。这种方法实际上相当于重新计算初始结构,工作量是很大的。但对于视场和孔径都不大的光学系统,如双胶合、双分离、密接三透镜系统的像差校正是很有效的。

2. 试验法

试验法是研究和利用光学系统各个结构参数的变化和由它们引起的像差值变化之间的关系,并假设参数变化不大时,它们之间的关系是线性的。

设计者在开始计算之前,先从专利文献等已有的资料中选择一个光学特性与所要求的尽可能接近的初始结构,然后在电子计算机上进行光路计算。连续改变每个结构参数(每次改变量均为微变量“ $\pm \Delta x$ ”)计量出像差变化量表,从中可分析各结构参数对各种像差影响

的大小和方向然后决定变哪几个结构参数,变多少,向哪个方向变,再计算出新的像差结果和新的像差变化量表,再继续重复前面的工作,直到使整个系统的像质达到设计要求为止。这种方法的思路与华罗庚院士提出的“优选法”中的“瞎子爬山法”异曲同工。

3. 像差自动校正

光学系统应据使用要求达到一定得像质要求,这些要求都与几何像差相联系。因此力求把光学系统的有关几何像差校正到尽可能小或取得最佳匹配,以便达到与像质要求一致。其实光学设计难,难就难在几何像差与光学系统的结构参数之间的非线性,更不能建立起确切的函数关系,因而无法从像差要求直接求得光学系统。自从用电子计算机辅助进行光路计算后,才使设计者从繁重的数值计算中解放出来,这是“试验法”的“鼎盛年代”。随着计算机技术与最优化理论和数值方法互相促进,迎来了“光学设计 CAD”的新阶段——光学自动设计(像差平衡计算)。其特点是根据系统的各个结构参数对像差的影响,同时修改对像差有校正作用的所有结构参数,使像差得到平衡。这就加快了设计速度并提高了设计质量。光学自动设计软件采用了几何像差、波像差、点列图,光学传递函数等多个评价指标,并以此多目标来评价设计结果,给设计者带来了很大的方便。

值得指出的是,有些光学自动设计软件在设计权重时,有一个“默认值”的权重。根据经验,采用这一权重是光学结构参数的“平均先进”水平的结果。如果用此权重达不到使用的要求,或迭代很多次后出现了一些奇怪的结果的话,就必须由设计人员对设计过程进行人工干预(如改变权重,人为地改变一些结构参数),以获得好的结果。可见在光学自动设计中,设计者仍然需凭借自己对像差理论的掌握,并应用于设计的实践之中,才能“高屋建瓴”、“水到渠成”。

像差自动平衡主要有阻尼最小二乘法、适应法、正交化法等,其中阻尼最小二乘法用得最为广泛。

§ 2.7.3 像差校正的一些设计技巧

文献[14]列举了在像差校正平衡阶段可能采用的一些方法,可以说这些都是我国光学设计人员长期实践经验的总结与归纳。把这些技巧用于自己的设计实践,是十分有效的。

像差校正设计技巧主要有如下 10 个方面。

(1) 各光组以至各面的像差分布要合理。在考虑初始结构时,可将要校正的像差列成用 P, W 表示的方程组,这种方程组可能有多组精确解,也可能是病态的,或无解。若是前者,应选一合理的解;若是后者,应取最小二乘解。总之,有多种解方程组的算法可资利用,在计算机上实现并不困难。然后,应尽量做到各个面上以较小的像差值相抵消,这样就不至于会有很大的高级像差。在此,各透镜组的光焦度分配、各个面的偏角负担要尽量合理,要力求避免由个别面的大像差来抵消很多面的异号像差。

(2) 相对孔径 h/r 或入射角很大的面一定要使其弯向光阑,以使主光线的偏角或 i_p 角尽量小,以减少轴外像差。反之,背向光阑的面只能有较小的相对孔径。

(3) 像差不可能校正到完美无缺的理想程度,最后的像差应有合理的匹配。这主要是指:轴上点像差与各个视场的轴外像差要尽可能一致,以便能在轴向离焦时使像质同时有所改善;轴上点或近轴点的像差与轴外点的像差不要有太大的差别,使整个视场内的像质比较均匀,至少应使 0.7 视场范围内的像质比较均匀。为确保 0.7 视场内有较好的质量,必要时

宁愿放弃全视场的像质（让它有更大的像差）。因为在 0.7 视场以外已非成像的主要区域，当画幅为矩形时（如照相底片），此区域仅是像面一角，其像质的相对重要性可以较低些。

（4）挑选对像差变化灵敏、像差贡献较大的表面改变其半径。当系统中有多个这样的面时，应挑选其中既能改良所要改的那种像差，又能兼顾其他像差的面来进行修改。在像差校正的最后阶段尚需对一两种像差作微量修改时，作单面修改也是能奏效的。

（5）若要求单色像差有较大变化而保持色差不变，可对某个透镜或透镜组作整体弯曲。这种做法对除色差和 S_{IV} 以外的所有像差均有效。

（6）利用折射球面的反常区。在一个光学系统中，负的发散面或负透镜常是为校正正透镜的像差而设置的，它们只能是少数。因此，让正的会聚面处于反常区，使其在对光束起会聚作用的同时，产生与发散面同号的像差就显得特别有利。设计者应善于利用这一性质。

（7）利用透镜或透镜组处于特殊位置时的像差性质。例如，处于光阑位置或与光阑位置接近的透镜或透镜组，主要用于改变球差和彗差（用整体弯曲方法）；远离光阑位置的透镜或透镜组，主要用来改变像散、畸变和倍率色差。在像面或像面附近的场镜可以用来校正像面弯曲。

（8）对于对称型结构的光学系统，可以选择成对的对称参数进行修改。作对称性变化以改变轴向像差，作非对称性变化以改变垂轴像差。

（9）利用胶合面改变色差或其他像差，并在必要时调换玻璃。可以在原胶合透镜中更换等折射率不等色散的玻璃，也可在适当的单块透镜中加入一个等折射率不等色散的胶合面。胶合面还可用来校正其他像差，尤其是高级像差。此时，胶合面二边应有适当的折射率差，可根据像差的校正需要，使它起会聚或发散作用，半径也可正可负，从而在像差校正方面得到很大的灵活性。同时，在需要改变胶合面两边的折射率差以改变像差的性态、或微量控制某种高级像差，以及需要改变某透镜所承担的偏角等场合，都能通过调换玻璃而奏效。

（10）合理的拦截光束和选定光阑位置。孔径和视场都比较大的光学系统，轴外的宽光束常表现出很大的球差和彗差，使 $y' \sim \tan U'$ 特性曲线上下很不对称。原则上，应首先立足于把像差尽可能校正好，在确定无法把宽光束部分的像差校正好的情况下，可以把光束中 y' 值变化大的外围部分光线拦去，以消除其对像质的有害影响，并在设计的最后阶段，根据像差校正需要最终确定光阑位置和各零件口径的大小。

最后值得指出，在像差校正过程中，重要的问题是能够判断各结构参数，包括半径、间隔、折射率等对像差变化的影响倾向。知道这种倾向，像差校正就不致盲目从事。一般讲，像差随结构参数而变化的定性判断是能够作出，至少是能够部分作出的。但要把握每一结构参数对所有像差的影响，特别是对最终像差的综合影响是不可能的。因此，逐个改变结构参数，求出各参数对各种像差影响的变化量表是十分必要的。这也是光学自动设计过程的必经之路。另外，如果像差难以校正到预期的要求，或希望所设计系统在光学性能，即孔径或视场上要有所扩大时，也常采用复杂化的方法，如把某一透镜或透镜组分为二块或二组，或者在系统的适当位置加入透镜（例如，在会聚度较大的光束中加齐明透镜）等。

§ 2.8 像差容限与像质评价

§ 2.8.1 概述

在《应用光学》一书^[9]中介绍了用几何像差、波像差、点列图、分辨率、星点法五种评

价光学系统像质的方法。前三种主要用于设计阶段，后两者用于检测产品的实际成像质量。由于像差和分辨率间没有简单的数量对应关系。因此，设计完成后，必须试制出产品，通过分辨率、星点法检验才能确定其质量。基于这种认识，后面将列举光学设计与制造实践案例，均明确指出该案例是否经历试制或商业化等，以增强读者的可信度。

经过长期的生产实践，对常用的光学系统，人们已总结出一系列对口的几何像差公差——像差容限，在这些像差容限内，设计和实际得到较好的一致。但随着科技发展，新的接收器和仪器不断涌现，如在现有的像差容限没有界定的范围之外，只好通过试制和实际经验来解决，因为新的光学系统的实际工作性能和像差间没有直接的数量关系。

§ 2.8.2 经典光学系统的像差容限

光学系统一般不可能完善地校正像差，这是像差容限问题，它是一个较为复杂，并且还不能认为已被很好地解决了的问题。因为光学系统的像差容限不仅与像质的评价方法有关，还随系统的使用条件、使用要求、接收器性能等的不同而不同。以最大波像差作为评价依据的瑞利判据，适用于小像差系统，例如望远镜和显微镜的物镜、缩微、制版物镜和某些投影物镜等。现列出其像差容限。

只有初级球差时，

$$\delta L'_m \leq \frac{4\lambda}{n' \sin^2 U'_m} \quad (2-24)$$

边缘球差校正为零时，最大剩余球差为

$$\delta L'_{0.7h} \leq \frac{6\lambda}{n' \sin^2 U'_m} \quad (2-25)$$

如果边缘光线没有完全校正到零，则应在焦深范围内。

其他像差容限如下：

$$\text{弧矢彗差} \quad K'_s \leq \frac{\lambda}{2n' \sin U'_m} \quad (2-26)$$

$$\text{正弦差} \quad SC' \leq \frac{\lambda}{2n'y' \sin U'_m} \quad (2-27)$$

$$\text{或按经验公差} \quad SC' < 0.0025 \quad (2-28)$$

$$\text{位置色差} \quad L'_{FC} < \frac{\lambda}{n' \sin^2 U'_m} \quad (\text{焦深})$$

$$\text{波色差} \quad W_{FC} < \frac{\lambda}{2} (\text{最好是 } \frac{\lambda}{4}) \quad (2-29)$$

式(2-24)至式(2-29)中， n' 是最后一面像方的空间折射率， U'_m 是像方边缘光线的孔径角， y' 是最后一面像的高度。

显微镜和望远镜的目镜是小孔径和视场比较大的系统，因此，主要考虑轴外像差的校正，有关像差的容限如下：

弧矢彗差 同式(2-26)

$$\left. \begin{array}{l} \text{像散} \quad x'_{ts} = x'_t - x'_s \leq \frac{\lambda}{n' \sin^2 U'_m} \\ \text{畸变} \quad q = \frac{Y'_t - y'_t}{y'_t} \times 100\% \leq 5\% \end{array} \right\} \quad (2-30)$$

倍率色差 以角度计应小于 $2' \sim 4'$

像面弯曲 x'_t 和 x'_s 应在眼睛的调节范围内

一般显微物镜的倍率色差相对值 $\frac{y'_F - y'_c}{y'_D} = -1.4\%$ 左右。为此，有些目镜的倍率色差相

对值容限与之相等，以补偿物镜的倍率色差，这种目镜习惯上称之为补偿目镜。

§2.9 应用光学传递函数校正像差和评价像质

§ 2.9.1 光学传递函数概述

《应用光学》^[8]中列举的五种像质评价方法，其缺点是没有一种方法能在设计和制造两个阶段都能应用，且具有统一像质评价标准。因此，人们仍一直在探索，希望能找到一种对设计和制造都适用统一的像质评价标准，且在设计阶段就预知光学系统的使用质量。直到 20 世纪 40 年代，这种探索有了战略性的突破：1946 年法国 P.M.Duffieux 首先应用傅里叶积分方法研究光学成像问题，认为非相干光学成像系统可看做一个低通线性滤波器，并提出了光学传递函数概念；1948 年美国 Schade 第一次应用光学传递函数来评定电视摄像系统成像质量。现在，光学传递函数（简称光学传函）不仅用于控制光学自动设计过程像差校正和设计结果像质评价，还能用于光学镜头质量检验、光学系统总体设计和光学信息处理等方面。

光学传递函数（OTF_N）分为调制传递函数（MTF_N）和位相传递函数（PTF_N）；光学传递函数是两者的统称。

§ 2.9.2 光学传函理论实质、基本出发点和物理意义

1. 理论实质和基本出发点

成像光学系统是信息传递系统，从物面到像面，输出图像质量完全取决于光学系统传递特性。几何光学是在空域研究光学系统成像规律，其实与空域相平行还可以在频域中分析光学系统成像质量，即用传递函数来研究系统空间频率传递特性，这是一种能全面评价光学系统成像质量的好方法。

从 § 2.8 节所提到的多种对光学系统的评定方法，都基于把物体看做是发光点集合，并以一点成像是能量集中程度来表征系统成像性质，利用光学传递函数来评价，则是基于把物面图形分解为各种频率谱组成，也就是把物体光场分布函数展开为傅里叶级数（物函数为周期函数）或傅里叶积分（物函数为非周期函数）形成，研究光学系数对各种空间频率亮度呈余弦分布目标传递能力。正是这种把物面图形分解成余弦基元来研究光学系统成像性质的思路，是光学传函理论基本出发点。一般来说，高频部分反映物体细节传递情况；中频部分反映光学物体层次传递情况；低频部分则反映物体轮廓传递情形。表明各种频率传递情况是振幅传函（MTF），因此振幅传函对成像质量起决定作用，光学设计一般只需计算 MTF，而一般不考虑 PTF。

2. 物理意义

由近代物理光学知道, 使用光学传递函数要求成像系统满足线性和空间不变性条件。而在这里, 线性是指对系统物方图样与像方图样之间辐射强度分布满足线性叠加。系统满足空间不变性是指: 当一个物点在物面上移动时, 它像点分布相应地在像面上移动, 但不改变其分布形状。满足这两个条件成像系统称为线性空间不变系统。

利用系统线性叠加特性, 可以将任何物方图样分解为许多基元图样线性组合, 这些基元对应像方图样是容易知道的, 然后由这些基元像方图样进行线性叠加就可以得到总的像方图样, 通常选取点状物或余弦状物为物方图样基元, 分别称为点基元法和余弦基元法。本小节主要介绍点基元法。

点基元法就是采用单位脉冲 δ 函数作为基元, 这里可以理解为一个无限小点光源物, 例如小星点孔, 用它来表示物方图样, 其数学关系式如下:

$$O(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(u_1, v_1) \delta(u - u_1, v - v_1) du_1 dv_1 \quad (2-31)$$

利用系统具有线性和空间不变性, 有如下物像关系式:

$$i(u', v') = \iint_{-\infty}^{\infty} O(u, v) h(u' - M_u u, v' - M_v v) du dv \quad (2-32)$$

式中, $O(u, v)$ 为物方图样; $i(u', v')$ 为像方图样; u, v 和 u', v' 分别为对应物面和像面笛卡尔坐标; M_u, M_v 为物像横向放大率; $h(u' - M_u u, v' - M_v v)$ 为系统点像分布, 即 (u, v) 处一个点物 $\delta(u, v)$ 像。

今后, 为描述问题方便, 往往只注意分析物像分布相似性, 而不计物像缩放及其因不同视场而放大率不一造成的畸变, 因此可以假定 $M_u = M_v = 1$ 。对它可有两种解释: 一是把理想像视为物, 对成像系统只讨论理想像与实际像之间关系; 二是取物像平面坐标不同尺度, 这样, 对 u', v' 和 u, v 可不加区别, 这样式 (2-32) 可简单表示为:

$$i(u, v) = O(u, v) \times h(u, v) \quad (2-33)$$

但在实际测量中, 对具体成像系统仍要注意在空域内或频域内物像尺度, 按照放大倍率正确换算。

为了下面引入归化光学传递函数的需要, 将点像分布函数 $h(u, v)$ 积分值归化为 1。这时, 称其为成像系统点扩散函数, 记为:

$$\text{PSF}(u, v) = h(u, v) / \iint_{-\infty}^{\infty} h(u, v) du dv$$

它是某像面上相对辐照度分布 (单位面积上辐射功率), 这时其相应傅里叶变换就是成像系统光学传递函数, 记为:

$$\text{OTF}(r, s) = \iint_{-\infty}^{\infty} \text{PSF}(u, v) \exp[-i2\pi(ru + sv)] du dv \quad (2-34)$$

OTF 是一个复函数, 可以写为:

$$\text{OTF}(r, s) = \text{MTF}(r, s) \exp[-i\text{PTF}(r, s)] \quad (2-35)$$

其模 $\text{MTF}(r, s)$ 称为调制传递函数, 它表示了被成像系统传递谐波成分调制度衰减; 其幅角 $\text{PTF}(r, s)$ 称为位相传递函数, 它表示被传递到像面上谐波成分对其理想位置横移。在零频处 $\text{MTF}=1$, $\text{PTF}=0$, 它们的图形如图 2-39 所示。

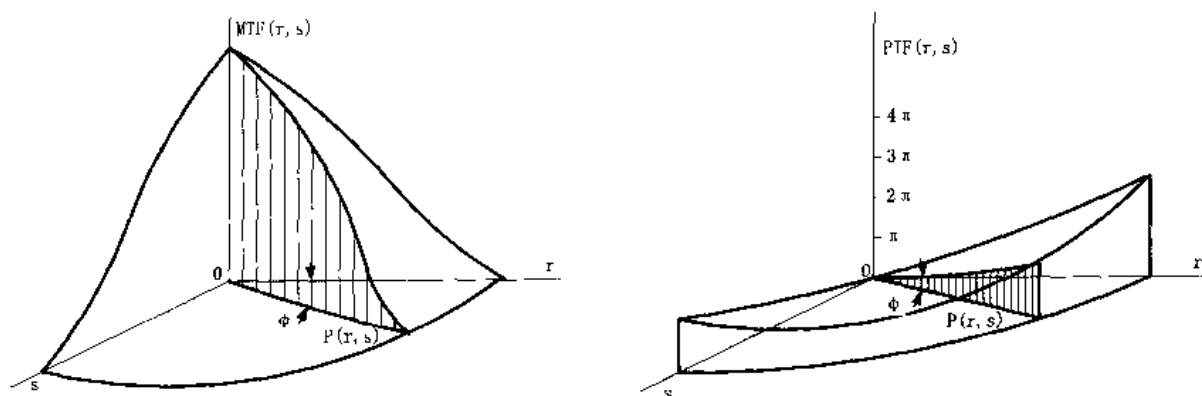


图 2-39 OTF (r, s) 的图形表示

§ 2.9.3 用光学传函评价光学系统像质

1. 用 MTF 曲线评价成像质量

用光学传函评价系统成像质量，目前最常用方式是给出若干视场（一般 3~5 个，即 0ω , 0.3ω , 0.5ω , 0.85ω , 1ω , 或 0ω , 0.7ω , 1ω ）用子午和弧矢振幅传函 MTF_t 和 MTF_s 曲线来代表成像质量。因为 MTF 表示多种不同频率 ω_0 正弦强度分布函数经光学系统成像后其对比度（即振幅）的衰减程度，当某一频率对比度下降到 0 时，说明该频率光强分布已经无亮度变化，即该频率被截止。这是利用光学传函来评价光学系统像质主要方法。

具体来说，MTF 有以下用途。

（1）确定不同对比度目标，经光学系统成像后，光学系统截止空间频率就是该系统分辨率极限，用不同接受器接收时能达到的对比度阈值相对应的分辨率为实际分辨率。据清华大学王民强教授的经验，他认为与接受器对比度阈值相对应目视系统 $MTF_1 \geq 0.05$ ，电视摄录、照相摄影系统 $MTF_2 \geq 0.15$ ；文献[7]指出： $MTF_1 \geq 0.03$ 、 $MTF_2 \geq 0.1$ ；文献[42]界定为： $MTF_1 \geq 0.03$ 、 $MTF_2 \geq 0.20$ 。本书提供上述这些经验数据的目的是让设计者有一个大概的“数”，读者可按实际情况掌握。对于一个完全没有像差的理想光学系统，像只是一个理想衍射图形，所以对应理想光学系统的 MTF 曲线如图 2-40 所示。图 2-41 是某镜头 0ω 、 0.5ω 、 0.7ω 、 1ω 时的 MTF_t 和 MTF_s 。据王教授经验数据判定该镜头摄录分辨率为 21 lp/mm (0.7ω 时)；目视分辨率为 35 lp/mm (1ω 时)。

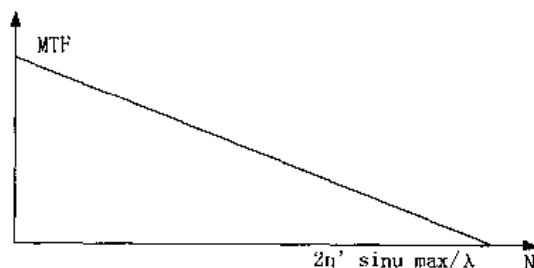


图 2-40 理想光学系统的 MTF 曲线

（2）判断不同设计方案的优势，例如，图 2-42 中镜头 1, 2 可视为不同的设计方案。

（3）用来指导进一步校正像差的方向。图 2-41 中轴外 0.5 视角子午和弧矢传函比较接近，而 0.7 视场弧矢传函很快下降，但全视场弧矢传函反面上升。因此可用适当降低全视场

的弧矢像差,来改善 0.7 视场弧矢像差校正;对子午像差则相反,可以降低 0.7 视场像差要求而改善全视场的像差校正。

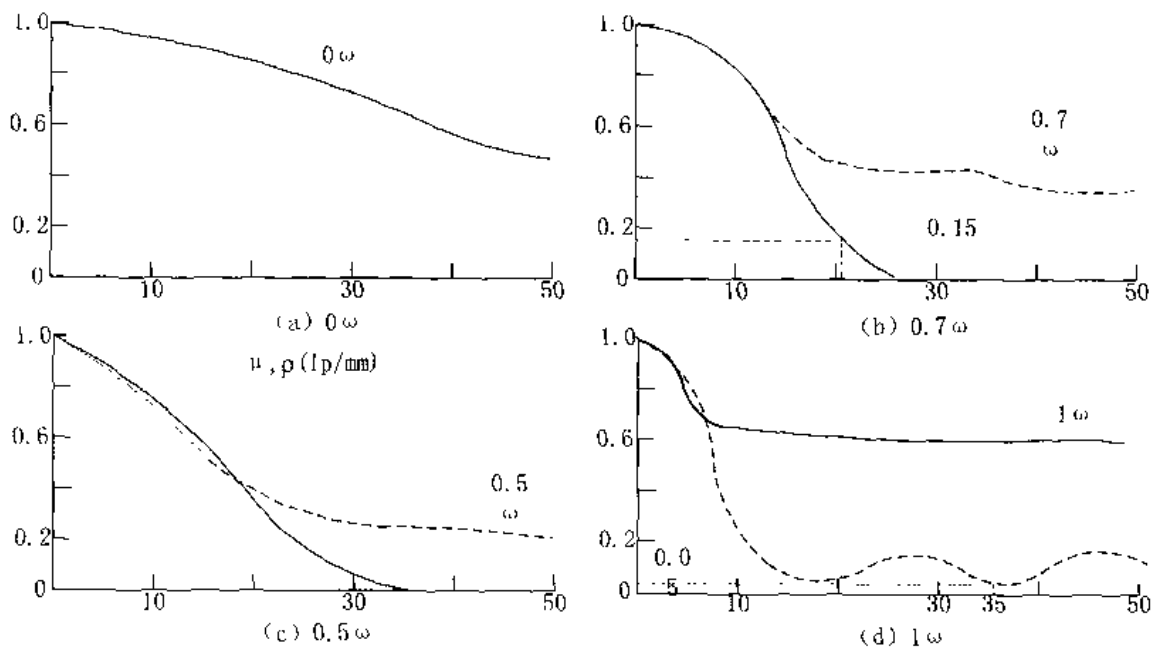


图 2-41 某镜头的 MTF_t 和 MTF_s

2. 用特征频率传递函数值评价光学系统像质

这是一种最简单、直观的像质评价方法。对一定用途的光学系统,为了简化有时也采用若干指定空间频率的 MTF 值来代表它的成像质量、特征频率。特征频率的选取,随仪器用途的不同而异。如电视摄像物镜,由于电视画面在水平方向的总扫描行数约为 600 线,相当于 300 线对 lp 。如采用 1 in (1 in=2.54 cm) 的摄像管,像面尺寸约为 15 mm×20 mm,则垂直方向上的空间频率为 $N=300/150=20$ (lp/mm)。它就是摄像管的截止频率。因此一般取 20 lp/mm 作为与这种摄像管配合使用的光学镜头的特征频率。

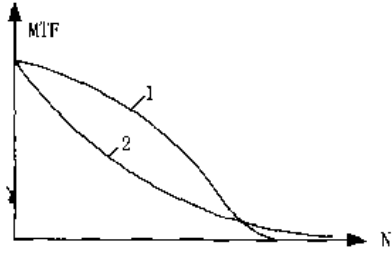


图 2-42 不同的设计方案

照相物镜的特征频率我国规定为 25 lp/mm (国外也用 30 lp/mm、15 lp/mm),画幅为 24×36 mm² 的 135 照相物镜的 MTF 评价国家标准如表 2-2 所示。

表 2-2 MTF 评价国家标准

MTF 视场孔径	特征频率	10 lp/mm		25 lp/mm	
		轴上	0.707ω	轴上	0.707ω
全孔径		0.7	0.35	0.4	0.15
F5.6		0.8	0.4	0.5	0.2

3. 用 MTF 曲线的积分值来评价成像质量

从理论上可以证明,像差中心点亮度值等于 MTF 曲线所围的面积。 MTF 所围的面积越

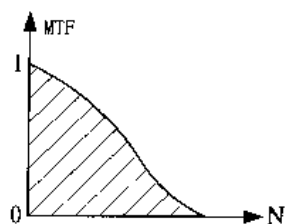


图 2-43 MTF 曲线所围面积

大，表明光学系统所传递的信息量越多，光学系统成像质量越好，图像越清晰。因此，在光学系统接收器截止频率范围内利用 MTF 曲线所围面积的大小来评价光学系统成像质量是非常有效的。

图 2-43 中阴影部分为 MTF 曲线所围的面积。从图中可以看出，所围面积的大小与 MTF 曲线有关，在一定的截止范围内，只有获得较大的 MTF 值光学系统才能传递较多的信息。

借助光学设计软件在电子计算机上可准确地求得 MTF 值和自动生成 MTF 曲线，而使用光学传递函数检测仪也能方便地对实际镜头进行测试。

第 2 部分 光学部件与系统设计

第3章 代数法求解光学部件初始结构

对光起反射、折射、衍射、偏振以及滤光后的分色等作用的零件,如透镜、反射棱镜、分划板、玻璃平板、滤光片、光栅和光纤等,称为光学零件。光学部件则是光学系统中的几个光学零件胶合或按某种要求组合而成的,并在该系统的功能上有一定独立作用的组成部分,如物镜、目镜、聚光镜、角镜、组合棱镜等。

如前所述(§1.2.3),光学部件的初始结构常用代数法和逐步修改法这两种方法确定。

本章主要讨论根据一定像差要求,按初级像差理论来求解初始结构参数(r, d, n)以进一步用做像差校正(像差设计)。

在解初始结构参数时,往往不考虑高级像差,又略去透镜的厚度,因此它只是一个近似解,其近似程度取决于所要求的视场和孔径的大小。为使初级像差系数和系统的结构有紧密的关系,把初级像差系数变换成以参量 P 和 W 表示的形式,并着重讨论用 P 、 W 形式的初级像差系数进行光学设计的一般方法。

§3.1 概述

在使用光学自动设计前的长时期内,光学设计是通过设计者人工修改系统的结构参数,然后不断计算像差来完成的。为了加速设计过程,提高设计质量,人们对像差的性质,像差和光学系统结构参数的关系,进行了长期的研究,取得了很多有价值的成果,这就是像差理论。今天,像差理论对光学自动设计过程中初始系统的确定、自变量的选择、像差参数的确定等一系列问题仍有其重要的指导意义。本章重点介绍用薄透镜系统的初级像差理论,求解单片薄透镜、双胶合薄透镜、两组双胶合物镜、小气隙双分透镜以及齐明弯月透镜初始结构。求解这些简单光组透镜或透镜组的初始结构的意义在于:它们是组成复杂光学部件与系统的结构单元,学会设计这些结构单元有助于进一步提高复杂光学部件与系统的设计质量,因为各结构单元的像差对部件与系统的像差总量均有不同程度的贡献。

§3.2 单片薄透镜初始结构设计计算

从上述已知,对于单片薄透镜,当物在无限远时,无须逐个分析 S_I 到 S_V 而只需抓住 P 、 W 、 $\sum \frac{\varphi}{n}$ 三个量,就能说明全部单色像差状况。因此,此处只需讨论 P 、 W 与 r 、 n 的关系,实质上也就是讨论 S_I 、 S_{II} 与 r 、 n 的关系。

为什么先以物在无限远作为讨论对象?因为有不少镜头的实际工作状况就是无限远物体,此外更主要的是各种镜头的物距有远有近,不能为各种镜头都单独分析一套规律,所以第一步先分析无限远物距的规律,然后再找出任意物距(近距)和无限远像距像差之间的联系,这样就能找出任意物距(无论近距或远距)时像差的普遍规律了。

此外,在实际镜头中,焦距 f' (或 $\varphi=1/f'$)长短不一,口径大小也不一,我们不可能为每种焦距、每种口径单独分析像差情况,于是我们讨论一种标准情况,称为规格化的情况(简称规化情况),也就是说把焦距和口径统一到 $f'=1$, $h=1$, $\varphi=1$ 上来。采用规化条

件后，无损于像差本身的客观规律，而带来的优点却是把所有各种不同的情况统一到 $h \cdot \varphi = 1$ 的相同状况下来讨论，这样讨论的结果完全适合于任何焦距、口径的镜头。

取归化条件 $h \cdot \varphi = 1$ ，在无限远物距时， $u_1 = 0$ ， $u'_2 - u_1 = h \cdot \varphi = 1$ ，故 $u'_2 = 1$ 。如图 3-1 所示， $\triangle ABF$ 为等腰直角三角形，故在 $h = 1$ ， $f' = 1$ ， $\varphi = 1$ 。在此归化条件下的 P 用 P^∞ 表示。

我们的目的是找出 P^∞ 与单片薄镜的 r 和 n 的关系，以便根据所需的 P^∞ 找出单片薄镜的 r 和 n 。经过推导，可得出单片薄透镜的 P^∞ 和 r_1 ， r_2 ， n 的联系。对单片薄透镜，物在无限远时，公式如下（ Q 的值代表透镜的弯曲）：

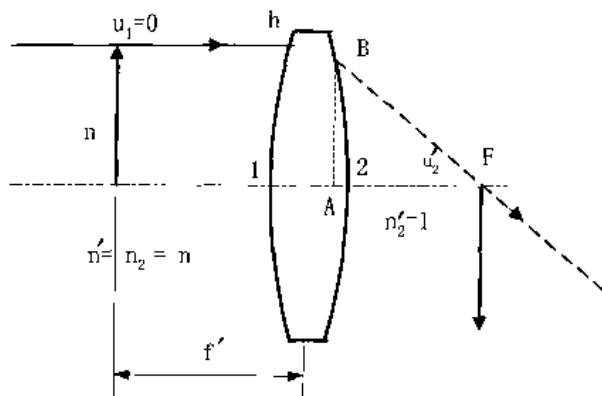


图 3-1 无限远物距时的单片薄透镜

$$P^\infty = aQ^2 + bQ + c \quad (3-1)$$

$$W^\infty = -\frac{a+1}{2}Q - \frac{b}{3} \quad (3-2)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 1 + \frac{2}{n} \\ b &= \frac{3}{n-1} \\ c &= \frac{n}{(n-1)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

$$\frac{1}{r_1} = Q + \frac{n}{n-1} \quad (3-4)$$

$$\frac{1}{r_2} = Q + 1 \quad (3-5)$$

从式 (3-1) 到式 (3-5) 可引出如下结论。

1. 分析一

$$\begin{aligned} P^\infty &= aQ^2 + bQ + c \\ &= \left(1 + \frac{2}{n}\right)Q^2 + \frac{3}{n-1}Q + \frac{n}{(n-1)^2} \end{aligned} \quad (3-6)$$

式 (3-6) 是 Q 的二次方程式，故 P^∞ （即球差 S_1 ）随弯曲（ Q ）的变化是二次抛物线关系）。

用取导数求极小的方法可以求出，当 $\frac{dP^\infty}{dQ} = 0$ 时， P^∞ 取极小值 P_0 。

注： P_0 是单片薄透镜物在无限远时的 P^∞ 的极小值，即图 3-2 所示抛物线底部处的 P^∞ 值，也即 $P_0 = P^\infty_{\text{极小}}$ 。

取导数，当

$$Q = Q_0 = \frac{-b}{2a} = -\frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \quad (3-7)$$

时,

$$P_{\text{极小}}^{\infty} = P_0 = C - \frac{b^2}{4a} \quad (3-8)$$

所以

$$P_0 = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] \quad (3-9)$$

注: Q_0 即极小值 P_0 所在位置的 Q 值 (参见图 3-2), 亦即最小值处的 Q 值。今后, 凡带下标 “0” 者都代表与极小值有关的量。

一般光学玻璃的 $n \approx 1.5 \sim 1.7$, 故由式 (3-9) 求得 P_0 在 1.3 到 2.1 之间。

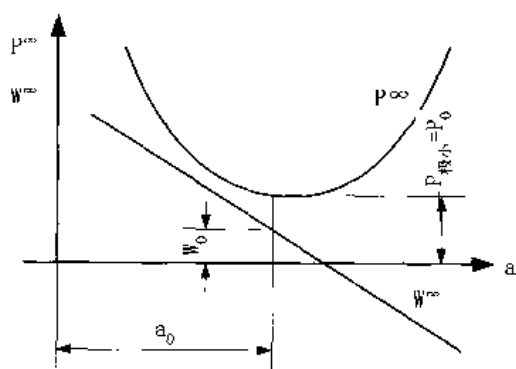


图 3-2 P^{∞}, W^{∞} 曲线

可见, 单片正透镜物在无限远时球差永为正值, 不可能为零, 从图 3-2 来看, 其表现是抛物线和横座轴没有交点, P_0 不可能为零。

应用举例 一单片薄透镜, $n=1.5$, 物在无限远处, 试求其球差最小时的弯曲 (即求 r_1, r_2)。

解 由式 (3-7), 球差最小时的弯曲形状为

$$Q = -\frac{3n}{2(n-1)(n+2)} = -1.29$$

再把此 Q 值代入式 (3-4) 及式 (3-5), 求得

$$r_1 = 0.58, r_2 = -3.5$$

即 $\frac{r_1}{r_2} = -\frac{1}{6}$, 即 r_1 较凸, r_2 较平。这一结论虽然

是由无限远物体推出的, 但对近距离物体也有参考价值。例如, 一单片薄透镜用于近距离物体成像, 则球差较小的形状必是一面较平, 一面较凸, 且较平之面向物像距中较短的一方, 许多聚光镜就利用这一球差较小的原理, 见图 3-3。

整个聚光镜由两片构成, 每片都符合球差较小形状。通常为了工艺方便, 较平的那面干脆做成平面。值得指出, 上述的形式 (像差最小) 只适用于球差。此形式对于其他像差不一定好。例如, 在许多目镜中靠近人眼那片 (简称接目镜), 做成图 3-4 中 I 的形式。即平面向着较远的物距, 这是对球差不利的形状。若为了改善球差, 应将 I 镜翻转, 但在一般目镜中主要矛盾是彗差和像散, 而图 3-4 中 I 片的形状对像散有利。

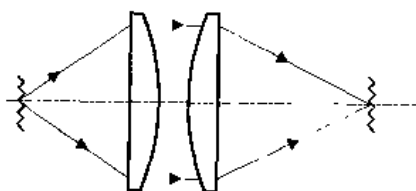


图 3-3 球差较小的原理

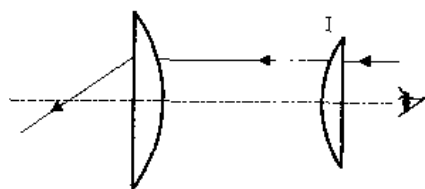


图 3-4 接目镜形状

2. 分析二

由式 (3-2), 有

$$W^{\infty} = -\frac{a+1}{2}Q - \frac{b}{3} = -\frac{n+1}{n}Q - \frac{1}{n-1}$$

即式 (3-2) 是 Q 的一次方程式, 故 W^{∞} 随弯曲 Q 的变化是直线关系。从式 (2-8) 知, 当光阑位于密接薄透镜组处时 $S_{II} = -JW$, 故 S_{II} (彗差), 随弯曲的变化也是直线关系, 参见图 3-2。

当球差处于极小位置时, 即图 3-2 的极小值 P_0 处, 此时的 W 称为 W_0 , 把式 (3-7) 的 Q_0 值代入式 (3-2), 得球差极小值时,

$$W^{\infty} = W_0 = \frac{1}{2(n+2)} \quad (3-10)$$

一般, 当玻璃 $n \approx 1.5 \sim 1.7$ 时, $W_0 \approx 0.14$, 0.14 是较小的数值。也就是说, 单片薄透镜弯曲到球差最小时, 其彗差也较小, 在图 3-2 上的表现就是正好在球差最小的弯曲 (极小值) 附近, W^{∞} 直线穿过横座标。

以上结论是针对无限远物体, 对于近距离 (任意物距), 其规律性与上述的情况相似, 只是在数值上稍有差别。

§3.3 双胶薄透镜初始结构的设计计算

§ 3.3.1 双胶薄透镜物在无限远时的 P^{∞} 、 W^{∞} 与结构参数的关系

本节只是把薄透镜的初始像差结论具体应用到双胶合透镜。与单片透镜相同, 先以物在无限远为讨论对象, 且取规范化条件 $h \cdot \varphi = 1$ (见图 3-5), 物在无限远时 $u_1 = 0$, $u_3 - u_1 = h \cdot \varphi = 1$, 故 $h = 1$, $\varphi = 1$, $f' = 1$ 。导出公式组如下。

对双胶透镜, 物在无限远时,

$$P^{\infty} = aQ^2 + bQ + c \quad (3-11)$$

$$W^{\infty} = -\frac{a+1}{2}Q - \frac{b-\varphi_2}{3} \quad (3-12)$$

其中 a 、 b 、 c 为:

$$a = 1 + 2\frac{\varphi_1}{n_1} + 2\frac{1-\varphi_1}{n_2} \quad (3-13)$$

$$\mu = \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} \quad (3-14)$$

$$b = \frac{3\varphi_1^2}{n_1-1} - \frac{3\varphi_2^2}{n_2-1} - 2\varphi_2 \quad (3-15)$$

$$c = \frac{n_1\varphi_1^3}{(n_1-1)^2} + \frac{n_2\varphi_2^3}{(n_2-1)^2} + \frac{n_2\varphi_2^2}{n_2-1} \quad (3-16)$$

$$\frac{1}{r_1} = \frac{\varphi_1}{n_1-1} + \frac{1}{r_2} \quad (3-17)$$

$$\frac{1}{r_2} = \varphi_1 + Q \quad (3-18)$$

$$\frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_2} - \frac{1-\varphi_1}{n_2-1} \quad (3-19)$$

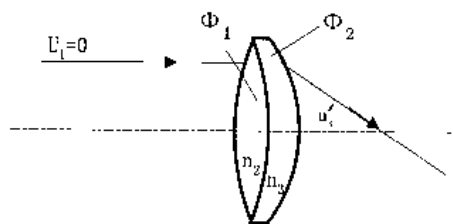


图 3-5 双胶薄透镜

§ 3.3.2 对 P^∞ 、 W^∞ 基本关系的分析

式 (3-11) 及式 (3-12) 是双胶薄镜 P^∞ 与 W^∞ 的基本关系式, 下面只是进一步分析此二式。

1. 分析一

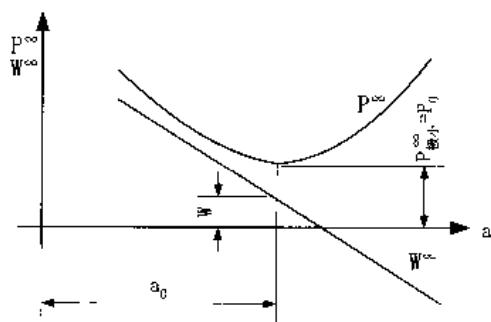


图 3-6 设计结果

P^∞ (即球差 S_1) 随变曲 Q 的变化是二次抛物线关系。联系过去的设计结果, 见图 3-6, 用求导数求极小值的方法, 可求出当 $dP^\infty/(dQ)=0$, 即

$$Q=Q_0=-\frac{b}{2a} \quad (3-20)$$

时, 得

$$P^\infty_{\text{极小}} = P_0 = c - \frac{b^2}{4a} \quad (3-21)$$

P_0 即双胶薄镜, 物在无限远时 P^∞ 的极小值, Q 即 P^∞ 极小值的弯曲。

2. 分析二

由式 (3-21) 知: W^∞ 随弯曲 Q 的变化是直线关系。又从式 (2-8) 知, 当光阑位于密接薄透镜组处时, $S_{II} = -Jw$ 。故此时彗差随弯曲的变化是直线关系。

当 P^∞ 取极小值 P (即弯曲 $Q=Q_0=-\frac{b}{2a}$) 时, 由式 (3-12) 得此时的 W^∞ (称为 W_0) 为:

$$W_0 = \frac{1-\phi_1}{3} - \frac{3-a}{6} Q_0 \quad (3-22)$$

从大量的实际镜头计算中发现, 对于大多数双胶合望远物镜式 (3-22) 中 W_0 值的变化范围不大。例如, 在双胶合透镜中:

$$\left. \begin{array}{l} \text{当冕玻璃在前时, } W_0=0.10 \\ \text{当火石玻璃在前时, } W_0=0.20 \end{array} \right\} \quad (3-23)$$

0.10~0.20 是较小的数值, 也就是说双胶合透镜弯曲到球差极小时, 其彗差也较小, 在图 3-6 上的表现是: 在球差极小的弯曲 Q_0 (极小值) 附近, W^∞ 直线正好穿过横坐标轴。这一结论具有实用意义。

但是, 图 3-7 所示的双胶合透镜, 虽然符合上述结论, 但其 $P^\infty_{\text{极小}} = P_0$ (也即 S_1) 太负了。故尽管有上述结论, 但不能说任一双胶合透镜“其球差好, 彗差必好”。

3. 分析三

根据前面的结论: 薄透镜光组的全部单色初级像

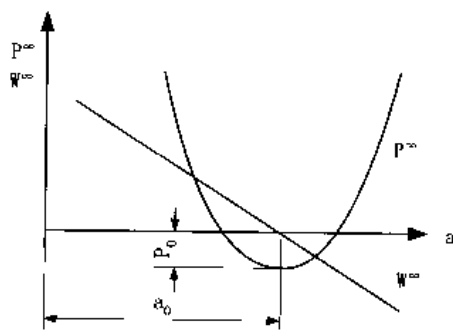


图 3-7 双胶合透镜举例

差 (S_I 到 S_V) 仅仅取决于 P 、 W 、 $\sum \frac{\varphi}{n}$ 三个量。联系到这里, 双胶合透镜的全部初级单色像差仅仅取决于 P^∞ 、 W^∞ 两个量。

现在我们证明, 每一双胶物镜的 P^∞ 和 W^∞ 两个量之间有一定的内在联系, 它们可以用该物镜的 P_0 一个量来代表。也就是说, 当需要设计 P^∞ 和 W^∞ 等于某两值的镜头时, 只需找出 P_0 等于其一值的镜头, 这样的 P_0 值一定能满足所需的 P^∞ 、 W^∞ 值。于是, 问题又可以进一步简化, 从两个量 (P^∞ 、 W^∞) 变成只要抓住一个量 P_0 , 这样在镜头设计时, 只需要根据 P_0 一个量来找出满足一定的像差要求的双胶玻璃对。

下面就分析 P^∞ 、 W^∞ 和 P_0 之间的关系。

如果将 P^∞ 配成 Q 的平方, 得

$$P^\infty = a(Q - Q_0)^2 + P_0 \quad (3-24)$$

$$W^\infty = -\frac{a+1}{2}(Q - Q_0) + W_0 \quad (3-25)$$

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= C - \frac{b^2}{4a} \\ Q_0 &= -\frac{b}{2a} \\ W_0 &= \frac{1-\varphi_1}{3} - \frac{3-a}{6}Q_0 \end{aligned} \right\} \quad (3-26)$$

以上即为透镜结构参数和 P^∞ 、 W^∞ 的关系式。为了讨论像差特性参数 P^∞ 、 W^∞ 和玻璃材料的关系, 从上面公式中消去与透镜形状有关的因子 ($Q - Q_0$), 得

$$P^\infty = P_0 + \frac{4a}{(a+1)^2}(W^\infty - W_0)^2 \quad (3-27)$$

前面说过, 当冕玻璃在前时 $W_0=0.1$, 火石玻璃在前时 $W_0=0.2$ 。而且, 对不同玻璃组合 a 值变化不太大, 在 2.3~2.45 之间。我们取其平均值 $a=2.35$, 则 $4a/(a+1)^2=0.85$, $(a+1)/2=1.67$, 将这些数值代入式 (3-27), 则有:

冕玻璃在前时,

$$P^\infty = P_0 + 0.85(W^\infty - 0.1)^2 \quad (3-28)$$

火石玻璃在前时,

$$P^\infty = P_0 + 0.85(W^\infty - 0.2)^2 \quad (3-29)$$

将 a 和 $(a+1)/2$ 的近似值代入式 (3-11) 和式 (3-12) 可得

$$P^\infty = 2.35(Q - Q_0)^2 + P_0 \quad (3-30)$$

$$W^\infty = -1.67(Q - Q_0) + P_0 \quad (3-31)$$

式 (3-29) 有很大的实用意义 (虽为近似), 因为它说明一个重要的近似规律: 在双胶合透镜中, 一对玻璃的 P^∞ 、 W^∞ 和这对玻璃的 P_0 有上述关系。当我们由消像差要求求出所需的 P^∞ 、 W^∞ 后, 就能按式 (3-29) 近似求出所需的 P_0 。换言之, 要是一对玻璃的 P_0 能满足此值, 就能满足所需的 P^∞ 、 W^∞ , 也就满足所需的消像差要求, 这样就大大方便双胶玻璃的选择。实际工作中, 利用式 (3-28)、式 (3-29)、式 (3-30)、式 (3-31) 等可求解双胶合透镜的结构参数。实际计算中可由 P^∞ 、 W^∞ 和规化的 C 值求玻璃材料和结构参数。规化的 C 值是总光焦度 $\varphi=1$ 时的 C 值, 表示色差要求。 $C=\sum (\varphi/\nu) = \varphi_1/\nu_1 + \varphi_2/\nu_2$, 由于双胶合中 $\varphi_2=1-\varphi_1$, 故 $C=\varphi_1(1/\nu_1 - 1/\nu_2) + 1/\nu_2$ 。

实际步骤如下:

(1) 由 P^∞ 、 W^∞ 求 P_0 。利用公式

$$P^\infty = P_0 + 0.85 (W^\infty - W_0)^2$$

式中 W_0 当冕玻璃在前取 0.1, 火石玻璃在前取 0.2。

(2) 根据 P_0 和规化 C 查双胶合透镜 P_0 表, 查出所需要的玻璃组合, 同时查出 ϕ_1 和 Q_0 值。

(3) 根据 Q_0 和 P^∞ 、 W^∞ 求 Q 。

由式 (3-30)、式 (3-31) 可解出

$$Q = Q_0 \pm \sqrt{\frac{P^\infty - P_0}{2.35}} \quad (3-32)$$

$$Q = Q_0 - (W^\infty - W_0) / 1.67 \quad (3-33)$$

由式 (3-32) 求得两个 Q 值, 取与式 (3-33) 相近的 Q 值, 再以二者的平均值作为要求的 Q 值。

(4) 根据 Q 值求 r_1 、 r_2 、 r_3 。

$$1/r_2 = \phi_1 + Q \quad (3-34)$$

$$1/r_1 = \phi_1 / (n_1 - 1) + 1/r_2 \quad (3-35)$$

$$1/r_3 = 1/r_2 - (1 - \phi_1) / (n_2 - 1) \quad (3-36)$$

由以上公式求出的半径, 对应透镜组的焦距为 1。如果我们所要设计的焦距为 f' , 则要把所有求出的半径乘以值距 f 才能得到实际的结构参数。

§ 3.4 两组双胶物镜初始结构设计

一般的单组双胶合透镜, 在像质较好的条件下, 口径只能做到 $\frac{D}{f'} \approx \frac{1}{5}$ (或 $u' - u \approx 0.1$), 否则高级球差太大; 视场只能做到 $2\omega = 10^\circ$, 否则像散太大, 采用两组双胶能增大口径和视场。

§ 3.4.1 选型

紧贴的 (或近于紧贴) 的两组双胶物镜 (见图 3-8) 应用于大口径、小视场物镜中, 其目的就是使偏角 $u' - u$, 由两组共同分担, 以减小高级像差。这种紧贴型主要只是用来消球差、色差、彗差三种像差, 只是口径可以比单组更大, $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2}$ (或 $u' - u = 0.25$) 而已, 不能消除像散, 视场不能大。

对称型物镜也是两组双胶物镜 (图 3-9), 但它属于小口径、大视场系统, 它的像差分析可参阅文献[12]。

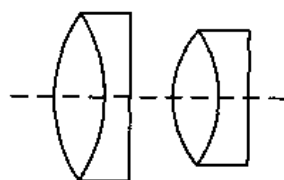


图 3-8 紧贴型

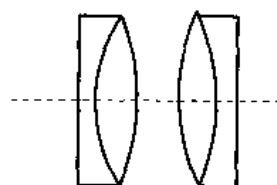


图 3-9 对称型

较远分离的两组双胶物镜在摄影物镜中称匹兹万型, 在显微物镜中称李斯特型 (见图

3-10)。

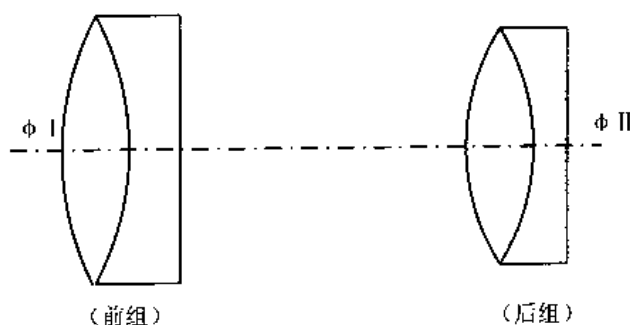


图 3-10 匹兹万型

§ 3.4.2 方案选择

方案一 当玻璃选择合适时，前组可单独消除球差、色差、彗差三种像差，后组也单独消此三种像差。于是，前、后组合成的整个物镜必能消除此三种像差，但是这种方案是有缺点的，因为由初级像差理论知当前后组 S_I 、 S_{II} 均为零时，不论光阑位置如何， S_{III} 必为定值： $S_{III} = J^2 \Sigma \varphi$ 。在此处为

$$S_{III} = J^2 (\varphi_I + \varphi_{II})$$

所以，这种消像差方案的缺点是不能消像散。也就是说，方案一没有充分利用该种型式物镜的潜力。

方案二 令 I 组球差不等于零（例如，I 组 S_I = 负值），II 组球差不等于零（例如，II 组 S_{II} = 正值），而 I、II 两组合成的 $\Sigma S_I = 0$ 。

此时，有可能消除像散（使 $S_{III} = 0$ ），这是更合理的，因为它是能充分利用这种型式消像差潜力的方案。

从理论上分析，这种型式还能消除畸变 S_V ，但由实践经验知道，消除畸变的要求将导致半径过小，使其他像差的高级量迅速增大，所以在实际中这种型式一般不能消除畸变。

这种型式前、后组全为正焦距，故场曲 $S_{III} = J^2 \Sigma \frac{\varphi}{n}$ 永为正值，无法消除。场曲是限制这种型式视场扩大的主要矛盾。

在保证像质较好的条件下，这种型式的口径能达到 $u' - u = 0.25$ 左右 $\left(\frac{D}{f'} \approx \frac{1}{2} \right)$ ，视场 2ω 能达到 20° 左右，属于大孔径、中等视场系统。而单组双胶合透镜只能做到 $u' - u = 0.1 \left(\frac{D}{f'} \approx \frac{1}{5} \right)$ ， $2\omega = 10^\circ$ 。

这种型式能消除轴上色差和倍率色差，因为前后组各有一 $C_{前}$ 、 $C_{后}$ 共有两个变量，能够使整组的 ΣC_l 和 ΣC_m 达到所需的值。

消除两种色差的另一种简便方法是使前组、后组分别单独消除轴上色差，此时 $C_{前} = 0$ ， $C_{后} = 0$ ，从初级像差理论知，此时不论光阑位置何在，倍率色差必为零。

§ 3.5 小气隙双分透镜

§ 3.5.1 双胶合组变小气隙双分透镜的目的

有时,把双胶合透镜的胶合面分开一个小间隙(气隙 d 可能小到零点几毫米,见图 3-11)。双胶合透镜变成小气隙双分透镜的目的如下:

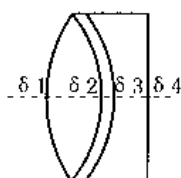


图 3-11 胶合面的间隙

(1) 在大孔径物镜(例如 $\frac{D}{f} > \frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 的物镜)中,分离的作用是减小高级球差。

(2) 在孔径不大的物镜中,分离的目的是便于调整 f'_s 。例如,在某些焦距值要求很准的双目测距仪望远物镜和平行光管中,虽然 $\frac{D}{f}$ 只有 $\frac{1}{6} \sim \frac{1}{10}$,也采用双分型,目的是在装调时可以靠改变气隙 d ,

以微量改变 f'_s ,由此补偿玻璃材料或加工误差引起的焦距误差。

(3) 当透镜外径较大时,例如 $D_{\text{外}} > 100 \text{ mm}$,胶合将引起困难,在使用过程中易裂开,此时也宜用非胶合双分离透镜。

§ 3.5.2 小气隙双分透镜能减小高级球差

双胶透镜之所以能消除球差,是由于胶合面(r_2)产生的负球差能抵消 r_1 、 r_3 两面所产生的正球差,故 r_3 必须产生大量的负球差,表现形式是 r_3 半径较小,弯得厉害。由于 r_3 较小,必然产生大量的高级负球差,这就是双胶透镜高级球差的来源,当边缘光线球差消除到零时,高级球差在像差曲线上的表现是 0.707 带的肚子太大。图 3-12 是两个镜头的球差曲线,其边缘光线球差都已消除为零,但镜头 I 的带球差大,镜头 II 的带球差小。

双胶改成小气隙双分后见图 3-13,其中 r_1 、 r_2 、 r_4 产生正球差, r_3 产生大量负球差。光线经 a 镜后会聚,由于气隙的存在,b 镜上的入射高 h_3 低于 h_2 。a 镜本身有正球差,且愈是边缘的光线,球差愈厉害,故相对说来,边光 h_3 降低得愈厉害。于是,边缘光线产生的高级负球差相应地降低,结果使肚子减小。

分步照相机物镜就利用小气隙双分来改善高级球差的。

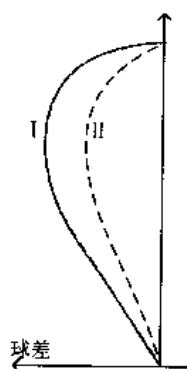


图 3-12 球差曲线

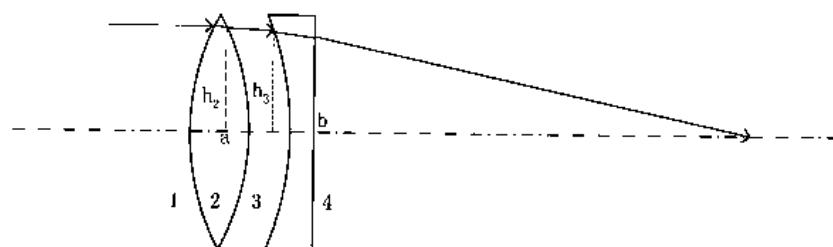


图 3-13 小气隙双分透镜

§ 3.6 齐明弯月透镜结构参数求解

由像差理论知道：在下列两种情况下，折射面不产生某些像差：①物体在折射面球心时，不产生球差、彗差；②物体在不晕点时，不产生球差、彗差、像散（不产生此三种像差时称为“不晕”或“齐明”）。于是人们利用这一性质设计出齐明透镜（球心不晕透镜）。齐明透镜在显微物镜、聚光镜的前组（或前组的主要组成部分）得到广泛的应用。在聚光镜的初始结构计算和采用试验法设计显微物镜时，有时该初始结构不能很好地符合设计要求，就需要替换某些组元，这就不能不涉及齐明透镜的计算。

源于 20 世纪 60 年代平场物镜设计时的分组算法在折射式物镜设计计算中是相当有效的。显微物镜有条件地分配成两组，开始阶段可独立地校正像差。当两组结合时，要注意：①必须得到要求的光学特性，如工作距离等；②保证必要的像差校正。实践证明，利用折射面齐明特性适用于数值孔径很大的光来通过前组，这样使后组光束孔径可降低很多，且前组不会引起很大的像差，同时因后组数值孔径较小，可根据三级像差理论利用代数法来计算，如设计平场物镜，应使前后两组结合时 $S_{IV} \approx 0$ ，前组的 S_{IV} 值就可据此决定。

§ 3.6.1 显微物镜齐明弯月前组

众所周知，两光学介质的分界球面具有三对共轭的齐明点。在所有的齐明点上没有球差，并且满足正弦条件，而对于某些点也没有三级像散。图 3-14 所示为半径为 r 的球面，其物空间的折射率为 n ，像空间的折射率为 n' 。点 A_1 和 A'_1 、 A_2 和 A'_2 、 A_3 和 A'_3 分别为第一、第二和第三类共轭齐明点。

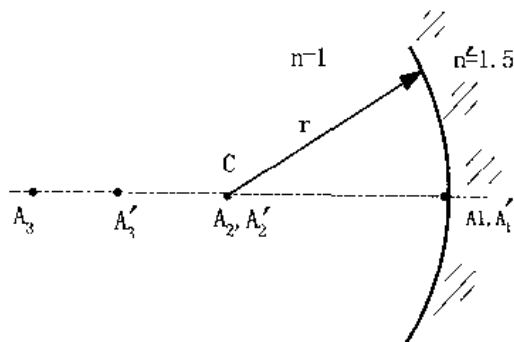


图 3-14 折射面的齐明点

点 A_1 和 A'_1 与折射面的顶点重合，即它们满足条件 $s=s'=0$ 。在此点上球差、彗差和像散都为零。

点 A_2 和 A'_2 也重合在一起，并位于折射面的中心点 C 上。条件 $s=s'=r$ 是对它们的正确表达。在此点上球差和彗差都为零，但像散不等于零。

对于齐明点 A_3 和 A'_3 ，它们到折射面顶点的距离、折射面的半径和光学介质的折射率三者之间具有下列的关系式：

$$\begin{cases} s = r \left(1 + \frac{n'}{n} \right) \\ s' = r \left(1 + \frac{n}{n'} \right) \end{cases} \quad (3-37)$$

在点 A_3 和 A'_3 上，如同在点 A_1 和 A'_1 上一样，球差、彗差和像散都为零。

利用齐明点的上述性质和它们之间的关系，可以形成四种型式的齐明弯月透镜，如图 3-15 所示。在 A 型弯月透镜中，第一面有第二类齐明点，而第二面则有第三类齐明点；在 B 型弯月透镜中，两个面都有第二类齐明点；在 C 型弯月透镜中，第一面有第三类齐明点，而第二面则有第二类齐明点；在 D 型弯月透镜中，两个面都有第三类齐明点。

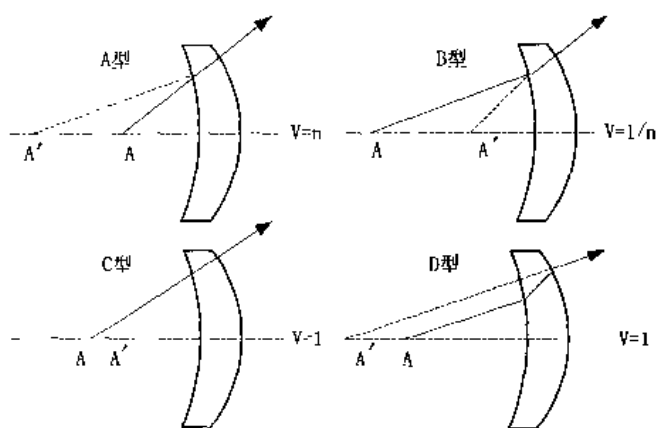


图 3-15 四种型式的齐明弯月透镜

在显微镜物镜中，A 型弯月透镜得到最广泛的应用。它们的优点是工作距离大，等于第一面的半径；垂轴放大率亦大，等于折射率。缺点是第一面产生像散和很大的色差，因此在计算视场不大的单色物镜时才应用这样的弯月透镜作为前置透镜。A 型弯月透镜的结构元素可以按下列式子确定：

$$\begin{aligned} r_1 &= s_1 \\ r_2 &= \frac{s_2}{1 + \frac{n'}{n}} \\ s_2 &= s_1 - d \end{aligned}$$

式中 d 为弯月透镜的厚度，可根据结构上的要求来选择。

在计算低倍物镜时，有时利用 C 型和 D 型弯月透镜。它们的放大率等于 1，因此它们不能降低后组的孔径。第一类齐明点用得相当少，主要用来计算不要求工作距离的系统。

§ 3.6.2 聚透镜第一片齐明透镜

利用上述特性可构成不产生球差、彗差的单片正透镜，如图 3-16 所示。灯丝 A 放在第一面 r_1 的球心。光线 1 过 r_1 时不折射，不产生球差、彗差。

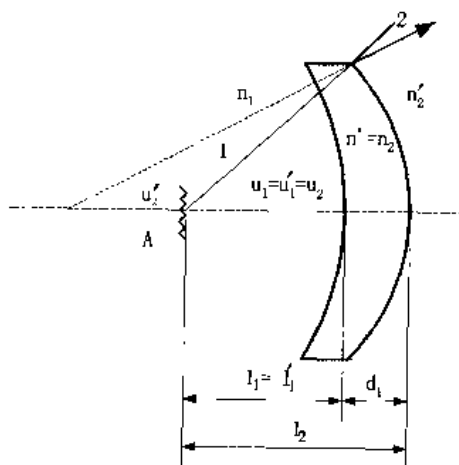


图 3-16 不产生球差、彗差的单片正透镜

光线继续前进，射到第二面后，适当选择半径 r_2 ，使 A 点正好处于 r_2 面不晕点的位置，

光线经 r_2 折射后按 $2'$ 方向出射第二面, 也不产生球差、彗差、像散。这就是所谓“球心-不晕镜”, 即物体位于一面的球心, 且位于另一面的不晕点。

§ 3.6.3 设计实例

使用上而聚光镜的例子, 设灯丝离第一面 $\ell_1 = -12 \text{ mm}$ 。同前, 则 r 应为 $r_1 = -12 \text{ mm}$ (物在球心)。第一面不折射, 即 $\ell'_1 = -12 \text{ mm}$, 若 $d_1 = 8$, 则

$$\ell_2 = \ell'_1 - d_1 = -20 \text{ mm}$$

再求不晕面的半径 r_2 :

$$r_2 = \frac{\ell_2 n_2}{n_2 + n'_2} = \frac{(-20)(1.5163)}{(1.5163) + 1} = -12.052 \text{ mm}$$

到此, 求出了同心不晕透镜的全部结构, 即 $r_1 = 12 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ mm}$, $r_2 = -12.052 \text{ mm}$, $\ell_1 = -12 \text{ mm}$ 。

后面第 II、III 镜的设计方法与 § 3.2 的薄透镜最小初级球差方法完全相同 (以 A'_2 作为第 II 镜的“物”, 依次往下设计)。

不晕面似乎是没有球差、彗差、像散三种像差的理想折射面。然而, 一切事物都是一分为二的, 由于不晕面的半径和物 (像) 距之间有一定的配合关系 (见图 3-17), 即

$$r = \frac{\ell n}{n' + n} \quad (3-38)$$

$$r = \frac{\ell' n'}{n' + n} \quad (3-39)$$

$$\frac{\ell}{\ell'} = \frac{n'}{n} = \frac{u'}{u} \quad (3-40)$$

也就是说, r 和 ℓ 是相互制约的。若 ℓ 已定, 则满足不晕情况的 r 必须符合式 (3-38); 反之, 若 r 已定, 则满足不晕情况的 ℓ 也必须符合式 (3-38)。

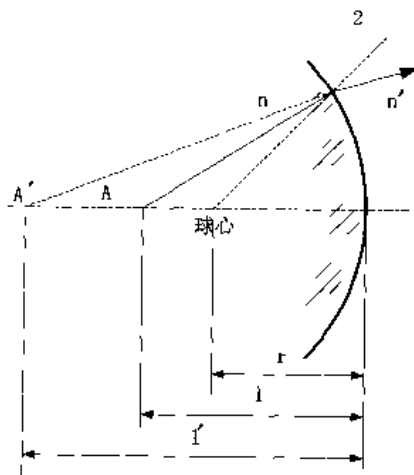


图 3-17 不晕面的半径与物 (像) 距的关系

从式 (3-38)、式 (3-39) 可见, 满足不晕情况的 r 、 ℓ 和 ℓ'_1 必同号 (即物和像必定位于球面的同一边, 并同在凹面那一边), 这样就限制了不晕面的应用范围, 不是在任意物像距时都能应用。

从式 (3-40) 可见, 不晕情况的横向放大率 $\beta = \frac{nu}{n'_2 u} = \frac{n^2}{n'_2}$ 也是受限制的。

在上例中, 不晕面的 $n=1.5163$, $n'=1$, $\beta = \frac{(1.5163)^2}{(1)^2} = 2.3$, 即不晕情况只能用于放大率等于 2.3 时。

总之, 不是在任意透镜中都能应用看似很有利的不晕特性。

在聚光镜设计中, 对 β 、 r 、 ℓ 和 ℓ' 等没有严格的要求, 在上述限制下仍有足够的回旋余地, 但是从式 (3-40) 可得: 不晕面的偏折负担 (偏角) 为

$$u' - u = \frac{n'u}{n} - u = \left(\frac{n' - n}{n} \right) u \quad (3-41)$$

即不晕面负担的偏角有一定限制。在本例中,

$$u' - u = \frac{1 - 1.5163}{1.5163} (-0.6) = 0.204$$

既然 I 镜只能负担偏角 0.204, 这偏角中剩下的 $0.75 - 0.204 = 0.546$ 将由 II、III 镜共同负担。经比较, 可见 II、III 镜的负担比前加重, II、III 镜造成的球差迅速增大, 尽管 I 镜本身不产生球差, 但整个聚光镜的球差反而增大, 所以在聚光镜中是否值得采用不晕面是有疑问的, 应针对具体情况进行分析、比较。

一般, 从式 (3-41) 可见, 当 u 角愈大时, 不晕面负担的偏角愈大, 也即不晕面能分担很大的偏角而不产生球差、彗差、像散等三种像差, 此时采用它更有利。对于 u 角特大的高倍显微物镜 ($\sin u$ 达 0.8 左右) 和大孔径聚光镜, 宜采用球心不晕镜。

第4章 典型光学部件设计

如前述, 光学部件是指光学系统中由几个光学零件胶合或按某种要求组合而成的, 并在该系统的功能上有一定的独立作用的组成部分。而本章讨论的光学部件设计主要指由透镜组成的透镜组、镜头。它们是组成传统光学仪器(如望远镜、显微镜、照相机、投影仪和电影放映机等)的成像光学系统的重要部分, 原则上都要求单独地、相当好地校正像差。因此, 典型光学部件设计是光学设计中基本而又十分重要的内容。从光学技术上看, 除了结构复杂的照相物镜, 高倍平场消色差物镜和平场复消色差物镜设计存在较大的难度外, 本章涉及的其他镜头都能在资料中查到相应的初始结构, 可采用 § 1.2.3 中的试验法, 加上 § 2.7 提到的设计技巧的灵活运用, 其设计问题是不难解决的。

各类镜头的设计特点主要是由它们的光学特性决定的。为此, 下面各节都首先介绍镜头的光学特性, 然后就有代表性的其中某种镜头展开讨论。

§4.1 望远物镜设计

§ 4.1.1 望远物镜光学特性与结构类型

1. 光学特性

望远镜一般由物镜、目镜和棱镜(或透镜)转像系统构成, 望远物镜是整个望远系统的一个组成部分。

入射光瞳直径(或物镜口径) D 决定物镜的分辨本领。物镜成像大小与物镜的焦距 $f'_{\text{物}}$ 成正比。而 D 和 $f'_{\text{物}}$ 又分别决定系统的外型尺寸, $D/f'_{\text{物}}$ (相对孔径) 决定物镜结构的复杂程度以及像面的光照度, 视场 2ω 决定观察范围。因此, 物镜三个重要的光学特性是相对孔径 D/f'_1 、焦距 f'_1 和视场 2ω 。具体来讲, 望远物镜的光学特性有:

(1) 相对孔径不大。在望远系统中, 入射的平行光束经过系统以后仍为平行光束, 因此物镜的相对孔径 (D/f') 和目镜的相对孔径 ((D'/f'_0)) 是相等的。目镜的相对孔径主要由出瞳直径 D' 和出瞳距离 l'_e 决定。目前观察望远镜的出瞳直径 D' 一般为 4 mm 左右, 出瞳距离 l'_e 一般要求为 20 mm 左右。为了保证出瞳距离, 目镜的焦距 f'_0 一般不能小于 25 mm。这样, 目镜的相对孔径为

$$\frac{D'}{f'_0} = \frac{4}{25} \approx \frac{1}{6}$$

所以望远物镜的相对孔径 $\frac{D}{f'_{\text{物}}}$ 一般小于 $\frac{1}{5}$ 。

(2) 视场较小。望远物镜的视场角 ω 和目镜的视场角 ω' , 以及系统的视放大率 Γ 之间有以下关系:

$$\tan \omega = \frac{\tan \omega'}{\Gamma} \quad (4-1)$$

目前常用目镜的视场 $2\omega'$ 大多在 70° 以下，这就限制了物镜的视场，通常望远物镜的视场不大于 10° 。

望远物镜一般主要校正轴向边缘球差 $\delta L'_m$ ，轴向色差 $\Delta L'_m$ 和边缘孔径的正弦差 SC'_m 。而不校正 x'_b ， x'_p ，和 $\Delta y'_r$ ，以及垂轴色差 $\Delta y'_{FC}$ 。

由于望远物镜要和目镜、棱镜或透镜式转像系统组合起来使用，所以在设计物镜时，应考虑到它和其他部分之间的像差补偿关系。在物镜光路中有棱镜的情形，棱镜的像差一般要靠物镜来补偿，即由物镜来校正棱镜的像差。另外，目镜中常有少量球差和轴向色差无法校正，也需要依靠物镜的像差给以补偿。所以物镜的 $\delta L'_m$ ， SC'_m ， $\Delta L'_{FC}$ 常常不是校正到零，而是要求它等于指定的数值。

望远镜属目视光学仪器，设计目视光学仪器（包括望远镜和显微镜）一般对 F 光（486.3 nm）和 C 光（656.28 nm）计算和校正色差，对 D 光（589.3 nm）校正单色像差。

2. 结构类型

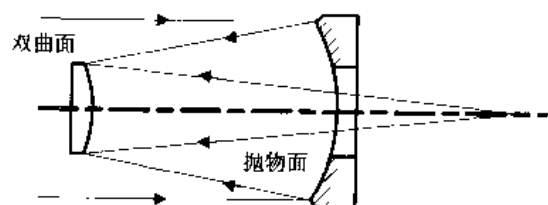
望远镜分折射式、反射式和折反射式三类。

（1）反射式和折反射式物镜。

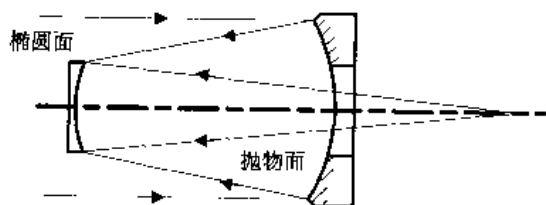
反射式和折反射式物镜在大孔径、长焦距的望远系统中采用。因为反射镜不产生色差，光路反射转折可以缩短轴向长度。

双反射面系统是应用较多的反射式物镜，主要有两种型式。一是卡塞格林系统，见图 4-1（a），其主镜（大反射镜）是抛物面，副镜（小反射镜）是双曲面，成倒像，镜筒短；二是格列果里系统，见图 4-1（b），其主镜仍是抛物面，副镜是椭球面，成正像，镜筒长。

由于非球面的加工困难，轴外像差又不能校正，因而出现折反射系统。图 4-2 是卡塞格林系统的改进。由图 4-2 可见，折反射镜是由球面主镜 1 和校正透镜（又称校正板）2 组成。因为主镜的像差能得到校正板的补偿，故能提高像质，增大视场和口径。较为著名的折反射物镜有斯米特物镜、马克苏托夫物镜和同心球壳校正板式物镜。

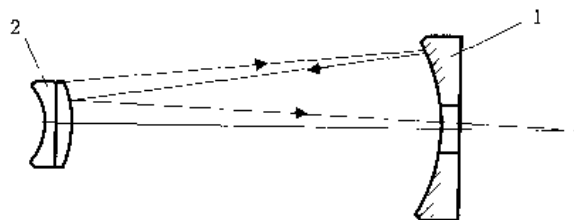


（a）卡塞格林系统



（b）格列果里系统

图 4-1 反射式望远物镜



1—球面主镜 2—校正透镜

图 4-2 折反射式望远物镜

（2）折射式物镜。

折射式物镜种类很多,主要有双胶合、双胶合-单、单-双胶合、三分离、对称、摄远 6 种,如图 4-3 所示。其主要光学特性、特点如下。

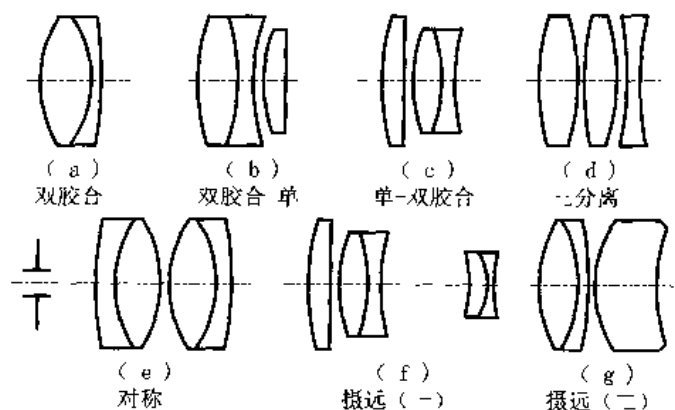


图 4-3 折射式望远物镜

(a) 双胶合: 视场为 $2\omega < 10^\circ$, 不同焦距适用的最大相对孔径 $f'/\frac{D}{f'}$ 为 $50/\frac{1}{3}$ 、 $150/\frac{1}{4}$ 、 $300/\frac{1}{6}$ 、 $1000/\frac{1}{10}$ 。

(b) 双胶合-单: 相对孔径 $\frac{D}{f'}$ 为 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$, 透镜口径 $D < 100 \text{ mm}$, 视场角 $2\omega < 5^\circ$ 。

(c) 单-双胶合: 相对孔径 $\frac{D}{f'}$ 为 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2.5}$, 透镜口径 $D \leq 100 \text{ mm}$, 视场角 $2\omega < 5^\circ$ 。

(d) 三分离: 相对孔径 $\frac{D}{f'}$ 为 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{1.5}$, 视场角 $2\omega < 4^\circ$ 。

(e) 对称式: 适合于短焦距, 大视场, 小相对孔径使用: $f' < 50$, $\frac{D}{f'} < \frac{1}{5}$, $2\omega < 30^\circ$ 。

(f) 摄远 (-): 由正、负两个分离薄透镜组构成, 系统长度小于焦距, 系统的相对孔径受前组相对孔径的限制。

(g) 摄远 (二): 由双胶合-厚弯月构成。

§ 4.1.2 双胶合、双分离物镜设计

双胶合、双分离物镜这两种镜头是最简单的镜头。可从相关资料找到合适或相近的结构(如通过“焦距缩放”可达到焦距要求等), 通过电子计算机进行光路计算, 一般比较容易得到良好的结果。

1. 双胶合物镜设计

双胶合物镜是一种常用的望远物镜, 它结构简单, 光能损失小, 合理选择玻璃和弯曲能校正球差、彗差和色差, 但不能消除像散、场曲与畸变, 故视场不大, 一般不超过 10° , 二级光谱与色球差也不能校正。一般在焦距不长、相对孔径不大的系统中采用。若物镜焦距加大, 相对孔径则随之减少, 在获得优良像质的情况下, 它们之间的对应关系如表 4-1 所示。

表 4-1 物镜焦距与相对孔径的对应关系

焦距 f' /mm	50	100	150	200	300	500	1 000
相对孔径 (D/f')	1/3	1/3.5	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10

例如，激光测距瞄准物镜，即是一个双胶合物镜，其后有正像斯米特屋脊棱镜（图中为展开图）如表 4-2（a）、（b）所示。

表 4-2（a） 双胶合物镜结构参数

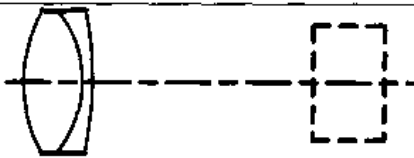
主要技术指标		结 构					
$D/f' = 1/5$ $D = 40 \text{ mm}$ $f' = 199.4066 \text{ mm}$ $2\omega = 5^\circ$							
面号	r/mm	D/mm	n_D	ν	D_g/mm	玻璃	
1	126.73				40		
2	-85.06	7	1.516 3	64.1	39.65	K9	
3	-258.00	4.2	1.647 5	33.9	39.613	ZF1	
4	∞	125.543			25.272		
5	∞	74.4945	1.516 3	64.1	19.662	K9	

表 4-2（b） 像差数据

h/h_m	$\delta L'$	SC'	$(D-d) \delta n$
1	0	0.000 163	0.000 137 73
0.707	-0.043 6	0.000 044	-0.000 038 28

2. 双分离物镜设计

双分离物镜的正负透镜用一空气隙隔开，弯曲较双胶物镜自由，能减少中间带球差，加大相对孔径 $\left(\frac{1}{2.5} \sim \frac{1}{3}\right)$ ，视场角达 12° ，色球差不能校正，二级光谱由于透镜分离而略有增大。它和双胶物镜比较有如下优缺点：

- （1）适用于直径加大的情况，双胶合物镜因受胶层应力及脱胶的影响，直径不宜超过 100 mm，而双分离物镜没有这种限制；
- （2）光能损失比双胶物镜大些；
- （3）双分离物镜装配对中困难，使用中也容易丧失共轴性。

设计实例如表 4-3（a）、（b）所示。

表 4-3 (a) 双分离物镜结构参数

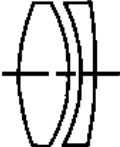
主要技术指标		结 构					
$D/f'=1/4$ $f'=118.596\text{ mm}$ $2\omega=5^\circ$							
参 数							备注
面号	r/mm	D/mm	n_D	v	D_g/mm	玻璃	
1	59.46				25		
2	-47.33	4.5	1.516 3	64.1	24.614	K9	
3	-43.43	2.1			23.777		
4	-175.12	2	1.672 5	32.23	23.741	ZF2	

表 4-3 (b) 像差数据

h/h_m	$\delta L'$	SC'	$\delta L'_{FC}$
1	-0.004 7	-0.000 117	0.059 0
0.85	0.004 2	0.000 052	0.022 0
0.707	0.001 7	0.000 097	0.002 3
0.5	-0.002 4	0.000 076	-0.027 9
0	0	0	-0.061 1

§ 4.1.3 摄远物镜设计

摄远物镜是由一正透镜组和一远离的负透镜组成，或者在双胶物镜后加一块厚弯月形透镜组成。这种物镜除校正球差、色差、彗差和像散外，由于后组是负光焦度，故能校正场曲。这种物镜主面外移，能缩短筒长。

1. 正-负镜组远离摄远物镜设计

这种结构形式的优点有：

(1) L (系统长度) $< f'$ ，一般 $L = (2/3 \sim 3/4) f'$ ；

(2) 因为由两薄透镜组构成，因此可能校正 4 种单色像差——球差、彗差、场曲和像散，因此它的视场角比较大，同时可利用它的校正像差的能力来补偿目镜的像差，使目镜的结构简化，或提高整个系统的像质。

这种物镜的缺点是：系统的相对孔径比较小，因前组的相对孔径一般比整个系统的相对孔径大 1 倍以上，如双胶合光组 $D/f' \approx 1/4$ ，则整个光组的 $D/f' \approx 1/8$ 。

正-负镜组远离摄远物镜的结构参数见表 4-4。

2. 双胶合-厚弯月摄远物镜设计

立式光学比较仪物镜就属这一类型，引入厚弯月透镜是为了校正场曲，其结构参数见表 4-5 (a)，像差数据见表 4-5 (b)。

表 4-4 正-负-镜组远离物镜结构参数

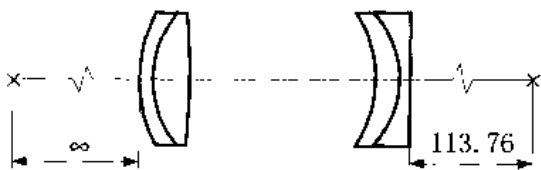
主要技术指标		结 构					
$D/f' = 1/8.8$ $f' = 220.21\text{mm}$ $2\omega = 6^\circ$ $f_F' = 113.76\text{mm}$							
参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n_D	v	D_0/mm	玻璃	
1	77.98				25		
2	32.81	3	1.672 5	32.23	25	ZF2	
3	-192.31	7	1.589 1	61.25	25	ZK3	
4	47.42	47.63			19		
5	-22.28	4	1.672 5	32.23	19	ZF2	
6	∞	2	1.546 7	62.78	19	BaK3	

表 4-5 (a) 双胶合-厚弯月物镜结构参数

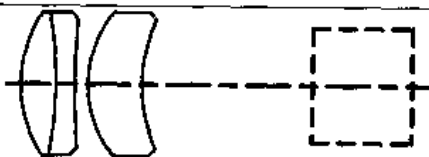
主要技术指标		结 构					
$f'=204.194\text{ mm}$ $D/f'=1/10$ $2\omega=4^{\circ}48'$							
参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n_D	v	D_0/mm	玻璃	
1	47.619				16		
2	-140.916	2.96	1.516 3	64.1	18	K9	
3	243.9	1.98	1.647 5	32.23	18	ZF1	
4	36.905	0.93			16		
5	26	11.86	1.539 9	59.67	16	BaK2	
6	∞	66.44			16		
7	∞	20	1.539 9	59.67	16	BaK2	

表 4-5 (b) 像差数据

h/h_m	$\delta L'$	SC'	$(D-d) \delta n$	x'_1	x'_s	x'_u	p
1	0.0223	0.000152	-0.000038	-0.136	-0.0851	-0.0512	0.000806
0.85	-0.0022	0.000132	-0.000035	-0.0994	-0.0618	-0.0376	0.000581
0.707	-0.0113	0.000104	-0.000028	-0.0692	-0.0429	-0.0264	0.000402
0.5	-0.0110	0.000058	-0.000016	-0.0349	-0.0215	-0.0134	0.000201
0.3	-0.0052	0.000022	-0.000006	-0.0126	-0.00778	-0.00486	0.000072

§4.2 显微物镜设计

§ 4.2.1 显微物镜概述

显微镜（microscope）是指为提高人们获得微小细节信息能力的光学仪器。显微镜由物镜和目镜组合而成，其作用是把被观察的物体，放大为一个实像位在目镜的焦面上，然后通过目镜成像在无限远供人眼观察，如图 4-4 所示。整个显微镜的性能——视放大率和衍射分辨率主要是由它的物镜决定的。在一架显微镜上通常都配有若干个不同倍率的物镜和目镜供互换使用。为保证物镜的互换性，要求不同倍率的显微物镜的共轭距离（从物平面至像平面的距离）相等，我国国家标准 GB2609—81《显微物镜系列》规定为 195 mm。所以显微物镜的倍率越高，焦距就越短。另有一种所谓“无限筒长”（“无限像距”）的显微物镜，被观察物体通过物镜以后，成像在无限远处；在物镜的后面，另有一固定不变的辅助物镜，再把像成在目镜的焦面上，如图 4-5 所示。

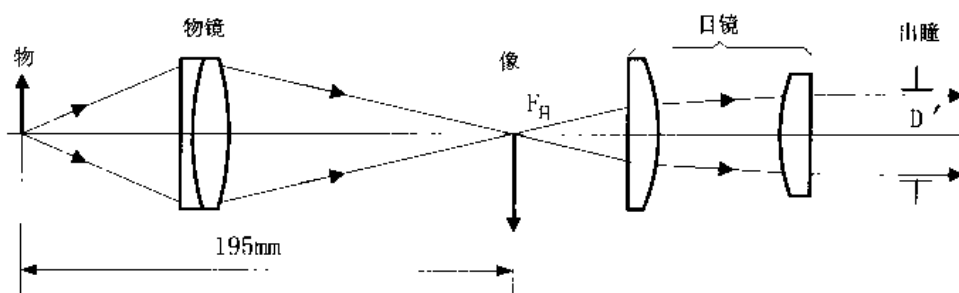


图 4-4 共轭距为 195 的显微镜光路图

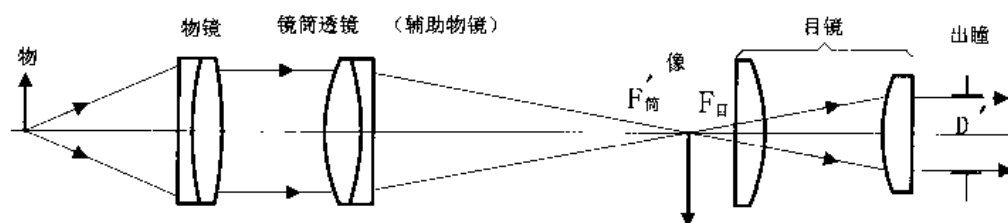


图 4-5 无限远像距显微镜光路图

§ 4.2.2 显微物镜的光学特性

显微物镜能将近距物体成一放大实像，它的孔径光阑在透镜组附近或后焦面上，如图 4-6 所示。短焦距、大孔径、小视场是显微物镜的特点。选用或设计时，考虑的光学特性包括下述几个方面，其中最重要的是放大率、数值孔径和线视场。

1. 物镜放大率（magnifying power of objective）

根据物镜成像规律满足以下关系式：

$$\text{物镜共轭距 } L = l' - l$$

$$\text{结构长度} = G + HH_1$$

$$\beta_{\text{物}} = \text{像高/物高} \approx l'/l \quad (\text{共轭距离为 } 195 \text{ mm 时})$$

$$\beta_{\infty \text{物}} = 250 \text{ mm/物镜焦距 (mm)} \quad (\text{共轭距离为无限远时, } \beta_{\infty \text{物}} = \text{辅助物镜焦距/物镜焦距})$$

物镜焦距

$$f' = \frac{-G}{\beta_{\text{物}} + 1/\beta_{\text{物}} - 2} \quad (4-2)$$

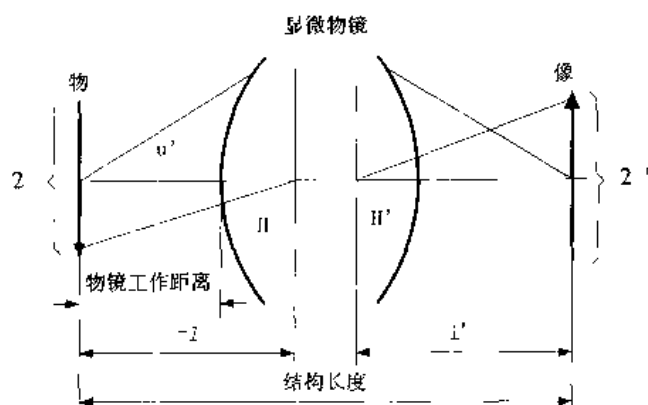


图 4-6 显微物镜成像

物镜共轭距距离又称物-像距离，指光学安装的基本尺寸。它是物面和第一次像之间在空气中的沿轴距离，国家标准规定为 195 mm 和无限远两种，通常结构长度是一定的，主面 HH_1 很小，所以，可以认为 $L \approx G = 195 \text{ mm}$ （标准显微镜）。由式（4-2）可见，高倍物镜焦距短。为便于选用，显微物镜以放大率作为标志，相当于给出了焦距。

2. 线视场 2η

物方视场 $2\eta = 2\eta' / \beta_{\text{物}}$ (mm) (4-3)

像方视场 $2\eta'$ 由镜筒直径限制，是一定值。如国家标准 GB9242-88《显微镜目镜和镜筒的配合尺寸》规定：显微镜目镜外壳直径 d_1 分别为 $\phi 23.2\text{h8}$ （生物、金相、偏光等显微镜）、 $\phi 30\text{h8}$ （偏光、体视显微镜和广角目镜）、 $\phi 34\text{h8}$ （体视显微镜），上述直径单位均为 mm。由此可知，视场实际尺寸为上述规定尺寸减去目镜筒厚度。如，对 $\phi 23.2\text{h8}$ 生物显微镜最大视场取 20 mm，一般取 $\phi 18 \text{ mm}$ 。

3. 数值孔径 (NA)

数值孔径大小直接影响分辨率和像的光亮度，它是物镜的主要指标。显然物镜结构和校正像差的复杂程度基本上取决于它。

倍率 β 和 f' 有如下关系：当共轭距 L 一定时， $f' = [-\beta / (1 - \beta)^2] \cdot L$ ；对无限筒长物镜来说， $f' = -250 / \beta$ 。从这两式可看出， β （绝对值）越大， f' 越短。因此倍率的内涵与焦距是一致的。

数值孔径 (NA) 如下：

$$NA = n \sin u \quad (4-4)$$

式中 n 为物镜物方折射率， u 为物方孔径角之半。对于非浸液物镜来说，NA 与 D/f' 近似符合以下关系： $D/f' \approx 2NA$ ，如 10 倍显微物镜，当 $NA = 0.25$ 时相当于 $D/f' = 1/2$ ，这反映了 NA 与 D/f' 是一致的。显微物镜的视场由目镜视场决定，对无限筒长显微镜来说，筒镜透镜物方视场角 = 物镜像方视场角，则 $\tan \omega = y' / f'_{\text{辅}}$ （ $f'_{\text{辅}} = 250 \text{ mm}$ ） $= 0.04$ ， $\omega = 2.3^\circ$ 。所以物镜视场角 2ω 不大于 5° ，有限筒长显微镜也大致相当。可见，显微物镜的光学特性参数通过 β 、NA 很容易转换为用 f 、 D/f 和 2ω 来描述。

4. 物方介质

前已指出, 普通显微物镜的物方介质 ($n=1$)。为了提高数值孔径, 选用高折射率的物方介质, 如杉木油 ($n=1.515$)、水 ($n=1.333$)、甘油 ($n=1.463$)、溴代萘 ($n=1.656$) 等。

5. 盖玻片厚度

盖玻片指在显微标本片中覆盖生物标本的玻璃片。观察生物或化学标本宜用盖玻片将它展平, 以免脏污和干裂, 有利于保存。盖玻片在物方成像光路内, 应按国家标准 GB6273-86《显微镜用盖玻片》标准的要求, 控制它的折射率 ($n_g=1.525 \pm 0.0015$) 和厚度。厚度一般为 $0.17_{-0.04}^0 \text{ mm}$, 40 倍以上的高倍物镜要求厚度为 $0.17_{-0.02}^0 \text{ mm}$ 。

6. 机械筒长 (mechanical tube length)

有限像距的物镜机械筒长是从物镜的安装定位面到显微镜镜筒上端面的距离, 我国标准定为 160 mm。镜筒上端面是安装目镜的定位面。对无限像距的物镜, 机械筒长可认为是无限远。

显微物镜是按一定的机械筒长设计的, 当然也有一些特殊的物镜允许改变筒长。在选用互换物镜时必须注意。对于物镜后面须加棱镜等光学另件的系统, 棱镜的等效空气层厚度应计算在机械筒长之内。有些反射照明的显微镜后常加斜放的平行平面玻璃板, 它应在平行光路内工作, 以免引入像差, 需要有无限远筒长的物镜, 然后再由会聚的辅助物镜成实像。

7. 工作距离 (working distance of objective)

物镜工作距离是指物镜前表面顶点到物平面的沿轴距离。物镜倍率高、焦距短, 工作距小。如 100 \times 物镜工作距为 0.19 mm。观察具有较大厚度的对象要求工作距大, 这对于高倍物镜是困难的。

标准显微物镜筒表面都有标记, 写明放大率、数值孔径、机械筒长及盖玻片厚度等数值 (均以 mm 为单位) (见图 4-7)。盖玻片厚度处若记为 “—”, 指盖玻片可用可不用; 记为 “0” 时, 意思是不用盖玻片。机械筒长与盖玻片厚度常刻在一起, 因为它们与物镜的像差校正有关。此外, 常用物镜外壳表面有不同的颜色圈, 如表 4-6 (a) 所示; 长工作距离物镜、相衬物镜、偏光物镜在物镜类别前分别加 C、X、P 为标志; 生物显微镜物镜用螺纹与显微镜本体连接, 螺纹均为英制尺寸, 如 WJ4/5" \times 1/36"。

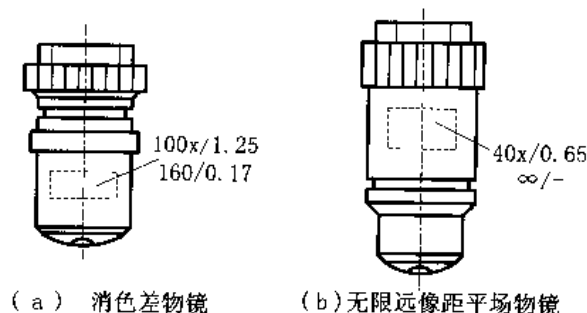


图 4-7 显微物镜外形图

国产显微镜的放大率和数值孔径的适配关系, 通常符合 GB2609-81《显微镜物镜系列》

规定, 如表 4-6 (b) 所示。

表 4-6 (a) 常用物镜外壳表面色圈

放大率	1.6 [×] , 2.5 [×]	4 [×] , 6.3 [×]	10 [×]	16 [×] , 25 [×]	40 [×] , 50 [×]	63 [×] , 80 [×]	100 [×]
颜色	黑	蓝	紫	绿	黄	红	白

表 4-6 (b) 显微镜物镜的基本参数系列

NA _{mm} \ β	1.6 [×]	2.5 [×]	4 [×]	6.3 [×]	10 [×]	16 [×]	25 [×]	40 [×]	(50 [×])	63 [×]	(80 [×])	100 [×] (油浸)	代号
分类													
消色差物镜	—	—	0.10	—	0.22	—	0.40	0.65	—	0.85	—	1.25	—
平场消色差物镜	0.04	0.07	0.10	0.15	0.22	0.32	0.40	0.65	0.75	0.85	0.95	1.25	PC
平场半复消色差物镜	—	—	—	0.20	0.30	0.40	0.60	0.75	—	0.90	—	1.30	PB
平场复消色差物镜	—	—	0.16	0.20	0.30	0.40	0.65	0.80	—	0.95	—	1.30	PF

注: (1) 除 100[×]油浸物镜外的其他物镜为干燥系统, 对于特殊需要的水浸、长工作距离等物镜的放大率应按照本标准系列, 但数值孔径不作规定;

(2) 括号内的放大率只适宜在反射光下使用;

(3) 对于特殊要求, 并且经供需双方协商而定的物镜放大率, 可允许不按此表的规定;

(4) 当放大率超过 100 时, 其倍率按优先数系 R10 选取。

§ 4.2.3 显微物镜结构基本类型

显微物镜根据用途不同分为消色差物镜, 复消色差物镜、平场消色差物镜、平场复消色物镜和折反射物镜。用于显微镜观察时, 一般选用消色差或复消色差显微物镜; 用于显微摄影时, 一般选用平场物镜, 使显微摄影像面上获得全视场清晰的像。

1. 消色差物镜 (achromatic objective)

