

大连理工大学教授学术丛书

光学工程导论

*Introduction to Optical
Engineering*

胡家升 著



DUTP

大连理工大学教授学术丛书

光学工程导论

胡家升 著

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光学工程导论/胡家升著. —大连:大连理工大学出版社,2002.8
大连理工大学教授学术丛书
ISBN 7-5611-2128-8

I. 光… II. 胡… III. 光电技术 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 057261 号

大连理工大学出版社出版发行

大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4701466

E-mail:dutp@mail.dlptt.ln.cn

URL:http://www.dutp.com.cn

大连海事大学印刷厂印刷

开本:850毫米×1168毫米 1/32 字数:712千字 印张:27.75 插页:4
印数:1—3000册

2002年8月第1版

2002年8月第1次印刷

责任编辑:王佳玉 李 鸽 刘新锋 责任校对:郑淑芹 木 土
封面设计:孙宝福

定价:50.00元

**The Professors Academic Works Series
of the Dalian University of Technology**

Introduction to Optical Engineering

Hu Jia-sheng

Dalian University of Technology Press

本书由

大 连 市 人 民 政 府
大连理工大学学术著作出版基金

资助出版

The published book is sponsored by

**The Dalian Municipal Government
and**

**The Publishing Academic Works
Foundation of the Dalian Univer-
sity of Technology**

序

光学和光学工程是一门古老的学科,它的历史几乎和人类的文明同步。人们从远古时代就知道把光作为能源和传递信息的工具而加以利用了,我国几千年前的烽火台就是利用光来传递信息的典型范例。在人的五官中,眼睛一直是了解和认识客观世界的最直接的感官。人们所能获取的信息量的70%来自于视觉,因此光学和光学工程的出现和发展早于电子学、声学等学科就是当然的事了。直到最近20世纪下半叶,电子学获得蓬勃发展,并取得一系列突破性的成就。相比之下,传统的光学和光学工程的发展速度就显得滞缓了。

然而60年代,由于激光的出现和发展,光学和电子学的密切结合以及工艺水平的提高,再加上70年代光纤和固体成像器件的实用化,80年代以光盘为代表的光存储的进展,使得光学工程发生了革命性的变化,科学上有了突破性的进展,随之而来的是应用领域的迅速扩展。先后形成了诸如光通讯、激光加工、文化光学(如光盘、数码相机、电子信息投影仪)等产业部门。与此同时,还形成了空间光学,遥感遥测,X射线光学,全光通讯和集成等新的学科增长点和高新技术领域。如果说20世纪人类社会处在电子时代,那么人类迈入21世纪的同时,也进入光子或光电子时代。

光学工程的不断发展,应用领域的不断扩大,要求光学工程方面书籍的内容也要不断地更新,反映出光学工程发展的

新成就。

胡家升教授撰写的这本“光学工程导论”专著就是在这种情况下出版的。该书较详细地论述了各有关领域的基本原理和某些领域的最新进展,是一本既兼顾系统理论又具有丰富实践的专著。

本书作者有 40 余年的科研经历,承担过数十项国家级课题的研究,很多内容涉及光学工程的最新进展,如靶场光学、合成孔径雷达光学、遥感立体成像技术、三维轮廓测量、掠入射 X 射线成像系统、编码孔径成像显微镜等。本书是作者积累了丰富理论基础和实践经验而形成的大作,是对现代光学与光学工程有意义的贡献。

本书特色是具有很多第一手的新鲜资料,如解决光学工程实际问题的方法,论述各种光学和光电设备的设计,包括参数选择,结构优化,设计程序和质量评价等。为解决工程中的实际问题提供了依据。因此,本书具有很好的学术价值和应用价值,是从事光学与光电工程、光学仪器、光电测控技术等科技人员和大专院校有关师生的很好的一本参考书。

王大珩(签字)

