



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

# Engineering Optics

# 工程光学

田芊 廖延彪 孙利群 编著

Tian Qian Liao Yanbiao Sun Liqun

清华大学出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

Engineering Optics  
**工程光学**

田芊 廖延彪 孙利群 编著

Tian Qian Liao Yanbiao Sun Liqun

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书以工程光学为体系,从光学技术的角度,介绍了光学的一些基本概念、原理、方法及其应用。

本书共分10章,介绍了光波的基本性质和几何光学、物理光学、现代光学的有关内容。其中,几何光学的内容有光的成像技术、光学像的记录和显示技术、光学测量技术;物理光学的内容有光的干涉技术、光的衍射技术、光的偏振技术、光的调制技术;现代光学的内容有激光技术、光波导技术。

本书可作为机械类非光学专业的本科生教材或教学参考书,亦可供有关工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

工程光学/田芋,廖延彪,孙利群编著. —北京:清华大学出版社,2006.5

ISBN 7-302-12722-0

I. 工… II. ①田…②廖…③孙… III. 工程光学—高等学校—教材 IV. TB133

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第023580号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 张秋玲

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

装 订 者: 三河市金元印装有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 34.5 字 数: 733 千字

版 次: 2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-12722-0/TH·199

印 数: 1~3000

定 价: 48.00 元

# 前言

我国的光学专业,有的设置在机械工程院系,有的设置在电子工程院系,有的设置在物理学院系,因此,有关光学的教材版本很多。本《工程光学》主要是为了机械类非光专业的学生进一步学习光学的有关知识而编写的。

大部分为本科生编写的光学教材,包括了几何光学和物理光学两部分内容。本《工程光学》同样也主要以这两部分内容为主,但考虑到机械类非光学专业学生的课程体制设置中有关光学的课程较少,为了使这些学生对光学有更全面的了解,本教材中也包括了现代光学的许多内容。这本《工程光学》是为了给这部分学生在学习这门课程时提供一本教材或教学参考书,同时也希望能够成为其他有关工程技术人员的学习参考书。

考虑到本教材主要是面向机械类非光专业的学生,因此除介绍光学的有关最基本的理论之外,更多的是侧重于光学理论的应用,即从光学技术的角度来进行讲述,而这也是本教材之所以称为《工程光学》的原因。这样的考虑,也许会导致对光学理论的介绍较为肤浅,影响学生对光学科学的深入理解,但却能够避免学生在学习物理基础课后再学习光学的重复与枯燥,让学生们能够感到光学的实用性,认识到学习光学大有益处。

对于机械类非光专业的学生,应该学习和掌握一些光学技术、电子技术,这样可以使这些学生的知识更为全面,以便更好地面对今后实际工作的要求和挑战。我们从 20 世纪 90 年代开始,在清华大学精密仪器与机械学系给机械制造专业的学生开设了“工程光学”课程,基于以上这些考虑,我们对该课程的内容和讲授安排进行了探索。授课 10 多年以来,从一些学生学习时的反应和毕业生的反馈情况来看,我们的考虑和探索基本是正确的,但还需要完善。

由于本教材的目的是对光学这一学科所包含内容的全貌有一个介绍,因此所选编的内容及篇幅较多一些。在利用本教材讲授“工程光学”课程时,可以根据教学计划和课时安排选择其中的部分内容,有些内容可以不讲而作为扩大知识面自学。

本教材由清华大学田芊、廖延彪、孙利群共同编写。廖延彪编写第1,5,6章和第7章部分内容以及第10章,孙利群编写第2,3,8章,田芊编写绪论、第4,9章和第7章部分内容以及附录,最后由田芊对本教材的完成进行定稿。在本教材编写时,我们参考了许多同类教材,学习和借鉴了这些教材的内容和方法,获益匪浅,在此深表谢意。在编写过程中,许多人提出了宝贵意见,为本教材的绘图和校对出版工作付出了辛劳,在此一并致谢。本教材一定有不足之处,恳请给予批评指正。

