

Mc
Graw
Hill

Education

Modern Optical Engineering

Fourth Edition

现代光学工程

(原著第四版)

[美] 沃伦 J. 史密斯 (Warren J. Smith) 著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校



化学工业出版社

Modern Optical Engineering

Fourth Edition

现代光学工程

(原著第四版)

[美] 沃伦 J. 史密斯 (Warren J. Smith) 著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校



化学工业出版社

· 北 京 ·

译者序

近几年，光学技术发展非常快，特别是现代光学技术与光电子技术的紧密结合，使光电子器件、光学系统和仪器发生了很大变化，应用于当代各种高科技领域（如航空航天技术、信息传输和通信技术、生化和材料技术等），设计了诸多新型光电子装置，创立了新的光学原理和方法，开辟了更多、更新的应用领域，其在国民经济中的作用显得愈加重要和不可缺少。

光学技术的快速发展有几个显著特征：在经典光学基础上创立了新的光学技术，最熟悉和实用的是二元光学（或衍射光学）和全息光学；在传统光学元件基础上创造出新的光学元件，最为典型的是非球面透镜、全息透镜（或衍射透镜）、二元光学元件和微光学阵列透镜；在一般光学研磨技术基础上发展和采用光学和计算全息加工、衍射光学元件和微光学元件加工以及精密模压成型等现代高新制造技术。

促使光学技术迅速发展的重要因素是：利用大容量、高运算速度的计算机及功能强大的光机设计软件可以设计出更为完善的光学系统、光机系统和光电子系统；工业领域不断研制出新的光学材料，使光学零件和光电子元件的选材不会局限于玻璃和光学晶体，光学塑料、光学乳胶、金属、陶瓷及半导体材料都得到了广泛应用。

光学技术的快速发展，使越来越多的科技人员从事光学及其相关专业，光学工程的研究领域也逐渐扩大，包括许多新的、无法预料的应用。随着对新型光学仪器可应用性的认识，人们会更迫切需要熟悉光学技术，尤其是现代光学工程方面的知识。由 SPIE 出版社和 McGraw-Hill 出版公司联合出版、Warren J. Smith 教授（美国）编写的《现代光学工程》（原著第四版）[Modern Optical Engineering (Fourth Edition)] 一书，就是献给特别需要光学系统与工程技术信息、从事实际工作的工程师和科学家的一本好书。正如该书“前言”所述：国际上普遍认为，《现代光学工程》是光学工程技术人员的“必备书”。

Warren J. Smith 先生毕业于罗彻斯特 (Rochester) 大学光学工程学院, 在光学领域有 60 多年的工作经验, 是世界上非常有声望的科学家。先后在田纳西州 (TN) Oakridge 的柯达 (Eastman Kodak) 公司、伊利诺伊州 (IL) 芝加哥市 Simpson 光学制造公司 (光学总工程师)、加州 (CA) Santa Barbara 市的 Raytheon 公司 (光学部经理)、Santa Barbara 红外公司 (研究和发展部主任) 和 Santa Barbara 应用光学研究开发部 (副总经理) 工作。Warren J. Smith 先生是美国光学协会 (OSA) 芝加哥分部的创始人和主席, 先后担任过南加州 (OSSC) 光学协会主席、美国光学协会主席、国际工程师协会 (SPIE) 美国协会主席, 是美国光学协会 (OSA)、SPIE 和南加州光学协会资深会员, 获得 SPIE 颁发的终身金奖。著有《现代光学工程——光学系统设计 (Modern optical engineering—The design of optical systems)》、《现代光学系统设计手册 (Modern lens design—A resource manual)》和《实用光学系统总体布局 (Practical optical systems layout)》等著作。Warren J. Smith 先生是一位资深教育家, 在威斯康星 (Wisconsin) 大学教授光学课程, 并为 SPIE、OSA 和世界各地的公司和政府机构传授光学知识。

