



LENS DESIGN
FOURTH EDITION

光学系统设计

(原书第4版)

(美)Milton Laikin 著
周海亮 程云芳 译
周华君 程 林 校



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



揭开请拨 95105715 或短
信发送至 106695887808



光学系统设计

(原书第4版)

(美) Milton Laikin 著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校



机械工业出版社

本书内容丰富,非常实用。全书共分43章,几乎涵盖了所有的光学系统,既包括普通的光学系统,又有近代光学系统。此外还提供了150多种具体的光学系统设计实例。对每种光学系统,不仅提供了常规设计的结构布局图和评价像差的曲线图,而且还以列表形式给出了该系统的具体结构参数,包括表面曲率半径、透镜厚度、空气间隔、光阑位置、透镜(或反射镜)的直径(甚至合适的边缘厚度)和光学材料。这就意味着可以对该系统进行复算,在某种情况下,稍加修改,甚至可以直接使用。

本书可供光学领域中从事光学仪器设计和光学系统设计的研发设计师、光学技术工作者使用,也可作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。

Lens Design 4th Edition/by Milton Laikin ISBN: 978-0-8493-8278-9

Copyright © 2007 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由Taylor & Francis出版集团旗下,CRC出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字01-2008-4440。

图书在版编目(CIP)数据

光学系统设计:第4版/(美)莱金(Laikin, M.)著;周海宪,程云芳译.
—北京:机械工业出版社,2009.7
ISBN 978-7-111-27413-1

I. 光… II. ①莱…②周…③程… III. 光学系统—系统设计 IV. TH740.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第093420号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:王欢 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京双青印刷厂印刷

2009年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·27.25印张·578千字

0 001-3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27413-1

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

译者序

光学系统设计师最迫切的希望是什么？

在光学系统设计的初始阶段，设计师希望尽快能够有一个光学系统的初始结构参数。

随着科学技术的迅速发展，大容量、高运算速度计算机以及各种光学设计和分析程序的应用，光线追迹和像差计算不再是光学系统设计师的主要任务。从目前提供的各种光学设计程序来看，名义上都是光学系统自动设计程序，实际上只是一种优化程序，无法做到全自动设计，至少需要光学设计师根据不同的使用环境和技术条件确定光学系统的初始结构形式和参数。因此，光学设计师的重要任务是选择一个合适的初始光学系统，将之输入到程序中。经验不足，选择不当，可能会无法优化，甚至导致设计失败。

如何选择不同类型光学系统的初始结构，《光学系统设计（Lens Design, Fourth Edition）》第4版一书给出了答案。

《光学系统设计》一书的作者Milton Laikin先生在1952年获得马里兰大学物理学学士学位，1957年获得罗彻斯特大学光学硕士学位，并分别在华盛顿大学和南加州大学学习过电子学专业。之后，曾在洛杉矶加州大学光学工程系教授过“光学工程绪论（Introduction to Optical Engineering）”课程。1967年，创建了Laikin光学公司，较早地利用计算机和光学设计程序从事光学系统设计工作。他从事光学系统设计工作超过50年，在光学系统设计和成像质量分析方面有非常丰富和成熟的经验，设计和开发了多种类型的光学系统，包括军用红外成像系统、照相物镜、水下光学系统、防辐射物镜、激光光学系统、超广角照相机光学系统、摄影机专用潜望镜系统、70mm摄影放映物镜、伽利略塑料双目望远镜、塑料放大镜系统以及门窥镜等，并获得多项美国技术专利。

Milton先生是美国光学学会（Optical Society of America, OSA）和国际光学工程学会（International Society of Optical Engineering, SPIE）等举办国际会议的组织者和积极参与者，并担任过SPIE南加州分会主席，在光学专业技术刊物上发表了許多论文。

本书内容丰富、非常实用，全书共分43章，几乎涵盖了所有的光学系统：既包括普通的光学系统，又有近代光学系统，例如摄微物镜（第32章）和衍射光学系统（第43章）；既有民用光学系统，又有军用光学系统，例如平视（头盔）显示器物镜（第25章）和航空摄影物镜（第30章）等；既有常规环境条

IV 光学系统设计

件下使用的光学系统，又有适合于特定条件下使用的光学系统，例如水下物镜（第12章）和抗辐射物镜（第31章）；既有可见光范围内光学系统的设计，又包括紫外和红外物镜的设计，是一本难得的光学工具书。

