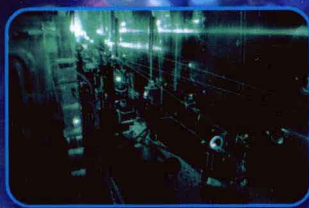




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



第3版

# 工程光学

ENGINEERING OPTICS

天津大学 郁道银 主编  
浙江大学 谈恒英



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工 程 光 学

第 3 版

天津大学 郁道银  
浙江大学 谈恒英 主编



机 械 工 业 出 版 社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是根据高等教育规划教材的编写要求,以及更新教材内容、反映现代科技发展和应用的原则,在普通高等教育“十五”国家级规划教材《工程光学(第2版)》基础上重新修订而成的。本书编写一贯坚持注重基本理论的论述,加强理论与工程实际的结合,突出现代光学与光学技术发展的指导思想。本书修订后仍分为上、下两篇,上篇为几何光学与光学设计,下篇为物理光学。全书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法和应用。

本书可作为高等学校光电信息科学与工程类、仪器仪表类及其相近专业的教材,亦可作为物理和光学类专业的选修课教材或参考书,也是从事光电信息科学与技术、仪器科学与技术等相关领域工作的工程技术人员的参考书。

本书是国家级精品课程教材,读者可以访问天津大学“工程光学”精品课程网站 <http://course.tju.edu.cn/gcgx/> 获取相关信息。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程光学/郁道银,谈恒英主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-34263-2

I. ①工… II. ①郁…②谈… III. ①工程光学-高等学校-教材 IV. ①TB133

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第109034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:闫晓宇 责任编辑:闫晓宇

责任校对:吴美英 封面设计:王伟光

责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年7月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·37.75印张·939千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34263-2

定价:64.00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

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

## 第3版前言

《工程光学（第3版）》是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是根据高等教育规划教材的编写要求，以及更新教材内容、反映现代科技发展和应用的原则，在普通高等教育“十五”国家级规划教材《工程光学（第2版）》的基础上重新修订而成的。

本次修订的指导思想仍然是坚持注重基本理论的论述，加强理论与工程实际的结合，出现代光学与光学技术的发展。

本书修订后仍分为上、下两篇，上篇为几何光学与光学设计，下篇为物理光学。

上篇主要修改内容为：在现代光学系统一章，将阶跃型光纤与梯度折射率光纤合并为一节，并省略了梯度折射率光纤中的部分指导公式；增加了第五节红外光学系统和第六节特殊面型及特殊结构光学系统；在红外光学系统一节中，主要介绍红外光学材料、红外光学系统的结构形式以及红外光学系统的冷阑效率与无热化设计；在特殊面型及特殊结构光学系统一节，主要介绍自由曲面光学系统、折/衍混合光学系统、离轴反射式光学系统以及自适应光学系统等。在光学系统的像质评价一章，增加了近年来光学设计软件中出现的新成像质量评价方法，如方均根统计评价方法、光程差曲线与光线差曲线、照度分析与光谱分析等。在光学设计一章，增加了光学系统的像差校正方法一节，主要介绍各种手工校正像差的方法，使读者对像差理论有更进一步的理解；将第八节更改为 $-5\times$ 显微物镜的优化设计，与第五节的 $-5\times$ 显微物镜初始结构设计相呼应，使读者全面了解一个显微物镜设计的全过程；此外，还增加了非球面镜头优化设计一节，介绍非球面成像的基本概念与两种非球面物镜的优化设计实例。

下篇主要修改内容为：在光的电磁理论基础一章，对波函数的复数表示、复振幅、波的叠加原理等内容作了补充描述与讨论，对光的吸收、色散和散射现象作了补充描述。在光的干涉和干涉系统一章，以复数形式的矢量波叠加对光波干涉条件进行了分析，补充了白光干涉及其应用的内容，增加了现代干涉技术及系统一节。在光的衍射一章，侧重于从波动光学的角度讨论光波场的衍射分布。在傅里叶光学一章，增加了复杂光波的复振幅分布与分解和光波衍射的傅里叶分析方法两节，以便加深对傅里叶分析方法处理光学问题的理解。在光的偏振和晶体光学基础一章，增加了若干偏振器件的介绍，并补充了液晶的双折射特性和各种电光效应特性的描述。

本书由天津大学郁道银（上篇）和浙江大学谈恒英（下篇）主编，上海理工大学庄松林院士（上篇）和广州大学梁铨廷教授（下篇）主审。参加编写的有天津大学郁道银、谢洪波（第八、九章），田学飞（第五章），清华大学毛文炜（第二、四章、第十章七至十一节），武汉大学何平安（第一、三章、第十章一至六节），长春理工大学王文生（第六、七章），浙江大学谈恒英（第十一、十五章），清华大学何庆声、孙立群（第十三、十四章、附录），上海理工大学曹俊卿（第十二章），南京理工大学赵琦（第十六、十七章）。此外，天津大学的陈晓冬，汪毅和雷湧等为本书的文字整理及校对工作付出了许多辛劳，在此一并感谢。