编者

2006年2月

# 目录



绪论 .....	1
0.1 光学是一门重要而有用的科学与技术 .....	1
0.2 光学一直在发展中并会有更大的发展 .....	2
0.3 工程光学是着重于应用的科学与技术 .....	5
0.4 工程光学学习与课程安排 .....	6
<b>第 1 章 光波的基本特性</b> .....	<b>8</b>
1.1 光的波动理论 .....	8
1.1.1 光波与电磁波 .....	8
1.1.2 平面波, 球面波, 柱面波 .....	10
1.1.3 谐波 .....	12
1.1.4 高斯光束 .....	15
1.2 平面光波在各向同性介质分界面上的反射和折射 .....	17
1.2.1 反射定律和折射定律 .....	17
1.2.2 菲涅耳公式 .....	19
1.2.3 反射率和透射率 .....	21
1.2.4 反射和折射时的偏振 .....	25
1.2.5 反射和折射时的相位 .....	26
1.2.6 全反射 .....	27
1.3 光波在金属表面上的反射和折射 .....	30
习 题 .....	33
<b>第 2 章 光的成像技术</b> .....	<b>35</b>
2.1 几何光学原理 .....	35

2.1.1	实验三定律 .....	35
2.1.2	全反射 .....	37
2.1.3	费马原理 .....	38
2.2	光学成像 .....	41
2.2.1	基本概念与符号规则 .....	41
2.2.2	单一球面成像 .....	42
2.2.3	薄透镜成像 .....	45
2.2.4	组合透镜成像 .....	51
2.2.5	光阑 .....	55
2.3	光学设计基础 .....	59
2.3.1	光线的光路计算 .....	59
2.3.2	像差理论 .....	66
2.4	光学材料 .....	71
2.4.1	光学玻璃 .....	71
2.4.2	光学晶体 .....	78
2.4.3	光学塑料 .....	81
2.5	光度学基础 .....	84
2.5.1	光度学量及其单位 .....	84
2.5.2	光传播过程中光学量的变化规律 .....	88
2.5.3	成像系统像面的照度 .....	92
	习题 .....	96
<b>第 3 章</b>	<b>光学像的记录和显示技术 .....</b>	<b>100</b>
3.1	眼睛和助视仪器 .....	100
3.1.1	眼睛及其光学系统 .....	100
3.1.2	放大镜和显微镜 .....	107
3.1.3	望远镜的工作原理 .....	110
3.2	光学成像器件 .....	114
3.2.1	感光底片 .....	114
3.2.2	电荷耦合器件 .....	116
3.2.3	互补金属氧化物半导体 .....	123
3.3	光学摄像系统 .....	127
3.3.1	摄影物镜的光学特性 .....	128
3.3.2	摄影物镜的基本类型 .....	131

3.3.3	取景系统和调焦系统 .....	132
3.3.4	电视摄像系统 .....	136
3.4	光学显示系统 .....	139
3.4.1	光学投影系统 .....	139
3.4.2	光电显示系统 .....	145
	习题 .....	153
<b>第 4 章</b>	<b>光的干涉技术 .....</b>	<b>156</b>
4.1	产生光波干涉的条件 .....	156
4.1.1	光波产生干涉现象的分析 .....	157
4.1.2	产生光波干涉的必要条件 .....	158
4.1.3	产生光波干涉的补充条件 .....	159
4.2	分波面双光束干涉 .....	160
4.2.1	双缝分波面双光束干涉 .....	160
4.2.2	分波面双光束干涉的其他实验装置 .....	163
4.2.3	干涉条纹清晰程度的影响因素 .....	165
4.3	分振幅双光束干涉 .....	170
4.3.1	平板分振幅干涉 .....	170
4.3.2	等倾干涉 .....	171
4.3.3	等厚干涉 .....	175
4.4	双光束干涉仪 .....	181
4.4.1	迈克尔逊干涉仪 .....	182
4.4.2	斐索干涉仪 .....	186
4.4.3	马赫-曾德尔干涉仪 .....	188
4.4.4	赛格纳克干涉仪 .....	188
4.5	多光束干涉 .....	192
4.5.1	多束光干涉的光强分布 .....	192
4.5.2	多光束干涉仪 .....	198
4.5.3	多光束干涉的应用 .....	202
4.6	薄膜光学简介 .....	204
4.6.1	单层光学膜 .....	205
4.6.2	多层光学膜 .....	208
4.6.3	光学薄膜的制备及其应用 .....	213
	习题 .....	216