更为可贵的是，本书提供了150多种具体的光学系统设计实例，几乎囊括了所有类型的光学系统。对每种光学系统，不仅提供了常规设计的结构布局图和评价像差的曲线图，而且还以列表形式给出了该系统的具体结构参数，包括表面曲率半径、透镜厚度、空气间隔、光阑位置、透镜（或反射镜）的直径（甚至合适的边缘厚度）和光学材料。这就意味着可以对该系统进行复算。在某种情况下，稍加修改，甚至可以直接使用。正如本书作者所写：“即使在叙述比较详细的光学工程书籍中，没有一本书能够给出各种光学系统的详细设计信息或者设计方法”，但是，本书做到了这一点。

本书的另一个特点是成熟。本书自第1版出版以来，就受到光学设计师的极大关注，成为热销书，已经连续出版四次。在不断跟踪新技术和新方法的同时，也不断查实和修正其内容和有关数据，例如本书第1版，所有设计数据都是使用David Grey的光学设计和分析软件完成计算的，而在第4版，已经使用ZEMAX软件对所有设计重新进行了复算。由于ZEMAX软件要比早期的Geay软件更为成熟，计算精度更高，消除了早期版本中的错误和不准确之处。同时，它又可以完成偏心、倾斜系统，梯度折射率系统以及各种变焦系统的计算。另外，由于各种光学材料有了很大变化，例如目前生产的玻璃不同于早期的玻璃材料，已经消除了其中的铅、镉和砷等有害成分，材料性能也有不同程度的改变，本版图书在此方面都重新进行了更正。此外，还补充了一些新的章节，例如：第40章稳态光学系统、第41章正常人眼系统、第42章光谱摄像系统、第43章衍射光学系统。

全书由43章组成：第1章，透镜的设计方法；第2章，消色差双胶合透镜系统；第3章，三分离物镜；第4章，改进型三分离物镜；第5章，匹兹伐物镜；第6章，准对称型双高斯物镜；第7章，摄远物镜；第8章，反摄远物镜；第9章，超广角物镜；第10章，目镜；第11章，显微物镜；第12章，水下物镜；第13章，无焦光学系统；第14章，中继转像系统；第15章，折反式和反射式光学系统；第16章，潜望镜系统；第17章，红外物镜；第18章，紫外物镜和光学平版印刷术；第19章， $F-\theta$ 扫描物镜；第20章，内窥镜；第21章，放大和复制物镜；第22章，放映物镜；第23章，远心系统；第24章，激光聚焦物镜（光盘）；第25章，平视（头盔）显示器物镜；第26章，消色差光楔；第27章，楔形板和旋转棱镜照相机；第28章，变形物镜附件；第29章，照明系统；第30章，航空摄影物镜；第31章，抗辐射物镜；第32章，显微物镜；第33章，机械补偿变焦物镜的初级理论；第34章，光学补偿变焦物镜的初级理

论；第35章，机械补偿变焦物镜；第36章，光学补偿变焦物镜；第37章，变倍率影印物镜；第38章，可变焦距物镜；第39章，梯度折射率物镜；第40章，稳态光学系统；第41章，正常人眼系统；第42章，光谱摄像系统；第43章，衍射光学系统。

4个附录分别列出了胶片和CCD的格式、法兰距离、有关材料的热特性和机械性能以及光学设计软件程序的有关资料，非常便于光学设计师应用。

在中文版《光学系统设计》的出版过程中，得到了Milton Laikin先生的大力支持，对原版英文书中的有关问题进行了及时和充分的讨论沟通，对书中有重要变动的内容增加了“译者注”。为了使读者更准确地理解和利用本书，保留了英文参考文献。

周海宪翻译了第1章到第40章，程云芳翻译了第41章到第43章及附录。在美国工作的周华君和程林先生对全书进行了认真的校对，赵妙娟研究员和程云芳高级工程师对本书做了专业校对和最终审核。

本书的出版得到了清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生，美国Milton Laikin先生和北京理工大学王涌天教授的极大支持；刘永祥、郭世勇、潘新宇、金朝瀚、翟文军等高级工程师也从不同方面对本书的出版给予了关注；祖成奎、黄存新博士，以及仇志刚高级工程师对书中的光学材料进行了认真的核对；与吴建伟、曾威、张良和王希军高级工程师对书中的有关问题进行了有益的讨论，在此表示衷心的感谢。

机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和王欢编辑对本书的出版给予了非常大的鼓励和支持，在此特别致以谢意！