本书可作为高等学校光电信息科学与工程类、仪器仪表类及其相近专业的教材，亦可作为物理和光学类专业的选修课教材或参考书，也是从事光电信息科学与技术、仪器科学与技术等相关领域工作的工程技术人员的参考书。

书中的不足之处望广大读者指正。

**编者**

## 第2版前言

《工程光学第2版》是“十五”国家级规划教材。为适应21世纪高等学校教学改革需要，使工程光学的教学内容和课程体系更适用于仪器仪表类及其相近专业的教学要求，对《工程光学第1版》进行了重新编写与修订。

重新编写与修订的指导思想仍然是既注重论述光学的基本原理，又更加紧密联系工程实际，并努力反映现代光学的发展和应用。

本书修订后仍分为上、下两篇，上篇为几何光学与光学设计，下篇为物理光学。

上篇在光学系统中的光束限制一章，单独介绍了光阑、出、入瞳和出、入窗的概念；在像差理论一章，补充了相关的像差特征曲线及其分析内容；在典型光学系统一章增加了变焦距光学系统的高斯光学成像原理；在像质评价一章，增加了现代光学设计软件中各种像质评价方法；上篇增加了第十章光学设计，主要介绍光学镜头的初始结构参数求解方法（PW法）和光学镜头的优化设计方法，并列举了多种光学镜头的优化设计过程。

下篇在光的电磁理论基础一章，补充了光传播时光的吸收、色散和散射的内容；在光的偏振和晶体光学基础一章，增加了液晶的内容；导波光学基础一章的叙述将更为简明易懂；下篇删去了光的量子性和激光基础一章，新增作为光子技术理论基础的光子学基础一章，主要介绍电磁场的量子化和光子特性，并指出光子学的广泛应用前景。下篇还增加了近场光学、二元光学、光调制、光存储、光子通信、光子晶体和激光器等相关内容。

本书由天津大学郁道银（上篇）和浙江大学谈恒英（下篇）主编，上海理工大学庄松林院士（上篇）和广州大学梁铨廷教授（下篇）主审。参加编写的有天津大学郁道银、谢洪波（第八、九章），田学飞（第五章），清华大学毛文炜（第二、四章、第十章6~10节），武汉大学何平安（第一、三章、第十章1~5节），长春理工大学王文生（第六、七章），浙江大学谈恒英（第十一、十五章），清华大学何庆生（第十三、十四章、附录），上海理工大学曹俊卿（第十二章），南京理工大学赵琦（第十六、十七章）。此外天津大学张以谟教授审阅了上篇的修改内容，并提出了许多宝贵意见，葛宝臻、陈晓冬为本书的校对及文字工作付出辛劳，在此一并致谢。

本书可作为高等学校仪器仪表类、光电信息科学与工程及其相近专业的教材，亦可作为物理和光学专业的选修教材或参考书，也是从事光电信息技术科学、仪器科学与技术等工程技术人员的参考书。

希望广大读者对书中的不足给予指正。

编者  
2005年10月

# 第1版前言

本书是根据国家教育部确定的国家级重点教材和原机械部确定的部级重点教材精神，并根据拓宽专业口径的原则而编写的。

本教材充分体现了高等学校教学改革对教学内容和课程体系改革的需要，在注重论述光学基本原理的同时，紧密结合工程实际，列举了大量的实际应用例子，有利于读者较全面地掌握光学基本理论和实际应用。在内容安排上，既包含有传统的光学理论和光学系统，又涉及现代光学的发展及其应用，努力反映光学的现代面貌。为了配合教学改革的要求，本教材拟配备多媒体教学光盘，以达到更新教学手段，增加课堂信息量，提高教学质量的目的。

本教材分为上、下两篇，上篇为几何光学与成像理论，下篇为物理光学。

上篇共分九章，系统地介绍了几何光学的基本定律与成像理论、理想光学系统的光学参数与成像特性、平面与平面镜成像系统、光学系统中的成像光束限制、光度学和色度学的基本原理、光学系统的光线光路计算和像差基本理论、典型光学系统和现代光学系统的成像特性和设计要求、光学系统的像质评价和像差公差。与以往教材不同的是增加了现代光学系统原理一章，简要地介绍了激光光学系统、傅里叶变换光学系统、扫描光学系统、阶跃型光纤光学系统、梯度折射率光纤光学系统和光电光学系统的光学成像特性及其应用。这些新型的光学系统与经典光学系统相比，其光学成像特性与设计的要求等方面均有较大差异，且近年来在光电仪器和光电系统中经常应用。