消色差物镜指对两条谱线校正轴向色差的物镜。现有普及型显微镜物镜大多属于消色差型, 能满足一般的显微观察需要。它校正近轴区域的球差、彗差和位置色差, 但边缘像质较差。消色差型显微物镜按 NA 大小有四种型式 (见图 4-8)。

(1) 双胶合物镜 用于低倍显微物镜, 放大倍数为 1[×]~5[×], NA=0.1~0.15。

(2) 两组双胶合——李斯特 (Lister) 型。中倍显微物镜用, 放大倍数为 8[×]~20[×], NA=0.25~0.3。前后双胶合组分别消位置色差, 则倍率色差自动校正。前后两组联解, 可消除球差、彗差和像散, 但场曲不能校正。

(3) 阿米西 (Amici) 型。在李斯特型物镜前加一不晕半球型透镜构成。用于中倍及高倍显微物镜, 放大倍数为 25[×]~40[×], NA=0.4~0.65。

如图 4-9 所示, 物点 A 出射光孔径角 u_1 , 经平面折射成虚像于 A' 正好在半球面的不晕点上, 最后成像于 A''。由不晕条件及折射定律得

$$\sin u_3 = (\sin u_2) / n = (\sin u_1) / n^2 \quad (4-5)$$

$$\therefore \sin u_1 = n^2 \sin u_3 \quad (4-6)$$

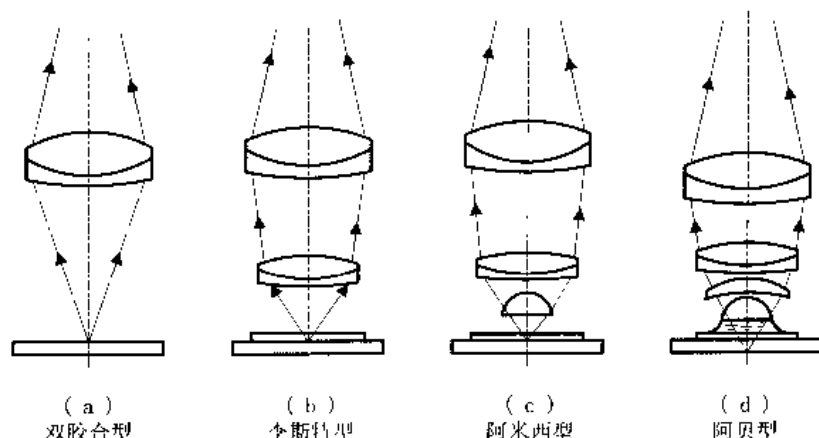


图 4-8 消色差型显微物镜

可见，加入前片能将数值孔径提高 n^2 倍。

因李斯特型物镜数值孔径为 0.3，玻璃折射率 n 取 1.5，代入上式得阿米西型能够负担的数值孔径 $\sin u_1 = 1.5^2 \times 0.3 = 0.675$ 。故一般 $40\times$ 物镜的 NA 取 0.65。

不晕半球透镜材料及结构参数确定后，它所产生的色差以及平面产生的球差和彗差为已知量，由后面两组双胶合来抵消。

(4) 阿贝 (Abbe) 型油浸物镜 在阿米西型前片与中组之间加一块弯月正透镜，便成阿贝型。放大倍数可达 $90\times \sim 100\times$ ， $NA=1.25 \sim 1.4$ 。

油浸物镜的前片选用折射率与浸油相同或略高的玻璃，如图 4-10 所示。第一面平面基本上不产生像差，第二面是不晕面，也不产生球差和彗差，但残留色差仍存在。

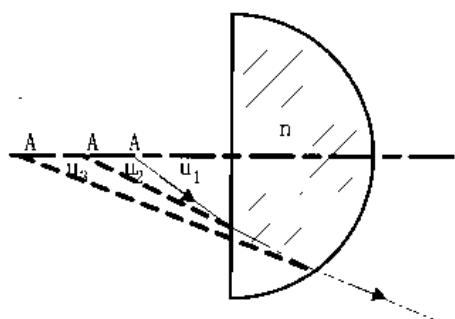


图 4-9 不晕半球形透镜

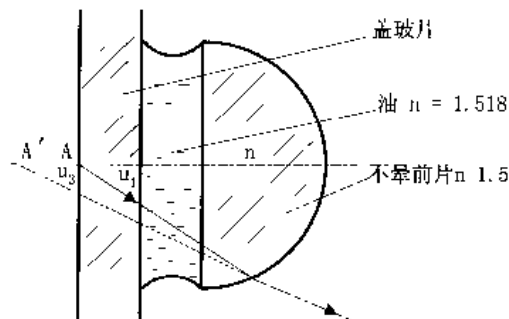


图 4-10 阿贝型油浸显微镜

设前片之后的正弯月镜及两组双胶合相当于阿米西型，能承担 NA 为 0.6，则

$$\sin u_3 = 0.6$$

由不晕条件 $\sin u_1 = n \cdot \sin u_2 = 1.50 \times 0.6 = 0.90$ ，得阿贝型油浸物镜的数值孔径为

$$NA = n_{\text{油}} \sin u_1 = 1.518 \times 0.9 = 1.35$$

2. 平场物镜 (flat-field objective)

消色差物镜残留严重场曲，为了适应显微镜摄影的需要，发展为平 (像) 场消色差物镜，简称平场物镜。它是场曲和像散都得到很好的校正的消色差物镜。

显微物镜的正透镜多、物距短，所以场曲大。图 4-11 列出国产平场物镜的几种形式。

高倍物镜前片做成弯月型，第一面用凹面代替原来阿米西型的不晕半球透镜的平面。它产生负值 S_{IV} 校正场曲。中倍物镜在靠近像方处加一弯月形厚透镜校正 S_{IV} 。低倍物镜采用三片式照相镜头结构改善像散和场曲。正透镜尽量用高折射率材料。由于一般显微镜的线视场不大，平像场主要是校正初级场曲 S_{IV} 。

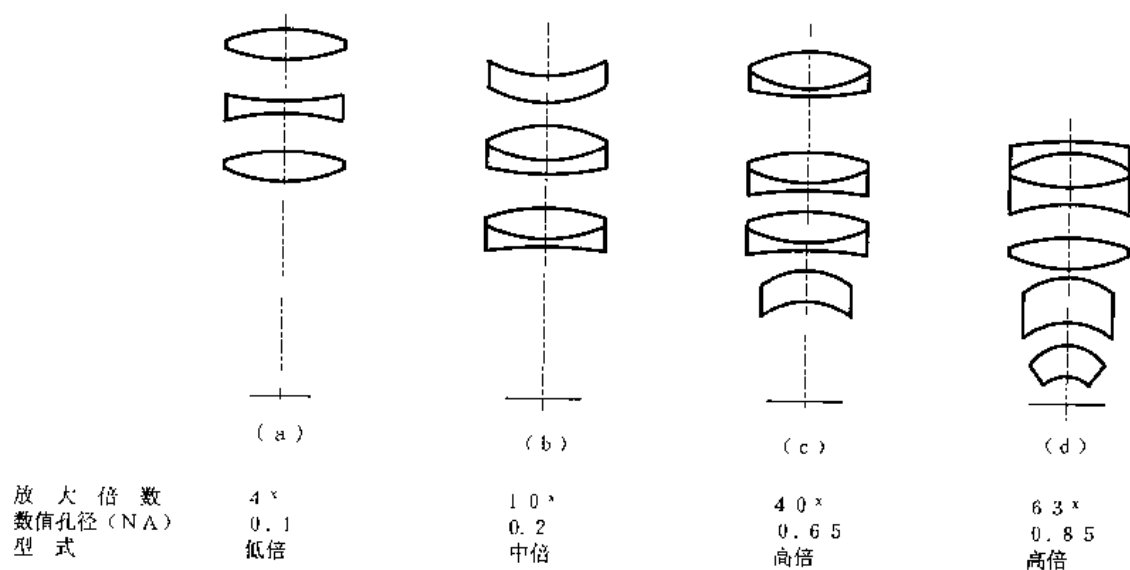


图 4-11 平场消色差型显微物镜

3. 复消色差物镜、半复消色差物镜

大孔径、高分辨显微物镜不允许有大的二级光谱和色球差等缺陷，于是出现复消色差物镜 (apochromatic objective)，它是对三条谱线校正轴向色差的物镜，见图 4-12。设计制造高分辨率大孔径显微物镜的困难在于校正二级光谱、色球差和倍率色差。校正二级光谱常选用低折射率、低色散材料——萤石 (CaF_2 ，晶体) 做正透镜。由于材料折射率低，所以球面

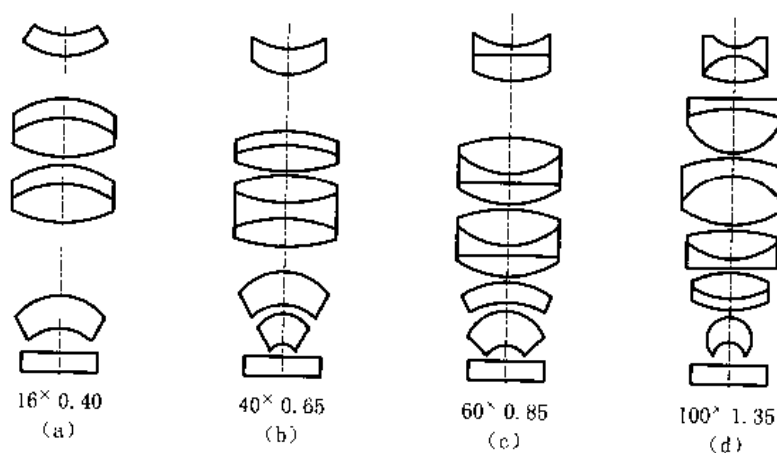


图 4-12 平场复消色差显微物镜

半径要小，需增加镜片数量，结构复杂，且倍率色差不可能完全校正。为此，在使用复消色差物镜时常配备“补偿目镜”，以补偿倍率色差，才能取得良好效果。图 4-13 列出四种 40 倍显微物镜结构及其色差校正曲线。因为复消色差物镜采用萤石材料多，价格昂贵。于是出现了半复消色差 (semi-apochromat)。这是一种二级光谱比消色差物镜小的物镜，它用特种

材料少，质量介乎消色差与复消色差之间。目前高级研究显微镜广泛采用平场复消色差物镜（plan apochromatic objective）。它是一种场曲和像散得到很好校正的复消色差物镜，其像质非常好，如对染色体标本进行彩色摄影的高倍物镜（100 \times ），NA=1.35。

4. 折反射显微镜物镜

折射式物镜因受到色差及光学玻璃光谱透过率特性的限制，往往达不到科研与应用实际要求扩展观察波谱范围，如紫外及红外领域；有的观察物体要求加大物镜的工作距离，因此折反射物镜在近 40 年来得到了新的发展。

我国设计的折反射物镜使用会聚光束中的消色差单透镜（半块弯月型厚透镜）来产生正球差，并使它的高级正球差及反射面的高级负球差相消。适当控制光阑位置、光焦度分配和间隔校正彗差，得出可用于 0.18~1.0 μm 波长、NA 为 0.85 的干镜头，不用不晕半球也得到 NA=1.32 的结果；NA=0.65 时像质优良，工作距离长达 40 mm，见图 4-14（a）。

普通中倍、高倍（20 \times 、40 \times ）显微镜下部安放一个加长工作距离的装置，见图 4-14（b）。它是 1:1 的转像折反射系统，与物镜组合后能产生正像。

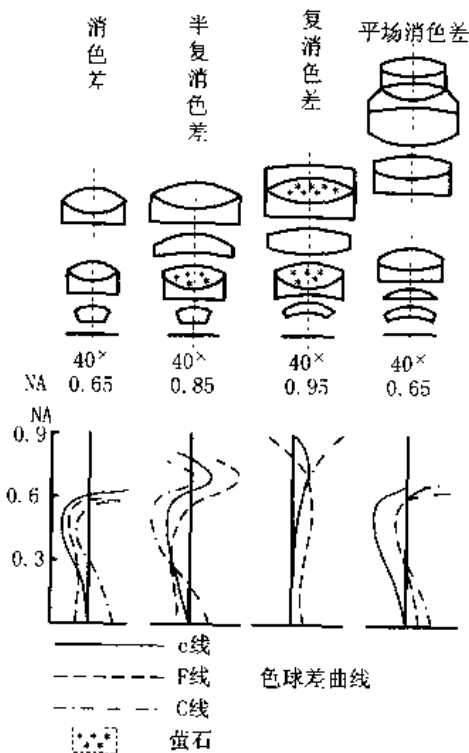


图 4-13 各种物镜色差校正比较

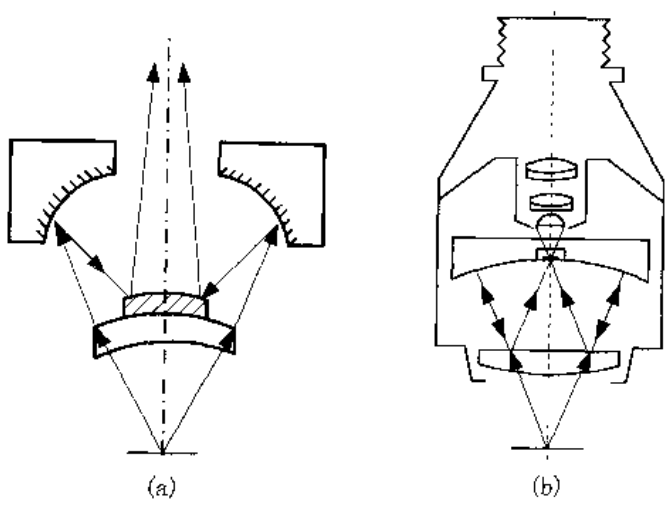


图 4-14 折反射显微镜物镜

§ 4.2.4 显微物镜设计时应校正的像差

设计显微物镜主要校正轴上点的像差和小视场的像差：球差（ $\delta L'$ ）、轴向色差（ $\Delta L'_{FC}$ ）和正弦差（ SC' ）。但是对较高倍率的显微物镜，由于数值孔径加大，除了校正这三种像差的边缘像差之外，还必须同时校正它们的孔径高级像差，如孔径高级球差（ $\delta L'_{m}$ ）、色球差（ $\delta L'_{FC}$ ）、高级正弦差（ SC'_{m} ）。对轴外像差，例如像散、垂轴色差，由于视场比较小，而且一般允许视场边缘的像质下降，因此在设计中，只有在优先保证前三种像差校正的前提下，

其他像差只在可能的条件下加以考虑。

平场消色差物镜要求整个视场成像都比较清晰，除了校正球差、轴向色差和正弦差外，还要求校正场曲、像散和垂轴色差。

由于显微镜属于目视光学仪器，因此它同样对 F 光和 C 光消色差，对 D 光校正单色像差。

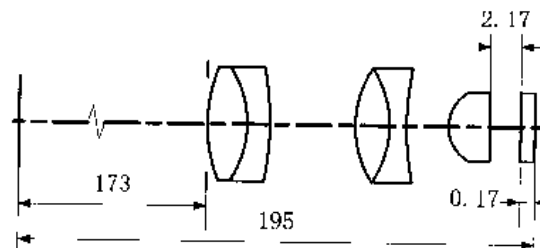
目前应用最广泛的显微物镜为消色差物镜和平场消色差物镜两种，因为据国家标准《生物显微物镜系列》(GB2984~82)规定，量大、面广的普及型显微镜配消色差物镜，实验室显微镜配平场消色差物镜。下面将结合具体的设计展开阐述。

§ 4.2.5 消色差显微物镜设计

消色差物镜是应用最早也最广泛(1870 年左右已定型，流传至今)的显微物镜。设计时至少应校正轴上色差、球差和正弦差，成套生物显微镜物镜参见图 4-8。

前述中、高倍物镜放大率为 $25\times\sim 40\times$ 或更高，数值孔径为 $0.45\sim 0.65$ 。这种物镜可以认为是在李斯特物镜之前加了一个接近半球形的透镜(前片)而得。一般前片的第一面为平面，第二面是不晕面，即轴上点发出的光束经平面以后的会聚点，位于第二面的不晕点上。前面已证明，加入这块透镜以后，能使李斯特物镜的孔径角增加 n^2 倍(n 为此半球形透镜玻璃的折射率)。设计时，在前片的玻璃和结构选定以后，所产生的色差、球差和正弦差均为已知，这些定量的像差由它的中组和后组来抵消。

表 4-7 (a) $20\times$ 消色差显微物镜结构参数

主要技术指标		结 构					
$\beta=20\times$ $f'=12.91\text{mm}$ $NA=0.4$ $L=195\text{mm}$ 工作距=2.17mm							
参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n_D	ν	D_0/mm	玻璃	
1	光阑				6.92		
2	20.424	0.001			6.92		
3	-11.105	2.31	1.5399	59.67	6.88	BaK2	
4	-33.679	1.82	1.6725	32.23	6.938	ZF2	
5	6.569	4.55			6.558		
6	-9.12	1.83	1.5399	59.67	5.818	BaK2	
7	16.828	1.6	1.6475	33.87	5.28	ZF1	
8	4.612	2.03			4.567		
9	∞	2.91	1.508	61.05	2.92	K4	
10	∞	2.17			1.066		
11	∞	0.17	1.5163	64.1	0.9	K9	

我国生物显微镜（普及型）一般配置 3~4 孔的物镜转换器，配备 $4\times$ 、 $10\times$ 、 $40\times$ 和 $100\times$ 四种物镜。对于用户来说 $10\times \rightarrow 40\times$ 跨度太大，希望有 $16\times$ 、 $20\times$ 、 $25\times$ 这样一些的中高倍率物镜， $16\times$ 、 $25\times$ 我国国家标准有规定，国外也有 $20\times$ 这种倍率。笔者应某生产厂出口订单要求设计了非标准的 $20\times$ 消色差显微物镜，表 4-7（a）为其结构参数，表 4-7（b）为其像差数据。

表 4-7（b） 像差数据

像差 h	$\delta L'$	$\delta L'_t$	$\delta L'_c$	$\Delta L'_{FC}$	SC'		
1	0.01318	-0.00089119	0.01211	-0.011218	0.002211		
0.707	0.013878	0.0087817	0.0096283	-0.0008466	0.001053		
像差 h	x'_1	x'_2	x'_3	$\delta L'_t$	K'_r	$\Delta y'_{FC}$	$\delta L'_s$
1	0.033151	0.020777	0.012374	0.01436933	-0.0042385	-0.0018235	0.94304
0.707	0.016696	0.010413	0.0062837	0.0118036	-0.0013963	-0.0012866	0.6583

§4.2.6 长工作距离平场物镜设计

用于计量或通过培养皿观察活体细菌等的显微物镜要求工作距离长，往往把这种显微物镜称为长工作距离物镜。长工作距离物镜有共轭距为 195 mm 和无限远两种，后者称为无限远像距长工作距离物镜（下称 ∞ 物镜）。笔者在这方面做了较多的工作，本小节就其成像原理和设计特点谈一些体会，接着介绍笔者设计的 $16\times$ 长工作距离平场物镜结构参数与像差情况。

1. 无限远像距物镜的长工作距离的获得

有人认为对同一种倍率物镜， ∞ 物镜工作距离比有限筒长物镜大得多，这种看法是片面的。其实物镜工作距离的长短，在本质上取决于其光学结构。从表 4-8 也可以得到证实。诚然，根据文献[23]有公式 $f'_{obj\infty} \approx (1.3-1.6)f'_{obj}$ （其中 $f'_{obj\infty}$ 、 f'_{obj} 分别为 ∞ 物镜和共轭距为 195 mm 的系统物镜焦距），对同放大率的物镜而言 $f'_{obj\infty}$ 大，给设计具有更长工作距离的显微物镜带来了方便。

从表 4-8 还可以看到，物镜工作距离的长短要看使用功能的需求，从设计上予以保证。

∞ 物镜要获得长工作距离，在结构上必须由一个间隔较远且分离的正、负光组构成，如图 4-15 所示，假定平行光通过 ∞ 物镜成像，则靠近物空间的光组经过前组发散后，再经过后组会聚于焦平面 F' 。由于像方主面位于正组的右侧靠近像平面空间里，这种结构的物镜后工作距离有可能接近或超过系统的焦距，加上 ∞ 物镜的焦距为同放大倍率有限筒长物镜的 1.3~1.6 倍，所以其工作距离可以比一般有限筒长物镜大得多，也可以比有限筒长的长工作距离物镜大。

此外，应用 ∞ 物镜还可获得较均匀照度的像面视场。 ∞ 物镜因为光束偏转角比同倍率有限筒长物镜小，不但像差校正比较容易，且像面照度比较均匀。

2. 设计实例

下面通过设计实例，向读者较详细地描述设计过程，供借鉴。

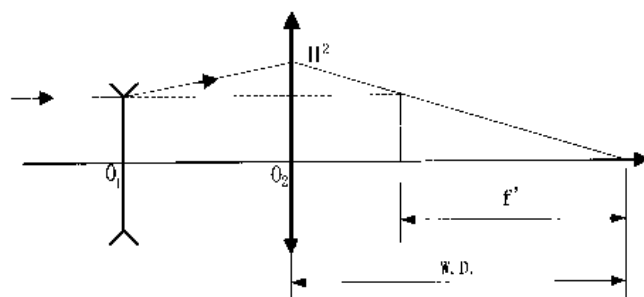


图 4-15 物镜长工作距离的原理

表 4-8 显微物镜主要光学性能一览表

编 号	放大率	数值孔径	筒长 /mm	凸像高 /mm	工作距离 /mm	生产厂	类型	备 注
No.4-1	4 [×]	0.12	∞	33.7	8.5	Ao	消到 182.7	①Ao 为美国光学公司简称;②Z 为民德蔡司简称; ③消, 指消色差物镜;④平, 指平场物镜;⑤复, 指复消色差物镜
No.4-2	4 [×]	0.10	∞	33.7	33.2	Ao	消	
No.4-3	4 [×]	0.10	152	42.8	35.8	重光厂	消	
No.4-4	4 [×]	0.16	150	45.0	2.5	Z	平, 复	
No.10-1	10 [×]	0.25	∞	33.7	7.8	Ao	消到 165.2	①到……, 指像距到; ②V 为维克斯公司简称; ③福光所指福建光学技术研究所简称; ④L 为西德莱茨简称; ⑤凸像高指物镜安装定位面到像面距离
No.10-2	10 [×]	0.25	∞	33.7	10.	Ao	消到 182.7	
No.10-3	10 [×]	0.15	∞	24	14	V	消, 偏, 到 250	
No.10-4	10 [×]	0.20	∞				平, 消	
No.10-5	10 [×]	0.25	152	45	18.6	L	消, 位	
No.10-6	10 [×]	0.18	158.1	36.99	7.7	福光所		①一机联, 指一机部联合设计; ②偏, 指偏光显微镜; ③水, 指水浸物镜
No.40-1	40 [×]	0.65	∞		5.99		消	
No.40-2	40 [×]	0.65	∞	27.4	0.56	重光厂	平、消	
No.40-3	40 [×]	0.65	∞	33.7	0.5	Ao		
No.40-4	40 [×]	0.65	∞	24.0	0.35	V	平, 消偏到 250	
No.40-5	40 [×]	0.65	182.2	12.55	0.63	一机联		
No.40-6	40 [×]	0.75	150	45	1.6	Z	消, 位, 水	①半, 指半复消色差物镜; ②金, 指金相显微镜; ③油, 指油浸物镜; ④弹, 指弹性片
No.100-1	100 [×]	0.95	∞	45	0.12	L	半、金、位	
No.100-2	100 [×]	1.25	∞	33.7	0.14	Ao	消, 油到 182.7	
No.100-3	100 [×]	1.36	∞	45	0.36	L	半, 金	
No.100-4	100 [×]	1.25	150	45	0.09	Z	消, 油	
No.100-5	100 [×]	1.25	152	37	0.38	L	半, 油, 弹	

设计一个无限远像距长工作距离平场物镜: 16[×], NA=0.32, 像方视场 ϕ 21 mm, 无盖玻片。

(1) 对初始结构选择的思考

在设计计算大孔径显微物镜时, 试验法仍然是很重要的方法。如前所述, 这种方法是设计者在开始计算之前, 先查找一个光学特性与所设计物镜尽可能接近的原始结构。应再次强调: 在利用这种方法设计计算物镜时, 初始结构的选择是决定性的因素, 它在各方面都与最后结果密切相关。初始结构的正确选择基于设计者实践经验的积累和对现代显微镜发展水

平的认识，并与他的设计技巧有关。

思考之一：平场物镜与普通消色差物镜和复消色差物镜比较，它的视场显著增大。欲增大视场，必须更精确地校正视场像差，特别是像面弯曲、像散和彗差，而且要求消色差。

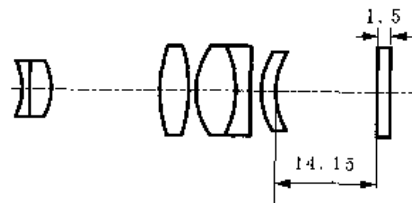
思考之二：校正场曲一般有两条途径。一是在物镜结构中设置“厚的”凹面，且有很大的曲率半径的弯月透镜（一个或几个）被配置到系统的不同部分。这种结构方式虽使像面弯曲得到校正，但由于引入厚透镜，物镜工作距离将大大减少，因此不可取。二是采用“反望远”物镜的结构形式，即远离的正负透镜组，且负组在后，有利于光组合成主面外移，以获得较大的工作距离。同时，这样的结构可能校正4种单色像差——球差、彗差、场曲和像散；至于色差校正，就得靠1~2组胶合组来实现。分析认为，选第二种结构形式可达到设计要求。

（2）选初始结构

在文献[10]第995页中选出如表4-9所示的初始结构。

该结构后组为具有负光焦度的双胶合组，它们间折射率差 Δn_D 趋于最小，正透镜用低色散（高 ν 值）玻璃，负透镜为高色散（低 ν 值），这样可校正色差；前组为“单-双-单”结构的正光焦度光组，双胶合组为了校正色差，也在一定程度上可校正球差。

表 4-9 $16\times$ 长工作距离物镜初始结构参数

主要技术指标		结 构					
$\beta=16\times$ $f'=15.77\text{ mm}$ $NA=0.32$ $L=\infty$ 工作距=14.15 mm							
参 数							备 注
面号	r/mm	d/mm	n_D	ν	D_j/mm	玻璃	* 厚 1.5 mm 盖玻片是 一种低折射率，低色 散（高 ν 值）的冕玻 璃，国产无此牌号 ** 光组长度 $\Sigma d=58.15$ mm 超过了国家标准 物镜座装面到像面距 离为 45 mm 的规定， 为非标准镜头
1	-15.922				10.0		
2	110.66	1.3	16.128	36.9	10.6	F2	
3	-23.39	4.0	1.613	60.6	11.5	ZK7	
4	36.14	25.			16.0		
5	-57.02	4.1	1.613	60.6	15.8	ZK7	
6	33.57	0.5			15.2		
7	-26.42	4.4	1.5831	59.3	14.3	ZK2	
8	∞	1.4	1.76157	26.5	13.7	ZF12	
9	13.122	0.1			13.0		
10	18.535	2.7	1.613	60.6	11.6	ZK7	
11	∞	14.15					
12	∞	1.5	1.45845	67.6			

（3）分析结构差异，改结构

初始结构已很接近拟设计镜头的要求，两者最大的差异是有无盖玻片，而平板玻璃盖玻片会产生一定的球差、色差。初始结构已把这些像差补偿掉，拟设计的镜头要把盖玻片去掉，势必增加球差、色差，所以在设计中换胶合组，用K5-ZF6替代ZK2-ZF12的组合，

主要为了增加折射率差 Δn_D 和阿贝数差 Δv , 这对消色差、校正球差有利。为保持双胶合组的光焦度变化不大, 应对其曲率半径按换玻璃公式 $r^*=r(n^*-1)/(n-1)$ (式中 r^* , n^* 与 r , n 分别是新透镜与原透镜的曲率半径和折射率) 进行变换。因为新旧玻璃组合的折射率差不等, 胶合面的曲率半径也要变, 可按正负透镜单独计算得了一个变化范围。然后再调整, 其调整原则是使胶合组光焦度在换玻璃前后变化不大。此外, 用 ZK9 替代 ZK7, 因替代材料的 n_d 比原材料高, 而 v 数值相仿, 利于校正像差。

(4) 电算迭代, 校像差

把新参数录入后, 电子计算机计算迭代, 使结果在像差容限内, 并进一步校正。计算结果见表 4-10 (a) 和 (b)。像差曲线图见图 4-16。

表 4-10 (a) 16×长工作距离物镜结构参数

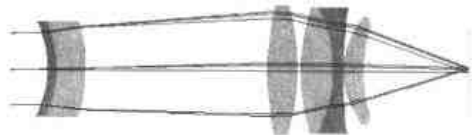
主要技术指标		结 构					
$\beta=16\times$ $f'=15.48\text{mm}$ $\text{NA}=0.35$ $L=\infty$ 工作距=14.484 mm							
参 数							备 注
面号	r/mm	d/mm	n_d	v	D_0/mm	玻璃	
1	∞ (光阑)				9.815		
2	-14.6161	1.5			11.7		
3	-14.5437	1.3	1.61295	36.95	12.2	F2	
4	-21.5683	4	1.62041	60.29	13.6	ZK9	
5	37.51320	25			18.2		
6	-31.1608	4.1	1.62041	60.29	17.8	ZK9	
7	28.41290	0.5			17.6		
8	-19.2642	4.4	1.51007	63.36	15.2	K5	
9	58.06499	1.4	1.75523	27.53	14.76	ZF6	
10	11.74129	0.1			14.76		
11	21.05150	2.7	1.62041	60.29	12.8	ZK9	

表 4-10 (b) 多色光光学传递函数 (MTF)

线对 (lp/mm)	轴上		0.7 视场		1 视场	
	T	S	T	S	T	S
50.00	0.898	0.898	0.887	0.895	0.869	0.888
100.00	0.736	0.736	0.731	0.726	0.712	0.707
150.00	0.556	0.556	0.574	0.545	0.549	0.523
200.00	0.395	0.395	0.417	0.389	0.408	0.374
250.00	0.266	0.266	0.289	0.267	0.289	0.267
300.00	0.170	0.170	0.194	0.178	0.203	0.195
350.00	0.105	0.105	0.137	0.120	0.140	0.151
400.00	0.069	0.068	0.107	0.089	0.109	0.123

续表

线对 (lp/mm)	轴上		0.7 视场		1 视场	
	T	S	T	S	T	S
450.00	0.057	0.057	0.083	0.074	0.081	0.096
500.00	0.060	0.060	0.069	0.063	0.060	0.066

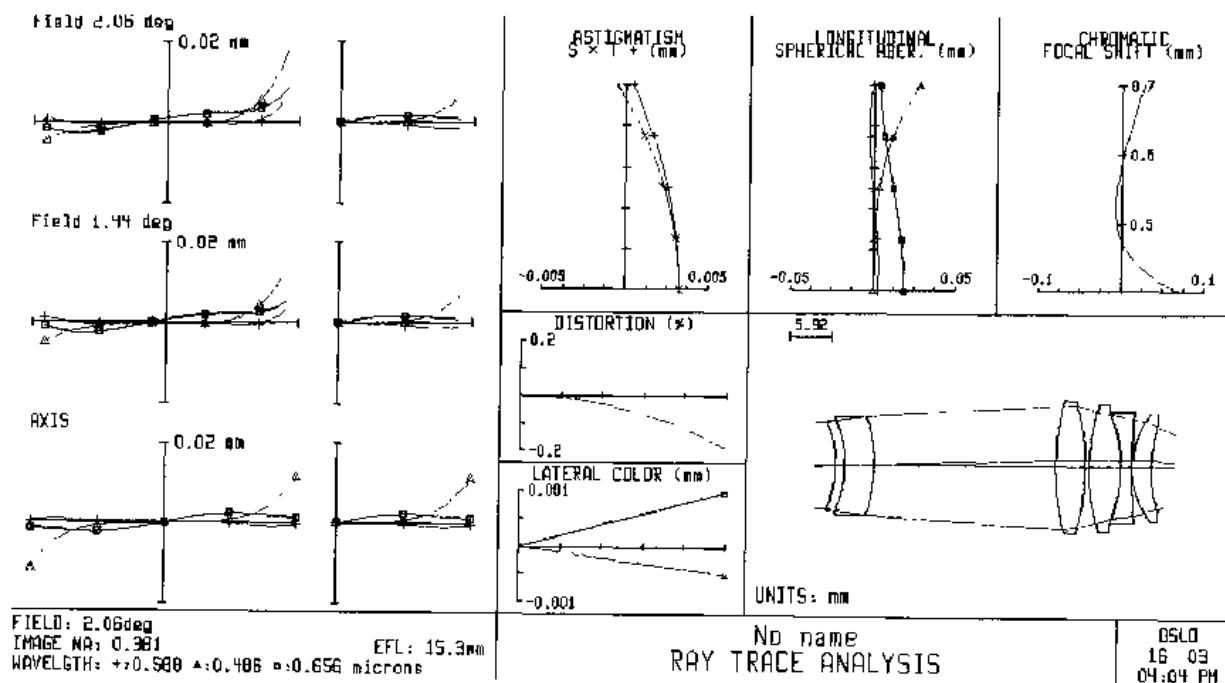


图 4-16 像差曲线图

§ 4.3 目镜设计

目镜 (ocular eyepiece) 是在光学系统中将物镜所成的像放大后供眼睛观察用的透镜。目镜中最靠近眼睛的透镜称接目镜 (eye-lens)。

目镜从使用功能来说可分为观察目镜和摄影 (摄录) 目镜两大类。若无特别说明, 目镜一般指的是观察目镜。

§ 4.3.1 目镜光学特性与结构类型

目镜是用来观察物体被物镜所成像的光学部件, 是目视光学仪器的一个组成部分。一般物镜的像位于目镜的物方焦面上, 因此自目镜射出的光束是平行光束, 成像在无限远 (或明视距离) 处。通常望远系统的出射光瞳位于目镜的像方焦点之外与焦点很靠近的地方。

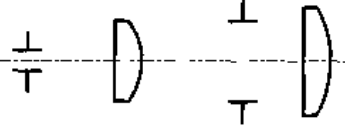
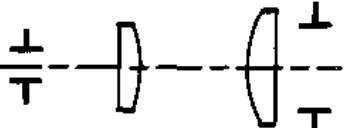
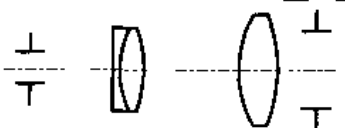
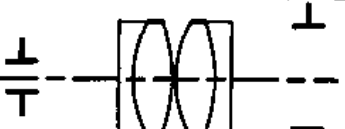
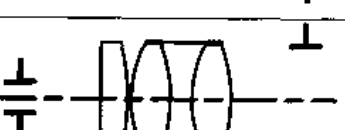
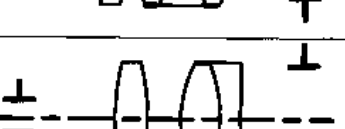
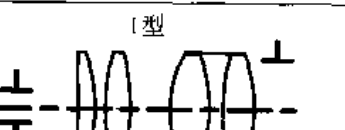
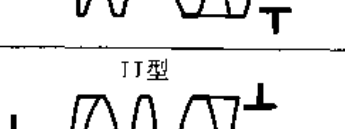
由目镜的最后一面到系统出瞳的距离称为镜目距。因为眼睛的瞳孔要与出射光瞳重合, 故镜目距不能太短, 一般不应小于 6 mm 或 8 mm, 以 10 mm 左右最为适宜。在军用仪器中, 通常要求镜目距较长, 要求 20 mm 以上。

与其他光组比较, 目镜具有以下特点:

- (1) 焦距短 (10~40 mm);
- (2) 相对孔径中等 ($\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}$), 显微镜目镜较小 ($< \frac{1}{10}$);
- (3) 视场大 ($30^\circ \sim 120^\circ$);

- (4) 光阑位于系统光组外部，只有惠更斯目镜是个例外，其光阑位于光组中间；
- (5) 入瞳和出瞳远离透镜组，入瞳远离透镜组，出瞳位于后方的一定距离上。
- 目镜的结构类型详见表 4-11。

表 4-11 目镜的结构类型

名 称	主要技术参数	结 构	主 要 特 点
惠更斯 (Huygenian ocular)	$2\omega=40^\circ\sim45^\circ$		由凸面对向物镜的两个平凸透镜组成的内焦点目镜。结构最简单，观察时常用；但不能安放分划板
冉斯登 (Ramsden eyepiece)	$2\omega=30^\circ\sim40^\circ$		由凸面相对的两个平凸透镜组成的目镜。视场光阑位于镜前，出瞳直径和镜目距不大，可安放分划板，用于测试仪器上
开涅尔 (Kellner ocular)	$2\omega=40^\circ\sim50^\circ$		结构简单，像质较好，应用广泛，是平场目镜的主要型式；前组双凸透镜，后组（接目镜）是正负透镜组成的胶合透镜的目镜
对称	$2\omega=40^\circ\sim50^\circ$		结构紧凑，工艺性好，适用于短焦距、较长镜目距的场合，瞄准仪器常用
消畸变	$2\omega=40^\circ\sim50^\circ$		像质较好，特别是畸变小，适用于测量仪器
柯尼希	$2\omega=40^\circ\sim50^\circ$		是简化了的消畸变目镜
广角 I 型 (Widefield ocular I)	$2\omega=60^\circ\sim70^\circ$	I 型 	广视场（广角）目镜——视场比同焦距的普通目镜大的目镜。两单透镜构成接眼正透镜组；三胶合组成场曲小，增加出瞳距，帮助接眼镜组校正像差
广角 II 型 (Widefield ocular II)	$2\omega=60^\circ\sim70^\circ$	II 型 	由双胶合组加单透镜构成接眼正透镜组；负光焦度胶合组位于后面，它起到协助校正接眼正透镜组像差的作用

§ 4.3.2 目镜设计要点

1. 目镜的像差校正

目镜的像差校正以轴外像差为主。在目镜设计中，主要校正像散、垂轴色差和彗差这

三种像差。初级彗差和光束孔径的平方成比例，由于目镜的出瞳直径较小，因而彗差不会太大，在这三种像差中它居于次要地位。因此，目镜设计中最重要的是校正像散和垂轴色差这两种像差。

正透镜组上主光线投射高达到焦距的 1.27 倍，透镜的直径大约等于焦距的 2.5 倍，轴外像差特别是高级像差将变得很大，即使用若干透镜组合，轴外像差（如彗差、像散、畸变、垂轴色差）也无法得到很好的校正。所以，在目镜中一般不校正场曲，在广角目镜中只是设法使场曲减小一些。

2. 望远镜目镜与物镜像差互相补偿

在设计望远镜目镜时，需要考虑它和物镜之间的像差补偿关系。望远镜物镜的结构一般比较简单，只能校正球差、彗差和轴向色差，无法校正像散和垂轴色差。虽然由于物镜的视场较小，这些像差一般不会很大，但为了使整个系统获得尽可能好的成像质量，物镜残留的像散和垂轴色差，要求由目镜补偿。而在目镜中这两种像差是比较容易控制的。目镜的球差和轴向色差一般也不能完全校正，需要由物镜来补偿，因为在物镜中这两种像差也是很容易控制的。彗差则尽可能独立校正，如果在目镜设计中，在优先考虑像散和垂轴色差的校正以后，有少量彗差无法完全校正，也可以用物镜的彗差进行补偿。这样虽然物镜和目镜都分别留有一定的像差，但整个系统像差得到很好的校正，可以使系统的成像质量得到提高。

以上所述是在目镜和物镜尽可能独立校正像差的前提下，进一步考虑它们之间的像差补偿问题，这是对要求在物镜后焦面（即目镜前焦面）上安装分划镜的望远系统来说的。如果系统中不要求安装分划镜，则物镜和目镜的像差校正可以按整个系统统算时对整个系统进行再优化，使系统整体光学性能更佳。

对显微镜目镜来说，由于不同倍率的物镜和目镜要求互换使用，因此难于考虑物镜和目镜的像差补偿问题，一般都采取独立校正像差的方式。

3. 光谱选择

由于目镜是目视光学仪器的一个组成部分，因此和物镜一样采用 F 光和 C 光消色差，对 D 光或 e 光校正单色像差。

4. 设计操作

在设计目镜时，通常按反向光路进行设计，如图 4-17 所示。假定物体位于无限远处，入瞳在目镜的前方，在它的焦平面 F'_E 上计算像差，当物镜按正向光路计算像差，目镜按反向光路计算像差时，它们之间像差的组合关系如下：

轴向像差（如 $\delta L'$ 、 $\Delta L'_{FC}$ 、 x'_t 、 x'_s 等）在光束孔径角相等的条件下为

$$\delta L'_{\text{组合}} = \delta L'_{\text{物}} (\text{正向光路}) + \delta L'_{\text{目}} (\text{反向光路}) \quad (4-7)$$

其他轴向像差的关系类似。

垂轴像差（如 K'_T 、 $\Delta y'_{FC}$ 、 $\delta y'_t$ 等）在像高相等的条件下为

$$K'_{T\text{组合}} = K'_{T\text{物}} (\text{正向光路}) - K'_{T\text{目}} (\text{反向光路}) \quad (4-8)$$

其他垂轴像差的关系类似。

以上公式可以用来计算物镜按正向光路设计，目镜按反向光路设计时系统的组合像差。由式 (4-7) 和式 (4-8) 看到，当目镜按反向光路，物镜按正向光路计算像差时，轴向像差

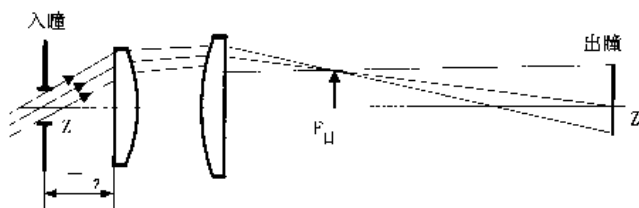


图 4-17 目镜光路计算

同号叠加，异号相消；垂轴像差则同号相消，异号叠加。

5. 传递函数

据文献[41]，对直视微光夜视仪用的大孔径、大视场目镜的传递函数也有较高的要求。规定对 10 lp/mm、20 lp/mm、30 lp/mm、40 lp/mm，其 MTF 分别要求为 0.85、0.72、0.58、0.45。对于普通目镜可酌情放宽要求。

另外，双目系统对光轴平行差、放大率和相对象倾斜等都要有一定的要求，视具体配用什么样的仪器而定。

§ 4.3.3 普通目镜设计

1. 惠更斯目镜设计公式及要点

惠更斯目镜由两块平凸透镜组成，其间隔为 d 。这种目镜的结构参见表 4-11 中的第一个图。图中靠近物镜一方的透镜 L_1 称为场镜；另一块透镜 L_2 接近眼睛，称为接目镜。两者的焦距分别是 $f'_{\text{场}}$ 和 $f'_{\text{目}}$ 。场镜把物镜成的像再一次成像于两透镜中间，该处是接目镜的物方焦面。中间像经过接目镜后成像于无限远处。

当惠更斯目镜的场镜和接目镜都选用同一种玻璃材料时，若间隔 $d = (f'_{\text{场}} + f'_{\text{目}}) / 2$ ，则可满足校正倍率色差的条件。从文献[3]得到三者和目镜总焦距 f'_H 的直接关系式：

$$f'_{\text{目}} = \frac{3}{4} f'_H, d = \frac{9}{8} f'_H, f'_{\text{场}} = \frac{3}{2} f'_H \quad (4-9)$$

根据以上关系，设计一个惠更斯目镜便十分简单。

为了消除渐晕现象，在接目镜的物方焦面上设置视场光阑。此时，场镜产生的轴外像差很大，很难予以补偿。所以，惠更斯目镜不宜在视场光阑平面上设置分划板，否则，从目镜里观察到的物体和分划板的像不可能都是清晰的。因此，惠更斯目镜不宜用在测量仪器中。值得指出，当间隔 d 满足倍率色差要求时，惠更斯目镜只能校正一种像差。但是目镜的彗差和像散对使用都有很大的影响，原则上都应该校正。在校正像差的结构参数较少的情况下，应该使彗差和像散互相兼顾为好。

2. 设计实例——12×惠更斯目镜设计

根据目镜焦距和倍率的关系，有

$$f'_H = \frac{250}{F} = \frac{250}{12} = 20.8 \text{ (mm)}$$

根据式 (4-9) 直接求出惠更斯目镜两透镜的焦距和间隔：

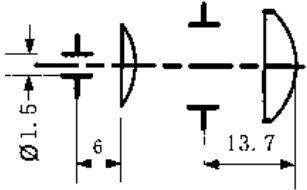
$$f'_{\text{眼}} = \frac{3}{4} f'_{\text{目}} = \frac{3}{4} \times 20.8 = 15.6 \text{ (mm)}$$

$$d = \frac{9}{8} f'_{\text{目}} = \frac{9}{8} \times 20.8 = 23.4 \text{ (mm)}$$

$$f'_{\text{场}} = \frac{3}{2} f'_{\text{目}} = \frac{3}{2} \times 20.8 = 31.2 \text{ (mm)}$$

求出接眼透镜和场镜的焦距以后，根据玻璃材料（取 K9）和透镜形状（平凹），即可求出目镜的全部结构参数，如表 4-12（a）所示。

表 4-12（a） 12×惠更斯目镜结构参数

主要技术参数	结 构	参 数				备 注
		r/mm	d/mm	n _D	D ₀ /mm	
2ω=40° D=1.5 mm f'=21.973 mm y'₀=8.07 mm 入瞳距=106 mm		∞			5.87	
		-8.06	2	1.5163 (K9)	6.83	
		∞	22		14.44	
		-16.1	4	1.5163 (K9)	15.72	

由于考虑到场镜的主面位于透镜内，所以将两透镜的间隔由 23.4 mm 减少为 22 mm。按上述结构计算，得像差数据如表 4-12（b）所示。

表 4-12（b） 像差数据

数据 h · ω	δL'	ΔL'_{\text{pc}}	x'_1	x'_2	x'_{\text{ts}}	K'_T	δy'_2	Δy'_{\text{pc}}
1.0	-0.326	-0.56	-1.37	-1.75	0.38	-0.028	-0.41	-0.015
0.7071	-0.162	-0.56	-0.66	-0.85	0.19	-0.010	-0.14	-0.01

由以上结果看到，惠更斯目镜的垂轴色差基本上已校正；像散和场曲还补偿得不够，但作为显微镜的目镜可以对视场不同部位分别进行调焦观察，对使用影响不大；彗差也比较小。因此，上述结果从像差来说已符合要求，但是显微镜对应的入瞳距应大约等于 160 mm，这和上述计算结果相差很大，可以改变场镜的焦距，即增大 r₄，得到最后结果如表 4-13 所示。

3. 用试验法设计普通目镜

由于普通目镜的结构基本定型，这给我们采用试验法带来莫大的便利。表 4-14 是笔者用试验法设计的并已商品化的各类目镜，供读者参考。

表 4-13 12 \times 惠更斯目镜结构参数

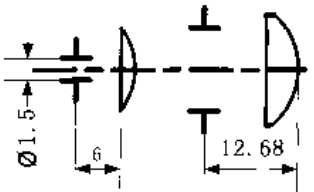
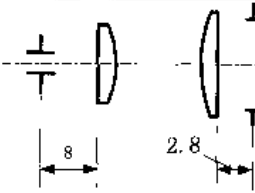
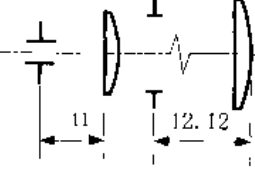
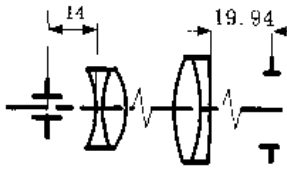
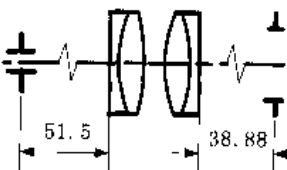
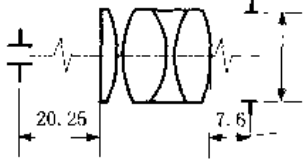
主要技术参数	结 构	参 数				备 注
		r/mm	d/mm	n_D	D_0/mm	
$2\omega=40^\circ$ $D=1.5\text{ mm}$ $f'=21.277\text{ mm}$ $y'_0=7.74\text{ mm}$ 入瞳距=167 mm		∞ -8.06 ∞ -17.5	2 22 4	1.5136 (K9) 1.5163 (K9)	5.87 6.83 14.44 1.572	GB2985-82 规定: 显微镜目镜放大倍 数误差不大于 $\pm 5\%$ (大于 $6.3\times$) 故此 结果虽 f' 稍大仍未 超差

表 4-14 目镜结构参数

名 称	主要技术参数	结 构	参 数				备 注
			r/mm	d/mm	n_D	D_0/mm	
10 \times 冉 斯 登	$2\omega=35^\circ$ $D=1.25\text{ mm}$ $f'=25.07\text{ mm}$ $y'_0=7.9\text{ mm}$ 入瞳距=164 mm		∞			6.29	
			15.922	2.5	1.5136 (K9)	7.33	
			15.922	23.75		16.66	
			∞	4.5	1.5163 (K9)	16.22	
5 \times 惠 更 斯	$2\omega=14.8^\circ$ $D=2.5\text{ mm}$ $f'=50.47\text{ mm}$ $y'_0=6.55\text{ mm}$ 入瞳距=168 mm		∞			5.62	
			-19.43	2.5	1.5163 (K9)	6.05	
			∞	48.13		12.22	
			-26	3.5	1.5163 (K9)	12.76	
8 \times 开 涅 尔	$2\omega=35^\circ$ $D=1.56\text{ mm}$ $f'=31.17\text{ mm}$ $y'_0=9.41\text{ mm}$ 入瞳距=162 mm		-24.38			10.39	
			11.995	2	1.6248 (F6)	11.49	
			-17.258	8	1.62032 (ZK9)	15.94	
			39.81	22.6		23.36	
			-27.16	8	1.5891 (ZK3)	23.27	
			-56.43	2	1.755 (ZF6)	23.41	
5 \times 对 称	$2\omega=24^\circ$ $D=2.5\text{ mm}$ $f'=46.81\text{ mm}$ $y'_0=9.8\text{ mm}$ 入瞳距=212 mm		34.2			24.5	GB2985-82 规定: 显微 镜目镜放大 倍数误差不 大于 $\pm 8\%$ (小于或等 于 $6.3\times$) 故 此结果虽 f' 稍大仍未超 差
			46.99	3	1.6128 (F6)	25.21	
			-46.99	9	1.5163 (K9)	27.8	
			46.99	0.2		27.82	
			-46.99	9	1.5163 (K9)	26.78	
			-34.2	3	1.6128 (F2)	26.55	

续表

名称	主要技术参数	结 构	参 数				备 注
			r/mm	d/mm	n_D	D_0	
10× 消 畸 变	$2\omega=46^\circ$ $D=1.25\text{ mm}$ $f'=23.62\text{ mm}$ $y'_0=10.03\text{ mm}$ 入瞳距=267.5 mm		∞			18.86	
			-24.65	6.5	1.6384 (ZK11)	22.81	
			29.907	0.2	1.5688 (BaK7)	22.37	
			-20.27	13	1.728 (ZF4)	21.26	
			744.82	1.85	1.5688 (BaK7)	21.24	
			-72.09	10.21		22	

§ 4.3.4 借助价格工程 (VE) 优化广角目镜设计

广角目镜是为适应大视场系统而设计的。由于视场角增大了，在一定的出瞳距离要求下，斜光束的倾斜角在透镜表面的投射高随之增加。各种高级像差很快增大，场曲也随之增大。一般目镜因其视场角在 40° 左右，所以基本采用二组元目镜。当视场角超过 50° 时，二组元目镜难以满足要求，为了保证像差的要求，目镜的光学结构会复杂一些，应采用三组元目镜，或在系统中加入负光焦度的透镜，或增加正透镜组的数目，使光焦度分散。表 4-11 给出的是两种视场在 60° 以上广角目镜典型结构形式——五片三组元。I 型广角目镜由两块透镜组成接目镜，三胶合透镜用来校正像差，加入负光焦度减少了场曲；II 型广角目镜由胶合透镜组和中间的凸透镜组成接目镜，另一个胶合透镜用来补偿整个系统像差。其光学特性如下：

I 型： $2\omega=60^\circ \sim 70^\circ$ ， $D'/f'=1:1.5 \sim 1:1.3$

II 型： $2\omega=60^\circ \sim 65^\circ$ ， $D'/f'=1:1.5$

借助价值工程 (VE) 这一现代化管理技术与方法，可使广角目镜设计优化。如前述，评价一个光学系统设计优劣的主要依据：①性能和成像质量；②系统的复杂程度。即优化设计的目标应是在功能（光学性能、成像质量）能满足用户需要的前提下，结构最简单（成本低）。要实现这一目标，可按 $V=F/C$ 公式，通过如下几个途径实施。

1. 优化选型

在光学镜头设计中，试验法得到广泛的应用。值得再次强调指出：原始结构的选择是决定性的因素。

据 $V \uparrow = F \rightarrow / C \downarrow$ （注：↑表示提高，↑↑为大大提高，↓表示下降，↓↓为大大下降，→表示不变，以下同）思考，因显微镜用的广角目镜属中等视场，从光线偏角的分配经验式判别，可以比典型广角目镜的五片三组元结构少用一个透镜。经过分析对比，选择蔡司 (Zeiss) 广角型目镜为原始结构。电算迭代后，研制出新的四片三组元广角目镜系列产品具有较为满意的像质，成本也降低了。

2. 产品系列设计中的优化

笔者在 G12.5×/18 广角目镜设计完成并研制成功的基础上，继续进行系列产品设计。国内某厂的 G10×/20 选用三片两组元开涅尔目镜型，从降低成本角度看似乎可取，但进一步仿此进行光路计算，发现像质不是很理想。于是遵循“处理目镜主光线的偏向角是设计中

首要问题”的原则，重新审视 G10×/20 广角目镜设计。据 $V \uparrow = F \uparrow / C \uparrow$ ，还是选用蔡司广角型目镜，达到了既定的目标。

3. 结构设计的优化

据 $V \uparrow = F \rightarrow / C \downarrow$ ，根据广角目镜的特点，把目镜筒一端设计成压圈形式，增加了它的一个功能，取消了压紧透镜组的压圈，减少了金属件，降低了成本。

4. 光学零件冷加工工艺的优化

影响光学零件成本的主要因素除材料外就是加工方法，工艺性好，可较大幅度地降低成本。而零件良好的工艺性，往往在设计阶段中赋予。据 $V \uparrow = F \rightarrow / C \downarrow$ ，利用微调各镜片光组焦度比例的办法，把过大的曲率半径 R 改成平面 ($R=\infty$)，把相近的 R 在保证像质优良的前提下取为相同值。这就大大减少了做光学样板及制造工装的费用，还缩短了生产周期，便于生产管理。

设计实例见表 4-15 和表 4-16 (a)、(b)。

表 4-15 10×广角目镜结构参数

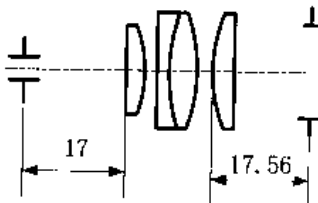
名称	主要技术参数	结 构	参 数				备 注
			R/mm	d/mm	n_D	D_f/mm	
10× 广 角 目 镜	$2\omega=50^\circ$ $D=1.25\text{ mm}$ $f'=23.796\text{ mm}$ $y'_0=11.1\text{ mm}$ 入瞳距 $i=169.8\text{ mm}$		∞				*配大视场显微镜(如体视显微镜)用
			-20.4677	5	1.5163 (K9)	17.11	
			-266.3265	0.17		20.18	
			23.6720	2.5	1.755 (ZF6)	20.26	
			-35.1731	11	1.5163 (K9)	20.94	
			32.8086	0.17		25.95	
			-134.3641	5	1.5163 (K9)	26.01	
						25.68	

表 4-16 (a) 15×广角目镜结构参数

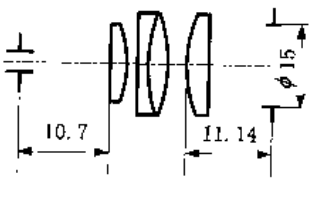
名称	主要技术参数	结 构	参 数				备 注
			R/mm	d/mm	n_D	D_f/mm	
15× 广 角 目 镜	$2\omega=50^\circ$ $D=0.8\text{ mm}$ $f'=17.05\text{ mm}$ $y'_0=7.95\text{ mm}$ 入瞳距 $=159.6\text{ mm}$		∞			10.78	
			-14.0100	3.5	1.5136 (K9)	12.94	
			-74.8556	0.1		12.98	
			17.7420	1.62	1.755 (ZF6)	13.52	
			-17.8810	8.5	1.5163 (K9)	17.83	
			23.0100	1.2		18.13	
			∞	5	1.5163 (K9)	17.62	

表 4-16 (b) 像差数据

像差 $h\omega$	$\delta L'$	$\Delta L'_{FC}$	x'_1	x'_2	x'_{18}	K'_T	$\delta y'_z$	$\Delta y'_{FC}$
1.0	0.011467	-0.036218	-0.96852	0.61676	-1.5862	-0.002554	6.18	0.0075
0.7071	0.0057311	-0.03626	-0.39566	0.33364	-0.72931	-0.0010937	3.56	0.006915

§4.3.5 显微摄影光学系统及摄影目镜设计

显微摄影 (photomicrography) 指利用摄影方法记录标本的显微图像的过程; 而摄影装置是实施显微摄影的装备。据国家标准《生物显微镜系列》(GB2984—82) 的规定, 摄影装置是实验室显微镜、研究显微镜必备的重要附件。我国显微镜行业在 20 世纪 80 年代初已开发出国产摄影装置, 可惜一直没有什么人的改进。近年来, 国外对显微摄影装置作了较大的改进。从有关图片资料看到, 这种改进主要是取消了附加的摄影对焦镜筒, 结构大为简化。

1. 显微摄影原理

显微摄影装置是一种以摄影方法记录各类显微镜中所看到的各种显微图像的显微镜重要附件。显微摄影装置可用于生物学、细菌学、药学、遗传学、优生学和微循环等的生物研究和金相研究, 以及其他领域的科学研究, 将重要的研究标本、成果拍摄保存。图 4-18 所示是与生物显微镜相连接的摄影装置示意图。可见摄影装置由摄影目镜 1、摄影对焦镜筒 2、反射镜 3、照相机暗箱 4、机械接筒 5 和卡口 6 等六个基本部分组成。

显微摄影原理如图 4-19 所示。物体 2 由光源 1 经柯勒照明系统照明, 经物镜 3 后成放大实像, 再经摄影目镜 4 后又一次放大成像在底片 5 上。目镜观察系统 6 中的半五角棱镜在摄影时从光路中移去, 使从物镜射出的光线投射到摄影目镜上。移入棱镜后, 从物镜反射的光线将由棱镜反射后射入目镜。变换系统的外形结构如图 4-20 所示。图 4-20 为目镜观察时的光路, 当把左下的拉杆向左拉, 半五角棱镜移出光路, 由一块平行平板代替时, 光线将射向摄影目镜。

成像原理如图 4-21 所示。摄影时, 物体 AB 经物镜 O_1 、摄影目镜 O_2 两次放大后成像于底片 $A'B'$ 上, 为使整个共轭物像距 L 不致于太大, 摄影目镜应设计成负目镜为好。常用的摄影目镜放大倍数系列为 $S2.5\times$ 、 $S4\times$ 、 $S6.3\times$ 。

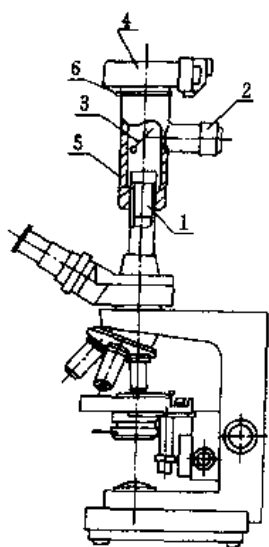


图 4-18 带摄影装置的生物显微镜

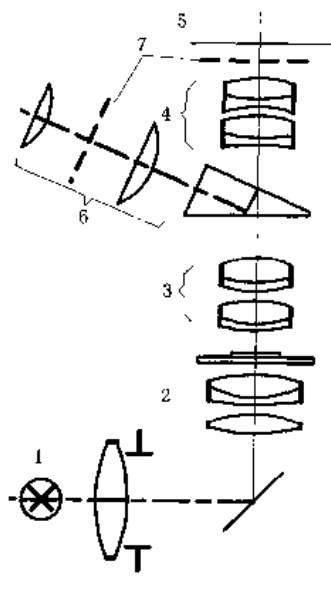


图 4-19 显微摄影原理

设计摄影目镜时必须注意, 中间像 A_1B_1 的大小是由物镜所决定的。摄影目镜的放大倍数应按 $2A'B'/2A_1B_1$ 来计算。

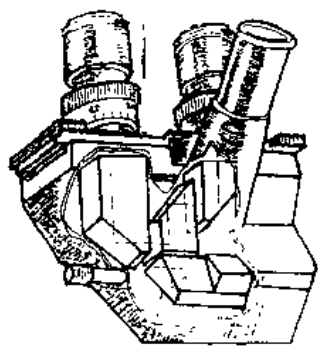


图 4-20 显微镜推拉式三目头

为使物镜和摄影目镜所成的像正确地成在胶片上，从光学原理可知，物体经物镜所成的中间像 7（参见图 4-19）对目镜或摄影目镜而言是共轭的。若人眼从目镜看到清晰像（通过调焦达到），似乎该像也应成在摄影目镜光路中间像面 7 上，因为像面 7 和胶片平面对摄影目镜而言在设计时是共轭的，此时理应获得清晰照片。但实际上，由于人眼有景深的缘故，中间像即使成在像面 7 的前面或后面，看起来也可能是清晰的，此时该像面与胶片平面将不共轭，不能获得清晰的图片。为此，专门设计了一种摄影对焦镜筒，以克服此缺点。图 4-22 所示为这种装置的光学原理图。

图 4-22 中的 3、4、5 构成一个对焦显微镜，其中 3 为对焦物镜，4 为十字线分划板，5 为目镜。通过粗、细调焦机构，使物体经物镜（图中未表示）、摄影目镜 1、反射镜 2、对焦物镜 3 后成像在分划板 4 上，人眼通过目镜 5 即可进行观察对焦。由于有分划板 4，消除了人眼景深的影响，若分划板 4 上的像是清晰的，可转动反射镜 2（或移动），使由物镜来的成像光线经摄影目镜后直接成像在底片 6 上，以进行显微摄影。因为该装置的底片平面 6 和分划板 4 均与物体共轭，故当分划板上成像清晰时，底片上的像也必然是清晰的。

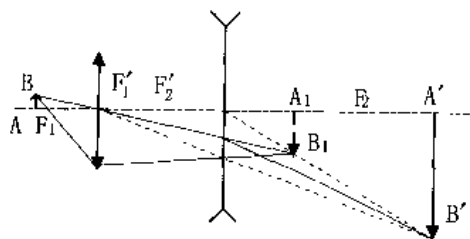


图 4-21 用负目镜作显微摄影成像原理

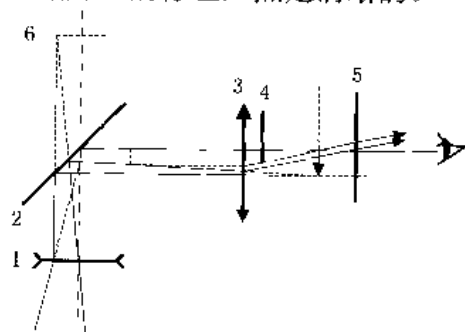


图 4-22 显微摄影对焦光学原理

2. 显微摄影装置的功能系统分析

借助价值工程这一先进的管理技术与方法，可分析出物化在先进的国外显微摄影装置中的技术秘密。

以显微摄影装置作为产品改进的价值工程对象，通过功能定义和功能整理，并画出功能系统图（见图 4-23）。从图中可直观地看出照相机暗箱的“取景器对焦”和对焦镜筒部件的“对焦光路”功能重叠，可见国产售品功能过剩，需消除这一过剩功能，实现产品优化。

3. 摄影目镜设计

要把摄影目镜设计好，首先必须注意摄影目镜与观察目镜的区别。然后再分类，阐述其设计方法。

摄影目镜与观察目镜的区别如下：

（1）物镜所成的像经观察目镜后成像在无限远或明视距离处，而物镜的像经摄影目镜后成像在给定的有限距离处。

（2）观察目镜允许存在一些场曲，而摄影目镜必须校正场曲，使整个视场范围内得到同样清晰的像。由于摄影目镜的视场角大多小于观察目镜，因此达到此要求困难不大。此外，

对垂轴色差的要求也比观察目镜严。

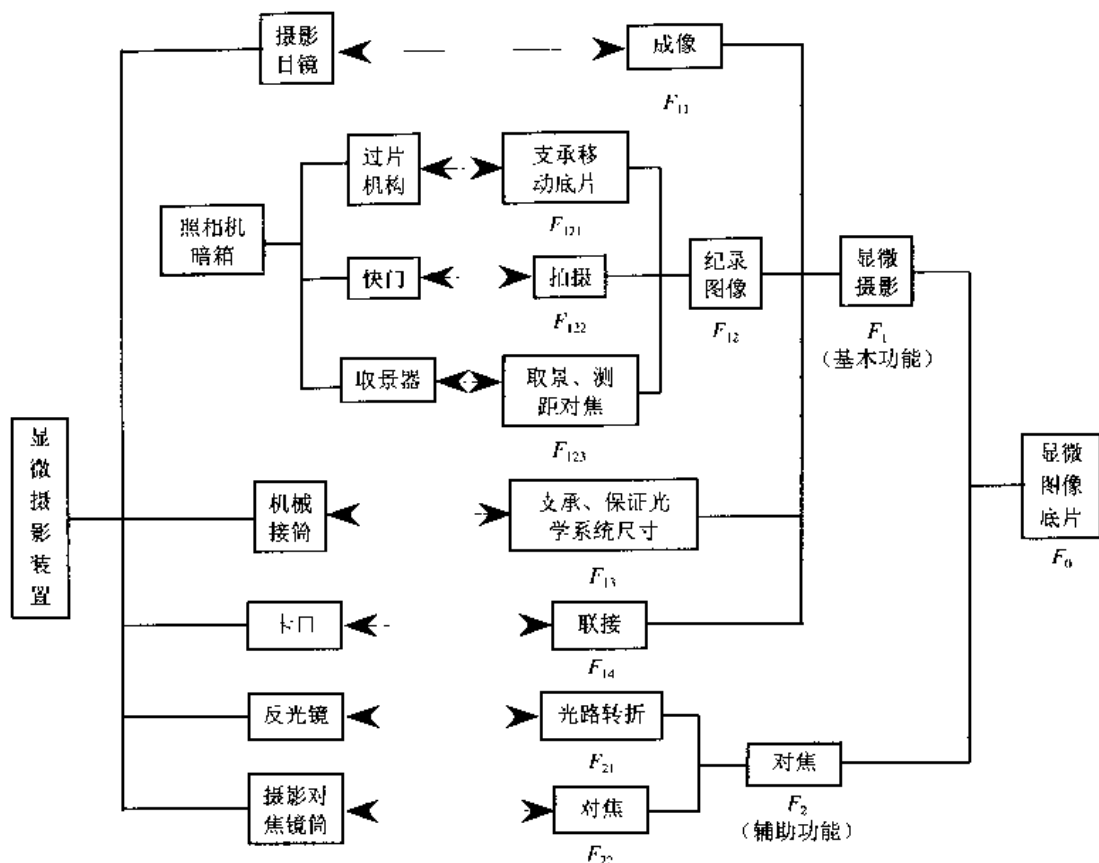


图 4-23 显微摄影装置功能系统图

(3) 观察目镜要求有一定的出瞳距离，以便观察者能看清整个视场，而摄影目镜对此却无要求。

摄影目镜就其光焦度的符号可分为二类，即摄影正目镜和摄影负目镜。

通常，摄影目镜的视场小于观察目镜的视场。由此可由观察目镜的“离焦”而构成摄影目镜。二者有如下关系：

$$x = \frac{250}{\beta y} \text{ 或 } x' = -\frac{250\beta}{y} \quad (4-10)$$

式中， β 是摄影目镜垂轴放大率， y 是观察目镜角放大率， x 和 x' 分别表示以焦点为原点的物距和像距。

若欲设计专用的摄影正目镜（如二组件系统），可由下列公式，先取 d 值，然后设不同 k 值，求出诸参数及主光线偏角，再由偏角决定目镜结构及各组件的光焦度，余下过程与观察目镜设计方法相同。

$$\begin{cases} [(\beta + k)l_1 + (1 - d)k]\varphi_1 = 1 - \beta \\ (1 - \beta)(d - l_1) - \beta l_1 d \varphi_1 = L \end{cases} \quad (4-11)$$

式中， $k = \varphi_2 / \varphi_1$ ， L 是摄影目镜共轭距离， d 是二组件间空气隙。

霍马尔目镜是典型的摄影负目镜。采用负系统的主要目的，是为了补偿复消色差显微镜物镜的场曲（附带补偿垂轴色差），因此也可与高倍消色差显微物镜配合使用。

4. 设计实例

笔者设计了 S2.5 \times 摄影目镜, 已商品化。这是用试验法在广角目镜的基础上“离焦”, 经电子计算机迭代计算得的结果, 见表 4-17 (a)、(b), 供参考。

表 4-17 (a) S2.5 \times 摄影目镜结构参数

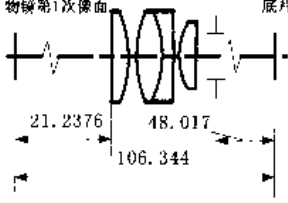
名称	主要技术参数	结 构	参 数				备 注
			r/mm	d/mm	n_d	D_g/mm	
S2.5 \times 摄 影 目 镜	$y=8.7\text{ mm}$ $\text{NA}=0.0104$ $y'=21.75\text{ mm}$ $f'=20.426\text{ mm}$		-272.452			23.25	
			-25.18	6.3	1.5136 (K9)	24.36	
			25.18	0.15		24.32	
			-21.692	10	1.5163 (K9)	19.24	
			168.27	2.4	1.7398 (F6)	18.41	
			21.88	0.15		18.33	
			∞	4.2	1.5163 (K9)	15.56	
			∞	13.8		1	

表 4-17 (b) 像差数据

数据 h/w	$\delta L'$	$\Delta L'_{\text{FC}}$	x'_1	x'_s	x'_{1s}	K'_1	$q(\%)$	$\Delta y'_{\text{FC}}$
1.0	0.075347	-0.019147	-0.46549	0.98726	-1.4527	0.004606	8.28	-0.014317
0.7071	0.037626	-0.018667	-0.17954	0.59027	-0.41073	0.002226	4.7	-0.008221

§4.3.6 显微电视 CCD 摄录接口的设计

1. 引言

近年来, 为了改善显微镜的观察条件, 进行教学 (或多人观察) 与远距离监视, 相当多的显微镜已配有显微电视装置。显微电视的实质是把电视摄像机和显微镜连接起来。其光学原理如图 4-24 所示。物体经显微物镜 O_1 后成一中间像 A_1B_1 , 再经摄影目镜 O_2 成像在电视摄像机光靶上, 然后摄像机把光信号转变为电信号, 传给电视显示系统, 在监视器荧屏上显出显微图像。

显微电视可以观察一个动态的研究过程, 特别适于活体培养或某些运动过程的观察, 如微血管循环状态等。显微电视不但能实时通过荧屏传递显微图像信息, 还可通过录像机把一些珍贵镜头及变化过程录制在磁带里, 作为研究资料。正是由于其优越的功能, 显微电视的应用越来越广泛。

值得指出, 20 世纪 80 年代我国显微电视几乎全部采用光导型摄像管式摄像机, 到了 90 年代才逐步开始使用固体摄像机。这类摄像机重量轻, 体积小, 寿命长, 耗电少, 耐振动, 耐冲击, 无残像, 特别适于显微镜无支架直接连接。其中使用最广的是 CCD 电荷耦合器件摄像机。

尽管显微电视应用日趋广泛, 然而当时国内尚没有光机一体化的显微图像摄录专用接口。绝大部分生产厂在显微图像摄录中采用“摄影目镜 (S2.5 \times 、S4 \times 、S6.3 \times) + 机械接筒”的传统模式。其好处是: ①摄影目镜可分别用于显微摄影或显微电视摄录, 一物两用; ②有较大的放

大率（显微物镜倍率×摄影目镜倍率）。但这样做有很大的不足：
 ①丢失了大量显微图像信息，如在 135 胶卷上的成像，其摄影目镜像方线视场为 43.266 mm，视场圆面积达 1470.2 mm²。对于当时最常用的 2/3"CCD 摄像机而言，光靶对角线长为 11.0 mm，视场圆面积为 121 mm²，仅占摄影目镜成像面积的 8.2%。
 ②摄影目镜和机械镜筒分别为两个零件，使用、携带不大方便。针对这些，作者设计了两种形式的显微电视专用接口，能与 CCD 光靶尺寸较好地匹配，大大提高了接收显微图像的质量。

2. 专用显微电视 CCD 摄录接口的设计

在设计接口时，像差计算按反向光路进行，即把 CCD 光靶对角线尺寸作为物，显微物镜成的一次像为像。这是一个中等视场与孔径的光学系统，主要校正轴上点像差和轴外点细光束像差。作为摄录接口，必须校正场曲，使整个视场范围内得到同样清晰的像。此外，对垂轴色差要求也比较严。

摄录接口的实质是针对 CCD 光靶尺寸按传统摄影目镜的设计思路进行，即由观察目镜“离焦”而构成。国内售品的摄影正目镜结构一般多为两组元四片式，而作者对外商提供的日本样机进行反求分析时，发现是更为简单的“双胶+场镜”形式，于是据此进行反求设计，引入正、负接口两种方式：

- (1) 开涅尔目镜“离焦”形式摄录正接口。显微物镜一次像在摄像物镜外侧场镜附近。从光路计算角度看，这种正接口像差校正比较容易，尤其是垂轴色差较小。
- (2) 具有胶合面的惠更斯型补偿目镜“离焦”形成摄录负接口。显微物镜成虚像在原接目镜与场镜之间。这种方式的优点是光学系统共轭距较小，对显微镜的照明要求较低，与普通高倍消色差显微物镜配合，对补偿垂轴色差有利。

连接尺寸应注意国际通用性。与摄像机连接部分采用国际通用的 C 安装方式，即安装部件采用英制螺纹 1"× 1/32"连接，接口安装基准面到光靶距离是 17.526 mm；与显微镜筒连接部分按有关标准选用（如与生物显微镜连接时，接口部分为 $\phi 23.2h8$ ）。

3. 设计实例

本实例是按日本样机“反求”设计而成，见表 4-18（a）和（b）。

表 4-18（a） 摄录负接口结构参数

主要技术指标	结 构
$v=0.0273$ $f'=431.66\text{ mm}$ $L=135.99\text{ mm}$ 入瞳距=217 mm	

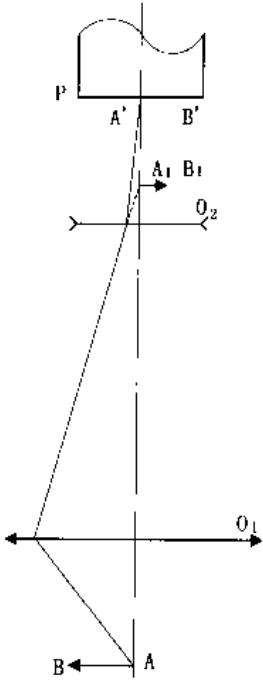


图 4-24 显微电视光学原理

续表

参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n_D	ν	D_0/mm	玻璃	
1	25.934				16.91		
2	647.64	4	1.4874	70.04	16.08	QK3	
3	25.44	79.8			8.67		
4	11.482	3.36	1.5163	64.1	8.1	K9	
5	29.011	0.96	1.6475	33.87	8	ZF1	
6	光阑	0.0001			8		

表 4-18 (b) 像差数据

数据 $h\omega$	$\delta L'$	$\Delta L'_{FC}$	x'_t	x'_s	x'_{ω}	K'_T	q (%)	$\Delta y'_{PR}$
1.0	0.17359	-0.21769	3.1885	1.9231	1.2654	-0.114952	1.39	-0.008334
0.7071	0.22619	0.185039	1.6278	0.96487	0.66298	-0.084154	0.68	-0.006198

§ 4.4 照相物镜设计

§ 4.4.1 照相物镜的光学特性和结构形式

1. 引言

照相物镜的性能由焦距 (f')、相对孔径 (D/f') 和视场角 (2ω) 这三个光学特性参数决定。照相物镜光学特性的最大特点是它们的变化范围很大。

焦距 (f'): 照相物镜的焦距, 短的只有几毫米, 长的可能达到 2~3 m, 甚至更长。

相对孔径 (D/f'): 小的只有 1:10, 甚至更小, 而人的可能达到 1:0.7。

视场角 (2ω): 小的只有 $2^\circ \sim 3^\circ$, 甚至更小; 大的可能达到 140° 。

照相物镜的三个光学特性之间是互相关联、相互制约的, 它们决定了物镜的光学特性。不可能做到同时提高, 只能像“翘翘板”一样, 此起彼伏。如前述, 可用 A.C.Bojiocob 的经验公式 $D/f' \cdot \tan \omega \cdot \sqrt{f'/100} = C_m$ 来表示三个光学性能参数间的关系。对照相物镜, $C_m \leq 0.24$ 。

同时, 也可用拉氏不变量表征一个物镜总的性能, 因为

$$f' \cdot D/f' \cdot \tan \omega = 2h \tan \omega = 2J \quad (4-12)$$

式中 h 为入瞳半径, J 为拉氏不变量。

2. 照相物镜的结构特点

对于照相物镜来讲, 它要求既有较大的相对孔径, 还要有较大的视场。为了得到大视场, 除了消除位置色差、球差、彗差之外, 对像散、场曲、畸变及倍率色差也必须特别注意。

照相物镜在结构上普遍具有以下几个特点。

(1) 满足消场曲 S_{IV} 的条件 (即满足匹兹万条件)。由于照相物镜的视场较大, 若消像散后像面弯曲严重, 将影响成像的清晰度, 所以要求系统消场曲, 满足 $\sum S_{IV} = 0$ 的条件。由像差理论可知, 在满足一定的光焦度要求的情况下, 消场曲途径有二:

① 采用正负分离的薄透镜结构, 如图 4-25 所示。两块合成焦距 $\varphi_{\text{合}} = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2$, 可为正。而场曲 $S_{\text{IV}} = J^2 \left(\frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} \right)$, 适当选择 φ_1 、 φ_2 、 n_1 、 n_2 , 能使 $S_{\text{IV}}=0$ 。

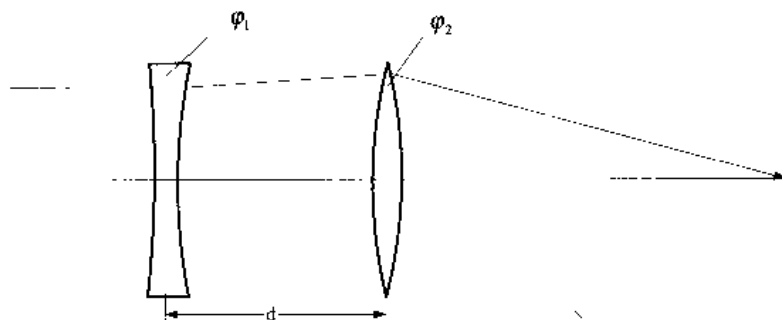


图 4-25 正负分离的薄透镜结构

② 采用弯月形厚透镜的结构, 如图 4-26 所示。其中 r_1 、 r_2 全为正值, 设 $r_1 > r_2$, 则根据

$$\varphi_{\text{弯}} = \underbrace{(n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}_{\text{第一项}} + \underbrace{\frac{(n-1)^2}{n} d \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2}}_{\text{第二项}}$$

式中 $(n-1)$ 必为正值。当 $r_1 > r_2$ 时, 第一项必为负值, 但第二项为正值。当 d 足够大时, 有可能使 $\varphi_{\text{弯}}$ 为正值。此时 $S_{\text{IV}} = J^2 \cdot \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$; 当 $r_1 > r_2$ 时, S_{IV} 得负值。当 $r_1 = r_2$ 时 $S_{\text{IV}}=0$ 。

其实, 一块弯月形厚透镜实际相当于一块正透镜、一块负透镜中间夹一块平行平板。

(2) 利用对称型 (见图 4-27) 消像差。所谓对称型是指: ① 结构参数 r_1 、 d 、 n 对中心平面左右完全对称; ② 物、像距完全对称; ③ 光阑居正中。由像差理论可知, 对称型物镜左右两半部的彗差、畸变、倍率色差等横向像差数值相等、符号相反, 故全组合成以后, 这些像差自然为 0, 即 $\Sigma S_{\text{II}}=0$, $\Sigma S_{\text{V}}=0$, $\Sigma C_{\text{II}}=0$ 。这样, 在设计中只需对半部系统的球差、位置色差、像散、场曲进行校正。

(3) 利用同心消像差。采用对主光线同心的折射面 (即光阑在球心的面), 这时 $i_p=0$, 折射面只产生 S_1 、 C_1 和 S_{IV} , 而不产生其他像差, 但同心的条件不可能全保证, 对于像差产生特别严重的面应考虑同心原则。

3. 普通照相物镜的基本结构

现有的照相物镜种类繁多, 但仔细分析, 不难发现, 不论何种复杂的物镜, 其中总有少数几个透镜起着决定性作用。这些起决定作用的元件叫照相物镜的基本结构, 这些基本结构往往并不复杂, 而且种类有限, 如果我们能充分掌握这些基本结构的性质和把它们复杂化的方法, 我们就可以掌握一切照相物镜设计的关键, 并且可以根据不同的需要, 创造出最合适的结构。

下面简单介绍八种基本结构。

(1) 由单个厚透镜构成的对称结构 (见图 4-28)。弯月形厚透镜当两个 r 相等时 $S_{\text{IV}}=0$,

对于单透镜可以找到两个像散为零的光阑位置，根据消像散光阑位置的不同又可分为两类：

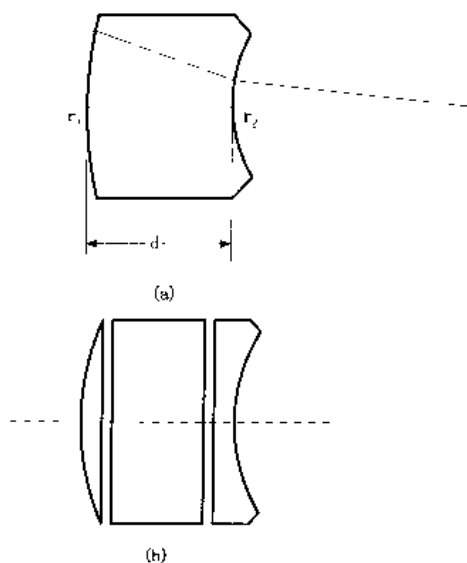


图 4-26 弯月形厚透镜及其等效结构

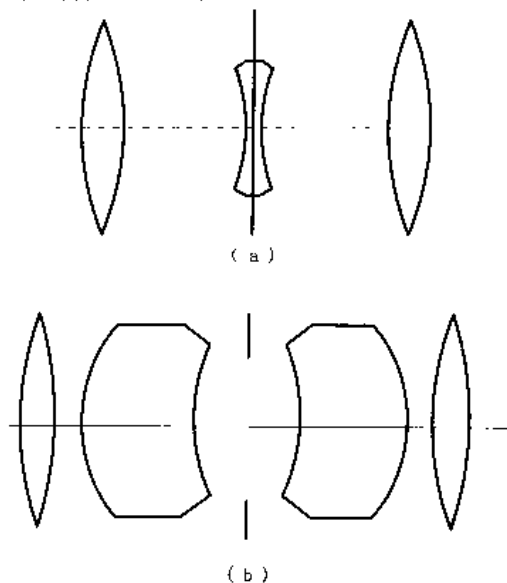


图 4-27 对称型消像差的结构

① 光阑离透镜较远的情况。称为海卜冈的广角照相物镜就属于这一类。由于没有消除球差和位置色差，为了得到比较清晰的像，物镜的相对孔径在厚透镜中加入一个胶合面，以消除色差，并部分地消除球差， $D/f' = 1/8$ ， $2\omega = 100^\circ$ 。

② 光阑离透镜较近的情况。在这一类中较著名的是达哥尔 (Dagor) 镜头，见图 4-29。它是在基本结构中加入一个消球差和一个消区域像散的胶合面，并且适当地选择材料，以消色差。

(2) 由一个厚透镜和一个薄透镜，而且负光焦度在前构成的半部对称结构，参见图 4-28，按薄透镜的光焦度为负或正，又可分为两类：

① 薄透镜的光焦度为负构成的广角物镜称托卜冈 (Topogoll)，见图 4-30。其特点是各个折射面和光阑趋近同心，广泛应用于航空摄影。

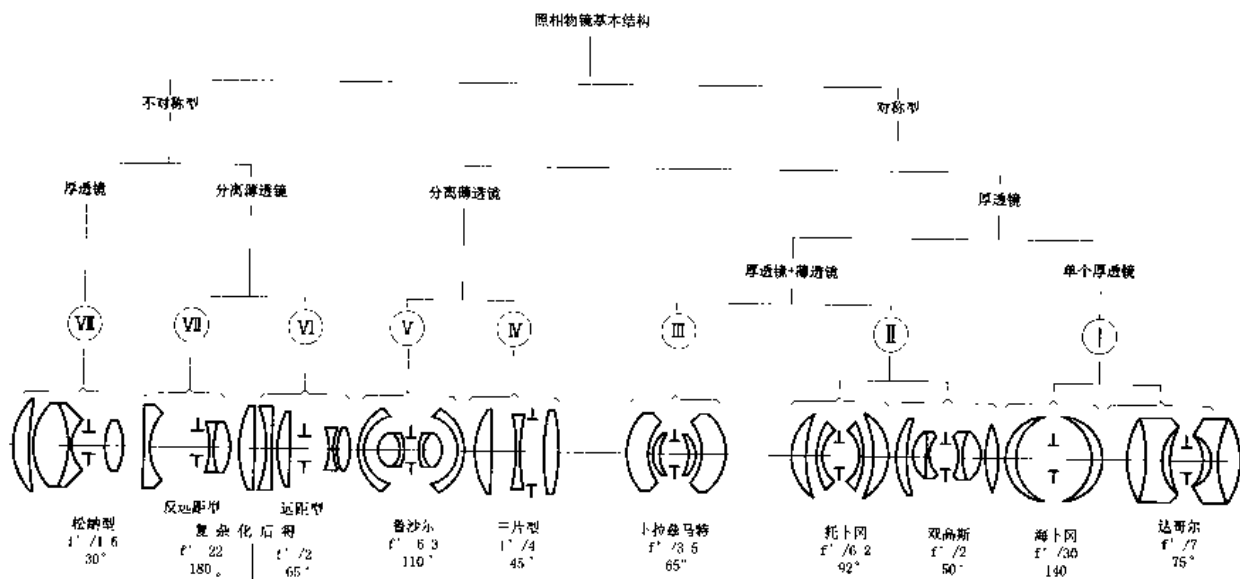


图 4-28 照相物镜的基本结构类型

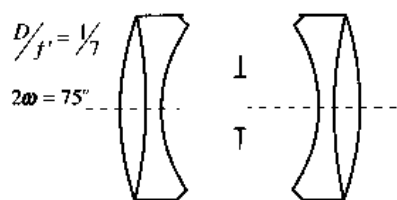


图 4-29 达哥尔镜头

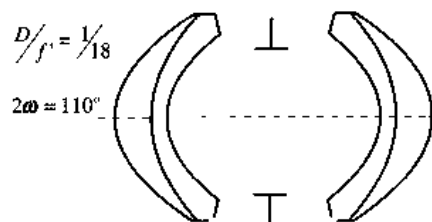


图 4-30 托卜冈镜头

② 薄透镜的光焦度为正构成的大相对孔径物镜称双高斯 (Planar)，见图 4-31。

这两种结构中，利用透镜弯曲消球差，光阑位置消像散，当第一块负透镜由薄变厚时，区域球差减小，但区域像散随之增加，因此物镜的相对孔径增加而视场减小。

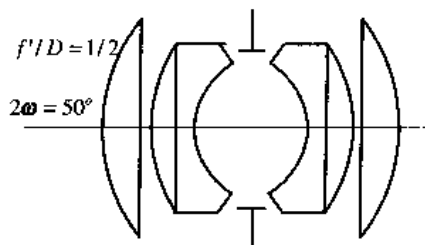


图 4-31 双高斯物镜

(3) 由一个厚透镜和一个薄透镜，而且正透镜在前构成的半部对称结构。这种结构也可分为两类，一类为负透镜为厚透镜，加入胶合面以校正区域像散，称为卜拉兹马特 (Plasmat)，其相对孔径达 1/3.5，视场为 65°，参见图 4-28；另一类是正透镜为厚透镜，它的相对孔径为 1/1.8，视场为 40°。

(4) 利用正、负分离的薄透镜，负透镜在前构成半部的对称结构。这种物镜使用最广泛，它是能校正全部像差的一种最简单的结构，它的复杂化后的结构如图 4-32 所示。

(5) 利用两个正、负分离的薄透镜，且正透镜在前构成的半部对称结构。这类物镜中最著名的是鲁沙尔型物镜，参见图 4-28。它的相对孔径达 1/6.2，视场达 110°。这类物镜除像差校正十分完善外，还利用外部两个帽形透镜，产生光阑彗差，而加大视场边缘口径（称为“像差渐晕”），这是超广角物镜所必需的，否则视场边缘的照度太低，而无法使用。

(6) 利用两组分离的薄透镜，而且正透镜在前构成不对称结构。这类物镜的特点是系统的总长度小于焦距，称为远距物镜或摄远物镜。

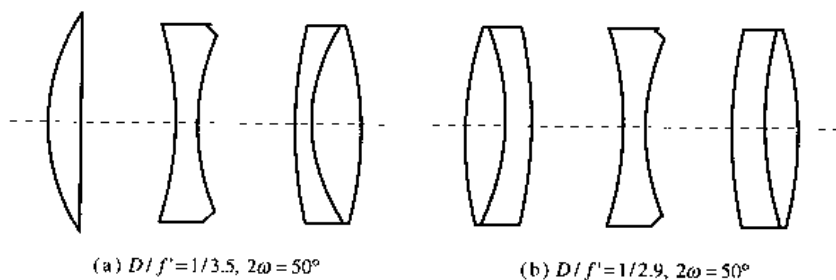


图 4-32 正、负分离薄透镜结构

图 4-33 (a) 为最简单的远距物镜。较复杂的结构如图 4-33 (b) 和图 4-33 (c)。其中图 (b) 中 $D/f' = 1/6.2$ 、 $2\omega = 30^\circ$ ，负组为双胶镜，有较大的畸变，未得到广泛使用；图 (c) 中 $D/f' = 1/6.3$ 、 $2\omega = 32^\circ$ ，负组由二个分离透镜组，消除了畸变，得到广泛应用。

(7) 利用两组分开的薄透镜，而且负透镜在前构成不对称结构。这类物镜与第 (6) 类正好相反，具有焦距短而工作距长的特点，故称为反远距型物镜或反摄远物镜。

这类物镜最简单的结构如图 4-34 (a) 所示，但具有较大的畸变，用于气象方面，因为

畸变对记录和测量天空的云层，没有很大影响。图 4-34 (b)、图 4-34 (c) 是这类物镜的较复杂的结构。为了适当校正畸变，前组透镜用两个薄透镜组成。后组则用复合透镜组代替，能得到大孔径、大视场的物镜；这类物镜的另一个优点，是具有良好的渐晕特性，整个视场内照度均匀。

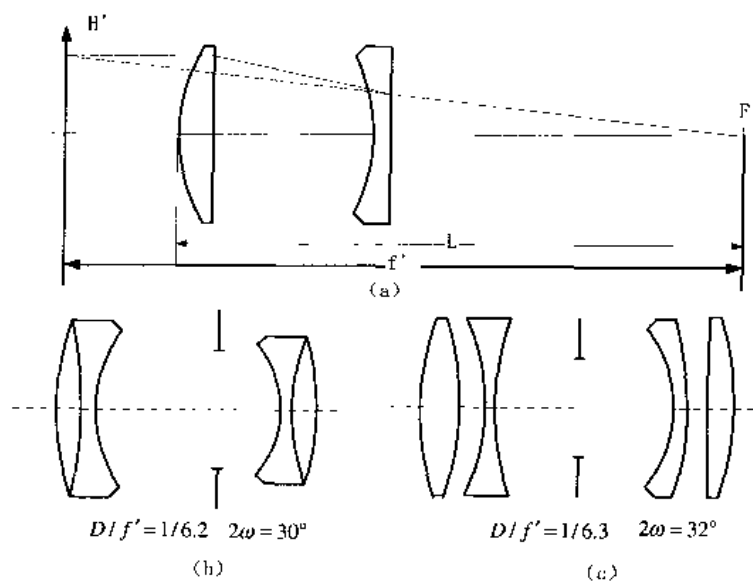


图 4-33 远距物镜

(8) 由两个正薄透镜和一个负厚透镜构成的不对称结构。它是属于大孔径物镜，其结构如图 4-35 所示。

另外，还有一种结构是匹兹力 (Petzval) 物镜 (见图 4-36)。由于没消场曲，视场一般较小，它是由两组分开的消色差物镜组成，目前应用很少。

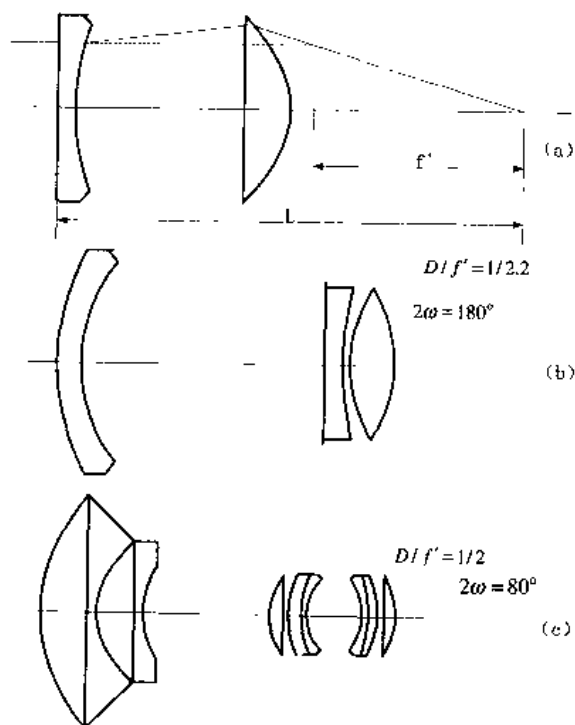


图 4-34 反远距物镜

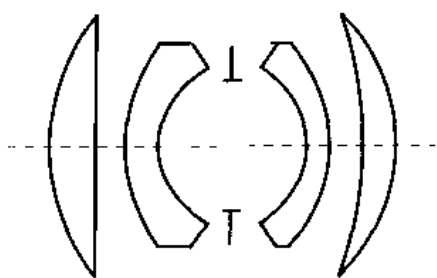


图 4-35 大孔径物镜

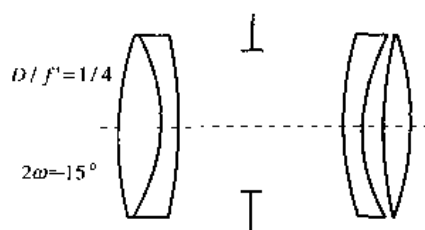


图 4-36 匹兹万物镜

4. 照相物镜复杂化的方法

在基本结构的基础上, 为了改进某些像质或提高系统的光学特性, 往往要把基本结构复杂化, 下面介绍几种常用的复杂化的方法。

(1) 加胶合面。这是照相物镜设计中常用的方法之一, 归纳起来, 加胶合面的作用分以下三种情况:

① 消色差胶合面。在基本结构中, 利用两种折射率相等但色散不等的光学玻璃构成胶合面以校正色差。由于折射率相等, 故加进胶合面时不会影响已校正好的单色像差特性。

② 消球差胶合面。当胶合面两边玻璃具有折射率差时就会产生一定的球差, 因此胶合面的方向是弯向光阑, 这样可使它少产生斜光束像差, 如图 4-37 所示, 其中胶合面 I 即用来消球差。