本书可供光电子领域中从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计的研究设计师、光学零件制造工艺研究的工程师阅读，也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书提供的材料和例子能够对军事、航空航天和民用光学仪器应用中光学系统的设计提供有益的指导。

译者
2009年9月

原 书 前 言

一些非常好的光学工程教科书都没有详细阐述各种光学系统的设计信息或设计方法。编写本书的目的是希望对正在从事或有意成为光学设计工程师的人们提供有用的帮助。

在编写本书时,作者假定读者比较熟悉光线追迹方法、近轴公式及三级像差理论,还假设读者已经在计算机上使用过光学设计和分析软件程序(对光学设计编程软件的有关资料,请参考本书附录D)。由于个人计算机非常流行,且计算能力大有提高,其科学计算能力已经超过了20世纪60~80年代的大型计算机。现在,许多优秀的光学设计软件程序都可以进行光学系统优化、光线追迹分析、绘制光学系统曲线图及调制传递函数计算等。然而,所有这些程序都是优化程序,设计师必须输入一个初始结构。

作者曾在洛杉矶加州大学教授过几年“光学工程绪论(Introduction to Optical Engineering)”课程,经常会自问:怎样才能有一个初始设计?本书的目的之一就是回答刚才提出的问题。

设计中列出的所有光学玻璃都源自Schott公司的玻璃目录(不包括图2.4和图7.5中使用的Ohara公司S-FPL53玻璃元件、图2.5中Ohara公司的S-LAL18玻璃元件以及第39章的梯度折射率材料),它与其它的玻璃生产厂商(Ohara、Hoya、Chance、Corning、Chengdu等公司)制造的玻璃类型几乎是一样的。在某些结构设计参数中,列出的材料SILICA是指 SiO_2 ,CAF2是指氟化钙。

除了第41章对人眼的阐述内容外,所有光学系统结构参数表格中给出的尺寸单位都是英寸[⊖],从而使每个实际系统代表着一种具体应用(或许,代表一种35mm反射式相机)。透镜的直径有合适的边缘厚度值。采用通常的符号规则:厚度是沿轴向到下一表面的尺寸;如果曲率中心位于表面的右边,则半径的符号为正;光线从左向右传播,并且从长共轭距传播到短共轭距。透镜直径不是指通光孔径,而是指光学图中所示的实际透镜直径。

可见光光谱区所有数据的中心光谱是e谱线,覆盖的光谱范围是 $F' \sim C'$ 。两个红外光谱区对应着 $8 \sim 14\mu\text{m}$ (中心谱线在 $10.2\mu\text{m}$)和 $3.2 \sim 4.2\mu\text{m}$ (中心谱线在 $3.63\mu\text{m}$)的大气窗口。紫外光谱区的所有数据对应着中心谱线 $0.27\mu\text{m}$,光谱范围 $0.2 \sim 0.4\mu\text{m}$ (由于氟化钙和熔凝石英两种材料在此短波长范围内吸收

⊖ 1英寸(in)=2.54cm。

能力强,所以需要格外注意,非常重要的一项是选择合适的等级)。视场 (Field of View, FOV) 的单位是度,并适用于全书所有内容。

本书第1版是使用 David Grey 光学设计和分析软件程序完成定焦距系统的设计。Grey 于 1966 年详细阐述了正交技术,并由 Walters 于 1966 年以软件程序实现。之后, Grey 于 1980 年又系统地提出利用正交多项式作为像差系数的方法。在本版本中利用了 ZEMAX 软件程序 (Moore 2006) 对所有设计重新进行了优化。出于环境保护的要求,需要消除玻璃中的铅、镉和砷,现在的玻璃成分有许多变化,所以重新优化是必要的。但可能最重要的是 ZEMAX 软件程序 (与本书附录 D 中列出的其它光学设计程序一样) 要比早期的 Grey 软件程序更为全面,除了提供系统的图形分析外,还可以完成偏心倾斜系统、梯度折射率以及变焦系统的计算。

在本版书 (译者注:英文第4版原版书) 中,还提供一张 CD,其中包括两类资料。

一类是“Lens”:包括所有物镜系统的结构参数表,与书中列出的一样,直接使用计算机中的数据,避免早期版本中发现的某些错误。所列内容包括 RADIUS (半径)、THICKNESS (厚度)、MATERIAL (材料) 和 DIAMETER (直径),文件与书中的图形相对应 (并非表的顺序号)。

