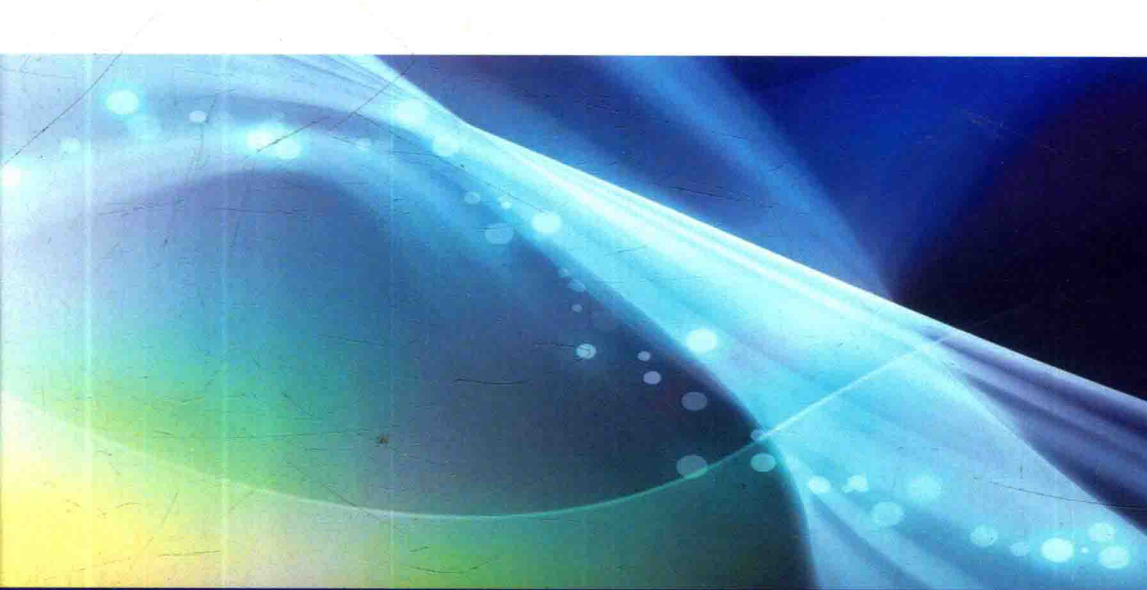


“十二五”国家重点图书出版规划项目

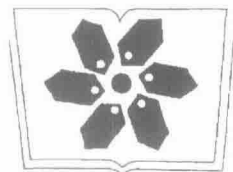
光学与光子学丛书

近代光学系统设计概论

宋菲君 陈 笑 刘 畅 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

光学与光子学丛书

近代光学系统设计概论

宋菲君 陈笑 刘畅 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据作者和美国光学设计师流行的设计方法,以“简练、实用,凡是计算机能做的尽量交给计算机做”的理念,介绍准直镜、柯克、天塞、双高斯、远摄、反远摄、远心、投影、变焦、广角、显微、红外等各类光学成像系统的设计方法和流程,讨论物理模型的建立、部件选型、高效评价函数的设置,并给出大量的设计实例和 ZEMAX 设计程序。教学和实践证明,只要认真研读本书有关章节,参考书中的实例,根据合理的技术指标,遵循规范的流程,系统总是沿着最速下降路径平稳快速收敛、自动更换玻璃,能得到性能符合要求、结构紧凑、成本合理的设计结果。

本书可作为光电信息和其他相关专业的研究生的教材或教学参考书,也可供科研工作者和工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

近代光学系统设计概论/宋菲君,陈笑,刘畅著. —北京:科学出版社,2019.6
(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-061225-0