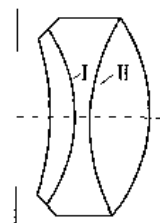


图 4-37 胶合面的作用

③ 消像散胶合面。利用胶合面两边介质折射率差产生一定的像散, 以校正基本结构的像散, 为了在折射率差不大的情况下产生较大的像散, 同时尽量少产生球差, 这样的胶合面往往是背向光阑的 (见图 4-37 中胶合面 II), 使 I_p 增大, 并且远离光阑。由像差理论可知, $S_{III} = S_I \left(\frac{i_p}{i} \right)^2$ 背向光阑时 I_p 增大, 虽然 S_I 较小, 但也能产生较大的 S_{III} 。

(2) 分裂透镜。把基本结构中某一透镜分裂成 2 个或 3 个, 目的是为了减小每个透镜的光焦度, 增大它们的曲率半径, 减小光线的入射角, 以便减少高级像差和系统的剩余区域像差, 提高光学特性; 也可用来减小区域像散增大视场; 还可用来减小轴上点高级球差或轴外点高级轴外球差, 以增大系统的相对孔径。

5. 照相物镜演变与分类

照相物镜光学结构形式相当多。清华大学图书馆馆藏的《光学镜头手册》^[17], 其中 6 个分册共刊登了 678 个镜头资料, 其中照相物镜为 435 个, 占 64.2%。为了帮助读者了解, 借助“纲举目张”的方法。先把照相物镜分为 5 大类的“纲”。

- (1) 匹兹万物镜: $D/f' = 1:3.4$, $2\omega = 25^\circ$, 见图 4-38;
- (2) 双高斯物镜: $D/f' = 1:2 \sim 1:1.7$, $2\omega = 40^\circ \sim 50^\circ$, 见图 4-39;
- (3) 三片式物镜: $D/f' = 1:3.5 \sim 1:2.8$, $2\omega = 55^\circ$, 见图 4-40;
- (4) 广角和超广角物镜: $D/f' = 1:1.8$, $2\omega = 122^\circ$, 见图 4-41;
- (5) 远距与反远距物镜: 远距, $D/f' = 1:4 \sim 1:1.28$, $2\omega = 35^\circ$, 见图 4-42 (a)、(b); 反

远距, $D/f' = 1:3.5 \sim 1:2.5$, $2\omega \approx 60^\circ$, 见图 4-42 (c)、(d)。

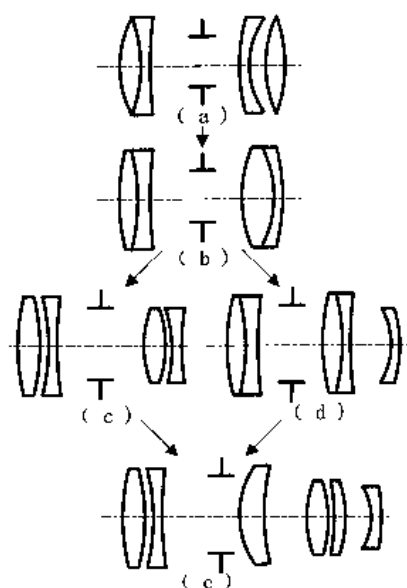


图 4-38 匹兹万物镜及其复杂化

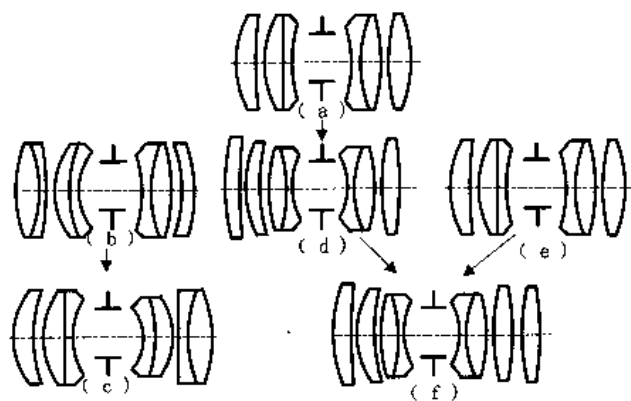


图 4-39 双高斯物镜及其复杂化

从“纲”开始, 逐次演化(或复杂化)成相关的型式为“目”, 这样表述脉络分明, 自然好掌握。

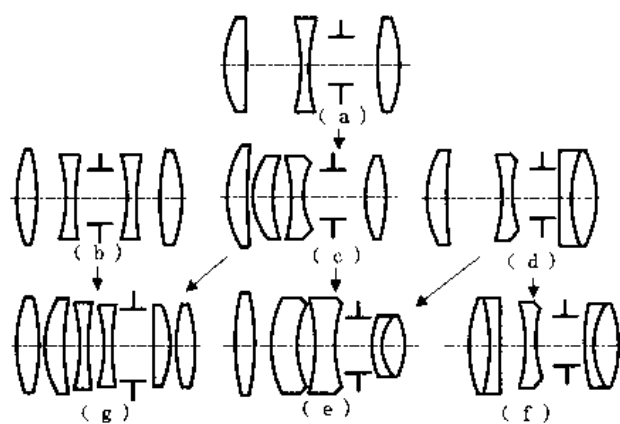


图 4-40 三片型物镜及其复杂化

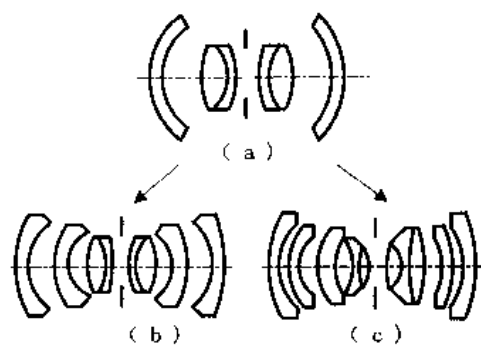


图 4-41 广角和超广角物镜

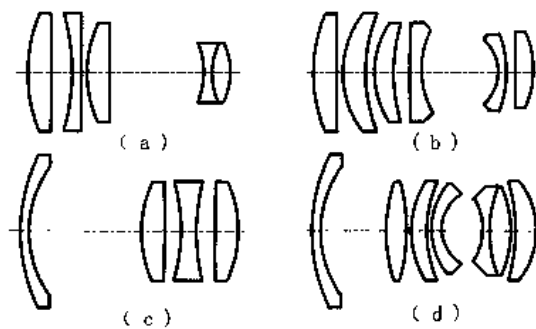


图 4-42 远距与反远距物镜

§4.4.2 照相物镜设计的一般方法

由于照相物镜的光学特性变化范围很大,视场和相对孔径一般都比较大,需要校正的像差也大大增加,结构也比较复杂,它的设计比前面讲过的几种光学部件的设计要困难得多。本小节将对照相物镜设计中有普遍性的问题作一些分析和说明。

1. 初始结构形式的确定

初始系统的选定是计算机辅助光学设计的基础和关键。照相物镜中高级像差比较大,结构也比较复杂。因此,照相物镜设计的初始结构一般都不用求解初级像差的方法来确定,而是根据要求的光学特性和成像质量,从手册、资料或专利文献中找出一个和设计要求比较接近的结构作为初始结构。

2. 像差校正

在初始结构确定以后,就要校正像差,究竟需要校正哪些像差,在不同光学特性和不同结构形式的系统中是不同的。我们必须通过像差计算来确定。为此我们把照相物镜的像差校正大体分成三个阶段来进行。

第一阶段:首先校正“基本像差”。

在照相物镜设计中,基本像差一般指那些全视场和全孔径的像差,如:

(1) 轴上点孔径边缘光线的球差 $\delta L'_m$ 和正弦差 SC'_m 。

(2) 边缘视场像点的细光束子午场曲 x'_m 和弧矢场曲 x'_{sm} 。

(3) 轴上点的轴向色差 $\Delta L'_{gC}$ 和全视场的垂轴色差 $\Delta y'_{gCm}$ 。在照相物镜中一般对g(435.83 nm)和C(656.28 nm)这两种波长的光线消色差,而不像目视光学仪器那样对F光、C光消色差。因为感光材料对短波比人眼敏感。

(4) 畸变只对那些特殊用途的照相物镜(如用于摄影测量的物镜),才将畸变作为基本像差一开始就加以校正,一般照相物镜中不加以校正。

由于照相物镜的结构比较复杂,校正上面这些基本像差并不困难。

第二阶段:校正剩余像差或高级像差。

在完成第一阶段校正的基础上,全面分析一下系统像差的校正状况,找出最重要的高级像差,作为第二阶段的校正对象。当然在第一阶段中已加入校正的像差在第二阶段必须继续参加校正。因为只有在基本像差得到校正的前提下,校正高级像差才有意义。对剩余像差或高级像差的校正,采取逐步收缩公差的方式进行,使它们校正得尽可能小。在校正过程中,某些本来不大的高级像差可能会增大起来,这时必须把它们也加入校正,或者在无法同时校正的情况下采取某种折中方案,使各种高级像差得到兼顾。第二阶段校正往往是整个设计成败的关键。如果系统无法将各种高级像差校正到允许的公差范围之内,就只能放弃所选的原始结构,而重新选择一个高级像差较小的原始结构,回到第一阶段重复上述校正过程,直到各种高级像满足要求为止。

第三阶段:像差平衡。

在完成了第二校正阶段后,各种高级像差已满足要求。根据系统在整个视场和整个光束孔径内像差的分布规律,改变基本像差的目标值,重新进行基本像差的校正,使得在整个视场和整个光束孔径内获得尽可能好的成像质量,这就是我们在前面已经说过的“像差平

衡”。

对多数照相物镜来说，一般允许视场边缘像点的像差比中心适当大些，同时允许子午光束的宽度小于轴上像点的光束宽度，即允许视场边缘有渐晕。因此在校正像差过程中，可以把轴外光束在子午方向上截去一部分像差过大的光线，使它们不能通过系统到达像面成像，这就是轴外光束的拦光，也就是“渐晕”。

§ 4.4.3 照相机标准镜头设计

标准镜头设计是指其焦距长度与所摄底片对角线长度基本相等的镜头。对于 135 相机，由于底片大小为 $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$ ，对角线长为 43.2 mm ，所以装配的标准镜头为 50 mm ，也有 45 mm 、 58 mm 等规格，但以 50 mm 最为常见。

135 相机的标准镜头属于中焦距大孔径摄影物镜（系指相对孔径 $D/f' \geq 1/2$ ），且成像质量要求高。因此，经常采用双高斯及其改进型物镜，参见图 4-39。这是一种用厚透镜来校正像面弯曲的系统。

1. 结构形式及初始结构的选定

评价一个光学系统的好坏，既要看它的光学特性和成像质量，又要看它的结构复杂程度。在满足光学特性和成像要求的条件下，系统的结构最简单，成本最低，才算是一个好的设计。双高斯型是标准镜头结构的首选，但要选择得当，结构形式的选择还跟材料有关。

试验法是最主要的设计手段，因此当结构形式确定后，选择初始结构参数时应注意：

(1) 应选择玻璃成本尽可能低的结构参数。在国外，由于镧系玻璃比较便宜，因此在照相镜头中大量采用高折射率低色散的镧系玻璃。例如， $f' 50\text{ mm}/F2$ 标准镜头，一般采用五片五组，其中三片为镧系玻璃，包括两片重镧火石玻璃； $f' 50\text{ mm}/F1.8$ 以及 $f' 50\text{ mm}/F1.7$ 标准镜头，一般采用六片四组或五组，其中有二到三片属于上述玻璃。由于目前国内普通玻璃和镧系玻璃在价格上差别相当大，所以应尽可能避免使用镧系玻璃（特别是重镧系玻璃），以降低材料的成本。

(2) 应选择高级像差小的专利参数。在比较不同专利的好坏时，主要不是看它们的像差校正情况，而是看它们的高级像差情况。只要高级像差小，即使目前像差不理想，经过校正，仍可达到较小的剩余像差。否则，即使目前像差较小，校正起来仍十分困难。

2. 设计中应注意的若干问题

众所周知，当光学系统对称于光阑，并且物、像位置对称时，它的所有垂轴像差会自动消除。由于这个原因，对于双高斯结构的标准镜头，设计重点应放在轴上和轴外的轴向像差。最主要的是轴外高级负球差和高级正像散。当然，也要注意中间视场的彗差。轴外高级负球差的产生原因是由于靠近光阑的两个面，尤其是后组靠近光阑的第一面，产生大量的负球差而光阑又不在其球心上。高级正像散的产生原因是由前组第二面的主光线折射角（ i_p ）大的缘故。而且随着相对孔径的增大，中间视场的彗差也随着增大。所以在校正初级像差的同时应以这样的原则来选择：凡是使单透镜弯向光阑或使光阑接近于厚透镜第一面球心的解，对轴外像差的减小是有利的。

由于标准镜头的成像质量要求较高，一般鉴别率在一级以上。因此，在校正像差时重点应放在 0.7 视场以内，同时兼顾 0.85 视场，而对全视场的要求适当放宽。这也符合照相机

国家标准 GB10047—88 的要求，因为国家标准规定边缘视场为 0.5y 和 0.7y。因此，测量分辨率时，边缘指 0.5 视场和 0.7 视场，而不包括 0.85 视场。

为了得到较好的轴外像质，光学系统往往需要离焦。对于双高斯结构的标准镜头，一般轴外的最佳像面位置离开高斯像面为 0.1~0.2 mm。在这种情况下，一般不宜把轴上点的边缘球差过校正。否则，会造成轴上和轴外像面上的分辨率不能同时满足要求，导致轴上像差和轴外像差不匹配。对于双高斯结构型的标准镜头这一矛盾比较特殊。为了使轴上与轴外的最佳离焦面相一致，可有意将轴上球差欠校正一点。当然，这也不是绝对的，要看具体的情况。另外，为了得到较好的像质，光学系统要采取拦光措施，使边缘出现适当的渐晕，设渐晕系数为 K，则按照几何光学原理，边缘视场的照度应为

$$E=KE_0\cos^4\omega$$

式中 ω 为半角视场， E_0 视场中心照度。设 $K=0.35$ ，对于 $f'=50\text{ mm}$ 的镜头而言，有

$$E=0.248E_0$$

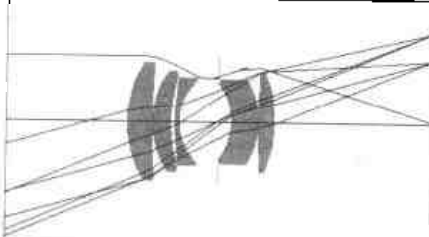
所以边缘视场的照度只能达到中心的 1/4 左右。若 K 继续变小，可能会使视场边缘产生黑角。因此，在设计时对此应予以充分考虑。

对于 135 可换镜头，对其后截距也有一定的要求，一般不宜小于 36 mm。

3. 设计实例

这是文献[46]提供的实例——设计一个 $f'50\text{mm}/F2$ 可换标准镜头。由于原文没有确定具体的光阑位置，把该例引入本文时，为了定光阑位置而进行光路计算，几经调整，加上离焦，使引入例子的像质基本上与文献[46]所载相仿。该镜头的结构参数见表 4-19 (a) 和 (b)。

表 4-19 (a) 标准镜头结构参数

主要技术指标		结 构				
$D/f' = 1/2$ $f' = 51.754\text{ mm}$ $2\omega = 45.6^\circ$						
参 数						备注
面号	r/mm	D/mm	n_d	ν	玻璃	
1	27.065					
2	165.844	5.882	1.54678	62.78	ZK3	
3	21.482	0.151				
4	37.177	4.377	1.7234	37.99	ZBaF21	
5	62.591	1.059				
6	18.636	0.951	1.64767	33.87	ZF1	
7	∞ (光阑)	9.476				
8	18.636	3				
9	34.561	1.157	1.71741	29.51	ZF3	

续表

参 数						备注
面号	r/mm	D/mm	n_d	ν	玻璃	
10	-20.021	5.28	1.70181	41.01	ZBoF20	
11	242.029	0.151				
12	-31.491	3.723	1.70181	41.01	ZBoF20	

表 4-19 (b) 多色光传递函数值

l_p/mm	轴上		0.7 视场		全视场	
	τ	s	τ	s	τ	s
5	0.799		0.837	0.768	0.920	0.636
10	0.639		0.57	0.678	0.72	0.484
15	0.607		0.453	0.586	0.47	0.409
20	0.489		0.417	0.506	0.237	0.359
25	0.479		0.364	0.464	0.075	0.343
30	0.463		0.294	0.385	0.124	0.318
35	0.389		0.258	0.325	0.211	0.228
40	0.350		0.259	0.277	0.247	0.311
45	0.294		0.250	0.218	0.222	0.343
50	0.23		0.203	0.184	0.155	0.238

注: -0.1 离焦。

§ 4.4.4 新型三片式照相物镜设计

1. 引言

近年来,人们对于照相机的需求量越来越大,为此世界各国的照相机厂家都推出了一种体积小、重量轻、价廉而成像质量较好的照相机,人们通常叫它“傻瓜”相机。

为使得机械结构简单,这种相机把传统的中心式快门移到镜头最后镜片的后面。由于光阑外移,使光阑在镜头中前后失去对称。这样,在镜头设计时给校正垂轴像差带来困难。

“傻瓜”相机镜头实质上是一种新型的三片式照相物镜。在一些光学技术先进的国家,其高折射率、低色散镧系玻璃价格比较便宜,他们生产的“傻瓜”相机镜头大都采用这种材料。我国到目前为止,一些镧系玻璃价格仍比较高,为了降低成本,增加竞争力,只能采用价格便宜的普通光学材料,这给光学设计带来更大的困难。本小节讨论如何用普通玻璃材料设计“傻瓜”相机镜头。

2. 对新型三片式照相物镜参数的要求

“傻瓜”相机应具有体积小,重量轻,携带方便等优点。其镜头要求是:焦距 $f' = 38\text{mm}$, 相对孔径 $D/f' = 1/3.8$, 使用 135 底片 ($24\text{mm} \times 36\text{mm}$), 视场角为 $2\omega = 60^\circ$ 。从参数要求来看,是短焦距、中等相对孔径、大视场的镜头。

目前国外设计的此类镜头,焦距 $f' = 38\text{mm}$, 相对孔径 $D/f' = 1/3.8$, 为三片型。或焦距 $f' = 38\text{mm}$, 相对孔径 $D/f' = 1/2.8$, 由四片透镜组成。若为三片型,则镜头中有一个曲率半径是

非球面。

3. 选型分析

在照相物镜中能够同时校正轴上、轴外像差，最简单的是对称式三片型物镜。三片型物镜共有 8 个独立参数，即 3 个光焦度、3 个透镜弯曲和 2 个空气间隔，正好满足一个总光焦度要求及校正 7 种初级像差的要求，如图 4-43 所示。

根据参数要求，且该镜头是用在一种普及型照相机上，故三片型结构形式基本上能满足校正像差要求。

4. 新型三片式照相物镜结构特点

新型三片式照相物镜的结构和普通照相物镜比较，其突出特点有：

- (1) 光阑由系统中间移到后镜片后面；
- (2) 前镜片由薄透镜变为弯月型厚透镜；
- (3) 在光学性能相同条件下光学系统总厚变薄；
- (4) 后镜片由非对称型变成对称型；
- (5) 从前镜片到中镜片的间隔变小，可去掉一个隔圈。

几类三片型照相物镜的结构特点见表 4-20。

5. 设计需要考虑的问题

典型三片型照相物镜，第一片和第三片是正透镜，光焦度分配大致为：

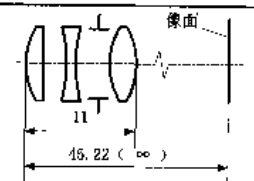
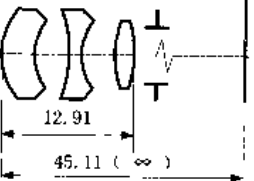
$$\frac{\varphi_1}{\varphi_3} = 0.9 \sim 1$$

光阑靠近负透镜，见图 4-43。

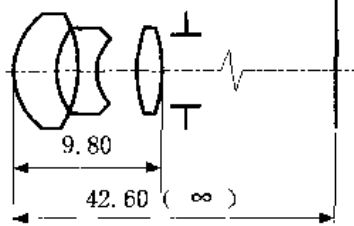
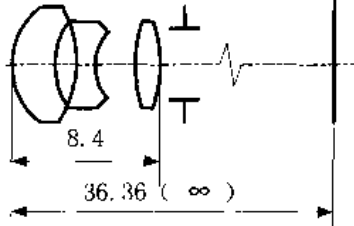
“傻瓜”相机的镜头虽然同是三片型，但光阑位置在第三片透镜之后，见图 4-44。这样，第一片透镜主光线高度高，第三片透镜靠近光阑，主光线低。此时这两片正透镜的光焦度分配将有较大变动，因为第一片透镜主光线高度较第三片主光线高度高，为校正轴外像差，这两片透镜光焦度分配应为：

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_3} = 0.5 \sim 0.6$$

表 4-20 三片型照相物镜的结构特点

光学特性	类型	结构简图	特点
$f=40.72\text{ mm}$ $F=4.5$	柯克型		(1) 光阑在中镜片附近 (2) 三片都是薄透镜 (3) 后片非对称透镜 (4) 光学总厚 11 mm 左右
$f=39.6\text{ mm}$ $F=4$	新型		(1) 光阑在后镜片后面 (2) 前镜片为厚透镜 (3) 后镜片为对称 ($r_1=r_2$) 透镜 (4) 用两个隔圈

续表

光学特性	类型	结构简图	特点
$f=40.37\text{ mm}$ $F=4$	新 型		(1) 光阑在后镜片后面 (2) 前镜片为厚透镜 (3) 后镜片为对称 ($r_1=r_2$) 透镜 (4) 省掉前隔圈 (5) 光学总厚变薄
$f=35.91\text{ mm}$ $F=3.6$	新 型		(1) 第一表面到像面总长最短 (2) 光学总厚更薄 (3) 其余特点同 $f'=40.37\text{ mm}$ 、 $F=4$ 镜头

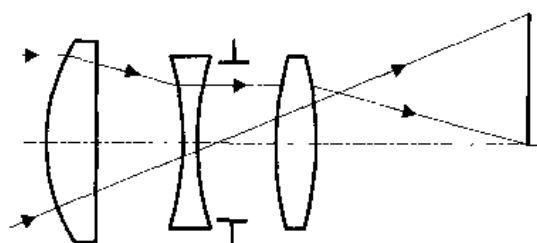


图 4-43 三片型物镜

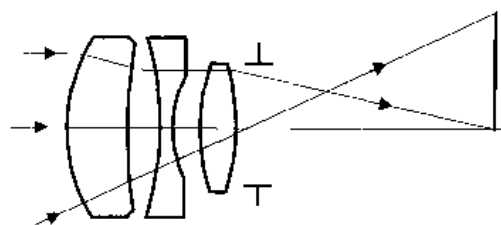


图 4-44 新型三片型物镜

为了使系统尽量少产生高级像差, 单片透镜光焦度 φ 应尽量小。这种用于正透镜的玻璃材料要选取高折射率、低色散的材料。高折射率对校正 S_{IV} 有利, 低色散则有利于校正色差。同样, 负透镜应选取低折射率、高色散的玻璃。目前能够用的玻璃材料, 正透镜用阿贝数 $\nu=55\sim60$ 、折射率 $n=1.62\sim1.64$ 的重冕玻璃, 负透镜用火石玻璃。

材料选定后, 单片透镜光焦度 φ 也确定, 可根据光焦度确定透镜形状, 求出半径。将透镜加厚并给出正、负透镜间的空气间隔, 进行实际像差计算, 在设计中不断调整空气间隔和单透镜光焦度。对弯曲透镜进行像差校正, 实践证明, 第一片正透镜的半径 r_1 、 r_2 必须弯向光阑, 这样可以减小 S_I 及 S_{II} , 从而可降低系统高级正彗差和高级负像散。

通常三片型照相物镜, 第一片透镜中心厚度 d 只要满足通光口径和工艺要求即可。当一片薄透镜的光焦度 φ 确定后, S_{IV} 值也就随之确定, 即

$$S_{IV} = J^2 \frac{\varphi}{n}$$

在此系统中要想降低 S_{IV} , 只能提高正透镜的折射率 n 。通常采用普通玻璃材料。当折射率高时, 色散也较大, 要满足系统光焦度 φ 及色差校正要求, 要想使每片单透镜光焦度 φ 都比较小, 负透镜的火石玻璃难选。即便选取重火石玻璃, 透镜空气间隔拉大, 斜光束在第一、第二片透镜上高度增加, 这对于轴外像差校正不利。空气间隔的拉大要比光焦度减小来得快。光焦度减小, 对轴上像差校正有利。对于较大视场、较小相对孔径的系统, 负透镜采用折射率和色散较小的火石玻璃。

将第一片正透镜加厚, 以校正 S_{IV} , 这片正透镜必须是一面凸, 另一面凹。透镜的加厚,

实际是 h_2 变低 (见图 4-45), 因为

$$h_2 = (l'_1 - d)u'_1$$

虽然 h_2 变低, 但 u_2 及 i_2 不变, 这样才能保持光焦度 ϕ 不变, 此时新的半径及 S_{IV} 为

$$r_2 = \frac{h_2}{u_2 + i_2}$$

$$S_{IV} = \frac{n' - n}{nn'} \cdot \frac{J^2}{r_2}$$

由于 h_2 变低, r_2 变小, 此面负的值增大, 系统 ΣS_{IV} 变小。

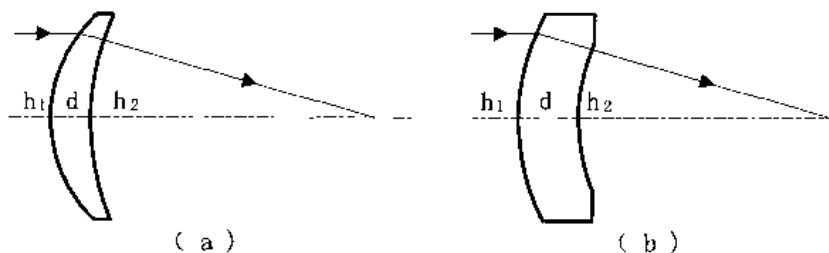


图 4-45 加厚前片交正 S_{IV}

透镜的加厚能够校正 S_{IV} , 由于光阑位置的限定, 透镜太厚将使入瞳距离加长, 主光线高度增加, 通光口径加大, 而且使轴外像差校正困难。经验证明, $d = (0.17 \sim 0.2) f'$ 为好。

6. 设计实例

笔者受企业委托, 用国产普通光学玻璃设计了新型三片式照相物镜。它具有低成本, 像质较好的特点, 其结构参数见表 4-21。

7. 新型三片式照相物镜设计的技术经济评价

新型三片式照相物镜设计是应用 VE 取得成功的十分典型的例子。广西梧州光学仪器厂在测试外商提供的日本产镜头样品后, 发现这镜头三片透镜光学材料为: LaK2-ZF2-LaF3。该厂按此组合进行光路计算, 制造出可与样品比美的产品。由于没有结合国情对产品进行价值分析, 经济效益平平。其实, LaK2 和 LaF3 都是含稀土成分的镧系玻璃, 虽具有高折射率、低色散的优良光学特性, 有利于提高镜头质量, 但其价格昂贵, 分别为普通光学玻璃 ZK1~ZK11 (47 元/kg) 的 5.3 倍和 4.3 倍 (LaK2 为 250 元/kg, LaF3 为 200 元/kg)。梧州西江仪器厂也生产这种镜头, 投产时改用 ZK11-F3-LaF3 的材料组合, 成本下降了, 取得初步成功。笔者认为仍大有潜力可挖, 因为该镜头成本主要取决于光学零件成本 (金工件占的比重较小), 而影响光学零件成本的有材料和加工方法两个主要因素, 从设计角度考虑, 玻璃材料选择是能否降低成本的关键。于是采用了 ZK11-F4-ZK11 的组合方案, 材料费用进一步降低。三种方案玻璃组合材料成本对比见表 4-22。

材料替代既节省材料, 又方便加工, 还降低了成本。

对比光路计算结果, 价值创新结构设计的一些次要质量指标稍低于日本样品 (功能略有下降), 但保证了主要性能和主要质量指标, 而总成本大大降低, 提高了产品的价值。

表 4-21 新型三片式物镜结构参数

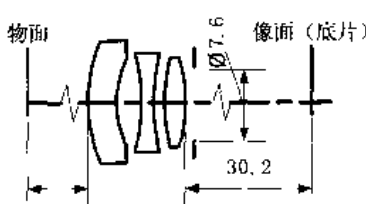
名称	主要技术参数	结 构	参 数				备注
			r/mm	d/mm	n_D	D_g/mm	
三片式照相物镜	$2\omega=60^\circ$ $f'=38\text{ mm}$ $D/f'=1:38$		12.3			15	
			28.7	4.9	1.6384	12	
			-29.5	1.8	(ZK11)	10.8	
			11.7	1.2	1.6199 (F4)	9.2	
			20.5	1.4		8.6	
			-20.5	3	1.6384	8.6	
			光阑	1.5	(ZK11)	7.6	

表 4-22 运用 VE，材料替代增效益

镜头材料组合	单位产品材料费/(元/只)	年产量/万元	材料费总计/万元	材料成本降率/(%)	备 注
LaK2-ZF2-LaF3	4.77	5	23.85	0	按梧州 I 设计图测算。为方便对比，年产值按 5 万计
ZK11-F3-LaF3	2.29	5	11.45	52	梧州西江仪器厂产品
ZK11-F4-ZK11	1.12	5	5.6	76.52	价值创新结构，其参数参见表 4-21

§ 4.5 投影物镜设计

§ 4.5.1 投影物镜光学特性

投影物镜 (projection objective) 是指将物体进行放大成像并投影在屏上的物镜。投影仪的物镜以及幻灯机和电影放映机上的投影物镜统称为投影物镜。

投影物镜的作用是将被光源照明的投影物体成像在较大的屏幕上，从而得到一幅放大的图像，其作用相当于倒置的照相物镜。两者相异之处是：照相物镜为了缩小成像，而投影物镜为了放大成像。

描述一个投影物镜光学特性的参数有：共轭距、焦距、放大率、视场、相对孔径和工作距离。

1. 共轭距、焦距和放大率

设投影物体到屏幕间的共轭距为 L ，物镜的垂轴放大率为 β ，则物镜的焦距三者间有如下关系：

$$f' = \frac{\beta}{(\beta - 1)^2} L \quad (4-13)$$

由此可见，共轭距与焦距成正比，当 β 一定时，共轭距大， f' 增长。

2. 视场

投影仪的视场用投影物体的最大尺寸——线视场表示，投影仪屏幕尺寸 $2y'$ 分别为 $\phi 400$, $\phi 600$, $\phi 800$, $\phi 1200$, $\phi 1500\text{mm}$ ，它的大小就决定了投影物镜的线视场，因为 $y = y'/\beta$ 。若用视场角来描述，则图片尺寸一定时，视场角的大小取决于焦距。焦距越长，视场角越小。

在考虑共轭距、放大率、焦距和视场角的关系时，宜使视场角小一些为好。一般的投影物镜，其视场角为 20° 左右。

3. 相对孔径

投影物镜的视场由屏幕（或图片）的大小决定。由于屏幕离投影物镜很远，所以投影物镜的成像关系可以看成是倒置的照相物镜的成像关系。

照相物镜像面中心的照度与物镜的相对孔径有关，与被拍摄的物体的光亮度有关，即

$$E'_0 = \frac{\pi KB}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{\beta_z^2}{(\beta_z - \beta)^2} \quad (4-14)$$

中心视场之外的照度与其视场角的大小有关，即

$$E' = E'_0 \cos^4 \omega' \quad (4-15)$$

把式（4-14）和式（4-15）用于投影物镜中，由于 $\beta > \beta_z$ ，所以照度公式可以简化成：

$$E'_0 = \frac{\pi KB}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{1}{\beta^2} \quad (4-16)$$

$$E' = E'_0 \cos^4 \omega' \quad (4-17)$$

从光源开始，经过照明系统，透过图片，最后由投影物镜投射到屏幕上，整个系统的吸收反射损失相当可观，照度公式中的 K 值不超过 0.6。为了满足像面照度的要求，投影物镜和照明系统的孔径都很大。笔者设计的电影投影物镜，其相对孔径 $D/f' = 1:1.4$ 。当投影物镜的视场角 $\omega' = 10^\circ$ 时，整个屏幕上的照度基本上是均匀的。

对于投影仪物镜来说，也可以用数值孔径来描述。在投影仪中为保持轴外像点和轴上像点具有相同的光亮度，轴外物点的孔径角与轴上物点的孔径角应相同。因此，在 U_{\max} 不大时，

$$NA = \sin U_{\max} = D'/(2f') \quad (4-18)$$

投影物镜的数值孔径与分辨率的关系和显微物镜相同，但不应根据分辨本领的要求来确定其数值，而应根据影屏照度的需要来决定，因为影屏照度与投影物镜的数值平方成正比。因此，投影物镜可取与放映物镜相仿的相对孔径。

4. 工作距离

计量用的投影仪的投影物体不仅仅是图片、照相底片、幻灯片等，往往还要测量齿轮及各种高低变化较大的工件。因此，要求投影物镜有长的工作距离，尤其是高倍投影物镜。

§ 4.5.2 结构形式与对像质的要求

一般计量用的投影系统，多利用中等孔径、中等视场的光学系统。因要进行精密测量，像质要求很高，故一般采用正、负、正三组结构形式，见图 4-46，图中 3、4 组合后相当于一个负透镜，所以可看成正、负透镜组合的光学系统。

放映物镜的像质要求，着眼于轴上点的像差（即球差和色差）、轴外像差的校正以及影响清晰度的彗差和像散的校正。这样的设计思想既考虑了投影物镜大孔径的特点，也考虑了它的应用特点。

简单的放映物镜是由两片透镜组成的，其中一个为正透镜，另一个是负透镜。假如设计时注重玻璃的选择，就可以使这种结构在校正了色差和球差的基础上，同时校正正弦差。

由于轴外像差没有校正，这种结构只能用在小视场的投影仪器中。

如果成像质量要求高一些，可以用两个不晕的透镜组成投影物镜，这也是小视场投影仪器中使用的结构。在投影仪器中最常用的投影物镜就是匹兹万照相物镜（倒置使用），视场角 $2\omega=16^\circ$ ，相对孔径 $D/f'=1:1.8$ 。当投影仪器所要求的视场再大时，就要采用消像散的结构。柯克物镜和天塞物镜，甚至双高斯物镜，都可以用做投影物镜。图 4-47 是一种普通银幕投影的大孔径、较大视场的镜头，相对孔径可达 $1:1.6$ 。这种结构还可以用在宽银幕放映中。

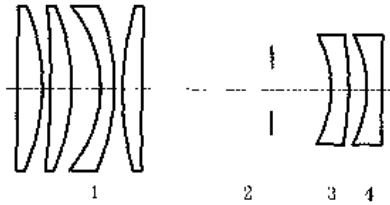


图 4-46 正负正三组结构的投影物镜

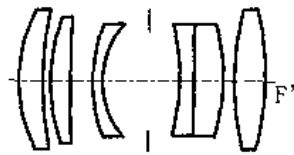
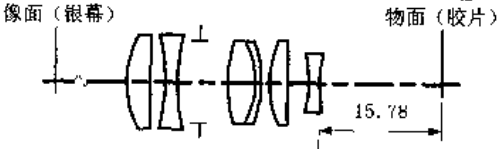


图 4-47 电影放映物镜

§ 4.5.3 电影投影物镜设计

笔者曾与同事合作设计过电影放映镜头，其光学结构参数见表 4-23。

表 4-23 16F-65 电影投影镜头结构参数

主要技术指标		结 构					
$f'=65\text{mm}$ $D/f'=1:1.4$ $2\omega=11^{\circ}15'$							
参 数							备 注 *按反向光路：像面实际上是电影胶片面 **这是倒置的匹兹万照相物镜结构形式。前组双分离，后组复杂化，光阑在中间靠近前组
面号	r/mm	d/mm	n_D	ν	D_0/mm	玻璃	
1	57.72				48		
2	-535.04	13.08	1.6126	58.35	48	ZK6	
3	-88.18	6.92			41		
4	217.17	2.82	1.6725	32.23	41	ZF2	
5	光阑	4.62			40		
6	105.59	30.48			38.2		
7	-41.94	15.8	1.6568	51.12	38.2	ZBaF3	
8	-111.57	3.77	1.728	28.34	38	ZF4	
9	37.24	0.26			35		
10	-262.61	14.54	1.622	59.71	35	ZK10	
11	-69.04	6.15			24		
12	41.25	6.34	1.6475	33.87	24	ZF1	

第5章 典型光学系统设计

§ 5.1 概述

一种或几种光学零部件按某种要求组合而成的系统，称为光学系统。典型的光学成像系统主要有望远镜系统、显微镜系统、摄影系统、照相制版和投影系统等，还有作为仪器一部分的照明光学系统。其中望远镜系统与显微镜系统属于目视光学系统，其基本结构是“物镜+目镜”。

光学系统设计最显著的特点是光学部件间的长光路拼接。例如，有限像距显微镜（共轭距 $L=195\text{ mm}$ ）加上目镜后，工作距与目镜的结构长度就等于生物显微镜的光路总长；而“工作距离与无限远像距显微物镜的结构长度”+平行光路+辅助物镜后焦面长度（一般 $f'_{\text{辅}}=250\text{ mm}$ ）+“目镜后工作距与目镜的结构长度”=无限远像距光路总长（至少 350 mm ）；而应用最多的开普勒望远系统因中间加上转像系统，光路亦不短；至于具有潜望、周视功能的军用望远系统，其光路更长。可见，要设计出一个具有实用功能的光学系统，实质上是把相关的校正好像质的光学部件进行有机的组合，即按几何光学的规律，进行长光路拼接，使系统优化。

长光路拼接成功与否的关键是光组间瞳孔必须重合。

成像光学系统如果二个以上光组，则瞳孔必须重合。反之，前一系统出射的光能只有部分进入后一系统，不仅光能损失，而且还要产生杂光。重合的方法常有如下两种情况：

（1）成像系统的前面部分的出瞳就是后面部分的入瞳。图 5-1 所示为一个显微摄影系统，其显微物镜的出瞳应为摄影物镜的入瞳。

（2）用场镜转接。图 5-2 所示为一个带有转像系统的望远物镜，其出瞳通过场镜成像系统的入瞳处。

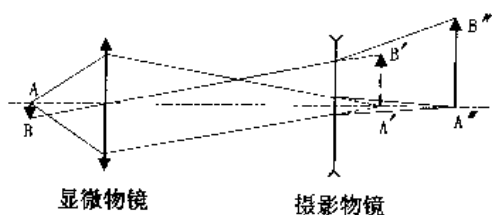


图 5-1 显微摄影系统

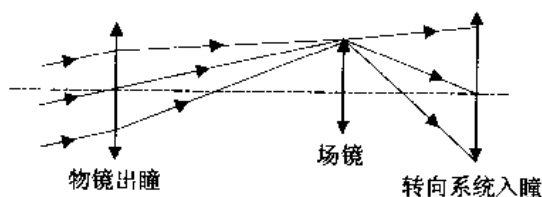


图 5-2 带转像系统望远物镜

§ 5.2 普通生物显微镜成像光学系统设计

§ 5.2.1 显微镜成像简述

显微镜（microscope）指为提高人们获得微小信息能力的光学仪器。往往把将近处物体进行放大的光学系统称为显微镜系统。显微镜系统通常由物镜和目镜两部分组成，实质上是利用一个物镜和一个目镜产生两级放大的复式显微镜（compound microscope）因为被

观测的物体本身不发光,而要借助于外界照明,故显微镜还需要有一个照明系统。这些部分都是较复杂的透镜组合系统,尤其是物镜更为复杂。

图 5-3 是显微镜成像的光路原理图,图中的物镜和目镜均用薄透镜表示。显微镜的物体 AB 处于物镜的两倍焦距之内一倍焦距之外,它首先经过物镜将一放大的倒立实像 $A'B'$ 成像于目镜的物方焦平面上或焦平面以内很靠近的地方,然后目镜将这一实像再次放大成一放大的正立虚像 $A''B''$,且成像于无穷远或人眼的明视距离以外,以供眼睛观察。显微镜对物体进行两次放大,因此与放大镜相比,具有更大的放大率,能观察到肉眼所不能直接观察的微小物体,分辨更细小的细节。在这里目镜相当于放大镜,只不过这时放入镜的物是物镜所成的像而已。

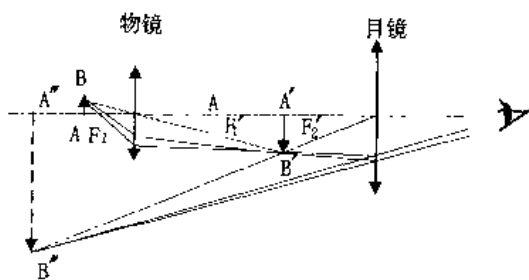


图 5-3 显微镜成像光路原理图

§ 5.2.2 显微光学系统的设计方法和要求

在设计显微光学系统时,首先要按照用途与使用条件,进行光学系统总体设计,接着是外形尺寸计算,确定光组数量最少的最佳方案。一方面要满足成像质量,另一方面要满足国家标准和有关外形尺寸要求。例如,国家标准对生物显微镜的要求,规定光学共轭距离为 195 mm (或无限远),机械筒长 = (160 ± 1) mm,物镜间要齐焦 (parfocal, 指当显微镜调焦后,调换任一透镜组,只需要微调焦就能得到最大清晰度),显微镜观察目镜前焦面应位于目镜支承面之下 10 mm。此外,显微镜有关外形要求有:其出瞳离开显微镜底座距离为 400 mm 左右,内装式光源离开标本的距离为 250~300 mm 等。

设计时还要注意,光学系统是受仪器的总体设计制约的;并且光学部件与机械部件是紧密联系的,所以要协调好这两个方面的关系,才能使整机性能最佳。

§ 5.2.3 显微光学系统设计的标准化

显微镜设计标准化的基本任务:一是达到一定的经济效益;二是缩减零件和部件的品种,扩大零部件的互换性,提高工艺水平和整个仪器的耐用性及可靠性。下面就显微镜整机及其光学装置的标准化展开阐述。

现代显微镜的光学装置可以分为下列几个基本部分:照明部分、观察部分、摄影部分以及投影部分。

设计显微镜标准型式的基本任务之一是将它们的基本特征和结构特点充分显现出来,并同时按用途进行分类。显微光学系统设计是为了实现显微镜的如下特征:

- ① 观察和照明方式,即物体在透射光、反射光、偏振光或者在混合照明下的研究;
- ② 显微镜观察镜筒的筒长 (195mm 和 ∞) 以及在这种镜筒中附加光学装置的应用;
- ③ 显微镜中摄影镜管、投影镜管、光能接收器 (电子光学变像管,光电倍增管等)

以及分路装置的配备;

④ 照明装置(内装的或外加的),照明方法(简单的、按柯勒原理的以及其他);

⑤ 光学系统像差校正程度,消色差集光镜、聚光镜、消色差物镜、复消色差物镜、平场物镜以及其他光学部件的应用。

根据各种用途显微镜的现有光学和机械结构的分析,可以规定必须标准化的仪器类别。显微镜分为生物显微镜、荧光显微镜、偏光显微镜、金相显微镜、干涉显微镜、相衬显微镜、微分干涉显微镜以及红外显微镜等类型。

若不考虑显微镜的用途,而以显微镜的一般特征为标志,则上述每一类仪器又可适当地分为下列三种基本类型。

① 透射光用显微镜:学生型、普通型和实验室型;

② 反射光显微镜:学生型、普通型和实验室型;

③ 研究型 and 万能型。

任何显微镜都是由各个光学部件组合而成的。属于这些装置的有照明系统,物镜,目镜,附加镜头,观察、摄影、投影和其他镜管光学系统等。任何部件光学结构形式必须与相应的显微镜型式匹配。例如,在简单型式的显微镜中(学生型和普通型显微镜),配置消色差物镜、简易可卸的照明器、单筒目镜和简易的双筒目镜附加装置等。实验室和研究型显微镜配备有平场消色差物镜和平视场复消色差物镜。这种平视场复消色差物镜带有专门为其计算的视场较大的补偿目镜。还配备有摄影和投影系统,用于分光光度测量、显微分光光度测量的各种附加装置以及其他保证现代研究方法的光学装置。在这些显微镜中照明装置做成内装式的,并按柯勒原理进行照明。为了进行摄影、分光光度测量、荧光观测以及其他研究,可以利用高亮度的光源。所采用的集光镜和聚光镜具有齐明和消色差校正功能。显微镜的某些结构备有万能连续变倍聚光镜,能够对物体进行明视场、暗视场和相衬方法照明,数值孔径和被照明视场的大小都是均匀改变的。

综上所述,显微镜结构在很大程度上取决于仪器的基本用途和所实现的显微术的功能。因此,不仅是显微镜的光学零部件,而且机械零部件也应贯彻标准化,实现互换性。

§ 5.2.4 显微光学系统设计要点

在进行显微镜光学系统设计时,应注意以下两点:

(1) 显微系统中的光束限制。

对一般显微镜而言,当物镜倍数较低时,孔径光阑就是物镜框。若物镜由多组透镜组成,常用最后一组透镜的镜框作为孔径光阑。显然,这种显微镜的出射光瞳就是上述镜框经目镜所成的像,其位置在目镜像方焦点之后,人眼通过显微镜观察时,已经能与之相重合。可见,目镜的焦距不能太小,不然会影响眼睛的观察。由于物镜的像面是显微镜的视场光阑,入窗和物面重合,观察时可以看到界限分明和照明均匀的视场。

精密测量用显微镜,其孔径光阑都安置在物镜的像方焦面上,以形成远心光路,减少测量误差。所以,出瞳位于目镜的像方焦点之后,与显微镜的像方焦面重合。孔径光阑和出射光瞳是目镜的一对共轭面。

(2) 光瞳转接。

对一般显微光路来说,物镜的出瞳与目镜的入瞳相接。因此,显微镜观察目镜的入瞳距一般为 160 mm 左右。当设计计算出的目镜入瞳距有偏离时,可用改变目镜场镜的焦距

的办法来调整。

显微光学系统设计框图见图 5-4。

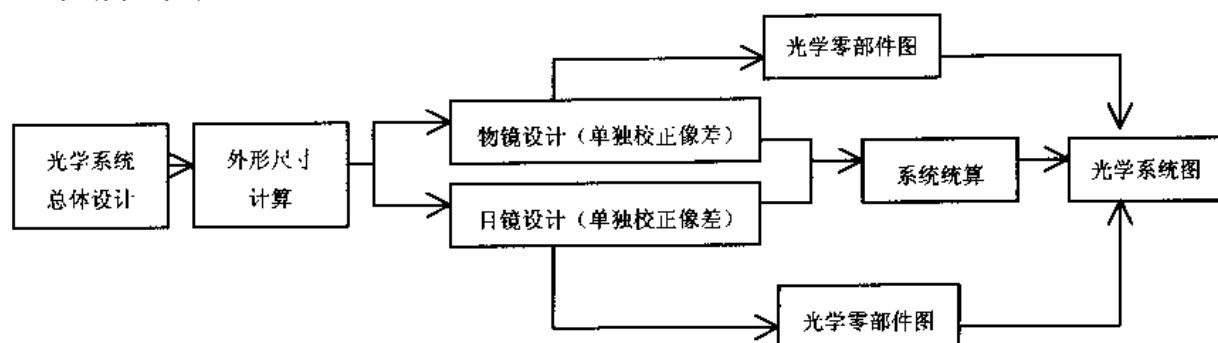


图 5-4 显微光学系统设计框图

§ 5.2.5 设计实例

设计一台具有多种倍率且 $\Gamma_{\max} = 1\,600$ 的生物显微镜光学系统 (见图 5-5)。

已知条件: $\Gamma_{\max} = 1\,600$, 共轭距 $L = 195\text{ mm}$ 。

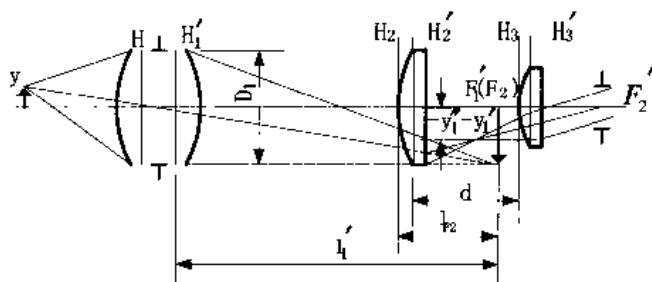


图 5-5 生物显微镜光学系统

1. 光学系统总体设计

因为要求有多种放大率, 所以要有多个物镜与目镜。

(1) 物镜和目镜放大率的配置。

按 $500\text{ NA} \leq \Gamma \leq 1\,000\text{ NA}$ (设所使用光线 $\lambda = 0.000\,55\text{ mm}$) 选择物镜放大率 β 。据国家标准《显微镜物镜系列》(GB2609-81), 可选用下列消色差物镜: $4\times$ ($\text{NA}=0.10$)、 $10\times$ ($\text{NA}=0.25$)、 $25\times$ ($\text{NA}=0.40$)、 $40\times$ ($\text{NA}=0.65$) 和 $100\times$ ($\text{NA}=1.25$)。所以得 $50 \leq \Gamma \leq 1250$ 。根据 $\Gamma_{\text{目}} = \Gamma / \beta$ 选目镜放大率, 根据原一机部标准《显微镜目镜系列》(JB1782-76), 可选用下列普通 (或平场) 观察目镜: $10\times/16$ (角放大率 / 视场直径, 直径单位为 mm。下同)、 $12.5\times/12.5$ 、 $16\times/10$ 。(所列的视场值为标准规定的最小值, 实际设计往往大于这个值)。

(2) 显微镜放大率选择。

表 5-1 示出了由不同倍率的 5 种物镜与 3 种目镜组合, 显微镜可形成 14 种放大率, 可满足不同观察的需要。值得指出, $40\times$ 和 $1\,600\times$ 超出有效放大率范围, 但实际还在用。笔者认为, 国外产品增加 $25\times$ 物镜和 $12.5\times$ 目镜, 不仅增加了组合的观察倍率, 更主要的是能更好地符合有效放大率的要求, 这对提高产品的市场竞争力十分有利。

表 5-1 显微镜各种放大倍率系列表

$\begin{array}{c} \Gamma \\ \beta \\ \Gamma_{II} \end{array}$	4 \times	10 \times	25 \times	40 \times	100 \times	备 注
10 \times	40 \times	100 \times	250 \times	400 \times	1 000 \times	*国产机型物镜有 4 \times 、10 \times 、40 \times 、100 \times ，国外产品还加上 25 \times
12.5 \times	50 \times	125 \times	~32 \times	500 \times	1 250 \times	
16 \times	~63 \times	160 \times	400 \times	~63 \times	1 600 \times	**国产机型目镜一般有 10 \times 、16 \times ，国外产品还加上 12.5 \times

2. 外形尺寸计算

计算外型尺寸的已知条件是：分辨率 σ 、共轭距 L 和有效放大率 Γ 。

基本公式和计算步骤如下。

(1) 计算物镜的放大率数值孔径。

$$NA = \frac{0.61\lambda}{\sigma} \quad (5-1)$$

(2) 分配物镜和目镜的放大率。首先根据数值孔径 NA 选择结构及其横向放大率 β ，然后按下式计算目镜的放大率 Γ_{II} ：

$$\Gamma_{II} = \frac{\Gamma}{\beta} \quad (5-2)$$

(3) 计算物镜和目镜焦距 f'_1 和 f'_2 。

$$f'_1 = \frac{-L\beta}{(1-\beta)^2}, \quad f'_2 = \frac{250}{\Gamma_{II}} \quad (5-3)$$

(4) 计算显微镜的总焦距 f' 。

$$f' = 250/\Gamma \quad (5-4)$$

(5) 计算目镜的线视场。目镜结构选好后，它的视场角 $2\omega'$ 是已知的，其线视场 $2y'$ 为：

$$2y' = 2f'_2 \cdot \tan \omega' \quad (5-5)$$

(6) 计算物镜线视场 $2y$ 。

$$2y = 2y' / \beta \quad (5-6)$$

(7) 计算出瞳距 l'_z 。用 x_z 表示孔径光阑到目镜前焦点的距离，得：

$$l'_z = l'_{F2} + x'_z = l'_{F2} - \frac{f_2^2}{x_z} \quad (5-7)$$

(8) 计算显微镜的景深。

$$2dx = \frac{250n\varepsilon'}{\Gamma \cdot NA} \quad (5-8)$$

(9) 计算物镜通光口径。

物镜框作为孔径光阑时，

$$D_1 = 2l_1 \cdot \tan u_1 \quad (5-9)$$

孔径光阑放在物镜后焦面上时，

$$D_1 = 2(y + f'_1 \tan u'_1) \quad (5-10)$$

(10) 计算目镜的通光口径。

参见图 5-5, 目镜场镜的通光口径 D_2 为

$$D_2 = 2\left(\frac{y' - \frac{D'}{2}}{l'_1}\right)(l'_1 - l'_{F2}) + D_1 \quad (5-11)$$

接目镜的通光口径 D_3 为

$$D_3 = 2(l'_{F2} + x'_z) \tan \omega' + D' \quad (5-12)$$

式中 D' 是出瞳直径, $D' = 2f' \cdot \text{NA}$ 。

[例题] 计算一种生物显微镜外型尺寸。已知条件是: 显微镜的放大率 $\Gamma = 250$; 分辨率小于 $1 \mu\text{m}$, 共轭距 $L = 195 \text{ mm}$ 。

[解] ① 计算数值孔径 NA。由式 (5-1) 得

$$\text{NA} = \frac{0.61\lambda}{\sigma} = \frac{0.61 \times 0.5893}{1} = 0.36$$

取标准数值孔径 $\text{NA} = 0.4$ 。

② 分配物镜和目镜的放大率。按数值孔径 $\text{NA} = 0.4$, 选择阿米西型显微物镜, 取 $\beta = -25$ 。由式 (5-2) 得 $\Gamma_{\text{目}} = \Gamma\beta = 250/50 = 10\times$ 。

因为生物显微镜主要用于观察, 所以一般选用惠更斯目镜, 其主要技术参数为: $f' = 25 \text{ mm}$, $2\omega = 33^\circ 24'$, $l'_{F2} = 11.56 \text{ mm}$ 。

③ 计算物镜焦距 f' 。由式 (5-3) 得

$$f' = \frac{-L\beta}{(1-\beta)^2} = \frac{-195 \times (-25)}{(1+25)^2} \text{ mm} = 7.21 \text{ mm}$$

④ 计算显微镜得焦距 f' 。由式 (5-4) 得

$$f' = 250 / \Gamma = 250 / 250 = 1(\text{mm})$$

⑤ 计算目镜的线视场 $2y'$ 。由式 (5-5) 得

$$2y' = 2f'_2 \tan \omega' = 2 \times 25 \tan 16.7^\circ = 15(\text{mm})$$

⑥ 计算物镜线视场 $2y$ 。由式 (5-6) 得

$$2y = 2y' / \beta = 15 \text{ mm} / 25 = 0.6 \text{ mm}$$

⑦ 计算出瞳距 l'_z 。由式 (5-7) 得

$$l'_z = l'_{F2} + \frac{-f_2'^2}{x_z} = 6.2 \text{ mm} + \frac{-25^2}{187.5} \text{ mm} = 9.53 \text{ mm}$$

⑧ 计算显微镜的景深。由式 (5-8) 得

$$2dx = \frac{250n\varepsilon'}{\Gamma \cdot \text{NA}} = \frac{250 \times 1 \times 0.0008}{250 \times 0.4} \text{ mm} = 0.002 \text{ mm}$$

⑨ 计算物镜通光口径。由式 (5-9) 得

$$D_1 = 2l_1 \cdot \tan \cdot u_1 = 2 \times 7.5 \text{ mm} \times \tan 23.59^\circ = 6.54 \text{ mm}$$

⑩ 计算目镜的通光口径。由 (5-10) 得

$$\begin{aligned} D_2 &= \frac{2(y' - \frac{D'}{2})}{l'_1}(l'_1 - l'_{F2}) + D_1 \\ &= \frac{2 \times (7.5 - 3.27)}{187.5} \times (187.5 - 11.56) + 6.54 \\ &= 14.3(\text{mm}) \end{aligned}$$

由式 (5-11) 得

$$\begin{aligned} D_3 &= 2(l'_{F2} + x'_1) \tan \omega' + D' \\ &= 2 \times 9.53 \times \tan 16.7^\circ + 2 \times 1 \times 0.4 \\ &= 6.52(\text{mm}) \end{aligned}$$

限于篇幅，这里仅介绍 $\Gamma = 250$ 时的情形，余者类推。

3. 选择并设计物镜

(1) 选择物镜型式。因为是普通生物显微镜，因此物镜选用消色差物镜。

低倍消色差物镜 ($4\times$, $\text{NA}=0.1$) 采用最简单的双胶合组；中倍物镜 ($10\times$, $\text{NA}=0.25$) 由两组双胶合透镜组成 (李斯特型)；中高倍物镜 ($25\times$, $\text{NA}=0.4$) 和高倍物镜 ($40\times$, $\text{NA}=0.65$) 是在李斯特型物镜前加入一个无球差、慧差的折射面构成的会聚透镜组成的 (阿米西型)； $100\times$ ($\text{NA}=1.25$) 为浸液物镜，应用浸液主要为提高物镜数值孔径，其结构是由在高倍物镜的第一片透镜和李斯特系统间加入一块同心不晕透镜。

$4\times$ 、 $10\times$ 、 $40\times$ 、 $100\times$ 消色差物镜在我国应用最广，技术十分成熟。下面介绍一套 20 世纪 80 年代在我国普通型生物显微镜使用最广泛的镜头。在当时的历史条件下，这套镜头的像质被认为是优良的。其结构参数见表 5-2 (a)、(b)、(c) 和 (d)，供读者学习与借鉴。

表 5-2 (a) $4\times$ 消色差物镜结构参数

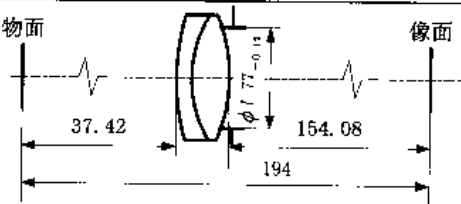
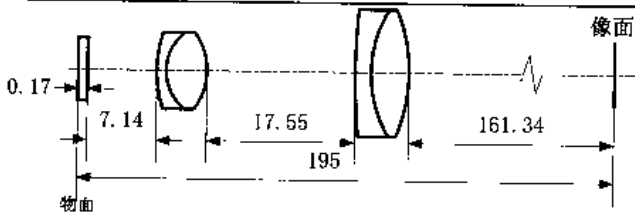
主要技术数据		结 构					
$\beta=4$ $\text{NA}=0.10$ $f'=30.992\text{mm}$ $L=195\text{mm}$ 工作距=37.42mm							
参 数							备 注
面 号	r/mm	d/mm	n	v	D_0/mm	玻 璃	
1	29.58				7.854		
2	11.482	1	1.6475	33.87	7.766	ZF1	
3	-23.12	2.37	1.5163	64.07	7.764	K9	

表 5-2 (b) $10\times$ 消色差物镜结构参数

主要技术数据		结 构					
$\beta=10$ $\text{NA}=0.25$ $f'=17.23\text{mm}$ $L=195\text{mm}$ 工作距=7.14mm							
参 数							备注
面 号	r/mm	d/mm	n	v	D_0/mm	玻 璃	
1	∞				1.8		
2	∞	0.17	1.5163	64.07	1.9		

续表

参 数							备注
面 号	r/mm	d/mm	n	ν	D_0/mm	玻 璃	
3	15.488	7.14			3.8	K9	
4	6.252	1.4	1.71715	29.5	4.1		
5	-8.356	2.9	1.51593	56.8	4.8	ZF3	
6	102.09	17.55			7.7	K8	
7	13.092	1.8	1.62591	39.1	7.9	BaF8	
8	-16.982	2.7	1.50041	66	8.1	K2	

表 5-2 (c) 40×消色差物镜结构参数

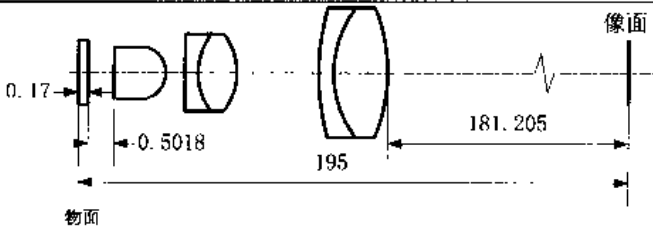
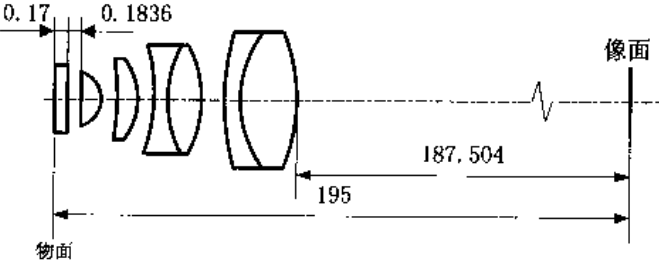
主要技术数据		结 构					
$\beta=40$ $\text{NA}=0.65$ $f'=4.5609\text{mm}$ $L=195\text{mm}$ 工作距=0.5018mm							
参 数							备注
面 号	r/mm	d/mm	n	ν	D_0/mm	玻 璃	
1	∞				0.45		
2	∞	0.17	1.5163	64.07	0.48	K9	
3	∞	0.5108			1.7		
4	-2.559	2.643	1.638438	55.49	1.708	ZK11	
5	∞	0.1			3.6		
6	5.754	1	1.755	27.53	4.02	ZF6	
7	-5.297	2.3	1.5153	54.48	4.02	KF2	
8	30.448	2.4			5		
9	70.47	1.3	1.755	27.53	5.65	ZF6	
10	-8.204	3.39	1.51533	54.48	5.8	KF2	

表 5-2 (d) 100×消色差物镜结构参数

主要技术数据	结 构					
$\beta=100$ $\text{NA}=1.25$ $f'=1.9\text{mm}$ $L=195\text{mm}$ 工作距=0.1836mm						

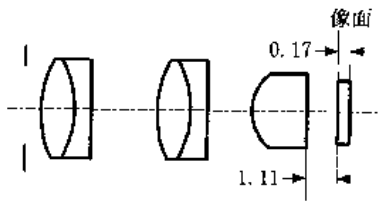
续表

参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n	ν	D_i/mm	玻璃	
1	∞				0.018		
2	∞	0.17	1.5163	64.07	0.02	K9	
3	∞	0.18			1.13		
4	-0.886	1.04	1.5399	59.7	1.77	BaK2	
5	-16.261	0.111			3		
6	-2.323	0.83	1.5399	59.7	3.2	Bak2	
7	12.314	0.107			3.51		
8	-5.777	0.78	1.69875	30.1	3.92	ZF11	
9	4.177	1.61	1.5163	64.47	4.33	K9	
10	47.986	0.228			4.54		
11	4.87	0.78	1.69875	30.1	4.63	ZF11	
12	-6.668	1.66	1.5163	64.07	4.72	K9	

(2) 25 \times 物镜的设计。

首先是选择初始结构(参考文献[10]980页),见表5-3。

表 5-3 25 \times 消色差物镜初始结构参数

主要技术数据		结 构					
$\beta=25$ $NA=0.40$ $f'=7.225\text{mm}$ $L=195\text{mm}$ 工作距=0.971mm							
参 数							备 注
面 号	r/mm	d/mm	n	ν	D_i/mm	玻 璃	*第 6 片玻璃 (10°/11°) 为 0.17 厚的盖玻 片; **无对应的国产 玻璃牌号
1	光阑				5.7		
2	14.289	0.0001			5.7	K9	
3	-8.279	2.6	1.5163	64.1	5.7	F6	
4	-42.76	1.31	1.6248	35.6	5.8		
5	7.1526	2.46			5.5	**	
6	-7.079	2.59	1.52008	63.7	5	F6	
7	353.689	1.31	1.6248	35.6	4.5		
8	4.207	2.46			3.3	BaK7	
9	∞	2.9	1.5688	56.0	2		
10	∞	0.97					
11	∞	0.17	1.5163	64.1		K9	

其次是换玻璃。换玻璃是光学设计中常用来校正像差，提高像质的主要手段之一。本实例是因为第三块玻璃（5#/6#）无对应的国产玻璃牌号，因此第二胶合组必须更换玻璃合。原则上应尽量选用胶合面两边玻璃的折射率差 Δn 相同的玻璃组合，可使胶合面的曲率半径 r_6 不变，这样可使原来系统的像差不会发生太大的变化。此外，还应注意使其阿贝数差 Δv 尽量靠近。为此，用 BaK2—ZF1 代替原结构的第二胶合组（5#~7#）。与原结构相比， $\Delta n_D - \Delta n_D^* \text{（新结构）} = 0.00297$ ，相当接近； $\Delta v - \Delta v^* = 2.3$ ，也相近。

在玻璃材料确定以后，还要把更换玻璃的各个透镜的半径作相应的改变，目的是使每个折射面对应的薄透镜光焦度不变。我们把系统中的每一个折射面，都看做是一个平凸或平凹的薄透镜。在更换玻璃以后，保持它们的光焦度不变，并且让它们之间的厚度和间隔不变，这样可以使系统的像差特性变化不大。根据薄透镜的光焦度公式，欲保持各个折射面的光焦度不变，新的玻璃折射率 n^* 及表面曲率 c^* 和原来的 n 、 c 之间应符合以下关系：

$$c^* = (n^* - 1) = c(n - 1) \quad (5-13)$$

由此得到新半径 r^* 和原来的半径 r 的关系如下：

$$r^* = r \frac{n^* - 1}{n - 1} \quad (5-14)$$

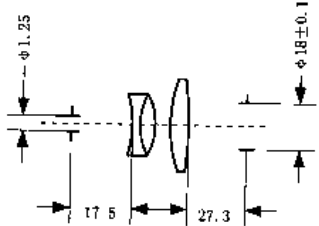
式（5-14）是通用的换玻璃时描述 n 、 n^* 、 r 、 r^* 四个参量的公式，具有很重要的使用价值。在本例的光学系统中胶合面的半径保持不变，因为胶合面两边的折射率差基本不变。新结构半径按公式（5-14）求得， r_5 由6.887改为7.1526， r_7 由341.2改为353.596。

当加入新的玻璃组合后，显然会破坏像差的平衡，因而需要重新进行校正，把换玻璃后的结构在电子计算机上进行光路计算。本例的优化结果见§9.6.2。

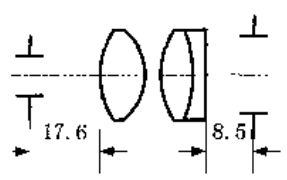
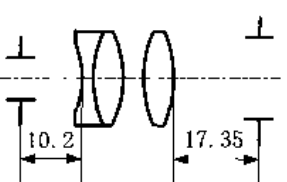
4. 目镜的选型

若从低成本的角度考虑，可选用惠更斯目镜，但从目前市场要求来看，除了中学生实验用的普通生物显微镜外，都偏向于使用视场较大、像质较好的平场目镜（flat-field ocular，指能使场曲得到很好校正的目镜）。国产生物显微镜配置的平场目镜一般为开涅尔型目镜，现已市场化的 $10\times/18$ 、 $12.5\times/16$ 、 $16\times/11$ 平场目镜的结构参数见表5-4。

表 5-4 平场目镜结构参数

名称	主要技术参数	结 构	参 数					备注
			r/mm	d/mm	n_D	v	D_f/mm	
10× 开 涅 尔	$2\omega = 39^\circ 30'$ $D = 1.11\text{mm}$ $f' = 24.95\text{mm}$ $y'_0 = 9.08\text{mm}$ 入瞳距 = 116.5mm		-31.41				14.30	
			23.01	3	1.755	(2F6)	16.11	
			-16.462	7	1.5163	(K9)	21.78	
			32.06	0.3			21.95	
			-32.06	6.5	1.5163	(K9)	22.76	

续表

名称	主要技术参数	结构	参 数					备注
			r/mm	d/mm	n_D	ν	D_0/mm	
12.5 \times 柯 尔 希	$2\omega = 48^\circ 27'$ $D = 1\text{ mm}$ $f' = 20.22\text{ mm}$ $y'_0 = 9.11\text{ mm}$ 入瞳距 = 331.2 mm		77.27				18	
			-16.982	6.5	1.4874	(QK3)	19.5	
			20.23	5			20.5	
			-16.032	8.5	1.5688	(ZK1)	19.5	
			∞	2.5	1.8060	(ZF7)	19.2	
16 \times 开 涅 尔	$2\omega = 39^\circ$ $D \approx 1.1\text{ mm}$ $f' = 15.55\text{ mm}$ $y'_0 = 5.51\text{ mm}$ 入瞳距 = 162.8 mm		-19.724				8.24	
			14.454	1.9	1.7550	(ZF6)	9.344	
			-10.351	4.5	1.5163	(K9)	12.84	
			20.14	0.2			12.95	
			-20.14	3.8	1.5163	(K9)	13.46	

5. 统 算

详见 § 5.3.2。

§ 5.3 无限远像距光学系统设计

§ 5.3.1 概述

20 世纪 80 年代初, 国外显微镜组合设计出现了新的突破, 因采用无限远像距光学系统, 迎来了显微镜组合设计的新阶段——系统集成设计 (SID), 即在一种显微镜主机上通过附件的外接或内插组合成各种显微术而成为多功能用途的显微镜。其中比较有代表性的有: 前联邦德国 OPTON 的 AXIOMA 和 AXIOPLAN 万能显微镜; 前民主德国 ZEISS 的 JENAVAL; 日本 OLYMPUS 的 AH、BH、CH, 近年来日本 Nikon、OLYMPUS 等有名显微镜生产厂家均使用了无限远像距光学系统。

国内除金相显微镜外, 使用这光学系统尚不多, 笔者 1987 年与课题组同仁在“微循环显微镜”研制中使用了无限远像距光学系统, 取得很好的成像效果。其后又多次应用了该光学系统。近年国内不少厂家也开始应用, 如厦门 Motic 公司等。在这里, 把笔者在无限远像距光学系统设计中的应用成果介绍给读者。

1. 无限远像距光学系统

无限远像距光学系统如图 5-6 所示。无限远像距物镜 (下简称 ∞ 物镜) 和辅助物镜间是平行光, 这是该系统的最突出的特点。

2. 共轭距为 195mm 和无限远像距显微镜系统的区别:

图 5-7 很直观地看出常用的共轭距为 195 mm 和物镜像距为无限远两种显微光学系统的区别。无限远光学系统的基本组成是“物镜+辅助物镜+目镜”。

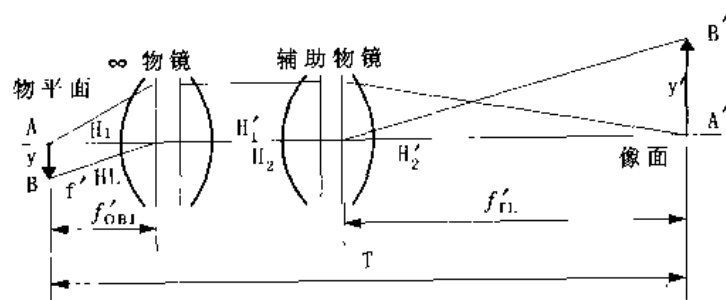


图 5-6 无限远像距光学系统

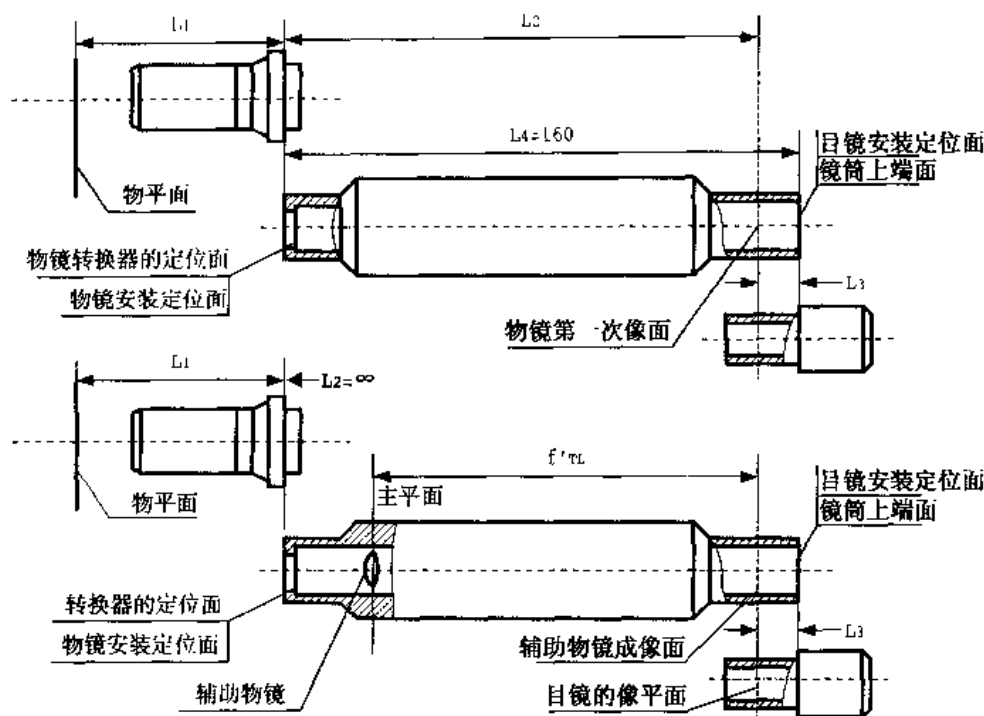


图 5-7 有限共轭距离与无限远像距显微镜的区别

3. 无限远像距光学系统的优点

正因为该光学系统中物镜与辅助物镜间存在着一段平行光路，所以存在如下突出的优点：

- (1) 物镜和辅助物镜之间为平行光线，当中装入分光镜情况下，不产生双像叠影，同时也不会出现像的偏移和像散；
- (2) 在这部分平行光路内，当抽出或插入平行面玻片（滤色片、偏振片）时，焦距不受影响；
- (3) 无限远像距系统可获均匀照度的像面视场，这是由于同倍率的 ∞ 物镜的光束偏转角比有限筒长小，孔径边缘光线的入射角相对减少，在透射表面反射损失减少，使像面照度较均匀。

§ 5.3.2 无限远像距光学系统设计要点

1. 系统对 ∞ 物镜的要求

- (1) ∞ 物镜系列的放大率与辅助物镜焦距线性相关，且同放大率 ∞ 物镜的焦距为定值。

所以 $\beta = f'_{\text{物}} / f'_{\text{辅}}$, $f'_{\text{辅}}$ 一旦确定后, $\beta \propto f'_{\text{物}}$ 。如当 $f'_{\text{辅}} = 250\text{mm}$ 时, $5\times\infty$ 物镜 $f' = 50\text{mm}$ 。这一点与有限筒长的同倍率的显微物镜有显著的区别。如 $4\times\infty$ 物镜 $f' = 62.5\text{mm}$ ($f'_{\text{辅}} = 250\text{mm}$ 时), 而共轭距同为 195mm 的 $4\times$ 物镜的焦距有的为 $f' = 28.798\text{mm}$, 有的为 $f' = 30.34\text{mm}$ 。

(2) 对辅助物镜有齐焦要求时, 设计时应注意使各种放大率物镜的出瞳距变化不要太大, 这样可保证平行光路变化不大, 从而保证整个系统的像质优良。

2. 对平行光路长度 D 的优选

∞ 物镜和辅助物镜之间这段平行光路是无限远像距光学系统最突出的优点, 正是它推动了显微集成设计的发展。然而, 光路长度 D 的变化与整个系统的数值孔径、工作距离以及对杂散光、像面照度影响等方面的关系, 是值得探讨的。

实践告诉我们:

- (1) D 变化, 基本上不影响光学系统的像质;
 - (2) D 变化, ∞ 物镜数值孔径基本不变;
 - (3) D 变化, ∞ 物镜工作距离基本不变;
 - (4) D 变大时, 进入仪器杂散增大, 在落射光照明时更为突出。可是在辅助物镜前面加孔径光阑, 情况有所改善;
 - (5) D 变大时, 像面照度减弱, 因轴外光损失大。
- 因此, 推荐选用平行光路长度 $D = 20 \sim 80\text{mm}$ 。

3. 辅助物镜的选择与设计

(1) 辅助物镜 f'_{TL} 的选择:

从表 4-8 看 f'_{TL} 分别为 165.2, 182.7, 250mm; 有的资料中 f'_{TL} 分别为 200, 250, 312.5 mm。笔者认为选择 $f'_{\text{TL}} = 250\text{mm}$ 较佳, $f'_{\text{TL}} = 200\text{mm}$ 也可以, 原因是:

① 共轭距为 195 mm 物镜, 其像距约为 155 mm, 若 f'_{TL} 取 250 mm, 200 mm, 对同倍率的 ∞ 物镜和共轭距为 195 mm 物镜, 在物方孔径角 u 相同时, 前者像方视场角 u' 远远小于后者, 因此更容易达到良好的像差校正。反之, 若 f'_{TL} 取为 160, 165.2, 182.7 mm, 则和共轭距 195 mm 物镜的像方孔径角 u' 相仿或稍大, 便失去相差校正的优势, 见图 5-8。

② 若 f'_{TL} 取为 300, 312.5 mm, 因像面照度较弱, 不利于观察和显微摄影, 同时会使仪器结构尺寸增大。

(2) 辅助物镜的设计

辅助物镜和目镜组合起来可以看成是一个望远系统。

辅助物镜相当于望远物镜, 由于它是一个小视场系统, 用结构简单的双胶合物镜就行。笔者设计的 $f'_{\text{TL}} = 250\text{mm}$ 的辅助物镜, 为光阑在前的双胶组, 效果不错。其结构参数见表 5-5。

设计辅助物镜要注意其视场等于 ∞ 物镜视场角, 即 $2\omega_{\text{辅}} = 2\omega_{\text{物}}$ 。

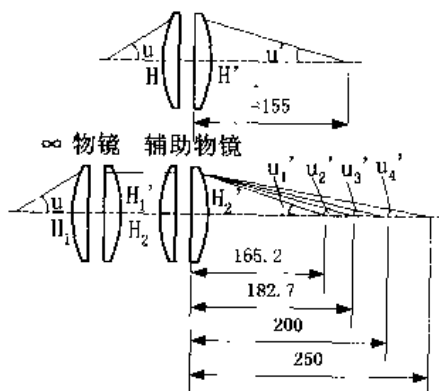
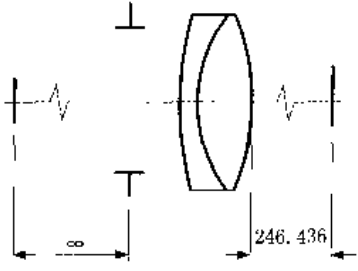


图 5-8 不同的辅助物镜成像质量

表 5-5 辅助物镜结构参数

名称	主要技术参数	结 构	参 数					
			r/mm	d/mm	n_D	ν	D_g/mm	玻璃
双 胶 合 组	$f' = 249.2399\text{mm}$ $D/f' = 1:20$ $2\omega = 5^\circ$ $l'_F = 246.436\text{mm}$		光 阑					
			152	10			12.5	
			104.08	3	1.5163	64.07	13.37	
			-388	3	1.6164	36.6	13.46	K9
							13.56	F3

4. 系统对目镜入瞳距和视场的要求

据笔者实践,无限远像距光学系统中目镜入瞳位置应与具有齐焦性能各放大率 ∞ 物镜的平均出瞳位置重合。目镜物方视场应与 ∞ 物镜经辅助物镜成的第一次像相一致。

5. ∞ 光学系统统算

统算不仅仅是为了考察构成光学系统的各光学部件连接成的光学系统是否合乎几何光学规律,更重要的是利用统算手段通过局部调整结构参数进一步校正、平衡整个系统的像差,实现光学系统的整体优化。 ∞ 光学系统统算比 $L=195\text{mm}$ 生物显微镜光学系统统算具有更重要的意义。因为后者简单、系统基本定型,一般只要物镜、目镜像差不错,统算结果就没有什么问题。而 ∞ 光学系统的影响因素多(如平行光路长度 D 、辅助物镜和棱镜,且光路长、变化较大,等等),不统算就很难协调好这诸多因素,影响像质,渐晕很大甚至不能成像。

∞ 光学系统统算一般可分为三个步骤:

- (1)“辅助物镜+棱镜”统算。主要是调整辅助物镜结构参数,用于补偿棱镜的球差。
- (2)“物镜+辅助物镜+棱镜”统算。按反向光路进行。要注意:①窗瞳对接,确定一个有效光阑,因各部件在设计时均定有光阑时,一般把物镜光阑定为孔径光阑,辅助物镜或棱镜光阑仍然保留,实际上相当是透光孔就行了。②是否有渐晕。显微成像光学系统一般是不允许出现渐晕的。当出现了渐晕时,可引用程序调出“初级像差表”查阅,看实际通光口径与设置值比较其差异,并进行调整,还可通过上下边缘光线追踪,查找出通光口径不足的面。③由像差决定最佳离焦量。④调整平行光路长度 D ,使像质为最佳。

(3)“物镜+辅助物镜+棱镜+目镜”统算。以反向光路进行平行光从目镜的入瞳进入。当像差与要求差距不大时,可改用高档次的目镜(如普通目镜改平场目镜、广角目镜等)与之配合;若差距较大,就要考虑改用高档次的物镜(如消色差物镜改平场消色差物镜、平场半复消色差物镜等),或者“量身定做”高性能物镜,以满足使用者的要求。

§ 5.3.3 设计实例

设计一个具有多种放大率,且最大放大率为320的特种显微镜的无限远像距光学系统。要求 ∞ 物镜为长工作距离平场物镜,物镜为大视场,像方线视场为 $\phi 21\text{mm}$ 。

已知条件: $\Gamma_{\max} = 320$,共轭距为无穷远, ∞ 物镜像方视场为 $\phi 21\text{mm}$ 。

1. 光学系统总体设计

因为要求有多种放大率，所以要有多个物镜与目镜组合。

(1) 物镜与目镜放大率的配置。

① 按 $500\text{NA} \leq \Gamma \leq 1000\text{NA}$ (设所使用光线 $\lambda = 0.00055\text{ mm}$) 选择物镜放大率 β 。据国标《显微镜物镜系列》(GB2609—81) 可选用下列平场消色差物镜: $4\times$ ($\text{NA}=0.1$)、 $10\times$ ($\text{NA}=0.25$)、 $16\times$ ($\text{NA}=0.32$)，因而得出 $50 \leq \Gamma \leq 320$ 。

② 据 $\Gamma_{\text{目}} = \Gamma/\beta$ 选目镜放大率。据原一机部部标准《显微镜目镜系列》(JB1782—76)，可选用下列广角观察目镜系列: $10\times/21$ 、 $16\times/15$ 、 $20\times/13$ 。

(2) 显微镜放大率系列，见表 5-6。

表 5-6 无限远像距光学系统放大率系列

Γ $\Gamma_{\text{目}}$	β	4	10	16	备 注
10		40	100	160	*物镜为长工作距离平场物镜，且齐焦；**入瞳距与视场特殊，目镜不能与 $L=195\text{ mm}$ 生物显微镜目镜通用，须重新设计；***本表显示了由 3 种物镜与 3 种目镜的组合可形成 8 种放大率
16		64	160	256	
20		80	200	320	

2. 外形尺寸计算

请读者参照 § 5.25 自行计算。

3. 设计物镜

$16\times$ 长工作距离平场物镜设计是难点，已在 § 4.2.3 中详细介绍了，在此不重复。因 $4\times$ 、 $10\times$ 长工作距离平场物镜比较容易选到同类型的镜头作为初始结构，只要结合实际要求确定相关技术参数，通过电子计算机的迭代优化，就能得到像质优良的结果。表 5-7 (a)、(b)、(c) 中的 $4\times$ 、 $10\times$ 长工作距离平场物镜是笔者设计的，且已商业化的成果，供参考。

表 5-7 (a) $4\times$ 长工作距离平场物镜结构参数

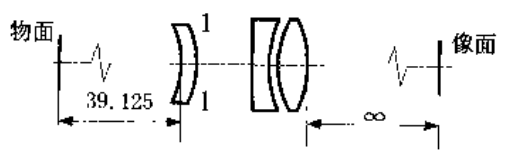
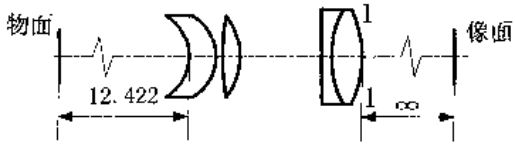
主要技术数据		结 构					
$\beta=4$ $\text{NA}=0.1$ $f'=62.575\text{mm}$ $L=\infty$ 工作距=39.125mm							
参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n	v	D_0/mm	玻璃	
1	-9.974				8.21	ZK6	
2	-12.32	2.75	1.6162	58.3	9.19		
3	光阑	0.001			9.19		
4	-149.28	9.2			12.51		
5	40.64	1.8	1.7172	29.5	12.95	ZF3	
6	49.549	0.9			13.54		
7	-22.397	3	1.6126	58.3	14.43	ZF6	

表 5-7 (b) 像差数据

<div>像差</div> <div>h</div>	$\delta L'$	$\delta L'_r$	$\delta L'_c$	$\Delta L'_{rc}$	SC'
0	0.035770	-0.033569	0.0075721	-0.041140	0.004246
0.707	0.048036	0.0096720	0.0091338	0.000538	0.001951

<div>像差</div> <div>h</div>	x'_1	x'_2	x'_{st}	$\delta L'_c$	K'_c	$\Delta y'_{rc}$	$\delta Y'_2$
0.707	0.009487	0.008542	0.000946	0.0370934	0.011887	0.000491	-0.02893
1	0.018572	0.016994	0.001578	0.011749	-0.038546	0.000545	-0.1654

表 5-7 (c) $10\times$ 长工作距离平场物镜结构参数

主要技术数据		结 构					
$\beta=10$ $NA=0.25$ $f'=25.012\text{mm}$ $L=\infty$ 工作距=12.438mm							
参 数							备注
面 号	r/mm	d/mm	n	v	D_g/mm	玻璃	
1	-6.8488				7.27		
2	-9.8955	3.37	1.6568	51.5	9.58	ZBaF3	
3	197.4064	0.2			9.68		
4	-20.2509	2	1.6203	60.3	10.25	ZK9	
5	60.1412	11.81			12		
6	17.5655	1.37	1.7172	29.5	12.11	ZF3	
7	-25.187	3.5	1.4874	70.0	12.5	QK3	
8	光阑	0.001			12.5		

§ 5.4 照明光学系统设计

§ 5.4.1 概述

1. 照明方式和要求

照明系统 (illuminating system) 指由光源与集光镜、聚光镜及辅助透镜组成一种照明装置。因为显微镜的成像质量与对物体的照明有很大关系, 显微镜观察的对象一般是不发光的, 由于显微图像的高倍放大, 像方光束孔径很小, 因而必须有足够的照明。照明的光能是由光源提供的, 它通过照明系统实现对被观察对象的照明, 根据观察对象光度性质的不同, 选择合理的照明方式。观察生物切片一类透明的标本采用透射照明, 照明光束通过物体进入显微物镜, 见图 5-9 (a)。对于不透明的金属表面应该采取反射照明, 依靠照明光束在物体表面的反射光通过物镜成像。为了看清标本的结构, 将生物标本制成切片和着色, 金相样品表面抛光腐蚀。普通亮视场透射或反射照明只能显示物体吸收或反射的差别, 不能暴露内部结构的散射差别, 由此出现了暗视场照明, 见图 5-9 (b)。暗场照明也有透

射和反射两种。它与亮视场照明不同，暗视场透射照明光束或暗视场反射照明从物体表面反射的光束均不能直接进入显微物镜。换句话说，亮视场照明光束与物镜共轴；而暗视场照明光束处于物镜的有效孔径光锥（图 5-9 (b) 阴影部分）之外，依靠标本内部的散射光通过物镜成像，增强对比，有利于辨别标本内部的结构差异。暗场照明用于观察细菌、细胞和微生物。

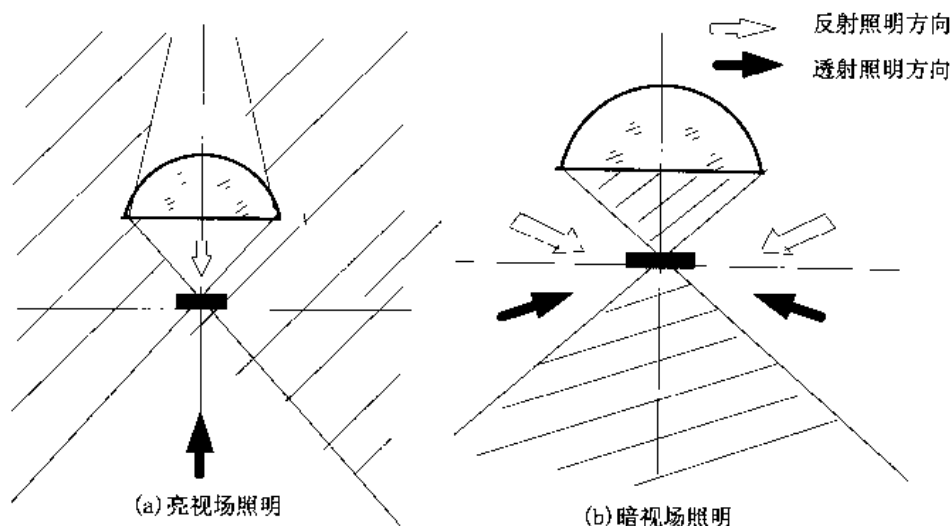


图 5-9 照明方式

照明系统是光学仪器的一个重要组成部分，研究不发光的对象都要配备照明装置。我们这里讨论的问题，不仅适用于显微系统，对于照相或投影、放映系统都是适用的。

照明部分影响光学系统成像光强的因素主要是光源亮度和发光面积，以及照明系统的拉氏不变量。光源参数的确定可以通过光度计算，但是更有效的是进行必要的试验，或者参考同类系统对比设计。

光源就是本身能发出光（包括可见光、紫外光和红外光）的物体，通常指能发可见光的发光体。光源主要分为热辐射光源、气体放电光源、激发光源、激光器等。显微镜用的照明光源除用自然光外，一般都配备专用光源，如低压卤钨灯（6 V、12 V）、氙灯、电子闪光灯、高压汞灯和激光器等。

照明系统性能取决于使用条件。设计时首先要满足对照明系统的要求，然后根据此要求遵循一定的设计原则。

对照明系统的要求如下：

- (1) 被照明面要有足够光照度，而且要足够均匀；
- (2) 要保证被照明物点的数值孔径，而且照明系统的渐晕系数与成像系统的渐晕系数应一致；
- (3) 尽可能减少杂光，限制视场以外的光线进入，防止多次反射，以免降低像面对比和照明均匀性；
- (4) 对于高精度的仪器和机床，光源和物面以及决定精度的主要零部件不要靠得很近，以免造成温度误差。

为了提供必要的照明视场和孔径，光源和照明系统组成的光管必须充满后继光学系统的入瞳和物面。这里分析两种情况：①光源直接照明——需要光源发光面积大，见图 5-10

(a), 光源离开物面愈远, 所需尺寸愈大; ②采用聚光照明系统——可能以小面积光源照明大面积物体, 缩小光源尺寸, 物面靠近聚光镜更为有利, 见图 5-10 (b)。

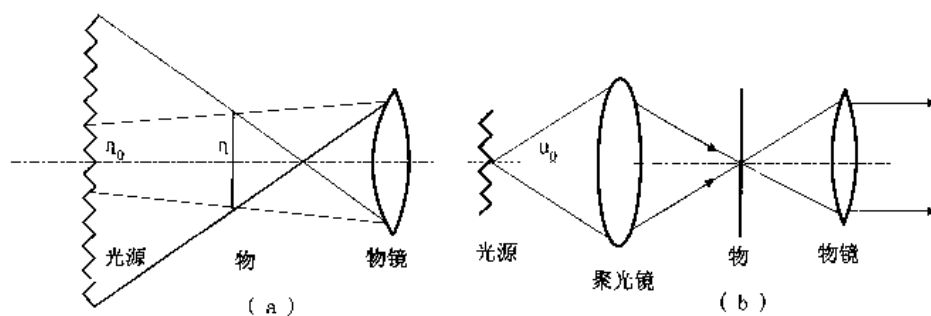


图 5-10 直接照明与聚光照明

2. 聚光照明系统设计原则

聚光照明系统要根据上述要求, 在设计上应遵循以下两个原则:

(1) 光孔转接原则。设照明系统的入瞳位置为光源的位置, 则照明系统的出瞳应与物镜的入瞳重合, 否则照明光束不能充分利用。见图 5-11, 内假定照明系统出瞳与后部光源系统入瞳大小一致。图 5-11 (a) 光瞳位置重合, 照明光束全部通过 (柯勒照明属于这种情况); 图 5-11 (b) 光瞳不重合, 成像光束仅为照明光束的一部分, 光束阴影部分皆被物镜的入瞳拦阻 (临界照明属于这种情况)。

(2) 系统的拉氏不变量应大于或等于物镜的拉氏不变量 (见图 5-12), 即按以上原则就可确定出光源的位置和大小以及照明系统的外形尺寸。

设拉氏不变量如下:

聚光照明系统

$$J_{\text{聚}} = \eta_0 \cdot n_0 \sin u_0$$

物方

$$J_{\text{物}} = \eta \cdot n \sin u$$

像方

$$J_{\text{像}} = \eta' \cdot n' \sin u'$$

整个光学系统光管封闭, 则下式成立:

$$J_{\text{聚}} = J_{\text{物}} = J_{\text{像}}$$

保证照明视场和孔径足够而充分, 应满足:

$$J_{\text{聚}} \geq J_{\text{物}}$$

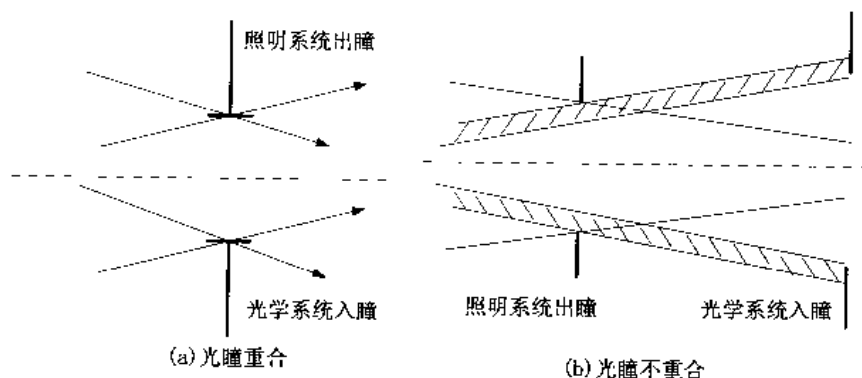
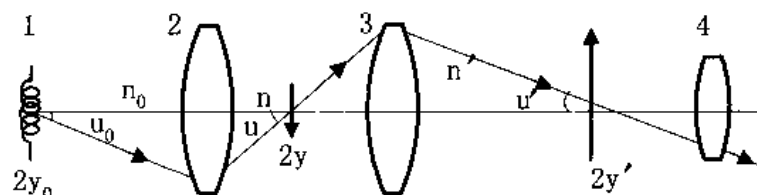


图 5-11 光孔转接



1—光源 2—聚光镜 3—物镜 4—目镜

图 5-12 显微光学系统的拉氏不变量

§ 5.4.2 照明系统及其分类

照明方式有亮视场照明和暗视场照明两种。暗视场照明用于观察细菌、细胞和微生物等生物显微镜中。

1. 亮视场照明系统

下面要讨论的照明方式是亮视场照明，并且主要是亮视场照明中的柯勒照明。

(1) 直接照明。普通显微镜利用自然光或灯泡直接照明（见图 5-13）。在显微镜下部安放平面或凹面反射镜。目前除低档的学生用的生物显微镜外很少应用。直接照明要同时实现数值孔径和光照均匀的要求，必须采用聚光镜，如图 5-14 所示。