<b>第 5 章 光的衍射技术</b> .....	220
5.1 衍射的基本理论 .....	220
5.1.1 惠更斯-菲涅耳原理 .....	220
5.1.2 夫琅禾费衍射和菲涅耳衍射 .....	224
5.2 夫琅禾费单缝衍射 .....	226
5.2.1 衍射光强的计算 .....	226
5.2.2 对衍射光强分布公式的分析 .....	228
5.3 夫琅禾费圆孔衍射 .....	229
5.4 巴比涅原理 .....	233
5.5 夫琅禾费多缝衍射 .....	234
5.5.1 双缝的干涉和衍射 .....	234
5.5.2 多缝的干涉和衍射 .....	237
5.6 菲涅耳衍射 .....	241
5.6.1 圆孔衍射和圆屏衍射 .....	241
5.6.2 直边衍射 .....	244
5.6.3 波带片 .....	245
5.7 衍射光栅 .....	248
5.7.1 平面衍射光栅 .....	248
5.7.2 闪耀光栅 .....	252
5.7.3 光谱仪 .....	255
5.8 全息技术 .....	257
5.8.1 全息原理和全息图种类 .....	257
5.8.2 全息技术应用举例 .....	261
5.9 傅里叶光学 .....	263
5.9.1 概述 .....	263
5.9.2 薄透镜的傅里叶变换性质 .....	264
5.9.3 光学傅里叶变换 .....	266
5.9.4 光信息处理及其应用 .....	268
5.10 二元光学 .....	269
5.10.1 概述 .....	269
5.10.2 二元光学的特点 .....	271
5.10.3 二元光学器件的制作 .....	271
5.10.4 二元光学的应用 .....	272

5.11 近场光学	275
5.11.1 概述	275
5.11.2 近场光学原理	275
5.11.3 近场光学应用举例	276
习题	278
<b>第 6 章 光的偏振技术</b>	<b>281</b>
6.1 光的偏振特性	281
6.1.1 光的横波性	281
6.1.2 光波的偏振态	283
6.1.3 偏振光的表示方法	286
6.2 平面光波在晶体中的传播特性	290
6.2.1 晶体的介电张量	290
6.2.2 各向异性晶体中的单色平面光波	292
6.2.3 平面光波在晶体中的传播——解析法	293
6.2.4 平面光波在晶体中的传播——图解法	296
6.3 平面光波在晶体表面上的反射和折射	301
6.3.1 光波在晶体表面上的反射定律和折射定律	301
6.3.2 单轴晶体中的光路	303
6.4 偏振器件	304
6.4.1 概述	304
6.4.2 反射型偏振器	304
6.4.3 双折射型偏振器	305
6.4.4 二向色型偏振器	307
6.4.5 波片和补偿器	308
6.4.6 退偏器	312
6.5 通过光学元件后光强的计算	313
6.5.1 概述	313
6.5.2 用琼斯矢量计算	313
6.5.3 用斯托克斯矢量计算	313
6.5.4 用邦加球表示	314
6.6 偏振光的干涉	315
6.6.1 概述	315
6.6.2 平行光的偏振光干涉	316