I. ①近… II. ①宋…②陈…③刘… III. ①光学系统-系统设计-概论
IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 092499 号

责任编辑:刘凤娟 孔晓慧 / 责任校对:彭珍珍

责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本:720×1000 B5

2019年6月第一次印刷 印张:60 插页:1

字数:1 176 000

定价:299.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈家璧 高志山 贺安之 姜会林 李淳飞

廖宁放 刘 旭 刘智深 陆 卫 吕乃光

吕志伟 梅 霆 倪国强 饶瑞中 宋菲君

苏显渝 孙雨南 魏志义 相里斌 徐 雷

宣 丽 杨怀江 杨坤涛 郁道银 袁小聪

张存林 张书练 张卫平 张雨东 赵建林

赵 卫 朱晓农

序 一

近代光学工程是物理学的一个重要分支，进入“光子学”时代，世界各国的科学家和光学工程师仍然在设计各类光学系统，以满足各领域不同的应用需求，从巨型拼镜面天文望远镜、超高精度光刻机物镜，到日常生活使用的显微镜、望远镜、照相机；性能优越、成本合理的光学系统是准确获取目标信息的基本保障。近年来，光学成像和变换系统进入更加细分的应用领域，特点更鲜明，要求更特殊，更具个性。同时，光学设计也是我国光信息科学与工程、测控仪器等专业的重要课程。

宋菲君于 1966 年以优秀的成绩毕业于北京大学物理系，他曾长期在企业界工作。在担任大恒新纪元科技股份有限公司副总裁兼总工程师期间，他继续从事物理学的科研工作，承担光学工程设计项目。正如美国国际光学工程学会（SPIE）授予宋菲君 Fellow 的公告中所述：“宋菲君在光学信息处理和光学工程领域获得突出的成就，他的特点在于同时在光学研究界和产业界作出了贡献。”特别是他曾为欧美客户设计过大量光学系统，大部分投产运用。该书正是宋菲君研究员多年设计工作的总结，是宋菲君和美国专家共同策划、参考美国的专著和大学的教程写成的。该书的特点在于以物理学的概念、理论和方法创建物理模型，基于信息论的 etendue 分析建立 $F-\omega$ 空间，流畅地设计各类光学系统。

该书内容非常丰富，涵盖了各类经典和近代的成像系统的设计方法，同时给出大量国外先进的设计实例。设计流程简练、实用，凡是计算机能做的工作尽量交给计算机做，使得光学设计变得容易学、容易做。该书的部分章节也曾多次作为大学光学设计课程和 ZEMAX 设计软件培训短课程的教材。研究生和各界读者认真阅读该书，做完练习，就可以学会基本光学系统的设计方法，为进一步的研究和工程设计打下基础。

我曾和宋菲君研究员长期合作，很高兴为他的书作序。

中国科学院院士 杨国桢
2018 年 7 月于北京

序 二

光学从来没有像现在这样与社会休戚相关。如果没有通信的主干网，没有显示屏，没有摄像模组，现代的手机还是手机吗？当今社会的互联网，照明的灯具，太阳能电池，日常生活中的电视机、传真机、复印机、相机，智慧城市的监控，甚至就连超市中收银台的扫码仪，都离不开光或基于光的技术与产品。光学技术与光学产品不知不觉之中已经是我们日常生活中不可或缺的，更不用说在信息技术产业、集成电路芯片制备、自动化生产线中。人类在认识自然、探索太空中更是离不开光学与光学技术。正是因为如此，我们认为，光与基于光的技术是现代社会的使能技术，推动着人类文明的进步。

近年来，光学设计已经不属于科研范畴，而是广泛应用的设计工具。作为工具最重要的属性是实用。该书正是论述这些在日常与社会中广泛应用的光学系统的设计方法与技术的教材。该书作者根据自己长期领导我国顶尖光学企业的经验，特别是进入信息社会之后，光学产品与社会需求的变化，对光学成像以及各种光束调控产品提出了更高的要求，传统复杂的光学系统得到更为丰富的技术与器件的支持而变得普及，产品的大批量生产使技术更加细分等状况，重新构建了这本现代光学系统，特别是成像系统的设计教材。该书设计流程规范、简练、实用。该书的特色是容易学、容易上手，不仅适用于光学专业的学生，还适用于其他专业的学生和科研人员。读者认真研读该书，做完练习，就可以学会基本光学系统的设计方法，为进一步的研究和工程设计打下基础。