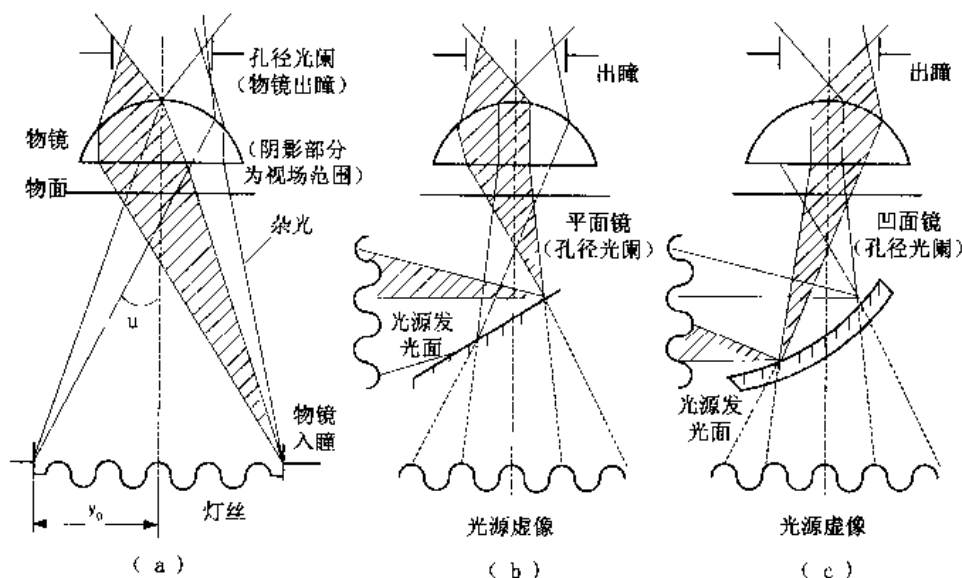


图 5-13 直接照明

(2) 临界照明 (critical illumination)。光源被照明系统成像在物面上的一种照明方法为临界照明，见图 5-15 (a)。临界照明时，视场光阑在光源的位置，孔径光阑设在聚光镜框或其附近，因而这种照明在物面视场范围内有最大的亮度，且没有杂光。缺点是光源亮度的不均匀性将直接反映在物面上，同时并不满足光孔转接原则，即聚光镜的出瞳位置和物镜的入瞳位置不重合。有时为了防止光源发热影响观察对象，在结构上要求加大光源与物面之间的距离。这时可把聚光镜分为前组和后组，见图 5-15 (b)。习惯上称前组为集光镜，后组为聚光镜。集光镜的焦距和口径满足光源的数值孔径需要，聚光镜的像方孔径角满足物镜的数值孔径要求。如聚光镜焦距太小，可用两片或多片透镜代替，见图 5-15 (c)。

如希望视场可变, 可使灯丝先成一次中间实像, 并在该处安放大小可变的视场光阑, 见图 5-15 (d)。临界照明系统简单, 电影放映机大多采用这种照明方式, 读数显微镜中刻线尺或度盘的照明也常采用。

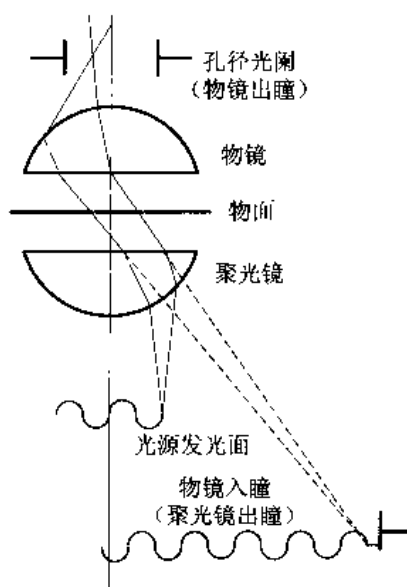


图 5-14 采用聚光的直接照明

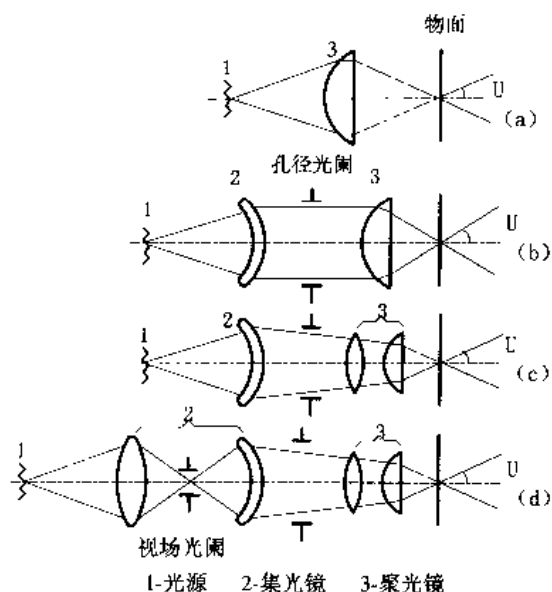


图 5-15 临界照明

(3) 柯勒照明 (Kohler illumination)。这种照明方式克服了临界照明不均匀的缺点。柯勒照明指被照明系统成像在物镜入瞳上的一种照明物体方法。它的构成有以下两个特点:

① 发光面通过集光镜成实像。该像面上可以安放可调的孔径光阑, 然后再经聚光镜成像于物镜的入瞳位置。因此, 充分利用了光能, 并满足光孔转接原则。

② 集光镜框或其后面附近可以安放可变的视场光阑, 它通过聚光镜成像于物面, 控制照明视场的大小, 避免杂光射入物镜。

柯勒照明系统分为非远心照明 (见图 5-16) 和远心照明两种。远心柯勒照明的特点是: 孔径光阑位于聚光镜的物方焦面上, 组成像方远心光路 (见图 5-17) 视场光阑的位置根据需要选定。它一般与显微物镜的物方远心光路配合使用。为了缩小聚光镜口径, 在孔径光阑附近应附加辅助透镜。如果要求增加轴向长度, 可将集光镜分成两组 (见图 5-18)。

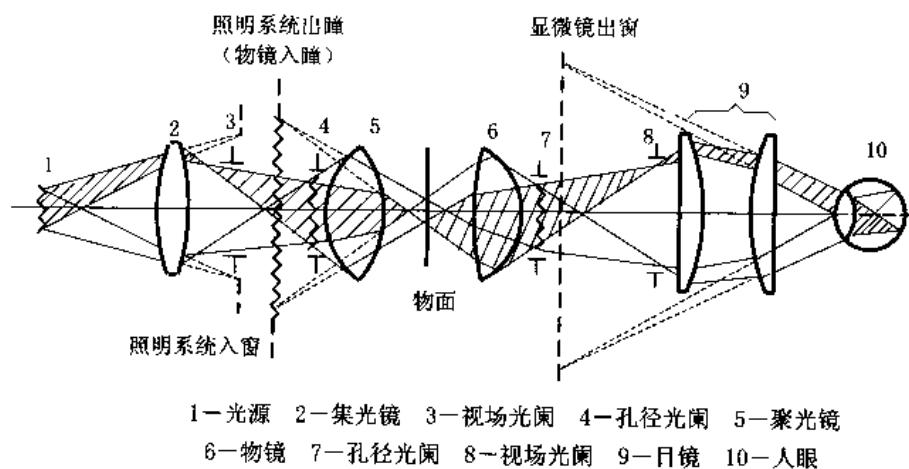


图 5-16 非远心柯勒照明

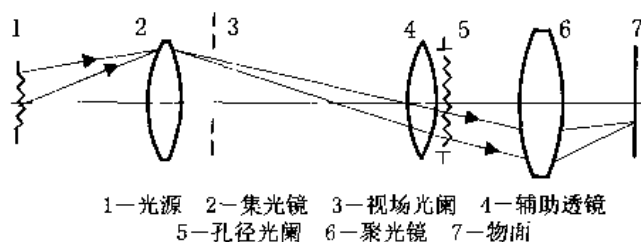


图 5-17 在孔径光阑附近加辅助透镜的柯勒照明

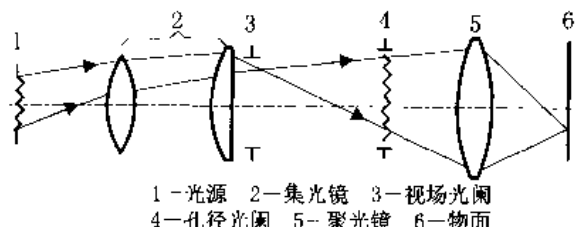


图 5-18 集光镜分两组的柯勒照明

聚光镜和集光镜的结构可根据光线偏角大小选用一片，两片或多片。目前，显微照相、投影仪、缩微照相、工具显微镜、电影印片机等要求像面照度高度均匀的光学系统，一般都采用柯勒照明系统，

(4) 反射照明。观察不透明物体时，需用反射照明。这种照明方式是以物镜兼做聚光镜，在物镜上方用半透半反镜或小棱镜分光，其原理如图 5-19 所示。上述临界照明及柯勒照明均适用于反射照明方式。

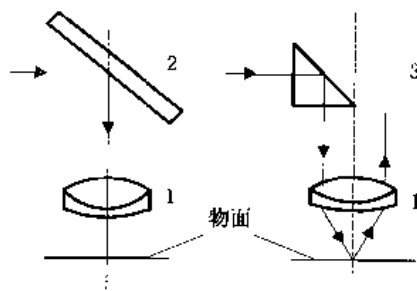


图 5-19 反射照明原理

2. 暗视场照明系统

暗视场照明也有透射照明及反射照明两类（见图 5-20）。透射暗视场照明最简单的办法是将聚光镜中部孔径挡掉，使照明光束不能直射入显微物镜。若物镜数值孔径大，则需要聚光镜的数值孔径更大，采用旋转抛物面或旋转心脏曲面与球面结合校正球差，数值孔径达 0.8 以上。暗视场反射照明光束沿物镜四周射入，聚光镜与物镜分开，用折射透镜，参见图 5-20 (b)，也可用抛物面、心脏曲面等反射镜。

§ 5.4.3 照明系统外形尺寸计算

下面以远心柯勒照明系统为例，讨论其外形尺寸的计算方法。

精密测量显微物镜一般采用物方远心光路，根据照明原则，需要用柯勒照明系统与之配合，其光路如图 5-21 所示。

1. 孔径光阑大小的确定

根据系统应满足拉氏不变量 $n_0 u_0 y_0 = n u y$ 要求，由图 5-18 可写出如下关系式：

$$J_{\text{聚}} = n_0 v'_0 D_{\text{孔}}/2 = n v_y = J_{\text{物}}$$

因为 $v'_0 = y/v'_{\text{聚}}$ ，故

$$D_{\text{孔}} = 2 f'_{\text{聚}} U \quad (5-15)$$

由此便可从物镜的孔径角来确定照明系统的孔径和光阑的大小。

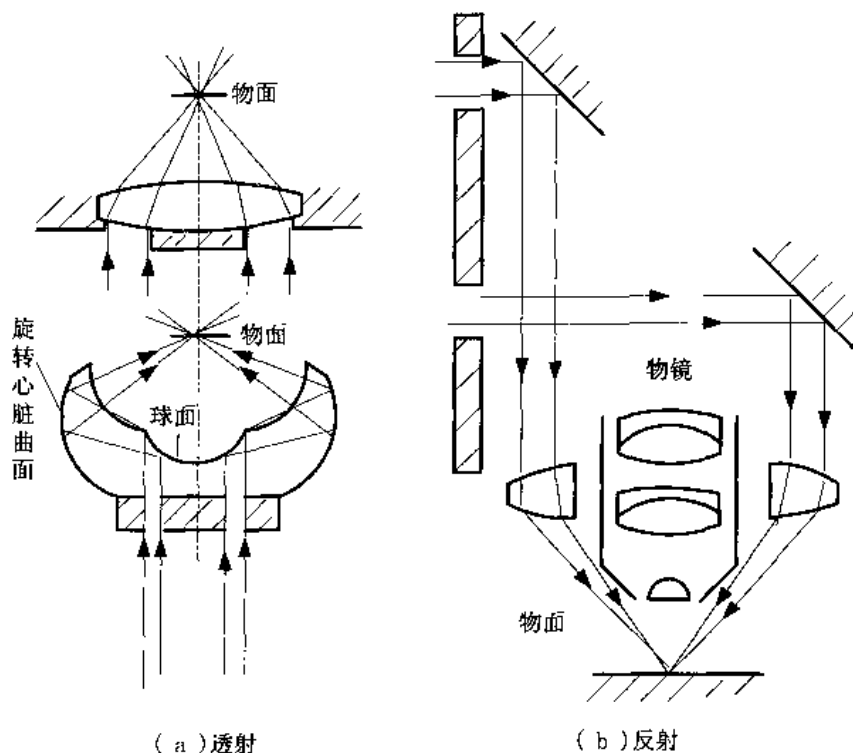


图 5-20 暗视场照明

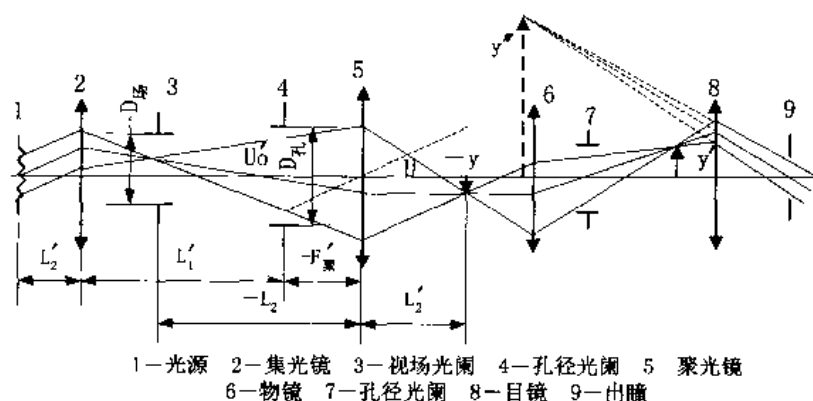


图 5-21 远心柯勒系统照明光路

2. 视场光阑位置和大小的确定

由图 5-18 可知，物面和视场光阑是聚光镜的一对共轭面，由高斯公式可写出

$$l_2 = l'_2 f'_2 / (f'_2 - l'_2) \quad (5-16)$$

式中 l 即视场光阑的位置。视场光阑的大小可由下式确定：

$$D_{\text{视}} = 2y / \beta = 2yl_2 / l'_2 \quad (5-17)$$

式中， $\beta = l'_2 / l_2$ 为聚光镜的放大率。

在工具显微镜和万能工具显微镜中，由于物面的位置在允许的轴向范围内可以变化。为了使不同位置的物面，在整个视场范围内得到均匀照明。一般做法是：在柯勒照明系统

中不专设视场光阑，而是使集光镜和聚光镜有足够大小的口径，以满足上述要求。

3. 聚光镜口径的确定

对物体的照明要求是光照均匀，即物面上每一点都应得到整个发光面的照明，以满足每点的孔径要求；同时，要求物面和发光面之间的距离适当大，以满足光源上的每一点照明整个物面。由图 5-22 不难看出，要保证物面位置变化（由位置 1 到位置 2）时，物点仍具有要求的孔径角，聚光镜口径一定要足够大，不然便不能满足孔径一致的要求。由图 5-23 可进一步看出，物面处于 $\triangle CDM$ 的照明范围内时，便能达到光照均匀的要求。设入窗范围满足光照均匀时离开聚光镜的最大变动距离为 L ，则聚光镜的口径为

$$CD = D_{\text{聚}} = 2y + 2LU = 2(y + L \cdot NA) \quad (5-18)$$

式 (5-18) 说明聚光镜直径与物镜的数值孔径 NA 、物面的最大变动距离 L 以及显微镜的线视场 $2y$ 有关，而与聚光镜焦距无关。这并不意味着焦距可以随意选取。因为聚光镜口径确定后， $f'_{\text{聚}}$ 便不能随意选取了。 $f'_{\text{聚}}$ 太短，导致 $(D/f')_{\text{聚}}$ 增大，则由于像差增大而使光束散射，光能不能有效合理使用； $f'_{\text{聚}}$ 太长，会使结构庞大，孔径光阑也大。在工具显微镜中一般取 $(D/f')_{\text{聚}} = 1/4$ 。

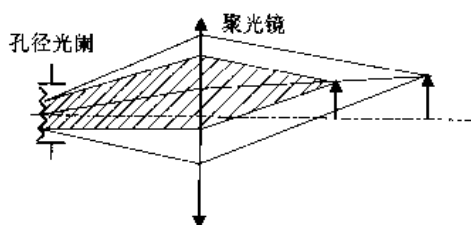


图 5-22 聚光镜口径的确定 (一)

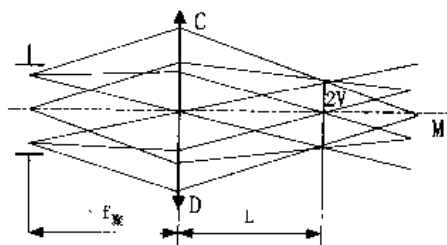


图 5-23 聚光镜口径的确定 (二)

4. 集光镜口径及焦距的确定

集光镜的主要任务是将灯丝成一放大实像于孔径光阑处，因而灯丝位置及孔径光阑位置是共轭关系（参见图 5-21）。共轭距 $(l'_1 - l_1)$ 由结构尺寸决定。根据灯丝长 $2y_0$ 和孔径光阑口径 $D_{\text{孔}}$ ，便可确定 l_1 和 l'_1 的尺寸。然后由高斯公式算出集光镜的焦距 $f_{\text{集}}$ 。

集光镜的口径是这样确定的：首先可由拉氏不变量求出集光镜的孔径角 U_0 ，即 $U_0 > y_0 / f_{\text{集}}$ ，则集光镜口径 $D_{\text{集}}$ （由图 5-21）满足： $D_{\text{集}} \geq 2l_1 \tan U_0$ 。

§ 5.4.4 聚光镜光学设计

1. 聚光镜的像差校正和形式

聚光镜照明整个物方视场，原则上对它的像差校正要求应与物镜类似，但是像差公差允许大得多。一般要求不同的聚光镜采用色散小的普通光学玻璃（如 K9）制造，只校正球差，选取球差最小的透镜弯曲形状。根据总偏角 Δu 的大小确定聚光镜的片数（见图 5-24），每片偏角 $\Delta u = 0.20 \sim 0.30$ 。有条件的地方用非球面型。与高数值孔径显微物镜相匹配的聚光镜位置必须十分靠近物面，照明视场很小，允许每片聚光镜承担更大偏角，见图 5-24 (e)、(f)。

高要求的聚光镜应校正球差、彗差，满足不晕条件。高倍显微镜观察时，为了看清聚光照明系统的孔径光阑边缘，应进行精确调整，聚光镜应校正球差、彗差及色差（包括色球差及倍率色差）。

当聚光镜适用于大数值孔径小视场时，它就不一定能适合小数值孔径大视场的照明要求，否则必须承受的拉氏不变量值太大，实际上往往做不到。采用变焦距聚光镜就可以解决这个问题。

2. 聚光镜通光口径

聚光镜通光口径可根据成像系统渐晕系数来确定。如图 5-25 所示，投影物镜 3 不产生渐晕，则相应聚光镜 2 的通光口径可由图 5-25 所示的口径确定。对聚光镜而言，物面 AB 是孔径光阑，可自右向左进行光线追迹，便可求得聚光镜 2 的通光口径。

3. 设计实例

对图 5-26 所示的物镜，试设计一个聚光镜均匀照明物面 AB 。已知初始条件如下：

- ① 灯丝到灯丝像之间总长为 120mm；
- ② 灯丝成像在物镜 1 入瞳处，其直径为 8mm；
- ③ 灯丝直径为 2 mm，灯丝到第一折射面的距离 l_1' （参考图 5-25）要大于灯丝到灯泡顶点之间距离 H ，设 $l_1 = -12\text{mm}$ ；
- ④ 被照明物面 $AB=4\text{mm}$ ，物镜的 $\text{NA}=0.3$ 。

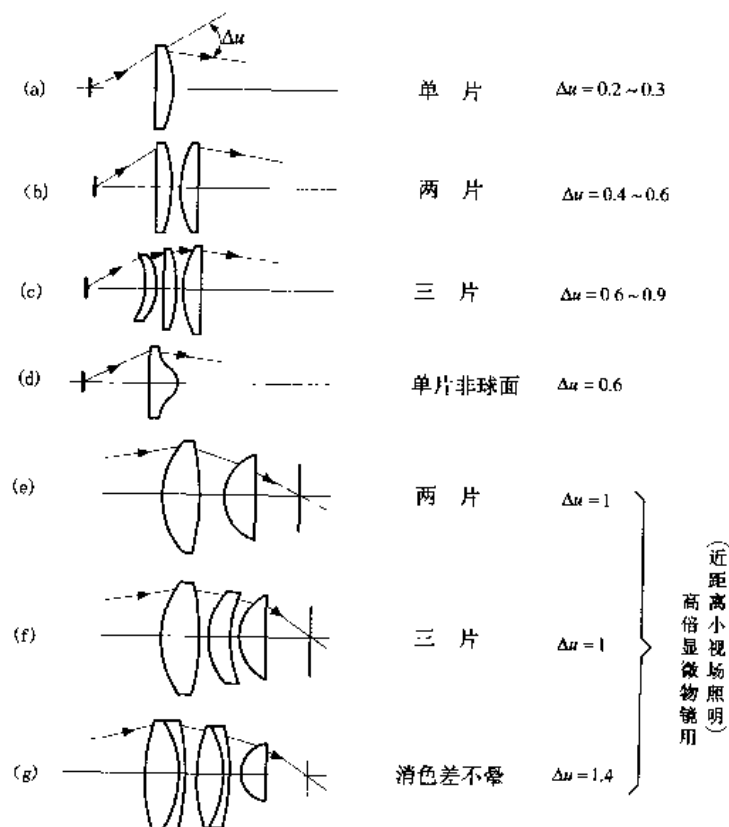


图 5-24 聚光镜型式

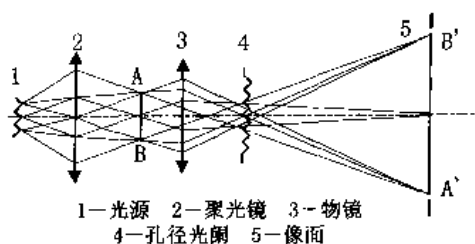


图 5-25 聚光镜通光口径

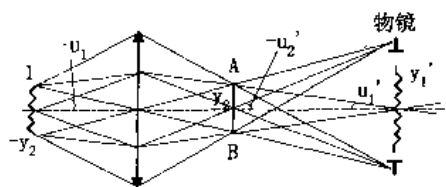


图 5-26 物镜照明

(1) 确定透镜片数及其负担的偏角。

根据物镜和聚光镜的拉氏不变量 $|J|$ 相等, 有

$$J = y_2 u_2$$

$$J = y_1' u_1'$$

由此可得

$$u_1' = \frac{y_2 u_2}{y_1'} = \frac{\frac{4}{8} \times 0.3}{\frac{8}{2}} = 0.15$$

由初始条件知, 聚光镜的垂轴放大率

$$\beta = y_1' / y_1 = -8/2 = u_1 / u_1' = u_1 / 0.15$$

解上式可得

$$u_1 = -0.6$$

由此可求得聚光镜负担的总偏角

$$u_1' - u_1 = 0.15 - (-0.6) = 0.75$$

现采用球面透镜, 则由上述可知, 这个聚光镜要由三个球面透镜组成。

可以先假设总偏角由三片平均负担, 即每片负担:

$$u_1' - u_1 = u_{II}' - u_{II} = u_{III}' - u_{III} = 0.75/3 = 0.25$$

由此可得

$$u_1' = u_{II} = u_1 + 0.25 = -0.60 + 0.25 = -0.35$$

$$u_{II}' = u_{III} = -0.35 + 0.25 = -0.1$$

$$u_{III}' = u_{III} + 0.25 = -0.10 + 0.25 = 0.15$$

(2) 镜片设计。

消像差要求: 一般的聚光镜不用来“成像”, 对像质要求较低, 不必消除像差, 只需使球差较小, 并适当照顾彗差(以上两点靠透镜的弯曲形状保证)。一般, 当单透镜的球差较小时, 彗差也较小。

也不必消除色差, 因为色差的突出表现是边缘处有彩色, 中央部分各色光线交叠后仍为白光, 工作时可把彩色边缘调放到视场以外。此外, 在选用玻璃时宜用色散较小或 v 值较大的玻璃(如 K9: $n_0 = 1.5163$, $\delta n = 0.00806$, $v = 64.1$), 以减小色差。总之, 一般聚光镜不必用双胶合透镜, 只在某些要求较高的聚光镜中采用双胶合透镜来消除球差、色差和彗差。

先设计第一片(见图 5-27), 已知:

$$\begin{cases} u_1 = -0.60 \\ u_2 = -0.35 \end{cases}$$

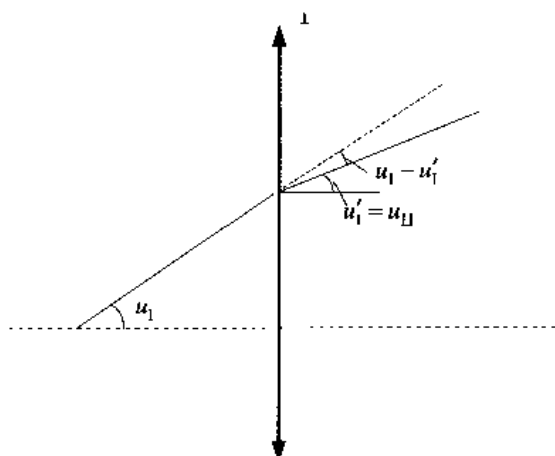


图 5-27 光线偏折

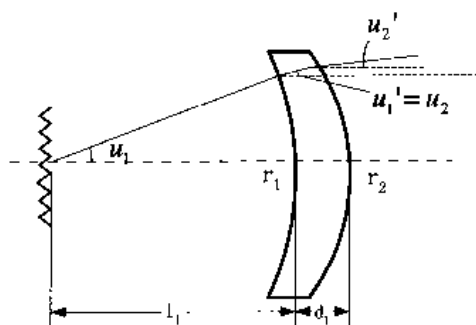


图 5-28 第一片偏角

设第一片由两球面 r_1 、 r_2 构成，设计任务就是采用多大的 r_1 、 r_2 ，既能保证所需的 u_1 、 u_2 ，又使球差较小。

一般的单片透镜，高级球差较小，在设计中只要使初级球差较小，就能得出较佳结果。在 § 3.2 中已知单片薄透镜弯曲形状和初级球差的关系，它是聚光镜设计的基础，具体步骤如下。

按下式求出使薄透镜初级球差最小时所需的 u_2 角，见图 5-28，有：

$$u'_1 = u_2 = \frac{(2n+1)(u'_2 + u_1)}{2(n+2)} \quad (5-19)$$

注：式 (5-19) 只能用于聚光照明系统，对其他镜片设计无效。

本例中， $u_1 = -0.6$ ， $u'_2 = -0.351$ ， $n_D = 1.5163$ (K9 玻璃)，求得 $u_2 = -0.54474$ ，见图 5-29。亦即当镜片内的 $u_2 = -0.54474$ 时，单片薄透镜的初级球差最小。

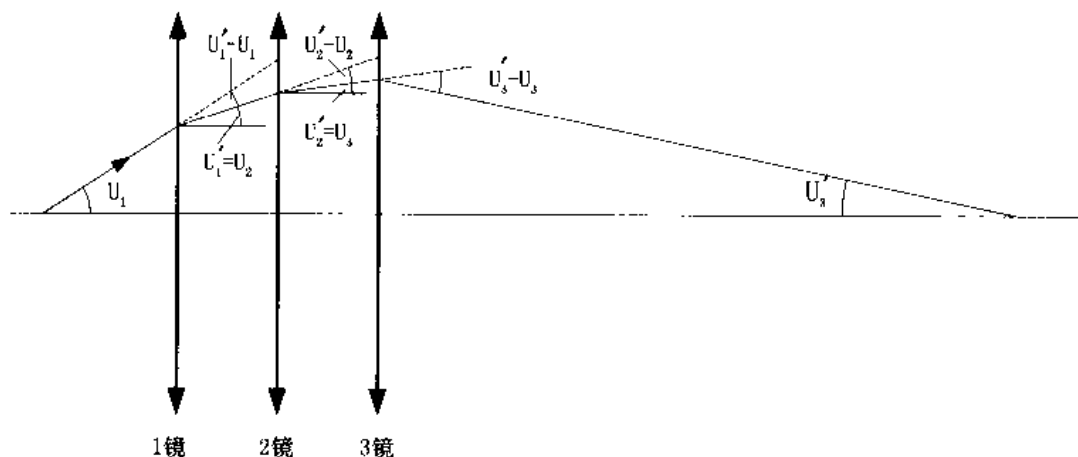


图 5-29 三片聚光镜的偏角负担

(3) 求各透镜的曲率半径。

① 计算第一片透镜

由上述计算可知, $u_1 = u_1' = -0.60$, $u_0' = u_1' = -0.35$, 材料用 K9 玻璃, $n_D = 1.5163$ 。则单个薄透镜球差最小的第二面物方孔径角为 $u_{II} = -0.54474$, 相应的 $r_1 = -16.449\text{mm}$ 。

为检验 r_1 计算是否正确, 可对第一面进行近轴光计算。检验 u_1' 是否等于 -0.54474 , 若检验正确, 就可往下进行。

根据精度高低来确定其必要厚度, 也可先假设一个厚度以后发现不合适可再调整, 本例先取 $d = 8\text{mm}$ 。

由上述近轴光追踪可求得:

$$l_1' = -13.217 \text{ mm}$$

$$l_2 = l_1' - d_1 = -13.217 \text{ mm} - 8 \text{ mm} = -21.217 \text{ mm}$$

则

$$r_2 = (-21.217)(-0.54474)(1 - 1.5163) / [-0.35 - 1.5163(-0.54474)] \\ = -12.536 \text{ mm}$$

r_2 求出后, 再以近轴光追踪求得 $u_2' = -0.35$ (说明上述所求 r_2 计算正确) 和 $l_2' = -33.024 \text{ mm}$ 。

② 计算第二片透镜。

先假设第一片和第二片之间的空气间隙为 $d_2 = 0.1\text{mm}$, 则

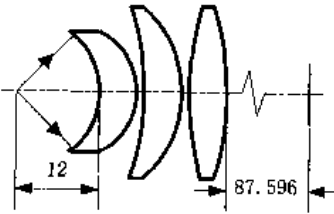
$$l_3 = l_2' - d_2 = -33.024 - 0.1 = -33.124(\text{mm})$$

$$u_3 = u_2' = -0.35$$

而其像方孔径角 $u_4' = u_3' = -0.1$ 。据此, 重复上述步骤, 求得 $r_3 = -144.99\text{mm}$, $r_4 = -24.21\text{mm}$, $d_3 = 8\text{mm}$ 。

重复运用上述方法, 可求出第三片透镜。计算结果见表 5-8 (a)。

表 5-8 (a) 三片式聚光镜初始结构参数

主要技术参数	结 构	参 数					
		r/mm	d/mm	n_D	ν	D_f/mm	玻璃
$NA = -0.6$ $L = 125.796\text{mm}$ $Y = -1\text{mm}$ $u' = 0.14998$		-16.449				16.26	
		-12.536	8	1.5163	64.1	24.79	K9
		-144.99	0.1			24.79	
		-24.21	8	1.5163	64.1	28.35	K9
		49.185	0.1			28.35	
		-65.132	8	1.5063	64.1	27.15	K9

实际球差 $\delta L_m' = -19.63843 \text{ mm}$, 初级球差 $\delta L_m' = -\sum_1^6 S_1 / (2n_6' u_6'^2) = -0.89482 / (2 \times 1 \times 0.149983^2) = -19.88939(\text{mm})$, 相应高级球差 $= -19.63848 - (-19.88939) = 0.25091 \text{ mm}$; 由此可知单透镜的高级球差是比较小的。

(4) 进一步减小实际球差的方法。

① 调整各透镜组偏角分配以减小球差。为了分析, 列出三片透镜的 S_1 如下:

第一片 $S_1 = 0.080753$

第二片 $S_1 = 0.358393$

第三片 $S_1 = 0.455672$

由此可见, 第一片球差负担太轻, 第三片负担太重, 其原因是三片透镜负担的偏角 $u' - u = h/f'$ 虽然都是 0.25, 但光线在第一片透镜上的入射高度较低, 相应 f' 较小, 而初级球差与焦距一次方成正比, 所以第一片透镜产生球差较小, 而第三片透镜则相反。为此, 可调整各透镜负担偏角, 由原来的平均每片负担 $u' - u = 0.25$, 改成:

$$\text{第一片} \quad u'_I - u_I = 0.30$$

$$\text{第二片} \quad u'_{II} - u_{II} = 0.23$$

$$\text{第三片} \quad u'_{III} - u_{III} = 0.22$$

这样调整的结果将使第一透镜的 S_I 增大, 第二、三透镜的 S_I 减小, 但总的 ΣS_I 比调整前小。

② 把透镜“弯曲”, 以减小球差。

由初级球差极小条件的 u_2 , 对于 $d=0$ 的薄透镜是精确值, 加入厚度 d 后, 尤其是 d 相对于 r 来说较大时, 便引入一定的误差, 得到的结果只是 S_I 较小而非极小值。所以, 可分别对每一片透镜进行弯曲, 使厚透镜的 S_I 处于极小值位置或其附近。所谓“弯曲”, 是在保持透镜的焦距不变(或基本不变)的条件下, 把透镜弯曲成不同形状, 以改善像差。

(5) 保证共轭距离的方法。

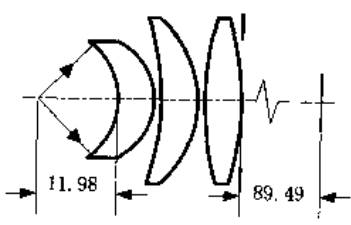
设计时希望共轭距离总长为 120 mm, 经过实际光路计算其值为 125.797 53 mm, 这对聚光镜来说基本上满足要求。若要严格保证共轭距离, 则在各透镜的曲率半径 r 、透镜厚度、透镜间间隔 d 以及物距 l_1 都乘以缩放系数 k (要求的共轭距离除以光路计算求得的共轭距离) 后, 就可获得所要求的共轭距离。

这种“缩放”, 即把所有的线值 (L, r, d 以及相应的 f', h, l' 等) 同时放大或缩小一个倍数, 是光学设计时常用的基本手段。“缩放”可以用人工进行, 但用光学设计 CAD 更为简捷。

(6) 用光学设计 CAD 优化初始结构。

用光学 CAD 软件对表 5-8 (a) 所示聚光镜的初始结构进行迭代优化, 得表 5-8 (b) 所示的结果。

表 5-8 (b) 三片式聚光镜结构参数

主要技术参数	结 构	参 数				
		r/mm	d/mm	n_D	D_f/mm	玻璃
$NA' = -0.6$ $L = 125.57\text{mm}$ $Y' = -1\text{mm}$		-19.19			16.33	
		-12.824	8	1.5163	24.66	K9
		-181.73	0.1		24.78	
		-26.126	8	1.5163	28.19	K9
		48.86	0.1		28.21	
		-72.271	8	1.5163	27.16	K9
		∞	0.01		27.16	

综上所述, 聚光镜的设计步骤如下:

- ① 根据物镜和聚光镜的拉氏不变量绝对值相等来确定聚光镜所负担的偏角;
- ② 根据聚光镜所负担的总偏角来确定片数;

- ③ 根据透镜球差最小来确定曲率半径;
- ④ 根据物镜渐晕系数来确定聚光镜各镜片的通光口径;
- ⑤ 优化初始结构。

§ 5.4.5 照明系统设计中的几个问题

照明系统看起来简单, 常为光学设计人员所忽视, 以致在实际系统中由于照明不合理而不能发挥仪器的潜力, 甚至报废的例子是不少的。光学系统中拉氏不变量一定及系统各部分光孔转接的原理是人所共知的, 可是照明系统设计容易产生光阑位置安排不当、光线遮拦造成渐晕、或实际数值孔径不足、光能利用率不高等问题, 值得我们充分注意。

1. 发热

大多数光源在发光的同时, 放射大量红外线, 发热升温。使精密测量仪器结构变形, 降低精度。如果光源附近有容易变形甚至燃烧的物质, 那就更为危险。减少发热影响的措施有:

① 光源安排在仪器外部或上部, 有利于散热。这必然导致光路的加长, 应该设计合理的照明系统充分利用光能, 或用光学纤维导光。

② 采用散热装置 (如灯箱外散热片), 或者安装风扇或循环水冷装置。

③ 光学元件散热。最常用的有隔热玻璃和冷反光镜 (见图 5-30)。隔热玻璃的作用是防止热量的直接幅射, 它本身又能吸一部分热。冷反光镜表面镀多层介质膜, 反射可见光供照明, 透射红外线散去热量。

2. 照明均匀性

照明不均匀的主要现象是全视场亮度不均 (中心或边缘带亮环或暗带) 或带彩色, 有时甚至有灯丝或镜筒内部另件的成像影子。原则上应该使光源通过照明系统成像尽量远离物面, 以求照明均匀 (当然可以采取柯勒照明系统), 但是实际影响的因素还有很多:

① 保证全部物面照明孔径角一致。如图 5-31 (a) 所示, 灯丝 AB 经聚光镜成像于 $A'B'$ 物镜入瞳处, 灯丝边缘 A 点发出的光束限制在光锥 MNA' 内, 灯丝 B 发出光束在光锥 MNB' 内; 只有在两个光锥的公共部分 MNP 空间内的物体能够得到全部灯丝的照明。如图 5-31 (b) 所示, MNP 光锥外一物点 D 只能得到灯丝 BC 段的照明, AC 段灯丝发光不能到达 D 点, 结果 D 点照明实际孔径角减小了, 而光轴上 P 点仍能接受全部灯丝的照明, 这样就出现了物面中间亮而四周暗的现象。

② 像差校正状态。普通聚光镜不校正色差, 射出的光束有色散。如果光源是钨丝灯发出白光, 那么透过聚光镜中部的光束有各种色光混合, 仍为白光, 但边缘光束带明显的彩色边, 如图 5-32 所示, 视场边缘 E 点附近只有蓝绿光进入物镜入瞳。改进的办法是适当增加聚光镜口径, 保证整个物面各种色光均能射入物镜。

由于聚光镜球差校正不良, 特别是在孔径角 u 较小的条件下, 光源像的焦深范围很长 (见图 5-33)。若物体放在这个区域内, 则视场内可看到灯丝影子, 亮暗不匀。

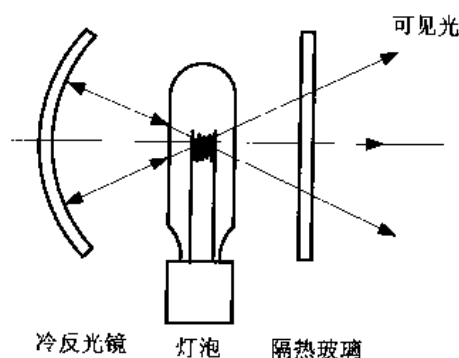


图 5-30 减少发热影响的措施

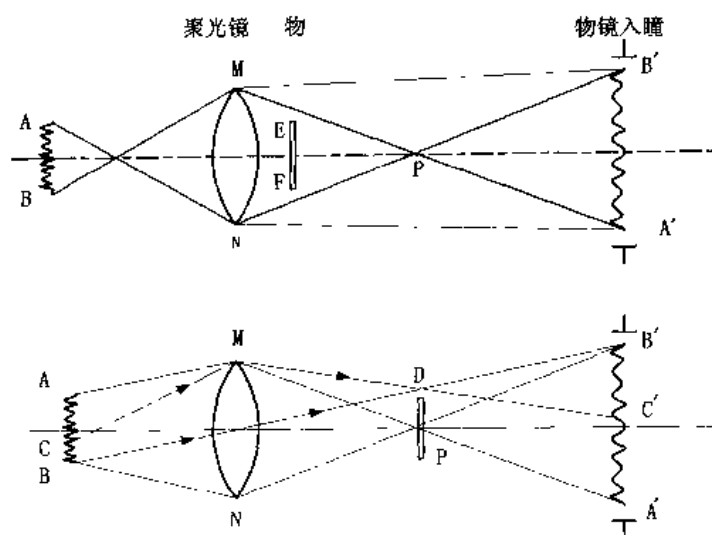


图 5-31 保证物面照明孔径角一致

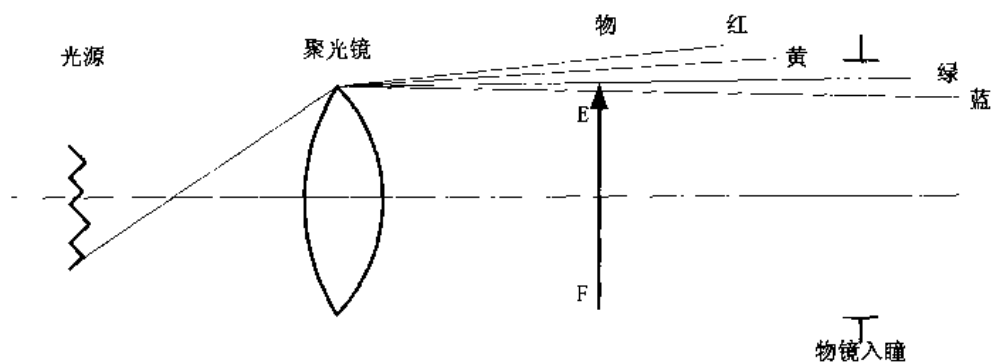


图 5-32 保证色光进入物镜

③ 多次反射像和杂光。光束在透镜表面或镜筒内壁的多次漫无边际反射杂光，容易破坏照明的均匀性。图 5-34 是一个单色光照明系统。聚光镜后放单色干涉滤光片，透过率低，有大量光线从滤光片背面和透镜内表面反射，又将灯丝成像于 E，相当于附加的小光源，使物面中央有一亮斑。

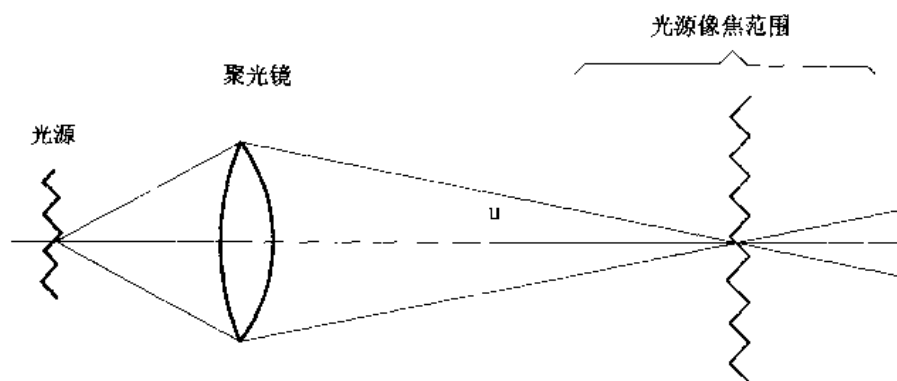


图 5-33 光源像焦深

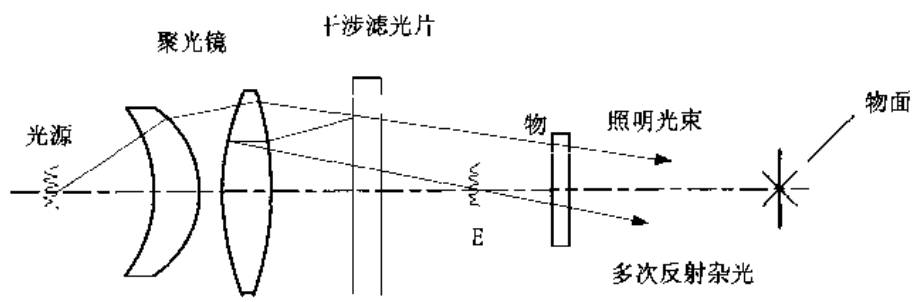


图 5-34 单色光照明系统

3. 照明光束相干性

前面讨论显微镜分辨率时，把物体上每一点都看成独立的发光体，各点发出光波是不相干的，像面上各自产生的衍射图形只是简单的光强叠加。普通大面积灯丝的白炽灯照明显微观察就是这种情况。假如物体为平行而且相干的光束所照射。即用聚光镜前焦面上点光源发出光束照射物体，则物体各点发出衍射光波将是完全相干的。前一种照明称为“非相干照明”；后者称为“相干照明”，相干照明光束在物面上的孔径角 $u_{\text{聚}}$ 趋近于 0。见图 5-35。

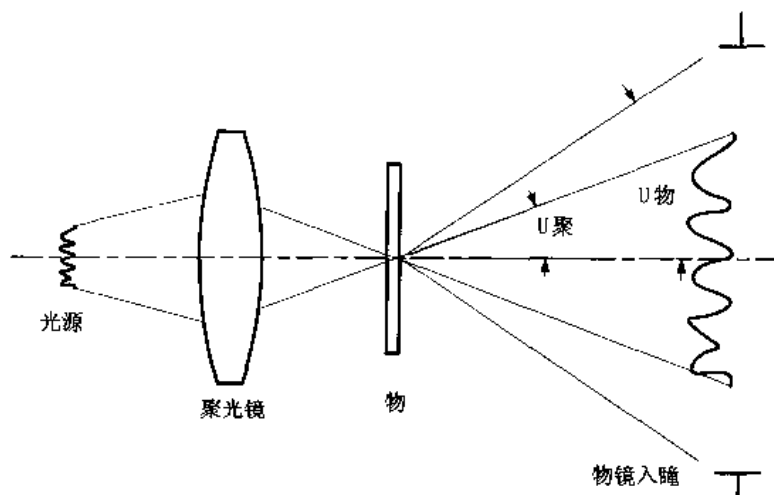


图 5-35 相干照明光束

设物镜的数值孔径为 $n \cdot \sin u_{\text{物}}$ ，聚光照明光束在物面上的数值孔径 $n \cdot \sin u_{\text{聚}}$ 。为把这两个数值孔径之比称为照明的“相干度”(σ)，则

$$\sigma = n \sin u_{\text{聚}} / (n \sin u_{\text{物}}) \quad (5-20)$$

式 (5-20) 反映照明光束相干能力的大小。 σ 接近 0 称为相干照明； $\sigma \geq 1$ 称为非相干照明（见图 5-36）。

我们历来要求光源成像应充满物镜入瞳，这是从几何光学的观点出发，充分利用光能和物镜口径所得出的结论。但是，即使光源缩小，物镜入瞳大是不是不起作用呢？事实并非如此。试考察物体照明成像过程中，必然有光的衍射。为了方便起见，以黑白等间隔的光栅作为物体，照明光束经过它就发生衍射，光源像就分成 0 级像以及对称分布的 1 级像、2 级像、3 级像等。0 级像光束只在像面上形成均匀的光强，看不到条纹。1 级衍射光束通过物镜入瞳才能在像面上形成黑白相间的条纹（它的亮度分布是按正弦规律变化的），2 级以上的高级衍射光束照在像面上的亮暗变化更为细密，它通过物镜愈多，像面上条纹边缘

更加清晰。

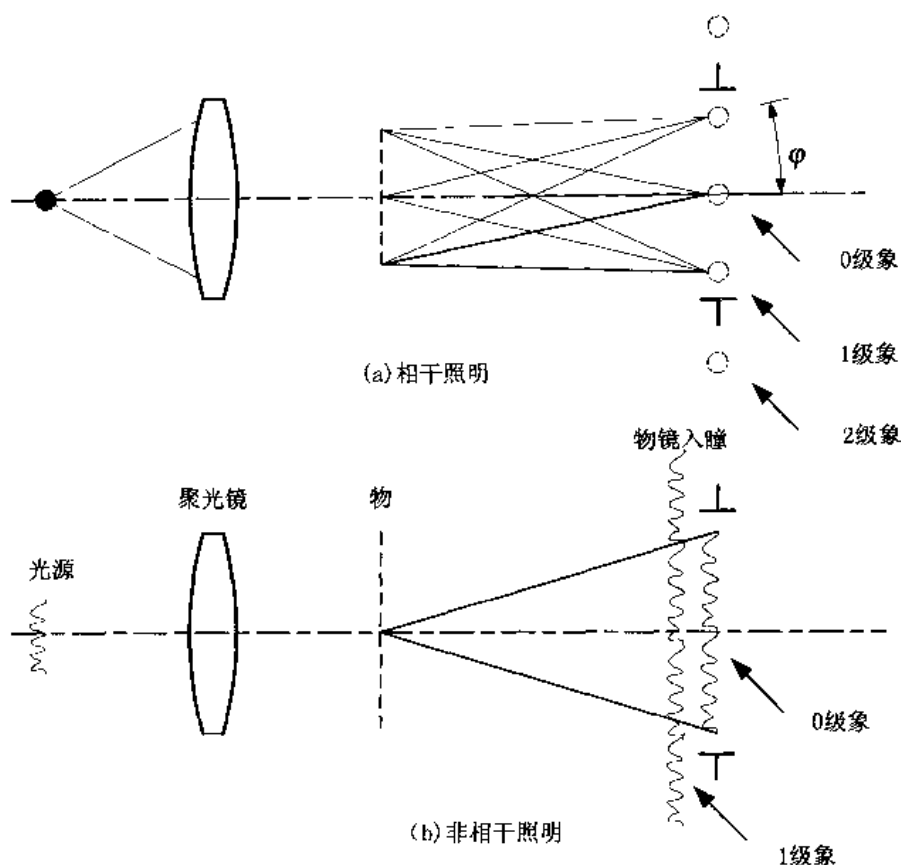


图 5-36 相干照明与非相干照

我们试用相干照明和非相干照明两种方式（参见图 5-36），以不同粗细（光栅间隔）的光栅做物体，研究像面上条纹对比的大小。在相干照明条件下，对于较粗的光栅成像对比很好，光栅细密到一定程度（如 500 线/mm），一级衍射角 φ 不断增加，以致不能射入物镜入瞳像面上条纹消失（即对比等于 0），就是光学系统不能分辨了。以光栅的每毫米条数为横坐标，对比为纵坐标，画出曲线如图 5-37（a）所示。非相干照明就是用大面积光源照明，照明光束经过光栅同样产生光源的 0 级像、1 级衍射像、2 级衍射像等。可是这时物面上每一点由灯丝各部分照明，即使光栅细密到相干照明已不能分辨的程度，仍有一半灯丝发出的光束进入物镜入瞳，直到全部灯丝像完全不能通过入瞳为止。光栅成像的对比是逐渐降低的，见图 5-37（b）。部分相干照明的对比特性介乎两者之间，见图 5-37（c）。如果用单边刀口当物体，则成像边缘的光强分布见图 5-38。部分相干照明刀口成像对比优于非相干照明，已为精密制版照相部门所采用。

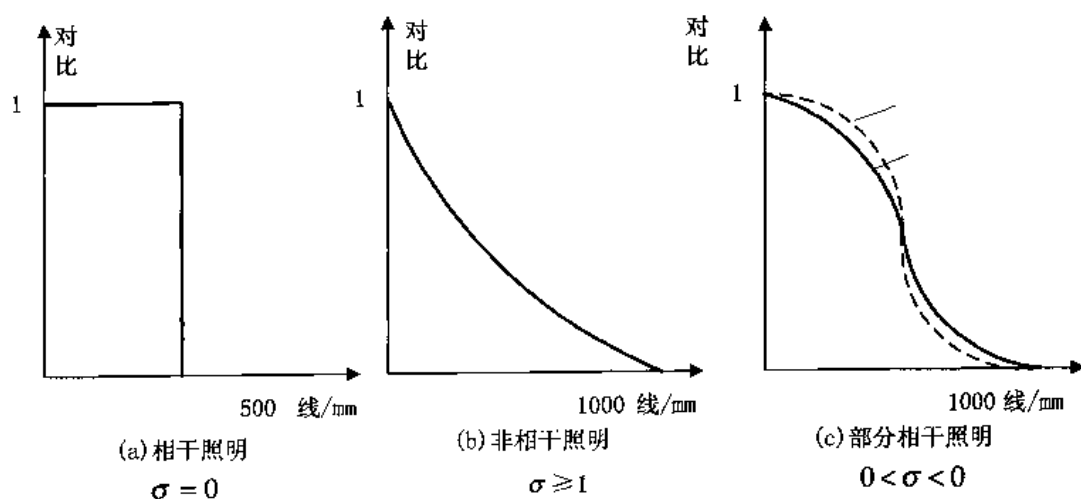


图 5-37 各种照明的成像对比特性

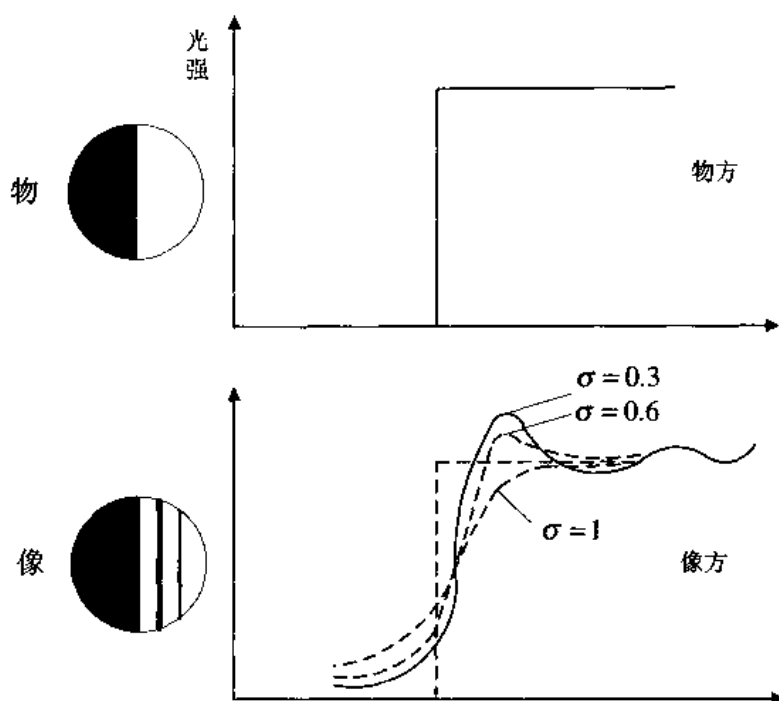


图 5-38 刀口（单边）成像的光强分布

§5.5 特殊照明系统设计

本节主要讨论两种特殊的照明光学系统——光导纤维束落射内照明系统和不散瞳广角眼底观测仪照明系统的设计。

§ 5.5.1 光导纤维束落射内照明系统设计

1. 概述

由光学纤维组成的照明纤维束能用于传递光通量很大的光，有较好的柔韧性、稳定性和较高的透射率，还有一个突出优点是光源灯泡本身的热量和红外线不能通过它到达被照

面。因此，它广泛地应用于需要“冷光”照明的医用光学仪器之中。

20 世纪 80 年代出现的微循环显微镜，是一种用于观测人体甲皱、眼球结膜、舌、唇等部位的微血管循环的仪器，利用微循环病理生理变化进行疾病诊断、病情监测和疗效判断。它要求被检测部位在连续照射半小时的情况下，温升不超过 1°C ，所以该类仪器均采用冷光源加光导纤维束照明系统。

笔者在梧州光学仪器厂工作时作为主要研究人员研制出具有国内先进水平的 WZD-1 型微循环显微镜（1987 年 12 月通过机械部、广西科委、经委鉴定），该成果曾获国家技术开发优秀成果奖、广西科技进步奖等多项国家、省部级奖励。光导纤维束落射内照明系统为该成果的主要创新点之一，属国内外首创。该系统优于光导纤维束倾斜外照明，尤其对于深部位的微血管循环的观测更是如此。

2. 光路原理

当被观测的物体为不透明体时应采用落射光照明。对于活体的微循环观测，为防止热量影响被照面，必须采用能发出含热射线很少的冷光源通过光导纤维束传输的落射照明。一般办法采用光导纤维束从旁边倾斜直接照射，这具有结构简单的突出优点，但对于深层次部位的微血管观测效果不够理想，从而促使我们对照明系统进行创新，设计出独特的落射内照明系统，其光路原理见图 5-39。图中分支光纤集光镜置于光纤出射光焦面上，形成一束平行光，平行光经环形聚光镜聚于焦面上，照亮成像物面，物体的散射光经物镜成像。可见落射内照明光路与成像主光路同轴，属于临界照明类型。它特别适于较深部位的微循

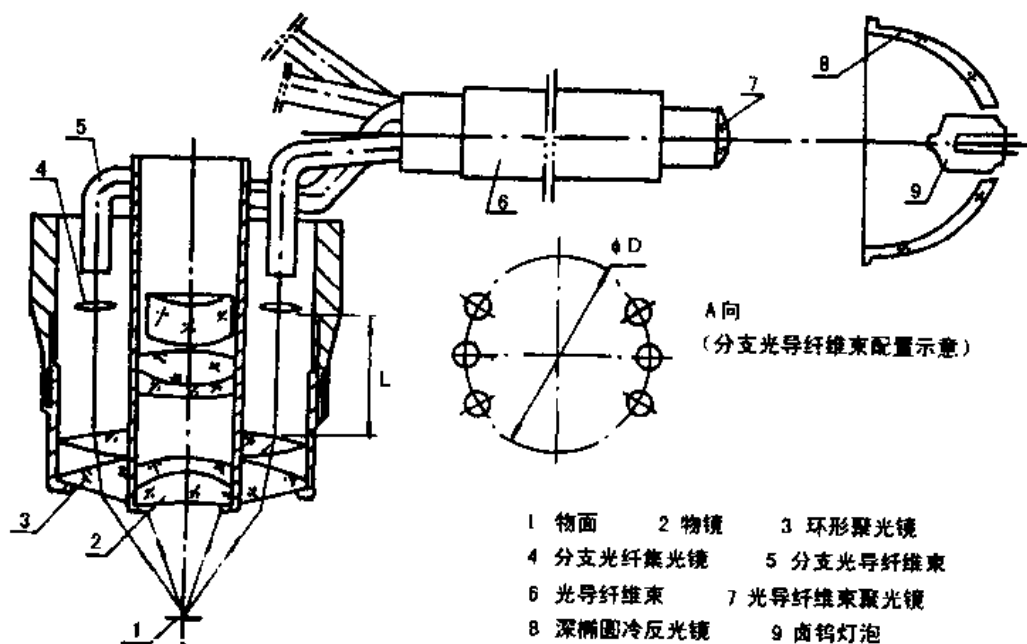


图 5-39 光纤落射内照明系统光路原理图

环观测，丰富了物镜视场的信息量，提高了图像的清晰度，取得较为满意的综合观测效果。

设计该照明系统时应注意两点：首先，物镜的工作距离约等于环形聚光镜焦距，其次，使照明光斑与物镜物方视场相适应，一般应略大于或等于物方物镜视场。值得指出，图中平行光程 L ，给照明系统与显微主光路的配合及结构设计带来很大的方便。

3. 环形聚光镜的设计

(1) 结构设计。环形聚光镜可根据物镜工作距离长短设计成单片、双片、三片式，其结构如图 5-40 所示。其设计与普通光源聚光镜相仿，但要注意透镜每一面的偏转角不要超过 10° 。通过这样的限制能达到控制聚光镜的球差和保证照明均匀的要求。

(2) 充分考虑“焦移”特性，使光强最大点与物镜工作距离重合。

由于物镜处于照明系统中心部位，所以聚光镜必须制成环形，这是本系统特色所在，也给设计带来新的矛盾：即光束经过环形透镜将引起“焦移”现象。所谓焦移是指光束经过环形透镜聚焦时，其光强最大点（最佳聚焦量）不在几何焦点上，而是处于透镜与几何焦点之间。假设环形透镜内径为 b ，外径为 a ，焦距 f' ，那么环形透镜的栏截比 $\beta = b/a$ ，环形透镜的非涅尔数 $Na = \alpha^2/\lambda f$ 。理论计算结果表明，当 β 和 α ($\alpha = \omega^2/\omega^2$ 为光束的栏截系数， ω 为光束的半径) 一定时，透镜的非涅尔数愈小，焦移愈大，即最佳聚焦点愈偏离几何焦点；焦移还与光束的栏截系数有关， β 愈大，焦移愈大。

偏 转 角 $U \angle U'$	结 构
$< 20^\circ$	
$20^\circ \sim 35^\circ$	
$35^\circ \sim 50^\circ$	

图 5-40 环形聚光镜的结构

为了防止理论计算的光强最大点与物镜工作距离不是很好地重合，设计时使环形聚光镜与物镜照明本体用细牙螺纹联结，从而可以微调两者的重合度。

3. 提高光传输效率的若干措施

(1) 光耦合设计。使光导纤维束与透镜很好地进行光耦合是提高光传输效率的关键。这可从两方面予以改善。首先，一般光导纤维束的端面为平面，若入射端面改为凸面可提高光导束的饱和度，因为在端面保证了截面均匀满照射，为此可在光导束端面上贴上一平凸小透镜来解决；其次是在出射端面加一小集光镜，使出射光的散射角减小或变成平行光。要强调指出的是，应尽量减少光耦合次数，最好一条光纤通到底，因为每耦合一次，光能的损失就增加许多。

(2) 分支光纤束的配置。分支光纤束一般以 4~6 头为宜。如图 5-39 所示，分支光纤束的分布图直径 D 尽量取小值（此值受物镜结构的限制）。分布方式有均布、单侧和双侧三种。据我们实践，双侧较为理想，这样照度高，衬度好。

(3) 光导纤维束的选择。应选择透射率高的光导纤维束，且长度尽量短，因为输出光

强随光导纤维束长度的增加而衰减。再者还要注意用途的多样性,如光源使用的是汞灯,为很好地传输紫外光,光导束必须由能透过紫外光谱区域的玻璃制成。

综上所述,与显微物镜光轴同轴的光导纤维束落射内照明系统的设计应充分考虑环形聚光镜的焦移特性,使光强最大点与物镜工作距离重合,照明光斑一般应略大于或等于物镜视场,可以通过提高光导纤维束与透镜间的光耦合质量,恰当地配置分支光纤束和优选光导纤维束三个途径来提高光传输效率。实践证明,落射内照明系统能较好地提高光源利用率,使成像物面得到均匀的“冷光”照明,尤其适合于深部位的照明,是一种特殊的具有一定应用前景的新的光导纤维束传输照明系统。

§5.5.2 不散瞳广角眼底观测仪照明系统设计

笔者受企业委托设计了不散瞳广角眼底观测仪,对于眼底观测来说,照明系统是一个重要的组成部分,应针对该仪器的特殊要求设计出具有特色的照明系统,其设计质量的好坏是仪器成败关键之一。

1. 眼底观测仪器概述

眼底视网膜血管网络是人体惟一能直接观察到的小动脉、小静脉血管网络,它可以直接反映冠心病、高血压、脑溢血和动脉硬化等疾病。因此,眼底病不仅仅是眼病并且是全身多种疾病早期诊断的主要依据。眼底饱含着微血管,与脑及全身病变密切相关,所以又是微循环研究的一个十分重要的部位,眼底图谱更是研究、诊断的重要资料。

眼底观测光学仪器主要有:(直接、间接)检眼镜,(手持式、台式)眼底相机,以及近年来出现的眼底电视。眼底电视可动态地观测眼底显微图像,可用计算机对眼底图像进行处理,大大提高了眼底相机科技含量并扩大其使用范围。

2. 眼底相机类仪器光学原理

眼底照相机是德国 Zeiss 厂于 1925 年在检眼镜的基础上发明的。Zeiss 厂产品有两个突出的特色:

- (1) Zeiss 产品把人眼的特性作为仪器光学系统的一部分来考虑;
- (2) 创造了适合于眼底观察的“共轴式照明”光学系统。

基于上述两点,目前几乎所有光学眼底观测仪器的光学系统都沿用 Zeiss 这一模式。

眼底暗、不发光,而眼角膜反射光却相对强烈,常常能干扰对眼底的观察。为此,眼底仪器必须具有一个能用较强的光照亮眼底的照明系统和一个能避开眼前部的强烈反光影响的成像系统。共轴照明使照明系统与照相系统同轴,是一个能较好地实现两者功能的结构。眼底观测仪器原理如图 5-41 所示。

眼底仪器由照明、观察瞄准、成像探测(照相底片或 CCD 光靶)三个基本部分组成。照相系统将光源的光引入眼底,照亮眼底;观察瞄准系统用于寻找、观察病变区;成像探测系统将眼底显微图像在屏幕上显示或摄录成资料保存。

3. 不散瞳眼底观测照明系统设计

(1) 共轴照明光学系统。

由图 5-41 可见,本设计大方向仍然采用传统的共轴照明。中空反射镜把照明系统的光束反射投于网膜物镜 L_1 的边缘部分,在眼瞳上形成 $\Phi 8$ (外径) $\times \Phi 4$ (内径) 的环形照

明光束（光阑像），从而照亮眼底；成像光束从被照亮的眼底通过瞳孔 $\Phi 4$ 部分，由网膜物镜成一次像，成像光束通过反射镜的中间孔，经成像物镜成像于 CCD 靶上，这样既实现共轴照明，又使眼角膜反射光和成像光分离。

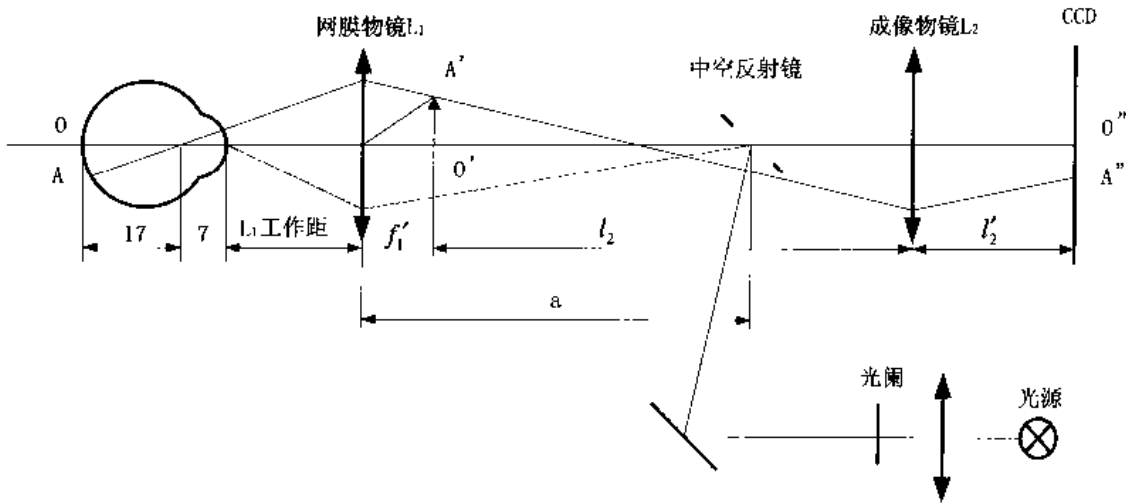


图 5-41 眼底观测仪光路图

(2) 不散瞳眼底观测仪照明系统的设计特色。

不散瞳眼底观测仪对照明系统的设计要求：①均匀的暗光照明；②具有独立的对焦功能。达到上述两点要求的对策是：①在照明系统中耦合一个目视观察系统，这样势必使照明系统复杂化，如加入胶合面校正色差等，否则像差校正达不到目视系统的要求；②在灯泡附近使用毛玻璃以形成一个漫反射的光源面。该照明系统光路见图 5-42。

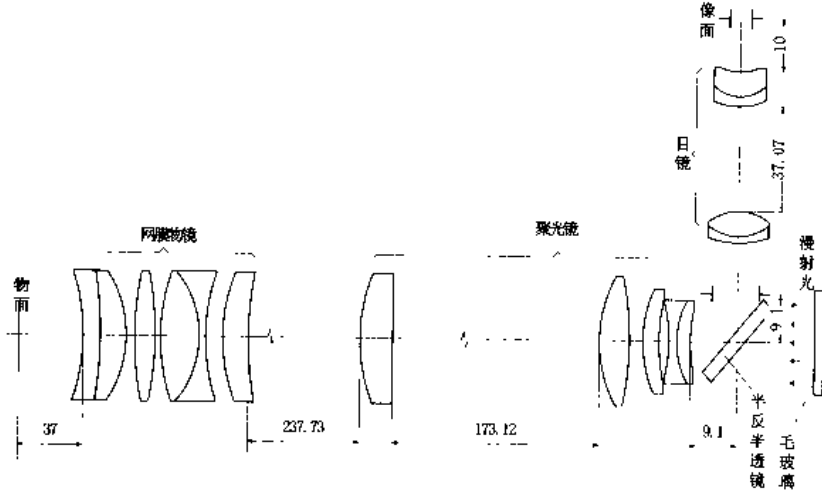


图 5-42 眼底观测仪照明系统光路图

第6章 变焦距（变倍）光学系统设计

变焦距系统（Zoom System）是指焦距在一定范围内连续改变而像面位置保持不变的光学系统。改变焦距的目的在于连续改变系统的放大率，像面景物的大小连续可变，使观众产生由近及远或由远及近的感觉。在照相光学系统中，把能在一定范围内改变系统焦距的物镜称为变焦距照相物镜。而在显微光学系统中，体视显微镜是最典型的具有变倍光学装置的显微镜。早期的体视显微镜是多挡变倍，后来发展为连续变倍。目前，日本 Nikon 公司生产的 SMZ1500 型连续变焦体视显微镜，在 0.75~11.25 的倍率范围内实现了 15:1 世界最高的变焦比。此外，在一些研究型显微镜采用的无限远像距光学系统中，使用了连续变倍的辅助物镜；有些厂家还生产变倍显微目镜，以扩大目镜的应用范围。军事上应用最多的变倍光学系统是连续变倍枪瞄镜。变焦距的摄像机更广泛应用于新闻采访、电视转播和影片摄制的场合。

§ 6.1 变焦距（变倍）光学系统原理

变焦距物镜是利用系统中两个或两个以上透镜组的移动，改变系统的组合焦距，而同时保持最后的像面位置不变，使系统在变焦过程中获得连续清晰的像。变焦距物镜的最大焦距 f'_{\max} 和最小焦距 f'_{\min} 之比称为镜头的变焦比，即 $M = f'_{\max} / f'_{\min}$ 。因为焦距变化引起倍率的变化，所以变焦比又称为变倍比。

变焦距或变倍率的方法常基于成像的一个基本性质——物像交换原则。透镜在相隔一定距离的两个平面 A 和 A' 之间，有两个位置可使该两平面互为物像关系，如图 6-1 所示。

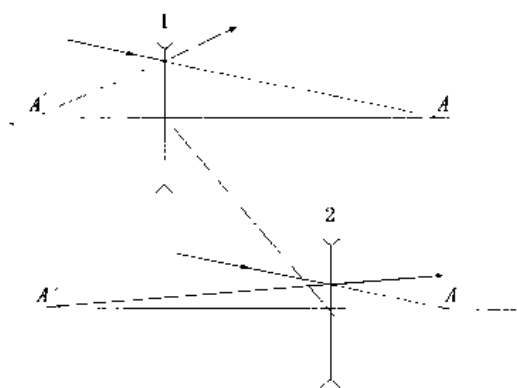


图 6-1 互为物像关系分析

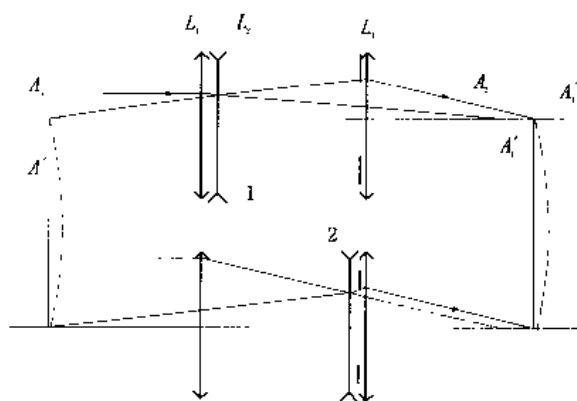


图 6-2 变焦物镜最短焦与最长焦位置

其放大倍率分别为 β 和 $1/\beta$ 。即当一个位置成缩小像时，另一个位置成放大像。而当透镜自位置 1 移到位置 2 时，放大率就在 β 和 $1/\beta$ 之间连续变化。所以，该透镜称为变倍组或变焦组，用 L_2 表示。如果在位置 1 之前加一前固定组 L_1 ，使被摄目标成像于变倍组的物平面上， A'_1 作为变倍组的虚物被变倍组成一虚像于 A'_2 。再在变倍组位置 2 之后加一后固定组 L_3 ，它使虚像 A'_2 最后成为实像 A'_3 ，如图 6-2 所示。这样就组成了一个变焦距物镜。在图 6-2 中，上面所画是最短焦距情况，下面所画的是最长焦距情况。当孔径光阑置于后固定组前面位置时，在变焦过程中能够保持相对孔径不变，上述第二个要求可以满足。但是，第一个要求不

能满足，因为只有当倍率互为倒数的两个位置上才具有共同的像面，其他倍率时，像面位置要变化。图 6-2 中左边的虚曲线和右边的实曲线就是经变倍组合和经后固定组后的像面位置变化曲线，像面位置是变化的，这是不允许的。所以，必须采取措施来补偿像面位置变化。现有的补偿方法有光学补偿和机械补偿两种。

§ 6.2 变焦距物镜

变焦距摄影物镜是目前广泛用于艺术、新闻拍照、电影摄影、电视摄录的摄像镜头。因为这种物镜能在一定范围内迅速改变系统的焦距，使用它时能把物像之间的倍率连续变化变成屏幕像，并且伴随景物大小连续改变，产生定焦距镜头无法达到的良好的视觉效果。因此，近十多年来变焦距物镜发展迅速，除变焦距摄影物镜摄像物镜应用广泛外，望远镜中的望远物镜或目镜也开始采用连续变焦形式，以获得大视场搜索目标，小视场仔细观察目标的效果。

1. 变焦距物镜的基本要求

变焦距物镜需要满足三个基本要求：

- (1) 在变焦过程中，像面位置保持不变；
- (2) 在变焦过程中，相对孔径一般保持不变；
- (3) 各焦距位置均具有满足要求的成像质量。

2. 变焦距摄影物镜的分类

变焦距物镜通常都是按系统中变焦透镜组（即系统中的可移动透镜组）的个数，以及正透镜组和负透镜组的配置位置进行分类的。主要有负-负型、负-正型和正-负-正型 3 种类型。

(1) 负-负型。这种类型变焦距物镜的变焦透镜是由两个负透镜组构成的，如图 6-3 中打有斜线的透镜组 φ_2 、 φ_3 所示。景物通过前面的固定透镜组（以后简称前固定组） φ_1 成像于 A'_1 ，成为变焦透镜组 φ_2 的虚物，经 φ_2 以后成像于 A'_2 ，再经过另一变焦透镜组 φ_3 成像于 A'_3 ，最后由后固定组 φ_4 成像于最后像面 F' 。在一个组合系统中，如果第一个透镜组的焦距为 f'_1 ，后面各个透镜组的垂轴放大率分别为 β_2 、 β_3 ， \dots ， β_n ，则该系统的焦距 f' 为：

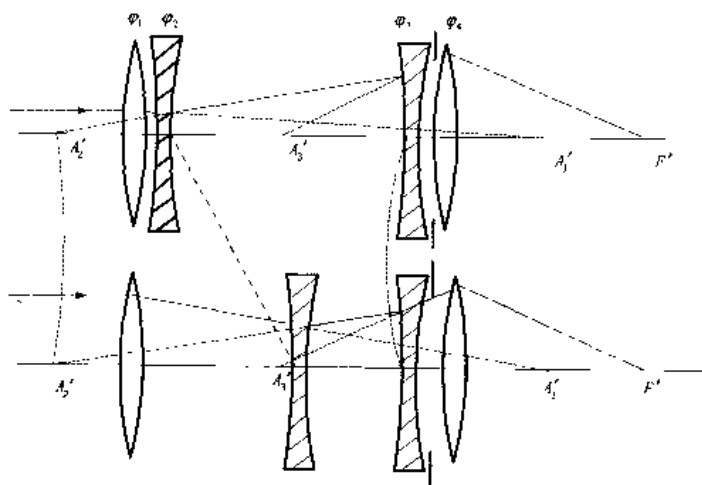


图 6-3 负-负型变焦系统

$$f' = f'_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \dots \beta_n \quad (6-1)$$

对上面所说的系统, 有

$$f' = f'_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$$

由于变焦透镜组 φ_2 、 φ_3 的移动, 使 β_2 、 β_3 发生改变, 同时保持像点 A'_3 位置不变, 系统的组合焦距 f' 改变, 而最后像点 F' 位置不变。图 6-3 上部表示焦距 f' 最短时的变焦透镜组位置。下部表示达到长焦距位置。在这类系统中, 焦距的改变主要是由 β_2 的变化造成的, 而 φ_3 的移动主要是用来补偿像点 A'_3 的移动。因此把 φ_2 称做“变倍组”, 而把 φ_3 称做“补偿组”。为了在变焦过程中保持最后像空间的相对孔径不变, 一般把系统的孔径光阑放在变焦透镜组的后面。

(2) 负-正型。这种类型的变焦透镜由一个负透镜组和一个正透镜组构成。与图 6-3 不同的是, φ_3 组改为正透镜, 在变焦中 φ_2 、 φ_3 都起变倍作用, 很难分清谁是变倍组, 谁是补偿组。由于景物经前固定和变焦部分后都成实像, 所以这种结构可以不加入后固定组。

(3) 正-负-正型。这类变焦系统的变焦透镜组共有三个, 两个正透镜组和一个负透镜组, 它们的位置排列如图 6-4 所示。图的上部为短焦距位置, 下部为长焦距位置。这三个透镜组可各自分别按一定规律移动, 以达到最大限度的变焦效果。

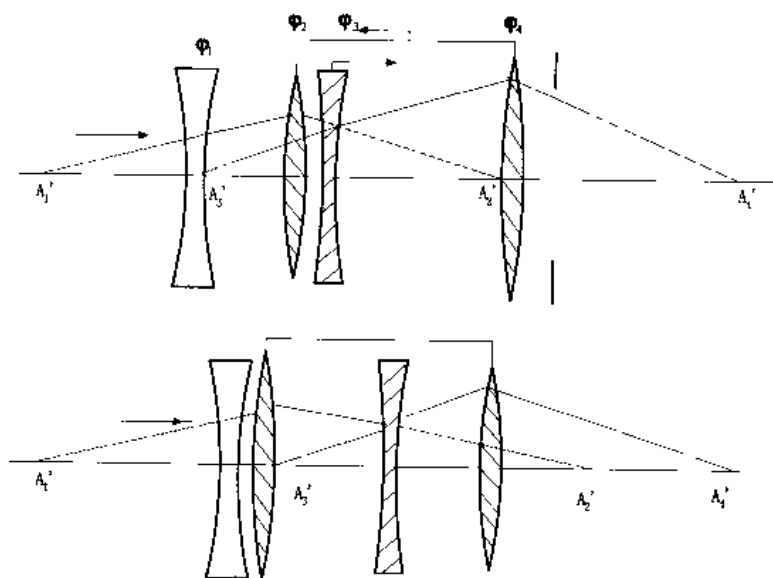


图 6-4 正-负-正变焦透镜

§ 6.3 连续变倍显微光学系统设计

§ 6.3.1 连续变倍显微光学系统的类型

连续变倍光学系统可作为一个独立的光学部件, 如上述的变焦距摄影物镜。然而当它应用于显微系统时, 往往总是组合于系统中与目镜或物镜耦合起来, 具有连续变倍物镜或连续变倍目镜的功能。图 6-5 所示是常用的几种类型。归纳起来为连续变倍物镜系统和连续变倍目镜系统。

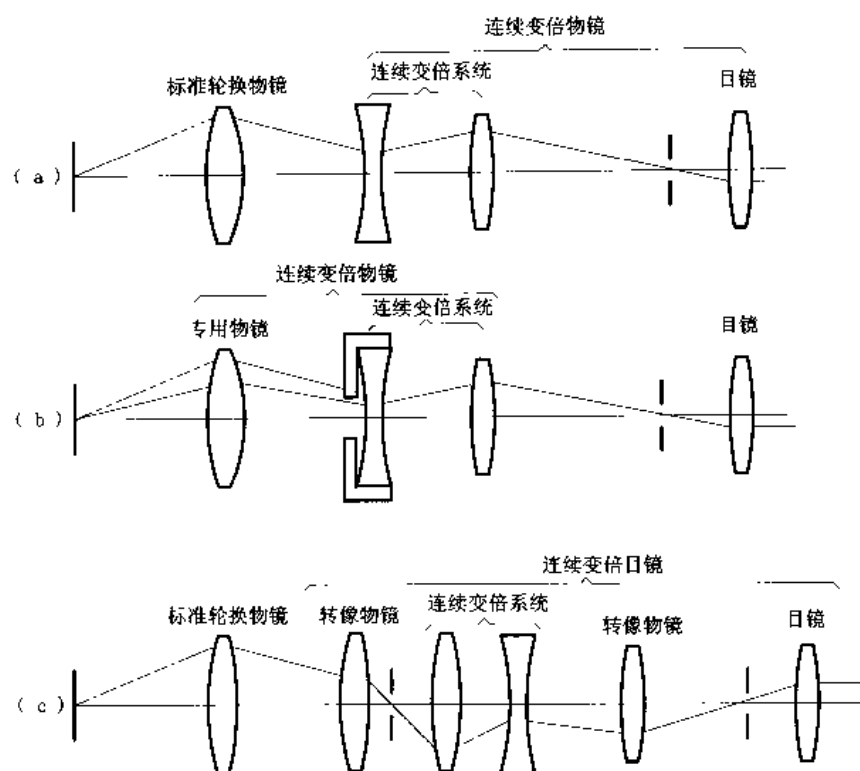


图 6-5 显微镜连续变倍系统

图 6-5 (a) 代表连续变倍显微镜的一种型式。这种型式在低倍时，变倍系统的第一个透镜移向物镜，而高倍时远离透镜。物镜的有效数值孔径随着放大率的变化而线性地或几乎线性地变化。光阑就安放在连续变倍系统的一个透镜组上。在高倍时，正好全部地利用了数值孔径。在低倍时，变倍系统的第一透镜组移向物镜，通过物镜的边缘光线便不能进入变倍组，使数值孔径变小。这种系统的物镜需要专门的设计，其像差应与连续变倍系统的像差平衡。

图 6-5 (b) 是一种简单的连续变倍显微镜，其变倍系统的第一组也作为物镜应用，其上也附带一个移动光阑以控制有效数值孔径。

图 6-5 (c) 是一种连续变倍目镜显微镜，这种连续变倍系统用于大型研究显微镜和金相显微镜中。用了这种结构使物镜和目镜间的距离大大加长，以利于操作（如更换分划板，更换显微摄影胶卷）和增加一些内部附件（如相衬板，高倍体视镜等）。由于本系统在物镜和目镜焦面间构成了一个中间像，因此最后由目镜看到的是与标本一致的正像。而在图 6-5 (a)、图 6-5 (b) 中所示的两种显微镜均构成倒像，如果将这两种系统用于体视显微镜则需外加棱镜倒像系统或透镜倒像系统。

§ 6.3.2 典型的连续变倍显微镜

图 6-6 表示了六种典型的连续变倍显微镜。

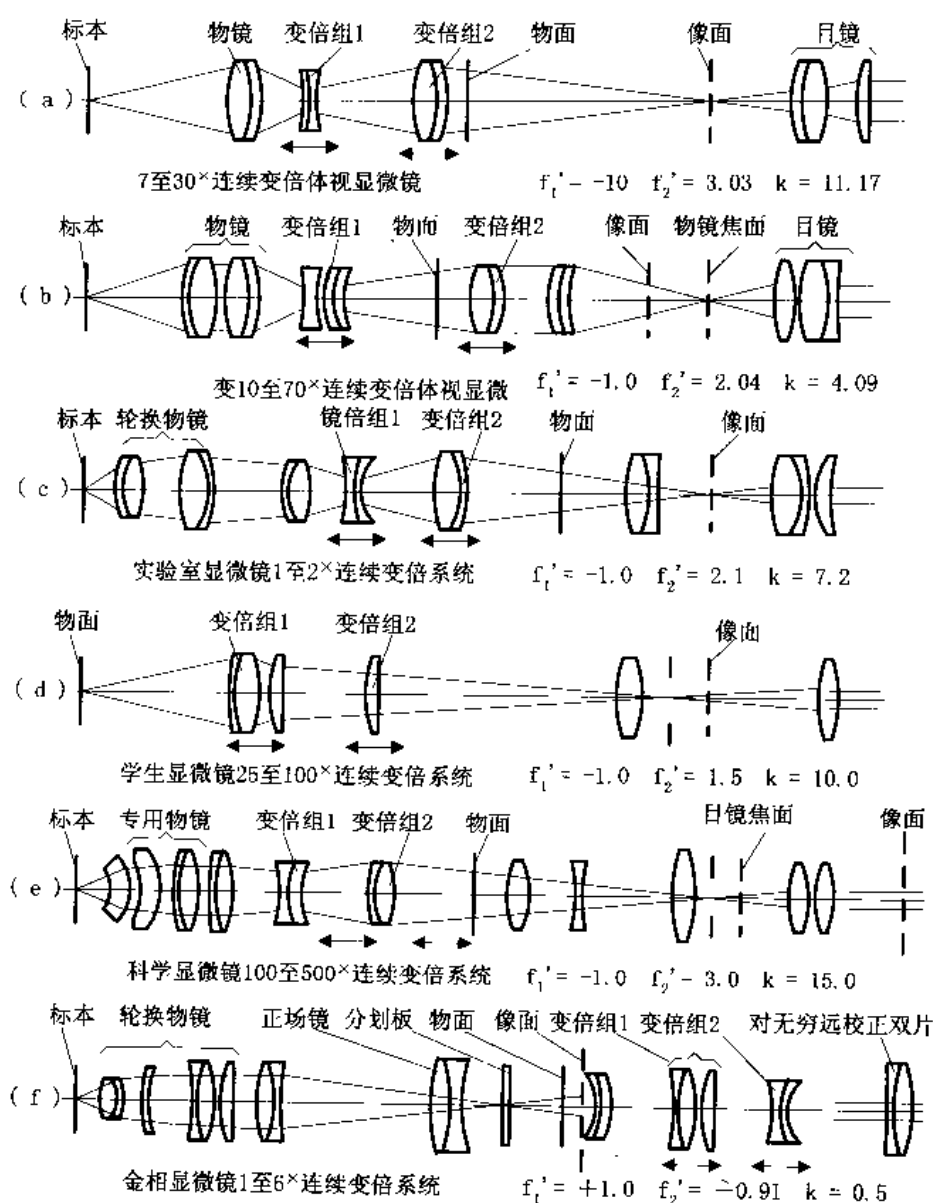


图 6-6 一些已商品化的连续变倍显微镜

在图 6-6 中所标注的“物面”和“像面”均系对连续变倍系统的运动透镜而言，并不是对整个系统而言的。 K 表示连续变倍系统的物面和像面之间的距离。

图 6-6 所列的所有系统都是两组元机械补偿连续变倍系统。其中 (a)、(b)、(c) 使用的是专用物镜。这些系统的数值孔径随倍率的连续变化而变化，属于连续变倍物镜系统。(e)、(f) 与标准物镜连用，数值孔径在整个变倍系统中保持固定，为连续变倍目镜系统。(d) 的物镜本身是连续变倍系统，数值孔径随倍率改变而改变。

在有的系统中应用了场镜和转像透镜，其目的是为了控制视场大小以及出瞳位置。在体视显微镜中所用的棱镜正像系统未画出。图 6-6 (f) 最后的望远系统亦未画出。

连续变倍系统最初是用于体视显微镜。表 6-1 列出从第一台连续变倍显微镜问世以来，世界上几个厂家生产的带连续变倍系统的体视显微镜。这些显微镜都是机械补偿系统。连续变倍范围最高为 7:1，最高数值孔径为 0.01。这个数值基本可视为当时世界先进水平。星移斗转，到了 20 世纪 90 年代和跨入 21 世纪，不少企业把无限远像距光学系统、平行光路等

新技术应用于连续变倍体视显微镜之中，使其性能与质量有了很大的提高。出现了像日本尼康（Nikon）SMZ1500 型和日本奥林巴斯（OLYMPUS）SZX12 型的杰出代表，他们的产品代表了当今连续变倍体视显微镜的世界最高水平。值得指出的是国内的厂家虽与国外水平有一定差距，但也有长足的进步。

表 6-1 国外厂家早期及目前生产的体视显微镜

生产年代	生产厂及国家	连续变倍范围	最大数值孔径	备 注
1959	Bausch & Lomb, 美国	4:1	0.06	
1962	Nikon, 日本	5:1	0.07	
1962	OLYMPUS, 日本	4:1	0.06	
1968	Zeiss, 德国	7:1	0.06	
1968	Bausch & Lomb, 美国	6:1		
20 世纪 90 年代~现在	OLYMPUS, 日本	12.86:1 ($0.7\times\sim 9\times$)	0.275	SZX12, ∞ 像距
	Nikon, 日本	15:1 ($0.75\times\sim 25\times$)		SMZ1500, 平行光路
	北京泰克公司	8:1 ($0.62\times\sim 5\times$)		SM8 平行光路
	桂林光学仪器厂, 中国	8.3:1 ($0.6\times\sim 5\times$)		XPZ803, 平行光路
	梧州光学仪器厂, 中国	6.5:1 ($0.7\times\sim 4.5\times$)		XTL-2000、3000
	麦克奥迪(Motic), 中国	5.2:1		K-700L 平行光路

还有一点要说明的，即表 6-1 所列的数值孔径值均为基本显微镜的，但在体视显微镜中往往同时设计一组附加大物镜，这些大物镜可以是正焦距的（加倍附加物镜），也可以是负焦距的（减倍大物镜）。其通光孔径应能同时包含基本显微镜的两个物镜。这种物镜一般都设计成消球色差的双片或三片组。当应用加倍附加大物镜时，将增加显微镜的倍率和数值孔径，但缩短了工作距。左右两对称光轴在物空间的会聚角也因之增加，加强了体视效应，使平的物体看上去好像是凸的。应用减倍附加大物镜时，效果与此相反，即使得倍率和数值孔径都降低，但加长了工作距。两个轴在物空间的会聚角减小，体视效应减小，体视效应减弱，使平的物体看上去好像是凹的，成了碟形。图 6-6 (a)、(b) 中的是体视显微镜。

尽管连续变倍系统目前最普遍地用于体视显微镜中，但其他许多类型的显微镜，如教学显微镜，实验室显微镜和金相显微镜都已逐步采用了连续变倍系统。图 6-6 (c) 是一台实验室连续变倍显微镜，使用了标准镜头，变倍时数值孔径不变，属于连续变倍目镜系统，变倍范围为 1 到 2 倍，这样选择的理由前面已经说过了。转像透镜用来缩短变倍系统负透镜组的物距以影响倍率的变化。图中所示是低倍 ($1\times$) 位置。由变倍系统第二透镜组构成的像距相当长，足以安排双目镜管附件或三目镜管附件（双目镜管和摄影镜管）。这种系统也可用于金相显微镜中。

图 6-6 (d) 的系统是一种供教学用的单管显微镜。图 6-6 (e) 是一种 NA 与倍率均较高的教学显微镜，其总倍率为 100~500，最大的 NA 为 0.55。它的光阑附加于连续变倍组的负双胶合组上。

图 6-6 (f) 是一个连续变倍金相显微镜，变倍范围为 6:1。此系统具有实的物面和虚的像面，因此需要有一个转像系统以在目镜焦面上构成一个实像，图 6-6 (f) 中在大的双胶物镜后有一个观察望远镜，没有画出。此显微镜所用镜头为标准可换镜头，变倍时数值孔径不变。实际类似于图 6-6 (d) 的系统，是一个连续变倍目镜，其倍率范围为 $5\times$ 至 $30\times$ 。

德国 Leitz 在 AXIOPLAN 万能研究用与常规应用显微镜的无限远色差校正光学系统中耦合了一种简单的连续变倍附件（见图 6-7）。它由两个运动组元构成，可以安放在物镜及双目镜管之间，且二个组元都是正焦距。组元 1 以 -1 倍的起始位置向给出较高倍率的位置移动。其像面位移由另一运动组 2 来补偿，以形成一固定的中间像。这种方法很适用于连续变倍目镜系统，其要求变倍范围较小，本例中是 1~3.23。

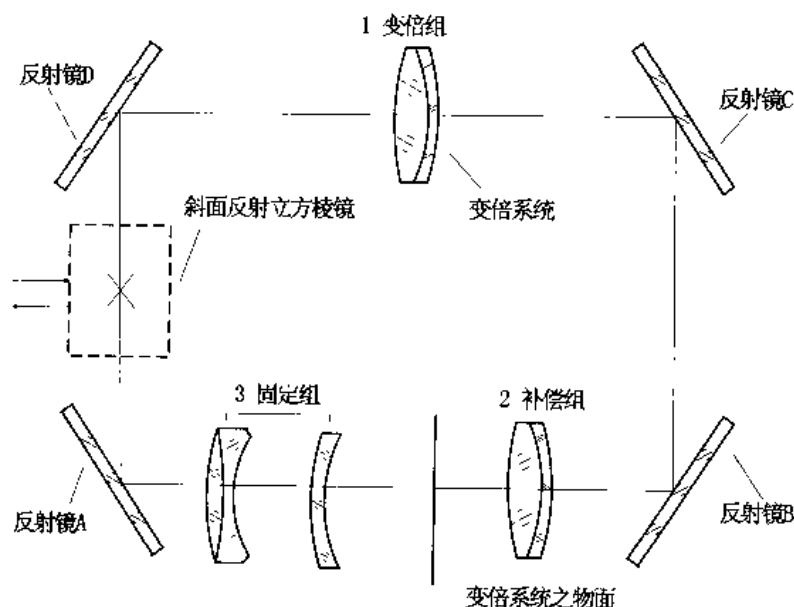


图 6-7 连续变倍附件的光学系统

§ 6.3.3 变倍目镜设计

在民用双筒望远镜中采用目镜变倍是一个最佳方案，文献[47]讨论了两组元及三组元变倍目镜的结构形式、高斯光学计算及一些相关的问题。

1. 变倍目镜的结构形式

变倍目镜按其结构形式的不同可分两组元变倍目镜和三组元变倍目镜，如图 6-8 所示。

对于目镜来说出瞳距的大小将直接影响到目镜的使用及设计的难易。出瞳距过短会给观察使用带来不便；出瞳距过长，又会增加设计难度。一般来说，两组元变倍目镜有较长的出瞳距。两组元变倍目镜结构虽然简单，但其成像质量远不如三组元变倍目镜，可根据不同的使用要求来选取变倍目镜的结构形式。

2. 两组元变倍目镜高斯光学计算

为了使出瞳距长度适用而变倍目镜的光学筒长又不致于过长，采用两个正组元较为适宜。从组元的特征来看仍然可分为接目镜 L_1 和场镜 L_2 。由同时以不同的轨迹和速度移动两个组元 L_1 和 L_2 来实现。在目镜焦距变化时出瞳相对于接目镜移动，即出瞳距在变化。这种型式的变倍目镜在不太大的视场及孔径情形下才会具有较好的成像质量。为了使变倍目镜的结构紧凑，选取场镜 L_2 处于物、像交换位置。

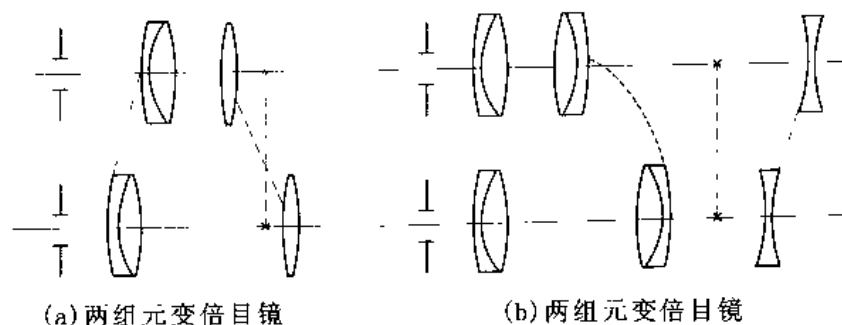


图 6-8 变倍目镜的结构

(1) 场镜 L_2 及放大倍率 β_2 的确定。根据使用要求首先确定变焦距范围 $f'_{\min} \sim f'_{\max}$ 。两端焦距为

$$f'_{\max} = f'_1 \cdot \beta_{2\max}$$

$$f'_{\min} = f'_1 \cdot \beta_{2\min}$$

其中 f'_1 为接目镜焦距, $\beta_{2\max}$ 、 $\beta_{2\min}$ 分别为长、短焦距时 L_2 的垂轴放大倍率。目镜变倍比为 $M = f'_{\max} / f'_{\min} = \beta_{2\max} / \beta_{2\min}$ 。