6.6.3	会聚光的偏振光干涉 .....	318
6.7	晶体的旋光性 .....	321
6.8	偏振光仪器 .....	322
6.8.1	旋光仪 .....	322
6.8.2	椭偏仪 .....	323
	习题 .....	325
<b>第 7 章</b>	<b>光调制技术</b> .....	<b>327</b>
7.1	非线性光学简介 .....	327
7.1.1	概述 .....	327
7.1.2	介质的非线性特性 .....	328
7.1.3	非线性效应产生和频 .....	329
7.1.4	非线性效应产生二次谐波 .....	332
7.1.5	非线性效应产生差频 .....	332
7.1.6	光纤中的非线性特性 .....	333
7.1.7	受激非弹性散射 .....	334
7.2	光的调制 .....	335
7.2.1	幅度调制和光强调制 .....	335
7.2.2	频率调制和相位调制 .....	337
7.2.3	脉冲调制 .....	338
7.3	电光调制 .....	339
7.3.1	线性电光效应 .....	339
7.3.2	晶体的线性电光系数 .....	341
7.3.3	KDP 晶体的线性电光效应 .....	343
7.3.4	电光调制器件 .....	347
7.4	磁光调制 .....	349
7.4.1	磁致旋光效应 .....	349
7.4.2	晶体的法拉第效应 .....	350
7.5	声光调制 .....	352
7.5.1	弹光效应 .....	352
7.5.2	声光衍射 .....	353
	习题 .....	356
<b>第 8 章</b>	<b>光学测量技术</b> .....	<b>357</b>
8.1	光学测量的基本装置 .....	357

8.1.1	光具座及其基本部件	357
8.1.2	精密测角仪	364
8.2	光学玻璃的测量	367
8.2.1	光学玻璃折射率与色散的测量	367
8.2.2	光学玻璃的双折射测量	371
8.2.3	有色光学玻璃光谱特性的测量	375
8.3	光学零件的测量	377
8.3.1	光学零件面形偏差的测量	377
8.3.2	球面曲率半径的测量	381
8.3.3	平面光学零件光学不平行度的测量	384
8.3.4	焦距和顶焦距的测量	389
8.4	典型光学系统特性参数测量	392
8.4.1	显微系统特性参数检测	392
8.4.2	望远系统光学特性参数检测	395
8.4.3	照相物镜光学特性参数检测	402
	习题	410
<b>第 9 章</b>	<b>激光技术</b>	<b>413</b>
9.1	激光的产生与特性	413
9.1.1	激光的产生	413
9.1.2	激光的特性	414
9.2	光的量子性与波粒二象性	415
9.2.1	光电效应与光量子(光子学)	415
9.2.2	光的波粒二象性	417
9.2.3	原子的能级分布	417
9.3	激光原理	419
9.3.1	原子的跃迁	419
9.3.2	激光器的构成	423
9.3.3	光学谐振腔	426
9.3.4	激光的模式	430
9.4	激光器	433
9.4.1	气体激光器	433
9.4.2	固体激光器	440
9.4.3	半导体激光器	443



9.5 激光技术 .....	451
9.5.1 激光准直技术 .....	451
9.5.2 激光测距技术 .....	453
9.5.3 激光调制技术 .....	458
9.5.4 激光稳频技术 .....	460
9.5.5 激光脉冲技术 .....	466
9.5.6 激光存储技术 .....	471
习题 .....	475
<b>第 10 章 光波导技术 .....</b>	<b>476</b>
10.1 概述 .....	476
10.1.1 光波导 .....	476
10.1.2 光导纤维 .....	477
10.2 平面光波导的传输特性 .....	480
10.2.1 平板光波导的结构 .....	480
10.2.2 平板波导的模式 .....	480
10.2.3 光波导损耗 .....	481
10.3 光波导器件 .....	482
10.3.1 光波导调制器 .....	482
10.3.2 电光调制器 .....	483
10.3.3 声光调制器 .....	484
10.3.4 周期波导和反射滤波器 .....	485
10.3.5 光波导偏振器 .....	486
10.3.6 波导激光器 .....	486
10.4 光波导耦合 .....	487
10.4.1 光波导透镜 .....	488
10.4.2 光波导反射镜和棱镜 .....	489
10.5 集成光学系统举例 .....	489
10.5.1 射频频谱分析仪 .....	490
10.5.2 微型光波导陀螺仪 .....	491
10.6 光纤的特性 .....	492
10.6.1 均匀折射率光纤的光线理论 .....	492
10.6.2 光纤的损耗 .....	493
10.6.3 光纤的色散 .....	494