我于 20 世纪 90 年代初认识宋菲君老师，拜读过宋老师的《近代光学信息处理》一书。当时宋老师还在中国科学院，刚从国外进修回来，是我国知名的光学信息处理领域的专家。进入大恒新纪元科技股份有限公司后，宋老师在企业工作很忙，但他一直是以学者的形象活跃在国内外的光学舞台，继续从事物理学的科研工作，承担光学工程设计项目，参加学术会议，是我国著名的学者型企业家。近年来，会光学设计的人越来越少，社会急需大量懂光学系统的人。为此，宋老师比较心急，多次与我谈起如何加强培养光学系统设计人才的事宜，并亲自为大学生开设光学设计课程。该书的部分章节就曾多次作为大学光学设计课程和 ZEMAX 设计软件培训短课程的教材。

该书积蓄了宋老师多年从事光学技术与产业发展的经验，内容非常丰富，涵盖了各类经典和近代的成像系统的设计方法，给出大量国际先进的设计实例；设计流程规范、简练、实用，同时结合光学系统设计程序，使得光学设计变得容易学、

容易做。该书是近年来国内外比较少见的一本系统性的光学成像与光学系统设计教材,认真研读该书,多做设计练习,就可以学会基本光学系统的设计方法,为进一步的研究和工程设计打下基础。因此,该书是一部本科生与研究生以及光学从业者获得光学设计知识的绝好教材。

浙江大学光电科学与工程学院



2018年7月于杭州

前 言

近代光学系统包括光学工程、电子工程和软件工程三大子系统，是光、机、电和计算机硬件、软件的复合系统，涵盖了待测目标信息的激活、提取、传输、探测、处理、显示和反馈的全过程，光学成像是这个信息处理链中的一个重要的不可或缺的环节。世界各国的光学工程师和科学家一直在设计各类光学系统，以满足不同的应用需求。大学和研究所实验室的光学平台上，搭建着各种光学系统，进行各领域的科研工作。性能优越、成本合理的镜头则是构建光学仪器、光电系统的基本单元，是准确获取目标信息的基本保障。进入“光子学”时代，光学成像和变换系统进入更加细分的应用领域，特点更鲜明，要求更特殊，更具个性。同时，光学设计也是我国光信息科学与工程、测控仪器等专业的重要课程。

传统的光学系统设计，是从理想光学公式出发得出系统初始结构，再以“三级像差”（即初级像差）理论为基础，“由像差决定光学结构系统”，也就是由初级像差确定结构参数，例如 $P-W$ 方法，再通过预先的估算和多次光线追迹（ray tracing），对高级像差进行补偿，这是一个“矫揉造作”的困难设计过程。由于像差方程没有解析解，且高级像差复杂和不可预知，任何一个系统的设计，特别是像差的优化平衡，都颇费时日，也很难达到高性能。

我于 1966 年从北京大学物理系毕业之后几十年的业务生涯中，曾三次担任显微镜的主任设计师，主持设计多款物理光学仪器系统，特别是担任大恒新纪元科技股份有限公司副总裁兼总工程师期间，与美国和欧洲的许多客户及光学设计师交流，设计过多种光学系统和部件，大部分投产出口，应用领域非常广泛，涵盖了光通信、光学测量、监控、投影显示、激光测距、激光加工、3D 打印和医疗仪器等多个领域。

三年前，美国 SMA Optical Technologies 公司的 CEO Stephen Arnold 先生建议我给研究生讲授光学设计课程，并写一册《近代光学系统设计概论》。他协助我策划了课程和专著的理念、风格与内容，并向我详细介绍了美国的光学设计课程，寄给我在美国最流行的三种光学设计专著。

Stephen 是经验丰富、水平很高的光学设计专家。对于光学设计课程和著作，我们共同的理念就是简练、实用，凡是计算机能做的尽量交给计算机做。对于一些简单的物镜，恰当设置评价函数（即 merit function，或优化函数），选择典型的初始结构后，可以经优化直接得到满意的结果。对于由多个组件构成的较复杂的系统，则根据技术指标和要求，首先建立理想光学模型，对各组件选型，或从数据库

中找到透镜实例作为初始结构,设置评价函数后进入像差平衡和全局优化。设计师的任务,在于建立物理模型、选型、设置高效的评价函数。只要技术指标合理,遵循规范流程,系统总是沿着最速下降路径平稳快速收敛,自动更换玻璃,一般都能得到性能符合要求、结构紧凑、成本合理的设计结果。Stephen 建议课程要高度互动,让学生在课堂上就学会各种典型系统的设计方法和流程,而不必过多讲授诸如三级像差等传统理论。