《现代光学工程》一书内容丰富, 不仅有成熟的光学工程理论基础、计算公式和分析方法, 而且包括对光学工程问题的讨论和解决方案; 不仅考虑到光学技术问题, 而且还有经济成本的分析。与其他同类书籍相比, 该书全面考虑到设计、制造和测量技术, 首次介绍使用“库存”透镜, 从而“变废为宝”。既阐述了普通的球面透镜系统、棱镜系统、反射及折反系统, 同时又讨论了非球面和衍射系统。为使读者全面了解现代光学工程的含义, 书中还介绍了光学材料、光学镀膜、人眼特性和光度学技术。一经出版, 此书便受到国内外读者好评, 已连续出了四版。

阅读《现代光学工程》一书, 使人感觉到就像正在阅读一个光学工程师的工作札记, 通俗易懂, 提纲挈领, 方法扎实, 结果实用。该书的重点不在纯理论阐述和像差分析, 而是在工程应用上, 是 Smith 先生 60 年呕心沥血工作的总结, 其集中代表就是第 14 章对系统总体布局的经典案例分析、第 20 章对光学工程中存在的实际问题的分析以及第 21 章最有效地利用现有“库存”透镜。第 19 章给出了 62 种光学系统的设计实例, 不仅提供了常规的结构布局和像差曲线图, 还以列表形式给出系统的结构参数 [表面曲率半径、透镜厚度、空气间隔、光阑位置、透镜 (反射镜) 直径和光学材料], 尤其是对同一结构类型给出了不同的结构形式, 并分析不同形式的元件对光学性能的影响, 如何采用简单可行的测量方法评估“库存”透镜的性能, 怎样确定透镜和系统的公差范围, 这些都是光学工程人员迫切需要的。

在中文《现代光学工程》(原著第四版) 的出版过程中, 由于原书存在一

些参数新旧单位混用，若换算成国际法定计量单位则会对原书产生较大改动。为保持与原书的一致性，本中文版保留了原书的物理量单位。同时，对书中一些印刷错误进行了修订，并增加了“译者注”。为使读者更准确地理解和使用该书，保留了英文参考文献和专业术语一节中术语名称的英文形式。

周海宪翻译了第1~20章，程云芳翻译了第21章、附录和术语。在美国工作的周华君和程林先生对全书进行了认真校对，高级工程师王希军、张良、曾威和程云芳对该书做了专业校对和最终审核。

该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、北京理工大学王涌天教授和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室刘旭教授的极大支持，刘永祥、郭世勇、鲁保启、金朝瀚、翟文军等高级工程师，孙维国和刘凤玉研究员从不同方面给予了关注，在此表示衷心的感谢！

本书可供光电子学领域中从事光学仪器设计、光学系统和光机结构设计的设计师、光学零件制造工艺师和工程师阅读，也可以作为相关专业本科生、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的设计提供有益指导。

译者

前言

非常高兴《现代光学工程》一书第四次再版，许多读者都知道该书（“Modern Optical Engineering”）的缩写是 MOE。与第三版明显不同，该版进行了许多修订，内容经过重新组织，并额外增加了 6 章，因此，是一本内容更为丰富的书。新版《现代光学工程》有许多小的改动和增减，由于太多而无法在此一一列出。

新版《现代光学工程》共 21 章，两个附录和一个术语表。该书的第一版和第二版只有 14 章，第三版 15 章。近些年来，《现代光学工程》的内容越来越多，初始的第一版仅仅 476 页，第二版 524 页，第三版 617 页，而该版增加到 768 页（译者注：原英文版的页码）。早期版本对该领域的内容阐述得非常恰当，我希望该版本同样能够做到这一点。第一版前言是以下面一段话开始的：

将本书献给那些特别需要光学系统与设计方面比较实用技术信息、从事实际工作的工程师或科学家。最近，随着对光学装置在诸如对准、计量、自动控制 and 空间（国防）领域可应用性的认识提高，迫切需要熟悉光学知识的技术人员，随之，电子、机械、物理或数学方面的许多人才都找到了比较高级的、与光学工程有关的位置。作者希望该书能够使他们增强信心，有助于非常好地完成其所承担的光学任务。

近些年，从事光学技术的人员数量增加了许多倍，光学工程的研究领域也逐渐扩大了，包括许多新的、无法预料的应用，而上面引证的需求仍在继续。已经普遍认为，《现代光学工程》是一本“必备书”。希望该书新版同样是这种结果。