由于 L_2 处于物、像交换位置, 即有:

$$\beta_{2\min} = 1 / \beta_{2\max}$$

则

$$M = \beta_{2\max}^2$$

$$\beta_{2\max} = \pm \sqrt{M}$$

$$\beta_{2\min} = \pm 1 / \sqrt{M}$$

$$\beta_{2\max} = \sqrt{M}$$

$$\beta_{2\min} = 1 / \sqrt{M}$$

$$f'_1 = f'_{\max} / \beta_{2\max} = f'_{\min} / \beta_{2\min}$$

(2) 选取场镜焦距 f'_2 。 f'_2 的选取主要考虑短焦距时两组元间隔 d_{12} 有足够的长度, 即组元 L_1 和 L_2 不碰撞。

根据高斯光学可推得:

$$l_{2\min} = (1 / \beta_{2\min} - 1) f'_2$$

$$d_{12\min} = f'_1 - l_{2\min} = f'_1 - (1 / \beta_{2\min} - 1) f'_2$$

则

$$f'_2 = \frac{f'_1 - d_{12\min}}{1 / \beta_{2\min} - 1}$$

给定 $d_{12\min}$ 后, 即可求得 f'_2 。

(3) 求任意焦距位置的高斯光学参数。

对于任意焦距位置, 有:

$$\beta_{2i} = f'_i / f'_1$$

$$l_{2i} = (1 / \beta_{2i} - 1) f'_2$$

$$d_{12i} = f'_1 - l_{2i}$$

如果在变焦过程中, 我们令场镜 L_2 作线性运动, L_1 运动的轨迹便是一条曲线。组元 L_1

和 L_2 运动轨迹给在图 6-9 中。

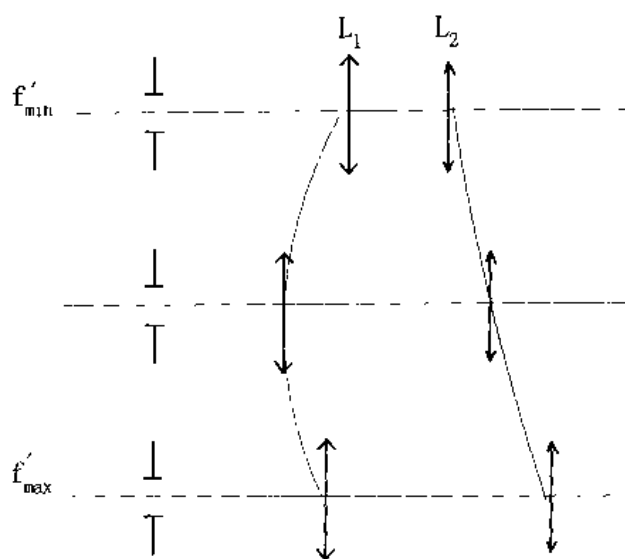


图 6-9 组元 L_1 、 L_2 运动轨迹

3. 三组元变倍目镜的高斯光学计算

由于两组元变倍目镜在变焦过程中场镜 L_2 越过像面，因而提高了 L_2 的工艺要求，这十分不利于降低产品的成本。另外出瞳距变化较大，这会给使用带来不便。克服上述不足的办法之一，可将变倍目镜做成三组元型式，增加一固定的接目镜组。其光路如图 6-10 所示。

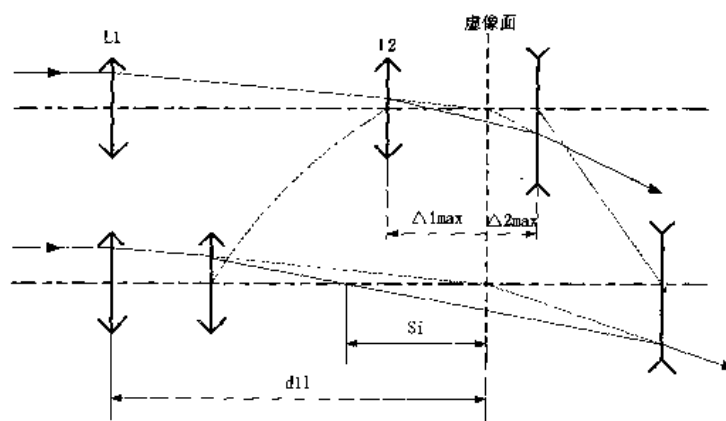


图 6-10 三组元变倍目镜

焦距的连续变化是通过沿光轴移动组元 L_2 和 L_3 的方式来实现的。两组元的移动是非线性关系，接目镜 L_1 在改变焦距的过程中是固定不动的，它只在为适合观察者不同屈光的眼睛时调节才移动。组元之间的空气间隔在一定的范围内变化。最小焦距时组元 L_2 和 L_3 间有最大的空气间隔。变焦过程中组元 L_2 和 L_3 分别在像面两侧移动，不越过像面。考虑到视度调节，接目镜沿光轴应有正、负五个屈光度的调节量。

(1) 选取镜组 L_2 、 L_3 在长焦位置时到像面距离分别为 $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$ ，即长焦位置时 L_2 、 L_3 间隔 $d_{23\max} = \Delta_{1\max} + \Delta_{2\max}$ 。

(2) 选取 f'_2 、 f'_3 。

(3) 长焦距位置计算。

$$l'_{3\max} = -\Delta_{2\max}, \quad l_{3\max} = \frac{f'_3 \cdot l'_{3\max}}{f'_3 - l'_{3\max}}$$

$$\beta_{3\max} = l'_{3\max} / l_{3\max}$$

$$l'_{2\max} = d_{23\max} + l_{3\max}, \quad l_{2\max} = \frac{f'_2 \cdot l'_{2\max}}{f'_2 - l'_{2\max}}$$

$$\beta_{2\max} = l'_{2\max} / l_{2\max}$$

则有

$$f'_1 = f'_{\max} / \beta_{2\max} \cdot \beta_{3\max} d_{12\max} = f'_1 - l_{2\max}$$

(4) 任意焦距位置的计算。

选取定 d_{12i} , 则

$$l_{2i} = f' - d_{12i} \cdot l'_{2i} = \frac{f'_2 \cdot l_{2i}}{f'_2 + l_{2i}} \cdot \beta_{2i} = l'_{2i} / l_{2i}$$

$$s_i = d_{11} - d_{12i} - l'_{2i}$$

其中 d_{11} 为接目镜 L_1 至虚像面距离, s_i 为经组元 L_2 后的实像面到达目镜虚像面的间距。

$$l_{3i} = -(s_i + \Delta_{2i})$$

$$l'_{3i} = -\Delta_{2i}$$

由高斯公式可得: $\Delta_{2i}^2 + s_i \cdot \Delta_{2i} + f'_3 \cdot s_i = 0$

$$\Delta_{2i} = \frac{-s_i \pm \sqrt{s_i^2 - 4f'_3 \cdot s_i}}{2} \quad (\sqrt{\quad} \text{取正值})$$

$$d_{23i} = l'_{2i} + s_i + \Delta_{2i}$$

$$l_{3i} = -(s_i + \Delta_{2i})$$

$$l'_{3i} = \frac{f'_3 \cdot l_{3i}}{f'_3 + l_{3i}}, \quad \beta_{3i} = \frac{l'_{3i}}{l_{3i}}$$

$$f'_B = f'_1 \cdot \beta_{2i} \cdot \beta_{3i}$$

4. 几个问题的讨论

(1) 出瞳位置。在变倍望远镜中无论是两组元的变倍目镜还是三组元变倍目镜, 其出瞳位置都是变化的, 这会给观察带来不便。因为在观察中人的眼瞳相对于目镜眼罩是不变的。如果我们把望远系统和人眼当成整体来考虑, 那么当人的眼瞳小于望远镜的出瞳时, 眼瞳就成为整个系统的出射光瞳, 眼瞳在物方的像即为实际的入瞳, 它对于物镜框有一偏离。当眼瞳大于望远镜的出瞳时, 系统的入瞳仍为物镜框, 此时眼瞳不与望远镜的出瞳重合。上述两种情况下, 轴外均产生渐晕。

对于两组元变倍目镜来说, 因为是两个正组, 所以应尽量选取 f'_1 、 f'_2 大些 (尤其 f'_2)。否则, 出瞳距很小, 将会给使用带来不便。

对于三组元变倍目镜, f'_2 、 f'_3 的选取也是有影响的。当 f'_2 大、 $|f'_3|$ 小时, 则出瞳距增大, 另一方面过长的出瞳距不利于轴外像差的校正, 所以在选取 f'_2 、 $|f'_3|$ 时应加以权衡。

(2) 渐晕。由于变倍望远镜在不同倍率时物方视场不同, 所以物镜的像高也不同。对

于两组元变倍目镜的望远镜来说, 从高能到低倍时由实像面变到虚像面。对于三组元变倍目镜来说, 在整个焦距范围内都是虚像面。所以在像面位置都无法放置分划板, 也不能设置视场光阑, 这就不可避免地要引起渐晕, 从而造成观察视场没有清晰的边界。但是, 通过光学组元的口径限制主要视场的渐晕不超过 60% 时, 对于目视用的望远镜来说还是不影响使用的。

(3) 有关镜组的粗糙度。对于两组元变倍目镜, 由于在变焦过程中场镜越过像面, 所以在场镜与焦面重合及其在焦面前后附近 (正负 5 个屈光度内) 时, 场镜表面粗糙度和材质的疵病等将清楚地反映在视场中。这对于既有实像面又有虚像面的目镜结构是不可避免的。解决这个问题的方法有两种: 其一, 选取适当的倍率选段, 使在变焦过程中场镜远离像面; 其二, 提高场镜表面的加工精度。

人眼具有自动调节 4 个屈光度的能力, 对于三组元变倍目镜, 如果我们取 8 个屈光度作为组元 L_2 、 L_3 离开接目镜 L_1 像面的允许值, 则设 $AB = \frac{f_1^2}{1000} \times 8$, 如图 6-11 所示。 AB 经镜组 L_2 缩小为实像 $A'B'$, $A'B' = \frac{f_1^2}{1000} \times 8 \times \beta_2^2$ 。所以考虑零件的加工要求, 镜组 L_2 和 L_3 在长焦位置时应位于实像面 $A'B'$ 以外处, 也即为 l_2' 及 l_3 应大于 $\frac{f_1^2}{1000} \times 8 \times \beta_2^2$, 否则必须提高对其的加工精度。考虑在长焦位置时 L_2 、 L_3 离实像面较近, 故应适当降低邻近像面的两个光学表面的粗糙度要求。

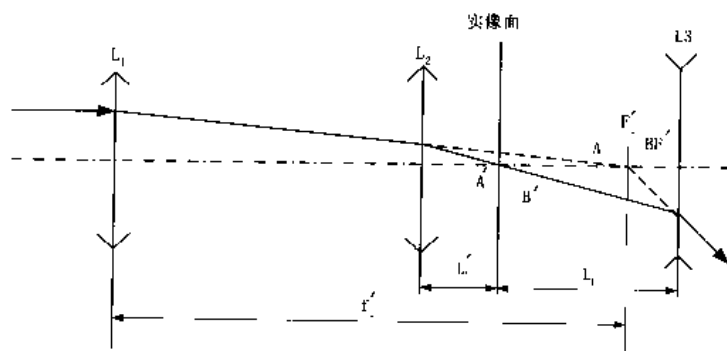


图 6-11 降低镜组镜片粗糙度对策之一

(4) 视度调节。为了适合观察者不同屈光眼睛的需要, 对于目视系统都应有视度调节的功能。

两组元变倍目镜的视度调节与普通定焦目镜的视度调节相同, 通过整组目镜作沿轴的调节改变视度。但在连续变焦时视度调节量也要随之改变, 这给视度刻值和使用都带来很大的不便。

三组元变倍目镜通过镜组 L_2 和 L_3 的相对移动达到变焦目的。在变焦过程中接目镜组 L_1 是不动的, 这样我们便可以采用 L_1 来实现视度调节, 如图 6-12 所示。从这一点上也可以看出三组元变倍目镜的优越之处。

通过接目镜组 L_1 的移动调节视度的过程中 u_1' 是不变的, 只是为了适应不同视力的人眼而沿轴调节接目镜组 L_1 的位置 (Δ_1 或 Δ_2), 使望远系统出射光线为平行光、会聚光或发散光, 以满足正常眼、远视眼或近视眼的需要。

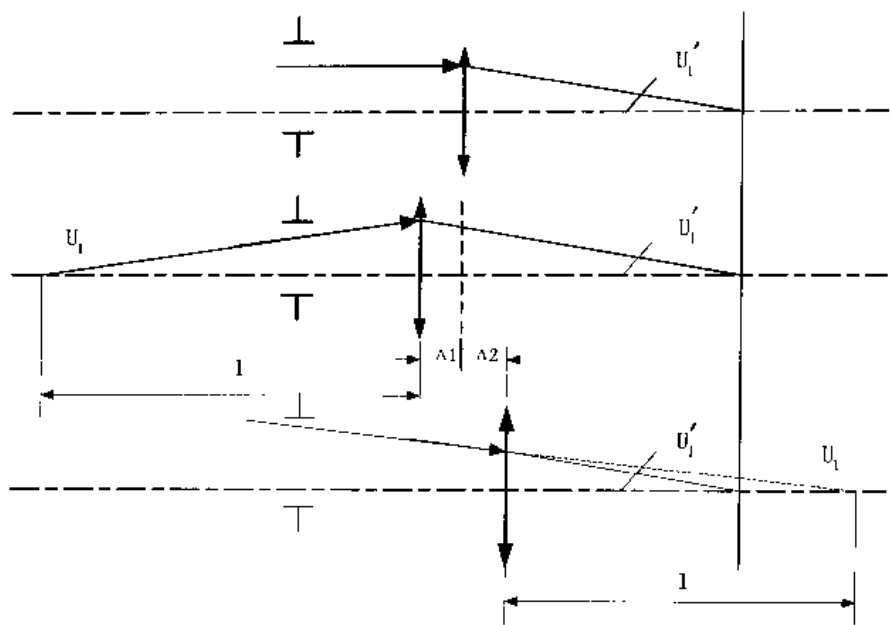


图 6-12 在三组元变倍目镜中实现视度调节

§ 6.3.4 设计实例

本设计实例是文献[17]上国外“显微镜变倍低倍物镜”的例子，见表 6-2。

表 6-2 变倍显微物镜结构参数

主要技术指标		结 构					
$\beta=0.63\sim 2$ $f'=94.969\sim 88.33\text{ mm}$ $NA=0.02\sim 0.06$ 像方线视场 $\phi 16\sim \phi 5$ 工作距=150.65 mm							
参 数							备注
序号	r/mm	d/mm	n	ν	D_0/mm	玻璃	
1	41.912						*均无对应的中国与 德国产的玻璃 带“**”号的间隔 的尺寸为变倍时的 移动量
2	20.113	2.5	1.7343	28.4			
3	-81.930	5.5	1.5821	53.6			
4	-30.839	**1					
5	-15.399	2.5	1.7685	26.8			
6	42.936	1.5	1.5917	52.9			
7	46.007	**2					
8	22.010	1.5	1.7685	28.4			
9	-62.106	3.0	1.5917	57.3			
10	-95.429	**3					
11	150.205	1.5	1.5749	57.3			
12	∞	1.5	1.7343	28.4			

第3部分 现代光学系统设计

伴随着激光技术、光纤技术和光电技术的不断发展，逐步形成了很多新型的光学系统，通常我们把这些系统总称为现代光学系统。它们的光学性能与传统成像原理的几何光学有一定的差异。下面将重点介绍激光光学系统、光纤光学系统的设计。

第7章 激光光学系统设计

§ 7.1 激光光学系统设计基础

§ 7.1.1 概述

1960年7月美国的梅曼(Theodore H. Maiman)在全世界众多研究小组参加研制第一个激光器的竞赛中脱颖而出,率先演示了世界上第一台红宝石固体激光器。激光具有亮度高、单色性好,方向性强等优点。40多年来,激光光学已在科技、经济、军事和社会发展的许多领域中得到广泛应用,形成了一系列新的交叉学科和应用技术领域,推动了现代科技的不断发展。

激光的应用不胜枚举,主要有:信息光电子技术、激光医疗与光子生物学、激光加工、激光测量与定位、光学信息处理与全息术、光通信、激光化学、量子光学、激光武器、激光雷达、激光制导等。激光在哪一方面的应用,都离不开激光光学系统。而在设计激光光学系统时必须研究各光学元件或系统对激光光束(高斯光束)的变换,找出传输变换的规律,这是激光实践应用中的重要课题,也是设计优质激光系统的关键问题。

采用稳定腔的激光器所发出的激光束,不同于球面波、平面波,是一种具有特殊结构的高斯光束。本节着重介绍高斯光束通过自由空间和通过薄透镜(组)时的变换规律。

§ 7.1.2 设计基础知识

1. 高斯光束的传播

(1) 基模高斯光束

任何稳定腔产生的沿 z 轴方向传播的高斯光束都可表示为式(7-1)

$$E = \frac{C}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} e^{-j[k(2 + \frac{r^2}{2R(z)} + \phi(z))]} \quad (7-1)$$

式中, $\frac{C}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}}$ 为振幅部分, $e^{-j[k(2 + \frac{r^2}{2R(z)} + \phi(z))]}$ 为相位部分, C 为常数因子; $r^2 = x^2 + y^2$, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\omega(z)$, $R(z)$ 和 $\phi(z)$ 分别是高斯光束的截面半径, 波面曲率半径和位相因子, 它们是高斯光束传播中的三个重要参数。此外, 还有高斯光束的共焦参数 $f = \pi\omega_0^2/\lambda$; 基模高斯光束腰斑半径 $\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}}$ 。

高斯光束的截面半径 $\omega(z)$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2} \quad (7-2)$$

当 $z=0$ 时, $\omega_{(0)} = \omega_0$ 即高斯光束的束腰半径。如图7-1所示, ω_0 表明它是光束截面最小处的光束截面半径, 称高斯光束的束腰。又从图7-1中很直观看到, 高斯光束在自由空间传播时, 其光束截面半径 $\omega(z)$ 与 z 不成线性关系。由式(7-2)可知高斯光束的截面半径轨迹

为一对双曲线。

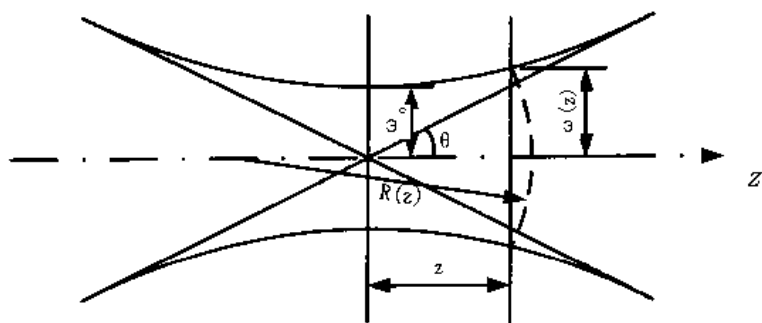


图 7-1 高斯光束传播

(2) 高斯光束波面曲率半径 $R(z)$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{f}{z} \right)^2 \right] = f \left(\frac{z}{f} + \frac{f}{z} \right) = z + \frac{f^2}{z} \quad (7-3)$$

当 $z=0$ 时, $R(0) = \infty$, 表明高斯光束在束腰处, 其波面为平面波, 把 $R(z)$ 对 z 求导可求得 $R(z)$ 的极值得 $z = \pm \pi \omega_0^2$ 把此值代入式 (7-3) 得 $R(z) = z = \pm 2\pi \frac{\omega_0^2}{\lambda}$ 。又当 $z \rightarrow \infty$ 时, $R(z) \rightarrow \infty$ 。可见, 高斯光束在传播过程中, 光束波面的曲率半径由 ∞ 逐步变小, 达到较小值后又开始变大, 直到无限远时变为 ∞ 。

(3) 高斯光束的位相因子 $\phi(z)$

$$\phi(z) = \tan^{-1} \left(\frac{z}{f} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right) \quad (7-4)$$

在高斯光束传播过程中, 要用双曲线的渐近线来表示。如图 7-1 中, 令双曲线的渐近线与光束对称轴的夹角 θ 称为光束发射角, 又称高斯光束的孔径角, 则有

$$\tan \theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{d\omega}{dz} \quad (7-5)$$

把式 (7-4) 对 z 求导, 并令 $z \rightarrow \infty$ 得 $\tan \theta = \lambda / \pi \omega_0$

由式 (7-2)、(7-3)、(7-5) 可看出, $\omega(z)$ 、 $R(z)$ 和 θ 与光束传播距离 z 和束腰半径 ω_0 相关。可见可用参数 $\omega(z)$ 和 $R(z)$ 来表征高斯光束的传播; 而几何光学中的同心光束传播只用一个曲率半径参数就行了。

(4) 高斯光束的 q 参数表征

引入一个新的复数参数 $q(z)$, 其定义为:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}$$

当 $z=0$ 时有

$$q_0 = q(0) = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} = if \quad (7-6)$$

把 $R(z)$ 和 $\omega^2(z)$ 的值代入式 (7-5) 得

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{z}{z^2 - q_0^2} - \frac{q_0}{z^2 - q_0^2} = \frac{1}{z + q_0}$$

$$q(z) = q_0 + z \quad (7-7)$$

很明显式 (7-7) 与同心球面光束沿 z 轴传播时 $R=R_0+z$ 有相同的形式,说明高斯光束在传播的过程中复数参数 $q(z)$ 和同心球面光束的波面曲率半径 R 的作用是相同的。

上面定义的两组参数都可确定基模高斯光束的具体结构,一般来说,用 ω_0 或 $\omega(z)$ 和 $R(z)$ 来描述高斯光束比较直观;用复数参数 $q(z)$ 来研究高斯光束的传播规律,特别是高斯光束通过光学系统的传播会更方便一些。

2. 高斯光束的透镜变换类型

高斯光束的透镜变换即是能够改变波阵面曲率的光学系统。

让我们看一下能够改变波阵面曲率的光学系统的具体情况。在要求改变光束的发散度或光斑直径时,以及当需要做两列波的波阵面匹配,或让一列波的波阵面与无源光学元件匹配时,都需要变换波阵面的曲率。可见,属于这类光学系统的有:会聚系统、准直系统、发散系统及激光的波束匹配系统。

增加激光束的发散度,可借助于一块正透镜或一块负透镜实现(见图 7-2)。借助正透镜,还可实现激光的会聚。为了减小光束的发散度即准直,也可利用一块正透镜,但一般是利用两组透镜组成的各种形式的准望远系统(见图 7-3)。当把准望远系统作一定的离焦时,可被用来将激光集中在比较远的距离上用做发散(见图 7-4)。两组透镜组成的光学系统,还可用于获得变化了的激光方向图(见图 7-5)。

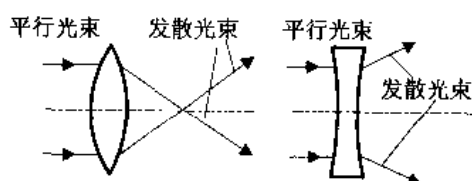


图 7-2 激光束发散

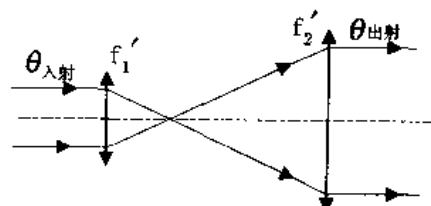


图 7-3 激光束的准直

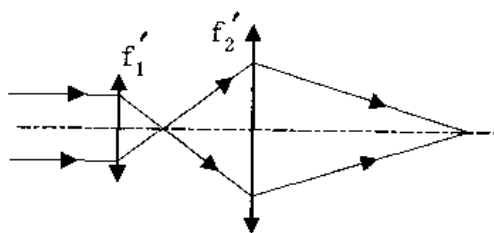


图 7-4 将激光汇聚在较远的距离上

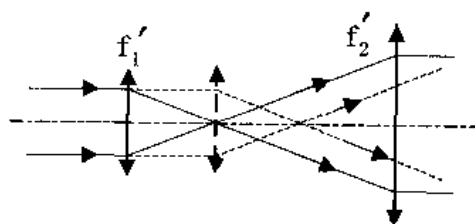


图 7-5 改变激光方向图的系统

尽管两组透镜组成的光学系统对波束匹配的柔韧性更好,但通常还是借助于一块透镜来实现,图 7-6 是各种形式的接收光学系统。对接收光学系统来说,选择反射、折射或折反射系统,主要根据的理由是被整形激光的波长或结构参数质量,外形尺寸和布局上的方便。高斯光束透镜变换的具体计算见 § 7.1.3。

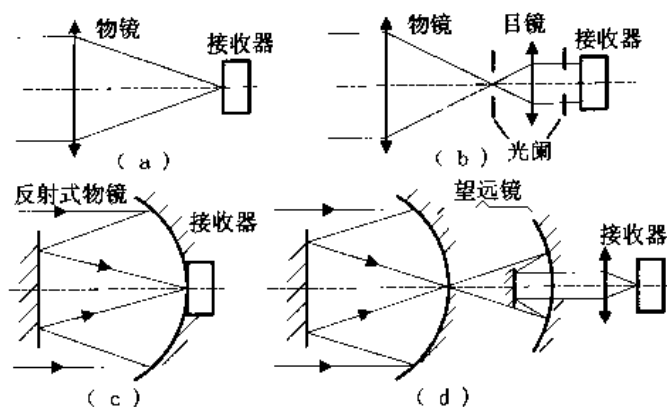


图 7-6 接收系统类型

a—透镜聚焦型系统；b—透镜准直型系统；c—反射型聚焦系统；d—反射混合型系统

§ 7.1.3 激光光学系统的外形尺寸计算

为了能改变激光束波面曲率，在要求改变光束的发散波或光斑直径以及需要做两列波的波阵面耦合时，可用会聚系统，准直系统，发散系统及高斯光束的面耦合系统。当激光束通过有限大小孔径（如各种准直聚光镜），如果通光孔比光孔处的高斯光束的光斑尺寸大得多，可认为光束不受限制地过，则在输出面就是高斯光束的光程分布。

首先计算激光束的空间参数谐振腔的参数值 R_s

$$R_s = 2L \sqrt{\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2}} \quad (7-8)$$

式中， L ——谐振腔两镜面之间的距离；

$$g_1 = 1 - (L/r_1)$$

$$g_2 = 1 - (L/r_2)$$

r_1 、 r_2 ——两镜面的半径。

由共焦参数值可确定束腰直径 2ω

$$2\omega = 2\sqrt{\frac{\lambda R_s}{2\pi}} \quad (7-9)$$

式中， λ ——激光波长。

在距束腰为 z 的任意位置，光束截面的值可由下式确定

$$2\omega_z = 2\omega\sqrt{1 + \epsilon^2} \quad (7-10)$$

式中， $\epsilon = 2Z/R_s$ 为截面的相对坐标。

在任意截面可近似认为激光光束的波前曲率半径 R 的球面

$$R = [(1 + \epsilon^2)/2\epsilon] \cdot R_s \quad (7-11)$$

利用式 (7-10) 和式 (7-11) 可计算透镜面内的波前曲率半径及光束的截面直径，然后由下两式确定薄透镜元件的焦距、通光口径及其他光学零件的线性尺寸和它们之间的距离，如图 7-7 所示

$$R'_s = \frac{R}{1 + (z/f')^2 + (R_s/2f')^2} \quad (7-12)$$

$$1 - \frac{z'}{f'} = \frac{1 + z/f'}{1 + (z/f')^2 + (R_s/2f')^2} \quad (7-13)$$

如果把束腰及由光学系统所成的束腰像，看做物和像，则可用下式计算经光学系统变换后的激光束的束腰尺寸和发散度

$$\beta_i^2 = \frac{4(f')\beta^2}{4(f') + \beta^2 R_s^2} \quad (7-14)$$

β_i —激光束横向放大率；

$$v_{ii}^2 = \frac{4(f') + \beta^2 R_s^2}{4(f')^2 \beta^2} = v^2 + \left(\frac{R_s}{2f'} \right)^2 \quad (7-15)$$

v_{ii} —激光束横向放大率。

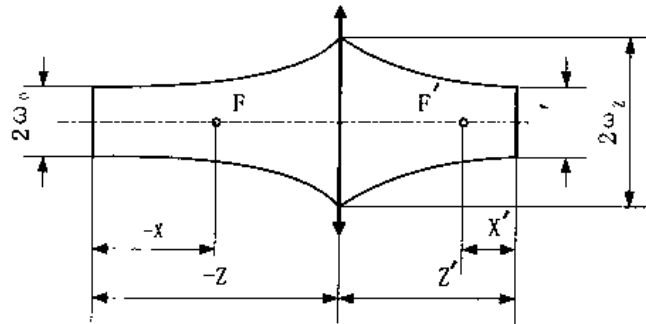


图 7-7 薄透镜对高斯光束的改变

§ 7.1.4 通光孔径的选择

通光孔径的大小对高斯光束的变换是有影响的、高斯光束通过一个圆孔时，如果光孔的直径比光孔处的高斯光束的光斑大得多，可认为光束不受限制，在输出面为高斯光束的强度分布；如果光孔的尺寸较小，则由于光孔的限制，将产生衍射效应，在输出面内不再是高斯光束的光强分布。那么系统的通光孔径有多大时，激光束将不产生衍射呢？

对于受圆孔径限制的高斯光束当 $z \gg 4\pi a^2/\lambda$ 时，可根据夫琅和费衍射图，利用复振幅来近似描述光场。夫琅和费衍射的一般计算公式如式 (7-16) 所示

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{\exp(ikz_1)}{i\lambda z_1} \exp\left[\frac{ik}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x_1, y_1) \exp\left[-\frac{ik}{z_1}(xx_1 - yy_1)\right] dx_1 dy_1 \quad (7-16)$$

而文献[29]给出能进行具体计算的式 (7-17)：

$$f(u) = A \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \text{airc}(r/a) e^{-a^2 r^2/\omega^2} \cdot J_0(ru) r dr \quad (7-17)$$

式中， $e^{(-a^2 r^2/\omega^2)}$ 是半径为 a 的圆形孔径范围内服从高斯规律的光场振幅分布；

ω ——按光场振幅减小 e 倍的水平确定的基模光斑；

$\text{airc}(r/a)$ ——圆函数， $u=2\pi a\rho/z$ ；

r ——孔径面内半径， ρ ——分析面内的半径；

Z ——孔径平面与分析平面间的距离；

J_0 ——零阶贝塞尔函数。

改变 a/ω 的比值，将式 (7-17) 用计算机进行计算，其衍射图中强度分布跟光束的 a/ω

限制有关,如图 7-8 所示。衍射图中第一暗环的尺寸同比值 a/ω 有关

$$D_{\text{衍射}} = 2k_{\parallel} / \text{NA} \quad (7-18)$$

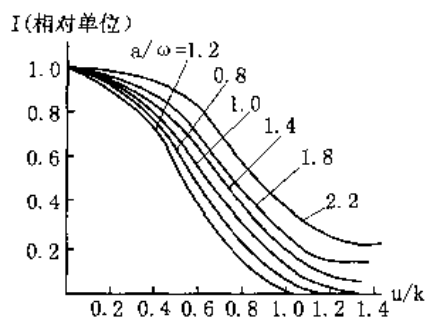


图 7-8 强度分布与光射 α/ω 的关系

式 (7-18) 中的系数 K_{\parallel} 与 a/ω 的关系如表 7-1 所示。

表 7-1 K_{\parallel} 与 α/ω 关系

α/ω	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2
K_{\parallel}	1.22	1.25	1.28	1.34	1.43	1.55	1.74	3.42	3.73

由表可知当 $\alpha/\omega=1$, 第一衍射暗环的角度位置应根据 $=1.43\lambda/D$ 公式进行计算。

当被投影的束腰尺寸非常小及当光束受到物镜的孔径限制时, 必须把由于衍射和像差造成的光斑尺寸的增加值计算进去, 对于一般的聚焦系统, 此时的光斑尺寸可由下式决定

$$D' = D'_I + D'_{\text{衍射}} + 2\delta'_T \quad (7-19)$$

式中, D'_I ——理想聚焦光斑的直径;

$D'_{\text{衍射}}$ ——衍射光斑;

δ'_T ——垂直球差。

对于有衍射效应的激光光学系统, 其衍射斑直径计算的 K_{\parallel} 取值可查表 7-1, 根据不同通光孔径大小取不同值。例如激光扫描系统、为了满足扫描分辨率的要求 $N=L/d$ 。式中, L 为光束扫描宽度, d 为光点直径。该系统设计时必须适当地选择成像透镜的焦距和通光口径, 当 f' 一定时, 当 α/ω 越大, 光斑直径越大, 当 α/ω 减小由于光孔限制, 光点直径变小, 但能量损耗大, 故应合适地选择孔径。

在设计激光光学系统时, 采用多大的通光口径可以忽略衍射效应呢? 讨论圆孔衍射对高斯光束特性的影响是有实用意义的。

当高斯光束在圆形光阑中发生衍射时, 衍射图中的光通量分布可按式 (7-20) 来求出

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{4a^2/\omega^2}{1 - e^{-2(a^2/\omega^2)}} \int_0^{u_0} \left[\int_0^1 e^{-a^2 r^2/\omega^2} J_0(ru) r dr \right]^2 u du \quad (7-20)$$

式中, Φ ——通过口径的光通量;

Φ_0 ——总光通量。

根据不同的 α/ω 值将式 (7-20) 进行计算, 结果列于表 7-2。

表 7-2 a/ω 与 Φ/Φ_0 关系

C/ω	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.2
Φ/Φ_0	84.2	86.0	88.0	92.1	95.3	97.8	99.0	99.6	99.8	100

由表 7-2 可知通光口径的大小影响激光通过的光通量, 引起不同程度的衍射效应。当 $a/\omega=1$ 时, 仅可通过 95.3% 的光通量; 当 $a \geq 1.5\omega$ 时, 可通过 99%, 通常取通光口径 $2a$ 等于 3ω , 称此时为最佳通光口径。按此口径设计, 可忽略该系统产生的衍射畸变, 当 $a/\omega < 1.5$ 时, 系统设计必须考虑高斯光束的衍射效应。

§7.1.5 聚焦高斯光束的焦点位移

在高斯光束的波面耦合系统的设计中必须考虑聚焦高斯光束的焦点位移, 讨论用一焦距为 f' 的薄透镜对单色高斯光束聚焦, 假设束腰处在透镜平面上, 在该透镜平面有一半半径为 a 的圆孔使光束不受限制地通过透镜聚焦, 聚焦后高斯光束的最大光强并不是处在几何焦点上, 而是在比较靠近聚焦透镜的 P 点上。如图 7-9 所示, 此成像后的束腰 P 点位置对焦点的偏离点位移, 其值可分别用两个参数表示, $N\omega$ 或 N_a , 统称为菲涅尔透数, 用 $N\omega = \omega^2/\lambda f'$ 表示焦点位移的计算式为

$$\Delta f' = f'(1 + \pi^2 N\omega^2) \quad (7-21)$$

用 N_a^2 表示焦点位移的计算式为

$$\Delta f' = f'(1 + \pi^2/12)N_a^2 \quad (7-22)$$

按式 (7-22) 计算结果可得出 $\Delta f'/f'$ 和 N_a 的关系如图 7-10 所示。可见随着菲涅尔透数 N_a 的减少, $\Delta f'/f'$ 快速增加, 当 $N_a=12$ 时, $\Delta f'/f'=1\%$, 当 $N_a=3$, $\Delta f'/f'=10\%$, 当 $N_a=1$, $\Delta f'/f'$ 为 40%。

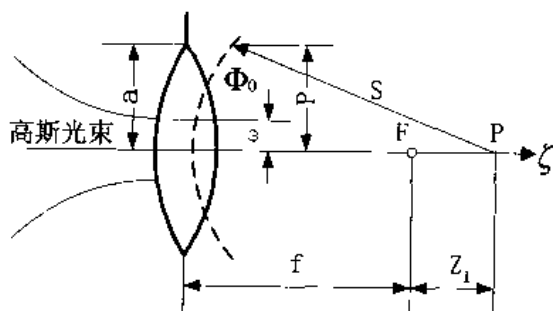


图 7-9 高斯光束的焦移特性

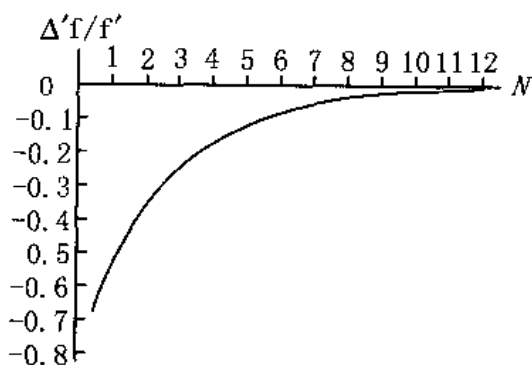


图 7-10 $\Delta f'/f'$ 与 N 的关系

当高斯光束入射到透镜时, 受到透镜光孔拦截, 在透镜得后焦面附近的光场分布可用下式表示

$$E(P) = iA \left(\frac{\pi N_a - u}{f'} \right) \exp(ikf' \frac{u}{\pi N_a - u}) \frac{\exp(-a - iu) - 1}{a + iu} \quad (7-23)$$

式中, 称 $\alpha = (a/\omega)^2$ 为高斯光束的拦截系数;

$u(z) = \pi N_a Z (f' + z)$ 是确定 P 点在 x 轴的参数。

$$P \text{ 点的光强 } I(p) = I(F) \left(1 - \frac{u}{\pi N_a} \right)^2 \frac{a^2 (\cosh a - \cos u) \cosh a}{a^2 + u^2} - 1 \quad (7-24)$$

式中,

$$I(F) = (\pi |A| / f')^2 (1 - e^{-a})^2 N\omega^2 \quad (7-25)$$

$I(F)$ ——透镜后焦面 F' 的光强

为了求得最大的强度点 P 的位置可解下列方程

$$\frac{dI}{dz} = \frac{dI}{du} \frac{du}{dz} = 0 \quad (7-26)$$

$$\frac{dI}{dz} = \frac{IF}{\pi N_a (\cosh a - 1)} \left(1 - \frac{u}{\pi N_a}\right) \frac{a^2}{a^2 + u^2} \times \left[2 \frac{a^2 + \pi N_a u}{a^2 + u^2} (\cosh a - \cos a) - (\pi N_a - u) \sin u \right] \quad (7-27)$$

可证明 $\frac{du}{dz}$ 不可能为 0; 由式 (7-27) 可得方程

$$\frac{2}{\pi N_a} \left(\frac{a^2 + \pi N_a u}{a^2 + u^2} \right) (\cosh a - \cos a) = \left(1 - \frac{1}{\pi N_a} \right) \sin u \quad (7-28)$$

解此方程可得许多根, 其中必有一个最大的 U_m , 令 $Z_m = \Delta f'$, 由式 (7-23) 可得

$$\Delta f' / f' = u_m / (\pi N_a - u_m) \quad (7-29)$$

当 $N_a \gg N_\omega$, 有较弱的光束拦截时, 由式 (7-23) 可得 $\Delta f' / f' = 1 / (1 + \pi^2 N_\omega^2)$ 这 and 前述的式 (7-21) 是一致的。

当 $N_a \ll N_\omega$ 时, 有强光的光束拦截, 可根据式 (7-27) 求解出 $\Delta f' / f'$ 。

§ 7.1.6 设计注意事项

综上所述, 可归纳出激光光学系统设计注意事项:

(1) 在激光光学系统设计中, 当 a/ω 大于 1.5 时, 系统可忽略衍射效应, 按高斯光束的基本变换规律, 利用几何光学知识进行设计。当 a/ω 小于 1.5 时必须考虑衍射效应, 根据衍射理论, 考虑像点的光强分布来确定系统的成像要求, 进行设计和评价。

(2) 对波面耦合系统的设计必须根据菲涅尔透数的大小确定系统的焦点位移量, 从而获得最佳匹配。

(3) 激光会聚系统中的激光光学与几何光学设计参数有差异: 由激光光学理论计算得出的像距与普通几何光学设计方法得到的像距之间仅存在一微小差别; 但由这两种方法得到的像高之间差别是相当大的, 后者已接近前者的四倍, 当需要考虑高斯光束腰大小经过光学成像系统的变化时, 不能直接采用理想光学系统的设计数据, 必须用激光光学理论加以计算, 否则将导致得出错误的结果。

§ 7.2 高斯光束会聚系统设计

激光光学系统一般分为两大类, 即准直扩束系统与会聚系统。高斯光束与光导纤维之间的耦合光学系统即为一会聚系统。一般由激光器出射的高斯光束的束腰直径在几百个微米左右, 若将其变换小到几个微米, 这给耦合光学系统的设计提出了很高的要求。

§ 7.2.1 激光聚光光学系统设计思想与实例

1. 设计思想

激光光学中, 在物方 S_0 处腰斑半径为 ω_0 的高斯光束, 经一光学系统变换后, 在像方 S'_1 处有新的腰斑半径 ω_i 。光学系统设计中, 将高斯光束物方束腰视为物, 像方束腰视为像, 则物高为 $2\omega_0$, 像高为 $2\omega_i$, 在高斯光束与光纤耦合系统中, 像高 $2\omega_i$ 应小于光纤芯直径;

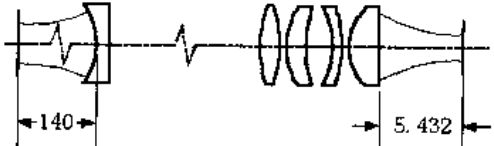
将高斯光束在光学系统的第一镜面处（物距为 S_0 ）的发散角 U_0 视为物方孔径角，在最后一个出射面处的发散角视为像方孔径角，在像面处的发散角应小于光纤数值孔径半角；考虑到高斯光束经球面光学系统后的衍射损耗，通光孔径应以高斯光束光斑在光学系统内部最大直径的 1.5 倍为宜。 ω_0 可由激光腔的结构参数求得， ω_1 由光纤芯径确定； U_0 可由高斯光束发散角公式计算。

设计思想可描述为：首先将聚光系统等效为一单薄透镜，利用激光光学中单薄透镜的参数公式，在选定高斯光束变换前参数 $S_0, \omega_0, \omega_1, U_0, \lambda$ （激光波长）后推导出系统总焦距 f'_Σ ；然后用几何光学理论设计满足系统总焦距、像方后截距、像差等要求的聚光光学系统；最后依据该系统的设计参数用激光光学理论计算高斯光束经该聚光系统变换后的参数 ω_1, S_1 。修改聚光系统设计参数，直到 ω_1, S_1 满足设计要求。

2. 设计实例

文献[30]依据上述设计思想做了一个聚光系统设计实例，其结构参数见表 7-3。该实例实现了 He-Ne 激光的输出通过一个高质量成像系统耦合到单模保偏光纤（芯径为几个微米）上去的目的。该系统将高斯光束腰斑半径由 0.2953 mm 压缩至 1.14 μm 。

表 7-3 激光聚光系统结构参数

主要技术参数		结 构				
$S_0 = 140\text{mm}$ $v_0 = 0.0002\text{rad}$ $\omega_0 = 0.2953\text{mm}$ $\omega'_0 = 1.14\mu\text{m}$ $f'_\Sigma = 1.75\text{mm}$						
参 数						
面号	r/mm	d/mm	$n_{632.8}$	v_d	D_f/mm	玻 璃
1	-6.0824				0.622	
2	53.6094	1.000	1.5147	64.07	0.662	K9
3	55.6127	47.309			3.846	
4	-30.5540	1.800	1.7125	29.51	3.884	ZF3
5	11.6632	0.500			3.832	
6	40.5221	1.800	1.7125	29.51	3.528	ZF3
7	-16.7345	2.000			3.06	
8	-65.4014	1.300	1.7999	25.37	2.986	ZF7
9	6.2517	0.500			2.894	
10	50.8011	2.800	1.6198	56.71	2.196	ZK10

* $n_{632.8}$ 为玻璃材料在 $\lambda=632.8\text{ mm}$ 的 He-Ne 激光下的折射率；

**理想像 $y' = 3.65\mu\text{m}$

§7.2.2 李斯特显微物镜激光会聚系统

1. 简介

在激光微光束技术中，为获得微米量级的光斑，多数利用显微物镜的聚焦来实现，也有一些场合利用显微系统。中倍李斯特物镜是显微物镜的基本结构，它在激光微光束技术中具有重要作用，本小节讨论了高斯光束经李斯特物镜的聚焦特性，分析了影响聚焦光斑的各

种因素, 得出确定最佳聚焦设计方案的原则。

2. 高斯光束经李斯特物镜系统的聚焦变换

高斯光束经李斯特物镜系统变换的示意图如图 7-11 所示。设物镜的第 I、II 组胶合透镜的焦距为 f'_1 、 f'_2 , 两组的间隔为 $H_1H_2=d$, 高斯光束经透镜物像变换公式为

$$1 - l'_i / f'_i = \frac{1 + l_i / f'_i}{(1 + l_i / f'_i)^2 + \left(\frac{z_{0i}}{f'_i} \right)^2} \quad (7-30)$$

$$\frac{z_{0i}}{f'_i} = \frac{\frac{z_{0i}}{f'_i}}{(1 + l_i / f'_i)^2 + \left(\frac{z_{0i}}{f'_i} \right)^2} \quad (7-31)$$

式中, l_i 、 l'_i 为物方、像方光束束腰到第 i ($i=1, 2$) 透镜组的物方、像方主面的距离。 Z_{0i} 、 Z_{0i} 为光束的瑞利距离, 它与束腰半径的关系为 $Z_{0i} = \pi \omega_{0i}^2$ 。对李斯特物镜的第 I、II 组依次应用式 (7-30)、式 (7-31) 并计及 $l_2 = l'_1 - d$, $Z_{02} = z'_{01}$, 经繁杂的推导和整理, 得像方束腰位置 l'_2 和瑞利距离 Z'_{02}

$$l'_2 = l'_f - \frac{(l_1 - l_f) f'^2}{(l_1 - l_f)^2 + Z_{01}^2} \quad (7-32)$$

$$Z'_{02} = \frac{Z_{01} f'^2}{(l_1 - l_f)^2 + Z_{01}^2} \quad (7-33)$$

引入束腰光斑缩小倍率或聚焦比 $\gamma = \frac{\omega_{01}}{\omega_{02}}$, 则式 (7-32) 可表示为

$$\gamma = \frac{\omega_{01}}{\omega_{02}} = \frac{1}{f'} [(l_1 - l_f)^2 + Z_{01}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7-34)$$

式中, f' 及 l_f 、 l'_f 为李斯特物镜系统的合成焦距及物方、像方焦点位置

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - d} \quad (7-35)$$

$$l_f = -f' \left(1 - \frac{d}{f_2} \right), \quad l'_f = f' \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) \quad (7-36)$$

典型的里李斯特物镜其光学特性为 $NA=0.25$, $\beta=10^\circ$, $y'=8.5$, 共轭距 $L=195$ 。具体结构参数可参阅表 5-2 (b)。

应用该系统时注意:

(1) 当 ω_{01} 一定时, 聚焦光斑半径 ω_{02} , 随着物方光束到物镜第一面的距离的增大而减小, 而光斑缩小倍率 γ 随之增大而增大。

(2) 当 l_1 一定时, 控制物方光束的 Z_{01} 或 ω_{01} (如通过前级透镜的预聚焦获得 ω_{01} , 或对某些有适当 ω_{01} 的激光) 可实现束腰光斑聚焦比 γ 等于物镜成像放大率 β 的倒数 (即 $1/\beta$, 可缩小倍率)。

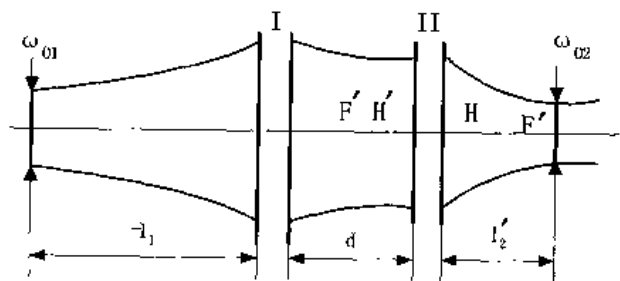


图 7-11 激光束经李斯特物镜汇聚

§ 7.3 高斯光束准直扩束系统设计

§ 7.3.1 激光准直扩束系统设计

1. 简介

激光由于具有光能量集中、方向性和单色性好等特点，被广泛用做光学干涉计量的光源。光学干涉仪中由激光器出射的激光需经过准直扩束才能满足要求。但是，一方面激光光束既不是平面波，也不是球面波，在凹型激光谐振腔中是一种所谓高斯分布的光波；另一方面，由于高斯光束的干涉将产生一个附加位相差，在光学干涉仪中需要用对激光进行准直扩束，压缩远场发散角的方法来减少因该附加位相差引起的测量误差。因此，对激光准直扩束光学系统设计参数的确定方法提出了较高的要求，不能简单地用普通光学系统设计参数来代替激光准直扩束系统的设计参数，更不能采取实验室中常用的倒置望远镜系统来达到对激光准直扩束的目的。结合高斯光束的传播特性，本小节提出了一种激光准直扩束系统设计参数的

确定方法，并给出激光准直扩束光学系统的设计结果。

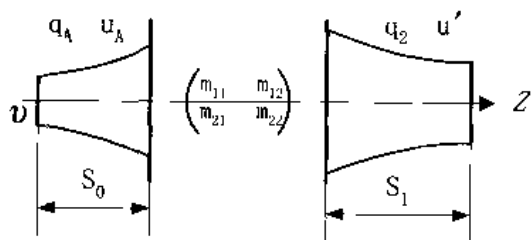


图 7-12 激光准直光束

2. 高斯光束通过光学成像系统的变换

如图 7-12 所示，设在物方 s_o 处有一等相面为平面，腰斑半径为 ω_o 的高斯光束。经一传播矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$$

的光学系统后，仍为高斯光束，但在像方 s_i 处有新的腰斑半径 ω_i 。由矩阵光学可以推导出下列公式

$$s_o m_{11} + s_i m_{22} + s_o s_i m_{21} m_{12} = -\left(\frac{\pi \omega_o^2}{\lambda}\right)^2 \frac{m_{21}(m_{11} + s_i m_{21})}{m_{22} + s_o m_{21}} \quad (7-37)$$

$$\omega_i = \omega_o |m_{11} + s_i m_{21}| \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_o^2}{\lambda}\right)^2 \frac{m_{21}^2}{(m_{22} + s_o m_{21})^2} \right]^{1/2} \quad (7-38)$$

式中， λ 为激光波长。式 (7-37) 为在一般情况下高斯光束的成像公式，当传播矩阵 M 为已知时，它给出像距 s_i 和物距 s_o 间的函数关系。式 (7-38) 为高斯光束的物像比例公式，它给出了 ω_o 和 ω_i 间的函数关系。

当光学系统为一焦距为 f 的薄透镜时，传播矩阵可表示为 $M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$

将 M ，代入式 (7-37)，式 (7-38) 中，得到高斯光束经单薄透镜成像公式和物像比例公式

$$\frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} - \frac{s_o - f}{z_o^2 + s_o(s_o - f)} \quad (7-39)$$

$$\omega = \omega_o \frac{f}{[z_o^2 + (s_o - f)^2]^{1/2}} \quad (7-40)$$

式中, z_0 为瑞利长度, 且 $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$ 。 (7-41)

3. 激光准直扩束光学系统设计参数的确定方法

(1) 高斯光束参数的确定。激光器的激光管腔长 l , 两反射镜半径分别为 R_1, R_2 (出射面半径), 由激光光学可知

$$\omega_0^4 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \lim \frac{l(R_1 - l)(R_2 - l)(R_1 + R_2 - l)}{(R_1 + R_2 - 2l)^2} \quad (7-42)$$

束腰距出射面的距离为

$$\tau = \lim \frac{l(R_1 - l)}{R_1 + R_2 - 2l} \quad (7-43)$$

当薄透镜焦距 f 一定时, 将式 (7-40) 对 s_0 求一阶偏导数, 得到

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial s_0} = \frac{\omega_0 f (f - s_0)}{[z_0^2 + (s_0 - f)^2]^{3/2}} \quad (7-44)$$

由式 (7-44) 可以得出结论, 当 $s_0 > f$ 时, ω_1 随 s_0 的减小而单调增加; 当 $s_0 < f$ 时, ω_1 随 s_0 的增大而单调增加; 当 $s_0 = f$ 时, ω_1 达到极大值, 由式 (7-40) 可求出

$$\omega_{1,\max} = \frac{\lambda f}{\pi \omega_0} \quad (7-45)$$

将 $s_0 = f$ 代入式 (7-39), 得 $s_1 = f$

另外, 对远场发散角 θ_0 与准直扩束后激光在距离 z' 处的光斑直径 D 有

$$\theta_0 = \lambda / (\pi \omega_1) \quad (7-46)$$

$$D = 2\omega_1 \sqrt{1 + (z/z_0)^2} \quad (7-47)$$

可见, 如将高斯光束中入射光束和出射光束的束腰比为几何光学中近轴光线的聚焦点, 高斯光束经透镜变换后的聚焦特性与普通几何光学中近轴光线的聚焦特性的差异是很大的。当入射高斯光束的束腰位于透镜左方焦点附近时, 出射高斯光束的束腰并不在无穷远, 而是位于透镜右方焦点附近; ω_1 达到极大值时, 远场发散角 θ_0 达到极小值, 是理想的准直扩束条件。

(2) 光学系统参数的确定。为方便起见, 以下设计时将准直扩束光学系统进行倒置计算, 即将物方与像方互相颠倒计算。

① 物方孔径角 U 。因为准直扩束后激光光束近似地可以视为平行光, 故取

$$U_0 = 0 \quad (7-48)$$

② 光线在物方入射参考面上的半高度 H_1 。当由设计要求确定准直扩束后激光束腰斑半径 $\omega_{1,\max}$ 之后, 取

$$H_1 = \omega_{1,\max} \quad (7-49)$$

③ 光学系统焦距 F 。由高斯光束参数的确定公式 (7-45) 可知

$$F = \frac{\pi}{\lambda} \omega_0 \omega_{1,\max} \quad (7-50)$$

④ 视场角 UPO 。

$$UPO \approx \frac{\text{光源直径}}{2 \times \text{焦距}} \quad (7-51)$$

4. 设计实例

自校整空间位移测量仪中双频氦氖激光（波长 λ 为 $0.6328\ \mu\text{m}$ ）光束经单模保偏光纤（芯径为 $2.5\ \mu\text{m}$ ）耦合，光学系统聚焦并由光纤端面出射后其束腰为 $1.12\ \mu\text{m}$ ，要求准直扩束后进入干涉仪时激光光斑直径为 $6\ \text{mm}$ ，在空间传输 $31\ \text{m}$ 距离后，光斑直径不大于 $8\ \text{mm}$ 。

由此可以确定高斯光束参数为

$$\omega_0 = 1.12\ \mu\text{m}, \omega_{t,\text{max}} = 3\ \text{mm}, z = 31\ \text{m}, D \leq 8\ \text{mm}, \lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$$

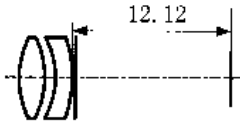
将上述参数代入光学系统设计参数的确定公式得到

$$U_0 = 0, H_1 = 3\ \text{mm}, F = 16.83\ \text{mm}, UPO = 0.004^\circ \quad (\text{实际设计时取 } 0.1^\circ)$$

将该组参数代入式(7-46)，式(7-47)，得到：高斯光束准直扩束后的远场发散角 $\theta_0=6.7 \times 10^{-5}\ \text{rad}$ ；高斯光束在空间传播 $31\ \text{m}$ 距离后光斑直径 $D=7.30\ \text{mm}$ 。可见经准直扩束后激光束近似为平行光，且光斑直径小于 $8\ \text{mm}$ ，满足设计要求。

设计准直扩束光学系统时，因为光源为单色光源，无需校正色差，只需校正球差、彗差和波差。表 7-4 为双分离光学系统自动优化设计后的结构参数。该系统球差、彗差和波差均满足使用要求。

表 7-4 双分离光学系统结构参数

结 构	主要技术参数				
	r/mm	d/mm	$n_{632.8}$	D_0/mm	玻 璃
	9.94			6.00	
	-15.76	4.50	1.64377	5.04	ZF1
	-11.16	0.60		4.68	
	-42.59	1.4	1.79991	4.44	ZF7
	光阑	12.12		0.06	

§ 7.3.2 半导体激光器准直系统设计

1. 简介

本系统是用于录像磁盘、数字音响磁盘光源半导体激光器的发散性激光束准直透镜系统。

半导体激光器的激光光束通常是垂直方向为 40° ，水平方向为 10° 左右发散角的发散性光束。为了使其实用，要校成平行光束或接近平行光束。半导体激光准直透镜系统用于录像磁盘，数字音响磁盘时，要求 NA 为 0.2 左右，因为波面的混乱将导致光学系统整体性能的恶化，必须确保良好的像差补偿。

现今，人们都在设计满足上述条件，且重量轻、体积小和成本低的准直透镜系统。

本系统设计是根据这种要求，提供能确保良好的像差补偿，而且量轻、小型、低成本的半导体激光器用准直透镜系统。

2. 设计实例

本设计的准直透镜系统由双凸面透镜和负凹凸透镜构成。双凸面透镜装配在像方侧，负凹凸透镜装配在物方侧即半导体激光器的一侧，使凹面向着像方侧，这个透镜系统还满足

下面两个条件:

$$(1) 0.5 < f'_1/f' < 0.85;$$

$$(2) 0.15 < d_2/|r_3| < 0.40$$

在条件(1)中, f'_1 是双凸面透镜的焦距, f' 是准直透镜系统的焦距; 在条件(2)中, d_2 是双凸面透镜组负凹凸透镜邻接面之间的距离, 即双凸面透镜的物方侧的透镜面和负凹凸透镜的像方侧透镜面之间在光轴上的距离。 r_3 为负凹凸透镜像方侧透镜面的曲率半径, 因为这一透镜面是凹面, 显然 $r_3 < 0$ 。

条件(1)是决定准直透镜的 NA 的条件, 即超过下限时, 各个透镜的折射能力变强, 难以补偿像差, 超过上限时, 由于光点位置在像方侧附近, 所以不能满足结构紧凑和所期望的 NA。

条件(2)与球面像差补偿相关连。超过下限时, 则补偿过剩, 超过上限时, 则像差补偿不足。

如此, 由两个透镜构成透镜组, 使轻量化、小型化和低成本成为可能。

下面, 用三个实例加以说明。见图 7-13。图中符号 Lx 为光轴, LD 为半导体激光器, 1A 为双凸面的透镜, 2A 是负凹凸透镜。图中, 左方是像方侧, 录像磁盘等磁盘放于像方侧。三种半导体激光其准直系统结构参数, 见表 7-5。

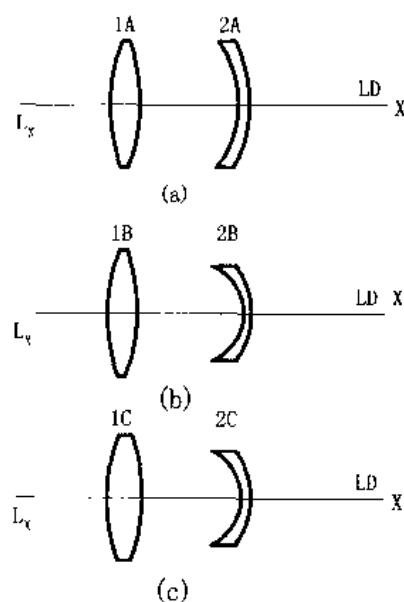


图 7-13 半导体激光准直系统

表 7-5 半导体激光准直系统结构参数

主要技术数据	结 构	参 数				
		r/mm	d/mm	$N_{632.8}$	v	玻 璃
$f'=1$ NA=0.17	见图 7-13 (a)	0.479				
		-6.349	0.091	1.61388	60.3	*无对应的国产玻璃
		-0.558	0.183			
		-1.116	0.048	1.60999	40.9	BaF7
$f'=1$ NA=0.17	见图 7-13 (b)	0.502				
		-1.005	0.152	1.61388	60.3	*无对应的国产玻璃
		-0.489	0.180			
		-1.759	0.102	1.7556	27.7	BaF7
$f'=1$ NA=0.25	见图 7-13 (c)	0.579				
		2.128	0.183	1.61388	60.3	*无对应的国产玻璃
		0.587	0.15			
		0.991	0.108	1.60999	40.9	BaF7

第8章 光纤光学系统设计

在光纤技术中光无源器件是一种能量消耗型器件,包括有光转接器、光耦合器、光开关、光衰减器、光隔离器及光滤波器等,因此光无源器件是光纤通信、光纤局域网以及各种光纤传感系统、光纤测量系统中不可缺少的重要器件。光无源器件可用光学分立元件构成,但由于存在着体积大、质量重、结构复杂和组装困难等缺点,在光纤通信中已有被近年来发展起来的全光纤定向耦合器取代的趋势,然而在光纤传感、光纤测量激光加工传输中仍有它存在的不可替代的功能和作用。本章在介绍半导体激光器与光纤耦合系统后,将重点介绍由光学分立元件构成的各种光纤光学系统的设计与实例。

§ 8.1 半导体激光器与光纤直接耦合设计

§ 8.1.1 概述

光纤和半导体激光器耦合是光纤通信系统中获得高性能光源的重要技术之一。耦合技术的进步,直接影响光纤通信系统的性能。光纤和 LD 耦合发展大致过程是:LD+平端光纤→透镜+平端光纤→球端光纤(微透镜光纤)→自聚焦透镜+光隔离器+光纤→双曲线端光纤和尖锥端光纤。这个过程是为了获得性能更好的光纤通信系统用光源。总起来说,一个优秀的耦合应该是:①效率高,获得尽可能大的出纤功率,以有利于扩展系统的传输距离和提高系统的信噪比;②反射小,尽可能减少耦合反射光对半导体激光器工作特性的影响。因为即使很小的反射,也将影响激光器振荡频率的稳定性,影响激光谱线宽度、动态响应及因功率起伏而产生的强度噪声。图 8-1 是光纤传输线中由于内部反射光造成光反馈示意图。

在实际应用中,有很多场合要求半导体激光器的封装是带光纤输出的。由于半导体激光器的光束发射角大,发射的光束有一定的模式分布:在平行和垂直方向不对称,光束截面是椭圆形;而光束要耦合进直径很细(约 $7\mu\text{m}$)的单模光纤中困难不小。上述耦合情形就是所谓直接耦合方式。即把一根光纤放在半导体激光器发光面的前面,如图 8-2 所示。因为发光表面积很小,只要光纤和发光面靠得足够近,激光器所发出的光都能照到光纤端面上。图 8-2 用的是平端面光纤,只能接收 $2\theta_0$ 张角中的那一部分光,因此激光器所发出的 2θ 角度内的光,据计算只有 20%能进入光纤,效率很低。为此,必须寻找提高耦合效率的有效办法。人们发现在光纤端面做一定处理后,耦合效率得到很大的提高,下面将详细讲述这方面的内容。

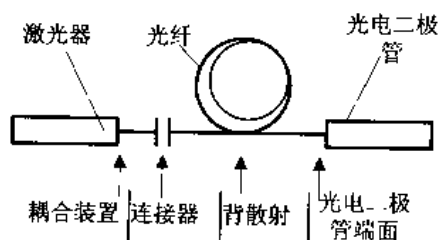


图 8-1 光纤传输线中,由于内部光反射造成的光反馈示意图

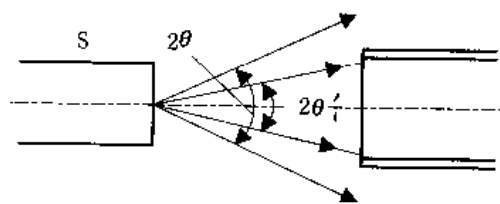


图 8-2 LD 与光纤直接耦合

§ 8.1.2 直接耦合光纤端面结构形式及其效率

激光器与光纤耦合时，光纤端面都作一定处理，其基本结构有如图 8-3 所示的 5 种。它们分别是：

(1) 部分切割，然后分离形成平面端面 (butt Joint, 对接)。

(2) 将光纤末端烧熔成球透镜 (圆珠, bead)。

(3) 在光纤末端粘上 (或熔化) 一个玻璃透镜，或者对光纤的内芯和包层进行选择性腐蚀，然后再进行热处理，或形成一个光刻胶的透镜。

(4) 将光纤包层腐蚀掉，然后将芯的端面熔化以形成锥端微透镜 (腐蚀锥形)。

(5) 局部加热，微拉伸，然后在细颈部切割，光纤末端熔成一透镜 (拉锥形)。

也可以用磨抛的办法在光纤尾端形成锥形透镜。

上述不同光纤末端形状的耦合效率与光纤相对于激光斑点中心在垂直于结平面和平行于结平面的偏移容差示于图 8-4。所用激光器是典型的折射率导引激光器 (沟道衬底平面 CSP 型)，所用单模光纤的芯径为 $7\mu\text{m}$ ，包层直径为 $125\mu\text{m}$ ，数值孔径 $\text{NA} = 0.1$ 。每一种情况下，光纤与激光器腔面的距离调整到使得耦合进光纤的功率为最大。图中数字 6 代表两个自聚焦透镜加平面端面光纤。在结构 1~4 中，最佳距离为 $10\mu\text{m}$ ，对于结构 5 (拉锥)，最佳距离为 $30\sim 50\mu\text{m}$ 。功率随距离 Z 的变化如图 8-5 所示。

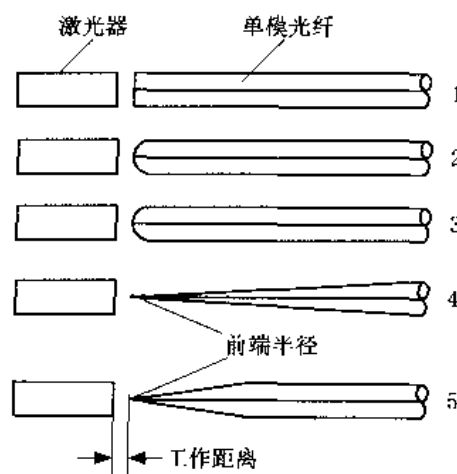


图 8-3 激光器与单模光纤间耦合的基本结构示意图

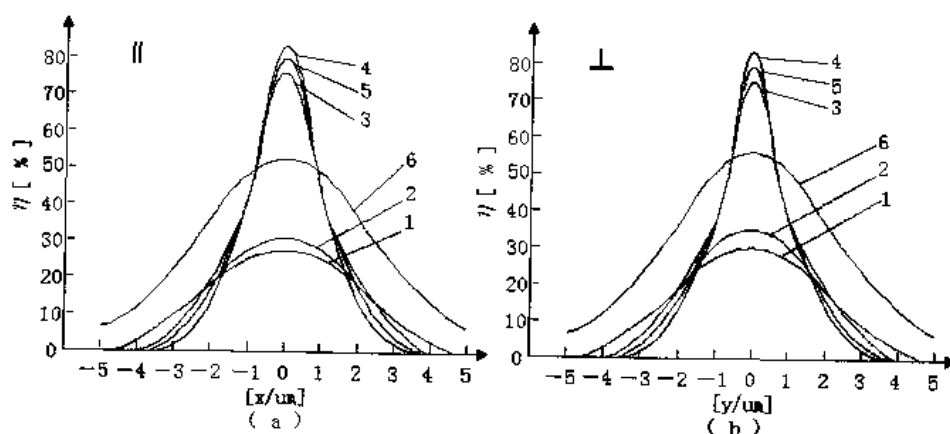


图 8-4 耦合效率与平行和垂直于 $P-n$ 结内光纤与激光斑中心偏移量的关系 (数字表示图 8-3 中的耦合方式)

图 8-5 所示的振荡曲线与光纤—激光器镜面形成的光腔的周期性调谐有关。功率幅度的变化是由于总的反射系数变化的结果，它是确定输出功率幅度的决定因素。功率和波长随距离 Z 的变化示于图 8-6。比较曲线所示结果可见，拉锥形状比其他几种形状都好，它的耦合效率最高，且对激光器的工作影响最小，而且制造也容易。虽然在调整这种结构时要很精细。有报导说，对于一个直径为 $10\mu\text{m}$ 的微透镜，其耦合效率可达 50%。但是如果光纤的侧向

位移有 $\pm 0.5\mu\text{m}$ ，则耦合效率可降到 20%。相对于纵轴光纤有小的倾斜时，没有发现有多大影响。但倾斜 $\pm 5\%$ ，耦合效率会降低 0.5dB。这说明，激光器与单模光纤的对中精密调节是多么重要，而且耦合效果（无论从光学上还是机械上看）都应该不随时间而变化。

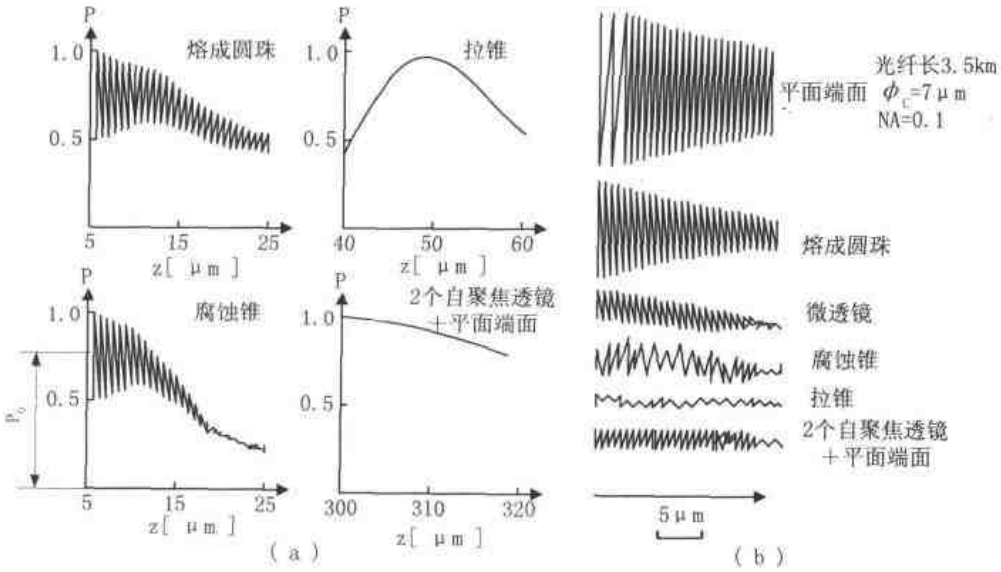


图 8-5 激光器腔面与光纤前端面之间的距离对 (a) 耦合进光纤的功率和 (b) 反射相位的影响

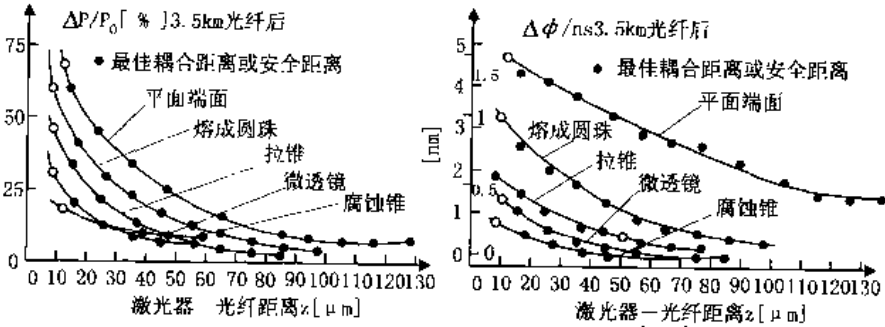


图 8-6 图 8-5 中的 ΔP , $\Delta \lambda$ 定量表示图（在光纤末端测量）

§ 8.1.3 尖锥端光纤耦合理论模型

在 § 8.1.2 中我们已定性地讨论了激光器与单模光纤的耦合问题。在 5 种基本结构中，非平端面光纤的耦合效率都高于平端面光纤。为了进一步设计这些非平端面光纤的表面状态，在这里引入尖锥端光纤耦合理论模型：它可以涵盖了 § 8.1.2 中的 4 种非平端面光纤的情况，因而是具有普遍意义的。

为了设计出最佳角度尖锥端光纤，我们应用一个模式耦合理论模型来计算半导体激光器和尖锥端光纤的耦合效率及反射损耗。这个模型由以下几部分组成：①半导体激光器和光纤中模场的高斯模近似；②高斯模的传输规律；③尖锥端光纤的模场相位传输因子；④用来计算耦合效率和反射损耗的模式匹配公式。

如上述，假设光纤和 LD（半导体激光器）的模场为高斯模场，这是基于电磁场理论推得的单模光纤和 LD 的模场很接近于高斯模场分布面得的。通常 LD 的模场为椭圆形，则其

在出射窗口处的横向场分布可表示为

$$\psi_l(x, y) = A_l e^{-\left[\left(\frac{x}{\omega_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{y}{\omega_{oy}}\right)^2\right]} \quad (8-1)$$

式中, x 轴和 LD 的结平面平行, A_l 为场振幅, ω_{ox} 和 ω_{oy} 分别为 LD 在 x 和 y 方向的模半径, 并假定高斯光束的束腰在 LD 的出射端面处。另外光纤中模场为椭圆形, 则其横向场分布可表示为

$$\psi_f(x, y) = A_f e^{-\left[\left(\frac{x}{\omega_y}\right)^2 + \left(\frac{y}{\omega_x}\right)^2\right]} \quad (8-2)$$

式中, A_f 为场振幅, ω_y 为光纤中的模半径。

利用高斯模的传输规律, 我们可以得到经过一段距离 z 之后的 LD 模场分布。其表达式为

$$\psi_{lz}(x, y, z) = \frac{A_l(\omega_{ox}\omega_{oy})^{1/2}}{[\omega_x(z)\omega_y(z)]^{1/2}} e^{-\left[\left(\frac{x}{\omega_x(z)}\right)^2 + \left(\frac{y}{\omega_y(z)}\right)^2\right]} e^{-ik\left[\frac{x^2}{2R_x(z)} + \frac{y^2}{2R_y(z)}\right]} e^{-ikz} e^{\left[\frac{\phi_x(z) + \phi_y(z)}{2}\right]} \quad (8-3)$$

$$\omega_x(z) = \omega_{ox} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_{ox}}\right)^2} \quad (8-4)$$

$$Z_{ox} = \frac{\pi\omega_{ox}^2}{\lambda} \quad (8-5)$$

$$R_x(z) = z + \frac{Z_{ox}^2}{z} \quad (8-6)$$

$$\phi_x(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{Z_{ox}}\right) \quad (8-7)$$

式中 $k=2\pi/\lambda$, $\omega_x(z)$ 和 $R_x(z)$ 分别为波前在 x 轴方向的模半径和曲率半径, 以 y 代替 x 可得 $\omega_y(z)$, Z_{oy} , $R_y(z)$ 和 $\phi_y(z)$ 的表达式。

光纤头处的尖锥相当于在光纤端面上加了一个微透镜, 起到一个传输因子的作用。本节就是利用这个传输因子来使 LD 的光场和光纤中的传输光场达成匹配。考虑到光纤中纤芯和包层的折射率相差很小, 故可用同一个折射率来表示它们, 在此前提下可得尖锥光纤头的传输因子为

$$\psi_\phi(x, y, z) = e^{ik(n_1 - n_2)\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cot(\theta)} \quad (8-8)$$

式中, θ 为半锥角, n_1 和 n_2 分别为光纤和空气中的折射率 (见图 8-7)。式 (8-8) 反映出 θ 因子在匹配过程中的重要性。

最后利用模场匹配公式, 对光纤中的模场 ψ_f 和经过距离 z 及传输因子变换后的模场 $\psi_l = \psi_{lz} \psi_\phi$ 进行计算, 可得两模场间的匹配系数, 而此匹配系数即为 LD 到光纤的耦合效率 η_0 , 故有

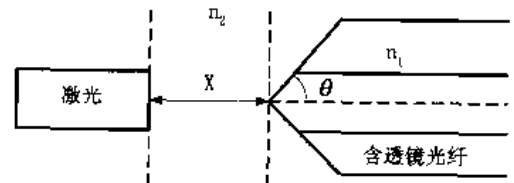


图 8-7 尖端光纤与 LD 耦合

$$\eta_o = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_f \psi_{iz}^* \psi_{\phi}^* dA \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_f \psi_f^* dA \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{iz} \psi_{iz}^* dA} \quad (8-9)$$

通过改变轴向距离 z 和半锥角 θ ，我们可以获得最大耦合效率。当然，最大耦合效率的大小是和 LD 模半径、光纤的模半径及 LD 的波长相关的。

当我们来计算尖锥端光纤头的反射损耗时，只需对入射光场和反射光场进行模场匹配计算即可。而反射光场是入射光场经尖锥头的传输因子变换得来的，此时，由于反射光和入射光方向相反，且经光锥头有来回两次传输变换，故尖锥头的传输因子就变为

$$\psi_{\phi r}(x, y, z) = e^{-2jk(n_1 \cdot n_2)\sqrt{x^2+y^2} \cot(\theta)} \quad (8-10)$$

利用模场公式计算入射光场 ψ_{iz} 和反射光场 $\psi_r = \psi_{iz} \psi_{\phi r}$ 的匹配，并计入菲涅尔反射 R ，可得反馈率 η_r

$$\eta_r = \frac{R \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{iz} \psi_{iz}^* \psi_{\phi r}^* dA \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{iz} \psi_{iz}^* dA \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_r \psi_r^* dA} \quad (8-11)$$

同样改变轴向距离 z 和半锥角 θ 可以减小反馈率（即加大了反馈损耗）。

此理论模型同样适合于计算其他形状的微透镜光纤（如球形、拉锥形及其双曲面形等）。需指出，此理论模型耦合效率的计算忽略了微透镜端面处的菲涅耳反射，故计算结果要比实测值偏大。

§ 8.2 微光学元件扩束耦合系统设计

1. 简介

要制作具有某些特定功能的纤维光路器件，就需要在被耦合的光纤端面之间插入必要的微小光学元件。然而，耦合损耗随着纤维端面轴向分离距离加长呈线性地增加。为了解决这一问题，人们索性把光纤端面大大地拉开，在其间加入透镜，让发射和接收纤维光路的芯互为一成像光学系统的物—像点，以达到提高耦合效率的目的。这样便引起了纤维光路中成像问题的研究。这种耦合方式，文献上又叫做扩束（expand beam）型耦合。我们把目前已经提出并获得某些应用的这类光学系统汇集于图 8-8，下面将对这些系统加以介绍。

2. 扩束型耦合光学系统及其主要特性

(1) 球、平—凹透镜棒和自聚焦棒透镜系统

文献[35]对图 8-8 (a)，图 8-8 (b)，图 8-8 (c) 这三种扩束型耦合光学系统做了较详细的比较分析。我们把它们的光学特性整理于表 8-1，表中符号意义示于图 8-9，三种系统的球差计算曲线如图 8-9 所示。由图可见，只要把制作球透镜和平—凹透镜棒之玻璃的折射率取得足够大，其球差不仅可以与自聚焦相比拟，而且还可以更小。

文献[35]还对这三种扩束型耦合光学系统的光耦合效率，以式 (8-12) 描述的光纤为例，做了较为普遍的分析。

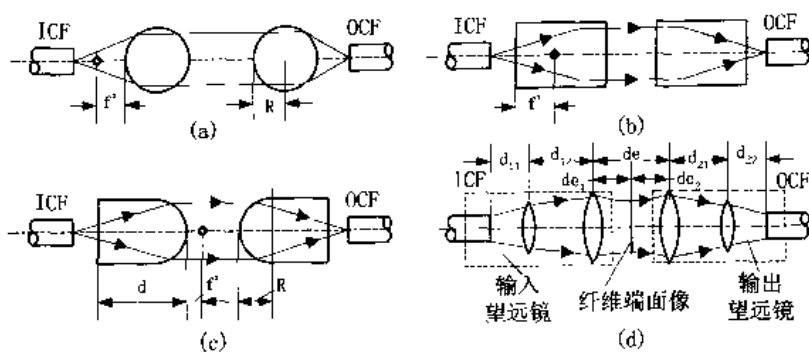


图 8-8 扩束型耦合光学系统

ICF—输入光纤 OCF—输出光纤

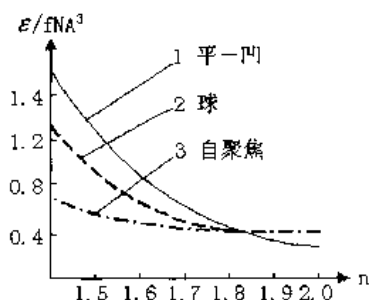


图 8-9 平-凹、球、自聚焦透镜球差曲线

$$n = \begin{cases} n_f [1 - 2\Delta (\frac{\rho}{a})^\alpha]^\frac{1}{2}, & \rho < a \\ n_f [1 - 2\Delta]^\frac{1}{2}, & \rho \geq a \end{cases} \quad (8-12)$$

式中, a 是光纤的芯半径; z 是散焦长度。

在成像元件无轴向倾角和横向错位的情况下, 这三种系统的耦合效率为

$$\begin{cases} \eta_{si} = \eta_{si}^0 (1 - 0.43 S_a / f^2 NA) \\ \eta_{gi} = \eta_{gi}^0 (1 - 0.55 S_a / f^2 NA) \end{cases} \quad (8-13)$$

式中, f 是成像元件的焦距; NA 是光纤的数值孔径; S 是系统中两透镜之间的距离。 η_{si} 和 η_{gi} 是分别对突变和渐变折射率光纤的耦合效率。 η_{si}^0 和 η_{gi}^0 则是

$$\begin{cases} \eta_{si}^0 = 1 - 0.19 \Delta_a \\ \frac{\Delta_a}{\Delta_s} = 2^\frac{3}{2} \end{cases} \quad (8-14)$$

$$\begin{cases} \eta_{gi}^0 = 1 - 0.21 \Delta_a \\ \frac{\Delta_a}{\Delta_s} = 2^\frac{3}{2} \end{cases} \quad (8-15)$$

式 (8-14) 和式 (8-15) 中 Δ_s 的定义见表 8-2 中的耦合参数一栏。

表 8-1 球、平凹透镜棒和自聚焦透镜的特性

项 目	球 透 镜	球—凹透镜棒	自聚焦棒透镜
焦距	$\frac{nR}{2(n-1)}$	$\frac{nR}{n-1}$	$\frac{1}{n_0 g}$
主平面	R	$\frac{d}{n}$	$\frac{1}{n_0 g}$
球差	$\frac{1}{2} \left[\frac{n}{(n-1)^2} - 1 \right] f \text{NA}^3$	$\frac{2}{n^2(n-1)^2} f \text{NA}^3$	$\frac{z}{n_0^2} f \text{NA}^2$
耦合参数 ²²	$\frac{2}{a} \text{NA}$	$\frac{2}{na} \text{NA}$	$\frac{2}{n_0 a} \text{NA}$

根据上述结果,文献[35]作出结论,经过良好设计,球透镜、平—凸透镜棒和自聚焦透镜具有近乎相同的成像质量和极限为 95% 的光耦合效率。因此,他们已建立起了球透镜耦合扩束型光纤连接器的生产线,声称装配一只器件只要 5 min。当球透镜表面镀以减反射膜时,多数连接器的损耗小于 1 dB。所用玻璃球的参数是,折射率 1.83,半径 2.476 mm。

(2) 望远系统

用望远系统的扩束型耦合结构安排如图 8-8 (d) 所示。这种系统已用于矩阵光开关,其系统结构特点是 $d_{21}=d_{22}=f_1+f_2$ 。无模变换的条件为

$$\begin{cases} d_{31} = f_2 + \beta^2(f_1 - d_{11}) \\ d_{32} = f_2 + \beta^2(f_1 - d_{12}) \\ d_e = d_{31} + d_{32} \end{cases} \quad (8-16)$$

式中, β 是望远系统的横向放大率,即 $\beta = -f_2/f_1$ 。由 8-16 式可见,改变 d_{11} 和 d_{22} 便可以设计出需要的 d_e 。 d_e 的最大值 $d_{e\max}$, 它和 L_2 与 L'_2 之间的光束孔径角的最大值 ϕ_{\max} 之比定义为 R_e

$$R_e = d_{e\max} / \phi_{\max} \quad (8-17)$$

此 R_e 值将限制可能构成的光开关规模。对于 $N \times N$ 型矩阵光开关, R_e 应当满足如下条件:

$$R_e \geq 2N - 1 \quad (8-18)$$

R_e 值给定之后, $d_{e\max}$ 的最小值 $d_{e\max(\min)}$ 则为

$$d_{e\max(\min)} = 8a\alpha R_e^2 \quad (8-19)$$

式中, a 和 α 分别为光纤的芯径和数值孔径。

文献[36]对望远系统的装配公差及其对耦合效率的影响亦作了分析。用这种望远系统设计一个 10×10 的矩阵光开关,由合理的装配公差所引起的光耦合损耗仅为 0.5 dB。

3. 设计实例

(1) 光纤耦合球透镜系统

在目前将光纤耦合到光纤(或耦合到激光二极管和探测器)的各种技术中,球透镜方法是一种能允许设计者干预耦合过程中光束的方法。使用这种方法时,球透镜这样放置:使得光纤端面(或者输入/输出设备)位于球透镜的焦点上。则球透镜的输出是一束准直光束。如果有两个球透镜在轴向上排列成一条直线,那么光束将从一个焦点转移到另一个焦点。这

同一对薄透镜正好相似，该薄透镜通过准直器 / 聚焦透镜组合将物空间中继为像空间。通过耦合扩大光束，降低了转换对准灵敏度。

在这些小直径上，球透镜比薄透镜更容易制造。同样，球透镜在实验应用中，也容易对中。由于简单，球透镜耦合系统能比其他方法获得更好的耦合效率。使用通信光纤，已经实现了高达 95% (0.4dB 的插入损耗) 的耦合效率。比较大的球透镜比较容易处理，且准直后输出光束的直径也比较大，方便了对光束的作用，位移灵敏度达最小化。

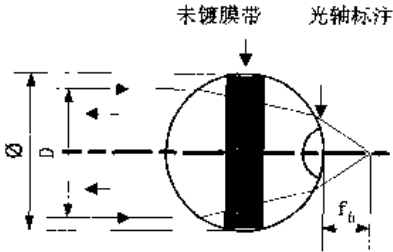


图 8-10 平行光径单球透镜会聚

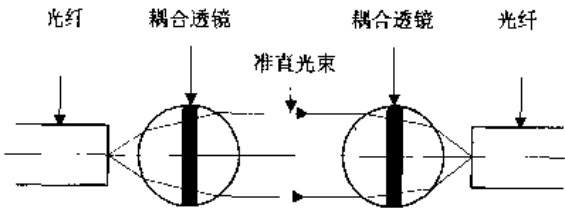


图 8-11 球透镜系统

球差是所有耦合系统中最主要的缺陷。光纤直径比耦合器焦距小得如此之多，以至于不存在离轴像差。有证据表明，球透镜的微小的负焦散将大大减少三级球差。

所有这些球透镜在两个半球面上都镀上了单层镁氟化物增透膜，由于这些球体有很高的折射率，导致了在特定波长低折射率镀膜的高效性。

光纤耦合系统设计理念与成像光学系统不同，作者认为它应以能量传输的多少作为主要评价准则。为此作者进行了一些设计试验研究，这里仅列举两个实例。这两个实例的光学系统结构都是两个球透镜，让 0.632 8 μm 的 He-Ne 激光束通过，材料不同，使通过的光能大不一样。设计 I（见表 8-2）是用 K9 ($n_d=1.51637$, $v_d=64.07$) 玻璃为材料；设计 II（见表 8-3）是用 ZF14 ($n_d=1.91761$, $v_d=21.51$) 玻璃为材料。设计 II 能让接近 60% 的光能通过，而设计 I 仅能让接近 40% 的光能通过。从图 8-12、图 8-13 径向能量分布图也能很直观地看出。

表 8-2 球透镜（K9）光纤耦合系统（设计 I）

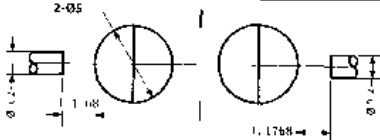
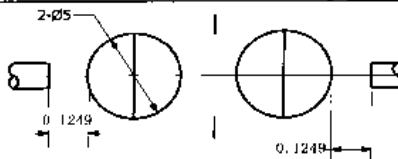
主要技术参数		结 构					
$\beta = -1'$ $f' = 38.239 \text{ mm}$ $NA \approx 0.3$							
参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n_d	v_d	D_g/mm	玻璃	
1	2.5						
2	∞	2.5	1.51637	64.07	0.937	K9	
3	-2.5	2.5	1.51637	64.07	1.652	K9	
4	∞ (光阑)	1			2.367		
5	2.5	1			2.313		
6	∞	2.5	1.51637	64.07	1.652	K9	
7	-2.5	2.5	1.51637	64.07	0.937	K9	

表 8-3 球透镜 (ZF14) 光纤耦合系统 (设计 II)

主要技术参数		结 构					
$\beta=-1^\circ$ $f'=38.239\text{ mm}$ $NA=0.3$							
参 数							备注
面号	r/mm	d/mm	n_d	ν_d	D_θ/mm	玻璃	
1	2.5						
2	∞	2.5	1.91761	21.51	0.279	ZF14	
3	-2.5	2.5	1.91761	21.51	0.929	ZF14	
4	∞ (光阑)	0.1			1.659		
5	2.5	0.1			1.651		
6	∞	2.5	1.91761	21.51	0.929	ZF14	
7	-2.5	2.5	1.91761	21.51	0.279	ZF14	

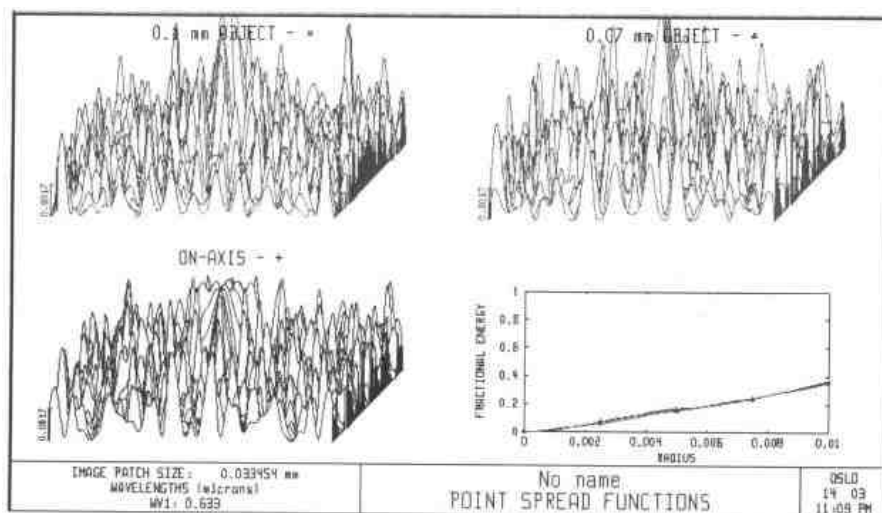


图 8-12 球透镜 (K9) 系统点扩散函数报告图

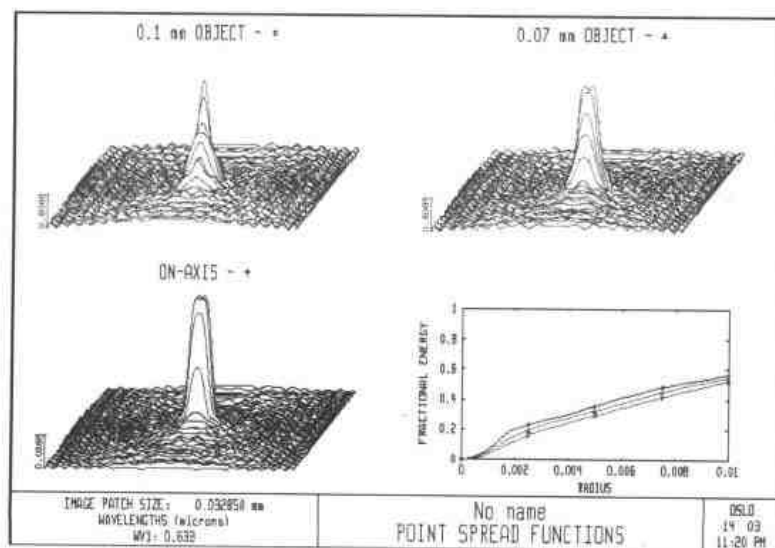


图 8-13 球透镜 (ZF14) 系统点扩散函数报告图

(2) 光纤端间平—凸透镜棒连接系统

作者设计了这一系统，结构见表 8-4。

(3) 光纤端间李斯特显微物镜连接系统

作者利用两个 $L=195\text{ mm}$, $10\times$ ($NA=0.25$) 消色差物镜组合成这一系统，两物镜间为平行光，扩束直径 $\phi=6\text{ mm}$ ，图 8-14 为系统结构参数示意图。

表 8-4 光纤与平凸透镜棒耦合系统

主要技术数据	结构	参 数				备 注
		r/mm	d/mm	n	D_0/mm	
NA=0.17		∞			5	* $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$
		4.108	12	1.514 (K9)	5	
		∞ (光阑)	0.25		5	
		4.108	0.25		5	
		∞	12	1.514 (K9)	5	

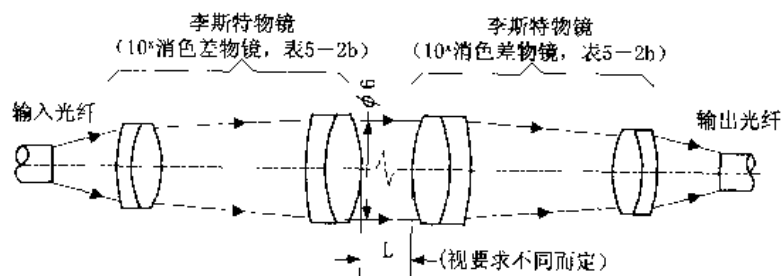


图 8-14 系统结构参数示意图

§ 8.3 光纤-透镜耦合激光会聚系统设计

由光纤传输激光，出射后通过透镜耦合系统到工作面的情况实例不少的，这里以 YAG 激光打标机光学系统为例说明这一系统的设计。该系统是用于对多模光纤出射的大功率 YAG 激光再会聚。

1. 与会聚光学系统有关的几点考虑

(1) 由多模光纤出射的光较由激光器直接输出的光发散角大很多，因此要设法压缩出纤光的发散角。

(2) 不同打标工件有不同的吸光（对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ ）系数，但都要有一定的刻痕深度。这要求在光源、导光光纤和耦合条件一定的情况下，由光学系统会聚出射的光能量密度尽可能大。因此，光学系统结构要简单，光学元件材料要能承受高辐射功率，吸光系数及对激光束的反射要小，并应对光学元件镀增透介质膜。

(3) 光纤传输的是大功率激光，对较大幅面的工件打标要用较长的时间。因此要求系统中光学元件口径要足够大，以致不会有太多的光能损失而使光笔发烫；但又不能过大，以免造成光笔外形太大及持笔器太大、太重。

(4) 刻划线宽要细，以能体现打标图案的细微部分，这要对 YAG 激光扩束且选用短焦距透镜；但在打标过程中，大功率 YAG 激光对工件的烧蚀、汽化溅射，会污损聚焦光学元件，这又要求工作距应尽量大，即选取长焦距透镜聚焦。这是一对矛盾，它应根据任务要求

做折中考虑以得到解决。

(5) 要做到对大和小幅面的工件以不同线宽都能打标, 就要求系统中某些光学元件容易更换或调节。

2. 会聚光学系统

会聚光学系统由三部分组成, 如图 8-15 所示。它是经综合考虑出纤激光的特性及其能量利用, 光学元件的参数、材料、加工及在光笔中的装校等, 解决矛盾, 优化而成的。