另一类是“Optics”:包括可执行的 ZEMAX 文件,与书中的图形相对应。在这些系统的初始设计阶段,一般要使用三种波长 (当然,激光系统除外),并且只追迹很少几条光线。而计算评价函数时,要使用较多的光线 (多数情况下,使用五种波长)。如果有二级色差,为了真实地评估物镜的 MTF,还要使用更多不同波长的光线。所以,光盘上阐述的内容中包含有更多的光线和波长。在玻璃目录中,为许多设计专门列出了推荐使用的玻璃。PREFERED (译者注:注意该词的拼写有误,该单词的正确写法是 PREFERRED),是作者根据价格合理性、实用性、透过率以及耐污染性所列写的,经常使用的 Schott 公司的光学玻璃的简单列表。可以简单地用 Schott_2000 文件代替该目录,或者将该光盘中的文件 PREFERRED.AGF 装入到你自己的玻璃目录中。遗憾的是,玻璃的实用性在不断变化,不断会研制出新型玻璃,例如,图 4.1 及其它一些设计使用的 N-LLF6 玻璃就不再适用,而应当代以 OHARA S-TIL6 玻璃。同样,图 14.4 的设计中的 SK-18 玻璃也不再适用,而使用 OHARA S-BSM 18 玻璃。

除变焦物镜移动量、二级色差图和增透膜外,图中的所有曲线都是使用 ZEMAX 软件程序绘制的。关于变焦物镜移动量曲线,要注意三条曲线代表两个移动透镜组的相对初级移动量,所以曲线的交叉点 (见图 35.9b) 并不意味着移动透镜组彼此相互干涉。交叉只是表现在曲线图上,是利用第 33 章和第 34 章中的公式初级计算的结果。首先计算出 10 个值,然后与一个三次方仿样方程相拟合,

得到上述实际的曲线。

对于大多数系统，要给出四种曲线：MTF、光学布局图、光扇图和 RMS 光点尺寸图。在 MTF 图上，标出的角度是半视场角，单位是度，从第一透镜前表面方向观看。这些数据（在某些情况下，是物高或像高）已经考虑到衍射的作用、MTF 以及表 1.2 中列出的权重。

畸变定义为

$$D = \frac{Y_c - Y_g}{Y_g}$$

式中， Y_c 是全视场时的实际像高； Y_g 是对应的近轴像高。对于有焦系统，有

$$D = \frac{\tan \theta' / \tan \theta - m}{m}$$

式中， θ' 是全视场时的出射角； m 是近轴放大率 (Kingslake, 1965)。

尽管作者已经尽了最大的努力保证设计数据的精确性，然而准备采用其中任何一种设计的用户都应当：

- 仔细分析结构参数，确信其可以满足具体的技术要求。
- 对可能的违背量，要进一步对专利文章进行核查。可以从美国专利和商标局得到专利的副本（每份 \$ 3.00），其联系地址是：P. O. Box 1450, Alexandria, VA22313 - 1450 (<http://www.uspto.gov>)。专利文章是有价值的详细设计数据的资源。由于专利局接受申请后 20 年内，专利都是有效的（以前是获得专利申请后 17 年），所以较早的专利现在已是公开，可以自由地利用（美国专利局，1999）。

也可以利用互联网搜索专利文章，通过对专利号或题目搜索专利，可以得到专利文章的内容和光学系统的结构参数（只对 1976 年后公布的专利），但没有光学系统图或其它插图，这些插图在打印出的专利版中才有。在《Optics and Photonics News》（译者注：杂志名称）中，Brian Caldwell 讨论每个月公布的专利设计。在《Applied Optics》（译者注：杂志名称）中，还会有关于专利的评述。

- 物镜结构参数的所有数据（本书中，不是 CD 上）都已四舍五入。如果读者希望核实光学数据，可能需要对后截距 (BFL) 稍作调整（特别是小 f 数的物镜系统）。

本版对前面 3 版进行了小部分修正，增加了一些新的设计和章节，例如稳定系统、人眼、光谱摄像系统和衍射光学系统。此外，前面设计中使用的某些型号的玻璃，目前不再使用，已经被替代。