基于这样的理念,我先后为北京信息科技大学的二年级本科生,以及中国科学院大学、中央民族大学、北京工业大学的研究生讲授光学设计课程(48~64学时,含课程设计),并为中国科学院光电研究院和国防科技大学开设光学设计短课程(15课时)。讲课时间和课堂设计实践时间大体为1:1,均获得很好的效果,听课的学生和教师对教学效果非常赞许,相当部分学生毕业后从事与光学相关领域的研发设计工作。

本书除了讲授设计方法和流程,还提供了大量典型的设计实例,这些设计的主要来源如下:

- (1) 本人为国外客户做的设计,以及客户提供的设计。
- (2) 美国和日本的设计专利。
- (3) Warren J. Smith 的著作 *Modern Lens Design* (McGraw Hill) 的设计实例(用 [WS- N] 的形式表示, N 为该书页码)。
- (4) Stephen 提供的设计实例。

绝大部分实例都历经较大幅度的修改,大部分系统的玻璃更换为成都光明光电股份有限公司(CDGM)的玻璃。

本书第1章阐述透镜设计理念和方法的演变,介绍近代光学设计流程。虑及部分本科生和研究生没有学过应用光学,第2章讲述应用光学最基本的内容,使本书成为完整的教程。第3章讨论成像质量评价,比较空域评价(弥散斑、特性曲线)和频域评价(传递函数),介绍表征光学信息和能量传递性能的 etendue(空间带宽积)分析。从第4章起,详细介绍各类典型物镜的设计方法,给出较多的设计实例,讨论如何根据 etendue 分析,在 F (光圈数)- ω (角视场)空间中选择初始结构,以及如何进行优化和像质评价。读者认真研读本书,做完练习,就可以学会基本光学系统的设计方法,为进一步的研究和工程设计打下基础。

本书第二作者陈笑承担教学任务,为几届本科生和研究生讲授光学设计课程,并负责全书的统稿;第三作者刘畅负责整理全书的程序及图表,编写各章附录,以及封底二维码内的全部程序和资料;科学出版社刘凤娟担任本书的责任编辑,对本书的写作规范、风格提出重要的建议,恰当、高效地掌控了写作、编辑、排版的协同进度。我想借此机会,感谢她们作出的重要贡献!和她们合作写成此书,也是一段珍贵的缘分。

我在学术界和企业界的朋友及研究生参加了本书的编写，在此一并表示感谢。考虑到部分读者和学生未必了解光学材料和加工过程，专门聘请成都光明光电股份有限公司孙伟和李小春编写了附录 A“光学玻璃”；请中国科学院光电技术研究所徐丽和成都炬科光学科技有限公司黄立新、郭强编写了附录 B“光学加工和在线测量”；请王茹编写了附录 C“光学镀膜”；请中国科学院光电技术研究所杨文志编写了附录 D“光学元件的测量”；请中国航空工业集团北京长城计量测试技术研究所段小艳编写了附录 E“反射棱镜”。

近年来，超分辨成像和红外光学发展很快，请中国科学院半导体研究所胡诗铭、俞育德编写了 21.16 节，简单介绍“突破光学衍射极限的超分辨成像技术”；请中国电子科技集团第十一研究所曾庆泰撰写了 25.6 节“红外接收器件”。

由于设计激光系统的广泛需求，请中国科学院光电研究院唐熊忻和郭广妍编写了 23.2 节“激光定倍及连续变倍扩束镜”，请王延伟编写了 23.4 节“用非序列模式生成多高斯激光匀光线光源”；请中央民族大学理学院禚颖仪编写了 23.5 节“利用异形棱镜对激光束整形”；请陈巧编写了附录 F“光栅、DMD 和微透镜阵列”。

北京信息科技大学牛春辉、李晓英，北京工业大学戎路曾担任我的助教，协助我完成了教学任务；中国科学院长春光学精密机械与物理研究所张新研究员、上海大学王朔中教授和大恒新纪元科技股份有限公司马为高级工程师提供重要资料，在此表示感谢！