中国科学院院士

中国工程院院士

2002 年 7 月 25 日

前 言

早就想写一本关于光学工程方面的书,把自己在研究机构从事近 40 年的科研经历和经验总结出来,供同类专业的人员借鉴与参考,但由于终日疲于奔命而无暇顾及。1995 年进入大连理工大学从事教学与科研工作。在教授研究生课程过程中深感有一本参考书的必要,于是在教书期间便断断续续地写起来。我满以为凭借几十年的知识积累,利用已经写好的数百篇研究报告、工作总结和国内外发表的论文,只要略加贯穿便可成书。可事实远非这么简单。书和论文不同,一篇论文只要把一个问题论述清楚即可,而一本书则不然,后者除了要求系统性、连贯性、完整性,所写内容要前后联系、融会贯通、由浅及深之外,还要有创新,有作者创造性的研究成果。既然决定写了,就得坚持写下去,前后用了我五年多的时间,三易其稿,才写成现在这个样子,还不知是否被师长和同行们认可。

全书共 19 章,主要由三部分组成。第一部分论述以几何光学为主体的工程光学基础,为光学系统设计,光学和光电设备的总体设计奠定知识基础。这部分属经典光学,不会有什么创新。第二部分主要论述像差理论(侧重于初级像差)和成像质量评价,包括各种像差的物理意义,初级像差与光学系统结构的关系,系统质量的评价方法等。这部分侧重于物理意义,

而不是繁琐的数学推演。第三部分论述光学和光电设备的总体设计,这是本书的主体,占据了本书的主要篇幅。这部分论及的很多设备是作者主持或参与研制的,有相当一部分是现代光学工程中的前沿。

在科学技术发展的今天,特别是计算机技术的迅速发展,把光学仪器设计者从繁重的光学计算中解脱出来,同时也使得传统的光学设计观点和方法发生了很大变化。现在已经很少有人用像差理论来求解光学系统的初始结构以便减少光学计算量了,因为在计算机发展的今天,光学计算已经不是光学设计者的主要负担了。在这种情况下,我适当地减少了用以论述像差理论的篇幅,把更多的篇幅留给了光学和光电仪器设计。因此,作者只用了三章多一点的篇幅论述了像差的基本概念和初级像差理论,以便指导光学系统和仪器的设计。

本书的第一部分(工程光学基础)主要包括几何光学基础(第一章),近轴光学(第二章),光学系统中的反射镜和棱镜(第三章),孔径光阑和视场光阑(第四章),光线追迹和像差计算(第五章),辐射与光度(第六章),光学材料与镀膜基础(第七章),基本光学系统与装置(第八章),图像探测与接收(第九章)等。

第二部分内容包括几何像差计算(第五章的一部分),单色像差(第十章),色差(第十一章),初级像差的一般性质(第十二章),成像质量评价(第十三章)等。这部分内容所占比重不大,倒是成像质量评价占了较大的篇幅。

第三部分是本书的重点,几乎占全书一半的篇幅,其中很多内容是作者的研究成果。主要包括光学系统设计概论(第十四章),变焦距光学(第十五章),合成孔径雷达中的光学(第十六章),反射和折反射光学系统(第十七章),软 x 射线成像及处理技术(第十八章),激光应用中的光学系统(第十九章)等。

本书注重于基本概念和解决工程中遇到的实际问题,具有很强的实用性。该书是从从事光学和光电工程、仪器仪表、测量与控制等领域的科研人员、高等院校教师和工程技术人员一本有价值的参考书,对相关专业的大学、研究生也是一本很好的教学参考书,同时对从事信息科学与技术、遥感遥测、精密仪器设计等方面的人员也是很有参考价值的。

在光学工程导论一书出版之际,使我想起我的师长王大珩院士和薛鸣球院士,他们对我的多年教诲和指导是我能写成此书的根本原因,同时也使我终生难忘。在此向二位师长表示由衷地感谢。

全书经中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的资深研究员史光辉先生审阅,并提出一些宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书的成型要感谢与我多年共事的邹振书、高清峰、董玉芝、张宪英、于前洋、刘伯翔、黄廉卿、郝志航、李喜增、赵宝庆、白雨虹等同事,因为很多项目是我们共同完成的。没有他(她)们的辛勤劳动,本书是难以完成的。