参 考 文 献

- Grey, D. S. (1966) Recent developments in orthonormalization of parameter space. In *Lens Design with Large Computers, Proceedings of the Conference*, Institute of Optics, Rochester, New York.
- Grey, D. S. (1980) Orthogonal polynomials as lens aberration coefficients, *International Lens Design Conference, SPIE*, Volume 237, p. 85.
- Kidger, M. (2002) *Fundamental Optical Design*, SPIE Press, Bellingham, WA.
- Kidger, M. (2004) *Intermediate Optical Design*, SPIE Press, Bellingham, WA.
- Kingslake, R. (1965) *Applied Optics and Optical Engineering*, Volume 1, Academic Press, New York.
- Moore, K. (2006) *ZEMAX Optical Design Program, User's Guide*, Zemax Development Corporation, Bellevue, WA.
- US Patent Office (1999) *General Information Concerning Patents*, Available from US Govt. Printing Office, Supt of Documents, Washington DC 20402.
- Walters, R. M. (1966) Odds and ends from a Grey box. In *Lens Design with Large Computers, Proceedings of the Conference*, Institute of Optics, Government Superintendent, Rochester, New York.

目 录

译者序

原书前言

光学系统图目录

第1章	透镜的设计方法	1
第2章	消色差双胶合透镜系统	38
第3章	三分离物镜	48
第4章	改进型三分离物镜	58
第5章	匹兹伐物镜	68
第6章	准对称型双高斯物镜	72
第7章	摄远物镜	80
第8章	反摄远物镜	90
第9章	超广角物镜	96
第10章	目镜	110
第11章	显微物镜	121
第12章	水下物镜	131
第13章	无焦光学系统	143
第14章	中继转像系统	156
第15章	折反式和反射式光学系统	168
第16章	潜望镜系统	194
第17章	红外物镜	201
第18章	紫外物镜和光学平版印刷术	214
第19章	$F-\theta$ 扫描物镜	225
第20章	内窥镜	231
第21章	放大和复制物镜	236
第22章	放映物镜	241
第23章	远心系统	258
第24章	激光聚焦物镜 (光盘)	266
第25章	平视 (头盔) 显示器物镜	273
第26章	消色差光楔	279
第27章	楔形板和旋转棱镜照相机	281

第 28 章	变形物镜附件	286
第 29 章	照明系统	293
第 30 章	航空摄影物镜	300
第 31 章	抗辐射物镜	308
第 32 章	摄微物镜	311
第 33 章	机械补偿变焦物镜的初级理论	314
第 34 章	光学补偿变焦物镜的初级理论	318
第 35 章	机械补偿变焦物镜	321
第 36 章	光学补偿变焦物镜	362
第 37 章	变倍率影印物镜	373
第 38 章	可变焦距物镜	379
第 39 章	梯度折射率物镜	385
第 40 章	稳态光学系统	395
第 41 章	正常人眼系统	399
第 42 章	光谱摄像系统	403
第 43 章	衍射光学系统	408
附录		413
附录 A	胶片和 CCD 的规格	413
附录 B	法兰距离	415
附录 C	有关材料的热性能和机械性能 (温度为 20℃)	416
附录 D	光学设计软件程序的有关资料	418

光学系统图目录

图号	光学系统类型	
图 2.1	焦距 48in 的消色差物镜	40
图 2.2	焦距 20in 的双胶合消色差物镜	41
图 2.3	焦距 10in 的双胶合消色差物镜	42
图 2.4	胶合复消色差物镜	44
图 2.5	焦距 48in 的望远物镜	46
图 3.2	焦距 5in、 $f/3.5$ 的三分离物镜	50
图 3.3	8~14 μm 红外三分离物镜	52
图 3.4	焦距 4in、光谱范围 3.2~4.2 μm 的红外三分离物镜	53
图 3.5	焦距 50in、 $f/8$ 的三分离物镜	55
图 3.6	焦距 18in、 $f/9$ 的三分离物镜	56
图 4.1	$f/5$ 的 Heliar 物镜	59
图 4.2	焦距 4in、 $f/4.5$ 的天塞物镜	60
图 4.3	幻灯机的物镜	62
图 4.4	含有场镜校正系统的三分离物镜系统	63
图 4.5	焦距 100mm、 $f/2.8$ 的物镜	65
图 4.6	焦距 10mm、 $f/2.8$ 的物镜	66
图 5.1	$f/1.4$ 匹兹伐物镜	69
图 5.2	含有致平场镜的匹兹伐物镜	70
图 6.1	$f/2.5$ 的双高斯物镜	73
图 6.2	焦距 50mm、 $f/1.8$ 的单透镜反射式照相物镜	75
图 6.3	$f/1$ 、视场 5° 的双高斯物镜	77
图 6.4	焦距 25mm、 $f/0.85$ 的双高斯物镜	78
图 7.2	$f/5.6$ 摄远物镜	82
图 7.3	焦距 180mm、 $f/2.8$ 的摄远物镜	83
图 7.4	焦距 400mm、 $f/4$ 的摄远物镜	84
图 7.5	焦距 1000mm、 $f/11$ 的摄远物镜	86
图 7.6	具有 $2\times$ 扩束能力的双胶合消色差物镜	88
图 8.1	$f/3.5$ 的反摄远物镜	92
图 8.2	焦距 10mm 的电影摄影物镜	93