该书新版的明显变化是其组织编排有修改：旧版的第 2 章被分为 3 章，即高斯光学、近轴计算和光学元件组合；有关像差的内容更加丰富，增加了三级像差理论和计算一章；旧版中光线追迹的大部分内容放到附录 A 中描述。增

加了全新的一章：初级系统布局图研究，包括大量的、已经使用的设计例子，其中有变焦距物镜和红外制冷探测器系统的结构布局图。早期版本中阐述透镜设计的 2 章修改为 3 章（光学设计的基础知识，目镜、显微镜和照相物镜的设计，反射镜和折反式系统的设计）。旧版第 14 章中给出了“44 种透镜设计实例”，而新版扩充至“62 种”，对像差的描述不仅给出光线交点曲线图和纵向球差（表示出三种波长）、单色畸变和场曲，而且还给出纵向和横向色差（三种波长）。全书以相同的表示方式，替代旧版中对单色纵向球差和场曲的表示。在“光学工程中的实际问题”一章之后，增加了全新的一章：“库存”透镜的应用。现在，已经全部完成了旧版中各章之后的大量练习，而非简单地给出正确答案。有一个新的术语表，力图做成光学系统设计文献中最好、最完整、最权威和最准确的术语表。有两个新的附录：光线追迹和标准尺寸。将一个公差预估的演示实例增加到“光学工程中的实际问题”（第 20 章）中。在“人眼特性”一章，还包括一些有趣的“自己动手做”的目视实验。

按照我的观点，单个人或比较小规模的小组是不可能编写出光学工程和光学系统设计“整本书”的，任何一本书首先是阐述作者个人的经验（没有人会亲身去做每一件事），所以，借此机会强烈建议，凡对《现代光学工程》一书感兴趣，认为该书有使用价值的读者应当同时阅读 Kingslake 编著的“Optical System Design”（Academic, 1983）以及由 Fischer 和 Tadic 编著的“Optical System Design”（McGraw-Hill, 2000）之书，对其所研究的项目会有更全面的观察。

最后，我要对许多朋友和同事表示感谢，在 60 年的光学研究生涯中，让我分享了他们的许多知识，在他们的帮助下，每天我都会有所收获。特别要感谢位于 Carlsbad 市的 Rockwell Collins Optronics 公司中与我同办公室工作的 Jerry Carollo 和 Greg Newbold，以及为我提供光学设计程序 OSLO（每天都要使用）的 Lambda Research 公司的 Leo Gardner 先生。

祝大家一切都好！

Warren J. Smith

目录

第 1 章 光学基础知识	1
1.1 电磁光谱	1
1.2 光波的传播	2
1.3 Snell 折射定律	4
1.4 简单透镜和棱镜对波前的作用	6
1.5 干涉和衍射	8
1.6 光电效应	12
练习	13
参考文献	14
第 2 章 高斯光学：基点	15
2.1 概述	15
2.2 光学系统的基点	16
2.3 像的位置和大小	17
2.4 成像公式汇总	22
2.5 不在空气中的光学系统	23
练习	23
参考文献	25
第 3 章 近轴光学和计算	26
3.1 光线在一个表面上的折射	26
3.2 近轴区域	28
3.3 通过几个表面的近轴光线追迹	29
3.4 焦点和主点的计算	33

3.5 “薄透镜”	36
3.6 反射镜	37
练习	39
参考文献	40
第4章 光学系统方面的考虑	41
4.1 分离透镜系统	41
4.2 光学不变量	45
4.3 矩阵光学	49
4.4 y - y bar 图	50
4.5 Scheimpflug 条件	51
4.6 符号规则总结	52
练习	53
参考文献	54
第5章 初级像差	55
5.1 概述	55
5.2 像差多项式和赛德像差	55
5.3 色差	64
5.4 透镜形状和光阑位置对像差的影响	66
5.5 像差随孔径和视场的变化	69
5.6 光程差（波前像差）	70
5.7 像差校正和剩余像差	71
5.8 光线交点曲线和像差的“级”	74
5.9 纵向像差、横向像差、波前像差（OPD）和角像差之间的关系	78
练习	80
参考文献	82
第6章 三级像差理论和计算	83
6.1 概述	83
6.2 近轴光线追迹	84
6.3 三级像差：表面贡献量	86
6.4 三级像差：薄透镜，光阑移动公式	89
6.5 计算实例	93
参考文献	97