I 准会聚系统, 它的作用是压缩出纤光的发散角, 变换出纤光束的特性, 提高对后续光学系统的聚焦效率。其中的光学元件焦距、口径或相对孔径大小及它们与光纤端面的位置参数都要折中考虑优化。

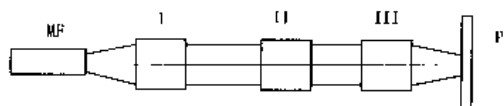


图 8-15 强激光会聚光学系统

II 扩束准直系统, 它的作用是在 I 的基础上对大功率 YAG 激光进一步扩束准直。采用离焦状态的倒伽利略望远镜系统, 其中的副镜 (焦距 f_1) 口径要与 I 中光学元件口径相匹配,

主镜 (焦距 f_2) 的位置能做微细调节移动。

此系统决不能采用倒开普勒望远镜系统, 否则会在副镜焦点区域击穿空气, 损坏光学元件和污损介质镀膜。

该系统的准直倍率可很好地近似用 f_2/f_1 来估计计算其中元件的诸参数。

III 聚焦系统, 它的作用是将扩束后的激光聚成高能量密度的小光斑。它将方便地采用一定相对孔径的球透镜, 即能较好地满足大多数任务的要求; 当采用玻璃材料的非球面单正透镜, 则可很好地校正球差, 得到更小直径的焦斑, 但它需经精心计算设计加工。

该系统不宜采用胶合透镜组。因是对波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的单色光聚焦, 故设计聚焦透镜时也不需考虑校正色差。

3. 应用

以准连续波多模输出的 Nd:YAG 激光器作打标光源, 其腔内插有声光 Q 开关, 脉宽小于 200ns 。泵浦灯在电流 20A 下重复率为 1kHz , 激光器的峰值功率至少为 40kW 。

选用阶跃石英光纤传光, 其数值孔径 0.2 , 内外芯径分别为 $300\mu\text{m}$ 和 $600\mu\text{m}$ 。光纤的输入和输出端面均分别经研磨抛光成一定形状。

用制做的光耦合装置将光束对准纤轴以最大效率耦合输入光纤中。试验中, 通常进行 20A 以下 1kHz 重复率时 YAG 激光的耦合、传输和打标。

会聚光学系统里初选元件参数, I 为单透镜, 焦距 f_0 是 10mm , 口径 11mm , 距光纤输出端面 13mm ; II 的准直倍率为 3.33 , 其中元件分别有适当的相对孔径; III 中单透镜的相对孔径是 0.48 。整个光学系统长 77mm , 可调焦范围 $0.5\sim 10\text{mm}$ 。各光学元件双面均镀有抗 $1.06\mu\text{m}$ 激光损伤的增透介质膜。

该光学系统用 $0.63\mu\text{m}$ He-Ne 可见红光作准直指示光。

此光学系统是在对三种设计系统做试验比较后选取的, 已成功地应用于智能化大幅面 YAG 激光打标样机中。某些参数、元件还在进一步优化加工中。

在综合考虑 Nd:YAG 激光器的输出功率、激光耦合效率、打标工件材料性质及光笔移动速度后, 经仔细调焦, 可使刻划线宽达 0.1mm , 一般线宽小于 0.2mm , 已能满足人们的

需要。

§ 8.4 光天线-光纤耦合系统设计

大气激光通信（自由空间光通信）是光通信领域近几年来发展起来的高新技术分支。它是以大气作为传输介质的一种通信方式。相对传统的通信方式而言，大气光通信的主要优点是：潜在的传输速率较高，通信容量大，光束方向性好，保密性高，不需要无线电频率使用许可，不需占用、租用光纤通道，体积小，重量轻，安装简便快捷，不影响市政建设，成本低。随着半导体激光器、光纤接收器件工艺水平的提高和激光通信技术的重大进展，作为 21 世纪的主要通信模式，大气激光通信也将得到越来越广泛的应用。要研发大气激光通信这一高技术，就必须涉足于光天线—光纤耦合系统。笔者由于教学的要求，作了一些这方面的设计研究工作。这里主要阐述的是自由空间光通信折射式接收光天线耦合系统设计。

§ 8.4.1 自由空间光通信接收系统前端概述

自由空间光通信接收系统前端，由光天线、耦合系统、滤波器、光电接收器 4 大部分组成，如图 8-16 所示。光天线应尽可能多地接收包含了目标信号光在内的自由空间的微弱光辐射，然后靠耦合系统把光耦合到滤波器的接收端，滤掉“噪声”，保留目标信号光，被探测器探测到转换成电信号。很显然，只要光天线从自由空间接收到的光能辐射足够多，光耦合系统插入损耗少，滤波效果又比较理想，则探测器就能接收到所需的信息。可见光天线是整个接收系统的“龙头”与关键部件。

光天线相当于一个物镜系统，可通过折射、反射和折—反射光学系统实施之。折射式物镜系统具有较易校正像差、能获得较大视场、结构较简单、装调方便等优点。

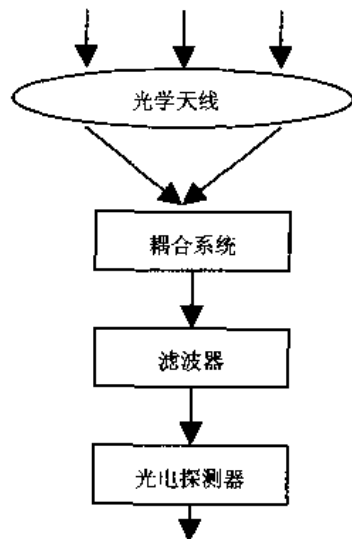


图 8-16 自由空间光通信接收系统前端

§ 8.4.2 对光天线设计的要求与设计理念

1. 对光天线设计的基本要求

可以把光天线看成是一个能接收自由空间某波长目标光微弱光辐射的物镜。对光天线的基本要求可简要概括为以下几点：

(1) 有大的通光口径（即光天线的入瞳直径）。光天线的大口径能最大限度地接收来自目标的光辐射，所以光天线是一个大孔径的光学系统。

(2) 选择合适的视场。大口径加大视场，使通光口径更大，有利于接收更多的信号光辐射，但视场应与后续的耦合、滤波器等匹配。

(3) 使用目标信号光波长消单色像差，消色差可视要求而定。

(4) 光天线的光学分辨率应与光电探测器分辨率匹配。光学分辨率可用弥散圆来量度，只有比较好地校正了球差、彗差、色散、场曲等像差后，才能减少弥散圆。

(5) 光电探测器为低通滤波器，为此要求光天线在低频下有好的光学传递特性。

(6) 无渐晕或渐晕很少，使尽可能多的光能通过系统到达探测器。

(7) 对光天线进行结构件设计时，应设置消杂光阑，尽量消除杂散光，以减少由此引起的像质变坏。

2. 光天线的设计理念

从系统论的角度看,光天线是接收、传输光能的系统。所以光天线的设计理念应从传统物镜设计要求成像清晰到追求能量接收多、传输损耗少、耦合高效的转变,这样才能获得最佳的设计结果。

§ 8.4.3 光天线设计

1. 对光天线初始结构优选的若干体会

对光天线这样的大孔径、大视场系统,逐步修改法是一种比较实用又容易获得成功的方法。即如前述,从已有技术资料 and 专利文献中选出其光学特性与所要求相接近的光学结构作为初始结构,通过像差计算逐步修改,达到满足光学特性要求的成像质量。用电子计算机做像差自动校正与平衡,实际上是从初始结构出发,不断反复迭代,直到各种像差符合要求为止。可见,初始结构的选择是十分重要的。

(1) 选型

我们在文献[17]中选择了多个大孔径的照相物镜和望远物镜进行光路计算,并对其中带有代表意义的镜头做了较深入的剖析。如图 8-17 中列举的 10 个透镜就是其中的一部分,10 个大孔径物镜依次按孔径由小到大排列;其中有大孔径的望远物镜、双高斯 (Plandr)、匹兹万 (Petzral)、柯克 (Tripiet) 及其改进型都可能成为折射式光天线的基本结构形式。我们将把 10 个镜头作为研究对象,探讨光天线的相对孔径 (D/f')、视场 (2ω) 与焦距等主要光学性能参数间的关系,以期从中引出一规律,指导初始结构优选。

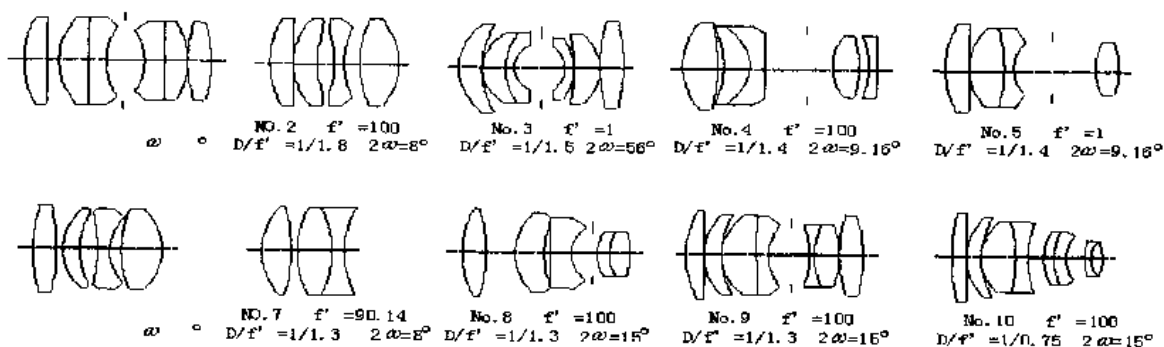


图 8-17 设计试验选择的镜头

(2) 光天线通光口径与基本光学性能参数间的关系

① 相对孔径 (D/f') 与通光口径敏感地线性相关

我们进行了设计实验,结果可从图 8-18 中直观地显示出来。由此可以得出如下结论:

a. 相对孔径 (D/f') 与口径敏感地线性相关,具有共性一面。

b. 有相同 D/f' 、不同结构的镜头实际入瞳直径有不同值。是一个值得关注的在共性条件下的个性差异。注意到这一差异,并刻意去利用它是很有实际意义的。例如, No.4、No.5、No.6 三个镜头,共同的标志是: $D/f' = 1/1.4$, 但入瞳直径 ϕ_λ 分别等于 $\phi 76.289$ 、 $\phi 74.086$ 、 $\phi 71.42$ mm。其最大与最小者面积比是 1:1.14 倍,假定自由空间信号光能量是均布的,则两者捕获到的能量比也将是同样的倍率。

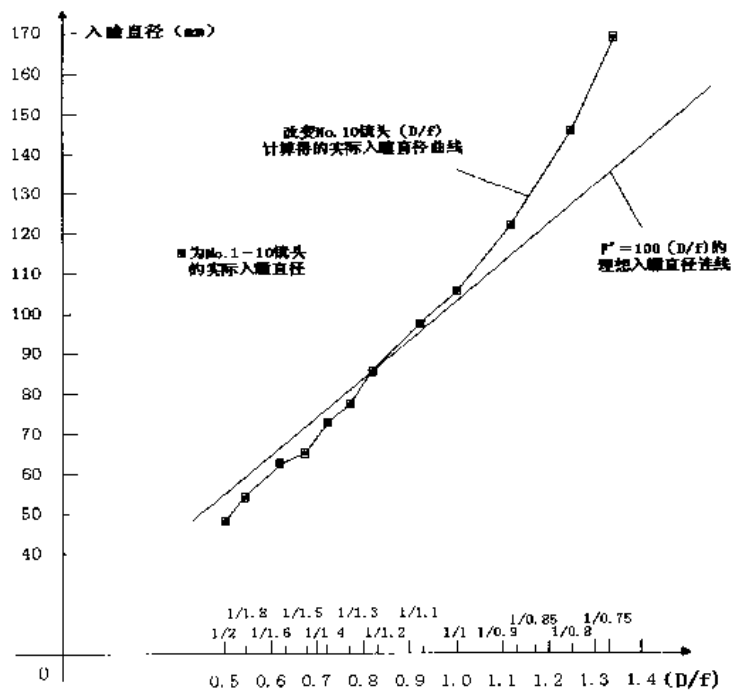


图 8-18 D/f' 与通光口径的关系

- ② 通光口径与焦距 f' 、像大小线性相关
- ③ 视场（视场角）变化对通光口径不大敏感，如图 8-19 所示

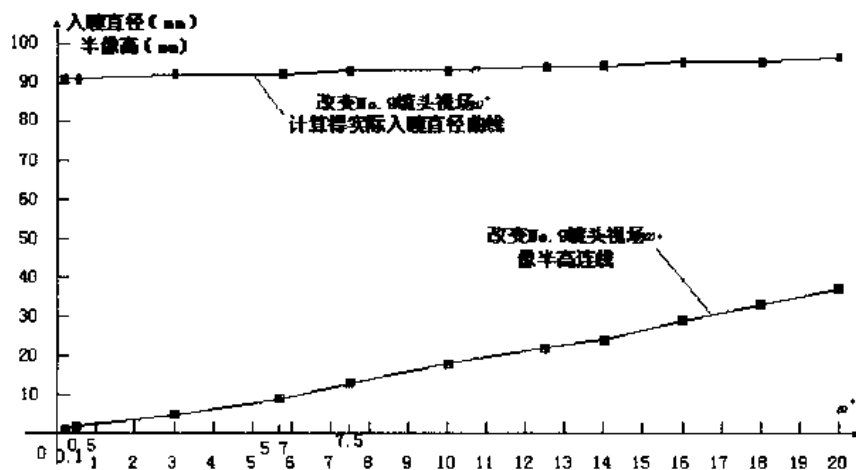


图 8-19 视场与通光口径关系

- ④ 孔径光阑位置变化，通光口径变化不大

我们把 No.2 镜头的孔径光阑分别置于第 5 面和第 7 面，通光口径分别为 $\phi 58.57$ 和 $\phi 58.328$ ，但出瞳距、入瞳距、出瞳直径变化较大。

- (3) 光天线各光学特性参数的约束条件 C_m

通过上述设计试验看出， (D/f') 、 2ω 、 f' 三者数值增大均能让通光口径增大，如前述光学镜头三个光学特性参数之间是互相关联、互相制约的，不可能希望同时提高，品质因素 C_m 是制约条件。

$$C_m = (D/f') \cdot \tan \omega \cdot \sqrt{f'/100} \leq 0.24$$

约束条件 C_m 主要使用在选型时，特别要注意 $f' \approx 1$ 的专利资料，如 No.2 镜头，在 D/f'

$=1/1.5$ 、 $2\omega=56^\circ$ 、 $\lambda e=546\text{nm}$ ，在 e 光校正单色像差，F 光、C 光消色差条件下， $f'=100\text{mm}$ ， $C_m=0.35447$ ； $f'=75\text{mm}$ ， $C_m=0.30698$ ； $f'=50\text{mm}$ ， $C_m=0.2505$ 。对上述 f' 值作了光路计算，结果表明只有 $f'=50\text{mm}$ 像质尚可。

(4) 减少光能损耗和提高经济性的结构选择

① 调和增大 (D/f') 、 2ω 与片 (面) 数少之间的矛盾

照相物镜是同时具有大相孔径和大视场的系统，可作为光天线的基本结构。但光天线与照相物镜有一定的差别，它既要求有大的相对孔径 (D/f') 和较大视场 (2ω) ，又希望系统的片数尽量少，因为片数越少光吸收率越小，透过率越高，系统的插入损耗越小。根据品质因素 C_m 的经验公式可知，要同时使 D/f' 大， 2ω 大，则系统就得复杂化，与要求片数少产生矛盾，所以要在 (D/f') 、 2ω 与片数三者之间谋求一个结果最优的妥协方案，就成为优选光天线初始结构的关键所在。我们选择了多个照相物镜的典型结构及其改进型，使用国外先进光学设计软件进行光路计算，并对像质进行了评价后发现：由柯克型发展起来的松纳型 (Sonnar) 的结构能比较好地符合这一要求。如图 8-17 中 No.5、No.8 镜头。

② 减少光能损耗的材质选用与经济性

笔者采用光学 CAD 软件计算了国外一些高质量的照相物镜后发现，由于在光学系统中合理地选用镧系玻璃，在不太复杂的条件下，光学系统的光学性能 (即 C_m 值) 可望提高。但国产 LaK、LaF、ZLaF 玻璃价格是普通光学玻璃价格的 3~4 倍，而光天线透镜直径一般比较大，使用这些玻璃成本太高，况且 LaK、LaF 玻璃光吸收系数类别都在 4~6 之间 (ZK 类为 1~4)，可见光学系统使用它们光能损失较大，从能耗、经济性这两个角度考虑，建议尽量避免或少用镧系玻璃为好。

光天线设计比常规的物镜设计还应多加一道计算光天线系统的光能损失量的程序，可按文献[6]导出的公式 (8-20) 粗略计算的光学系统的透过系数 τ ：

$$\tau = (0.85)^{N_1} (0.90)^{N_2} (0.96)^{N_3} (0.95)^{N_4} (0.99)^L \quad (8-20)$$

式中， N_1 、 N_2 分别是镀铝、镀银面数； N_3 、 N_4 分别是冕牌、火石牌玻璃和空气接触的面数； L 为沿光轴计算的玻璃总厚度 (以 cm 为单位)。

为了减少光学零件表面的反射损失，在透镜表面镀增透膜，镀双层或多层增透膜可使反射系数分别降低到 0.01、0.005。如所有透镜表面的反射系数都按 0.01 计，则公式 (8-20) 变为：

$$\tau = (0.85)^{N_1} (0.90)^{N_2} (0.99)^{N_3+N_4+L} \quad (8-21)$$

2. 光天线的像质评价

光天线捕获到自由空间信号光能量的最终归宿是光电探测器的像面，并应该尽最大限度为探测器所利用，因此对光天线的像质评价应立足于传统像质评价方法的基础上形成特有的评判指标。

(1) 用点列图确定探测器像面上的能量

通常要利用集中 30% 以上的点或点线所构成的图形区域作为其实际有效弥散斑，一般要计算上百条甚至数百条光线，工作量非常大。

(2) 用弥散圆表征与光电探测器分辨率匹配的光学分辨率

分辨率是评价成像光学系统的重要指标，光天线的像质也可用光学分辨率来评价，并用光学弥散圆来表征。文献[43]指出：多数红外和 F 数 $(D/f'$ 相对孔径倒数) 很大的系统，

光学弥散圆大于光电阵列探测器离散的像素面积, 则整个系统的分辨率由光学弥散圆所决定。当系统的等效弥散圆为器件像素有效宽度的 125% 时, 则可认为光学分辨率和像素分辨率基本平衡, 这时光天线把捕获到的自由空间信号光能投射到探测器像素的边缘, 其光能量最大限度地被像素吸纳, 从而获得较高的耦合效率。

(3) 光学传递函数 (MTF) 指标

要确保光天线传输的信息保真, 不仅要考虑光天线的光学分辨率与光电探测器分辨率匹配, 还应注意到在频域上的匹配。文献[43]指出: 据奈奎斯特定理, 一个光电器件能够分辨的最高空间频率等于它的采样频率 f_s 的一半, 这个频率称为奈奎斯特频率 f_N ($f_N=f_s/2$)。光电探测器分辨率制约了光学系统的分辨率。过高的光学系统分辨能力不仅不会增加系统整个的分辨能力, 且其中所产生超过奈奎斯特频率极限的高频部分将被反射到基本频带中, 发生莫尔干涉效应, 将发生周期频谱交迭混淆, 影响信息保真传输。基于此, 光天线应在低频下有好的传递特性。笔者认为光天线的 MTF 值的界定, 可借鉴文献[41]指出的, 微光和主动红外成像系统要求物镜在 10lp/mm 的空间频率时, MTF 值不低于 75% 的指标。

§ 8.4.4 设计实例

设计一套与多模光纤直接耦合的折射式接收光天线系统。

选择如图 8-17 中 No.8 镜头, 因为它通光口径大, 结构比较简单, 且仅有 1 片玻璃使用镧系玻璃, 不仅经济性较好且光能损耗少。

经过计算机自动优化迭代, 焦距缩放后得如表 8-5 所示结果; 光线追迹情况见图 8-18; 表 8-6 是光学传递函数 (MTF) 值; 据公式 (8-20) 计算: $\tau=0.8828$; 据公式 (8-21) 一面一面计算, 光线经全部系统信号累积透过率 $\tau=0.9252$ 。

主要技术数据: $f'=57.988\text{ mm}$, $D/f'=1/1.3$, $2\omega=\pm 0.1^\circ$; 取 $\lambda_z=532\text{ nm}$ 校正单色像差, $\lambda_1=534\text{ nm}$ 、 $\lambda_2=530\text{ nm}$ 校正色差; $l=\infty$, $l'=11.522\text{ mm}$, 像半高 $y'=0.10121$, $\text{NA}'=0.3846$ 。

表 8-5 光天线结构参数

面号	r/mm	d/mm	玻璃	n_d	r_d	D_d/mm	备注
1	77.9172					29.07	* 入瞳直径 $\phi_s=46.88$ * * 无渐晕
2	-443.74	7.49	ZK10	1.6221	56.71	28.87	
3	29.261	9.71				20.85	
4	82.244	12.06	ZK10	1.6221	56.71	17.63	
5	97.6595	1.8				16.37	
6	27.7669	13.87	ZF7	1.80627	25.37	9.03	
7	∞ (光阑)	4.06				7.99	
8	-21.797	4.81				7.6	
9	39.1255	2.77	KF2	1.51539	54.48	7.87	
10	-28.6934	6.93	LaF10	1.78831	47.39	7.94	

表 8-6 光天线光学传递函数 (MTF) 值

线 对 f (lp/mm)	轴 上		0.7 视 场		1 视 场	
	T	S	T	S	T	S
5	0.936	0.936	0.936	0.936	0.936	0.936
10	0.804	0.804	0.804	0.803	0.804	0.803
15	0.697	0.697	0.699	0.697	0.7	0.697
20	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657
25	0.644	0.644	0.638	0.643	0.633	0.642
30	0.601	0.601	0.595	0.599	0.589	0.598
35	0.528	0.528	0.531	0.526	0.533	0.525
40	0.472	0.472	0.483	0.471	0.492	0.471
45	0.463	0.463	0.461	0.463	0.458	0.462
50	0.471	0.491	0.441	0.469	0.419	0.467

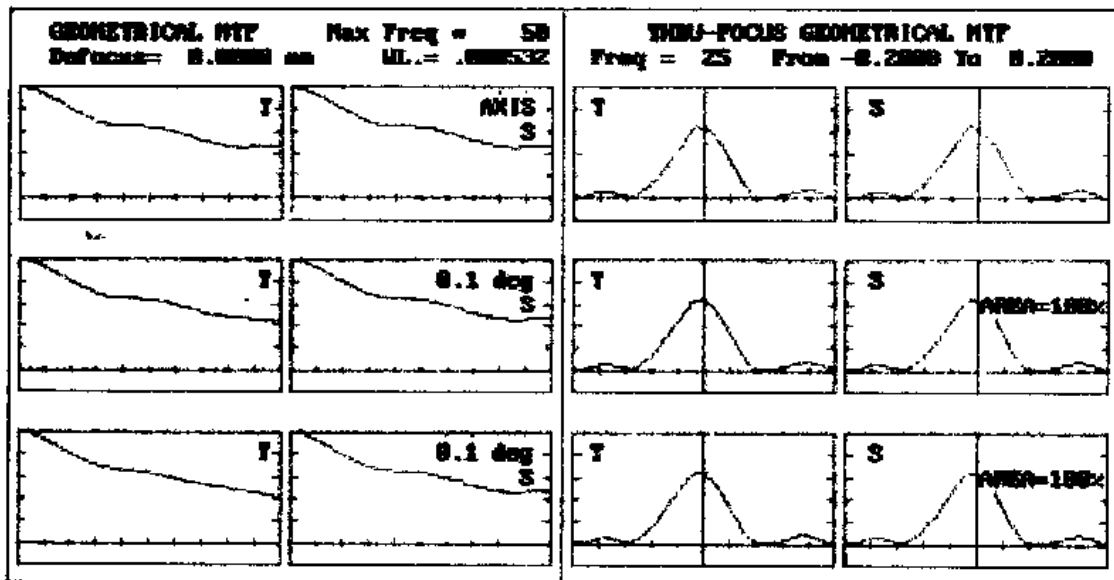
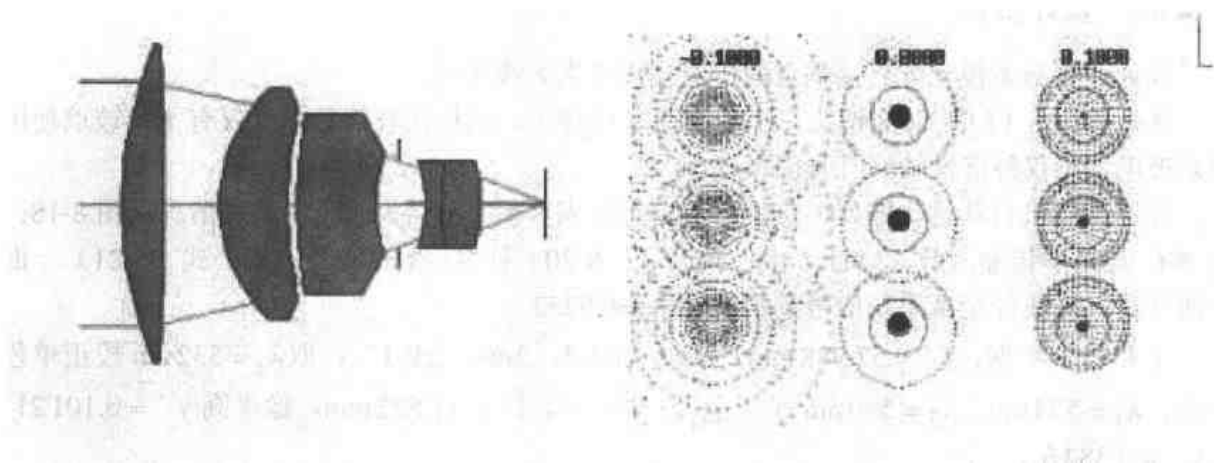


图 8-20 光天线像质评价

第 4 部分 光学设计实务

第9章 光学设计 CAD 软件应用基础

§ 9.1 国内外光学设计 CAD 软件概述

§ 9.1.1 光学设计 CAD 软件的发展历史

光学系统像差的自动校正,也称计算机辅助光学设计,其历史可追溯到半个世纪之前。20 世纪 50 年代美国国家标准局首开用电子计算机进行光线追踪的先河,经过了几年的研究开发,积累了一些使用电子计算机进行自动光学设计的经验,这为后来转入自动光学设计阶段奠定了基础。半个世纪以来,很多科技工作者在自动光学设计这一领域里,不断探索创新,辛勤耕耘,取得了许多优秀成果,惠及工程光学乃至整个光学学科,并逐步形成了光学设计中的计算机辅助设计即光学设计 CAD 这一光学分支。

在光学设计 CAD 领域中国际知名的学者有:英国哈佛大学的贝克、英国曼彻斯特大学的布莱克、霍普金斯,美国柯达公司的梅隆以及格雷、齐哈德、格拉采尔等。在国内,长春光机所、上海光机所、西安光机所、上海光学仪器研究所、北京大学、清华大学、南京大学等单位和个人,从 20 世纪 60 年代初开始,先后将电子计算机应用于光学设计。70 年代初,北京理工大学等单位也加入此行列。随着像差分布计算程序、空间光线计算程序、点列图计算程序、传递函数、光学系统公差计算程序和变焦系统的像差自动校正程序的相继投入使用,从而初步形成一个比较完整的光学设计软件包。到了 20 世纪 80 年代,北京理工大学袁旭沧教授等在原先的微机用光学设计软件包的基础上,研发了“SOD88 微机用光学设计软件包”。这是目前国内研发的应用最广的具有自主知识产权的光学 CAD 软件。

最近出版的《计算机辅助光学设计的理论与应用》(李林,安连生,国防工业出版社,2002.4)一书是一本关于光学设计 CAD 软件的数学模型及编程特点的专著,它填补了我国在此领域空白。

§ 9.1.2 有代表性的中外光学设计 CAD 软件简介

对于光学设计 CAD 的研究,在半个世纪以来一直在持续发展着,高质量的光学设计软件产品已进入国际市场。在这里选择几个有影响的光学设计软件作一简介。

- OSLO (美国)

OSLO 软件目前由美国 Lambda Research Corporation 出品。OSLO 程序由最优化、点列图、透镜结构图、光线追踪和透镜参数输入等子程序构成。本章及后续章节将对 OSLO 软件作详细的阐述。

- SIGMA (英国)

由英国 Kidger Optics 公司出品。SIGMA 软件是具有 20 世纪 90 年代先进水平的、成熟可靠、在欧洲应用很广的光学自动设计软件。除了能进行常规光学设计外,还具有以下功能:自动优化数据,计算光学传递函数,计算倾斜和非共轴系统,还可作光栅、光全息计算等。

- ZEMAX (美国)

ZEMAX 是由 Focus Software Inc 发展出来的一套光学设计软件。它有 SE (标准版)、XE (完整版)、EE (专业版) 三个版本。

ZEMAX 软件可模拟并建立如反射、折射、衍射、分光、镀膜等光学系统模型。可以分析光学系统的成像质量, 如各种几何像差、点列图、光学传递函数 (MTF)、干涉和镀膜分析等。此外 ZEMAX 还提供优化的功能来帮助设计者改善其设计, 而公差容限分析功能能帮助设计者来分析其设计在装配时所造成的光学特性误差。

- CODE-V (美国)

CODE-V 是由 Optical Research Associates 公司出售的大型设计软件。它具有光学设计、分析、照度计算等功能; 提供了超过 2 400 种以上的光学设计实例。CODE-V 的功能非常强, 但价格也相当昂贵。

- SOD88 (中国)

SOD88 微机用光学设计软件包是由北京理工大学光电工程系技术光学教研室研制的。是我国在光学仪器行业 and 高校、科研院所应用最广, 具有自主知识产权的光学设计软件。它具有像质评价 (几何像差、像点弥散圆、光学传函等)、变焦距系统像差计算与像差自动校正、公差计算等功能。尽管国产软件在功能强大和迭代收敛速度方面不如国外产品, 但由于其价格性能比低, 还是值得推介的。

此外, 中科院长春光机所开发的光学设计软件包 CIOES 虽不及 SOD88 软件应用面广, 但其功能亦是相当优秀。国外比较流行的光学设计软件还有 BEAM FOUR、OPTICA 等。

上述提到这些光学设计 CAD 软件都能够解决共轴系统、偏心系统、变焦光学系统的光学设计问题。能够处理平面、球面、柱面、非球面、光栅等各种面型; 能够进行系统性能的优化, 变焦系统凸轮曲线的优化; 能够做衍射光学传递函数和几何光学传递函数分析; 能够进行辅助加工和公差分析等, 且具有相当强的绘图功能, 即根据数值计算结果, 绘制出各种像差曲线图、传递函数曲线图、点列图、二维光学系统结构图、光路图, 有的还能显示三维光学系统结构图, 光能分布模拟图等等。各种软件包还配置了不少与光学设计相关的数据库, 例如“玻璃型号数据库”, 提供给设计参考的设计实例数据库等。

总之, 光学设计 CAD 的出现并不断完善, 对光学科技工作者来说是福音! 它能使设计者的工作环境更具智能色彩; 能改变设计人员的思考方法和工作方式, 大大减轻了设计人员的劳动强度, 更充分地利用前人的设计成果。研发单位利用光学设计 CAD 不仅能节约大量的人力资源, 缩短设计周期, 还可以开发出更多质量更高、结构更简单的光学仪器与产品。

§ 9.2 OSLO 软件简介

OSLO 是 Optics Software for Layout and Optimization 的缩写。Rochester 大学为了光学设计教学的需要, 开发出了一系列光学设计软件。在此基础上, 逐步演变、融合, 形成了 OSLO 软件。OSLO 目前有 3 种版本, 分别为 OSLO SIX, OSLO PRO, 和 OSLO Light, 广泛适用于光学应用的需要。

§ 9.2.1 OSLO 的特点

OSLO 之所以分为 3 种版本是为了扩大其适用性, 可以用删掉了一些高级功能的简版软件来提供经济实用的服务。而在 Sinclair Optics 的内部软件研发部门, 则是只有一种源程序。3 种不同版本只是根据编译方式的不同, 从同一种源码延伸而来的, 由此确保了所有的用户

都可以用到最高质量的软件。由于简版软件只是主程序的一部分，它们是相互兼容的。其低级版本存档的透镜文件也能用更高级版本程序读取。

OSLO 这套软件的功能与 ZEMAX 软件大体相似，它可以模拟光学系统，也可以分析光学系统的成像质量。成像质量可以用图示输出方式呈现。如各种像差曲线、MTF 图、能量集中度、点扩散函数图等，也可以文本窗口输出数据的方式输出。

§ 9.2.2 OSLO 的 3 种版本

为了给不同设计要求的项目提供一个合适的工具，OSLO 根据三种不同用户（高等研发，专业光学设计和一般光学工程）的要求分为 3 种版本。

1. OSLO SIX

OSLO SIX 是 OSLO 的王牌产品。它主要用于高等研发。除了 OSLO PRO 和 OSLO Light 所具有的透镜设计和评估的特性外，它还包括了以下的一些特性和前端设计能力，如：

MTF/波前公差制定 (MTF/Wavefront tolerancing)

非顺序性光线追踪 (Non-sequential ray tracing)

不对称表面 (Surfaces without symmetry)

全局坐标 (Global coordinates)

透镜阵列 (Lens arrays)

向量衍射 (Vector diffraction)

部分相干 (Partial coherence)

Eikonal 表面 (Eikonal surfaces)

用户定义表面及梯度折射率 (User-defined surfaces and index gradients)

2. OSLO PRO

OSLO PRO 是一种高级光学设计软件，它是在 OSLO Light 的基本优化特性的基础上增加了一些高效的可操作的编译方法。OSLO PRO 适用于那些对其软件的优化部分做重点要求的光学设计者。OSLO PRO 的内容包括：

多配置优化 (Multiconfiguration optimization)

拉格朗日乘子约束 (Lagrange multiplier constraints)

GENII 的变化量表制定公差 (GENII change-table tolerancing)

自动或用户定义误差函数 (Automatic or user-defined error function)

Arthur Cox, Warren Smith 和光学工具库 (Optical Toolbox libraries)

其他软件透镜文件的转换 (Lens translation from other programs)

CCL (编译语言) [CCL (Compiled command language)]

3. OSLO Light

OSLO Light (OSLO LT) 是 Sinclair Optics 公司提供的一套免费教育软件。通过学习使用 OSLO 程序，它可以使读者对光学系统设计的操作有初步了解，进而使用功能更强的高级软件 OSLO Prm 和 OSLO PRO，后两种高级软件其操作与 OSLO LT 大致相同。为了方便读者学习与使用，笔者特将从网上下载的 OSLO LT54 软件作为重点推广的对象，OSLO LT 可能是迄今为止世界上惟一的免费提供的光学设计 CAD 软件。OSLO LT54 最多能计算 11

个面，对中等复杂程度的镜头亦能对付。

OSLO Light 含有 OSLO 的基本特性，有经济、易用及功能强大的特点。特别指出，OSLO Light 内包括了一种叫 SCP 的宏语言，能够使用软件中包含的成百种命令。在 OSLO Light 中使用这种语言，不但能增强软件的功能，而且还能建立优化的误差函数。在用普通手段解决一般光学任务的基础上，还可以针对不同的特殊问题提供完全多样化的解决方法。

OSLO Light 是一种易操作的全方位，全功能的光学设计软件：

各种标准表面（球面，二次曲面，复曲面等）

任意级次的旋转对称奇/偶非球面

阶梯形非球面

衍射元件

梯度折射率元件

完全几何分析（像差、光线追踪、点列图等）

完全物理光学分析（波前面，MTF，扩散函数，高斯光束等）

巨大的透镜数据库

面数、光线数、色光数不受限制

扩展光源和激光光源（包括激光二极管）

热分析

Zernike 分析

光纤耦合

柔性优化及公差制定

SCP 宏语言（SCP macro language）

§ 9.3 OSLO LT 54 基本概念

在学习 OSLO 软件之前，或者广义认为，在学习光学设计 CAD 软件之前，必须建立起这样一个概念：“镜头亦文件”。因为设计镜头就是用结构参数、文字和图形等信息把镜头形象地模拟出来。要学好 OSLO，用户必须弄明白程序中数据的基本特性。OSLO 数据主要分为 4 种基本类型：面数据，操作条件，程序环境设定和编辑表数据缓存区。

1. 面数据编辑表（Surface data spreadsheet）

面数据包含着透镜的结构参数，例如：曲率半径、厚度、玻璃种类、非球面常数等等。所有的面都以数字标记，其中第 0 面为物面。在一般情况下连续的透镜组，其面数依光束穿过的顺序依次标为第 1 面，第 2 面……第 n 面。

在 OSLO 里有 4 种方式输入或修改面数据：

（1）面数据编辑表（surface data spreadsheet）（见图 9-1）。利用“更新”菜单（update menu）或利用 F5 的工具栏按钮。

（2）命令行编辑。各项数据、面数及其数值，直接由命令行（command line）输入。

（3）内部透镜编辑器（internal lens editor）。程序可以利用此编辑器，输入某一面的数据。

（4）离线输入。可以脱离 OSLO 利用任何编辑器以文本文件的方式来编辑面数据。

虽然编辑表方式（Spread-sheet）是最方便的，但其他方式亦有其独到的用处。

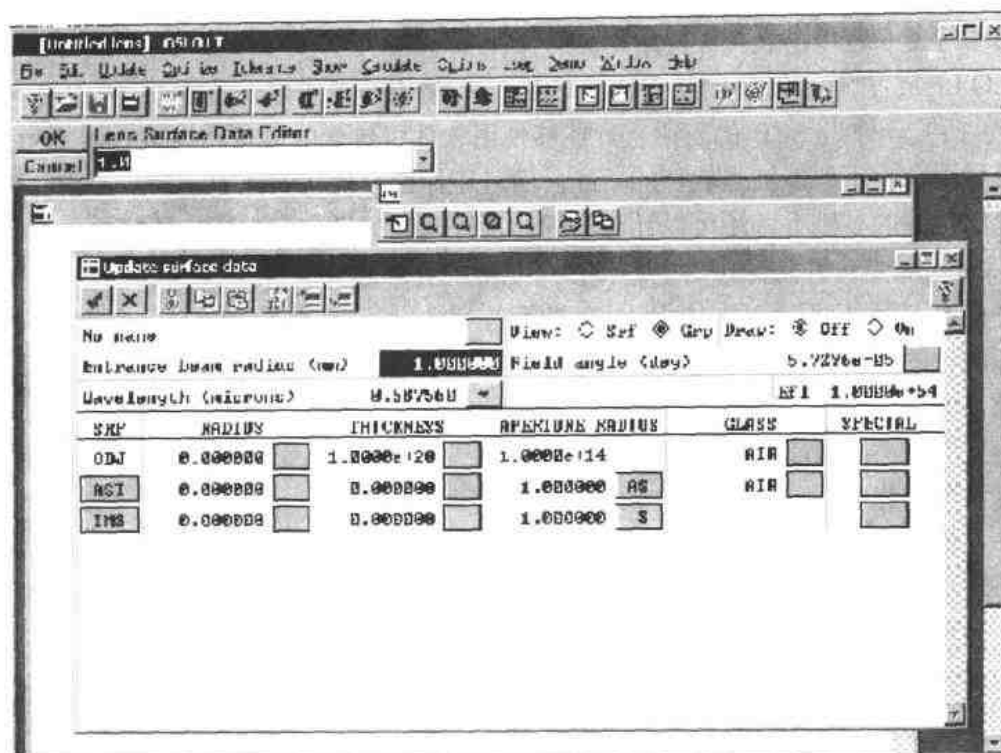


图 9-1 面数据编辑表

2. 透镜操作条件设定 (Operating conditions)

透镜操作条件设定是指对整个透镜组的相关参数进行设定, 见图 9-2。传统意义的透镜操作条件设定是指对孔径及视场进行设定。OSLO 的透镜操作设定还包括对其他参数和操作条件的设定。有些在其他光学设计软件中都包括, 如波长、误差函数等的设定; 有些则是 OSLO 新增加的。例如: 元件图制图数据; 点列图操作设定; 避免重新键入大量数据的透镜制图条件设定。

需要注意的是, 透镜操作设定是附在透镜数据之中, 而且是与面数据一起存储在透镜文档中。这样就简化了设计过程, 一旦完成透镜数据输入之后若有选用就自动引入。例如一组特定光束用于透镜制图, 则不论何时, 一旦启用这一含有特定光束的透镜图, 此特定光束透镜设定即可使用。

3. 程序环境设定 (preferences)

程序环境设定与透镜操作设定有些不同。程序环境设定是设定整个 OSLO 程序, 它对所有透镜都起作用。例如: 图形窗口的显示、数字格式等。大多数选项一旦被设定好后立即生效, 但有一部分设定必须重新启动 OSLO 才能生效。例如: 设定透镜面数的上限、设定点列图的光束及程序可以用的波长和字型。一旦程序设定被确定, 其内容会被存入配置设定文档 (configuration file) (*.ini), 而且将在程序启动时被读取。

4. 编辑表数据缓存区 (the Spreadsheet Buffer)

编辑表数据缓存是 OSLO 数据结构中一个重要部分。就 OSLO 而言, 编辑表数据缓存只是个输出型数据结构, 其实它是连接程序与用户之间的主要通道。编辑表数据缓存区附在每个文本窗口 (text window) 之中, 一旦 OSLO 将浮点数字输出到文本窗口, 与此同时将

备份暂存于编辑表数据缓存区，并将保留全部数据精确度。而各个暂存元素均可以在数据输入区（Data entry）以 SCP 及 CCL 宏命令加以定址，或者单击文本窗口的数字来显示暂存元素的内容。

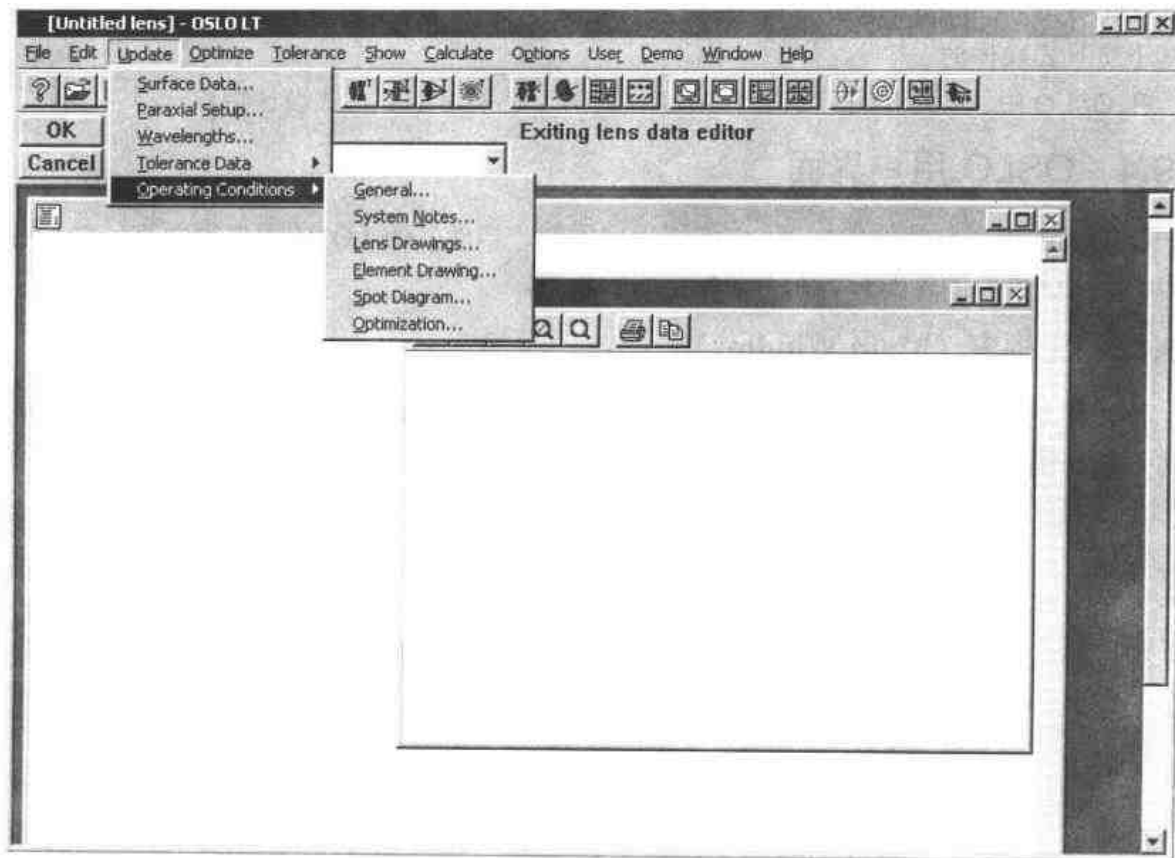


图 9-2 透镜操作条件控制选项

星命令(Star command) 尽管 OSLO 对一些不留心的用户看来只是一个普通的 Windows 应用程序，实际上它是一个应用程序和宏语言的综合体。部分指令是由程序提供并属于核心部分，而其他部分则是由宏语言编写成的。对用户而言，它属于哪一类，并不容易分清。OSLO 使用了两种宏语言：SCP 和 CCL。OSLO Light 包含了 SCP，是一种注释语言。OSLO PRO 和 OSLO SIX 另外还包括了 CCL，是一种编译语言。两者都是采用了 C 语言结构形式。

用 SCP 编写的宏命令执行时都要在命令字前加一个星号，因此又叫做“星命令 (Star command)”。因为 OSLO 所支持的菜单可以被用户更改，因此高级用户可以编写自己的星命令，并与 Sinclair Optics 所提供的宏命令相融合。由于这些命令经常被用于特殊目的，它们不像内部命令那样受范围限定，因此容易给程序增加新的特色。

单击/命令接口 (Click/Command Interface) 如上所述，可以给 OSLO 程序增加星命令。这些命令既可被加入菜单系统中作为菜单选项来执行，也可以在命令行状态下直接输入命令名执行。尽管一些 Windows 程序自称“不用学习命令用法”，但实际上所有应用程序的执行都是基于命令的。区别仅在于这些命令能否直接被用户访问。OSLO 保留了传统命令行供用户选择，这样可以更有效地使用该软件。单击/命令 (Click/Command) 表示用户既可以输入一个命令，也可以用鼠标单击菜单图标来执行程序。

在一个编辑表打开时我们可以输入各种命令。OSLO 能分辨命令和数据，并执行相应的

操作。基于此，OSLO 编辑表上的各单元格又可称为智能单元格。

交互式操作（Interactive operation） OSLO 其实是一种交互式操作程序。在执行完每一个命令后，将进行相应的操作并把内部刷新后显示于界面上。但也有一些命令例外，如和输入优化数据（Optimization data）相关的几个操作命令。对于大多数的 OSLO 命令而言都是基于交互式操作的。

在 OSLO 中，程序的交互式操作最经典的例子是采用了交互式设计窗口。

§ 9.4 OSLO 用户界面

OSLO 的操作与其他 Windows 应用程序类似。当然，OSLO 的用户界面有一些独有的特点。OSLO 界面的各部分将在下面作详细的介绍。

§ 9.4.1 主视窗（Main Window）

主视窗是执行 OSLO 任务的控制中心，它包含了菜单栏、工具栏、标题栏、命令区域及可以访问所有其他的 OSLO 窗口的通道。

下面将就主视窗的各部分作介绍，见图 9-3。

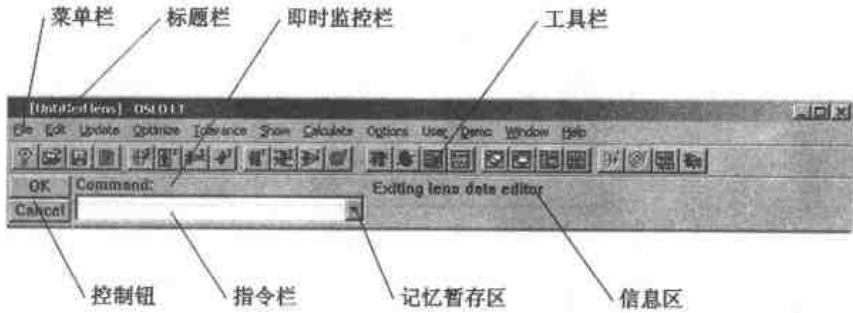


图 9-3 主视窗的工作选项

1. 标题栏（Title bar）

标题栏选项如图 9-4 所示。

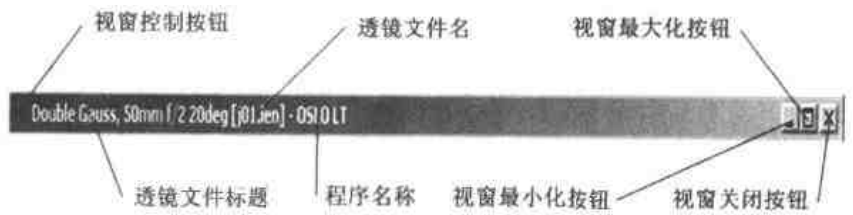


图 9-4 标题栏

- 视窗控制按钮——提供视窗的管理功能，如切换任务，移动视窗，改动视窗大小等。
- 程序名称——显示视窗所用的程序版本名称。
- 透镜文件标题（lens title）——显示用户定义的透镜文件标题（最多 32 个字符），除了显示在标题栏上，透镜文件名也会显示在其他的显示窗口上。
- 透镜文件名称（lens file name）——当使用过[Save]的选项后，显示所储存的透镜文件名称。

- 视窗最小化按钮——将视窗缩成一个图标 (icon)。
- 视窗最大化按钮——将屏幕转换为全屏或恢复到原有大小。
- 视窗关闭按钮——关闭视窗和取消命令或编辑表。

2. 菜单栏 (Menu bar)

菜单栏显示 OSLO 菜单系统最上层的菜单选项, 见图 9-5。单击其中任何一个菜单选项时, 系统都会展开一个下拉菜单, 显示出所有的与该功能有关的命令选项。OSLO 菜单系统的操作同 Windows 菜单非常相似, 这可以让用户很快掌握。因此你可以选择使用鼠标来单击菜单上的选项或者使用快捷键 ([Alt]加上每一个选项所规定的字母) 来执行。



图 9-5 主菜单栏

以下将详细介绍菜单中的每一个选项。

- 文件 (File) ——可以选择开启 (Open) 和储存 (Save) 文件, 以及管理打印和绘图, 最后一个选项为退出 (Exit) 用以结束 OSLO 程序。
- 编辑 (Edit) ——此菜单中的选项可以编辑透镜的镜面或是元件, 例如插入 (insert)、删除 (delete)、翻转 (reverse)、插入产品目录中的元件 (insert catalog element) 等, 在从面数据编辑表中选定行透镜数据前, 除了透镜缩放 (Scale Lens) 选项之外, 其他的菜单选项都显示为灰色 (即为无法使用)。
- 更新 (Update) ——此菜单可以更新透镜数据, 这些选项包含了进入 OSLO 编辑表的通道, 例如面数据编辑表 (Surface data Spreadsheet)、近轴设定 (Paraxial Setup) 及波长。其他用于设定操作条件 (operation condition) 及公差选项用来确定 OSLO 如何表现其透镜计算、绘图及打印输出。
- 优化 (Optimize) ——设定及执行优化。
- 公差 (Tolerance) ——设定及显示透镜组公差情况。
- 显示 (Show) ——选择在图形窗口中输出图形或是在文本窗口中输出数据。
- 计算 (Calculate) ——该选项是使用透镜数据来计算系统的成像质量, 同时还包含了光学评价子程序, 如像差分析、光线追踪和图像分析 (image analysis)。
- 选项 (Options) ——这里包含高级或特殊功能的程序, 加上对于设定程序环境 (preference) 的支持程序等。
- 用户 (User) ——由程序所提供的或是由用户加入的 SCP 或 CCL 程序。
- 演示 (Demo) ——可以选择示范程序做演示。
- 视窗 (Window) ——可以选择开启 (Open)、关闭 (Close) 及更新 (Update) 视窗。这处的选项也包含了指定复制文字和图形输出到一个文件或视窗。
- 帮助系统 (Help) ——提供到 OSLO 帮助系统的路径, 单击工具栏中的[help]按钮或编辑表中的[Help]按钮来获得帮助。

3. 工具栏 (Tool bar)

工具栏是提供一个快速的方法来执行命令, 见图 9-6, 每一个图标代表一个命令。这些工具分成 6 组, 每一组中的工具的功能相似, 若某工具颜色变成灰色即表示当前不能使用该


工具。如果想要看某工具的注释, 可以将鼠标移到此工具图形处停驻数秒, 即可显示。





图 9-6 工具栏


(1) 文件组 (file group)

这一组的工具包含了主视窗上经常所执行的任务。

 F1——打开 OSLO 帮助系统。


 F2——显示文件开启对话框来打开一个新的透镜文件。


 F3——将目前的透镜数据存储到磁盘文件中, 并用新的透镜数据覆盖以前的透镜数据。


 F4——打开文字编辑器视窗 (text editor window)。


(2) 编辑表组 (spreadsheet group)

这里的每个图标都代表 OSLO 中的某一个编辑表的通道, 图形中右上角的“S”代表编辑表。

 F5——打开面数据编辑表 (Surface Data spreadsheet)。


 F6——打开一般操作条件编辑表 (general operation condition spreadsheet)。


 F7——打开高斯光束编辑表 (Gaussian beam spreadsheet)。


 F8——打开公差数据编辑表 (tolerance data spreadsheet)。


(3) 文本组 (text group)

这些工具显示文本窗中的数据, 图形中右上角的“T”表示文本输出。

 F9——在文本窗口中显示面数据。


 F10——在文本窗口中显示近轴常数。


 F11——显示轴上物点及视场边缘物点的基本光线轨迹。

 F12——显示轴上物点及视场边缘物点的点列图 (spot diagram)。

(4) 图表组 (graphics group)


这些工具显示当前的图形视窗。


 SHIFT+F1——显示透镜的平面视图。


 SHIFT+F2——显示透镜的立体图。


(5) 报告图组 (report graphics group)


这些工具可以激活 OSLO 的图像报告功能。OSLO 计算 3 个视场 (轴上视场、0.7 视场和全视场) 位置的数值, 并用标准模板显示图像品质。这些工具将多个选项合而为一, 所以在快速计算及产生简明的报告图时很有用。


 SHIFT+F3——光线分析报告图 (ray analysis report graphics), 这些图包括横向像差曲线图, 像散、畸变和垂轴色差曲线图, 以及描绘出内定的光线轨迹之平面透镜视图。

 SHIFT+F4——波前分析报告图 (wavefront analysis report graphic)。此图展示一个出射瞳孔波前图 (exit pupil wavefront map) 及 3 个视场位置中的每一个的等高线图。


 SHIFT+F5——不同频率 (through-frequency) 的 MTF 报告图。此图以不同颜色显示在 3 个不同视场位置下以空间频率为变数的 MTF (Modulation Transfer Function) 函数, 同时也绘出一个理想透镜的 MTF 作为参考。


 **SHIFT+F6**——离焦分析的 MTF 报告图 (through-focus MTF report graphic)。此图显示出在一个固定的空间频率 (如 25cycles/mm) 下 3 个视场位置像点前后的 MTF。该频率在点列图操作条件 (spot diagram operation condition) 中指定。


 **SHIFT+F7**——点列图分析报告图 (spot diagram report graphic)，此图包括 3 个视场点和焦点前后 5 个不同位置的点列图，以及对于每一个视场位置的径向能量分布。


 **SHIFT+F8**——点扩散函数报告图 (point spread function report graphic)，显示在 3 个不同视场的点扩散函数 (point spread function)，另外还有 1 个径向能量分布图。

(6) 优化组 (Optimization group)



 **SHIFT+F9**——对透镜进行优化 (optimize)，使用目前的变数及误差函数执行，直到 10 次迭代操作。



 **SHIFT+F10**——在文本窗口计算并显示当前的运算项。

 **SHIFT+F11**——开启互动式设计视窗 (interactive design window)。

 **SHIFT+F12**——自动对焦 (autofocus)，对透镜系统加入一个焦点位移来对轴上的斑点尺寸进行优化。

4. 控制钮 (Control buttons)

 **OK** 此两个按钮功能相同，除了在编辑一个编辑表 (spreadsheet) 或对话框 (dialog box) 时，它们等同于 [SHIFT+ENTER]，其他情况下它们都等同于 [ENTER]。在 OSLO 中单击这两个按钮表示接受并完成当前的数据输入。在编辑表中，单击  按钮将接受数据改变并关闭编辑表；在对话框中，单击此按钮将关闭对话框并执行命令。

 **Cancel** 此两个按钮功能相同，除了在编辑一个编辑表或对话框时，它们等同于 [SHIFT+ESCAPE]，其他情况下它们都等同于 [ESCAPE]。在 OSLO 中， 表示放弃并终止目前的数据输入。

5. 命令区域 (Command area)

命令区选项如图 9-7 所示。



图 9-7 命令区

- 提示行——提示行指出程序目前所处的状况或者是一个要求用户由键盘输入的提示。单击“下拉式记忆缓存区” (history buffer pull-down)，OSLO 列出所有会要求输入的命令。
- 命令行 (Command line)——这是一个可以由键盘直接输入命令的选项。当在编辑表的视窗上进行命令行输入时，则在编辑表上也会同时出现此数据。当在命令行输入一个自变量 (argument) 时，将会出现一个包含所有允许值的下拉式选项。

- 信息区域（message area）——信息区域包含由程序提供的最多 2 行的资料信息。信息区域也用做程序输出，例如计算结果或文字编辑。

6. 下拉式窗口

选择下拉式窗口如图 9-8 所示。

- 选择清单（option lists）——许多 OSLO 命令及智能单元格按钮（SmartCell button）要求在自变量（argument）的取值范围中选择一个，OSLO 在一个下拉式菜单或选择清单中提供自变量的清单。下拉式菜单的使用方法与其他的菜单相似，你可以在选择清单上欲选择的项目上双击，或是将箭头指标置于其上再单击[ENTER]来选择，此外也可以在命令行输入你想要的值。如果你不想要这一个命令，可以单击[Cancel]按钮（或是输入[ESCAPE]）。
- 警告对话框——如图 9-9 所示，当 OSLO 无法完成某项操作时，它将弹出警告对话框，并描述无法完成的操作的原因。OSLO 常在一个对话框中显示几种错误原因，因为一次操作的失败将导致随后的操作也失效。每一次警告对话框包括一个[确定]按钮，你必须单击此按钮或单击[ENTER]键，继续 OSLO 程序。

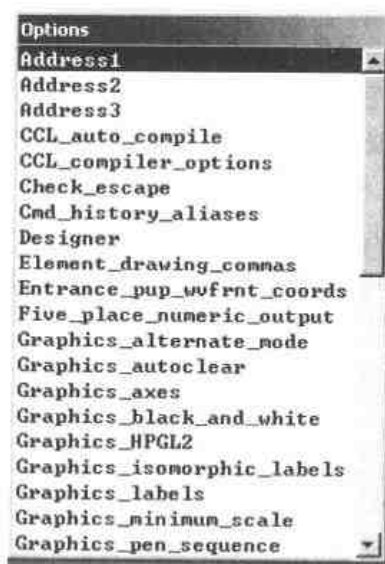


图 9-8 下拉式选择窗口



图 9-9 警告框

7. 文本窗口（Text window）

文本窗口在程序开始时即被打开，而且无法关闭（但可最小化为一个图标），如图 9-10 所示。文本窗口可以视为一个设计过程的顺序记录，它可以有 999 行文字输出，所以可以使用滑块，页模式来控制文本窗口的移动。如果启动页模式，则从每一个命令的输出之第一行将显现在文本窗口的顶部；若关闭，则从每一个命令的输出之最后一行将出现在文本窗口的末端（若视窗被填满了）。文本窗口可以扩大为全屏幕，也可以支持横向及纵向的滑块。

欲开启文本窗口，可以使用[Window>>Text>>Open]的菜单。程序的文字输出将会直接在视窗的标题栏上出现一个尾号。每一个文本窗口都有其单独的编辑表缓存区。

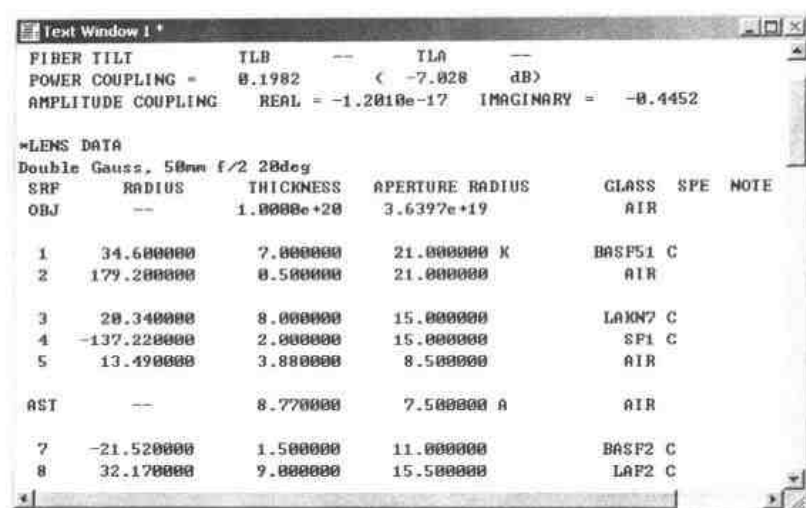


图 9-10 文本窗口

§ 9.4.2 文件管理 (file management)

OSLO 可以处理几种格式的文件，这些文件格式包括透镜文件 (lens files)、宏命令源文件 (macro source files) (SCP 及 CCL)、玻璃目录 (glass catalogs)、数据库文件 (database files)、帮助文件 (help files)、帮助图形文件 (help graphics files)、样板清单 (test glass catalog)、可执行的 CCL 文件 (CCL executable files) 及设置文件 (configuration files) 等。用户经常使用透镜文件与宏命令源文件。透镜文件使用主视窗中的[File]选项来开启，而宏命令源文件则使用文本编辑窗中的[File]菜单来开启。

OSLO 透镜文件通常为文本文件，它包含输入透镜数据所必需的一系列命令，这些文件可以由视窗文件管理程序 (window files manager) 来调用。

执行命令[File>>Open]与[File>>Save As]将会弹出一个视窗对话框，此对话框除了含有标准控制之外，还包括两个按钮来转换 OSLO 的[private]子目录及[public]子目录，由程序所提供的文件都放置于[public]子目录内，而由用户开发的文件则放置于[private]子目录内，如图 9-11 所示。

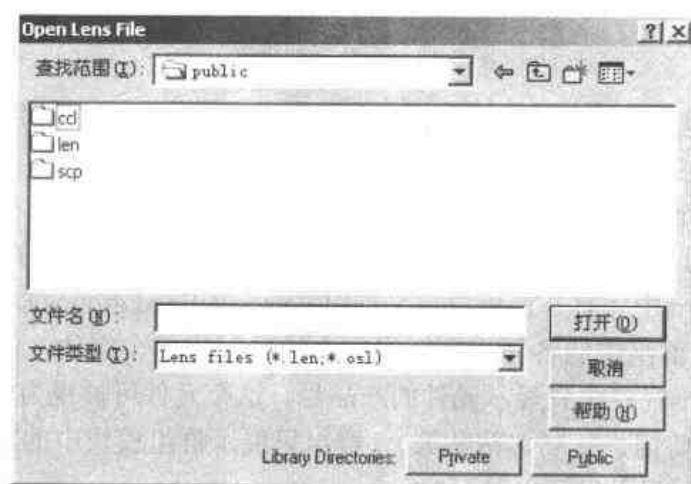


图 9-11 开启透镜文件

§ 9.4.3 编辑表 (spreadsheets)

OSLO 使用编辑表来输入及显示透镜数据。这些编辑表与其他的视窗编辑表相似，它包含了行及行单元格，用户可以利用鼠标或键盘按键在单元格间移动，也可以输入数值数据到单元格中。OSLO 的编辑表还有一个特点，就是可以利用指令输入。

每一个编辑表都有一个标题栏及控制栏，标题栏有编辑表的标题及标准视窗按钮。控制栏中除了有 及 按钮，还有其他的按钮， 按钮是对目前的编辑表显示文字帮助。如果编辑表有行数变动，则另有 6 个功能键 (icon) 会出现来提供剪贴编辑。

1. 面数据编辑表 (Surface data spreadsheet)

面数据编辑表是所指定的透镜面的数据输入及更新之处，见图 9-12。此编辑表可以由 [Update] 菜单上开启，也可以单击工具栏中的透镜输入工具来开启。

在开始下面的讨论之前，打开文件，以方便下列的操作。使用 [File>>Open] 到 [private/len] 子目录下选择 [trip.len] 文件。

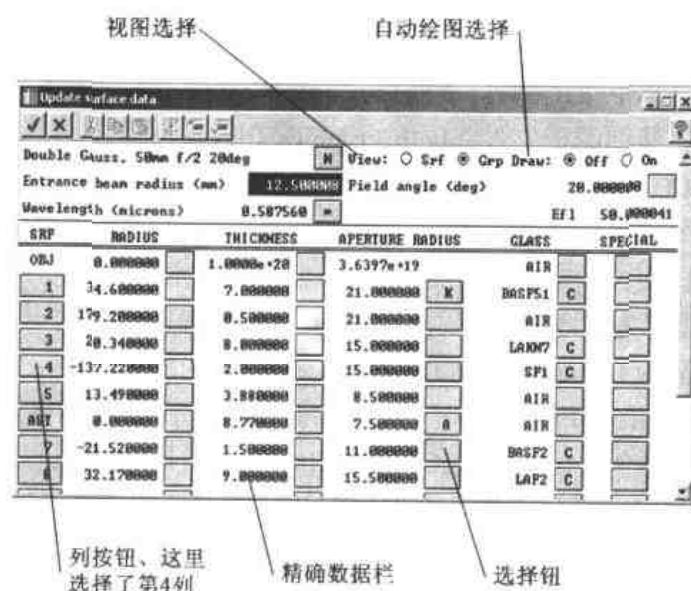


图 9-12 面数据编辑表

- 视图 (view) ——这两个视图按钮标为[Srf]及[Grp]，可以让用户选择不同方式查阅透镜数据。

在[Srf]模式 (Surface mode) 中，每一个面分别列出所有参数的值，包含曲率半径；[Grp]模式 (Group mode) 则是使用产品目录中的元件 (catalog elements)、无序群组 (non-sequential groups) (在 OSLO Prm 中才有) 及用户定义群组 (user-defined groups)。

在[Grp]模式中，群组中的各面将在编辑表中被显示为单个实体，例如一个产品目录中的透镜，编辑表中的半径栏中只显示元件的产品号，这个元件可被视为整体，所以它所有的面可以同时被编辑 (剪切、复制、粘贴等)。群组只展示群组模块中的入射及出射面；用户自定义的群组也只是显示入射及出射面。

- 自动绘图 (Autodraw) ——当自动绘图设定在[ON]，则 OSLO 会开启一个透镜的平面视图。此视图包括了由当前操作所选择的光束。在面数据编辑表上所选定的

面会以另一种颜色显示，而且每当透镜数据改变，将游标移到编辑表中的其他面时，视图会跟着更新。

若[Draw]选择为[off]，则自动绘图视窗将自动关闭。

- 选择钮（Option buttons）——此按钮在每个智能单元格的右边，用来选择该智能单元格中的数据的选择，例如求解（solve）或检取（pickup）。其操作方法可以单击鼠标或是将游标移到按钮上再单击空白键，然后将出现一个下拉式菜单，并列出可能的选项，如图 9-13 所示。

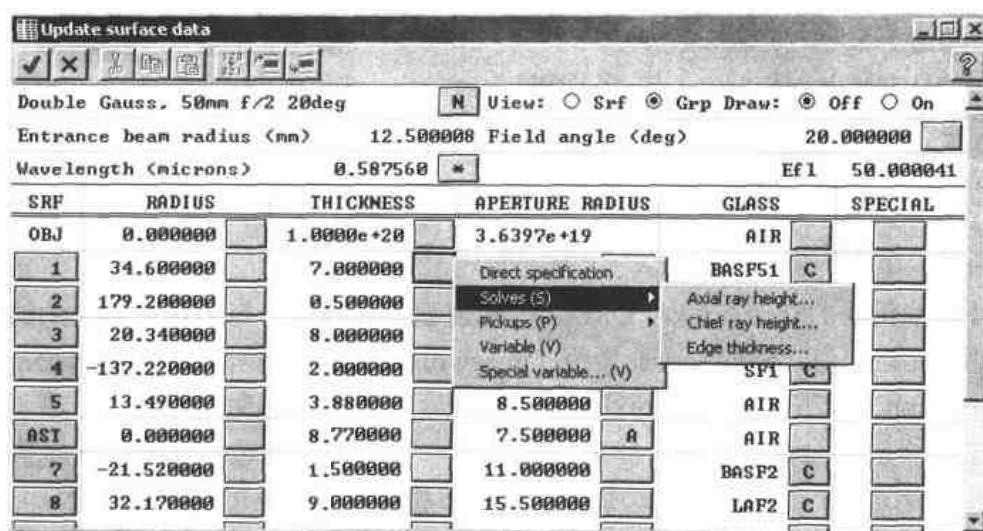


图 9-13 选择键

- 行按钮——面数据编辑表中包含好几行，当某一行与其下一行中有空气介质出现时，则它们之间将有一条灰线来隔开。

在大部分的行的左边是行按钮，它是用来选择行的按钮，在[Grp]模式中，两行或更多的行共用同一行按钮。

欲选择一行，在行按钮上单击一下即可。要选择相连几行，首先在所要选择的行范围内的第一行或最后一行单击一下，接下来再单击范围内的其他任意行按钮，这两行之间的范围即为所选择的行。也可重新选择新的行范围，第一次单击的行不变，第二次任意选择其他行即可。要取消所选择的行范围，可以单击鼠标右键或[cancel]键。

图 9-12 显示已选择了编辑表中的第 4 行，只有当一行或行范围选定之后，编辑菜单才会出现，然后就可以使用剪切（cut）、复制（copy）及粘贴（paste）工具，或是利用菜单来编辑选定的行。

编辑表中的第二组工具功能分别是翻转范围内的行或插入行（可以插在所选择的范围之前或之后。）

2. 近轴特性编辑表（paraxial properties spreadsheet）

一个透镜的成像质量与所使用的操作条件有关。孔径与视场这两个基本的近轴特性操作条件列于面数据编辑表中的第二行，在此行的最右边有一个选择按钮，单击一下即可进入近轴特性编辑表如图 9-14 所示。

此编辑表中的每一行表示透镜的一个近轴特性，这些特性为孔径（Aperture）、视场

(Field) 及共轭距 (Conjugates), 每一种特性皆可用不止一种方法来指定, 需要在每一行输入一个值 (或者接受默认值) 以完成透镜组特性的建立。

图 9-14 近轴特性编辑表

近轴特性编辑表的功能与其他 OSLO 的视窗编辑表相似, 每一单元格中的输入都将影响许多其他单元格的值, 例如若改变像距 (image distance), 则物距 (object distance)、放大率 (magnification) 及工作 f 数 (working f-number) 都将相应地改变。

值得注意的是此编辑表只设定参数的初始值, 它并不控制透镜数据在程序执行过程中的变化。例如透镜焦距在设计期间改变了, 则外形和孔径参数也可能跟着改变。

3. 波长编辑表 (wavelength spreadsheet)

用做分析的主要波长显示在面数据编辑表中的第 3 行, 如果欲使用多个波长, 则单击该按钮, 将会出现一个波长编辑表。此编辑表允许输入欲分析的波长, 见图 9-15。对于单色光的应用而言, 如激光, 只需要一个波长就可以了; 但对于多色光的应用, OSLO 定义 3 个默认波长做分析用, 用户也可以增加更多的波长值。

图 9-15 波长编辑表

OSLO 中的计算程序基本上使用当前波长 (current wavelength) (常设定在第 1 行)。如果当前波长设定为其他的值, 则像差和单波长的光线追踪将以设定的波长值执行分析。若这样的分析不是使用波长第 1 行, 则文本输出将会指出使用的波长。并可以指定每一个波长的

权重，这可以在优化及点列图的分析程序中使用（包括 rms 点尺寸，MTF，PSF 等）。

波长编辑表的编辑与面数据编辑表的编辑相似，可以选择、剪切、复制、粘贴或插入一行或多行。例如欲删除第 2 行至第 3 行，则先单击第 2 行，再单击第 3 行，这样第 2 行至第 3 行的范围即被选取。然后再到工具栏单击剪切工具，则第 2 行及第 3 行就被剪切，只剩下第 1 行仍然保存下来。如欲再增加一波长，则先选择任意一行，然后单击[Insert After]图标，或单击[SHIFT+SPACE]来增加一行，然后再输入所要求的值。

欲改变波长，先单击波长的智能单元格，当此格被选定后，可以手动输入一个新的波长，或再单击一次可显示波长选择框，里面包含了 OSLO 中常使用的标准波长。

在 OSLO Prm 及 OSLO PRO 中还包含了一个可以自动产生波长及波长权重的按钮，其数据是根据高斯积分（Gaussian quadrature）机制来产生。该机制能给用户自定义的光谱带提供统一的光谱权重。OSLO Prm 也有一个允许用户定义的权重优化操作环境。

4. 其他透镜数据编辑表（other lens data spreadsheets）

除了上面所介绍的几种编辑表之外，还有好几种编辑表可以用来输入数据到 OSLO 中，它们的原理和面数据、近轴特性及波长编辑表相同。大部分的编辑表提供输入操作条件、特殊的面数据（special surface data）或优化数据。

5. 恢复或取消

OSLO 有一个[Revert_enable]的选项，该选项可以取消由编辑表中所作的透镜参数改变。如果设定了此选择，不管在何时当单击[Cancel]键来离开编辑表时，将会出现一个确认对话框来要求，确认你是否要恢复在输入此编辑表之数据前的透镜状态，见图 9-16。

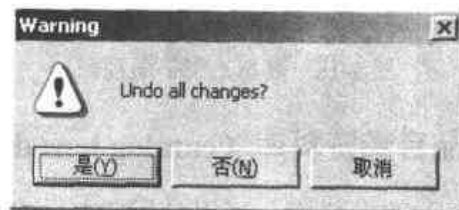


图 9-16 确认对话框

6. 高斯光束编辑表（Gaussian beam spreadsheet）

高斯光束编辑表的主要功能是研究高斯光束如何通过透镜系统进行传播，可以在编辑表中的斑点尺寸、束腰尺寸、束腰位置及波前半径栏内选择输入两个独立变量，然后程序将自动计算其他未输入的数据并更新显示。此外，也可以单击编辑表中的按钮，绘出光束经过此系统的非直线传播图。

高斯光束编辑表可用于激光共振腔的分析及设计，它是利用物面作为第一个镜面，像面作为另一镜面（第二镜面），接下来假定定物面波前半径与第一镜面的半径相同，则当像面的波前半径与第二镜面半径相吻合时，物体的斑点尺寸可以改变，这是共振腔内高斯光束的操作条件见图 9-17，图 9-18。

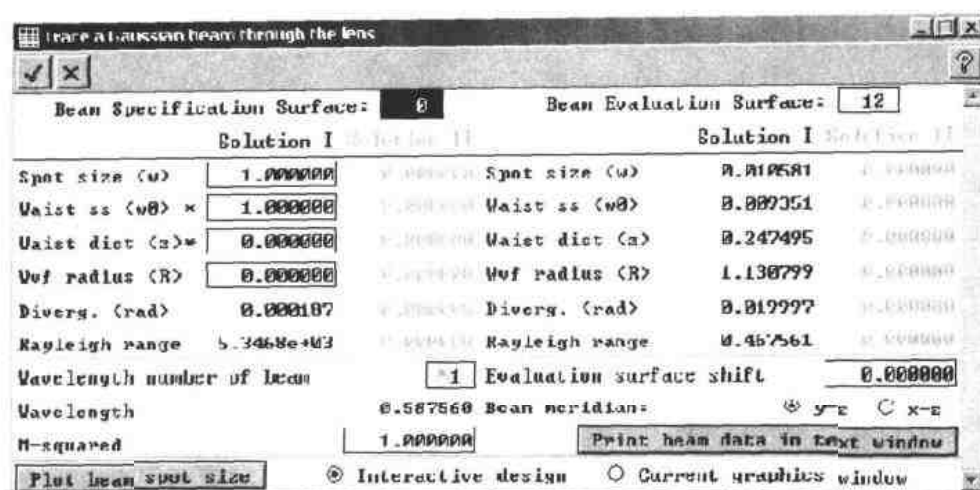


图 9-17 高斯光束编辑表

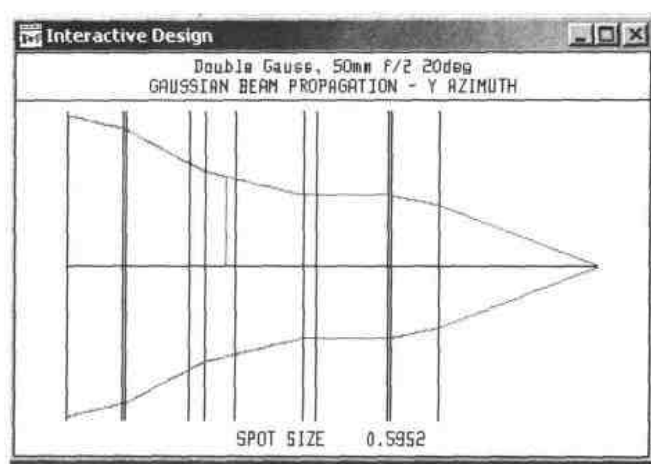


图 9-18 高斯光束平面视图

§ 9.4.4 各厂商的透镜产品目录资料库 (catalog lens database)

OSLO 包含了一个用图表示的资料库，可以使用[File>>New]命令并选择产品目录透镜 (catalog lens)，或是从编辑菜单 (Edit) 中选用[Insert Catalog Lens]，见图 9-19。在第一个方法中，OSLO 为从库中选择的元件打开一个透镜文件；在第二个方法中，OSLO 在所选择的行之之前，将一个目录元件添加到当前的面数据编辑表中。

- 分类控制 (sort control) ——该选项可以用几种不同的方法来整理资料库。3 个透镜类型选择按钮 (Lens Type) 将决定列出哪种类型的透镜，而 3 个分类依据选择按钮 (Sort By) 则可决定使用哪一种透镜参数，清单上的元件将根据这个参数来分类及列出。
- 范围控制 (range control) ——该选项可以限制出现在清单上的元件范围，例如若设定中心的有效焦距 (central Efl)，参数为 (50 ± 10) mm，将只有有效焦距在 40 mm~60 mm 范围内的透镜会出现在清单上。中心直径 (central Dia) 可以进一步的限制此清单。
- 清单 (list) ——建立清单后，可以移动滑块或游标光标来进行选择。每一个元件对应一个图，可以知道其形状。信息区域将提供关于该元件的其他信息。

- 选择 (selecting a part) ——欲选择一个元件，可以在清单中其参数上双击，或是单击后单击[OK]键。如果你知道所需要的元件的产品编号，则可以直接在[part number]空格中输入，然后不管其分类及范围的限制，元件将直接被调用到清单中。

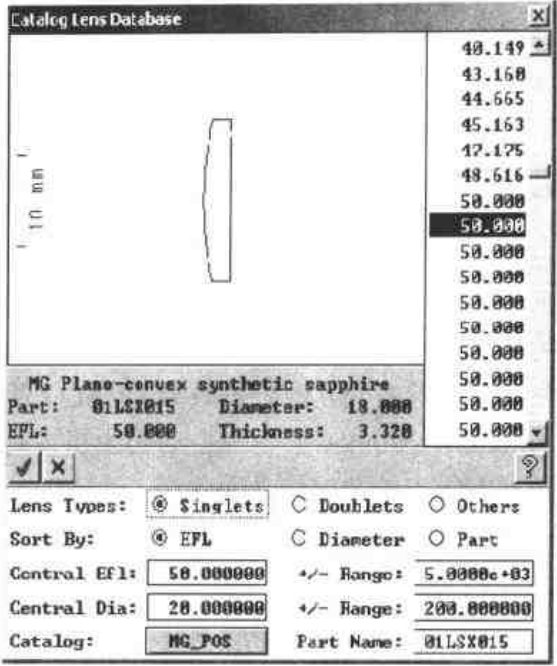


图 9-19 透镜目录

当资料库中的某一个元件输入到面数据编辑表后，它的面被设定为组群 (group)，其半径、厚度及玻璃都被标志为固定值 (fixed)，无法更改。如果你想要清除此限制，可以在面数据编辑表上单击[RADIUS]半径栏的透镜号码旁的选项按钮，则会有取消组群 (ungroup) 的对话框出现，单击[确定]就可以解除组群，见图 9-20。

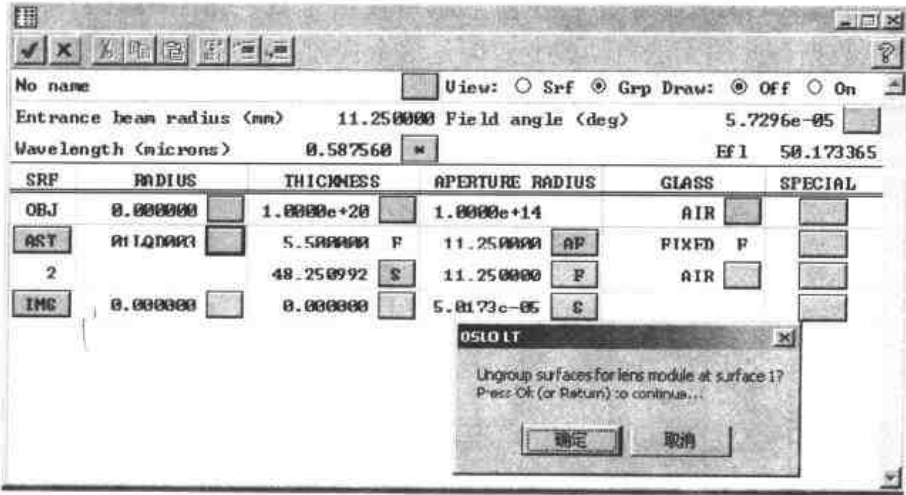


图 9-20 解除组群

- 改变产品目录资料库——OSLO 包含了几种独立的透镜资料库，当前透镜名称展示在透镜目录视窗的标题栏。单击 catalog 单元格可以调用不同厂商的产品目录资料库。

§ 9.4.5 对话框 (Dialog boxes)

OSLO 包含了许多对话框, 它们用来对命令输入自变量 (arguments)。虽然少数的对话框是标准的 Windows 控制 [例如文件 (file)] 对话框, 但是大部分 OSLO 对话框和编辑表形式相似。对话框与编辑表之间的区别只在于前者是执行一个命令, 而且不会储存其自变量的值。不过有一些例外, [Setup Point] 对话框使用以前的参考光线值当做默认值, [Setup SPD/Wavefront] 对话框与点列图操作条件框 (spot diagram operating condition box) 相同。

§ 9.4.6 图形视窗 (Graphic window)

OSLO 提供好几种形态的图形视窗来让你了解你的透镜设计之成像质量, 大部分的 OSLO 分析结果可以用图形形式来表现。许多图形视窗是随时可以更新的。只要在改变任何透镜数据之后, 对一个可以更新的图形视窗双击, 就可以根据新的透镜数据重新计算。还有另一种特殊的视窗可以即时监控两种透镜参数交互改变的效果。OSLO 使用下列形态的图形视窗:

- 自动绘图视窗 (Autodraw Window) —— 自动绘图视窗是一个目前透镜系统的平面视图, 它随着面数据编辑表的数据变动而改变。
- 图形视窗 (Graphics Windows) (GW 及 UW) —— OSLO 有 6 种通用的图形视窗, 它们有两类, 一类是静态的图形视窗, 另一类则是可更新的 (updatable) (UW)。一旦启动 OSLO, 会自动开启一个图形视窗。而欲开启或关闭图形视窗, 可以使用视窗菜单上的 [Open] 及 [Close]。

第一次开启的图形视窗是静态的形式 (GW), 它会变成前台视窗, 任何新的图形输出都置于此图上。所做的各种分析, 其结果的图形输出将被放置于新的视窗上, 而且会标志为可更新的 (UW)。OSLO 随着视窗储存这些分析, 所以它们可以自动重复。如欲根据新的透镜数据来重新计算图形输出, 则在视窗上双击即可。

可更新视窗在透镜设计期间是非常有用的。例如假设你有一个透镜要修改, 使用 [Windows>>Graphics>>Open] 命令开启视窗, 然后使用工具栏 [SHIFT+F3] 将光线分析图放入, 若改变透镜数据, 此图无法自动改变。但是这个视窗是可更新的, 所以在图形视窗上单击 [Update window] 的图形钮, 则光线分析将依据目前的数据重新计算, 也可以双击图形视窗上更新。

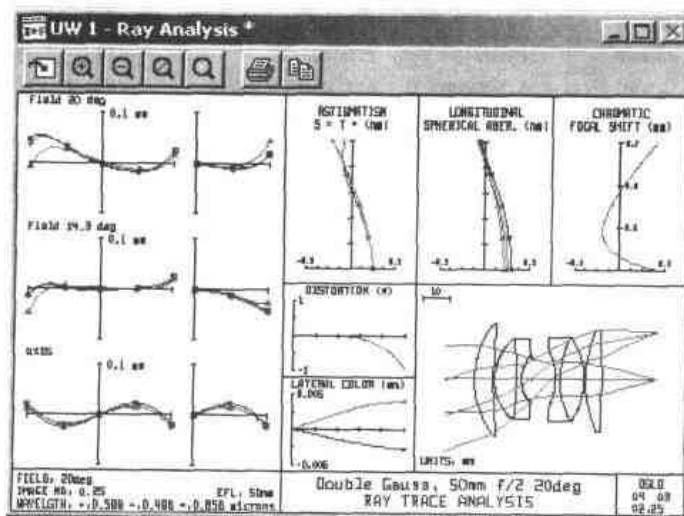


图 9-21 图形视窗

OSLO 图形视窗可以放大至 16 倍, 如果单击[zoom-in]的按钮, 则图像将以 2 倍的倍数放大, 你可以放大 4 次, 如欲回复原本的尺寸, 单击[cancel zoom]按钮即可。你也可以在图形视窗上双击鼠标右键来放大视窗; 如欲缩小, 在双击鼠标时同时按下 [SHIFT]键。

[set zoom center]按钮可以设定缩放图形视窗的中心, 如果单击此按钮, 然后, 将光标移动到图表视窗中, 则光标将变成十字, 再将此十字置于想要的视窗中心点上, 并单击鼠标左键, 则图像将会根据你所要求的中心点来更新。你也可以借此在期望的中心点上单击鼠标右键来重新设定缩放图形视窗的中心点。

如果屏幕上有好几个可更新的图形视窗, 可以使用[Windows>>Graphics>>Update All]命令来同时更新。

除了将图形视窗放大到最大及缩小至最小之外, 你也可以在绘图之后重新定义图形视窗尺寸, 这个动作包括了改变外观的比例。有两种形态的视窗, 即正常视窗 (normal window) 及等轴视窗 (isometric window)。在正常视窗中, 当外观比例改变时, 图元件也随着改变, 在等轴视窗中, 保持图元件的外观比例, 且将元件移进视窗中。当图形视窗完成后, 由视窗菜单中[Graphics>>Close]命令来关闭图形视窗, 由于关闭的视窗不会再被重新计算, 所以可以增加图形视窗更新的速度, 虽然图形视窗可以被最小化, 但最小化的图形视窗被更新时所需要的时间与开着的图形视窗是相同的。

- 互动式设计视窗 (interactive design windows) ——在 OSLO 中的交互设计使用 3 个指示视窗, 1 个视窗是显示系统图, 这个与自动绘图形视窗相似; 第 2 个视窗显示用户指定的成像质量分析, 例如横向像差曲线; 第 3 个视窗则包含两个 5 透镜参数相连的图形滑尺, 如图 9-23 所示。

交互视窗的操作是借助于一个滑块拖曳过程并设定了[on]/[off]的对话框来建立的。如果开启拖曳过程, 则在拖曳滑块时, 分析过程将是连续的; 若关闭, 则用鼠标移动滑块并释放鼠标之后分析过程才会被更新。开启此交互设计对话框的方法是利用主视窗上的菜单 [Optimize>>Interactive Design], 即可出现如图 9-22 所示的对话框。

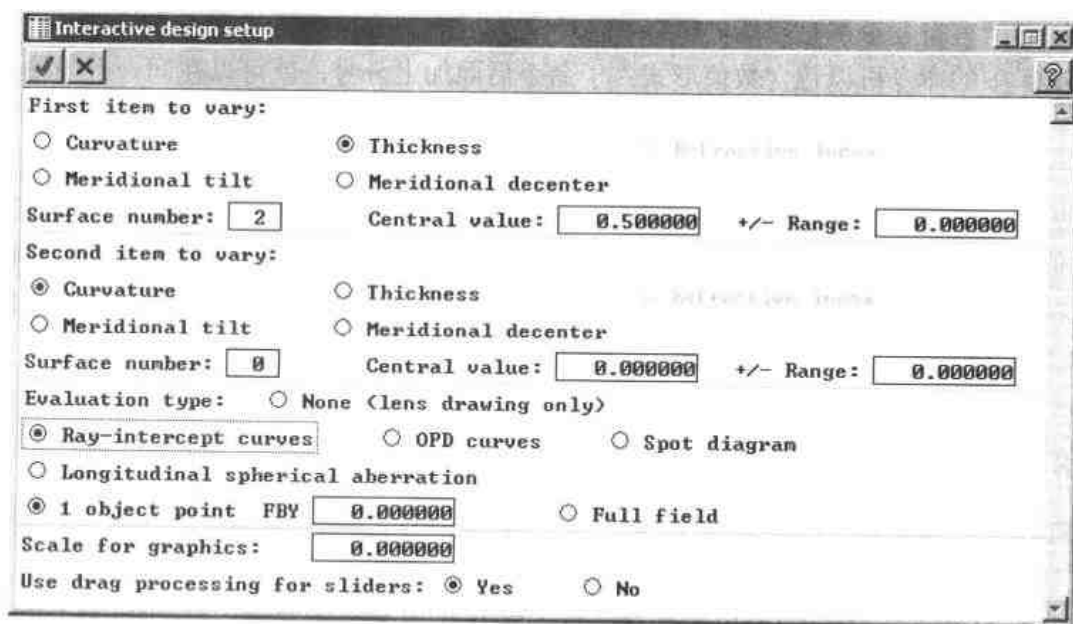


图 9-22 交互设计对话框

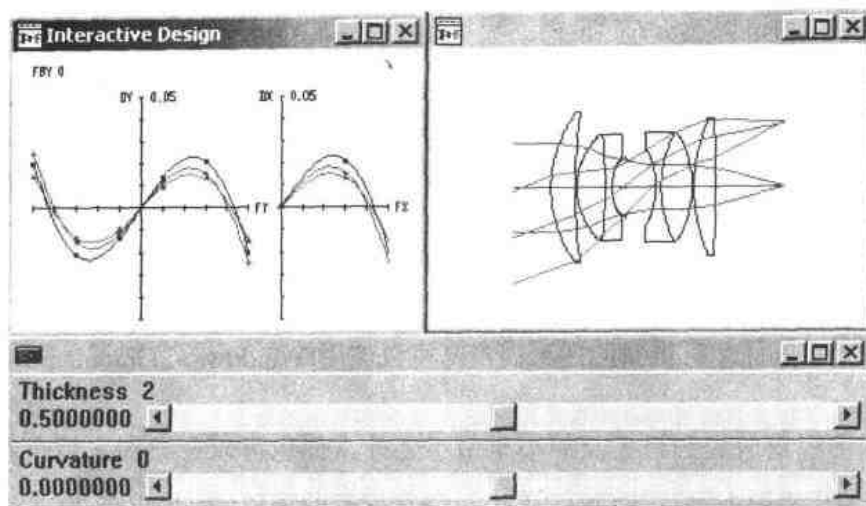


图 9-23 交互设计视窗

§ 9.4.7 命令输入 (co mmand input)

如前所述, OSLO 可以使用菜单或命令来执行程序, 执行程序时所需要的命令可以从用户手册中或是程序的帮助系统中找到。你可以先由菜单来执行某一命令, 然后再到缓存区呼叫其前所执行的命令, 这些命令集是下一次当你想要执行此命令时可以直接在命令行中输入的名字, 此方法可以非常方便而快速地学习命令的使用。若命令是由对话框产生的, 并且在 [co mmand_history_alias] 呈开启状态时, 则命令缓存区内将显示命令的短形式; 反之, 则会出现命令的长形式。除了输入数据的命令之外, 大部分的命令都有两种书写形式, 一种是便于输入的短形式 (short form), 另一种是便于了解的长形式 (long form), 此两种形式在作用上是等效的。

在 OSLO 中的命令会自动提示, 如果没有定义自变量 (argument) 就输入命令, 在需要之处就会使用默认值 (default value), 而且对于任何必需的自变量也将自动提示。如果你想要使程序对所有自变量都有提示, 可以在命令名称后面空一格后再加上一个问号。

OSLO 中的命令可以包含数值形式; 于命令后面加上分号, 就可以在同一行中输入多条命令, 每一行字节限制是 512 个字节; 命令行中也允许使用 C 语言中的循环 (loops) 及控制结构 (control structure)。

当编辑表中的某一输入单元格被选中时, 可以在命令行直接输入数据。在 OSLO 中, 这些数值数据输入单元称为智能单元格 (SmartCell), 智能单元格会从编辑表中自动检测并执行这些命令。在一个即将输入字串的输入格中, 为了避免被程序视为命令, 在这串的前后必需加上引号, 例如以 [Paraxial_constants] 当做透镜的名字, 就必须在这个名称的字首与字尾处加上引号以避免被归类为命令。

§ 9.4.8 文字编辑器 (Text editor)

OSLO 文字编辑器主要用作撰写 SCP 及 CCL 宏程序, 见图 9-24。它也是一个适合各种小型文字工作的编辑器, 例如直接修改透镜文件。

文字编辑器包含有 [File] 菜单来开启文件, 请注意如果在编辑器内使用 [File] 菜单来开启透镜文件, 它将是一个文字文件, 若它的主视窗中以 [File] 菜单来开启, 则它将显示为二进制数。

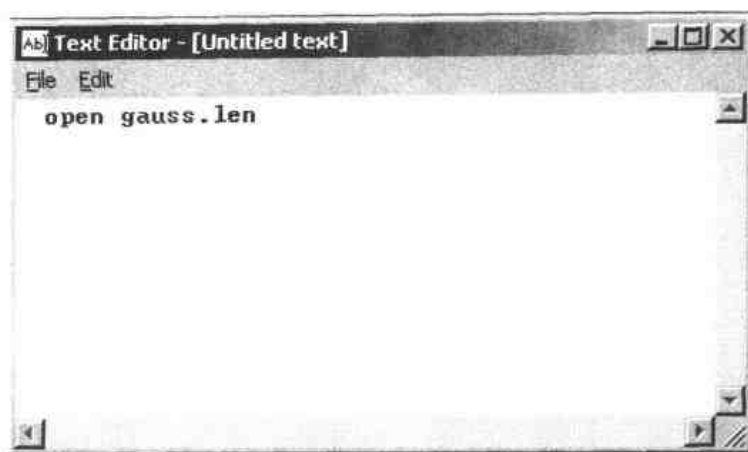



图 9-24 文字编辑器

§ 9.4.9 帮助视窗 (Help Window)

OSLO 利用视窗帮助程序提供一个全功能的帮助系统，它提供主题分类对话框、编辑表及命令定义。帮助系统是 OSLO 文件中的一个重要部分，由于用户手册未必来得及更新，帮助视窗的信息会比用户手册上及时。

你可以使用[F1]图形钮或菜单中的“Help”直接进入帮助系统，此外，也可以在编辑表及对话框中经由工具钮  得到按主题分类的协助及索引式的帮助资料。

§ 9.4.10 打印输出 (Hard copy output)