图 8.3	反摄远照相物镜	94
图 9.1	视场 100° 的照相物镜	97
图 9.2	$f/2$ 、视场 120° 的电影放映物镜	99
图 9.3	$f/2$ 、视场 160° 的电影放映物镜	101
图 9.4	$f/1.8$ 、视场 170° 的照相物镜	103
图 9.5	视场 210° 的放映物镜	105
图 9.6	全景照相物镜	107
图 10.2	$10\times$ 目镜	113
图 10.3	$10\times$ 长眼距目镜	114
图 10.4	Plossl 目镜	116
图 10.5	Erfle 目镜	117
图 10.6	焦距 25mm、 $f/5$ 、有中间像的目镜系统	118
图 11.1	$10\times$ 显微物镜	122
图 11.2	$20\times$ 显微物镜	124
图 11.3	焦距 4mm 的复消色差显微物镜	125
图 11.4	紫外反射式显微物镜	127
图 11.5	$98\times$ 油浸显微物镜	129
图 12.3	平板窗口、70mm 胶片的照相物镜系统	135
图 12.5	水-整流罩光学校正系统	137
图 12.6	带有整流罩的水下物镜	138
图 12.7	为变焦物镜设计的水下光学校正器	140
图 13.1	$5\times$ 激光扩束镜	144
图 13.2	$5\times$ 伽利略扩束镜	145
图 13.3	$50\times$ 激光扩束镜	147
图 13.4	$4\times$ 伽利略塑料望远镜	148
图 13.5	能量转换光学系统	150
图 13.6	Albada 取景器	151
图 13.7	门窥镜	154
图 14.1	$1:1$ 中继转像透镜	158
图 14.2	单位放大率的影印复制物镜	159
图 14.3	$0.6\times$ 影印复制物镜	161
图 14.4	步枪瞄准光学系统	162
图 14.5	目镜的中继转像光学系统	164
图 14.6	$1:5$ 中继转像光学系统	166
图 15.2	中红外 ($3.2\sim 4.2\mu\text{m}$ 光谱范围) 卡塞格林物镜系统	170

图 15.3	$f/1.57$ 观察星光用望远物镜	172
图 15.4	焦距 1000mm 的卡塞格林物镜	174
图 15.5	焦距 50in 卡塞格林望远物镜	176
图 15.6	焦距 10in、 $f/1.23$ 卡塞格林物镜	177
图 15.7	Schmidt 照相物镜	179
图 15.8	反射式物镜	180
图 15.9	焦距 250in、 $f/10$ 卡塞格林物镜	182
图 15.10	Ritchey-Chretien 望远物镜	184
图 15.11	哈伯空间望远镜	185
图 15.12	单位放大率的同心反射镜系统	186
图 15.13	倾斜反射镜系统	188
图 15.14	小型望远镜	190
图 15.15	无遮挡、全反射式物镜	191
图 16.1	焦距 25mm 潜望镜	196
图 16.2	65mm 幅面的潜望镜系统	199
图 17.2	双焦距红外物镜系统	205
图 17.3	中红外 ($3.2 \sim 4.2\mu\text{m}$ 光谱范围) 红外物镜	207
图 17.4	$10\times$ 激光扩束镜	208
图 17.5	适用于 $1.8 \sim 2.2\mu\text{m}$ 光谱范围的双分离物镜系统	210
图 17.6	长波红外照相机	211
图 18.1	由石英、氟化钙材料组成的紫外物镜	217
图 18.2	全部使用熔凝石英玻璃的卡塞格林物镜	218
图 18.3	平版印刷术使用的投影物镜	222
图 19.1	文件扫描系统	226
图 19.2	氩激光光源扫描物镜	228
图 19.3	使用 $0.6328\mu\text{m}$ 波长扫描物镜	229
图 20.1	$f/3$ 由棒状透镜组成的内窥镜	232
图 20.2	含有纤维光学技术的内窥镜	234
图 21.1	焦距 65mm、 $f/4$ 、 $10\times$ 放大镜	237
图 21.3	单位放大率复制物镜	239
图 22.1	$f/1.8$ 放映物镜	243
图 22.3	70mm 胶片的放映物镜	245
图 22.4	视场 70° 、 $f/2$ 的放映物镜	248
图 22.5	塑料放映物镜	249
图 22.7	焦距 2in 的 LCD 投影物镜	253