第 7 章 棱镜和反射镜系统	98
7.1 概述	98
7.2 色散棱镜	98
7.3 “薄”棱镜	99
7.4 最小偏折量	100
7.5 消色差棱镜和直视棱镜	101
7.6 全内反射	102
7.7 一个平面的反射	103
7.8 平面平行板	105
7.9 直角棱镜	108
7.10 屋脊棱镜	110
7.11 正像棱镜系统	112
7.12 倒像棱镜	116
7.13 五(角)棱镜	117
7.14 菱形棱镜和分束镜	117
7.15 平面反射镜	119
7.16 棱镜和反射镜系统的设计	120
7.17 制造误差分析	124
参考文献	124
第 8 章 人眼特性	125
8.1 概述	125
8.2 眼睛的构造	126
8.3 眼睛的特性	127
8.4 眼睛的缺陷	134
实验	137
练习	138
参考文献	139
第 9 章 光阑, 孔径, 光瞳和衍射	140
9.1 概述	140
9.2 孔径光阑和光瞳	141
9.3 视场光阑	141
9.4 渐晕	142
9.5 消杂散光光阑、冷光阑和挡光板	143

9.6	远心光阑	146
9.7	孔径和像的照度—— f 数和余弦四次方定律	147
9.8	焦深	149
9.9	孔径的衍射效应	150
9.10	光学系统的分辨率	154
9.11	高斯(激光)光束的衍射	156
9.12	傅里叶变换透镜和空间滤波	160
	练习	160
	参考文献	163
第 10 章	光学材料	165
10.1	反射、吸收和色散	165
10.2	光学玻璃	170
10.3	特种玻璃	175
10.4	晶体材料	177
10.5	光学塑料	179
10.6	吸收滤光片	181
10.7	散射材料和投影屏	185
10.8	偏振材料	187
10.9	光学胶和溶剂	188
	练习	189
	参考文献	190
第 11 章	光学镀膜	192
11.1	介电质反射和干涉滤光片	192
11.2	反射膜	200
11.3	分划板	203
	练习	204
	参考文献	205
第 12 章	辐射度学和光度学原理	206
12.1	概述	206
12.2	逆平方定律;光强度	207
12.3	辐射率和朗伯(Lambert)定律	208
12.4	半球内的辐射	208

12.5	散射光源产生的辐照度·····	209
12.6	像的辐射度学·····	211
12.7	光谱辐射度学·····	214
12.8	黑体辐射·····	215
12.9	光度学·····	219
12.10	照明装置·····	224
	练习·····	227
	参考文献·····	230

第 13 章	光学系统总体布局 ·····	231
13.1	望远镜和无焦系统·····	231
13.2	场镜和中继系统·····	234
13.3	出瞳、眼睛和分辨率·····	236
13.4	简单显微镜和放大镜·····	244
13.5	复式显微镜·····	245
13.6	测距机·····	247
13.7	辐射计和医用光学·····	251
13.8	光纤光学·····	255
13.9	变形系统·····	260
13.10	变光焦度（变焦）系统·····	264
13.11	衍射表面·····	268
	练习·····	269
	参考文献·····	271

第 14 章	系统总体布局中的案例分析（经典案例） ·····	273
14.1	概述·····	273
14.2	摄远物镜·····	274
14.3	反摄远透镜·····	275
14.4	转像系统（中继系统）·····	276
14.5	转像系统（14.4 节中）的孔径光阑·····	277
14.6	短距离望远镜·····	278
14.7	14.6 节的场镜·····	281
14.8	14.7 节的光线追迹·····	282
14.9	125 倍显微镜·····	283
14.10	Brueke 125× 放大镜·····	284