10.6.4	光纤的偏振 .....	494
10.7	特种光纤 .....	495
10.7.1	变折射率光纤 .....	495
10.7.2	红外光纤 .....	500
10.7.3	塑料光纤 .....	501
10.8	光纤器件 .....	501
10.8.1	光纤连接器和耦合器 .....	502
10.8.2	光纤波分/波合器 .....	502
10.8.3	光纤偏振控制器 .....	503
10.8.4	光纤滤波器 .....	503
10.8.5	光纤光栅 .....	505
10.8.6	光纤放大器和激光器 .....	505
10.9	光纤传感器 .....	506
10.9.1	概述 .....	506
10.9.2	振幅调制传感型光纤传感器 .....	507
10.9.3	相位调制传感型光纤传感器 .....	508
10.9.4	偏振调制型光纤传感器 .....	512
10.9.5	波长调制型光纤检测系统 .....	512
10.9.6	传光型光纤检测系统 .....	513
附录 A	张量的基本知识 .....	515
附录 B	矢量分析与场论 .....	520
附录 C	电磁场理论的基本方程 .....	525
参考文献	.....	535



# 绪 论

人们都期盼着“让世界充满阳光”。光确实是美好的,光与人类生活和社会活动息息相关。光学的研究发展伴随着人类对客观世界的认识,有助于我们了解与利用自然,促进经济建设、科学技术的发展和文明社会的进步。

## 0.1 光学是一门重要而有用的科学与技术

光学是研究光的本性及其特征、光的产生及其机理、光的传播及其规律、光的接收及其处理、光与物质的作用等的一门学科,它是物理学中的一个重要组成部分,同时也是一种科学方法与技术手段。

在 19 世纪末 20 世纪初,物理学的天空有“两朵乌云”,从而导致物理学有两个极其重要的基础理论:相对论和量子论,并由此引发了近代物理学的革命,而这两项基础理论研究都与光学有关。

一个是迈克尔逊-莫雷实验,这个利用光的干涉效应的实验证明,光顺着地球转动和逆着地球转动的速度是完全相同的。这就表明,在牛顿力学领域中普遍公认成立的相对性原理,在麦克斯韦电磁波理论里却不成立。它动摇了假设有电磁波(光波)载体——“以太”媒质的存在,而具有的绝对时空观。爱因斯坦对此提出“同时的相对性”这一关键问题,即只有在异地发生的两个事件的同时性,才是依赖于观察者的。并通过光速恒定和相对性原理推导出狭义相对论,进而有了广义相对论和统一场论,彻底改变了人们对时空观的认识。

另一个是普朗克定律/公式,这个“能量子”假说提出,热的物体发光会有不同波长——光谱,其各种频率的光波(电磁波)是以“能量子”的形式发生的,它解决了经典物理学导出的黑体辐射公式中其能量随频率增大而趋于无穷大的困惑。后来爱因斯坦由能量子概念提出光量子理论,推动了量子论、量子力学的产生。这就改进了人们对于物质结构

及作用的认识,进而发展了原子结构、分子构造、核能、半导体、超导体等的研究,特别是激光的面世。

可以说,几乎所有 20 世纪的物质文明进步,都是与这两个物理基础研究的成果有关的,并将科学引进了一个新的时代。在进入 21 世纪后,由于科学技术的不断发展,将人类推进到知识经济时代。这一切改变了人类的时空观、物质观、生命观、宇宙观和价值观,并且催生出核能、半导体、激光、计算机、新材料、信息和生命科学等一批新技术的发展,从而也极大地改变了人类的生产方式和生活方式。