本书是在我夫人顾乐频的鼓励和直接参与下写成的,我写稿,她打字、并编辑排版,几易其稿,全书共70余万字,书中的很多图表也是她画的,工作量之大可想而知。在此,对她的辛勤劳动表示衷心感谢。

由于本人知识水平所限,必有错误和不当之处,敬请师长、同行和热心的读者们指正。

胡家升

2002年7月于大连

目 录

序

前言

第一章 几何光学基础	1
1.1 光的本性及其描述—几何光学,波动光学,量子光学	1
1.2 光线和光的直线传播	5
1.3 光的折射和反射—Snell 定律	7
1.4 光路的可逆性和互不干扰性	11
1.5 光的全反射	12
1.6 费马原理	16
第二章 近轴光学	19
2.1 引言	19
2.2 子午面内的光线计算	20
2.3 光学系统的简化	32
2.4 近轴区域	34
2.5 光学系统的物像关系	37
2.6 近轴光线计算	43
2.7 厚透镜	49
2.8 薄透镜	53
2.9 透镜的组合	56
2.10 反射镜	58

2.11	拉格朗日不变量	62
2.12	近轴光学总结	65
第三章	反射镜和棱镜	69
3.1	引言	69
3.2	色散棱镜	70
3.3	小顶角的折射棱镜	75
3.4	消色差棱镜和直视棱镜	78
3.5	平面反射镜	80
3.6	双平面反射镜系统	84
3.7	平面平行板	86
3.8	棱镜的计算	88
3.9	直角棱镜	96
3.10	几种典型的棱镜	100
3.11	棱镜成像的正倒关系	109
3.12	棱镜及棱镜系统的应用	111
3.13	分束与合束器件	115
3.14	棱镜和反射镜系统的设计	117
第四章	孔径光阑和视场光阑	121
4.1	引言	121
4.2	孔径光阑,入射光瞳和出射光瞳	123
4.3	视场光阑,入射窗和出射窗	125
4.4	杂光和杂光的消除	126
4.5	渐晕	129
4.6	远心光路	131
4.7	孔径的衍射效应	134
4.8	光学系统的分辨率	138
4.9	光瞳函数对成像的影响	142
4.10	光学系统的焦深和景深	143

第五章 光线追迹与像差计算	148
5.1 引言	148
5.2 近轴光线计算	151
5.3 子午面内的光线计算	153
5.4 轴外邻主光线的细光束光线计算	158
5.5 空间光线计算	164
5.6 通过非球面的光线追迹	168
5.7 光学系统的像差	173
5.8 球差	175
5.9 慧差和正弦差(<i>OSC</i>)	179
5.10 像散和像面弯曲	183
5.11 畸变	187
5.12 轴向色差	189
5.13 倍率色差	192
5.14 光程差	194
5.15 透镜材料和形状对像差的影响	196
5.16 光阑位置变化对像差的影响	198
5.17 像差与孔径和视场的关系	200
5.18 像差校正和残余量	202
5.19 表面的三级像差	206
5.20 非球面的像差	213
5.21 薄透镜的三级像差	216
第六章 辐射与光度	223
6.1 引言	223
6.2 点源的辐射特性	223
6.3 扩展辐射源的辐射	227
6.4 光谱辐射计量	233
6.5 黑体辐射	235

6.6	光度学中的一些概念	239
6.7	像的光度计算	244
6.8	光学系统中的光能损失	249
6.9	照明装置与光能计算	252
第七章	光学材料与镀膜基础	259
7.1	光学材料的特性	259
7.2	透射用光学材料的特性	260
7.3	普通光学玻璃	267
7.4	有色光学玻璃	275
7.5	特殊光学玻璃	276
7.6	晶体材料	279
7.7	塑料光学材料	283
7.8	漫射材料	285
7.9	偏振材料	286
7.10	光学镀膜基础.....	288
7.11	单层减反膜.....	294
7.12	反射膜.....	297
7.13	干涉和吸收滤光片.....	298
第八章	基本光学系统与装置	302
8.1	眼睛	302
8.2	望远系统	319
8.3	显微镜系统	336
8.4	测距仪光学系统	356
8.5	摄录与投影光学系统	359
8.6	辐射计量装置	370
8.7	歪像光学系统	374
8.8	纤维光学	378