OSLO 使用视窗界面来提供打印输出，这种输出可以被写成一个文件或传送到一个装置上（例如激光打印机）。此输出分为两种最基本的类别（文字及图形）。

文字输出可以直接由文本窗口获得，或间接地由记忆缓存区得到；图形输出可以从任何标准的图形视窗获得；OSLO 使用标准的视窗对话框来设定打印机。

图形输出若选择[Save Graphic As]，OSLO 将提供一个输出格式选择项，此输出格式包括[HP/GL]、视窗图元文件（Window metafiles）及*.rle 文件或视窗*.bmp 文件。前两个是向量文件（vector-based files），后面两个则是栅格文件（raster-based files）。

§ 9.4.11 剪切板支持

OSLO 支持文字及图形视窗的视窗剪切板，可以使用[Window>>Text(或 Graphics)>>Copy to Clipboard]命令将目前的视窗复制到剪切板。在有图形的例子中，向量输出放置在标准视窗图元文件中的剪切板中，当要把 OSLO 移到其他的应用软件中时，这通常是一个最好的方法。

§9.5 OSLO LT 54 基本操作要点

§ 9.5.1 概述

1. 用光学设计 CAD 软件设计的基本过程

用光学设计 CAD 软件来进行镜头(或系统)设计的基本过程，如图 9-25 所示，使用 OSLO LT54 基本如此。

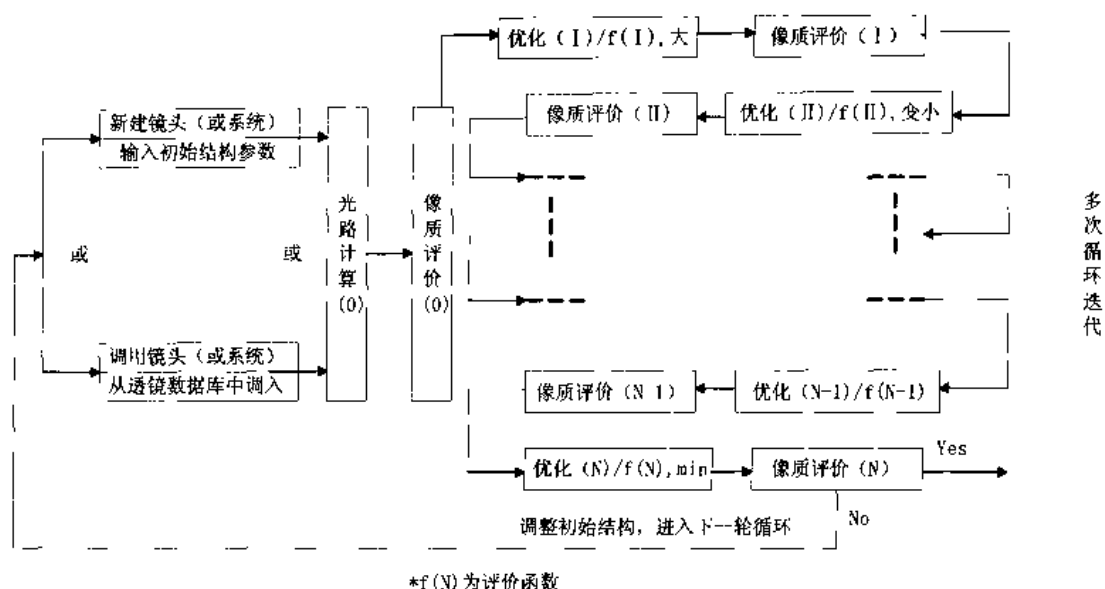


图 9-25 光学设计 CAD 工作过程框图

光学设计 CAD 其自动校正的前提是假定可以定义一个评价函数，它惟一地表征了一个光学系统的成像质量。该评价函数的值越小，光学系统的成像质量就越好；评价函数的值越大，光学系统的成像质量就越差。虽然与实际并不完全一致。但毫无疑问，评价函数定义得越合理，就越能真实地表征光学系统的成像质量。

2. 基本操作环节

由图 9-25 可知，使用 OSLO LT 54 程序进行光学设计的基本操作有如下环节：

(1) 新建镜头（或系统）。这一环节的关键是如何正确输入拟设计镜头（或系统）的光学性能参数和初始结构参数。

(2) 调用镜头（或系统）。即从储存于光学设计 CAD 软件包内的透镜数据库中调出合适的镜头数据，作为拟设计镜头的初始结构。对于 OSLO LT 54 来说有透镜样品库、各大公司透镜样品库、私人透镜库。私人透镜库实质上就是设计者本人过去设计成果的记录。从透镜数据库中调用镜头数据操作最为简捷。

(3) 光路计算与优化计算。对于 OSLO LT 54 来说，只要把设计参数正确输入，程序就可以计算出结果，并显示在相应的编辑表中，优化计算同样如此。

(4) 像质评价。可以从 OSLO 报告图中直观显示，如要准确数值可调出相应的文本编辑表进行详细分析。

§ 9.5.2 新建镜头

正确输入镜头数据信息是光学设计 CAD 的第一步，也是最基本、最重要步骤之一。对于 OSLO 来说，输入无限像距和有限像距镜头有一定的差异，因此，将分别予以阐述。

1. 预备知识

在 OSLO 中对镜头参数输入有如下常用规定。

(1) 透镜表面个数（面数）的规定

在 OSLO 中，一个光学系统中一束光线连续地通过该系统的一组镜片面。光从左到右

透过该系统，其中物平面被指定为第 0 个。在顺序系统中，镜片表面按光线或其延长线穿过的顺序依次计数，面数值最大者称像面，不管该面上是否成像。在 OSLO 中，正确的透镜表面顺序对于透镜数据输入来说是极其重要的。

和面数相关的一些参数，比如曲率（是曲率半径的倒数，常使用曲率半径）、非球面系数等，都带有面的序号（如 r_1 ）。和透镜表面之间的空间相关的参数还有如折射率、厚度等，在面数据编辑表中都指定在同一个面数横行中。

理论上认为，没有折射率变化的折射表面对光路的轨迹没有影响，称之为虚表面(dummy surface)。虚平面常用来保存光路信息，或者是为其他光学表面建立基坐标。

(2) 符号规则

在共轴系统中，OSLO 规定了曲率、厚度和折射率的正负号，当然这不包含倾斜表面，规则如表 9-1 所示。

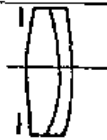
表 9-1 共轴光学系统的符号规定

曲率半径 r	如曲率中心位于镜片表面右侧，则曲率半径或表面曲率为正；反之为负
厚度 d	如下一表面位于当前表面的右侧，则两表面之间的厚度为正；否则为负
折射率	所有的折射率为正；反射表面则用“rf”指明

2. 新建立一个无限远物距镜头文件

要建立合格的镜头文件，关键的第一步就是要懂得如何正确输入透镜的结构参数，只要按部就班地输入合理、准确、完整的数据，OSLO 程序立刻就能把计算结果在相应的编辑表中显示出来。在这里我们结合设计一个最简单的双胶合望远物镜，建立文件。其初始结构参数见表 9-2。


表 9-2 双胶合望远物镜结构参数

主要技术指标		结 构					
$D/f' \approx 1/5$ $D=40\text{ mm}$ $f'=199.73\text{ mm}$ $2\omega=5''$							
参 数							
面 号	r/mm	D/mm	n_D	ν	D_0/mm	玻 璃	备 注
1	∞ (光阑)				40		*此结构表为表 4.2a 中球面透镜部分 *“()”内为德国玻璃牌号
2	126.73	0.01			40		
3	-85.06	7	1.5163	64.1	39.65	K9(BK7)	
4	-258.00	4.2	1.6475	33.9	39.61	ZF1 (SF2)	

OSLO 为方便使用，将菜单，编辑表，单元格行、列等，都给出了详尽的说明。尽管如此，还是希望读者在学习这部分的内容时，最好是在计算机上进行同步操作。本部分的论述已假定使用者都已熟悉了 OSLO 界面。如果能按步骤一步步进行，那么你将在学习完本部分后对操作有了初步的了解，进而可着手独立进行光学设计了。

下面接着讲述输入面数据的具体操作。

(1) 输入光学特性参数

① 开机，出现主视窗。单击 File>>New，屏显如图 9-26 所示的面数编辑表。在“New file name”栏键入文件名，本例为“YZ00”（文件名由设计者自行决定，由英文字母加数字组成，不宜含有小数点或其他标点符号），在“Number of surfaces:”栏输入面数，本例为 4，物面和像面不计入，光阑要算一个面；当光阑与某面很靠近或重合时，光阑也可以不算一个面。在 File type 选项中使用默认值：即用户自定的透镜（custom lens）。单击 （意为“接收”、“保存”或“OK”），则面数据编辑表就会自动打开（见图 9-27）。

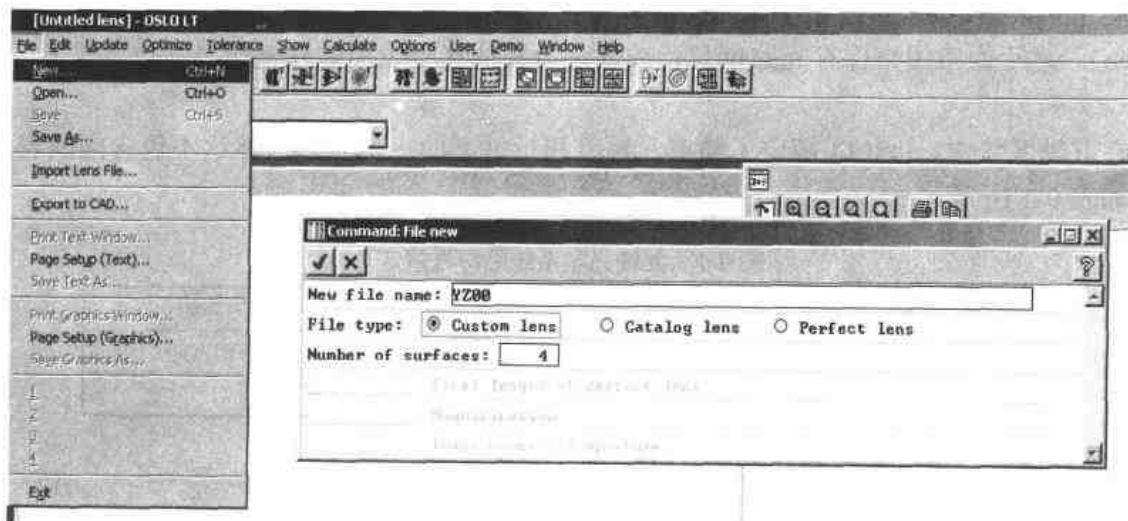


图 9-26 文件名、面数输入

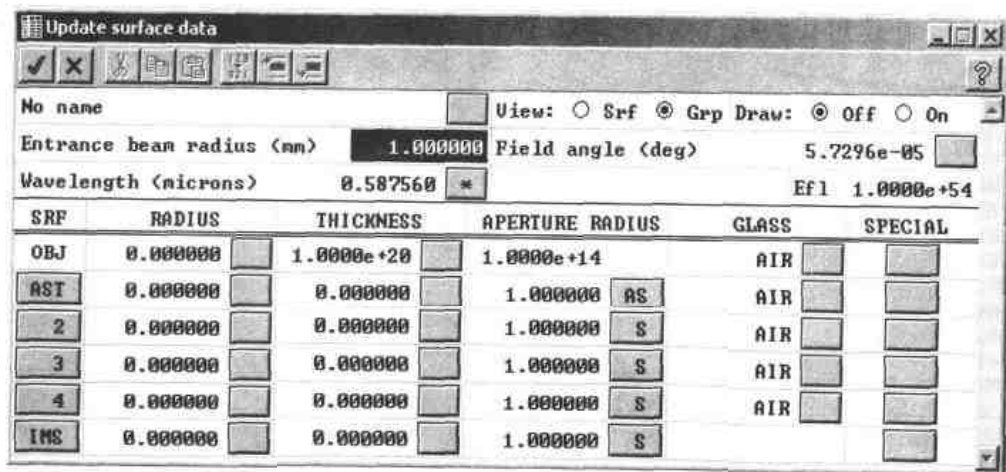


图 9-27 面数据编辑表


② 在“未知文件名”（No name）区域中，输入“YZ00”作为标题栏。如果愿意还可以通过单击该区域尾处按钮，输入补充说明文字。




③ 选择 View 中的 srf 和 Grp 选项，本例选默认值 srf。


④ 在[Draw]中选择“on”（自动绘图）；也可选择“off”（无图）。

⑤ 在设置输入光束半径栏中，因焦距 $f' = 200 \text{ mm}$ 、 $D/f' = 1/5$ ，所以输入入射光束半径（Entrance beam radius）为 20 mm。在视场角（Field angle）中，输入 2.5° 。

⑥ 波长（Wavelength）的选择。

a. 目视仪器波长选择：单击波长（wavelength）栏里的  选择钮，将会弹开一个带有波长默认值的波长选择。如设计的为目视光学仪器的镜头（或系统）就可用默认值（即 d 光

校正单色像差，F 光、C 光校正消色差)。单击，返回面数据编辑表，此时选择钮边框变粗，表示该栏得以支持。

b. 单色光或非常规的波长选择：单击“波长 2”中的行按钮，然后在“波长 3”行按钮中选中所有的行，最后使用剪切工具删除这些波长。选中波长栏里的“波长 1”，出现黑色的方框，以细实线包围，即表示通过选项列表使该栏得以支持。单击，回到面数据编辑表，再在波长栏处输入设计需要的波长值（如 He-Ne 激光 $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$ ）。此时可再回到波长选择表中，检查表中显示的值是否与输入值相同，如相同，说明波长选择操作正确。波长表中的权重（weight）一般选默认值。设置好镜头的光学性能参数后，面数据编辑表上部显示如图 9-28 所示。

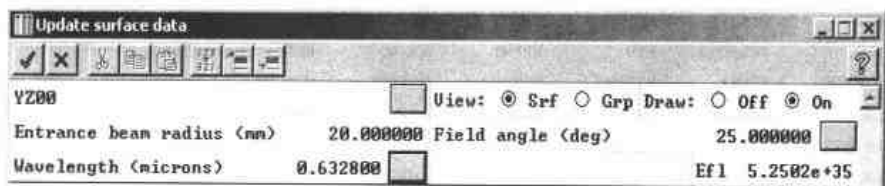





图 9-28 双胶合望远物镜光学性能参数设定



(2) 输入面数据

面数据主要有曲率半径、厚度、孔径、玻璃等种类。

① 曲率半径。在键入曲率半径时，首先注意是光阑面，其默认值为第 1 面，本例将使用默认值，当光阑不是位于第 1 面时，则要重新设置规定的面。（如改变第 4 面为光阑面）具体操作如下：在表面数据编辑表第 4 行“APERTURE RADIUS”右边选择，单击。拉下一个选项表，选第 6 项，孔径光阑[Aperture stop(A)]。则变为。此外，平面（R ∞ ）或光阑面均输入为 0。

② 厚度（THICKNESS）。按面与面间隔键入，因物在无限远，第 1 栏为默认值。

③ 孔径半径（APERTURE RADIUS）可不设置。在 OSLO 中，因为当键入 $2D/f'$ 后，各镜表面的通光孔之半径数值将自动生成。

④ 玻璃（GLASS）。在 GLASS 竖栏中，单击，拉下一个选项表，取第 5 项“目录”（catalog）单击，又拉下一个关于世界著名玻璃生产企业各项的选项表（见图 9-29），如选中第 1 项德国肖特厂（Schott）单击，弹出一个该厂生产的玻璃种类列表（见图 9-30）。按设计要求选所需的牌号。如选 LASF18A，单击，就被双线长方形框框住。这时在信息区就会显示出 LASF18A 的折射率、阿贝数等数据，供核对用。单击后，玻璃牌号表关闭。

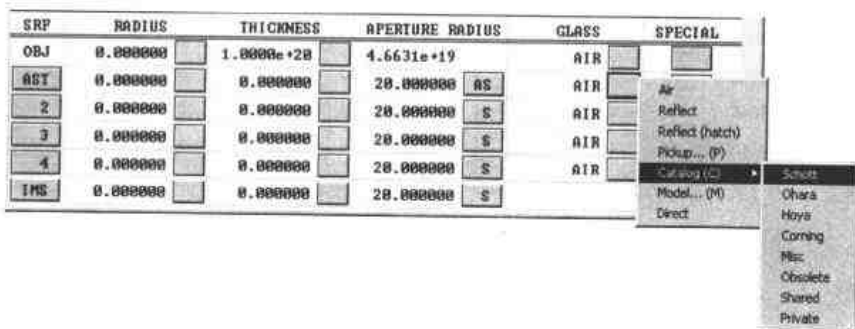


图 9-29 世界著名玻璃生产企业选项表

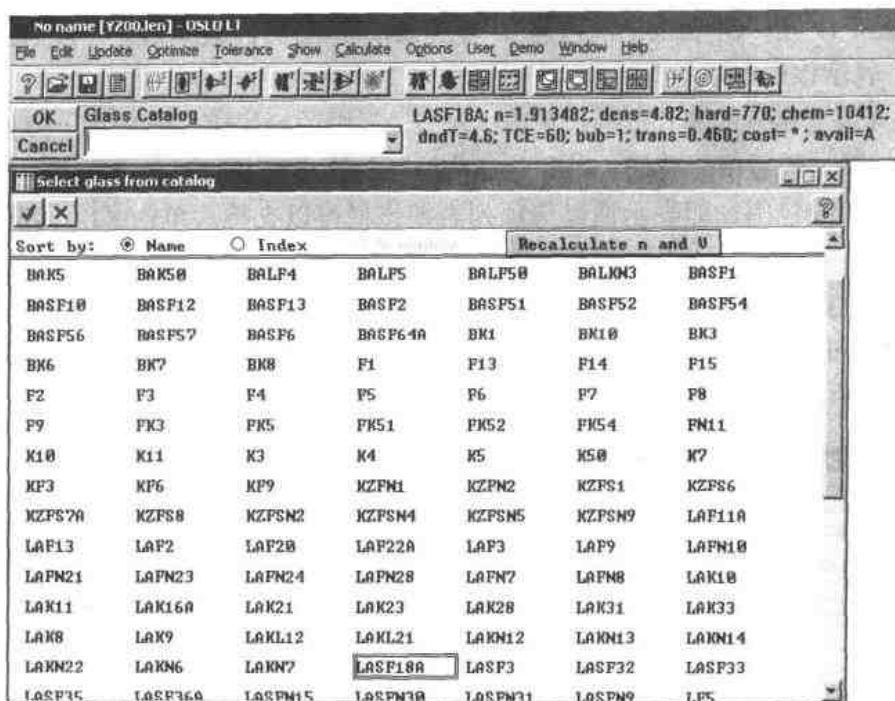


图 9-30 德国肖特厂玻璃牌号表

重现面数据编辑表，玻璃牌号名称已自动键入“GLASS”相应的栏中。重复上述操作，直到所有镜片玻璃种类均录入为止。

(3) 光路计算

现在可进入设计。按下文件(File), 选择 Save Lens As (第一次计算必须用 Save Lens As)。

单击出现“Save Lens As”编辑表（见图 9-32），可选择适当保存类型，做保存操作后，自动回到如图 9-31 所示状态。但添加了部分数据，在存档后，程序已立刻把结果计算出来，如焦距（Eff）， $f' = 199.4066 \text{ mm}$ ，各通光口径之半的实际值等，但像距等有关参数还须从近轴光特性表中才能看出。

Update surface data

View: ☐ Srf ☒ Crp Draw: ☒ Off ☐ On

Entrance beam radius (mm) 20.000000 Field angle (deg) 2.500000

Wavelength (microns) 0.587560 * Effl 199.406590

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.3661e+18	AIR	
AST	0.000000	0.000000	20.000000 AS	AIR	
2	126.730000	7.000000	20.000000 S	BK7 C	
3	-85.060000	4.200000	19.825100 S	SF2 C	
4	-258.000000	194.348400	19.806259 S	AIR	
INS	0.000000	0.000000	8.706283 S		

图 9-31 镜面设定完成存档后的面数据表

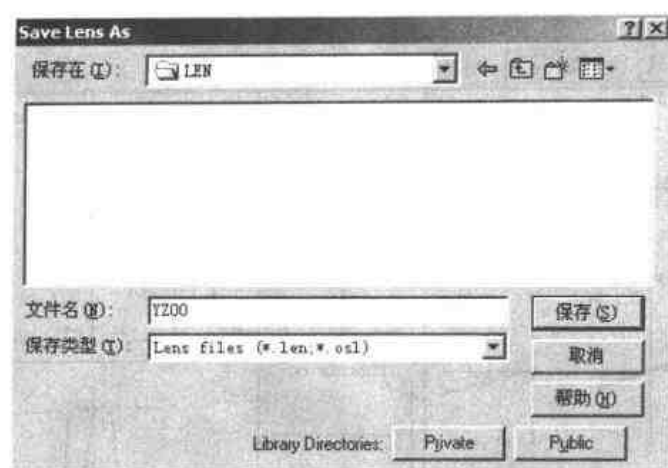



图 9-32 存档编辑表

(4) 近轴光特性设置

在如图 9-31 所示的上部通栏的右边在“Field angle”(deg) 栏旁边有一选项按钮，用它来调用近轴光特性的编辑表，单击，出现近轴光特性编辑表见图 9-33。显示了 NA、NA'、物高，像高、高斯像面距 (Gaus img dist)、后主面到像面距 (PP2 to image)、放大倍率 (Magnification)、出瞳半径、出瞳面位置等等。对于无穷远物距镜头，最主要记住高斯像面距 194.348453 mm (理想像面距)。值得强调的是，调用后必须单击 ，则屏幕又自动返回到如图 9-31 状态，进一步操作：把高斯像面距数值 194.348453 mm 键入如图 9-31 厚度竖栏的倒数第二行中，则在视场的最后一栏出现了像半高的数值 8.706280 mm。(这与图 9-33 中数值是一致的)。至此，输入与光路计算已告一段落，下面第 (6) 步骤属于“像质评价”范畴。

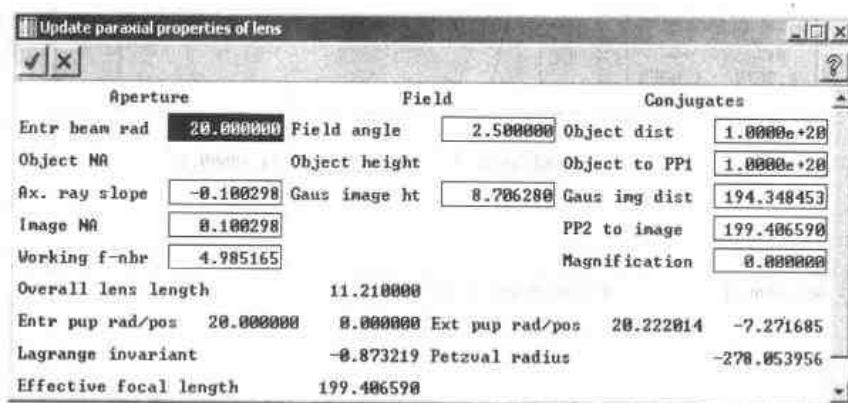





图 9-33 近轴光特性编辑表

(5) 透镜图形

在主视窗口，单击工具栏中图标 ，可出现透镜组平面剖面图；单击  会出现透镜组三维立体图。

(6) 像质评价报告图

- 观察主要的分析——单击工具栏中 ，可出现如图 9-34 所示平面图，从图中看到各种像差及光线追踪的透镜组平面图。经分析，像质不够好，有待进一步优化。

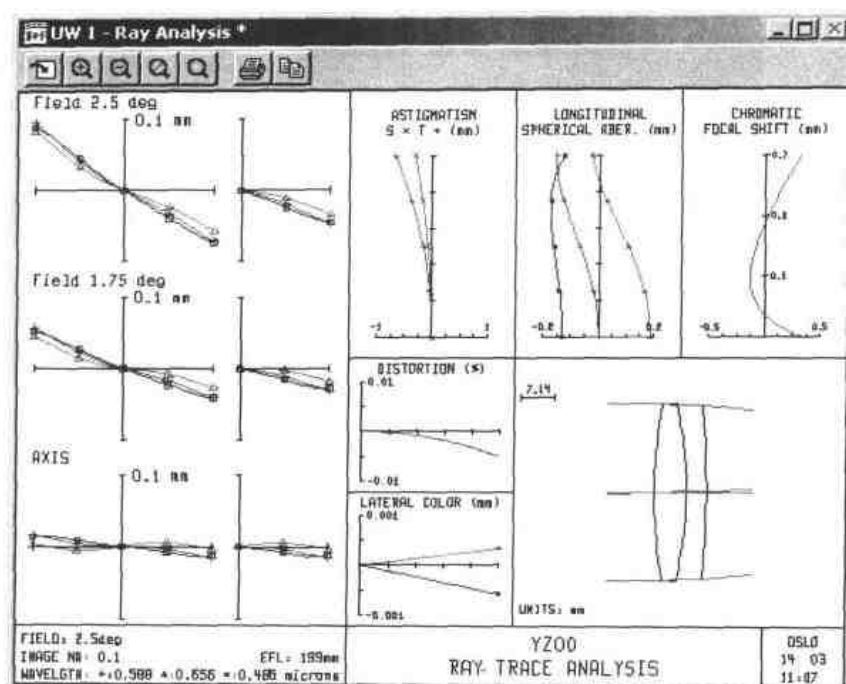



图 9-34 像差曲线及结构图

- 光学传递函数 (MTF) 分析——单击图标，如图 9-35 所示。

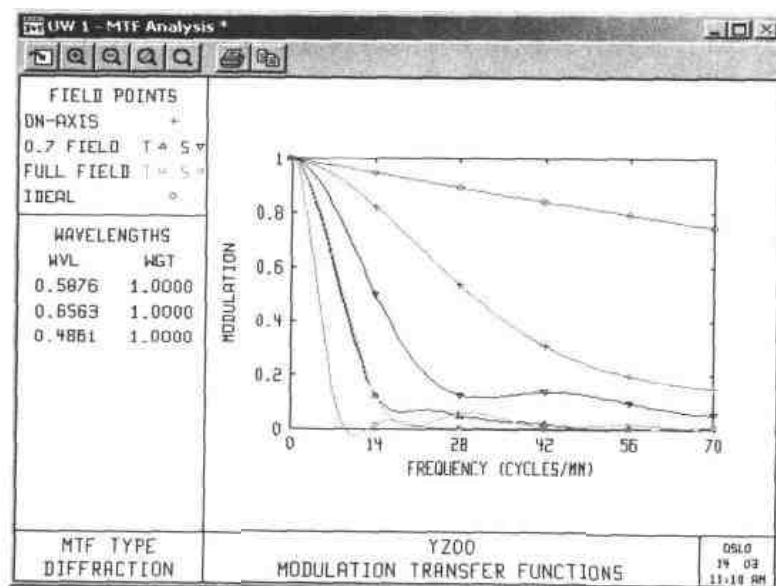






图 9-35 MTF 分析图

- 点列图分析——单击图标，如图 9-36 所示。

此外，如果是设计激光光学系统还应作波前分析，单击和点扩散函数，可看出输出像面光能集中度，若要分析在某规定的频率下，离焦时的 MTF 情况则单击.

3. 新建有限物距镜头文件

我们结合设计生物显微镜用 $10\times$ 消色差物镜来讲述。

设计一个 $10\times$ 色差物镜。光学特性： $\beta = -10\times$ ， $f' = 17.23 \text{ mm}$ ， $NA = 0.25$ ， $2Y = 1.8$ ， $L = 195 \text{ mm}$ ；为简单直观，取消盖玻片。其初始结构参数见表 9-3。

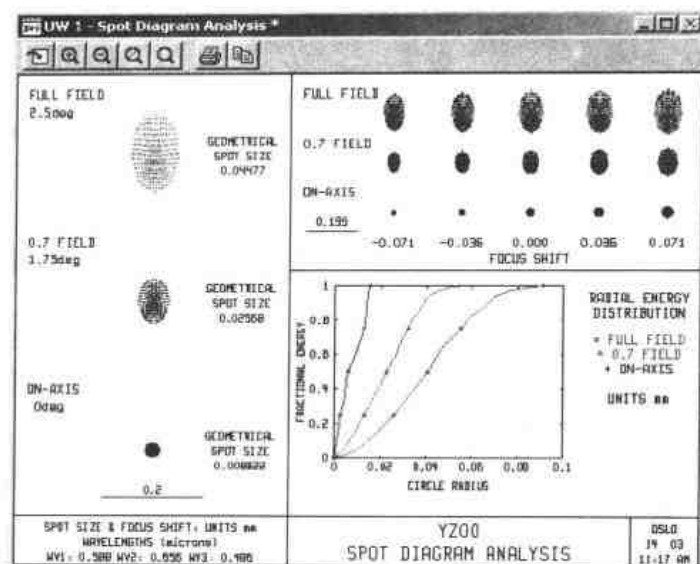


图 9-36 点列分析图

表 9-3 $10\times$ 消色差物镜初始结构

面号	r/mm	d/mm	n_D	ν	D_f/mm	玻 璃	备 注
1	∞ (光阑)				8.044		“()”内为德国 玻璃牌号
2	17.5212	0.01			8.044		
3	-13.092	2.7	1.5163	64.1	7.912	K9(BK7)	
4	-105.6329	1.8	1.6475	33.9	7.916	ZF1(SF2)	
5	8.357	17.55			7.129		
6	-6.252	2.9	1.5163	64.1	6.201	K9(BK7)	
7	-15.488	1.4	1.71715	29.5	5.967	ZF3(SF1)	

这里是按反向光路计算的。

有限物距镜头的输入具体操作步骤与无限远物距镜头大同小异，另有以下不同之处。

(1) 在输入光学特性参数时，不输入“光束半径”而输入 NA；在视场栏输入物半高值，单位为 mm。


(2) 在近轴光学特性设定时要在放大率栏填上放大倍率数值，NA 值、物半高值等。本例子的面数据输入后的图样，见图 9-37。

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	160.834133	9.000000	AIR	
ASI	0.000000	0.010000	4.022110	AS	AIR
2	17.521200	2.700000	4.022920	S	BK7 C
3	-13.092000	1.800000	3.955825	S	SF2 C
4	-105.639200	17.550000	3.957852	S	AIR
5	8.357000	2.900000	3.564557	S	BK7 C
6	-6.252000	1.400000	3.100259	S	SF1 C
7	-15.488000	7.399099	2.983368	S	AIR
IMS	0.000000	0.000000	0.900000	S	

图 9-37 $10\times$ 消色差物镜面数据编辑表

§ 9.5.3 调用镜头

从镜头库调用镜头作为设计的初始结构操作比较简单。如从“私人镜头”文件夹调用的步骤如下：

单击 File>>Open, 弹出“Open Lens File”编辑表, 见图 9-38, 在查找范围可以搜索, 也可键入拟调用镜头的文件名, 单击, 打开。在主视窗工具栏单击图标, 则可出现你所调用透镜的面数据编辑表。

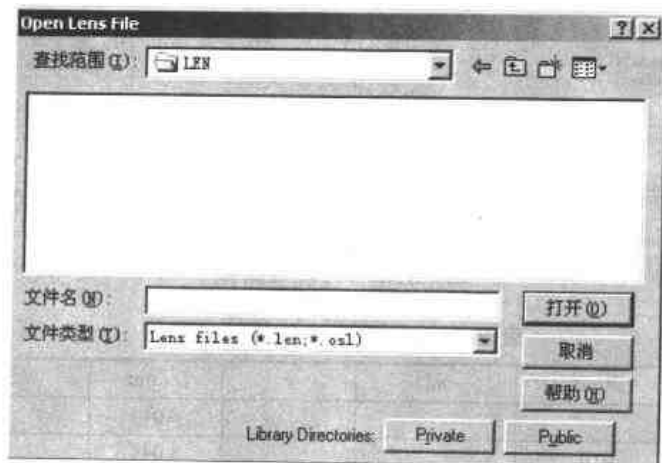


图 9-38 打开镜头文件

§ 9.5.4 优化

1. 优化的前期工作

- (1) 选好一个初始结构。
- (2) 确定优化变量。

一般来说透镜组的全部结构参数都可以作为优化变量参与优化, 但在本例中影响透镜组像质最主要的因素是 r 。因此把“ r ”作为优化变量, 当然可以选全部也可根据需要选择部分 r 。对于一般透镜组, 只要优化“ r ”就能达到相当好的像质。但有的需对厚度“ d ”和折射率“ n ”优化。限于篇幅本书仅介绍最常用的曲率半径的优化办法。

- (3) 选用评价函数。

依优化方式而定。

2. OSLO 的优化方式

- (1) “Aberrations”方式, 指用像差系数来优化。
- (2) “Rays”方式, 指用光线的几何像差, 横向像差等作为评价进行优化。
- (3) 用 GENII 误差函数方式优化, 与其他光学设计 CAD 软件一样, 在 OSLO Light 中优化必须建立适用的评价函数, OSLO Light 选用基于像差的误差函数作为评价函数。它包括 200 项, 各为 OCM1, OCM2, ..., OCM200。而 OSLO LT54 仅有 50 项, 误差函数最后一项是上述各项的误差函数值的均方根最小值 (MIN RMS ERROR)。





3. 曲率半径优化具体步骤





这里以表 9-2 双胶合望远物镜初始结构为例, 通过优化曲率半径的途径提高像质。

(1) 打开主视窗，单击 File>>Open，然后再打开相关的镜头数据调出镜头数据。因我们把“YZ00”放在私人透镜数据库中，仿“调用镜头操作”，屏显包含有 YZ00 镜头结构数据的面数据编辑表（见图 9-31）。

(2) 单击 File >> Save As，然后将该透镜“另存为”一个新文件（这里用“YZ00a”），目的是在文件夹里，保留备份，在需要时，可以再次打开。

(3) 打开近轴特性数据编辑表，确认 f' 、 ω 、 $D_0/2$ （入射光束半径）的优化目标值。

(4) 单击孔径半径竖列的选择钮，出现一个选择表，选中“Checked(k)”栏，则原有  标志的变为 ；有  标志变为 ，带 k 表示这一孔径可人为设置“渐晕”。若需复原，则选“not checked”栏单击，则 k 标志可除去。

(5) Optimize>>Variables 单击，出现一个变量编辑表（Update variables）如图 9-39 所示。若把全部 r 作为优化变量则单击“改变全部 r”（Vary all curvatures）栏，表中原只有一个栏就会扩展，其扩展栏数为“面数-1”（因光阑不作优化变量）。单击 ，则重复出现面数据编辑表，此时在曲率半径竖列选择钮的空白标志处均出现 。若仅是优化部分 r，则一个面一个面地设置，对 RADIUS 竖列，某面 r 值的选择钮单击，出现一个选项表，选中“Variable(v)”单击，使原来无标志的选择钮中出现 ，说明该面已支持作为优化变量。若单击 ，则又出现另一张选择表，单击“直接指定”（Direct specification）栏，则选择钮复现空白。

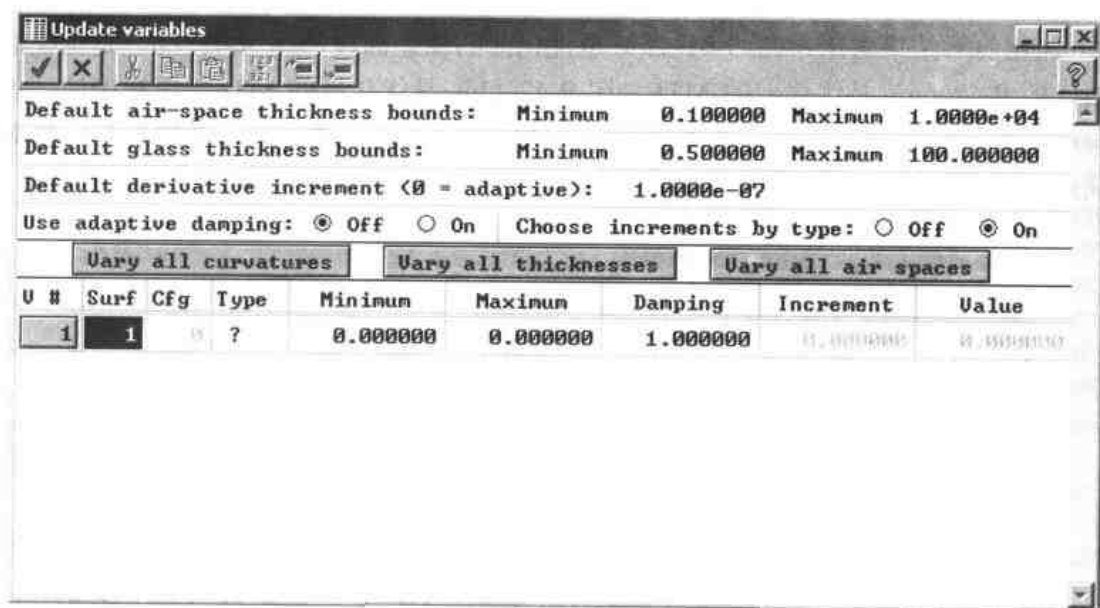







图 9-39 优化变量编辑表

(6) 选择误差函数 Optimire>>GEN II Error Function。单击后，激活了图标  和 。

(7) 单击面数据编辑表左上角绿 ，关闭该表，并立即重新打开它，将此当前透镜数据存入一个临时文件里，这样就可以利用 OSLO 还原功能。那么，在优化的过程中，如果一些操作或者数据发生了错误，设计者得以返回原来的状态。

(8) 单击  图标，出现误差函数表（Text Window）见图 9-40。最后一项就是本例镜头初始结构的误差函数最小均方根值：4.252394。

(9) 单击  图标，单击一次，循环迭代 10 次，误差函数的变化记录在工具栏下面的信息栏内。单击一次，该值变为 2.406374，第 2、3 …等多次变化不大。优化结果立刻显示在面数据编辑表上。

0 32	"OCM32/OCM4"	M	1.000000	1.0	YFS	-3.395999	2.06
0 33	"OCM33/OCM1"	M	1.000000	1.0	XFS	-4.758899	4.04
0 34	"OCM34/OCM7"	M	1.000000	1.0	Coma	-0.575959	0.06
0 35	"OCM35/OCM5"	M	1.000000	1.0	DY U	-2.116100	0.80
0 36	"OCM36/OCM6"	M	1.000000	1.0	OPD U	9.773464	17.04
0 37	"OCM37/OCM6"	M	1.000000	1.0	DMD U	4.338744	3.36
0 38	"OCM38/OCM5"	M	1.000000	1.0	DY L	2.807888	1.41
0 39	"OCM39/OCM6"	M	1.000000	1.0	OPD L	12.048550	25.90
0 40	"OCM40/OCM6"	M	1.000000	1.0	DMD L	2.974520	1.58
0 41	"OCM41/OCM5"	M	1.000000	1.0	Sag DX	-1.146544	0.23
0 42	"OCM42/OCM1"	M	1.000000	1.0	Sag DY	0.397610	0.03
0 43	"OCM43/OCM6"	M	1.000000	1	Sag OPD	4.218643	3.17
0 44	"OCM44"	M	--		f1_fymax	1.000000	--
0 45	"OCM45"	M	--		f2_fymin	-0.900000	--
0 46	"OCM46"	M	--		f2_fymax	0.900000	--
0 47	"OCM47"	M	--		f2_fx	0.800000	--
0 48	"OCM48"	M	--		f3_fymin	-0.800000	--
0 49	"OCM49"	M	--		f3_fymax	0.800000	--
0 50	"OCM50"	M	--		f3_fx	0.700000	--
MIN RMS ERROR:			4.252394				

图 9-40 误差函数表

(10) 对优化结果进行像质评价。在评价前，最好将优化结果先临时存一个文件。

① 评价优化结果的像质。仿照§9.5.2 “2.” 中“(6)”。

② 优化前后结果对比：图 9-41 (a) 是优化前的像差曲线，图 9-41 (b) 是优化后的像差曲线；图 9-42 (a) 是优化前的 MTF，图 9-42 (b) 是优化后的 MTF，更精确的评价要开启文本编辑表，质量如不满意，则调整结构或调整优化变量，继续下一轮的优化。如对结果表示满意，作为设计的成果。切记第 1 次必须存在“另存为”文档中。

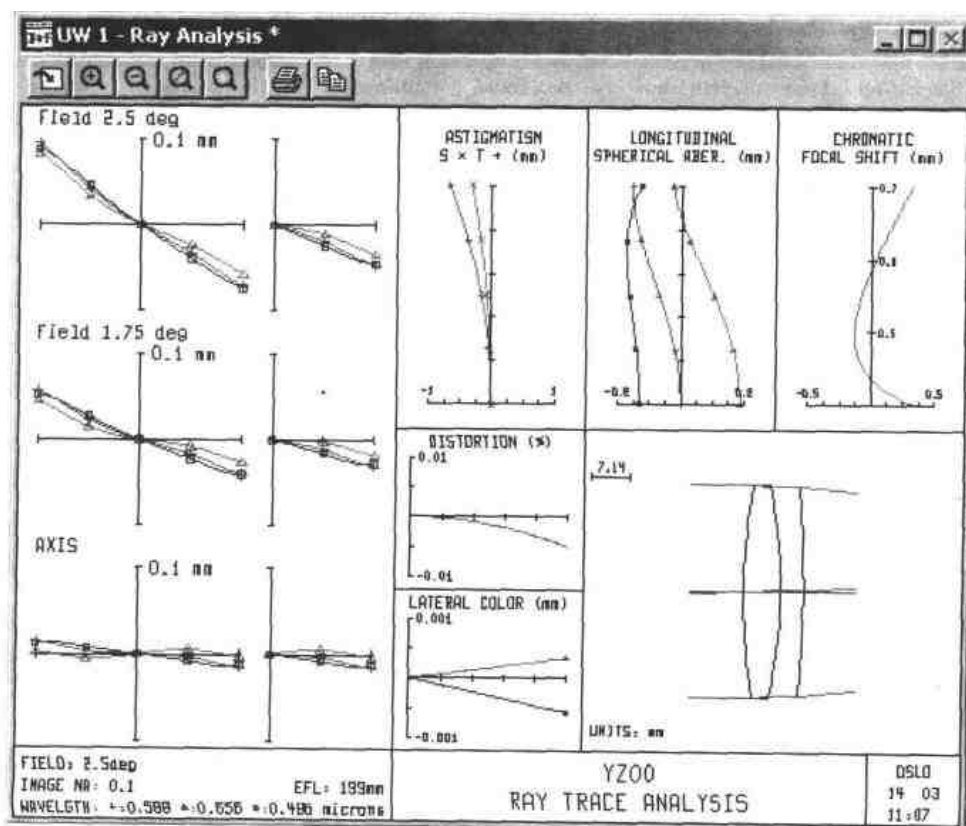


图 9-41 (a) 优化前像差曲线

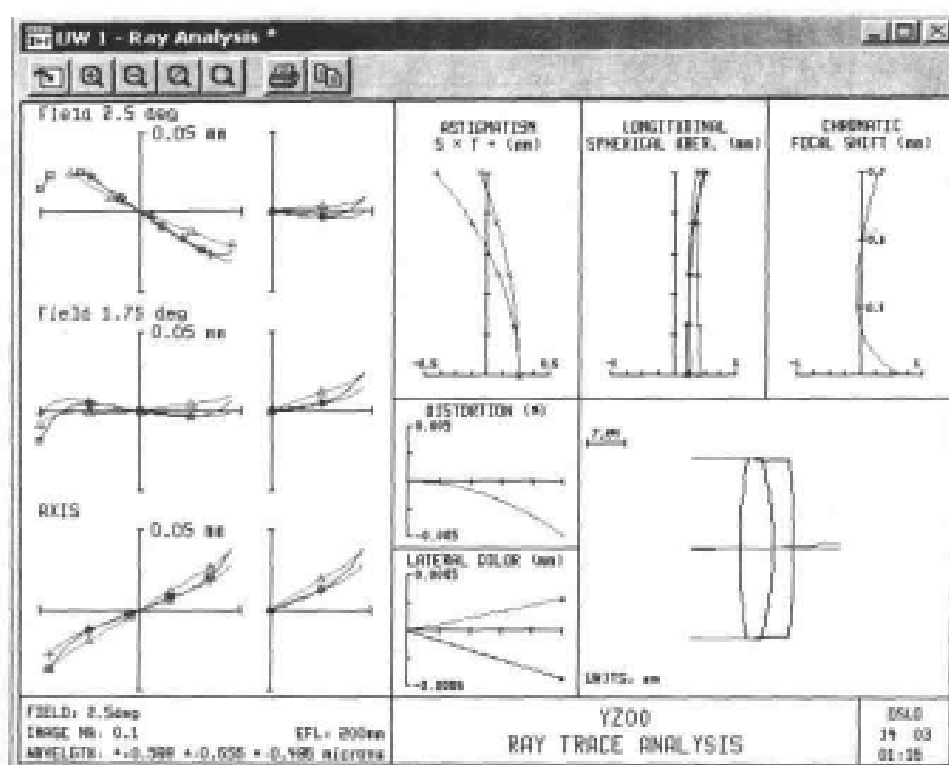


图 9-41 (b) 优化后像差曲线

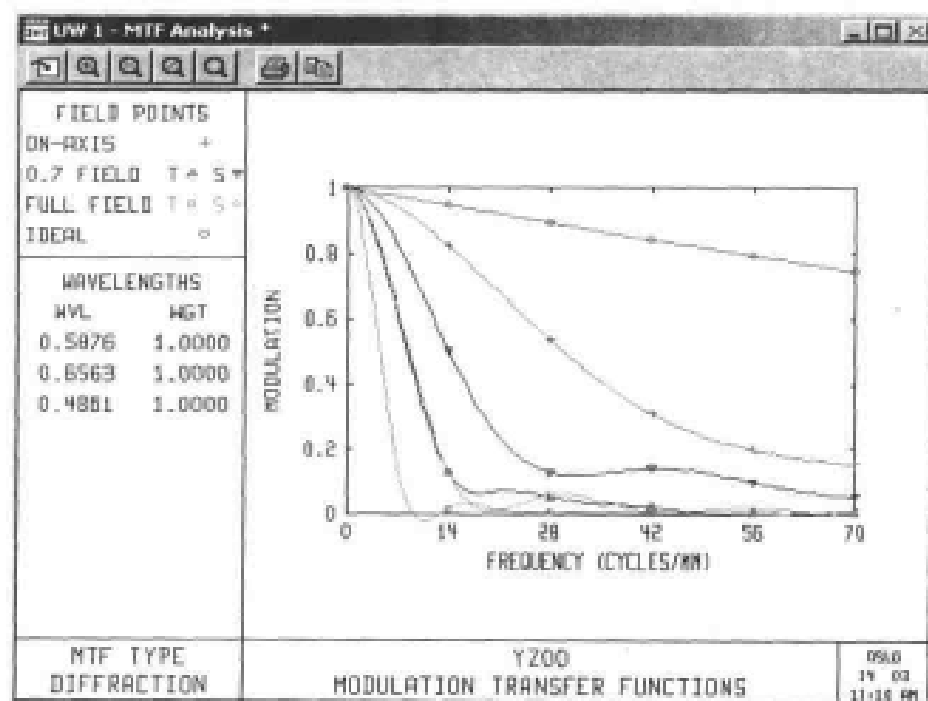


图 9-42 (a) 优化前 MTF

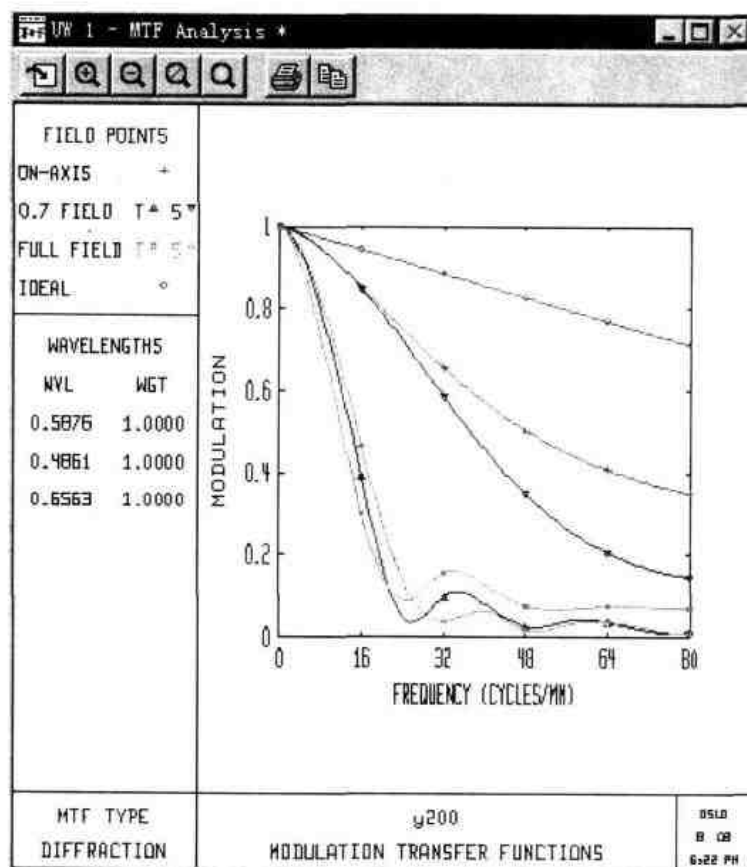
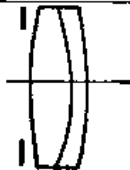


图 9-42 (b) 优化后 MTF

很显然，优化后结果优于初始结构，优化后结构参数见表 9-4。

表 9-4 优化后的双胶合望远物镜结构参数

主要技术指标		结 构					
$D/f=1/5$ $D=40\text{ mm}$ $f=199.765$ $2W=5^\circ$							
参 数							
面号	r/mm	d/mm	n_D	ν	D_0/mm	玻璃	备注
1	∞ (光阑)				40		“() ” 内为 德国玻璃牌 号
2	124.4072	0.01			40		
3	-82.9678	7	1.5163	64.1	39.64	K9(BK7)	
4	-262.9995	4.2	1.6475	33.9	39.59	ZF1(SF2)	

§ 9.6 OSLO LT54 应用实例

作者应用了 OSLO LT54 软件设计了结构比较简单的照像物镜、显微物镜以及望远物镜、目镜。本章介绍的实例除双高斯照相物镜引用 OSLOLT54 范例外，其余均出自作者本人的设计。

§ 9.6.1 双高斯型照像物镜设计

这里引用了 OSLO 使用手册中的范例见图 9-43, 图 9-44, 图 9-45。作者受出品商委托确认本范例版权所有, 即: Copyright 2001 by Lambda Research Corporation, Littleton, MA, USA。为了帮助读者查找, 现列出该范例的文件名和路径: ①文件名: Dblgauss1.len; ②路径: Oslo It54\Public\Len\Demo\Tutorial\Dblgauss1.len。

Double Gauss, 50mm f/2 20deg						N View: <input type="radio"/> Srf <input checked="" type="radio"/> Grp Draw: <input type="radio"/> Off <input checked="" type="radio"/> On	
Entrance beam radius (mm)		12.500008		Field angle (deg)		20.000000	
Wavelength (microns)		0.587560 *		Efl		50.007874	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.6397e+19	AIR			
1	35.596764	V	7.000000	V	21.000000	BASF51	C
2	179.585038	V	0.500000	V	21.000000	AIR	
3	19.562015	V	8.000000	V	15.000000	LAKN7	C
4	-215.934036	V	2.000000	V	15.000000	SF1	C
5	13.172084	V	3.880000	V	8.500000	AIR	
AST	0.000000	8.770000	V	7.500000	A	AIR	
7	-21.018490	V	1.500000	V	11.000000	BASF2	C
8	31.373425	V	9.000000	V	15.500000	LAF2	C
9	-27.487997	V	0.500000	V	15.500000	AIR	
10	45.204010	V	6.000000	V	19.000000	LAF2	C
11	-677.153337	V	20.000000	V	19.000000	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	18.500000				

图 9-43 双高斯物镜结构参数

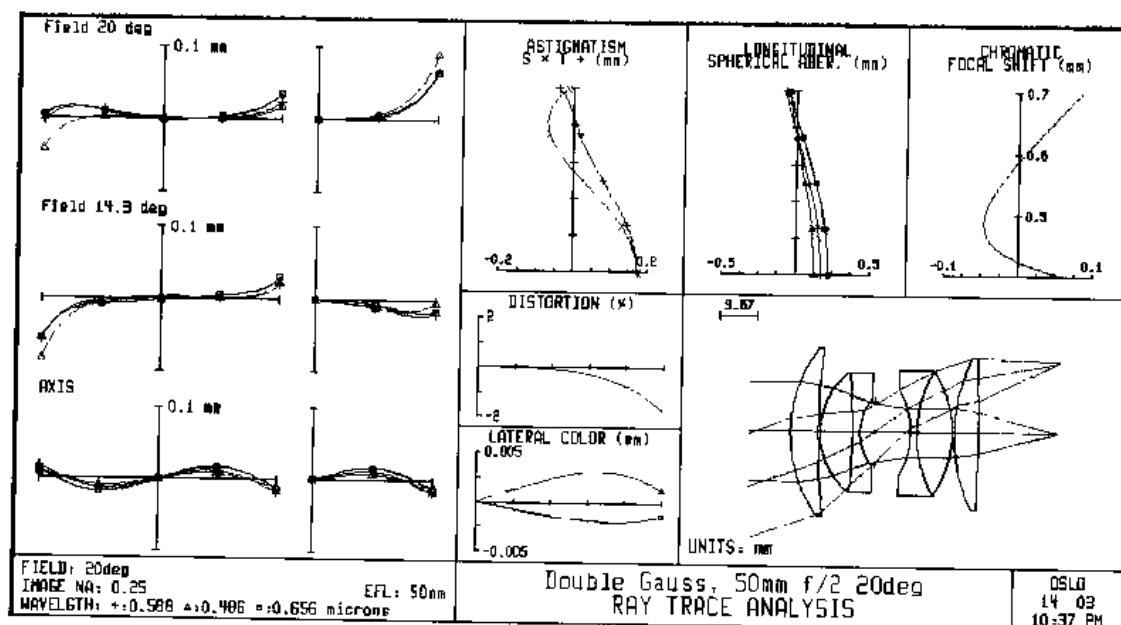


图 9-44 双高斯物镜像差曲线及结构图

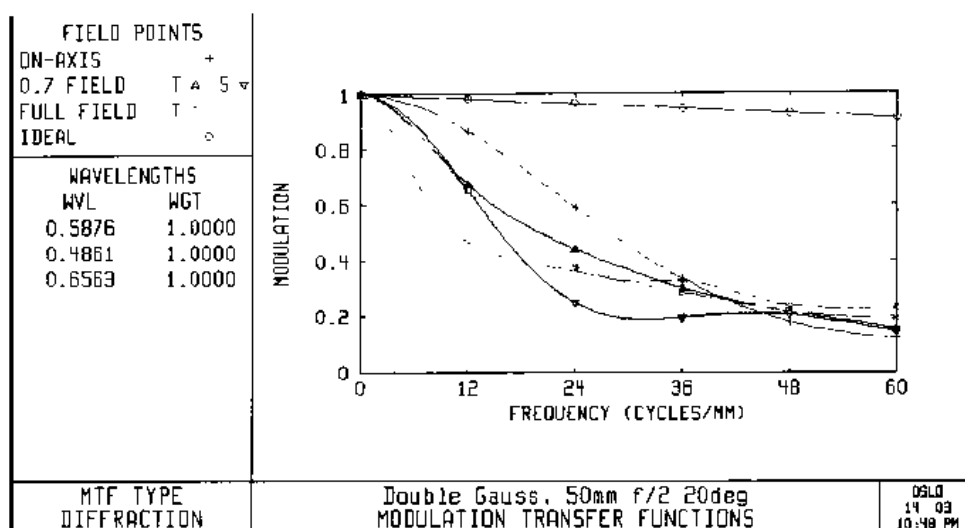


图 9-45 双高斯物镜多色光光学传递函数

§ 9.6.2 25 \times 消色差显微物镜设计

25 \times 消色差显微物镜设计如图 9-46、图 9-47、图 9-48 所示。

Update surface data

☒ ☐

图 9-46 25 \times 消色差显微物镜结构参数

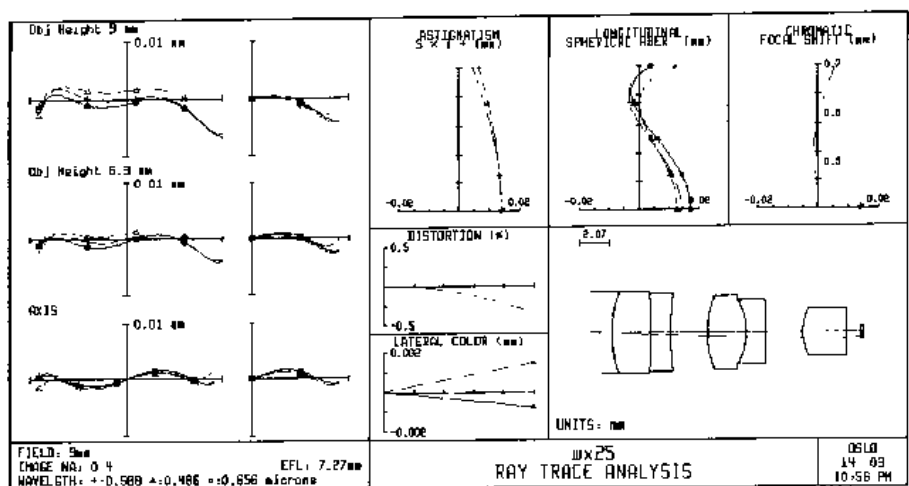


图 9-47 25×消色差显微物镜像差曲线及结构图

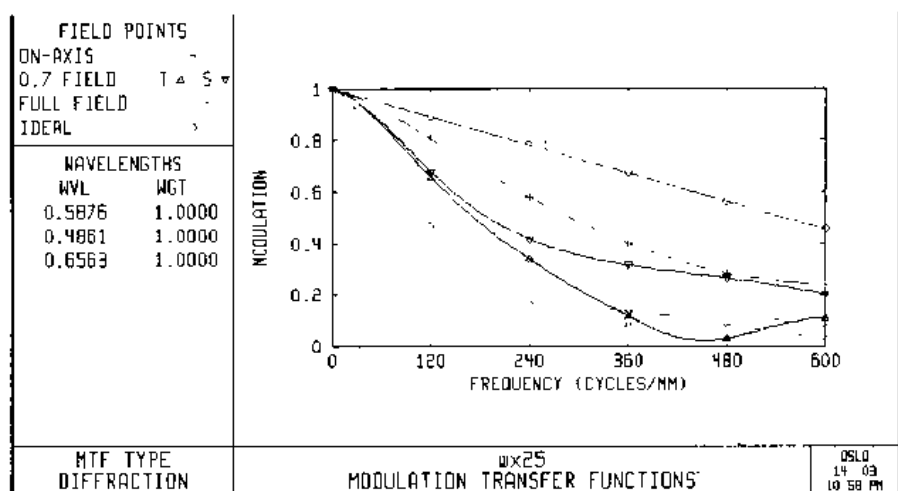


图 9-48 25×消色差显微物镜多色光光学传递函数

§ 9.6.3 15×广角目镜设计

15×广角目镜设计如图 9-49、图 9-50、图 9-51 所示。

No name		View: <input type="radio"/> Srf <input checked="" type="radio"/> Grp Draw: <input checked="" type="radio"/> Off <input type="radio"/> On			
Entrance beam radius (mm)		0.400000	Field angle (deg)	24.000000	
Wavelength (microns)		0.587560	Efl	17.185487	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	CLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.4523e+19	AIR	
AST	0.000000	9.500000	0.400000 AS	AIR	
2	0.000000	3.500000	4.629673 S	BK7 C	
3	-14.010000 V	0.100000	5.657033 S	AIR	
4	-74.855600 V	1.620000	5.680688 S	SF4 C	
5	17.742000 V	8.500000	5.951916 S	BK7 C	
6	-17.891000 V	1.200000	8.046880 S	AIR	
7	23.578500 V	5.000000	8.216401 S	BK7 C	
8	0.000000	11.256000	8.088429 S	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	7.651475 S		

图 9-49 15×广角目镜结构参数

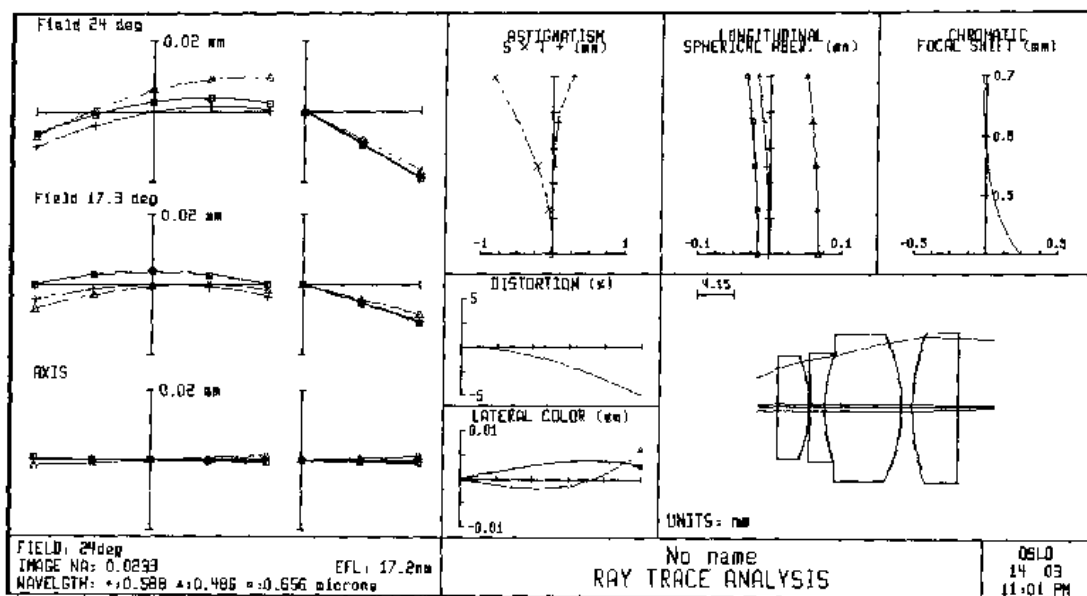


图 9-50 15 \times 广角目镜像差曲线及结构图

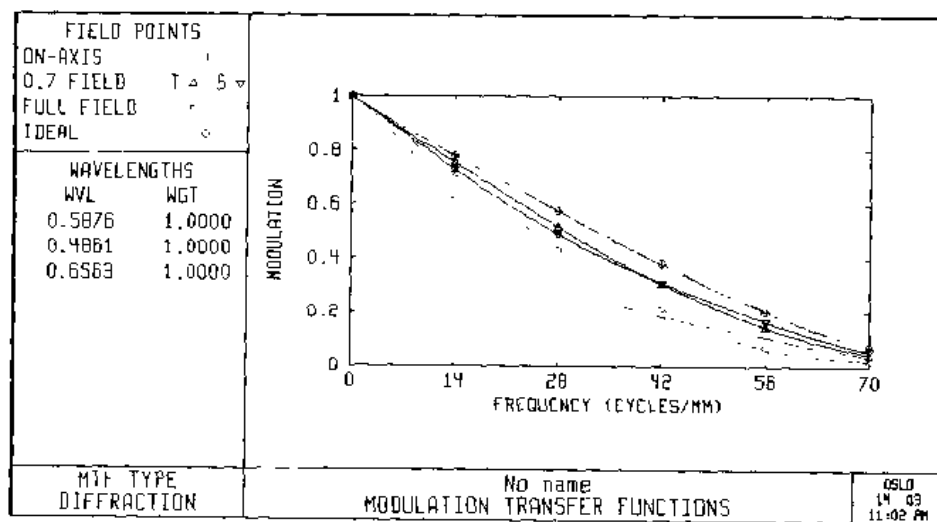


图 9-51 15 \times 广角目镜多色光光学传递函数

第 10 章 光学零件与光学制图

光学零件是光学仪器结构中最小的独立单元，由光学材料经过加工制造而成。因此，学习光学设计应具备光学材料方面的基础知识。

光学系统设计完成后，后续的重要工作是绘制技术图纸，主要绘制光学系统图、光学部件图、光学零件图。这些图纸为光学零件加工、检验，部件的胶合、装配、校正，乃至整机的装调、测试提供依据。可见，设计者也需要熟悉光学制图方法，掌握光学制图的技能。只有这样，才算掌握了工程光学设计的全过程。

值得指出的是，光学制图与机械制图有不少共性（视图表达、粗糙度符号与标注、公差与配合的使用与标注等等），当然也有其特殊性。笔者假定读者已掌握了机械制图的知识与技能，主要就特殊性展开阐述。

§ 10.1 光学材料

§ 10.1.1 光学材料简介

光学材料是指用来制作光学零件的透光材料。常用有光学玻璃、普通玻璃、光学晶体、光学塑料等。选什么材料来制造光学零件？首先取决于光学零件的功能如折射、衍射、偏振、滤光、分色和反射等；其次是光学零件在成像波段的透过率和反射率，或在反射情况下的反射率，也要考虑外形尺寸、重量等其他要求。

光学仪器主要由折射光学零件构成。光学玻璃是最常用的光学材料，它的光学均匀性好，机械强度高，表面强度较大，易于加工研磨和抛光；大多数在大气中具有较好的化学稳定性。光学晶体透射波段范围一般比光学玻璃更宽，因此，在红外、紫外波段范围得到较广泛的应用。光学塑料具有价格便宜，密度小而轻，易于模压成型，成本较低，生产率高和不易破碎等优点，近年来已应用在一些中低档光学仪器上，但主要缺点是热膨胀系数和折射率的温度系数比光学玻璃大得多。

§ 10.1.2 光学玻璃

光学玻璃是指对折射率、色散、透射比、光谱透射比和光吸收等光学特性有特定要求，且光学性质均匀的玻璃。硅酸盐玻璃按光学性质可分为冕牌玻璃和火石玻璃。冕牌玻璃是具有低折射率、低色散特性的光学玻璃；火石玻璃是具有高折射率、高色散特性的光学玻璃。

我国无色玻璃是根据国家标准“无色光学玻璃”（GB903—87）制造的。如上述，光学玻璃分冕牌玻璃和火石玻璃两大类，这两大类中又可细分为 18 种类型：氟冕（FK）、轻冕（QK）、冕（K）、磷冕（PK）、钡冕（BaK）、重冕（ZK）、镧冕（LaK）、特冕（TK）、冕火石（KF）、轻火石（QF）、火石（F）、钡火石（BaF）、重钡火石（ZBaF）、重火石（ZF）、镧火石（LaF）、重镧火石（ZLaF）、钛火石（TiF）和特种火石（TF）。

透射材料的折射特性一般以夫琅和费特征谱线的折射率表示。用于目视仪器的常规光学玻璃常以 d 光的折射率 n_d 、F 光和 C 光的折射率 n_F 、 n_C 为主要特征。这是因为 F 光和 C

光位于人眼灵敏光谱区的两端，而 d 光位于其中，比较接近人眼最灵敏的谱线 555nm。

光学玻璃一般有如下几种光学常数：

折射率 n_d 和中部色散 $d_n = n_F - n_C$ ；阿贝常数： $\nu_d = (n_d - 1)/(n_F - n_C)$ ，也叫色散系数；部分色散：任意一对谱线的折射率之差 $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$ ；相对色散：部分色散和中部色散之比 $(n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2})/(n_F - n_C)$ 。这些光学常数在附录 I《无色光学玻璃 n_d 、 $n_F - n_C$ 、 ν_d 标准数值》中均可查到。此外，光学玻璃的物理化学性能参数，如密度、热膨胀系数、化学稳定性、光学均匀性、应力消除程度、玻璃气泡、杂质和条纹等均有一定的标准和规定，这是在光学设计时必须熟悉的。值得指出，当我们使用国外光学设计 CAD 软件时，软件会给出德国肖特厂等著名的玻璃生产厂家的玻璃牌号，只要输入相应的牌号，所有的有关光学常数就能自动地录入相关的参数表中，查找十分方便。为此，我们编写了附录 II《中德玻璃牌号对照表》，该表是在我国最大的光学玻璃生产基地——成都光明器材厂产品目录的基础上，作了若干处修订而成。

各种牌号玻璃色散系数和折射率分布如图 10-1 所示。利用这种无色光学玻璃 $n_d - \nu_d$ 领域图，为光学设计挑选玻璃带来了便利。

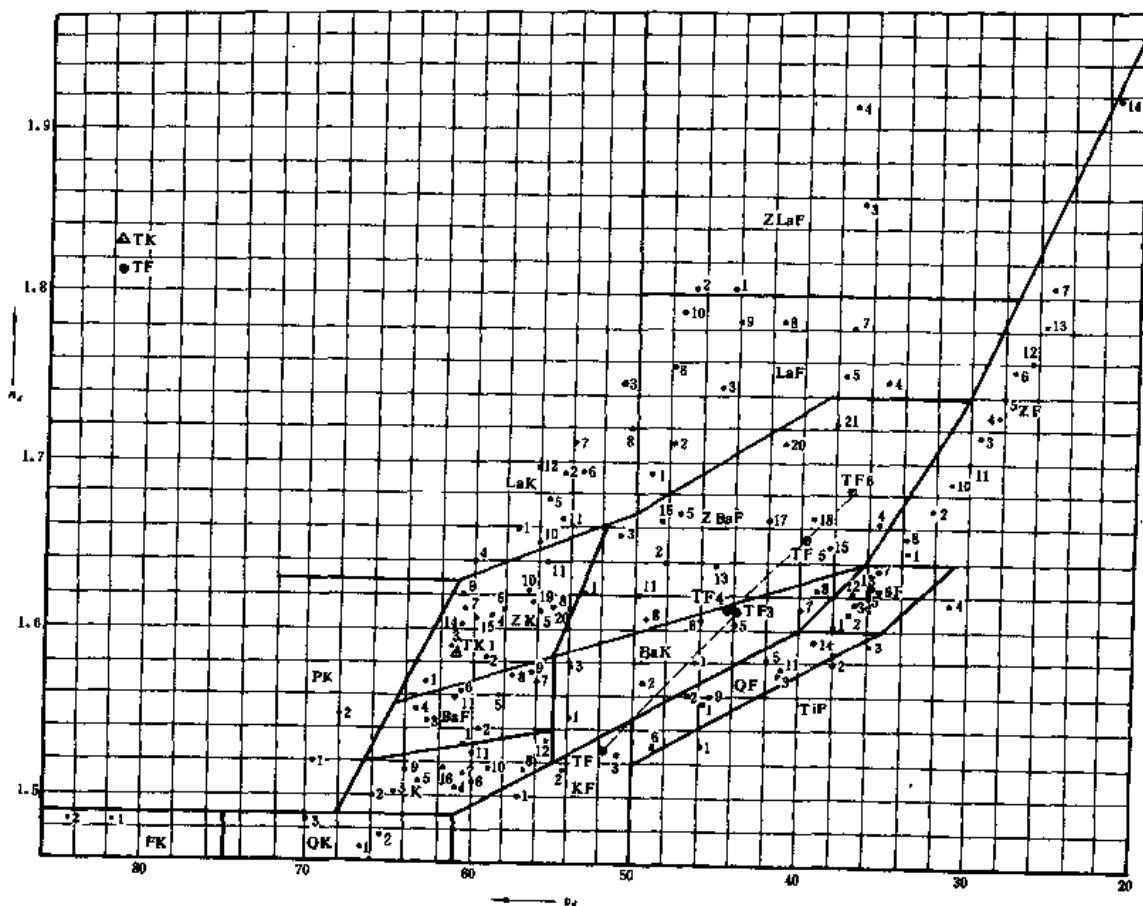


图 10-1 无色光学玻璃 $n_d - \nu_d$ 领域图

反光镜和具有反射面的棱镜等反射光学零件是在抛光玻璃表面镀上高反射率金属材料的光学薄膜制成的。因此，反射光学材料的重要光学特性是对各种色光的反射率。

§ 10.1.3 激光技术用的光学材料

本节简要介绍激光技术用的光学材料及其在各激光波长下的折射率。按照苏联国标

ГОСТ13659-68 规定, 在 $\lambda=0.4\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 光谱区内, 光学玻璃实际上是足够透明的, 可见, 最好的光学材料是无色光学玻璃。多数光学玻璃的吸收率, 在此光谱区的大部分均为常数——玻璃中的 1 cm 光程的吸收率约为 1% , 而与玻璃牌号无关。但在靠近透射界限处, 吸收率的变化完全取决于玻璃的成分 (牌号)。玻璃的吸收率值可从该材料的透射曲线上求得。我们把 $d=10\text{ mm}$ 厚的材料层中透射达到 $\tau_\lambda = 50\%$ 的波长, 取为透射界限值—— $\lambda_{\text{界限}}$ 。

伴随着激光技术的发展, 激光光学系统的应用越来越广泛, 就必须计算激光的特殊波长 (如 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$, $\lambda=0.4880\ \mu\text{m}$) 光的光学特性和像差。而这些波长的折射率一般玻璃目录中又没有, 这就需要设计者利用插值公式。现介绍以下几个公式。

1. 赫兹别尔格 (Herzberger) 公式

$$n_\lambda = A + B\lambda^2 + \frac{C}{(\lambda^2 - 0.035)} + \frac{D}{(\lambda^2 - 0.035)^2} \quad (10-1)$$

式中, n_λ 为所计算波长的折射率; λ 为波长; A, B, C, D 为 4 个待定系数, 通过计算已知的任意 4 种波长的折射率, 建立 4 个方程式, 就可解出 4 个系数 A, B, C, D 。将已知 4 个系数代入式 10-1 即可算出任意波长折射率 n_λ 。计算时波长的单位是 μm 。该公式的计算精度在小数点后 5 位, 波长范围是 $0.404\ 00\sim 0.763\ 00\ \mu\text{m}$ 。

2. 肖特厂公式

上述公式待定系数少, 计算精度低和光谱范围窄, 为了提高计算精度和扩大光谱范围, 肖特厂提出具有 6 个待定系数的折射率插值公式

$$n_\lambda^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8} \quad (10-2)$$

式中, n_λ 为所计算波长的折射率; λ 为波长; 以 μm 为单位; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为待定系数。

在一般的玻璃目录中都给出 6 个系数, 也可以由参考文献[45]中查出, 然后将其代入式 (10-2) 中, 即可算出任意波长折射率 n_λ 。该公式的计算精度为 3×10^{-6} , 光谱范围 $0.365\sim 1.04\ \mu\text{m}$ 。

为方便读者, 把激光技术常用的光学材料及其折射率, 列于表 10-1, 表 10-2 之中。

表 10-1 激光用玻璃材料的折射率

玻璃牌号	各种激光波长 λ (μm) 折射率							
	0.4416	0.488	0.530	0.6328	0.6943	0.91	1.060	1.153
K9	1.526	1.521	1.519	1.514	1.512	1.5084	1.5062	1.505
F2	1.6329	1.6243	1.6186	1.6095	1.6059	1.597	1.5952	1.593
ZK6	1.6249	1.6198	1.6163	1.610	1.608	1.6028	1.6003	1.5990
BaF8	1.645	1.637	1.631	1.6227	1.6193	1.612	1.608	1.6074
QF3	1.591	1.584	1.579	1.5721	1.5691	1.5626	1.5598	1.5583
F5	1.645	1.636	1.630	1.620	1.617	1.609	1.6059	1.6043
BaK3	1.5568	1.5526	1.5497	1.5450	1.5429	1.5383	1.5360	1.534
BaK7	1.580	1.575	1.572	1.56676	1.56450	1.5593	1.5570	1.5558
ZF1	1.6709	1.6608	1.6542	1.643	1.639	1.6312	1.6276	1.6277
TF1	1.541	1.536	1.533	1.527	1.525	1.5198	1.5173	1.5160

续表

玻璃牌号	各种激光波长 λ (μm) 折射率							
	0.4416	0.488	0.530	0.6328	0.6943	0.91	1.060	1.153
ZK7	1.624	1.619	1.616	1.6109	1.6086	1.603	1.600	1.599
ZF6	1.789	1.774	1.764	1.7497	1.7440	1.732	1.727	1.7255

表 10-2 激光用晶体材料的折射率

材料名称	各种激光波长 λ (μm) 折射率								
	0.488	0.530	0.6328	0.6943	0.910	1.060	1.153	2.36	10.6
CaF_2 晶体	1.436	1.4353	1.4329	1.4319	1.4296	1.4285	1.4280	1.4219	—
BaF_2 晶体	—	—	1.4733	1.471	1.469	1.4681	1.467	1.4634	1.39
KBr 晶体	—	—	1.556	1.553	1.546	1.543	1.542	1.537	1.52
熔融石英	—	1.4608	1.4570	1.4554	1.4506	1.4497	1.4486	1.4324	—
Ge	—	—	—	—	—	—	—	4.07	4.002
Si	—	—	—	—	—	—	3.54	3.4422	3.4177
NaF	—	—	1.3247	1.3238	1.3219	1.321	1.32	1.31	1.22
LiF	—	1.393	1.391	1.3902	1.38788	1.38662	1.38589	1.37493	1.05

§ 10.1.4 红外、紫外光学材料

选择红外、紫外光学材料首先要选择光谱透射和折射率。

1. 红外、紫外光玻璃透射曲线

某些玻璃的红外光谱透射曲线见图 10-2。这里列举的透射曲线，有的是对 $d=1\text{ mm}$ 厚的玻璃做的，未考虑表面损耗的用实线表示；有的是对 $d=10\text{ mm}$ 厚的玻璃做的，已考虑表面损耗的用虚线表示。由图可以看出：所有 $d=10\text{ mm}$ 的玻璃，实际上在红外区具有同一个透射界限，即在 $2.6\sim 2.8\mu\text{m}$ 之间。

某些最常用的光学玻璃的紫外光谱透射曲线图见图 10-3。它们的光吸收率，在可见区是 $0\sim 0.6\%/1\text{ cm}$ 。由图可以看出，随着折射率的提高，透射界限，如 $\lambda_{\text{界限}}$ 通常是往可见区方向移动，即在紫外区的透射将会减少。图中尚未给出的玻璃的光谱透射曲线，应处于 QK3 及 ZF6 玻璃的曲线之间，约按折射率增加的顺序排定。可能超出上述范围之外的，只有折射率小于 QK3 ($n_D=1.49$) 或大于 ZF6 ($n_D=1.75$) 的玻璃。所列举的曲线是针对 $d=10\text{ mm}$ 厚的玻璃说的，且已把表面损耗考虑进去。

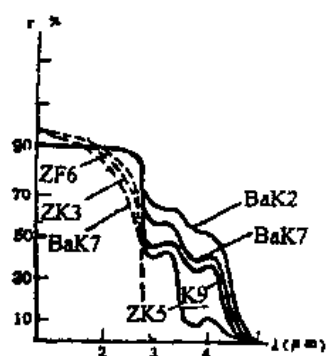


图 10-2 玻璃的红外谱线透射曲线

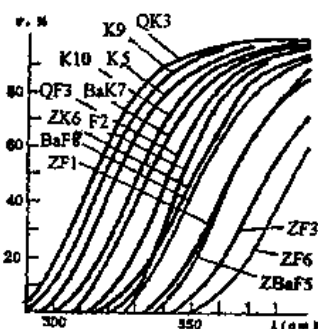


图 10-3 光学玻璃的紫外光谱透射曲线

2. 红外光谱范围的折射率计算公式

在设计红外光学系统时，需要选用一些光学晶体材料，这些材料的折射率公式在一般的书上很难查到，为此我们引用了赫兹别尔格（Herzberger）的另一种插值公式

$$n_{\lambda} = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (10-3)$$

式中， $L = \frac{1}{\lambda^2 - 0.028}$ ； A, B, C, D, E 是待定系数，由表 10-3 查出。将已知系数代入式 10-3 中，就可以计算出任意波长的折射率 n_{λ} 。

表 10-3 公式 (10-3) 的常数系数

序号	材料	应用的波长范围 μm	常 数				
			A	B	C	D	E
1	熔融石英	0.5~4.3	1.44902	0.004604	-0.000381	-0.0025262	-0.00007722
2	SrTiO ₃	1.0~5.3	2.28355	0.035906	0.001666	-0.0061335	-0.00001502
3	MgO	0.5~5.5	1.71960	0.006305	-0.000000	-0.0031356	-0.0000077
4	Al ₂ O ₃	1.0~5.6	1.75458	0.007149	-0.001577	0.004538	-0.00002808
5	LiF	0.5~6.0	1.38761	0.001796	-0.000041	-0.0023045	-0.00000557
6	CaF ₂	0.6~8.3	1.42780	0.002267	-0.000069	-0.0011157	-0.00000162
7	BaF ₂	0.5~11.0	1.46629	0.002867	0.000064	-0.0006035	-0.000000465
8	Si	1.3~11.0	3.41696	0.138497	0.013924	-0.0000209	0.00000148
9	Ge	2.0~13.5	3.99931	0.391707	0.163492	-0.0000060	0.00000053

3. 用在紫外光谱范围的光学晶体折射率

在设计紫外光学系统时，要用到一些晶体材料，这些材料的折射率一般书上也很难找到。现将一些常用晶体材料的折射率引用在表 10-4 中。

表 10-4 光学晶体的折射率

波长 μm	各种光学晶体的折射率					
	NaCl	KCl	LiF	NaF	CaF ₂	KBr
239.98	1.6721	1.60500	1.42195	1.35793	—	1.7576
248.28	1.65878	1.59265	1.41942	1.35500	1.46793	1.7330
253.65	1.65112	1.58569	1.41792	1.35325	1.46597	1.7198
265.37	1.63680	1.57270	1.41504	1.34999	1.46233	1.6950
280.35	1.62214	1.55939	1.41188	1.34645	1.45828	1.67125
302.15	1.60578	1.54468	1.40818	1.34232	1.45357	1.64603
313.17	1.59915	1.53875	1.40669	1.34062	1.45163	1.63607
366.31	1.57684	1.51889	1.40121	1.33482	1.44477	1.60391
404.66	1.56660	1.50993	1.39851	1.33194	1.44151	1.58989
486.13	1.55327	1.49818	1.39480	1.32818	1.43704	1.57191
546.07	1.54730	1.49293	1.39300	1.32640	1.43496	1.56405
587.56	1.54428	1.49028	1.39209	1.32552	1.43387	1.56010
589.30	1.54416	1.49020	1.39204	1.32549	1.43383	1.55995
656.28	1.54052	1.48700	1.39085	1.32436	1.43248	1.55519
728.14	1.53777	1.48454	1.38978	1.32349	1.43141	1.55160
768.20	1.53654	1.48349	1.38927	1.32307	1.43092	1.55007
1083.03	1.53116	1.47878	1.38657	1.32125	1.42839	1.54355

§ 10.1.5 光学薄膜

在光学零件表面镀上一层（或多层）金属（或介质）薄膜，其目的是为了达到减少或增加光的反射、分束、分色、滤光、偏振等要求。光学薄膜按其用途可分为透光膜、内反光膜、析光膜、半透明半反射膜、滤光膜、保护膜；按其结构可分为单层、双层、三层和多层膜；按制造方法可分真空镀膜和化学镀膜，前者使用最普遍。所谓真空镀膜是指在真空条件下利用物理现象进行光学零件镀膜的工艺过程。基本原理是：在真空条件下加热金属或介质材料，使金属或介质分子形成蒸气从本体渗出，向各方发射、撞击而凝聚在被镀零件表面上，就形成了均匀薄膜。光学镀膜技术的工艺要求在光学零件图上按标准注出。

（见 § 10.2、§ 10.4）

§ 10.1.6 光学塑料

光学塑料是一种具有光学性能的透明塑料材料，因此它能在一定的使用范围内替代光学玻璃。

1. 光学塑料的类别及主要品种

据受热后性能变化，光学塑料可分为：热塑性光学塑料和热固性光学塑料两大类。尽管光学塑料在世界上有上百种之多，但应用较多的品种也不外下列几个品种。

（1）聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）

因其折射率与冕牌玻璃相近，故被称为冕牌光学塑料。PMMA 具有质轻、工艺简单、价格低廉的优点。它可通过热压成型或注射成型，还可机械加工；适用于制造量大面广的塑料光学元件，是光学塑料应用最广的一种。如照相机的取景器，教学投影仪的非涅尔透镜，生物医学工程的人工晶体、接触眼镜，还大量用于塑料光纤、光盘基板等。

（2）聚苯乙烯（PS）

PS 属热塑性塑料。成本比 PMMA 低一半，容易模压成型。因其折射率、色散系数、透过率与火石玻璃相仿，也称火石光学塑料；因此它在光学仪器应用的一个重要方面是把它做成负透镜，与 PMMA 材料的正透镜组合成消色差双胶合透镜组。但它的光学稳定性、耐紫外辐射都不及 PMMA，受光照或长期存放后，往往会出现变浊和发黄现象。

此外，使用较多的光学塑料还有聚碳酸酯塑料（PC）、苯乙烯-丙烯酸酯的共聚物（NAS）、CR-39 塑料、聚 4-甲基戊烯-1（TPX）、苯乙烯-丙烯腈共聚物（SAN）等。

2. 光学塑料的性能

对于光学塑料，主要看其光学性能。几种主要光学塑料的性能见表 10-5。

3. 光学塑料的优缺点

（1）光学塑料的优点

① 成形方便，量大、面广、成本低。

② 耐冲击强度高。光学塑料的冲击强度可达 $25 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m/m}^2$ ，比光学玻璃大 10 倍，经得起撞击和跌落，不易破碎。

表 10-5 几种主要光学塑料的性能

塑料性能		单位	聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	聚苯乙烯 (PS)	聚碳酸酯 (PC)	NAS	TPX	CR—39	SAN
物理性能	N_D^{20}		1.490	1.59~1.60	1.586	1.533	1.465	1.504	1.571
	v		57.2~57.8	30.8~30.9	29.9	42.4	56.2	57.8	35.3
	透光率	%	92	88~92	80~90	80~88	90	92	
	密度	Kg/m ³	(1.17~1.20) × 10 ³	(1.04~1.06) × 10 ³	1.20 × 10 ³	(1.12~1.16) × 10 ³	0.83 × 10 ³	1.32 × 10 ³	1.1 × 10 ³
机械性能	抗张屈服强度	Pa	8 × 10 ⁷	(35~63) × 10 ⁶	72 × 10 ⁶	63 × 10 ⁶			
	抗张断裂强度	Pa	8 × 10 ⁷	(35~63) × 10 ⁶	6 × 10 ⁷				
	断裂伸长率	%	2~10	1.0	75 泊桑比 0.38	4~5			
	抗张弹性模量	Pa	3.16 × 10 ⁹	(2.8~3.5) × 10 ⁹	2.3 × 10 ⁹	3.5 × 10 ⁹			
	静弯曲强度	Pa	145 × 10 ⁶	(61~98) × 10 ⁶	113 × 10 ⁶	(113~130) × 10 ⁶			98 × 10 ⁶
	弯曲弹性模量	Pa	2.56 × 10 ⁹		1.54 × 10 ⁹				
	压缩强度	Pa	(84~127) × 10 ⁶	(80~112) × 10 ⁶	771 × 10 ⁵	77 × 10 ⁶			
	剪切强度	Pa		408 × 10 ⁵					
	冲击韧性	N · m/m ² × 10 ³	无缺口 23.7 缺口 3	悬臂缺口 0.54~0.86	无缺口, 不断	悬臂缺口 0.75~1.1			
	布氏硬度	HB	15.3	65~80	75	70~85			
热性能	玻璃化温度	℃	105	100	149				
	熔点	℃	160~200	131~165	225~250				130~160
	马丁耐热	℃	68	70	116~129	<60			63
	线胀系数	1/℃	(5~9) × 10 ⁻⁵	(6~8) × 10 ⁻⁵	6 × 10 ⁻⁵	(6~8) × 10 ⁻⁵		8 × 10 ⁻⁵	3.6 × 10 ⁻⁵
	热变形温度	℃	68	65	132	85			
	计算收缩率	%	1.5~1.8	0.5~0.6	0.5~0.7				
	导热系数	W/m · K	0.167~0.251	0.100~0.138	0.193	0.125~0.167			
化学性能	耐酸性及对盐稳定性		除强氧化酸外, 对酸、盐水均稳定	能耐有机酸盐等溶液	稀酸、盐水稳定				
	耐碱性		强碱侵蚀, 弱碱稳定	对碱类化合物稳定	弱碱影响较轻, 强碱不行				
	耐油性		对油类稳定	影响表面颜色	稳定				
	耐有机溶液		芳香族、氯化烃能溶解	受许多烃类、酮类脂肪族侵蚀而软化	不溶于脂肪族、碳氢化合物、醚和醇类				
	日光及耐气候性		紫外透过率 73.5%	日光照射会变黄	日光照射微脆化				

③ 相对密度小。光学塑料相对密度约为玻璃相对密度的一半,这对军用光学仪器有特殊意义。

④ 透光率好。在可见光波段与光学玻璃相近;在紫外和红外波段优于光学玻璃。

⑤ 折射率和色散系数的范围基本上能满足光学仪器的要求。

(2) 光学塑料的缺点

① 折射率温度系数大 ($\approx 2 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)。

② 热膨胀系数比玻璃大 10 倍左右。

③ 导热性和耐热性能差,软化温度低,易变形,加热时会变形和分解。

④ 不耐有机溶剂。

⑤ 耐磨性差。

⑥ 吸湿性严重。

§ 10.2 光学制图 (GB13323—91) 标准的主要内容

本节内容主要是介绍《光学制图》(GB13323—91)标准。该标准规定了光学制图的一般规定,图纸类型及各种图纸类型的应用举例,它适用于在图纸上对光学零件、部件和系统绘制的技术要求。

§ 10.2.1 一般规定

(1) 除本标准规定外,光学图样的幅面、比例、字体、图线、剖面符号、图样画法、尺寸、尺寸公差与配合及表面粗糙度的注法等,应按 GB4457~4460 和 GB131 的规定执行,而倒角按 GB1204 的规定执行。

(2) 在光学图样上光轴用细点划线,光轴中断线用双波浪线。

(3) 在光学图样上,零件的有效孔径应在所列表格的“ D_0 ”栏内标明。圆形注:“ ϕ 直径”,例“ $\phi 30$ ”;方形注:“ \square 边长”,例“ $\square 10$ ”;矩形注:“ \square 长 \times 宽”,例“ $\square 30 \times 20$ ”;椭圆注:“ \bigcirc 长轴 \times 短轴”例:“ $\bigcirc 30 \times 20$ ”等。

(4) 光学零件表面上需要标明有特殊要求的范围,用细实线或涂色画出其范围,并予以说明(见图 10-4 标明有特殊要求范围的标注法)

(5) 光学纤维件的剖面画法,见图 10-5 光学纤维的剖面。

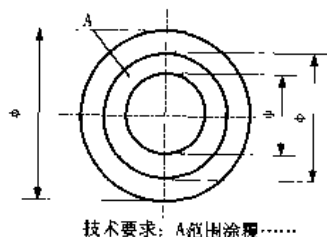


图 10-4 标明有特殊要求范围的标注法

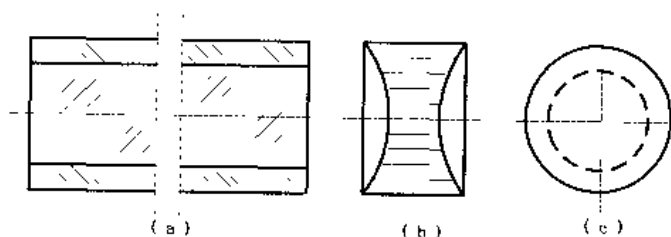


图 10-5 光学纤维的剖面

(6) 光学晶体的剖面和光轴(C轴)的画法,见图 10-6 光学晶体的剖面和光轴。

(7) 光源、光阑和镀膜等符号规定,见表 10-6。

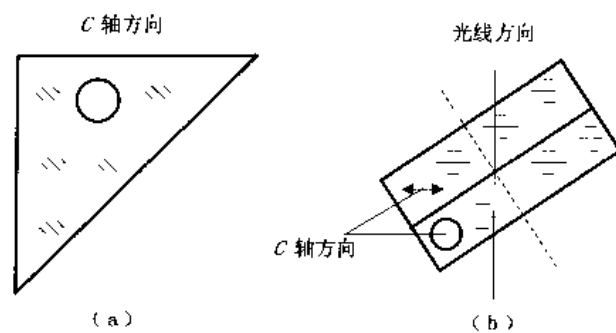


图 10-6 光学晶体的剖面 and 光轴

表 10-6 光源、光阑和镀膜符号规定

序号	名称	标记	尺寸	图线名称	附注
1	反射膜	内反射膜		粗实线	
2	反射膜	外反射膜			
3	分束(色)膜				
4	滤光膜				
5	保护膜				
6	导电膜				
7	偏振膜				
8	涂黑				
9	减反膜				

续表

序号	名称	标记	尺寸	图线名称	附注
10	光阑或光瞳			粗 实 线	1、尺寸a的选取应与整幅图面协调 2、光源与光电接收器的型号和要求在图样的明细栏中注明 3、毛面符号仅适用于系统
11	狭缝				
12	眼点				
13	光源				
14	光电接收器				
15	物面或像面				
16	分划面				
17	毛面				

(8) 标题栏和明细表分别参照 GB10609.1 和 GB10609.2。

§ 10.2.2 图样要求

1. 光学系统图

(1) 光学系统图的示例见图 10-7。一般按光路前进方向自左至右、自下而上绘制，也可根据仪器工作位置绘制。

(2) 光学系统图中零件或部件的序号应沿光路前进方向编排，置换使用的零件或部件序号应连续编排（见图 10-7 中序号 4, 5）；重复出现的相同零件或部件均标注第一次编排

的序号（图 10-7 中序号 16），附件序号最后编排。

（3）光学系统图中应标注整个光学系统中的所有零件或部件的相对位置尺寸，必要时应标注公差。

（4）光学系统图中标注光阑、光瞳及狭缝的大小、位置和狭缝和方向。

（5）光学系统图中有分划元件（如分划板、度盘、标尺）在视场中成像时，可将像面上的视见情况绘出示意图，并注出“视见示意图”字样，此图的比例可不与整个图样一致，细节允许夸大（见图 10-7）。

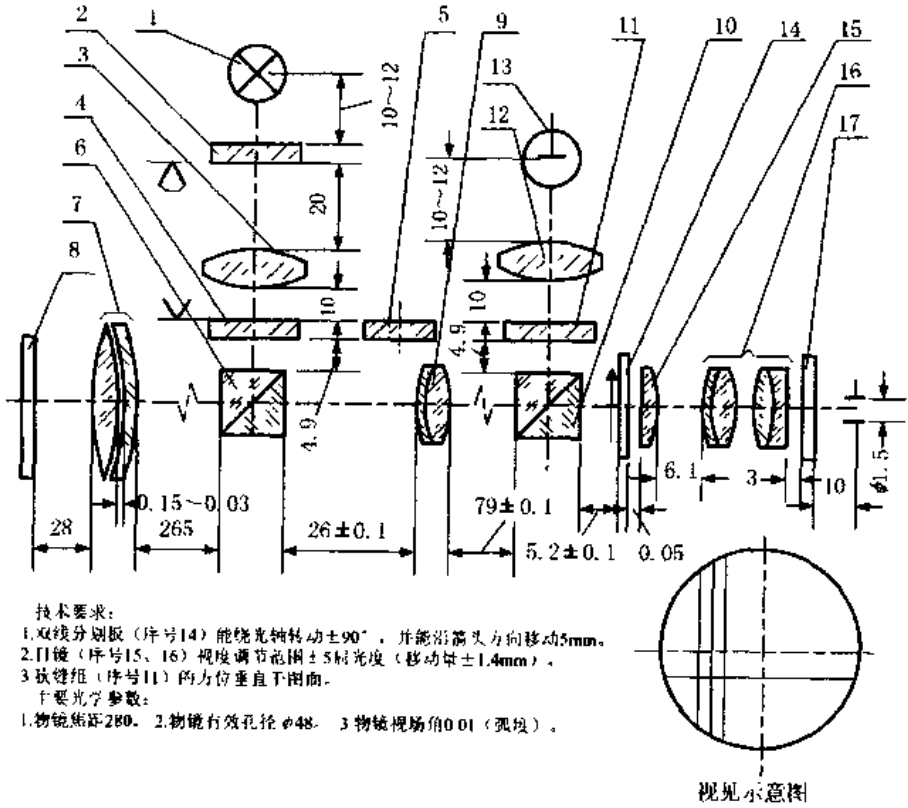


图 10-7 光学系统图（标题栏，略，下同）

（6）光学系统图上需要标注的光学结构参数及矢高，见表 10-7（a）和表 10-7（b）。

（7）在光学系统图中可增绘光学系统轴测示意图，画法应符合 GB4458.3 的要求。

表 10-7（a） 光学结构参数

序号	R	d	材料	n_D	ν	轮廓尺寸	D_0	x_D
1								
2								
3								
4								
5								

表 10-7 (b) 矢高

序 号	外形轮廓尺寸	镜框孔径 D_{01}	X_{c01}	镜框孔径 D_{01}	X_{c02}	中心厚度
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
1						