感谢中国科学院物理研究所聂玉昕研究员和半导体研究所俞育德研究员对本书的大力推荐。

中国科学院物理研究所杨国桢院士，浙江大学刘旭教授为本书写序，在此深表谢忱！

宋菲君

2018 年 5 月 4 日写于北京

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光学成像系统的最新进展	1
1.2 光学玻璃的进展	5
1.3 新一代光学设计软件的开发	7
1.4 近代光学设计的特点	8
1.4.1 传统光学设计	8
1.4.2 近代光学设计理念和设计流程	8
1.4.3 小视场物镜的直接设计	8
1.4.4 etendue 分析和光学系统的 F - ω 空间	9
1.4.5 复杂系统设计	10
1.5 像质评价指标和评价函数	11
1.5.1 像差	11
1.5.2 评价函数	12
1.6 本章小结	13
第 2 章 应用光学基础	14
2.1 引言	14
2.1.1 光学设计和应用光学	14
2.1.2 成像系统的一般模型	14
2.1.3 符号规则	15
2.1.4 理想光学	15
2.2 薄透镜成像、光焦度和偏角公式	17
2.2.1 光线经过薄透镜的折射	17
2.2.2 光焦度与偏角	17
2.2.3 分离薄透镜的偏角公式	19
2.2.4 分离薄透镜设计	20
2.3 光波的波段和材料	21
2.4 光学系统图、视场和孔径	22
2.4.1 光学系统图	22
2.4.2 视场	23
2.4.3 孔径	23

2.4.4	归一化	25
2.5	放大率	25
2.5.1	横向放大率和纵向放大率	25
2.5.2	角放大率	26
2.6	焦深	27
2.6.1	离焦	27
2.6.2	衍射极限成像系统的焦深	28
2.6.3	物方焦深和像方焦深	29
2.7	光学系统的基面和基点	29
2.7.1	主平面、焦平面和节平面	29
2.7.2	透镜	30
2.7.3	透镜的基点和基面	31
2.8	光阑、光瞳和渐晕	32
2.8.1	光阑和光瞳	32
2.8.2	光阑的直径和弥散	32
2.8.3	光阑的位置和渐晕	33
2.9	光度学基础: 成像系统像面的照度	35
2.9.1	辐射通量和光通量	35
2.9.2	发光强度和亮度	36
2.9.3	余弦发射体	36
2.9.4	光学系统像的轴上点的亮度和照度	37
2.9.5	光学系统轴外像点的照度	38
2.9.6	相对照度的余弦四次方定律与软件计算结果的比对	41
2.9.7	倾斜安置监控物镜的照度估算实例	42
2.10	光通量传递的 etendue 分析	43
2.11	本章小结	44
第 3 章	成像信息的传递和像质评价	45
3.1	引言	45
3.2	衍射极限系统和近衍射极限系统	45
3.2.1	衍射极限系统	45
3.2.2	近衍射极限系统	46
3.3	光线追迹	47
3.3.1	主光线和点扩散函数	47
3.3.2	上光线、下光线和“大光线”	48
3.4	球差和纵向色差	48

3.4.1	球差	48
3.4.2	纵向色差	50
3.5	轴外像差	51
3.5.1	彗差	52
3.5.2	场曲和像散	52
3.5.3	畸变	56
3.5.4	横向色差	56
3.6	特性曲线和弥散斑图 (点列图)	57
3.6.1	光线的扇形分布和特性曲线	57
3.6.2	弥散斑图	59
3.7	光学传递函数	59
3.7.1	声音频率和图像频率	59
3.7.2	衍射极限系统的光学传递函数	61
3.7.3	用光学传递函数来评价像质	62
3.8	高斯型弥散斑的传递函数、半峰全宽和分辨率	63
3.8.1	贝塞尔函数的积分公式	63
3.8.2	弥散斑的 RMS 半径	63
3.8.3	弥散斑的半峰全宽和分辨率	64
3.8.4	MTF 的解析表达式	65
3.8.5	$1/e^2$ 带宽	65
3.8.6	等效带宽	66
3.9	像素探测器阵列 CCD、CMOS 和器件截止频率	68
3.10	光学信号的 etendue 分析	69
3.10.1	空间带宽积和一维 etendue 分析	69
3.10.2	探测器和光学系统的 etendue 匹配	70
3.10.3	光学系统的 etendue 指标	71
3.11	本章小结	71
	参考文献	71
第 4 章	双胶合和双分离消色差物镜	72
4.1	双胶合消色差物镜	72
4.1.1	双胶合消色差物镜简介	72
4.1.2	球差和纵向色差	73
4.1.3	弥散斑和轴外像差	74
4.2	双胶合消色差物镜的信息量和定义区间	75
4.3	初级球差和高级球差	76