目前,随着光学渗透到众多领域,加深了我们对光的本质及其现象的了解和理解,出现了许多光学研究的细分和交叉分支,并各自形成一定的体系。随着其他学科和许多高新技术的发展并与光学结合,涌现出各种新的光学方法和技术,而且又进一步开拓了光学的广阔应用前景。现在,光学越发显现其重要性,并在应用中发挥着重大作用。

## 0.2 光学一直在发展中并会有更大的发展

光学的研究历程既是历史悠久的,又是充满活力的,始终在持续发展中。光学发展至今几千年来,人们一直在探索着:光是什么?怎么运用光?因而光学领域中新概念、新理论、新分支、新方法、新技术不断涌现,研究在不断地深入与拓宽。光学的发展进程可以大致分为 3 个阶段:初级光学阶段、经典光学阶段、现代光学阶段。

### 1. 初级光学(几何光学)阶段

自墨翟(公元前 468—前 376)、欧几里得(Euclid, 公元前 330—前 275)描述了光学起始,之后直至 17 世纪中叶的 2000 多年中,光学一直处于萌芽初级阶段。在这一时期,人们对光的直线传播、反射、折射、成像等光学的一些现象和简单规律已有一定的认识,这些光学现象也引起了古代的哲学家对于光的本性的深思。但更多的还是仅限于对这些光学现象的描述,及至发明反射镜、棱镜、透镜和望远镜、显微镜等初级光学仪器,才奠定了几何光学的基础。

### 2. 经典光学(物理光学)阶段

从 17 世纪中叶到 19 世纪末,光学获得了很大的发展,初步建立了独立完整的学科,同时开始了人类对于光的本性的认识进化。在前一段时期,以牛顿(I. Newton, 1642—1727)为代表的“微粒说”在光学中占优势地位,但同时存在与之截然不同的以惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)为代表的“波动说”也在发展。到 19 世纪,由于杨(T. Young, 1773—1829)、菲涅耳(J. Fresnel, 1788—1827)等的研究,“波动说”又占据了上风。后来,由麦克斯韦(C. Maxwell, 1831—1879)在总结安培(M. Ampere, 1775—1836)、法拉第(M. Faraday, 1791—1867)等一系列电学和磁学实验的基础上,并经赫兹(R. Hertz, 1857—1894)实验证实,确立了光的电磁波理论。光是一种电磁波,人们从干





图 0-1 牛顿  
(Isaac Newton, 1642—1727)



图 0-2 惠更斯  
(Christian Huygens, 1629—1695)



图 0-3 菲涅耳  
(Augustin Jean Fresnel, 1788—1827)

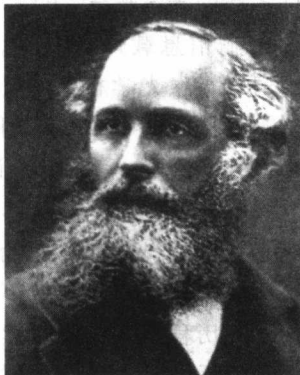


图 0-4 麦克斯韦  
(James Clerk Maxwell, 1831—1879)

涉、衍射和偏振等光学现象证实了光的波动性,形成物理光学(波动光学)。

### 3. 现代光学(量子光学/光子学)阶段

19 世纪末 20 世纪初,随着近代物理学两大革命性理论的诞生,光学的研究与应用有了更深刻的演变进步。1905 年爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)提出“光量子”或“光子”理论,人们从黑体辐射、光电效应证实了光的量子性(粒子性)。至此逐渐认识到,光和一切微观粒子都具有波粒二象性——波动和微粒两重特性,推动了关于光的本质问题、光和物质作用问题研究的深入。

尤其是在 20 世纪 20 年代,爱因斯坦结合普朗克定律和玻尔兹曼统计,提出了受激辐射的概念,到 1960 年诞生了激光器——一种全新的光源,从此光学进入了崭新的发展时