2. 光学部件图

光学部件图的示例见图 10-8、图 10-9。

- (1) 应标注整个部件图中所有零件（零件和胶合件）之间的相对位置。
- (2) 胶合件图的右上角应列出“对胶合件的要求”专用表格（附图框用粗实线外其余用细实线），格式内容及尺寸按表 10-8 要求。
- (3) 胶合件图中必须标注技术要求。

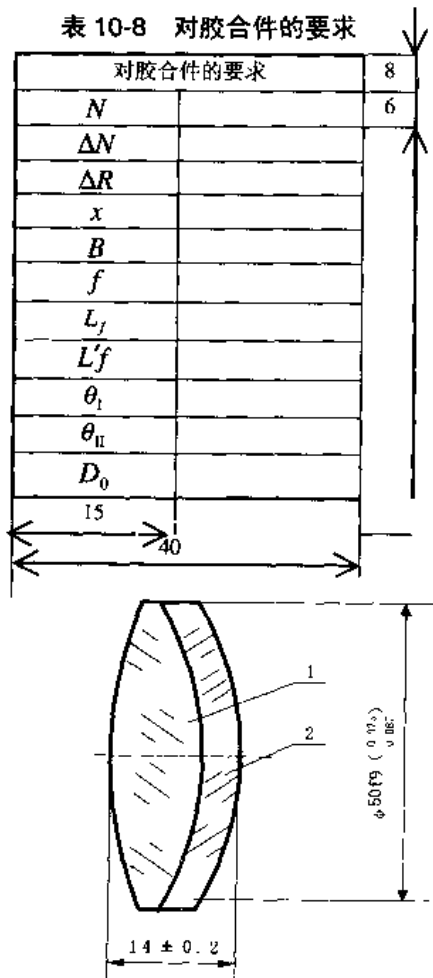


图 10-8 胶合透镜

对胶合件的要求	
N	3
ΔN	0.3
ΔR	B
x	5'
B	3×0.063
f	50
L_f	45
L'_f	45
θ_I	
θ_{II}	
D_0	φ 48

- 技术要求：
- 1. 用冷杉树脂胶胶合。
 - 2. 胶合层不得有油渍、灰尘与气泡。

其中：
 N ——光圈数；
 ΔN ——最大像散光圈数和局部光圈数；
 ΔR ——光学样板；
 x ——光学表面面倾角；
 B ——光学零件表面疵病；
 f ——透镜焦距； L_f ——物方顶焦点；
 L'_f ——像方顶焦点； θ_I ——棱镜第一平行差；
 θ_{II} ——棱镜第二平行差；
 D_0 ——光学零件的有效孔径。

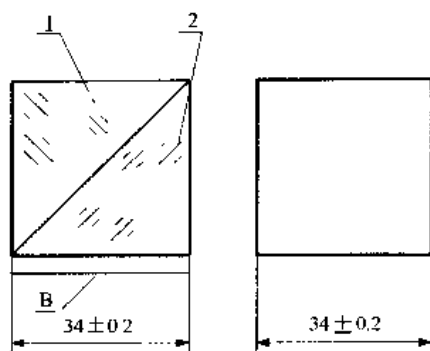


图 10-9 胶合棱镜

表 10-9 对材料、零件的要求

25		↓
对材料的要求		8
Δn_d		6
Δv_d		↑
光学均匀性		
光吸收系数		
应力双折射		
条纹度		
气泡度		
对零件的要求		
N		
ΔN		
ΔR		
x		
B		
θ_I		
θ_{II}		
d		
f		
L_f		
$L'f$		
倒二面角		
倒三面角		
D_0		
15		
40		

对胶合件的要求	
N	2
ΔN	0.2
ΔR	A
x	
B	3×0.063
f	
L_f	
$L'f$	
θ_I	$30''$
θ_{II}	$30''$
D_0	$\phi 30$

技术要求:

1. 用冷杉树脂胶胶合。
2. 胶合层不得有油渍、灰尘与气泡。
3. B 面涂黑漆。

其中:

Δn_d ——折射率 n_d 与标准数值的允许差值和同一批玻璃 n_d

的一致性;

Δv_d ——色散系数与标准数值的允许差值和同一批玻璃 Δv_d

的一致性;

d ——光学零件中心厚度。

3. 光学零件图

光学零件图示例如图 10-10、图 10-11 所示。

(1) 光学零件图右上角应列出“对材料的要求”与“对零件的要求”的专用表格（除图框用粗实线外，其余用细实线），格式内容及尺寸按表 10-9 要求，示例见表 10-10，表 10-11。

(2) 曲率半径过大时，其曲率允许夸大绘制，如图 10-12 中的 R1028；透镜表面为平面时，应标注 $R\infty$ 。

表 10-10 材料零件表示例 1

对材料的要求	
Δn_d	3C
Δv_d	3C
光学均匀性	3
光吸收系数	3
应力双折射	4
条纹度	1C
气泡度	2D
对零件的要求	
N	3
ΔN	0.5
ΔR	A
x	1'
B	3×0.063
θ_I	
θ_{II}	
d	
f	340
L_f	300
L'_f	300
倒二面角	
倒三面角	
D_0	$\phi 48$

技术要求： \oplus GB1316/1.1, $\lambda_0 \approx 520 \text{ nm}$

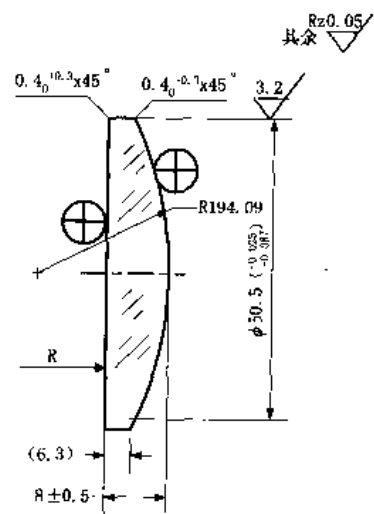


图 10-10 透镜

表 10-11 材料零件表示例 2

对材料的要求	
Δn_d	3C
Δv_d	3C
光学均匀性	3
光吸收系数	3
应力双折射	4
条纹度	1A
气泡度	2D
对零件的要求	
N	$N_1 = 3, N_2 = 0.5$
ΔN	$\Delta N_1 = 0.5, \Delta N_2 = 0.1$
ΔR	A
x	
B	$B_1 = 1 \times 0.04, B_2 = 1 \times 0.063$
θ_i	$5'$
θ_u	$5'$
d	30
f	
L_f	
$L'f$	
倒二面角	$0.4 + {}^{0.3}_0$
倒三面角	$1.5 + {}^{0.5}_0$
D_0	$D_0 = \phi 26, D_{02} = \phi 37 \times 26$

技术要求:

1. \odot GB1316/1.1, $\lambda_0 = 520 \text{ nm}$;
2. \odot GB1316/1.1, $\alpha = 45^\circ$;
3. B 面涂黑漆。

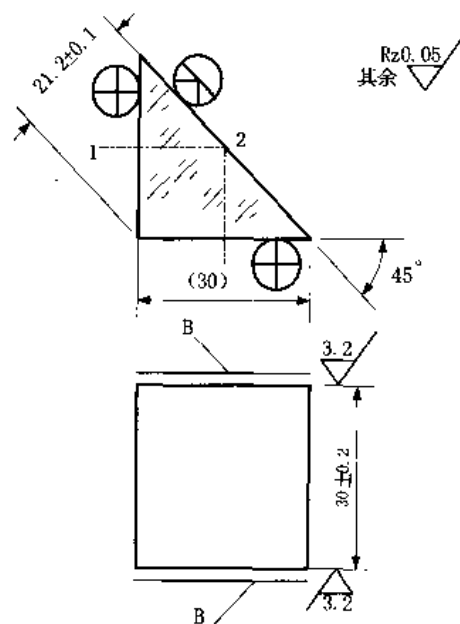


图 10-11 棱镜

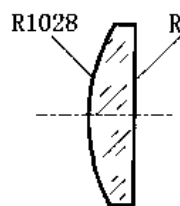


图 10-12 R 过大时夸张绘制

(3) 光学零件图上一般用图形和文字表明倒角要求见图 10-13 (a)、图 10-13 (b)。若倒角尺寸在图形上小于 2 mm, 可不绘制倒角图形, 只需在倒角处引出细实线, 标注倒角尺寸见图 10-13 (c) 或用文字说明。不允许倒角的棱应用细实线引出, 并注明“尖棱”字样见图 10-13 (d)。

(4) 光学零件图上轴对称非球面, 可用近似球面绘制, 并注明“非球面”字样在图样上, 并应列出曲线方程式, 见图 10-14。

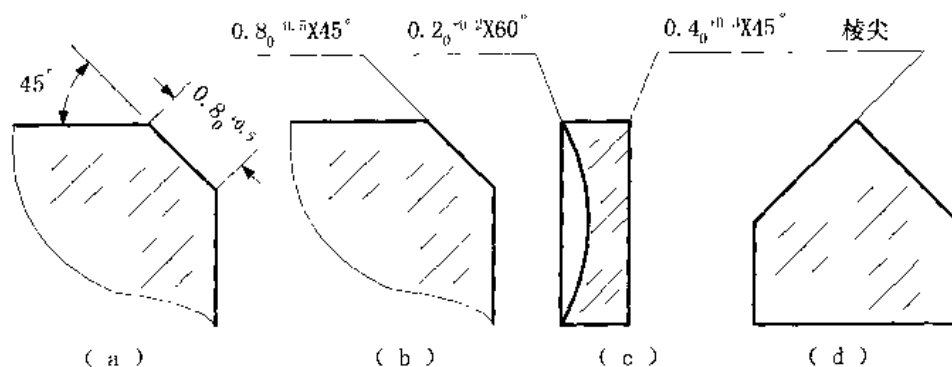


图 10-13 对倒角的要求

§ 10.3 对光学零件材料的要求

光学零件的技术要求反映了光学系统像差设计的要求，这也是对加工后的光学系统成像质量的保证，它包括对光学材料的质量要求和对光学零件加工精度的要求。

对光学材料的要求如下。

(1) 对无色光学玻璃的要求。对无色光学玻璃的要求，原则上应该根据光学系统像差设计的要求来确定。但不同用途的光学零件对光学玻璃材料的要求，可参考表 10-12 (a) 给出的经验数据。

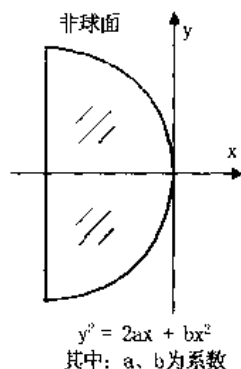


图 10-14 非球面

(2) 对有色光学玻璃的要求。对均匀性、双折射、条纹度和气泡度的要求一般比无色光学玻璃降低 1~2 级，而光谱特性指标则根据生产单位提供的指标及实际需要来定。

(3) 对晶体材料的要求。按无色光学玻璃的质量指标给定。可参考表 10-12 (b) 给出的经验数据。

表 10-12 (a) 各种光学零件对无色玻璃要求经验数据

技术指标	物镜			目镜		分划板	棱镜	聚光镜 反射镜	
	高精度①	中精度②	一般精度	$2\omega > 50^\circ$	$2\omega < 50^\circ$				
Δn_D ③	1B	2C	3C	3C	3D	3D	3D	3D	—
$\Delta \nu_D$	1B	2C	3C	3C	3D	3D	3D	3D	—
均匀性	3	3	4	4	4	4	3	5	3
双折射	2	2	3	3	3	3	3	4	2~3
光吸收系数④	3	3	4	3	4	4	3	5	—
条纹度	1C	1C	2C	1B	1C	1C	1A	2C	—
气泡度④	1C	1C	1C	1B	1C	1A	1C	1D	—

注：(1) 高精度物镜一般包括：大孔径照相物镜、高倍显微物镜、测距仪物镜等；

(2) 中等精度物镜一般包括：一般照相物镜、低倍显微物镜等；

(3) 对于需知实际折射率的物镜，此项可不填；

(4) 对该项指标有较高要求时，请参考光学玻璃产品目录中的生产最高水平，以符合生产实际情况。

表 10-12 (b) 光学零件对晶体材料的要求

质量指标	Δn_D	$\Delta \nu_d$	均匀性	双折射	光吸收系数	条纹度	气泡度
棱镜	—	—	2	2	1	1A	2C
透镜	—	—	3	3	1	2C	4D

§ 10.4 对光学零件的加工要求

§ 10.4.1 光学零件的表面误差

光学零件表面误差指球面半径误差、平面的平面性偏差和表面的局部误差。造成光学零件表面误差的原因有二种：其一是光学样板本身的表面误差；其二是零件表面与样板表面之间的误差，即光学零件的面形偏差。

1. 光学样板

对光学样板要执行 GB1240—76 标准。

(1) 光学样板按用途分为两类：

标准样板——复制工作样板用的光学样板；

工作样板——检验光学零件用的光学样板。

(2) 标准样板的精度。即“零件的要求”中的 ΔR ，分为 A、B 两级，其允差应符合表 10-13 (a) 及表 10-13 (b) 的规定。

表 10-13 (a) 标准样板半径允差

精度等级	球面标准样板曲率半径 R/mm					
	0.5~5	>5~10	>10~35	>35~350	>350~1000	>1000~4000
	允 差 (±)					
	μm			R 公称尺寸的百分数 (%)		
A	0.5	1.0	2.0	0.02	0.03	$\frac{0.03R}{1000}$
B	1.0	3.0	5.0	0.03	0.05	$\frac{0.05R}{1000}$

表 10-13 (b) 标准样板光圈

曲率半径 R /mm	0.5~750		>750~40000		—	
精度等级 N	A	B	A	B	A	B
	0.5	1.0	0.2	0.5		
ΔN	0.1				0.05	0.1

(3) 球面工作样板的光圈根据被检光学零件的要求按表 10-13 (c) 选取。

表 10-13 (c) 球面工作样板光圈

组 别	I	II	III
N	0.1	0.5	1.0
ΔN	0.1	0.1	0.1

(4) 平面工作样板相对标准样板的偏差与球面标准样板的允差相同 (见表 10-11)。

2. 光学零件的面形偏差

光学零件的面形偏差执行 GB2931—81 标准。

(1) 面形偏差的定义

被检光学表面相对于参考光学表面 (工作样板) 的偏差称为面形偏差。

(2) 面形偏差的分类

面形偏差是在圆形检验范围内, 通过垂直位置所观察到的干涉条纹 (通称光圈) 的数目、形状、变化和颜色来确定的。面形偏差包括下面三项。

1) 被检光学表面的曲率半径相对于参考光学表面曲率半径的偏差称半径偏差。此偏差对的光圈数用 N 表示。

2) 被检光学表面在二个相互垂直方向上产生的光圈数不等所对应的偏差称像散偏差, 此偏差所对应的光圈数用 $\Delta_1 N$ 表示。

3) 被检光学表面与参考光学表面在任一方向上产生的干涉条纹的局部不规则程度称局部偏差, 此偏差所对应的光圈数用 $\Delta_2 N$ 表示。

(3) 光圈正负号规定

高光圈 (凸) 为正 (相当于中接触);

低光圈 (凹) 为负 (相当于边缘接触);

(4) 标注方法

1) 被检光学表面允许的最大半径偏差以 N 个光圈数表示。如 $N=2$, 表示被检光学表面与参考光学表面允许的最大半径偏差为 2 个光圈, 一般情况下, 光圈数不需标注正负号, 必要时, 可以在 N 前加 “+” (高光圈) 或 “-” 低光圈。

2) 被检光学表面在两个互相垂直方向上光圈数的允许最大差值 (像散偏差) 以 $\Delta_1 N$ 表示。相对于平滑干涉条纹的不规则程度 (局部偏差) 的允许最大值以 $\Delta_2 N$ 表示。例如:

① 如 $\Delta_1 N = 0.1$ 即表示允许的最大像散光圈数为 0.1;

② 如 $\Delta_2 N = 0.1$ 即表示允许的最大局部光圈数为 0.1;

③ 如 $\Delta N = 0.1$ 即表示允许的最大像散光圈数和局部光圈数均为 0.1。

3) 如有必要, 可以在 N 数值后面标注检验范围的直径, 如 $N = 2 (60)$, 即表示在 $\phi 60 \text{ mm}$ 检验范围内允许的最大光圈数为 2。

3. 表面误差的给定 (可参考表 10-14)

表 10-14 光学零件表面误差参考数值

仪器类型	零件性质	表面误差		仪器类型	零件性质		表面误差	
		N	ΔN				N	ΔN
显微镜和精密仪器	物 镜	1~3	0.1~0.5	望远系统	棱 镜	反射面	1~2	0.1~0.5
	目 镜	3~5	0.5~1.0			折射面	2~4	0.3~0.5
照相系统	物 镜	2~5	0.1~1.0			屋脊面	0.1~0.4	0.05~0.1
	滤光器	1~5	0.1~1.0		反射镜		0.1~1.0	0.05~0.2
望远系统	物 镜	3~5	0.5~1.0		场镜、滤光镜、分划板		5~15	0.5~5.0
	转像透镜	3~5	0.5~1.0					
	目 镜	3~6	0.5~1.0					

4. 光学零件精度等级的分类（见表 10-15）

表 10-15 光学零件精度等级分类

零件精度等级	精度性质	公差	
		N	ΔN
1	高精度	0.1~2.0	0.05~0.5
2	中精度	2.0~6.0	0.5~2.0
3	一般精度	6.0~15.0	2.0~5.0

光学表面允许的最大半径偏差也可直接根据像差变化量表确定。给定表面曲率增量 ΔC ，计算相应的各种像差变化量，根据允许的像差变化量来确定允许表面曲率误差，然后按下述关系式求得允许的最大半径偏差 N

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \Delta C$$

其中， N 为半径偏差（光圈数）； ΔC 为表面曲率偏差； D 为被检表面直径（mm）； λ 为平均波长（mm）。

§ 10.4.2 光学零件外径及配合公差的给定

1. 光学零件的外径

光学零件与镜框固定，固定方式不同，光学零件外径所需的余量不同，见表 10-16。

表 10-16 光学零件外径余量

通光口径 D/mm	外径 ϕ /mm		通光口径 D/mm	· 外径 ϕ /mm	
	用滚边法固定	用压圈固定		用滚边法固定	用压圈固定
到 6	D+0.6	—	>30~50	D+2.0	D+2.5
>6~10	D+0.8	D+1.0	>50~80	D+2.5	D+3.0
>10~18	D+1.0	D+1.5	>80~120	—	D+3.5
>18~30	D+1.5	D+2.0	>120	—	D+4.5

2. 圆形零件与镜框的配合公差（见表 10-17）

表 10-17 圆形零件与镜框的配合公差

零件性质		公差与配合	
		透 镜	镜 框
高倍显微物镜和高精度望远镜的物镜、照相物镜	配合的	h6, f7	H7
	非配合的	b11, c10, c11	
低倍显微物镜和较高精度望远镜的物镜，具有调节视度装置的高倍目镜	配合的	h8, h9	H8, H9
	非配合的	b11, c10, c11	
一般望远镜的物镜和目镜、聚光镜、转像透镜、分划板	配合的	f9	H8, H9
	非配合的	b11, c10, c11	
滤光镜、反光镜		d11	H11

注：（1）对特高精度的配合，可用选配法达到，不宜提高精度；

（2）对胶合透镜中，一般以负透镜作为配合尺寸，正透镜为非配合尺寸。

§ 10.4.3 光学零件的中心厚度及边缘最小厚度

玻璃材料的球面的双凸透镜、平凸透镜、正弯月透镜的边缘最小厚度（见图 10-15）和双凹透镜、平凹透镜、负弯月透镜的中心厚度（见图 10-16）都必须有一定的数值，以保证光学零件的必要强度，使其在加工中不易变形或破损。

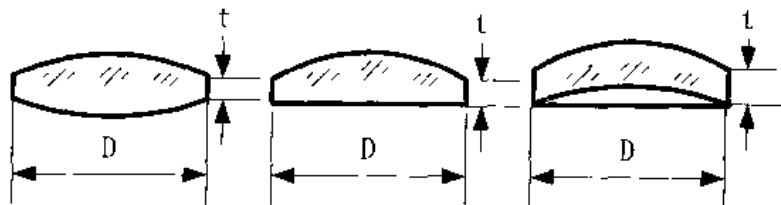


图 10-15 凸透镜边缘最小厚度

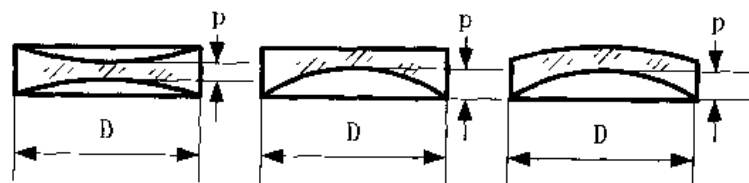


图 10-16 凹透镜中心最小厚度

透镜中心最小厚度按表 10-18 给定（GB1205—75 标准）。

表 10-18 透镜边缘及中心最小厚度

透镜直径 D/mm	正透镜边缘最小厚度 t/mm	负透镜中心最小厚度 d/mm
3~6	0.4	0.6
>6~10	0.6	0.8
>10~18	0.8~1.2	1.0~1.5
>18~30	1.2~1.8	1.5~2.2
>30~50	1.8~2.4	2.2~3.5
>50~80	2.4~3.0	3.5~5.0
>80~120	3.0~4.0	5.0~8.0
>120~150	4.0~6.0	8.0~12.0

根据透镜直径，考虑精度、焦距要求和工艺情况后，在表 10-18 中每一尺寸分析所规定的范围最小范围内选一数值作为其最小厚度。

§ 10.4.4 光学零件的厚度公差

1. 透镜中心厚度公差

透镜中心厚度公差随透镜的不同而不同，其具体数值可参考表 10-19，要求高的可按计算结果确定。

表 10-19 透镜中心厚度

透镜类别	仪器种类	厚度公差/mm
物 镜	显微镜及实验室仪器	$\pm 0.01 \sim 0.05$
	照相物镜及放映镜头	$\pm 0.05 \sim 0.3$
	望 远 镜	$\pm 0.1 \sim 0.3$
目 镜	各种仪器	$\pm 0.1 \sim 0.3$
聚 光 镜	各种仪器	$\pm 0.1 \sim 0.5$

2. 分划板的厚度及其公差（可参考表 10-20）

表 10-20 分划板厚度及公差

分划板直径 D/mm	厚度及厚度公差/mm	分划板直径 D/mm	厚度及厚度公差/mm
到 10	1.5 ± 0.3	$> 30 \sim 50$	4.0 ± 0.5
$> 10 \sim 18$	2.0 ± 0.3	$> 50 \sim 80$	5.0 ± 0.5
$> 18 \sim 30$	3.0 ± 0.3		

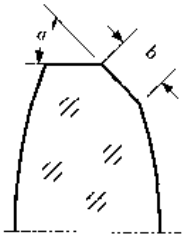
§ 10.4.5 光学零件的倒角（GB1204—75）

光学零件的倒角分为设计性和保护性两大类。GB1204—75 标准适用于光学零件的保护性倒角，其有关数值由表 10-21 和表 10-22 给定。

1. 圆形光学零件的倒角

(1) 倒角宽度 b 按表 10-21 给定。

表 10-21 倒角宽度

零件直径 D/mm	倒角宽度 b/mm			倒角位置
	非胶合面	胶合面	辊边面	
3—6	$0.1^{+0.1}$	$0.1^{+0.1}$	$0.1^{+0.1}$	
$> 6 \sim 10$			$0.3^{+0.2}$	
$> 10 \sim 18$	$0.3^{+0.2}$	$0.2^{+0.1}$	$0.4^{+0.2}$	
$> 18 \sim 30$			$0.5^{+0.3}$	
$> 30 \sim 50$	$0.4^{+0.4}$	$0.2^{+0.2}$	$0.7^{+0.3}$	
$> 50 \sim 80$			$0.8^{+0.4}$	
$> 80 \sim 120$	$0.5^{+0.4}$	$0.3^{+0.3}$	—	
$> 120 \sim 150$	$0.6^{+0.5}$	—	—	

(2) 倒角角 α 按表 10-22。

表 10-22 倒角角度

零件直径与表面半径的比值 D/r	倒角角度 α		
	凸面	凹面	平面
< 0.7	45°	45°	45°
$> 0.7 \sim 1.5$	30°	60°	
$> 1.5 \sim 2$	—	90°	

(3) 在图样上应标注倒角宽度和角度。例如 $0.3^{+0.2} \times 45^\circ$

2. 非圆形光学零件的倒角

(1) 一般约小于 135° 的二面角需倒角。

(2) 棱镜倒角宽度按表 10-23 要求。

表 10-23 棱镜倒角宽度

最短棱边长度/mm	二面角倒角宽度	三面角倒角宽度	倒角位置
3~6	$0.1^{+0.1}$	$0.4^{+0.3}$	二面角:
>6~10	$0.2^{+0.2}$	$1.0^{+0.4}$	倒角面垂直于二面角的二等分面
>10~30	$0.4^{+0.3}$	$1.5^{+0.5}$	三面角:
>30~50	$0.6^{+0.4}$	$2^{+0.6}$	倒角垂直于三面角中每个二面角
>50	$0.8^{+0.5}$	$2.5^{+0.8}$	的二等分面之交线

注: (1) 三面角倒角宽度是指倒角后所得到的三角形倒角中最长边的长度;

(2) 在图样上应注明倒角宽度。如: 倒二面角 $0.2^{+0.2}$; 倒三面角 $0.1^{+0.4}$ 。

§ 10.4.6 透镜中心误差 (GB7242—87)

透镜中心误差按 GB7242—87 标准规定, 也可参考表 10-24 给出的偏心差 c 允许值。从理论上讲, 给透镜几何轴与光轴的偏倾角 X 更合理, 但限于国内实际检验设备情况, 给 C 的要求更实用, 但一定要考虑到透镜焦距 f' 的长短, 不要照搬表 10-24 的参考值。

表 10-24 偏心差允许值

透镜性质	偏心差 c /mm	透镜性质	偏心差 c /mm
显微镜与精密仪器	0.002~0.01	望远镜	0.01~0.1
照相投影系统	0.005~0.1	聚光镜	0.05~0.1

平行度允差数值可以参考表 10-25。

表 10-25 玻璃平板不平行度允差参考数值

玻璃平板性质		不平行度 θ	玻璃平板性质	不平行度 θ
滤光 保护 玻璃	高精度	$3'' \sim 1'$	表面涂层的平面反射镜	$10' \sim 15'$
	一般精度	$1' \sim 10'$		
分划板		$10' \sim 15'$	背面涂层的平面反射镜	$2'' \sim 30''$

§ 10.4.7 光楔

表 10-26 给出了光楔角度公差 θ 值。

表 10-26 光楔角度公差 θ

光楔性质	角度公差 θ
高精度	$\pm 0.2'' \sim \pm 10''$
中精度	$\pm 10'' \sim \pm 30''$
一般精度	$\pm 30'' \sim \pm 1'$

§ 10.4.8 光学零件镀膜分类、符号及标注 (JB/T 6179—92)

该标准适用于镀在光学玻璃零件上的膜层, 规定了各种膜层的分类、符号及标注。

1. 膜层的分类和符号

膜层的分类和符号见表 10-27。

表 10-27 膜层分类符号

序 号	1	2		3	4	5	6	7	8
种 类	减反射膜	反射膜、高反射膜		波光膜	分束膜	分色膜	偏振膜	导电膜	保护膜
		内反射膜	外反射膜						
图示符号	⊕	⊗	⊙	⊖	⊙		⊕	⊖	⊖

2. 在图纸上的标注

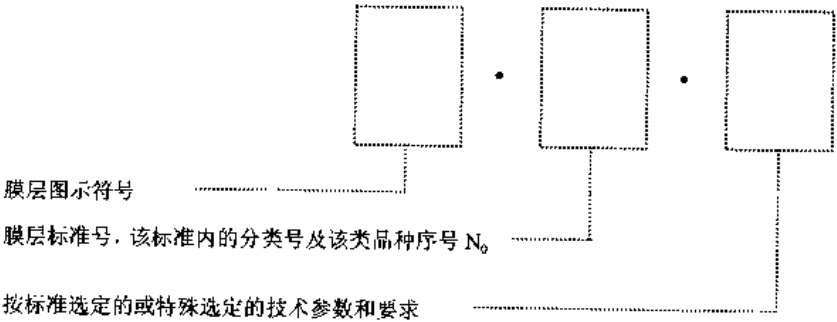
(1) 图示符号的标注

① 光学零件需镀膜的表面, 应在图纸上标注图示符号, 标注方法按 GB1331 规定。

② 在同一图纸上有两处或两处以上同类膜层而要求不同时, 图示符号应加注脚标, 分别注明技术要求, 以示区别, 脚标用阿拉伯数字标注。

(2) 技术要求的标注

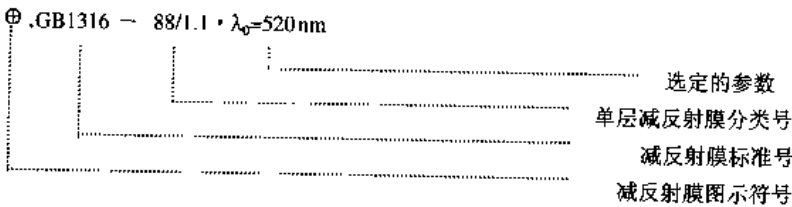
① 有标准的镀膜按下列方法标注:



其中, 含膜层标准号、该标准内分类号及序号 N_0 的标注。

② 已有标准的标注应用举例。

中心波长为 $\lambda_0 = 520 \text{ nm}$ 的单层减反射膜:



附录 A 无色光学玻璃 (GB 903-87)

该标准适用于直径或边长不大于 300mm, 厚度不大于 600mm 的无色玻璃毛坯 (以下简称玻璃)

1. 系列、类型和牌号

1.1 系列

无色光学玻璃分为两个系列:

- (a) 普通光学玻璃系列 (P 系列), 其牌号序号由 1~99;
- (b) 耐辐射光学玻璃系列 (N 系列), 其牌号由 501~599。

1.2 类型

根据折射率 n_d 和色散系数 ν_d 在 $n_d-\nu_d$ 领域图 (见图 1-2) 中的位置, 无色光学玻璃按表 1-1 分为 18 种类型。

表 1-1 无色光学玻璃类型

玻璃类型		玻璃类型	
代 号	名 称	代 号	名 称
FK	氟冕玻璃	QF	轻火石玻璃
QK	轻冕玻璃	F	火石玻璃
K	冕玻璃	BaF	钡火石玻璃
PK	硼冕玻璃	ZBaF	重钡火石玻璃
BaK	钡冕玻璃	ZF	重火石玻璃
ZK	重冕玻璃	LaF	镧火石玻璃
LaK	镧冕玻璃	ZLaF	重镧火石玻璃
TK	特冕玻璃	TiF	钛火石玻璃
KF	冕火石玻璃	TF	特种火石玻璃

1.3 牌号

各牌号玻璃的折射率 n_d 、中部色散 n_F-n_C 及色散系数 ν_d 的标准数值按表 1-2 的规定。

表 1-2 无色光学玻璃 n_d, n_F-n_C, ν_d 标准数值

玻璃牌号		折射率	中部色散	色散系数	玻璃牌号		折射率	中部色散	色散系数
P 系列	N 系列	n_d	n_F-n_C	ν_d	P 系列	N 系列	n_d	n_F-n_C	ν_d
氟冕玻璃					冕玻璃				
FK1	—	1.48605	0.005941	81.81	K1	—	1.49987	0.008050	62.07
FK2	—	1.48656	0.005760	84.47	K2	K502	1.50047	0.007580	66.02
轻冕玻璃					K3	—	1.50463	0.007797	64.72
QK1	—	1.47047	0.007040	66.83	K4	—	1.50802	0.008321	61.05
QK2	—	1.47817	0.007290	65.59	K5	K505	1.51007	0.008050	63.38
QK3	—	1.48746	0.006960	70.04	K6	—	1.51112	0.008454	60.46

续表

玻璃牌号		折射率	中部色散	色散系数	玻璃牌号		折射率	中部色散	色散系数
P 系列	N 系列	n_d	$n_F - n_C$	ν_d	P 系列	N 系列	n_d	$n_F - n_C$	ν_d
冕 玻 璃					冕 玻 璃				
K7	K507	1.51478	0.008490	60.63	LaK8	—	1.72000	0.014282	50.41
K8	—	1.51602	0.009086	56.79	LaK10	—	1.65113	0.011650	55.89
K9	K509	1.51637	0.008060	64.07	LaK11	—	1.66461	0.012170	54.61
K10	K510	1.51818	0.008790	58.95	LaK12	—	1.69680	0.012404	56.18
K11	—	1.52638	0.008750	60.16	特 冕 玻 璃				
K12	—	1.53359	0.009620	55.47	TK1	—	1.58599	0.009600	61.04
K16	—	1.51878	0.008410	61.69	冕 火 石 玻 璃				
磷 冕 玻 璃					KF1	KF501	1.50058	0.008750	57.21
PK1	—	1.51907	0.007430	69.86	KF2	KF502	1.51539	0.009460	54.48
PK2	—	1.54867	0.008060	68.07	KF3	—	1.52629	0.010320	51.00
铍 冕 玻 璃					轻 火 石 玻 璃				
BaK1	BaK501	1.53028	0.008770	60.47	QF1	—	1.54811	0.011950	45.87
BaK2	BaK502	1.53998	0.009050	59.67	QF2	QF502	1.56091	0.011990	46.78
BaK3	BaK503	1.54678	0.008710	62.78	QF3	QF503	1.57502	0.013920	41.31
BaK4	—	1.55248	0.008720	63.36	QF5	—	1.58215	0.013852	42.03
BaK5	—	1.56069	0.009610	58.34	QF6	—	1.53172	0.010905	48.76
BaK6	BaK506	1.56388	0.009280	60.76	QF9	—	1.56138	0.012410	45.24
BaK7	BaK507	1.56889	0.010150	56.05	QF11	—	1.57842	0.014070	41.11
BaK8	BaK508	1.57249	0.009960	57.48	QF14	—	1.59551	0.015200	39.18
BaK9	—	1.57444	0.010176	56.45	火 石 玻 璃				
BaK11	—	1.55963	0.009143	61.21	F1	—	1.60324	0.015900	37.94
重 冕 玻 璃					F2	—	1.61295	0.016590	36.95
ZK1	ZK501	1.56888	0.009040	62.93	F3	F502	1.61395	0.016590	37.01
ZK2	—	1.58313	0.009831	59.32	F4	—	1.61655	0.016840	36.61
ZK3	ZK503	1.58919	0.009620	61.25	F5	F503	1.61705	0.016840	36.64
ZK4	—	1.60881	0.010344	58.86	F6	—	1.62005	0.017060	36.35
ZK5	ZK505	1.61120	0.010950	55.82	F7	F504	1.62055	0.017060	36.37
ZK6	ZK506	1.61269	0.010500	58.35	F8	—	1.62435	0.017380	35.92
ZK7	ZK507	1.61309	0.010120	60.58	F9	F505	1.62485	0.017380	35.95
ZK8	ZK508	1.61410	0.011140	55.13	F10	—	1.62495	0.017570	35.57
ZK9	ZK509	1.62041	0.010293	60.29	F11	F506	1.62545	0.017570	35.60
ZK10	ZK510	1.62210	0.010970	56.71	F12	—	1.63636	0.018001	35.35
ZK11	ZK511	1.63854	0.011507	55.49	F13	—	1.62364	0.016941	36.81
ZK14	—	1.60311	0.009952	60.60	铍 火 石 玻 璃				
ZK15	—	1.60729	0.010214	59.46	BaF1	—	1.54809	0.010160	53.95
ZK19	—	1.61375	0.010882	56.40	BaF2	BaF502	1.56970	0.011520	49.45
ZK20	—	1.61720	0.011448	53.91	BaF3	BaF503	1.57960	0.010760	53.87
冕 冕 玻 璃					BaF4	BaF504	1.58271	0.012540	46.47
LaK1	—	1.65950	0.011500	57.35	BaF5	—	1.60562	0.013787	43.93
LaK2	—	1.69211	0.012690	54.54	BaF6	BaF506	1.60772	0.013180	46.11
LaK3	—	1.74693	0.014660	50.95	BaF7	—	1.61413	0.015340	40.03
LaK4	—	1.64050	0.010658	60.10	BaF8	BaF508	1.62604	0.016010	39.10
LaK5	—	1.67790	0.012210	55.52					
LaK6	—	1.69350	0.012992	53.38					
LaK7	—	1.71300	0.013245	53.83					

续表

玻璃牌号		折射率	中部色散	色散系数	玻璃牌号		折射率	中部色散	色散系数
P 系列	N 系列	n_d	$n_F - n_C$	ν_d	P 系列	N 系列	n_d	$n_F - n_C$	ν_d
重 钡 火 石 玻 璃					硼 火 石 玻 璃				
ZBaF1	ZBaF501	1.62231	0.011710	53.14	LaF1	—	1.69362	0.014100	49.19
ZBaF2	ZBaF502	1.63962	0.013250	48.27	LaF2	—	1.71700	0.014972	47.89
ZBaF3	ZBaF503	1.65691	0.012850	51.12	LaF3	—	1.74400	0.016565	44.91
ZBaF4	ZBaF504	1.66426	0.018740	35.45	LaF4	—	1.74950	0.021421	34.99
ZBaF5	ZBaF505	1.67103	0.014190	47.29	LaF5	—	1.75367	0.020080	37.55
ZBaF8	—	1.60729	0.012293	49.40	LaF6	—	1.75719	0.015836	47.81
ZBaF11	—	1.62012	0.012451	49.80	LaF7	—	1.78179	0.021077	37.09
ZBaF13	—	1.63930	0.014151	45.18	LaF8	—	1.78427	0.018989	41.30
ZBaF15	—	1.65128	0.016994	38.32	LaF9	—	1.78443	0.017875	43.88
ZBaF16	—	1.66672	0.013769	48.42	LaF10	—	1.78831	0.016635	47.39
ZBaF17	—	1.66755	0.015921	41.93	重 硼 火 石 玻 璃				
ZBaF18	—	1.66998	0.017090	39.20	ZLaF1	—	1.80166	0.018111	44.26
ZBaF20	—	1.70181	0.017112	41.01	ZLaF2	—	1.80279	0.017168	46.76
ZBaF21	—	1.72340	0.019040	37.99	ZLaF3	—	1.85544	0.023381	36.59
重 火 石 玻 璃					ZLaF4	—	1.91042	0.025665	35.47
ZF1	ZF501	1.64767	0.019120	33.87	钛 火 石 玻 璃				
ZF2	ZF502	1.67268	0.020870	31.23	TiF1	—	1.53256	0.011580	45.99
ZF3	ZF503	1.71741	0.024310	29.51	TiF2	—	1.58013	0.015260	38.02
ZF4	ZF504	1.72822	0.025700	28.34	TiF3	—	1.59270	0.016560	35.79
ZF5	ZF505	1.74002	0.026280	28.16	TiF4	—	1.61650	0.019904	30.97
ZF6	ZF506	1.75523	0.027430	27.53	特 种 火 石 玻 璃				
ZF7	—	1.80627	0.031780	25.37	TF1	—	1.52949	0.010220	51.81
ZF8	—	1.65446	0.019447	33.65	TF3	—	1.61242	0.013890	44.09
ZF10	—	1.68893	0.022098	31.18	TF4	—	1.61340	0.013848	44.30
ZF11	—	1.69895	0.023246	30.07	TF5	—	1.65412	0.016507	39.63
ZF12	—	1.76182	0.028718	26.53	TF6	—	1.68064	0.018305	37.18
ZF13	—	1.78472	0.030468	25.76					
ZF14	—	1.91761	0.042658	21.51					

注：本书用黑体字表示的玻璃牌号，为大量使用的牌号，应尽量采用。

附录 B 中、德玻璃牌号对照表

中国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc	德国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc	中国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc	德国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc
FK1	1.48579	0.005870	FK52	1.48605	0.005941	BaK7	1.56889	0.010150	BaK4	1.56883	0.010135
FK2	1.48656	0.005760	FK51	1.48656	0.005760	BaK8	1.57249	0.009960	BaK1	1.57250	0.009948
QK1	1.47047	0.007040	FK1	1.47069	0.006990	BaK9	1.57444	0.010180	BaK6	1.57444	0.010186
QK2	1.47817	0.007290	FK4	1.47823	0.007260	BaK11	1.55963	0.009140	SK20	1.55963	0.009143
QK3	1.48746	0.006960	FK5	1.48749	0.006924	BaK12	1.56470	0.010100	BaK3	1.56470	0.010098
K1	1.49967	0.008050	K11	1.50013	0.008140	ZK1	1.56888	0.009040	PSK2	1.56873	0.009016
K2	1.50047	0.007580				ZK2	1.58313	0.009830	SK12	1.58313	0.009808
K3	1.50463	0.007800	BK5	1.50463	0.007766	ZK3	1.58919	0.009620	SK5	1.58913	0.009615
K4	1.50802	0.008320	ZKN7	1.50484	0.008310	ZK4	1.60818	0.010340	SK3	1.60881	0.010332
K5	1.51007	0.008050	BK1	1.51009	0.008038	ZK5	1.61120	0.010950	SK8	1.61117	0.010919
K6	1.51112	0.008450	K7	1.51112	0.008461	ZK6	1.61269	0.010500	SK4	1.61272	0.010451
K7	1.51478	0.008490	K9	1.51478	0.008490	ZK7	1.61309	0.010120			
K8	1.51602	0.009090				ZK8	1.61410	0.011140	SK9	1.61405	0.011130
K9	1.50637	0.008060	BK7	1.51680	0.008054	ZK9	1.62041	0.010290	SK16	1.62041	0.010284
K10	1.51818	0.008790	K3	1.51823	0.008787	ZK10	1.62210	0.010970	SK10	1.62280	0.010945
K11	1.52638	0.008750	BaLK1	1.52642	0.008770	ZK11	1.63854	0.011510	SKN18	1.63854	0.011521
K12	1.53359	0.009620	ZK5	1.53375	0.009651	ZK14	1.60311	0.009960	SK14	1.60311	0.009952
K13	1.51276	0.008580	K8	1.51276	0.008580	ZK15	1.60729	0.010220	SK7	1.60729	0.010214
K16	1.51878	0.008410	BaLK2	1.51783	0.008480	ZK614563	1.61380	0.010900	SK6	1.61375	0.010882
			BaLK3	1.51835	0.008599	ZK617541	1.61720	0.011420	SSK1	1.61720	0.011448
K519604	1.51918	0.008600				LaK1	1.65950	0.011500	LaK11	1.65830	0.011497
PK1	1.51907	0.007430	PKS1						LaK1	1.65830	0.011450
PK2	1.54867	0.008060				LaK2	1.69211	0.012690	LaK9	1.69110	0.012630
BaK1	1.53028	0.008770							LaK5	1.69110	0.012610
BaK2	1.53998	0.009050	BaK2	1.53996	0.009043	LaK3	1.74693	0.014660			
BaK3	1.54678	0.008710				LaK4	1.64050	0.010660	LaK21	1.64050	0.010660
BaK4	1.55428	0.008720	PSK3	1.55232	0.008704	LaK5	1.67790	0.012210	LaK12	1.67790	0.012210
BaK5	1.56068	0.009610							LaKK12	1.67790	0.012280
BaK6	1.56388	0.009280	SK11	1.56384	0.009273				LaK2	1.67790	0.012210
LaK6	1.69350	0.012990	LaK13	1.69350	0.012990	F7	1.63636	0.018000	F6	1.63636	0.018005
			LaKK13	1.69350	0.013004	F12	1.62364	0.016940	F10	1.62364	0.016940
LaK6	1.69350	0.012990	LaK3	1.69350	0.012970	F13	1.62588	0.017530	F1	1.62588	0.017530
Lak7	1.71300	0.013230	LaK8	1.71300	0.013245	BaF1	1.54809	0.010160	BaLF5	1.54739	0.010207
LaK8	1.72000	0.014310	LaK10	1.72000	0.014282	BaF2	1.56970	0.011520	BaF2	1.56965	0.011539
LaK10	1.65113	0.011650	LaK22	1.65113	0.011650	BaF3	1.57960	0.010760	BaLF4	1.57957	0.010790
LaK11	1.66466	0.012170				BaF4	1.58271	0.012540	BaF3	1.58267	0.012538
LaK12	1.69680	0.012400	LaK24	1.69680	0.012404	BaF5	1.60562	0.013760	BaF4	1.60562	0.013787
LaK755531	1.75496	0.014230	LaKN19	1.75496	0.014231	BaF6	1.60772	0.013180	BaF52	1.60859	0.013180

续表

中国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc	德国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc	中国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc	德国牌号	折射率 nd	中部色散 nf-nc
TK1	1.58579	0.009620	LgSK2	1.58599	0.009600	BaF6	1.60772	0.013180	BaF5	1.60729	0.011520
KF1	1.50053	0.008750	K10	1.50137	0.008888	BaF7	1.61413	0.015340			
KF2	1.51539	0.009460	KF3	1.50454	0.009406	BaF8	1.62604	0.016010	BaSF1	1.62606	0.016080
KF3	1.52629	0.010320	KF2	1.52630	0.010319	BaF562509	1.56248	0.011060	BaLF1	1.56248	0.011062
KF53320	1.53329	0.010260	KF4	1.53358	0.010340	BaF603425	1.60323	0.014210	BaSF5	1.60323	0.014201
QF1	1.54811	0.011950	LLF1	1.54814	0.011980	ZBaF1	1.62231	0.011710	SSK2	1.62230	0.011707
QF2	1.56091	0.011990	LLF3	1.56013	0.011876	ZBaF2	1.63962	0.013250			
QF3	1.57502	0.013920	LF7	1.57501	0.013860	ZBaF3	1.65691	0.012850	SSKN5	1.65844	0.012940
QF5	1.58215	0.013850	LF3	1.58215	0.013836	ZBaF4	1.66426	0.018740			
QF6	1.53172	0.010900	LLF6	1.53172	0.010905						
QF9	1.56138	0.012410	LLF4	1.56138	0.012410	ZBaF5	1.67103	0.014190	BaFN10	1.67003	0.014222
QF11	1.57842	0.014070	LF4	1.57845	0.013908	ZBaF607494	1.60729	0.012290	BaF5	1.60729	0.012293
QF14	1.59551	0.015200	F8	1.59551	0.015200	ZBaF11	1.62012	0.012450	SSK9	1.62012	0.012450
F1	1.60324	0.015900	F5	1.60324	0.015868	ZBaF13	1.63930	0.014150	BaF12	1.63930	0.014151
F2	1.61295	0.016590	F3	1.61293	0.016549	ZBaF15	1.65128	0.016990	BaSF4	1.65128	0.016990
F3	1.61655	0.016840	F4	1.61659	0.016834				BaFN11	1.66672	0.013769
F4	1.62005	0.017060	F2	1.62004	0.017050	ZBaF16	1.66672	0.013770	BaF11	1.66672	0.013780
F5	1.62435	0.017380				ZBaF17	1.66755	0.015920	BaSF6	1.66755	0.015921
F6	1.62495	0.017570	F7	1.62536	0.017586	ZBaF18	1.66998	0.017090	BaSF12	1.66998	0.017090
			Basf52	1.70181	0.017112	LaF4	1.74950	0.021420	LaFN7	1.74950	0.021445
ZBaF20	1.70181	0.017110				LaF5	1.75350	0.020080			
						LaF6	1.75719	0.015830	LaF24	1.75719	0.015836
ZBaF21	1.72340	0.019040				LaF7	1.78179	0.021080	LaF22	1.78179	0.021077
			BaSF51	1.72323	0.018991	LaF8	1.78427	0.018990	LaF25	1.78427	0.018989
ZBaF618498	1.61772	0.012410	SSKN8	1.61772	0.012412	LaF9	1.78443	0.017870	LaF10	1.78443	0.017875
ZF1	1.64767	0.019120	SF2	1.64769	0.019135	LaF10	1.78831	0.016640	LaFN21	1.78831	0.016612
ZF2	1.67268	0.020870	SF5	1.67270	0.020884	ZLaF1	1.80166	0.018110	LaSF11	1.80166	0.018111
ZF3	1.71741	0.024310	SF1	1.71736	0.024307	ZLaF2	1.80279	0.017170	LaSF11	1.80279	0.017168
ZF4	1.72822	0.025700	SF10	1.72825	0.025634	ZLaF3	1.85544	0.023380	LaSF13	1.85544	0.023381
ZF5	1.74002	0.026280	SF3	1.74000	0.026244	ZLaF881410	1.88069	0.021470	LaSF5	1.88069	0.021476
ZF6	1.75523	0.027430	SF4	1.75520	0.027383	ZLaF4	1.91010	0.025610			
ZF7	1.80627	0.031780	SF6	1.80518	0.031660	TiF1	1.53256	0.011580	LLF8	1.53256	0.011580
ZF8	1.65446	0.019440	SF9	1.65446	0.019447	TiF2	1.58013	0.015260			
ZF10	1.68893	0.022100	SF8	1.68893	0.022098	TiF3	1.59270	0.016560	F16	1.59270	0.016560
ZF11	1.69895	0.023250	SF15	1.68895	0.023246	TiF4	1.61650	0.019900	TiF6	1.61650	0.019904
ZF12	1.76182	0.028710	SF14	1.76182	0.028718	TF1	1.52949	0.010220	KZF2	1.52944	0.010244
ZF13	1.78472	0.030460	SF11	1.78472	0.030468	TF2	1.55390	0.011400			
ZF14	1.91761	0.042660	SF58	1.91761	0.042658	TF3	1.61242	0.013890	KZFS1	1.61310	0.013826
LaF1	1.69366	0.014100				TF4	1.61390	0.013960	KZSN4	1.61340	0.013848
LaF2	1.71700	0.014970	LaF3	1.71700	0.014970	TF5	1.65412	0.016510	KZSN5	1.65412	0.016507
			LaFN3	1.71700	0.014943	TF6	1.68047	0.021830	KZSN7	1.68047	0.021830
LaF3	1.74400	0.016570	LaF2	1.74400	0.016570						
			LaFN2	1.74400	0.016618						

附录 C 单薄透镜参数表

n v	1.4704 66.8	1.4781 66.6	1.4874 70.0	1.4996 62.1	1.5004 66.0	1.5046 64.7	1.5080 61.1	1.5100 63.4
A	+2.360174	+2.353088	+2.344628	+2.333689	+2.332977	+2.329257	+2.326260	+2.324503
B	+6.377551	+6.274838	+6.155109	+6.004804	+5.995204	+5.945303	+5.905512	+5.882353
C	+6.645090	+6.466456	+6.261188	+6.008009	+5.992009	+5.909171	+5.843512	+5.805459
K	+1.680087	+1.676544	+1.672314	+1.666844	+1.666489	+1.664628	+1.663130	+1.662251
L	+2.125850	+2.091612	+2.051703	+2.001601	+1.998401	+1.981767	+1.968504	+1.960784
Q_0	-1.351076	-1.333319	-1.312598	-1.286547	-1.284882	-1.276223	-1.269314	-1.265292
P_0	+2.336810	+2.283273	+2.221596	+2.145276	+2.140443	+2.115404	+2.095535	+2.084011
W_0	-0.144075	-0.143756	-0.143373	-0.142873	-0.142840	-0.142669	-0.142531	-0.142450
p	+0.836142	+0.837159	+0.838374	+0.839948	+0.840051	+0.840587	+0.841019	+0.841272
玻璃	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	PK1
n v	1.5111 60.5	1.5147 60.6	1.5159 56.8	1.5163 64.1	1.5181 58.9	1.5263 60.1	1.5335 55.5	1.5190 69.8
A	+2.323539	+2.320393	+2.319348	+2.319000	+2.317436	+2.310358	+2.304206	+2.316655
B	+5.869693	+5.828638	+5.815080	+5.810575	+5.790388	+5.700171	+5.623243	+5.780347
C	+5.784708	+5.717659	+5.695600	+5.688279	+5.655528	+5.510274	+5.387843	+5.639272
K	+1.661769	+1.660196	+1.659674	+1.659500	+1.658718	+1.655179	+1.652103	+1.658327
L	+1.956564	+1.942879	+1.938360	+1.936858	+1.930129	+1.900057	+1.874414	+1.926782
Q_0	-1.263093	-1.255959	-1.253602	-1.252819	-1.249309	-1.233611	-1.220212	-1.247562
P_0	+2.077723	+2.057394	+2.050701	+2.048479	+2.038536	+1.991374	+1.957067	+2.033599
W_0	-0.142405	-0.142259	-0.142211	-0.142194	-0.142122	-0.141791	-0.141502	-0.142085
p	+0.841411	+0.841865	+0.842015	+0.842066	+0.842291	+0.843314	+0.844203	+0.842404
玻璃	PK2	BaK1	BaK2	BaK3	BaK4	BaK5	BaK6	BaK7
n v	1.5486 68.1	1.5302 60.5	1.5399 59.7	1.5467 62.8	1.5524 63.3	1.5606 58.3	1.5638 60.8	1.5688 56.0
A	+2.291489	+2.307018	+2.298785	+2.293075	+2.288327	+2.281558	+2.278936	+2.274859
B	+5.468465	+5.658242	+5.556584	+5.487470	+5.430847	+5.351409	+5.321036	+5.274262
C	+5.145501	+5.443381	+5.282821	+5.174971	+5.087405	+4.965756	+4.919614	+4.848958
K	+1.645744	+1.653509	+1.649392	+1.646537	+1.644163	+1.640779	+1.639468	+1.637429
L	+1.822821	+1.886080	+1.852194	+1.829156	+1.810282	+1.783803	+1.773678	+1.758087
Q_0	-1.193212	-1.226310	-1.208591	-1.196530	-1.186641	-1.172753	-1.167438	-1.159249
P_0	+1.882981	+1.974000	+1.925000	+1.892008	+1.865171	+1.827815	+1.813623	+1.791864
W_0	-0.140900	-0.141635	-0.141246	-0.140976	-0.140749	-0.140425	-0.140299	-0.140103
p	+0.846044	+0.843796	+0.844987	+0.845814	+0.846502	+0.847483	+0.847864	+0.848455
玻璃	BaK8	BaK9	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK6
n v	1.5724 57.5	1.5743 56.4	1.5688 62.9	1.5831 59.3	1.5891 61.2	1.6087 58.9	1.6111 55.8	1.6126 58.3
A	+2.271941	+2.270405	+2.274859	+2.263344	+2.258574	+2.243239	+2.241387	+2.240233
B	+5.241090	+5.223751	+5.274262	+5.144915	+5.092514	+4.928536	+4.909180	+4.897160
C	+4.799144	+4.773202	+4.848958	+4.656100	+4.579027	+4.341786	+4.314177	+4.297072
K	+1.635970	+1.635203	+1.637429	+1.631672	+1.622287	+1.621620	+1.620694	+1.620116
L	+1.747030	+1.741250	+1.758087	+1.714971	+1.697504	+1.642845	+1.636393	+1.632386
Q_0	-1.153438	-1.150400	-1.159249	-1.136573	-1.127373	-1.098530	-1.095120	-1.093002
P_0	+1.776505	+1.768500	+1.791864	+1.732311	+1.708443	+1.634712	+1.626104	+1.620769
W_0	-0.139961	-0.139887	-0.140103	-0.139543	-0.139310	-0.138554	-0.138461	-0.138404
p	+0.848879	+0.849102	+0.848455	+0.850129	+0.850822	+0.853056	+0.853326	+0.853494
玻璃	ZK7	ZK8	ZK9	ZK10	ZK11	ZK12	LaK1	LaK2
n v	1.6130 60.6	1.6140 55.1	1.6203 60.3	1.6220 56.7	1.6384 55.5	1.6645 54.6	1.6594 57.3	1.6920 54.5
A	+2.239925	+2.239157	+2.234339	+2.233045	+2.220703	+2.201562	+2.205255	+2.182033
B	+4.893964	+4.885993	+4.836369	+4.823151	+4.692248	+4.514673	+4.549590	+4.335260
C	+4.292531	+4.281212	+4.211064	+4.192471	+4.020075	+3.769587	+3.816394	+3.533362
K	+1.619962	+1.619578	+1.617169	+1.616522	+1.610351	+1.600781	+1.602627	+1.591016
L	+1.631321	+1.628664	+1.612123	+1.607717	+1.566416	+1.504890	+1.516530	+1.445086
Q_0	-1.092439	-1.091034	-1.082281	-1.079949	-1.058054	-1.025334	-1.031534	-0.993399
P_0	+1.619352	+1.615820	+1.593907	+1.588092	+1.534045	+1.455063	+1.469865	+1.380040
W_0	-0.138389	-0.138350	-0.138110	-0.138045	-0.137423	-0.135444	-0.136634	-0.135427
p	+0.853539	+0.853651	+0.854354	+0.854543	+0.856345	+0.859146	+0.858605	+0.862009

续表

玻 璃	LaK3	KF1	KF2	KF3	QF1	QF2	QF3	QF4	
n	1.7468	1.5005	1.5153	1.5262	1.5480	1.5608	1.5749	1.5800	
v	50.9	57.2	54.5	51.0	45.9	46.8	41.3	38.0	
A	+2.144950	+2.332889	+2.319870	+2.310441	+2.291989	+2.281394	+2.269922	+2.265822	
B	+4.017140	+5.994006	+5.821851	+5.701254	+5.474452	+5.349501	+5.218299	+5.172414	
C	+3.132092	+5.990014	+5.706612	+5.512007	+5.154776	+4.962851	+4.765060	+4.696789	
K	+1.572475	+1.666444	+1.659935	+1.655222	+1.645994	+1.640097	+1.634961	+1.632911	
L	+1.339046	+1.998002	+1.940617	+1.900418	+1.824817	+1.783167	+1.739433	+1.724138	
Q_0	-0.936417	-1.284674	-1.254779	-1.233800	-1.194257	-1.172419	-1.149444	-1.141398	
P_0	+1.251232	+2.139840	+2.054042	+1.994902	+1.885823	+1.826922	+1.765987	+1.744896	
W_0	-0.133447	-0.142836	-0.142235	-0.141795	-0.140924	-0.140417	-0.139864	-0.139664	
p	+0.867460	+0.840064	+0.841940	+0.843301	+0.845971	+0.847507	+0.849172	+0.849768	
玻 璃	QF5	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
n	1.5820	1.6031	1.6128	1.6164	1.6199	1.6242	1.6248	1.6362	
v	42.0	37.9	36.9	36.6	36.3	35.9	35.6	35.3	
A	+2.264222	+2.247582	+2.240079	+2.237317	+2.234644	+2.231375	+2.230920	+2.222344	
B	+5.154639	+4.974299	+4.895561	+4.866969	+4.839490	+4.806152	+4.801536	+4.715498	
C	+4.670469	+4.407395	+4.294800	+4.254256	+4.215460	+4.168617	+4.162151	+4.042491	
K	+1.632111	+1.623791	+1.620039	+1.618658	+1.617322	+1.615687	+1.615460	+1.611172	
L	+1.718213	+1.658099	+1.631853	+1.622323	+1.613163	+1.602050	+1.600512	+1.571832	
Q_0	-1.138280	-1.106588	-1.092720	-1.087679	-1.082832	-1.076948	-1.076133	-1.060928	
P_0	+1.736757	+1.655143	+1.620060	+1.607403	+1.595281	+1.580628	+1.578604	+1.541087	
W_0	-0.139586	-0.138769	-0.138396	-0.138259	-0.138125	-0.137961	-0.137938	-0.137506	
p	+0.850001	+0.852423	+0.853516	+0.853919	+0.854309	+0.854786	+0.854853	+0.856105	
玻 璃	BaF1	BaF2	BaF3	BaF4	BaF5	BaF6	BaF7	BaF8	
n	1.5480	1.5696	1.5795	1.5826	1.6055	1.6076	1.6140	1.6259	
v	53.9	49.4	53.9	46.5	43.9	46.1	40.0	39.1	
A	+2.291989	+2.274210	+2.266223	+2.263743	+2.245717	+2.244090	+2.239157	+2.230088	
B	+5.474452	+5.266854	+5.176877	+5.149330	+4.954583	+4.937459	+4.885993	+4.793098	
C	+5.154776	+4.837812	+4.703409	+4.662622	+4.379071	+4.354542	+4.281212	+4.150342	
K	+1.645994	+1.637105	+1.633111	+1.631871	+1.622859	+1.622045	+1.619578	+1.615044	
L	+1.824817	+1.755618	+1.725625	+1.716443	+1.651527	+1.645819	+1.628664	+1.597699	
Q_0	-1.194257	-1.157952	-1.142181	-1.137348	-1.103117	-1.100102	-1.091034	-1.074643	
P_0	+1.885823	+1.788429	+1.746943	+1.734329	+1.646326	+1.638686	+1.615820	+1.574907	
W_0	-0.140924	-0.140071	-0.139684	-0.139563	-0.138677	-0.138596	-0.138350	-0.137896	
p	+0.845971	+0.848550	+0.849710	+0.850071	+0.852694	+0.852932	+0.853651	+0.854974	
玻 璃	ZBaF1	ZBaF2	ZBaF3	ZBaF4	ZBaF5	ZBaF6	ZBaF7	ZF1	
n	1.6222	1.6395	1.6568	1.6641	1.6709	1.6935	1.7535	1.6475	
v	53.1	48.3	51.1	35.4	47.3	49.2	37.6	33.9	
A	+2.232893	+2.219884	+2.207146	+2.201850	+2.196959	+2.180986	+2.140576	+2.213960	
B	+4.821601	+4.691165	+4.567600	+4.517392	+4.471605	+4.325883	+3.981420	+4.633205	
C	+4.190293	+4.008947	+3.840641	+3.773222	+3.712230	+3.521212	+3.088440	+3.929577	
K	+1.616446	+1.609942	+1.603573	+1.600925	+1.598479	+1.590493	+1.570288	+1.606980	
L	+1.607200	+1.563721	+1.522533	+1.505797	+1.490535	+1.441961	+1.327140	+1.544401	
Q_0	-1.079675	-1.056623	-1.034729	-1.025817	-1.017680	-0.991726	-0.929988	-1.046361	
P_0	+1.587411	+1.530548	+1.477525	+1.456214	+1.436897	+1.376166	+1.237104	+1.505575	
W_0	-0.138037	-0.137381	-0.136731	-0.136459	-0.136206	-0.135372	-0.133209	-0.137080	
p	+0.854565	+0.856465	+0.858328	+0.859103	+0.859820	+0.862162	+0.868104	+0.857331	
玻 璃	ZF2	ZF3	ZF4	ZF5	ZF6	ZF7	TF1	TF2	TF3
n	1.6725	1.7172	1.7280	1.7398	1.7550	1.8060	1.5294	1.5538	1.6123
v	32.2	29.5	28.3	28.2	27.5	25.4	51.8	48.6	44.1
A	+2.195814	+2.164686	+2.157407	+2.149557	+2.139601	+2.107419	+2.307702	+2.287167	+2.240464
B	+4.460966	+4.182934	+4.120879	+4.055150	+3.973510	+3.722084	+5.666793	+5.417118	+4.899559
C	+3.698124	+3.338415	+3.260475	+3.178854	+3.078812	+2.780018	+5.456991	+5.066280	+4.300484
K	+1.597907	+1.582343	+1.578703	+1.574778	+1.569800	+1.553709	+1.653851	+1.643583	+1.620232
L	+1.486988	+1.394311	+1.373626	+1.351716	+1.324503	+1.240694	+1.888930	+1.805706	+1.633186
Q_0	-1.015788	-0.966175	-0.955053	-0.943252	-0.928563	-0.883090	-1.227799	-1.184242	-1.093425
P_0	+1.432425	+1.317691	+1.292645	+1.266339	+1.233984	+1.136549	+1.978147	+1.858691	+1.621833
W_0	-0.136147	-0.134509	-0.134120	-0.133696	-0.133155	-0.131371	-0.141667	-0.140694	-0.138416
p	+0.859988	+0.864556	+0.865627	+0.866782	+0.868248	+0.872993	+0.843697	+0.846670	+0.853460

附录 D 冕牌透镜在前的玻璃组合

编号	玻璃组合的牌号
1	ZK8F3 ZK6F3 ZK19F3 ZK20F3
2	
3	ZK6F4 ZK19F4 ZK8F4
4	ZK6F5 ZK20F5
5	ZK19F2 ZK8F5
6	
7	
8	ZK3F2 ZK3F3 ZK3ZF6 ZK6ZF1 K2ZF1 K2ZF6 BaK8F2
9	BaK6ZF6 ZK19ZF1 ZK6 BaF8 BaK3ZF6 K9ZF6 ZK3F5 K2ZF5 ZK6ZF5
10	BaK6ZF6 ZK19ZF1 ZK6ZF2 ZK6ZF3 K9ZF5 BaK3ZF5 BaK6ZF5 ZK19ZF6 ZK3ZF2 ZK3ZF1 ZK19 BaF8
11	ZK19ZK5 ZK20 BaF8 K2ZF3 BaK3ZF3 ZK8ZF1 BaK6ZF3 BaK1ZF6 ZK8ZF6 ZK19ZF3 ZK20ZF1
12	ZK614563ZF2 K9ZF3 BaK2ZF6 BaK8ZF6 ZK8ZF5 K7ZF6 BaK6QF11 BaK1ZF5 BaK8ZF5 ZK20ZF5 ZK8ZF3 ZK8 BaF8
13	BaK2ZF5 ZK8ZF2 K7ZF5 ZK20ZF3 BaK3ZF2 K10ZF6 BaK7ZF6 BaK6ZF2
14	ZK20ZF2 BaK1ZF3 BaK8ZF3 BaK6ZF1 BaK7ZF5 BaK2ZF3 K2ZF2 K10ZF5 BaK3ZF1
15	BaK6F2 ZK3 BaF8 BaF3ZF6 K9ZF2 K7ZF3 BaK6F5 BaK6F4 BaK6F3
16	BaK7QF11 BaK8ZF2 BaK7ZF3 BaK3ZF5 BaK3F4 BaK3F2 BaK3F3 K10ZF3 K2ZF1
17	K9ZF1 BaK8F2 BaK8ZF1 BaK8F3 BaK1ZF2 BaK2ZF2 BaK8F5 BaK8F4 BaK3ZF3
18	BaK3QF11 BaK7ZF2 K2F5
19	K7ZF2 K9F5 K2F4 BaK2ZF1 BaK1ZF1 K9F4 K2F3 K9F3 BaK7ZF1 BaK7F3 K2F2 BaK2QF1 BaK1F4
20	K9F2 BaK3ZF2 K10ZF2 BaK7F2
21	BaK7F5 K7ZF1 BaK2F5 BaK2F4 BaK1F5 BaK2F3 BaK7F4 BaK3F2 BaK3ZF2 BaK7F3 BaK7F2 BaK7F5
22	BaK1F3 BaK1F2 BaK6 BaF8 K10ZF1 BaK3 BaF8 BaK2F2
23	K7F5
24	K7F4 K7F3 K7F2
25	K2 BaF8 K9QF11 K10F5 K2QF11 BaK8BaF8 K9 BaF8
26	K10F4 BaK2QF11 K10F3 BaK1QF1
27	BaK1QF11 K9QF1
28	BaK1 BaF8 BaK2BaF8 K2QF1
29	BaK7 BaF8
30	
31	BaK3 BaF8

附录 E 火石透镜在前的玻璃组合

编号	玻璃组合的牌号
1	F3ZK19 F3ZK8 F4ZK20 F3ZK6
2	F4ZK6
3	F4ZK19 F4ZK8
4	F5ZK20 F5ZK19
5	F5ZK6 F5ZK8 ZF6 BaK6
6	ZF5K2 ZF6 BaK3 ZF6ZK3
7	ZF5ZK3 ZF6K9 ZF5 BaK3 ZF2ZK3 ZF6ZK6 F3ZK3 ZF1ZK6 ZF5ZK6
8	ZF5K9 ZF3ZK3 ZF5 BaK6 ZF3ZK6 F5ZK3 BaF6ZK6 ZF2ZK6 ZF3K2 ZF6ZK19
9	ZF6BaK1 ZF6K7 ZF6 BaK2 ZF5K7 ZF6ZK8 ZF2ZK3 ZF1ZK19 ZF3BaK6 ZF6BaK8
10	ZF5BaK1 ZF3ZK19 ZF6BaK8 ZF6ZK20 ZF5ZK8 ZF6K10 ZF5BaK8 ZF5BaK2 ZF1ZK6 BaF8ZK19 ZF1ZK20 ZF2ZK19 BaF8ZK20
11	ZF3ZK8 ZF5BaK8 ZF6BaK7 ZF3BaK3 ZF2ZK8 BaF8ZK8 ZF2BaK3 QF11BaK6 ZF3ZK20
12	ZF5K10 ZF3BaK1 ZF3BaK2 ZF5BaK7 ZF3K7 ZF2BaK6 ZF2ZK20 ZF1BaK3 ZF2K2 ZF3BaK8
13	ZF2K9 ZF1BaK6 ZF3BaK6
14	F3BaK6 F4BaK6 ZF3K10 ZF1K2 ZF2BaK8 BaF8ZK3 F5BaK3
15	F3BaK3 ZF1K9 F2BaK6 F5 BaK6 ZF2 BaK1 QF11 BaK3 ZF1 BaK8 F4 BaK3 F2 BaK3 ZF2 BaK2 F4BaK3
16	F4BaK8 F2BaK8 F3BaK8 F5BaK8
17	ZF2K7 ZF2BaK7 F5K9 F4K9 QF11BaK3 ZF1BaK2 ZF1BaK1 F5K2 F4K2
18	ZF1BaK1 ZF2BaK3 ZF2K10 F2K9 F2K2 F3K9 F3K2
19	F5BaK7 F4BaK7 ZF1BaK3 F2BaK7 ZF1K7 QF1BaK2
20	F5BaK1 F4BaK2 F2BaK3 F4BaK3 F3BaK2 F5BaK3 F3BaK3 F2BaK2 F3BaK1
21	ZF1K10 F2BaK1 BaF8BaK6 BaF8BaK3 F3BaK7
22	F5K7 F4K7 F3K7
23	F2K7 F5K10 BaF8K2
24	BaF8K9 QF11K9 QF11K2 F3K10 F2K10 F4K10 BaF8BaK8
25	F4BaK2 F4BaK1
26	QF1K9 QF1BaK1 QF11BaK1
27	BaF8BaK1 BaF8BaK2 QF1K2
28	BaF8BaK7 BaF8K7
29	QF11K7
30	BaF8 BaK3

附录 F 双胶合透镜 P_0, Q_0 表

P_0 后	Q_0 前	K7									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2		1.66	-3.07	-2.34	-6.00	-13.55	-9.09	-73.46	-15.66	-212.33	-22.71
F5		1.69	-2.95	-1.95	-5.68	-12.12	-8.56	-66.10	-14.70	-190.72	-21.27
BaF5		0.62	-4.36	-14.70	-9.49	-61.11	-15.00	-325.46	-26.96	-964.28	-39.95
BaF6		-0.33	-5.04	-26.87	-11.37	-109.51	-18.23	-590.72	-33.24	-1768.26	-49.59
BaF8		1.40	-3.38	-5.28	-6.86	-24.54	-10.55	-129.96	-18.51	-378.37	-27.08
ZF1		1.76	-2.73	-1.21	-5.11	-9.41	-7.62	-52.31	-12.96	-150.46	-18.67
ZF2		1.81	-2.57	-0.70	-4.69	-7.56	-6.92	-43.08	-11.67	-123.66	-16.75
ZF3		1.89	-2.35	0.01	-4.11	-5.03	-5.95	-30.64	-9.88	-87.90	-14.08
ZF5		1.92	-2.25	0.32	-3.86	-3.96	-5.55	-25.52	-9.13	-73.36	-12.94
ZF6		1.93	-2.21	0.46	-3.74	-3.48	-5.34	-23.19	-8.74	-66.77	-12.36

P_0 后	Q_0 前	K9									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2		1.83	-2.69	-0.95	-5.35	-9.08	-8.15	-53.17	-14.10	-156.00	-20.46
F5		1.85	-2.60	-0.73	-5.10	-8.23	-7.72	-48.68	-13.31	-142.68	-19.28
BaF5		1.37	-3.57	-7.71	-7.96	-36.12	-12.65	-200.05	-22.78	-598.21	-33.76
BaF6		0.99	-3.99	-13.49	-9.24	-60.03	-14.90	-334.36	-27.21	-1009.21	-40.59
BaF8		1.70	-2.91	-2.77	-6.02	-16.18	-9.32	-90.65	-16.39	-267.21	-24.00
ZF1		1.89	-2.43	-0.28	-4.63	-6.52	-6.94	-39.72	-11.86	-116.19	-17.11
ZF2		1.91	-2.31	0.04	-4.28	-5.30	-6.36	-33.44	-10.76	-97.77	-15.47
ZF3		1.96	-2.14	0.52	-3.80	-3.53	-5.53	-24.49	-9.22	-71.74	-13.15
ZF5		1.97	-2.07	0.73	-3.59	-2.75	-5.18	-20.63	-8.56	-60.66	-12.15
ZF6		1.98	-2.03	0.83	-3.48	-2.39	-5.00	-18.86	-8.22	-55.58	-11.64

P_0 后	Q_0 前	K10									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2		1.52	-3.29	-3.05	-6.35	-15.66	-9.58	-82.32	-16.46	-236.13	-23.83
F5		1.57	-3.14	-2.59	-5.99	-13.95	-8.99	-73.69	-15.40	-210.96	-22.25
BaF5		0.03	-4.85	-19.34	-10.43	-76.96	-16.41	-402.48	-29.43	-1185.95	-43.56
BaF6		-1.46	-5.72	-36.91	-12.74	-145.47	-20.36	-772.66	-37.04	-2301.27	-55.21
BaF8		1.17	-3.66	-6.70	-7.33	-29.00	-11.23	-149.90	-19.64	-433.52	-28.71
ZF1		1.66	-2.89	-1.70	-5.36	-10.76	-7.96	-57.73	-13.50	-164.67	-19.43
ZF2		1.73	-2.70	-1.09	-4.89	-8.62	-7.19	-47.20	-12.10	-134.29	-17.35
ZF3		1.82	-2.45	-0.26	-4.26	-5.73	-6.16	-33.23	-10.19	-94.40	-14.50
ZF5		1.86	-2.34	0.09	-3.99	-4.53	-5.72	-27.56	-9.39	-78.39	-13.29
ZF6		1.88	-2.29	0.25	-3.86	-3.99	-5.50	-24.99	-8.98	-71.18	-12.69

P_0 后	Q_0 前	BaK2									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2		1.60	-3.08	-1.37	-5.96	-9.54	-8.95	-52.44	-15.26	-150.63	-21.97
F5		1.62	-2.95	-1.18	-5.63	-8.84	-8.43	-48.84	-14.34	-140.13	-20.62
BaF5		0.77	-4.45	-10.78	-9.53	-44.94	-14.91	-235.90	-26.46	-691.85	-38.90
BaF6		-0.06	-5.19	-20.69	-11.50	-83.47	-18.24	-442.61	-32.85	-1312.40	-48.67
BaF8		1.37	-3.41	-3.85	-6.83	-18.62	-10.43	-98.14	-18.11	-283.49	-26.33
ZF1		1.67	-2.72	-0.72	-5.06	-7.19	-7.50	-40.57	-12.66	-116.16	-18.14
ZF2		1.70	-2.55	-0.39	-4.63	-5.98	-6.81	-34.58	-11.41	-98.89	-16.30
ZF3		1.76	-2.32	0.15	-4.05	-4.12	-5.85	-25.54	-9.67	-73.08	-13.72
ZF5		1.79	-2.23	0.39	-3.80	-3.28	-5.45	-21.54	-8.93	-61.77	-12.62
ZF6		1.80	-2.18	0.51	-3.68	-2.89	-5.24	-19.71	-8.55	-56.64	-12.06

续表

P ₀ Q ₀ 前 后	BaK4									
	$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2	1.73	-2.63	0.08	-5.19	4.60	-7.83	-29.44	-13.35	-86.32	-19.16
F5	1.73	-2.54	0.11	-4.49	-4.49	-7.43	-28.76	-12.64	-84.23	-18.13
BaF5	1.44	-3.54	-3.75	-7.75	-19.57	-12.16	-108.38	-21.48	-319.89	-31.41
BaF6	1.19	-3.98	-7.32	-9.03	-33.89	-14.34	-186.38	-25.67	-554.77	-37.83
BaF8	1.63	-2.86	-1.22	-5.85	-9.55	-8.97	-54.82	-15.55	-160.41	-22.55
ZF1	1.74	-2.37	0.26	-4.49	-3.90	-6.69	-25.65	-11.30	-75.05	-16.18
ZF2	1.76	-2.25	0.40	-4.15	-3.38	-6.13	-22.97	-10.28	-67.21	-14.69
ZF3	1.79	-2.08	0.68	-3.67	-2.38	-5.34	-17.97	-8.83	-52.77	-12.54
ZF5	1.80	-2.01	0.82	-3.47	-1.87	-4.99	-15.47	-8.20	-45.63	-11.60
ZF6	1.81	-1.97	0.89	-3.37	-1.63	-4.82	-14.31	-7.88	-42.34	-11.12

P ₀ Q ₀ 前 后	BaK7									
	$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2	1.44	-3.52	-1.06	-6.06	-7.58	-9.78	-40.64	-16.37	-114.54	-23.28
F5	1.44	-3.34	-1.07	-6.20	-7.60	-9.16	-40.54	-15.32	-114.11	-21.79
BaF5	0.33	-5.63	-11.33	-11.55	-44.05	-17.73	-220.28	-30.79	-631.24	-44.65
BaF6	-1.16	-6.93	-26.01	-14.68	-97.78	-22.86	-494.31	-40.30	-1434.98	-59.02
BaF8	1.10	-4.00	-4.05	-7.75	-17.89	-11.66	-89.91	-19.90	-254.38	-28.63
ZF1	1.47	-3.03	-0.84	-5.50	-6.75	-8.05	-36.31	-13.40	-102.01	-19.05
ZF2	1.50	-2.81	-0.60	-4.98	-5.93	-7.25	-32.34	-12.00	-90.71	-17.02
ZF3	1.56	-2.51	-0.11	-4.30	-4.31	-6.15	-24.76	-10.07	-69.42	-14.21
ZF5	1.60	-2.39	0.14	-4.01	-3.50	-5.70	-21.05	-9.25	-59.12	-13.01
ZF6	1.61	-2.32	0.25	-3.87	-3.13	-5.47	-19.37	-8.84	-54.48	-12.41

P ₀ Q ₀ 前 后	ZK3									
	$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2	1.64	-2.72	0.94	-5.26	-0.96	-7.83	-10.70	-13.09	-32.41	-18.48
F5	1.62	-2.61	0.78	-5.00	-1.54	-7.42	-13.37	-12.41	-39.77	-17.55
BaF5	1.53	-3.79	-0.34	-8.05	-5.78	-12.38	-35.03	-21.25	-102.22	-30.38
BaF6	1.39	-4.34	-2.08	-9.50	-12.40	-14.77	-69.03	-25.63	-201.00	-36.90
BaF8	1.55	-2.98	-0.02	-5.97	-4.43	-9.03	-27.62	-15.36	-80.35	-21.94
ZF1	1.61	-2.43	0.65	-4.52	-1.95	-6.67	-15.19	-11.11	-44.67	-15.74
ZF2	1.61	-2.29	0.62	-4.17	-2.03	-6.10	-15.45	-10.12	-45.23	-14.33
ZF3	1.63	-2.10	0.73	-3.67	-1.64	-5.30	-13.50	-8.70	-39.58	-12.27
ZF5	1.64	-2.01	0.83	-3.46	-1.33	-4.95	-11.98	-8.07	-35.30	-11.35
ZF6	1.64	-1.97	0.87	-3.35	-1.18	-4.77	-11.28	-7.75	-33.30	-10.88

P ₀ Q ₀ 前 后	ZK6									
	$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2	1.62	-2.99	1.61	-5.63	1.59	-8.28	1.50	-13.57	1.29	-18.87
F5	1.58	-2.85	1.23	-5.33	0.32	-7.82	-4.18	-12.86	-13.99	-17.96
BaF5	1.76	-4.43	2.95	-9.07	6.22	-13.66	23.03	-22.72	59.92	-31.61
BaF6	1.79	-5.23	3.28	-10.98	7.49	-16.69	29.42	-27.97	78.06	-39.06
BaF8	1.53	-3.33	0.79	-6.49	-1.20	-9.68	-11.35	-16.15	-33.84	-22.74
ZF1	1.54	-2.62	0.84	-4.79	-0.97	-6.99	-9.92	-11.49	-29.47	-16.13
ZF2	1.52	-2.45	0.67	-4.38	-1.51	-6.36	-12.25	-10.44	-35.73	-14.67
ZF3	1.52	-2.21	0.67	-3.82	-1.50	-5.48	-12.07	-8.92	-35.00	-12.52
ZF5	1.53	-2.12	0.74	-3.5	-1.27	-5.10	-11.00	-8.26	-32.01	-11.56
ZF6	1.54	-2.07	0.77	-3.47	-1.16	-4.91	-10.50	-7.92	-30.59	-11.07

续表

P_0 Q_0 前 后		ZK7									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2		1.62	-2.71	1.63	-5.19	1.64	-7.67	1.72	-12.63	1.89	-17.60
F5		1.59	-2.60	1.33	-4.93	0.62	-7.28	-2.95	-12.01	-10.77	-16.80
BaF5		1.71	-3.81	2.56	-7.97	4.98	-12.09	17.57	-20.23	45.37	-28.22
BaF6		1.72	-4.38	2.74	-9.42	5.70	-14.41	21.29	-24.29	56.10	-34.02
BaF8		1.56	-2.98	1.02	-5.91	-0.48	-8.86	-8.18	-14.83	-25.34	-20.91
ZF1		1.56	-2.41	1.00	-4.46	-0.48	-6.55	-7.89	-10.80	-24.18	-15.18
ZF2		1.55	-2.27	0.86	-4.11	-0.96	-5.99	-10.06	-9.87	-30.03	-13.88
ZF3		1.55	-2.07	0.84	-3.62	-1.02	-5.20	-10.19	-8.50	-30.21	-11.94
ZF5		1.56	-1.99	0.89	-3.40	-0.85	-4.86	-9.38	-7.89	-27.91	-11.06
ZF6		1.56	-1.95	0.92	-3.30	-0.77	-4.69	-9.00	-7.58	-26.81	-10.61
P_0 Q_0 前 后		ZK11									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
F2		1.72	-3.31	2.93	-6.08	5.97	-8.79	20.38	-14.04	50.25	-19.04
F5		1.61	-3.15	2.16	-5.73	3.50	-8.29	9.95	-13.32	23.51	-18.26
BaF5		2.73	-5.32	11.39	-10.39	33.76	-15.18	139.06	-23.80	344.60	-30.97
BaF6		3.70	-6.55	20.01	-13.03	62.54	-19.04	260.53	-29.50	631.47	-37.50
BaF8		1.67	-3.77	2.62	-7.13	5.04	-10.45	16.85	-16.97	42.00	-23.33
ZF1		1.50	-2.85	1.28	-5.10	0.72	-7.36	-1.96	-11.90	-7.67	-16.49
ZF2		1.45	-2.64	0.86	-4.64	0.58	-6.66	-7.49	-10.79	-22.30	-15.03
ZF3		1.42	-2.35	0.67	-4.00	-1.18	-5.69	-9.97	-9.18	-28.75	-12.80
ZF5		1.43	-2.24	0.69	-3.74	-1.10	-5.28	-9.57	-8.47	-27.59	-11.80
ZF6		1.43	-2.18	0.71	-3.61	-1.06	-5.08	-9.36	-8.12	-26.98	-11.29
P_0 Q_0 前 后		F2									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		1.76	3.49	-1.89	6.41	-12.52	9.48	-70.40	16.03	-205.98	23.06
K9		1.91	3.11	-0.60	5.77	-8.26	8.55	-50.72	14.48	-150.90	20.82
K10		1.64	3.71	-2.57	6.76	-14.54	9.97	-79.05	16.83	-229.38	24.18
BaK2		1.68	3.51	-1.03	6.37	-8.78	9.36	-50.24	15.65	-146.13	22.34
BaK4		1.77	3.06	0.29	5.61	-4.12	8.25	-28.04	13.76	-83.45	19.55
BaK7		1.51	3.95	-0.80	7.03	-7.03	10.20	-39.09	16.78	-111.44	23.68
ZK3		1.66	3.16	1.03	5.70	-0.76	8.27	-10.17	13.52	-31.34	18.90
ZK6		1.62	3.43	1.61	6.08	1.60	8.73	1.50	14.02	1.30	19.32
ZK7		1.62	3.15	1.63	5.64	1.64	8.12	1.71	13.08	1.88	18.04
ZK11		1.68	3.77	2.81	6.54	5.70	9.25	19.70	14.51	49.02	19.53
P_0 Q_0 前 后		F5									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		1.80	3.37	-1.51	6.09	-11.10	8.95	-63.10	15.07	-184.50	21.62
K9		1.93	3.02	-0.38	5.51	-7.41	8.12	-46.25	13.69	-137.62	19.64
K10		1.69	3.56	-2.10	6.40	-12.85	9.39	-70.49	15.77	-204.36	22.61
BaK2		1.71	3.38	-0.83	6.05	-8.06	8.84	-46.60	14.73	-135.55	20.99
BaK4		1.78	2.97	0.33	5.37	-3.97	7.84	-27.27	13.04	-81.18	18.51
BaK7		1.52	3.77	-0.79	6.63	-6.99	9.57	-38.84	15.72	-110.70	22.18
ZK3		1.65	3.05	0.89	5.43	-1.28	7.86	-12.66	12.83	-38.34	17.97
ZK6		1.59	3.30	1.27	5.77	0.42	8.27	-3.93	13.30	-13.49	18.40
ZK7		1.60	3.05	1.36	5.37	0.69	7.72	-2.74	12.45	-10.35	17.24
ZK11		1.60	3.60	2.09	6.18	3.37	8.74	9.61	13.79	22.88	18.73

P_0 前 后	Q_0	BaF5									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		0.83	4.78	-13.66	9.89	-58.51	15.38	-317.21	27.31	-946.51	40.27
K9		1.50	3.99	-6.98	8.36	-34.29	13.04	-194.21	23.14	-585.62	34.09
K10		0.29	5.27	-18.11	10.82	-73.96	16.79	-393.02	29.77	-1165.65	43.87
BaK2		0.93	4.88	-10.00	9.94	-43.04	15.31	-230.04	26.83	-679.38	39.25
BaK4		1.52	3.97	-3.34	8.17	-18.54	12.56	-105.21	21.87	-313.19	31.78
BaK7		0.48	6.06	-10.69	11.97	-42.53	18.14	-215.77	31.18	-621.86	45.03
ZK3		1.56	4.23	-0.20	8.49	-5.45	12.82	-34.05	21.68	-100.23	30.80
ZK6		1.74	4.88	2.87	9.52	6.04	14.11	22.54	23.18	58.98	32.07
ZK7		1.69	4.26	2.50	8.42	4.84	12.54	17.16	20.68	44.58	28.68
ZK11		2.60	5.78	10.91	10.86	32.76	15.66	136.63	24.31	340.64	31.51
P_0 前 后	Q_0	BaF6									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		-0.03	5.45	-25.33	11.76	-105.59	18.60	-578.02	33.58	-1740.62	49.90
K9		1.17	4.41	-12.49	9.64	-57.45	15.28	-325.90	27.56	-990.76	40.91
K10		-1.09	6.13	-35.05	13.12	-140.77	20.72	-757.51	37.37	-2268.39	55.50
BaK2		0.17	5.61	-19.52	11.90	-80.56	18.63	-433.37	33.21	-1292.49	49.00
BaK4		1.30	4.41	-6.73	9.44	-32.41	14.74	-181.70	26.05	-544.74	38.19
BaK7		-0.92	7.36	-24.91	15.10	-95.14	23.26	-486.22	40.68	-1417.85	59.37
ZK3		1.43	4.78	-1.86	9.93	-11.86	15.20	-67.43	26.05	-197.71	37.31
ZK6		1.77	5.68	3.20	11.43	7.30	17.14	28.90	28.42	77.05	39.52
ZK7		1.71	4.83	2.68	9.86	5.55	14.86	20.87	24.75	55.28	34.48
ZK11		3.52	7.02	19.31	13.50	61.06	19.53	257.10	30.02	626.29	38.06
P_0 前 后	Q_0	BaF8									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		1.55	3.80	-4.61	7.26	-22.96	10.94	-125.16	18.87	-368.26	27.42
K9		1.81	3.33	-2.27	6.43	-14.96	9.71	-86.92	16.76	-259.32	24.35
K10		1.34	4.08	-5.97	7.73	-27.27	11.62	-144.66	20.00	-422.51	29.04
BaK2		1.49	3.83	-3.33	7.24	-17.41	10.83	-94.53	18.49	-275.95	26.69
BaK4		1.70	3.29	-0.90	6.27	-8.78	9.38	-52.51	15.94	-155.61	22.92
BaK7		1.22	4.43	-3.60	8.17	-16.87	12.07	-86.98	20.29	-248.36	29.00
ZK3		1.59	3.42	0.16	6.41	-4.03	9.46	-26.47	15.78	-78.03	22.34
ZK6		1.55	3.78	0.86	6.93	-1.04	10.12	-10.89	16.58	-32.93	23.17
ZK7		1.58	3.43	1.08	6.35	-0.34	9.30	-7.80	15.27	-24.59	21.35
ZK11		1.65	4.23	2.53	7.58	4.86	10.90	16.37	17.43	41.09	23.80
P_0 前 后	Q_0	ZF1									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		1.87	3.15	-0.78	5.52	-8.43	8.01	-49.49	13.33	-144.67	19.02
K9		1.96	2.86	0.06	5.04	-5.72	7.34	-37.38	12.23	-111.37	17.47
K10		1.78	3.31	-1.23	5.76	-9.72	8.35	-54.75	13.87	-158.56	16.78
BaK2		1.76	3.15	-0.38	5.47	-6.41	7.90	-38.35	13.04	-111.65	18.51
BaK4		1.80	2.81	0.51	4.91	-3.35	7.10	-24.07	11.69	-71.85	16.56
BaK7		1.56	3.46	-0.53	5.92	-6.08	8.46	-34.47	13.80	-98.32	19.43
ZK3		1.65	2.87	0.81	4.96	-1.61	7.10	-14.24	11.53	-42.78	16.15
ZK6		1.56	3.06	0.94	5.23	-0.74	7.42	-9.30	11.92	-28.27	16.55
ZK7		1.58	2.85	1.09	4.90	-0.28	6.98	-7.36	11.23	-23.13	15.60
ZK11		1.51	3.30	1.31	5.55	0.78	7.80	-1.79	12.35	-7.34	16.93

续表

P_0 后	Q_0 前	ZF2									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		1.92	2.99	-0.28	5.09	-6.61	7.31	-40.38	12.03	118.14	17.09
K9		1.99	2.73	0.39	4.69	-4.51	6.75	-31.16	11.14	-93.09	15.82
K10		1.85	3.12	-0.64	5.30	-7.61	7.59	-44.35	12.47	-128.50	17.70
BaK2		1.80	2.98	-0.03	5.05	-5.20	7.21	-32.38	11.78	-94.43	16.66
BaK4		1.82	2.68	0.66	4.57	-2.80	6.53	-21.33	10.67	-63.89	15.06
BaK7		1.59	3.24	-0.27	5.40	-5.22	7.65	-30.41	12.39	-86.85	17.40
ZK3		1.66	2.73	0.81	4.60	-1.62	6.52	-14.33	10.53	-43.00	14.73
ZK6		1.56	2.89	0.82	4.82	-1.19	6.79	-11.39	10.86	-34.03	15.08
ZK7		1.58	2.71	0.99	4.55	-0.68	6.42	-9.29	10.29	-28.51	14.29
ZK11		1.48	3.09	0.96	5.08	-0.37	7.10	-6.96	11.22	-21.28	15.45

P_0 后	Q_0 前	ZF3									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		1.99	2.77	0.42	4.51	-4.14	6.34	-28.17	10.25	-82.94	14.42
K9		2.04	2.56	0.86	4.20	-2.77	5.93	-22.36	9.59	-67.43	13.50
K10		1.94	2.87	0.17	4.66	-4.80	6.55	-30.64	10.56	-89.22	14.84
BaK2		1.86	2.75	0.50	4.46	-3.36	6.25	-23.44	10.04	-68.88	14.08
BaK4		1.85	2.51	0.95	4.09	-1.79	5.74	-16.33	9.22	-49.48	12.91
BaK7		1.67	2.94	0.23	4.71	-3.59	6.56	-22.83	10.45	-65.59	14.57
ZK3		1.68	2.53	0.95	4.10	-1.18	5.71	-12.24	9.09	-37.09	12.65
ZK6		1.58	2.65	0.86	4.26	-1.09	5.90	-10.97	9.33	-32.86	12.91
ZK7		1.60	2.51	1.01	4.05	-0.65	5.63	-9.20	8.91	-28.27	12.33
ZK11		1.48	2.80	0.83	4.44	-0.84	6.13	-9.09	9.60	-27.04	13.21

P_0 后	Q_0 前	ZF5									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		2.02	2.67	0.71	4.26	-3.12	5.94	-23.20	9.49	-68.72	13.28
K9		2.05	2.49	1.06	4.00	-2.02	5.57	-18.61	8.93	-56.59	12.50
K10		1.97	2.76	0.50	4.40	-3.65	6.11	-25.13	9.75	-73.56	13.64
BaK2		1.89	2.65	0.74	4.21	-2.54	5.85	-19.53	9.30	-57.79	12.97
BaK4		1.87	2.43	1.09	3.89	-1.28	5.40	-13.87	8.59	-42.44	11.97
BaK7		1.70	2.81	0.47	4.43	-2.79	6.10	-19.18	9.63	-55.45	13.37
ZK3		1.70	2.45	1.05	3.88	-0.86	5.37	-10.72	8.47	-32.80	11.73
ZK6		1.59	2.56	0.94	4.02	-0.84	5.53	-9.87	8.66	-29.80	11.95
ZK7		1.61	2.43	1.07	3.84	-0.46	5.28	-8.35	8.30	-25.89	11.45
ZK11		1.49	2.68	0.87	4.18	-0.73	5.71	-8.61	8.89	-25.74	12.20

P_0 后	Q_0 前	ZF6									
		$\bar{C} = 0.01$		$\bar{C} = 0.0$		$\bar{C} = -0.01$		$\bar{C} = -0.03$		$\bar{C} = -0.05$	
K7		2.04	2.63	0.84	4.14	-2.65	5.73	-20.93	9.11	-62.26	12.71
K9		2.06	2.45	1.16	3.89	-1.67	5.39	-16.87	8.59	-51.60	11.99
K10		1.99	2.71	0.66	4.26	-3.12	5.89	-22.63	9.35	-66.49	13.03
BaK2		1.90	2.60	0.85	4.09	-2.16	5.64	-17.74	8.93	-52.73	12.41
BaK4		1.87	2.40	1.16	3.78	-1.05	5.22	-12.72	8.26	-39.18	11.49
BaK7		1.72	2.75	0.59	4.28	-2.42	5.87	-17.52	9.22	-50.84	12.77
ZK3		1.70	2.41	1.09	3.77	-0.70	5.19	-10.00	8.15	-30.78	11.26
ZK6		1.60	2.51	0.98	3.90	-0.72	5.33	-9.33	8.32	-28.33	11.46
ZK7		1.61	2.39	1.11	3.73	-0.37	5.11	-7.93	7.99	-24.74	11.00
ZK11		1.49	2.62	0.90	4.04	-0.66	5.50	-8.35	8.53	-25.04	11.69