4.4	双胶合消色差物镜设计方法	77
4.4.1	流行的设计方法	77
4.4.2	设计指标四要素：“适用波段、相对孔径、视场和焦距”	77
4.4.3	双胶合物镜对像差的校正	77
4.4.4	焦距缩放	78
4.4.5	设计实例	78
4.5	评价函数的“SPHERICAL”(球差校正)模块和“ACHROMATIC”(色差校正)模块	80
4.5.1	焦距 EFL	80
4.5.2	“ACHROMATIC”(色差校正)模块	80
4.5.3	“SPHERICAL”(球差校正)模块	82
4.5.4	评价函数第2节“默认评价函数”(default merit function)的弥散斑校正设置	83
4.6	有限共轭距双胶合成像系统设计	83
4.6.1	有限共轭距时关于“孔径”的几个定义	83
4.6.2	有限共轭距双胶合消色差准直镜设计方法	84
4.7	双分离消色差物镜设计	84
4.7.1	双胶合消色差物镜的设计极限	84
4.7.2	双分离消色差物镜设计方法	85
4.8	带棱镜(平板)的双胶合消色差物镜	86
4.8.1	棱镜(平板)的加入	86
4.8.2	HAMMER 优化和更换玻璃	87
4.8.3	将平板改为 45° 反射棱镜	88
4.9	本章小结	89
附录 4.1	技术指标、像差曲线和结构参数	90
附录 4.2	[DB-2]-SPLIT 技术指标、像差曲线和结构参数	96
附录 4.3	[DB-5]-PRISM 技术指标、像差曲线和结构参数	97
附录 4.4	评价函数 ACHROMATIC-3	98
第 5 章	三片及四片式消色差准直镜/望远物镜	99
5.1	引言	99
5.2	光焦度与偏角	99
5.3	“双胶合 + 单片”物镜与双胶合透镜性能比对	100
5.4	三片及四片式物镜典型设计	101
5.4.1	“2+1”型三片式物镜	101
5.4.2	“1+2”型三片式物镜	102

5.4.3	三胶合和四胶合物镜	103
5.4.4	三分离和四分离物镜	104
5.5	长入瞳距物镜	105
5.6	“双胶合 + 单片”(“2+1”)物镜设计 (I)	107
5.6.1	前后组参数计算	107
5.6.2	设计流程	107
5.7	“双胶合 + 单片”(“2+1”)物镜设计 (II)	109
5.8	分光棱镜的插入操作	110
5.9	带有棱镜的望远系统设计	112
5.9.1	低倍开普勒望远镜	112
5.9.2	低倍开普勒望远镜设计方法	112
5.10	本章小结	114
附录 5.1	技术指标、像差曲线和结构参数	115
附录 5.2	评价函数	134
第 6 章	二级光谱和复消色差航摄望远物镜	135
6.1	长焦距双胶合消色差准直镜的二级光谱	135
6.2	二级光谱的波像差	136
6.3	光学玻璃的色散特性和阿贝公式	137
6.3.1	光学玻璃所用的特征谱线	137
6.3.2	中部色散和相对部分色散	137
6.3.3	阿贝公式和反常材料	138
6.4	双胶合复消色差准直镜设计	140
6.5	光学设计的极限	142
附录 6	技术指标、像差曲线和结构参数	143
第 7 章	柯克物镜	152
7.1	有限共轭距成像系统	152
7.2	典型的柯克物镜	153
7.2.1	典型的柯克物镜 [CK-A]、[CK-B]	153
7.2.2	柯克物镜的佩茨瓦尔半径	156
7.3	柯克物镜的定义域和 $F-\omega$ 空间	156
7.3.1	柯克物镜的参考设计	156
7.3.2	柯克物镜的平场特性分析	156
7.3.3	柯克物镜的定义域和 etendue 分析	157
7.4	柯克物镜设计	158
7.4.1	无限共轭距柯克物镜设计	158