图 22.8	广角 LCD 投影物镜	254
图 22.9	数字光学投影仪 (DLP) 的投影物镜	255
图 23.1	20 × 轮廓投影仪物镜	259
图 23.2	$f/2.8$ 远心光学系统	261
图 23.3	$f/2$ 远心物镜	262
图 23.5	三芯片 CCD 照相物镜	264
图 24.1	$f/1$ 影碟机物镜	267
图 24.3	波长 $0.308\mu\text{m}$ 的激光聚焦物镜	269
图 24.4	氦氛激光束 ($0.6328\mu\text{m}$) 聚焦物镜	271
图 25.1	平视显示器	275
图 25.2	双目物镜	277
图 27.2	楔形板	282
图 27.4	旋转棱镜照相机的物镜	284
图 28.1	与 35mm 胶片配用的 2 × 变形辅助物镜	287
图 28.2	与 70mm 胶片配用的 2 × 变形辅助物镜	288
图 28.3	1.5 × 变形辅助扩束物镜	290
图 28.4	变形棱镜组件	291
图 29.1	1 × 熔凝石英聚光镜	294
图 29.2	0.2 × 熔凝石英聚光镜	294
图 29.3	派热克斯玻璃聚光镜	295
图 29.4	为 10 × 投影物镜设计的聚光镜系统	296
图 29.5	氙弧灯反射镜	298
图 30.1	焦距 5in、 $f/4$ 航空摄影物镜	302
图 30.2	焦距 12in、 $f/4$ 航空摄影物镜	303
图 30.3	焦距 18in、 $f/3$ 航空摄影物镜	305
图 30.4	焦距 24in、 $f/6$ 航空摄影物镜	306
图 31.1	焦距 25mm、 $f/2.8$ 耐辐射物镜	309
图 32.1	24 × 微型投影物镜	312
图 35.1	10 × 机械补偿变焦物镜	321
图 35.2	变焦显微镜的无焦系统	325
图 35.3	红外卡塞格林变焦物镜	328
图 35.4	变焦步枪瞄准镜	331
图 35.5	体视显微镜	334
图 35.6	变焦显微镜	338
图 35.7	变焦范围 20 ~ 110mm 物镜	342

图 35.8	三个移动透镜组、变焦范围 25 ~ 125mm 的变焦物镜	345
图 35.9	单透镜反射式照相机变焦物镜	348
图 35.10	变焦范围 12 ~ 234mm 电视变焦物镜	351
图 35.11	变焦范围 40 ~ 20mm 变焦目镜	354
图 35.12	变焦范围 40 ~ 20mm 变焦潜望镜	357
图 36.1	变焦范围 100 ~ 200mm 光学补偿变焦物镜	362
图 36.2	变焦范围 72 ~ 145mm 单透镜反射式照相机光学补偿变焦物镜	366
图 36.3	6.25 ~ 12.5 × 光学补偿投影物镜	369
图 37.1	静电复印机变焦物镜	373
图 37.2	复制物镜	377
图 38.1	单透镜反射式照相机放映物镜	379
图 38.2	可变焦距电影放映物镜	382
图 39.3	焦距 3.0in、 $f/1.8$ 梯度折射率放映物镜	387
图 39.4	轴向梯度折射率激光聚焦物镜	389
图 39.5	焦距 50in 径向梯度折射率物镜	390
图 39.6	SELFOC 物镜	392
图 39.7	使用 Corning-GRIN (梯度折射率材料) 的激光聚焦物镜	393
图 40.2	稳态物镜系统	396
图 41.1	正常人眼系统	400
图 42.2	费里棱镜	404
图 42.3	利特罗棱镜	404
图 42.5	利特罗衍射光栅	406
图 43.1	消色差单透镜	409
图 43.2	混合夜视物镜	411