14.11	4×机械补偿变焦物镜	285
14.12	计算机绘制系统布局图	289
14.13	设计有外部冷光阑的消色差中红外系统	290
第 15 章	波前像差和调制传递函数 (MTF)	297
15.1	概述	297
15.2	光程差: 焦点漂移	297
15.3	光程差: 球差	299
15.4	像差(容限)公差	304
15.5	像的能量分布(几何)	309
15.6	点和线扩散函数	310
15.7	由于球差造成光斑的几何尺寸	311
15.8	调制传递函数	314
15.9	方波与正弦波靶标	319
15.10	特殊调制传递函数: 衍射受限系统	320
15.11	径向能量分布	328
15.12	具有初级像差光学系统的点扩散函数	329
	练习	334
	参考文献	335
第 16 章	光学设计的基础知识	336
16.1	概述	336
16.2	简单的弯月形照相物镜	337
16.3	对称原理	342
16.4	消色差望远物镜(薄透镜理论)	344
16.5	消色差望远物镜(设计形式)	346
16.6	光学设计中的衍射表面	353
16.7	库克(Cooke)三分离消像散物镜: 三级理论	358
16.8	自动设计	367
16.9	对一些实际问题的考虑	371
	练习	372
	参考文献	373
第 17 章	目镜、显微镜和照相物镜的设计	374
17.1	望远系统和目镜	374

17.2	显微物镜·····	381
17.3	照相物镜·····	388
17.4	聚光镜系统·····	406
17.5	简单透镜的像差特性·····	409
	练习·····	412
	参考文献·····	412
第 18 章	反射镜和折反式系统的设计 ·····	413
18.1	反射系统·····	413
18.2	球面反射镜·····	413
18.3	抛物面反射镜·····	415
18.4	椭球面和双曲面反射镜·····	416
18.5	双反射镜系统的公式·····	417
18.6	过原点的锥形截面·····	421
18.7	施密特 (Schmidt) 系统·····	422
18.8	Margin 反射镜 (内表面镀膜反射镜)·····	424
18.9	Bouwers [或马克苏托夫 (Maksutov)] 系统·····	425
18.10	对简单光学系统弥散斑尺寸的快速计算·····	428
	练习·····	432
	参考文献·····	432
第 19 章	物镜设计实例集、分析和说明 ·····	433
19.1	概述·····	433
19.2	物镜的数据表·····	433
19.3	光线追迹图·····	434
19.4	关于调制传递函数的注释·····	436
19.5	物镜目录·····	437
19.6	物镜设计实例·····	439
	参考文献·····	500
第 20 章	光学工程中的实际问题 ·····	501
20.1	光学加工·····	501
20.2	光学技术要求和公差·····	511
20.3	光学装配技术·····	524
20.4	光学实验室中的实际问题·····	529

20.5 公差预算实例	545
参考文献	549
第 21 章 最有效地利用“库存”透镜	551
21.1 概述	551
21.2 库存透镜	551
21.3 一些简单的测量	553
21.4 系统原理样机和测试	556
21.5 像差方面的考虑	559
21.6 如何利用单透镜（单块零件）	562
21.7 如何使用双胶合物镜	566
21.8 库存透镜的组合	566
21.9 库存透镜的供应商	574
附录 A 光线追迹和像差计算	577
附录 B 一些器件的标准尺寸	592
专业术语表	594

第

1

章

光学基础知识

1.1 电磁光谱

本书要讨论的是与较窄电磁光谱（电磁波谱）有关的一些现象。光学常常被定义为与人眼可以观察到的辐射有关的研究范畴，然而，随着其在可见光光谱两侧的广泛应用，光学的定义似乎不仅仅局限于先前所述，因此，本书讨论中必须包括红外和紫外方面的内容。

众所周知的电磁波谱图如图 1.1 所示，波谱范围从宇宙射线到无线电波。所有的电磁辐射都传输能量，真空中常用的速度是 $c = 2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ 。另一方面，波长范围非常宽，辐射特性的范围也非常广。在短波波谱区，有波长小于亿分之一微米 ($1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) 的 γ 辐射，在长波波谱区，无线电波的波长则以英里计量。在短波波谱区，电磁辐射特性倾向于粒子性，而在长波波谱区，倾向于波动性。由于光学光谱位于电磁波谱的中间位置，所以，光学辐射同时具有波动性和粒子性便不足为奇了。