7.4.2	有限共轭距柯克物镜设计	161
7.4.3	探测器和传递函数	163
7.5	玻璃的选配和演变	163
7.6	近紫外-深红超宽带柯克物镜	165
7.7	柯克物镜的评价函数“FIXED-3A-SIMPLE”	166
7.7.1	角视场模块	166
7.7.2	放大率和焦距模块	167
7.7.3	共轭距、物镜长度、物距、像距和畸变模块	167
7.7.4	中心和边缘厚度边界条件模块	167
7.7.5	“默认评价函数”设置	168
7.7.6	设置评价函数的要点	169
7.8	光阑像差和光线对准操作	169
7.9	本章小结	170
附录 7.1	技术指标、像差曲线和结构参数	171
附录 7.2	评价函数“FIXED-3A-SIMPLE”	187
第 8 章	天塞物镜及其变形	188
8.1	引言	188
8.2	典型的天塞物镜	188
8.3	天塞物镜的 $F-\omega$ 空间	189
8.4	拦光操作	190
8.5	变形天塞物镜	191
8.6	海利亚物镜	193
8.7	本章小结	194
附录 8.1	天塞及其变形物镜技术指标、像差曲线和结构参数	195
附录 8.2	评价函数 TESSA	212
第 9 章	双高斯物镜及其变形	213
9.1	引言	213
9.2	单反相机物镜	214
9.3	拦光和斜光束渐晕	215
9.4	换玻璃操作	216
9.5	双高斯物镜的典型设计	217
9.6	双高斯物镜的 $F-\omega$ 空间	221
9.7	双高斯扫描仪物镜	222
9.8	双高斯照相机物镜设计	223
9.9	本章小结	225

附录 9.1	技术指标、像差曲线和结构参数	226
附录 9.2	FIXED-3A-SIMPLE 优化函数	244
第 10 章	有限共轭距近对称成像物镜	245
10.1	引言	245
10.2	有限共轭距成像的理想光学基本公式	245
10.2.1	共轭距 L 、横向放大率 β 和焦距 f'	245
10.2.2	物高 y 、像高 y' 和孔径角	245
10.2.3	偏角公式和光圈数 F	246
10.3	全对称成像	246
10.3.1	全对称 $-1\times$ 双高斯型物镜典型设计	246
10.3.2	全对称 $-1\times$ 三片式和四片式物镜典型设计	248
10.3.3	非对称 $-1\times$ 双高斯型物镜典型设计	249
10.4	近对称成像	249
10.4.1	全对称 $-0.75\times$ 物镜 [LM-7]	249
10.4.2	全对称 $-0.82\times$ 物镜 [LM-8]	250
10.5	$-0.5\times$ 成像	251
10.5.1	小视场 $-0.5\times$ 物镜 [LM-9]	251
10.5.2	中等视场 $-0.5\times$ 物镜 [LM-10]	251
10.5.3	小视场高分辨率 $-0.5\times$ 物镜 [LM-11]	252
10.6	“等 etendue 过渡”有限共轭距物镜设计	253
10.6.1	物镜设计指标	253
10.6.2	“等 etendue 过渡”	254
10.6.3	设计实例 1	254
10.6.4	设计实例 2	255
10.7	本章小结	255
	参考文献	256
附录 10.1	技术指标、像差曲线和结构参数	257
附录 10.2	评价函数	270
第 11 章	远摄物镜	271
11.1	引言	271
11.2	典型的远摄物镜	272
11.3	单反相机 180mm 物镜	276
11.4	远摄物镜的理想光学模型	277
11.4.1	系统构成和归一化坐标	277
11.4.2	偏角公式的修正及“有限共轭距等效 F 数”	277