第九章 图像探测与记录	392
9.1 引言	392
9.2 摄影胶片	393
9.3 电荷耦合器件(CCD)	409
9.4 像增强器和变像管	426
第十章 单色像差	438
10.1 引言	438
10.2 球差	439
10.3 正弦条件,慧差	446
10.4 光学系统的畸变	451
10.5 像散和像面弯曲	456
10.6 单色像差表达式	463
10.7 棱镜和平板玻璃的像差	467
10.8 球面反射镜的初级像差	470
第十一章 色差	473
11.1 引言	473
11.2 由色散引起的光程差	475
11.3 消色差波段的选择	479
11.4 轴向色差	482
11.5 倍率色差	486
11.6 薄透镜系统的初级色差	490
11.7 二级光谱,高级色差	496
11.8 平板玻璃和棱镜的色差	449
11.9 消色差透镜的光焦度分配举例	501
第十二章 初级像差的一般性质	505
12.1 引言	505
12.2 几何像差与初级像差系数	506
12.3 初级像差系数随光阑位置的变化	509

12.4	光阑像差与物面像差之间的关系·····	513
12.5	物面移动时初级像差系数的变化·····	515
12.6	薄透镜系统的初级像差·····	517
12.7	双胶合透镜的 $\bar{p}^\infty, \bar{W}^\infty, \bar{C}_1$ 与结构参数的联系·····	525
12.8	单透镜的结构参数与 $\bar{p}^\infty, \bar{W}^\infty, \bar{C}_1$ 的关系·····	538
第十三章	像质评价·····	541
13.1	引言·····	541
13.2	波像差与几何像差·····	543
13.3	典型光学系统的像差公差·····	548
13.4	像差曲线·····	553
13.5	图像分辨率·····	555
13.6	点列图与能量集中度·····	559
13.7	像面优化·····	562
13.8	星点检验·····	565
13.9	光学传递函数·····	570
第十四章	光学系统设计概论·····	589
14.1	引言·····	589
14.2	单透镜设计·····	591
14.3	双胶合透镜设计·····	600
14.4	显微物镜设计·····	612
14.5	典型的目镜设计·····	627
14.6	摄影和投影物镜设计·····	642
第十五章	变焦距光学·····	671
15.1	引言·····	671
15.2	光学补偿法的变焦距光学·····	673
15.3	机械补偿变焦距系统的高斯光学·····	679
15.4	机械补偿变焦距系统设计·····	690

第十六章	合成孔径雷达中的光学	717
16.1	引言	717
16.2	微波合成孔径的形成及发展	719
16.3	合成孔径雷达的信息获取与存储	723
16.4	合成孔径雷达数据的光学处理技术	726
16.5	合成孔径雷达数据的光学处理器设计举例	738
16.6	合成孔径雷达数据的光电实时处理技术	743
16.7	光电实时处理中的几个问题的讨论	751
第十七章	反射和折反射成像光学	760
17.1	引言	760
17.2	单反射镜成像	762
17.3	双反射镜光学系统	770
17.4	折反射光学系统	774
17.5	折反射光学系统设计举例	780
第十八章	软 X 射线成像及处理技术	797
18.1	引言	797
18.2	掠入射 X 射线成像系统	800
18.3	正入射 X 射线成像系统	811
18.4	多针孔成像及处理技术	816
18.5	环形编码孔径显微镜	826
第十九章	激光应用中的光学系统	835
19.1	引言	835
19.2	激光光束的传输特性	835
19.3	透镜对激光束的聚焦特性	838
19.4	光束扩展器	842
19.5	傅里叶变换镜头	846
19.6	激光扫描技术与装置	850