电磁波谱的可见光光谱区（图 1.2）只是其中很小一部分，波长范围从 $0.4\mu\text{m}$ 的紫光到 $0.76\mu\text{m}$ 的红光。可见光光谱红光之外是红外光谱区，与红外光谱区相邻的是微波波谱区，波长约为 1mm 。可见光光谱短波长之外是紫外光谱区，光谱范围一直到波长约为 $0.01\mu\text{m}$ 的 X 射线波谱区为止。人眼观察到的颜色与波长有关，如图 1.2 所示。

光学波谱范围内波长的单位通常是埃 ($\text{\AA}$)、毫微米 ($\text{m}\mu$)、纳米 (nm)、

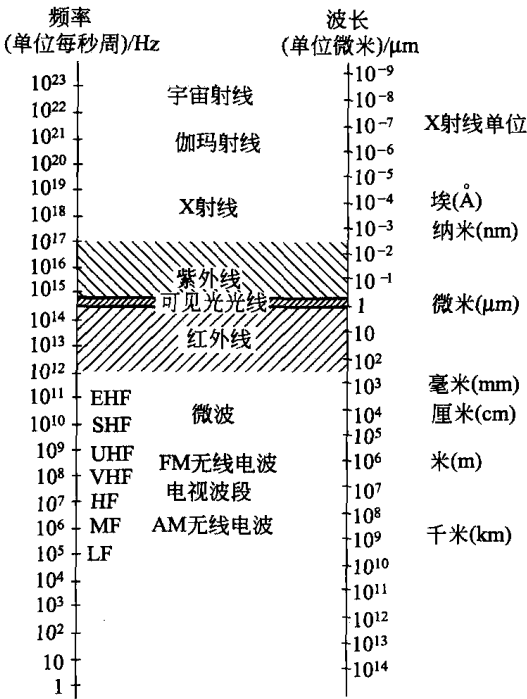


图 1.1 电磁波谱

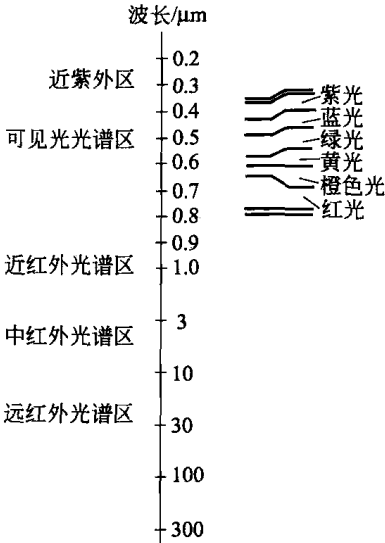


图 1.2 电磁波谱的光学波谱区域

微米 (μm 或者 μ)。1 μm 等于 1m 的百万分之一，1m μ 是 1 μm 的千分之一 (即 1nm)，1 $\text{\AA}$ 是 1 μm 的万分之一 (参见表 1.1)。因此，1.0 $\text{\AA}$ =0.1nm=10⁻⁴ μm ；频率等于速度 c 除以波长，波数等于波长的倒数，量纲通常是 cm^{-1} 。

表 1.1 经常使用的波长单位

厘米(cm)=10 ⁻² m	毫微米(m μ)=10 ⁻³ μm =1.0nm=10 ⁻⁶ mm=10 ⁻⁹ m
毫米(mm)=10 ⁻³ m	纳米(nm)=10 ⁻⁹ m=1.0m μ
微米(μm) ^① =10 ⁻⁶ m=10 ⁻³ mm	埃($\text{\AA}$)=10 ⁻¹⁰ m=0.1nm

① 译者注：微米的英文是 Micrometer 或 Micron。

1.2 光波的传播

图 1.3 所示是真空中一个点光源发出的光波，很明显，任一时刻的波前形状都是球面，随着波前传播远离点源，其曲率 (半径的倒数) 在减小。在一个足够远的距离上，波前半径可以看作无穷大，这种波前被认作是平面波。

当然，两个连续波之间的距离是辐射波长。光波在真空中的传播速度近似为 3 $\times 10^{10}$ cm/s，其他介质中的速度小于真空中的速度，例如，普通玻璃中的速度大约是真空中速度的 2/3。真空中与某种介质中的速度之比定义为该介