下篇共分七章，详细地阐述了光的电磁性质、光在各向同性介质界面上的传播规律和光波的叠加与分析、光波的干涉和典型干涉装置与应用、光波的衍射和傅里叶光学的基本原理、光的偏振及其在晶体中的传播、光的量子性和激光、光纤和导波光学。除了传统内容之外，进一步充实了傅里叶光学、全息术、光学信息处理、光学传递函数和晶体光学的内容。考虑到现代光学的发展及其应用，增加了二元光学、光调制、半导体激光、导波光学和光子学方面的基本概念。

本书由天津大学郁道银(上篇)和浙江大学谈恒英(下篇)主编，上海理工大学庄松林院士(上篇)和广州师范学院梁铨廷教授(下篇)主审。参加编写的有天津大学郁道银(八、九章)、田学飞(五章)，清华大学毛文炜(二、四章)，武汉测绘科学大学何平安(一、三章)，长春光机学院王文生(六、七章)，浙江大学谈恒英(十、十四章)，清华大学何庆声(十二、十三章、附录)，上海理工大学曹俊卿(十一章)，南京理工大学赵琦(十五、十六章)。本书上篇由郁道银定稿，下篇由谈恒英定稿。此外，天津大学的张以谟教授、胡鸿章教授审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，毛义和于为为本书的绘图及校对工作付出了辛劳，在此一并致谢。

本书可作为高等学校仪器仪表类、测控技术及仪器、光电信息工程和其他相近专业的教材，亦可作为物理和光学专业的选修课教材或参考书，也是从事光学和光电技术、仪器仪表技术和精密计量及检测技术的工程技术人员的参考书。

由于作者水平有限，衷心希望广大读者对书中的不足之处给予批评指正。

编者  
1998年11月

# 目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	

## 上篇 几何光学与光学设计

第一章 几何光学基本定律与成像	
概念	1
第一节 几何光学的基本定律和原理	1
一、光波与光线	1
二、几何光学的基本定律	2
三、费马原理	5
四、马吕斯定律	6
第二节 成像的基本概念与完善成像条件	6
一、光学系统与成像概念	6
二、完善成像条件	6
三、物、像的虚实	7
第三节 光路计算与近轴光学系统	7
一、基本概念与符号规则	8
二、实际光线的光路计算	8
三、近轴光线的光路计算	9
第四节 球面光学成像系统	10
一、单个折射面成像	10
二、球面反射镜成像	12
三、共轴球面系统	13
习题	14
第二章 理想光学系统	16
第一节 理想光学系统与共线成像理论	16
第二节 理想光学系统的基点与基面	18
一、无限远的轴上物点对应的像点 $F'$	18
二、无限远轴上像点对应的物点 $F$	19
三、物方主平面与像方主平面间的关系	19
四、实际光学系统的基点位置和焦距的计算	20
第三节 理想光学系统的物像关系	21
一、图解法求像	21
二、解析法求像	22
三、由多个光组组成的理想光学系统的成像	24
四、理想光学系统两焦距之间的关系	25
第四节 理想光学系统的放大率	26
一、轴向放大率	26
二、角放大率	27
三、光学系统的节点	27
四、用平行光管测定焦距的依据	28
第五节 理想光学系统的组合	28
一、两个光组组合分析	29
二、多光组组合计算	31
三、举例	32
第六节 透镜	35
习题	37
第三章 平面与平面系统	39
第一节 平面镜成像	39
一、平面镜成像原理	39
二、平面镜旋转特性	40
三、双平面镜成像	40
第二节 平行平板	41
一、平行平板的成像特性	42
二、平行平板的等效光学系统	42
第三节 反射棱镜	43
一、反射棱镜的类型	43
二、棱镜系统的成像方向判断	47
三、反射棱镜的等效作用与展开	48



第四节 折射棱镜与光楔 .....	50	第三节 成像系统像面的光照度 .....	82
一、折射棱镜的偏向角 .....	50	一、轴上像点的光照度 .....	82
二、光楔及其应用 .....	52	二、轴外像点的光照度 .....	82
三、棱镜色散 .....	53	三、光通过光学系统时的能量损失 .....	83
第五节 光学材料 .....	53	四、光学系统的总透射比 .....	85
一、透射材料的光学特性 .....	53	第四节 颜色的分类及颜色的表观特征 .....	85
二、反射光学材料的光学特性 .....	54	一、颜色及其分类 .....	85
习题 .....	55	二、颜色的表观特征 .....	85
<b>第四章 光学系统中的光阑与</b>		第五节 颜色混合及格拉斯曼颜色混合	
<b>光束限制</b> .....	57	定律 .....	86
第一节 光阑 .....	57	一、颜色混合 .....	86
一、孔径光阑 .....	57	二、格拉斯曼颜色混合定律 .....	86
二、视场光阑 .....	60	第六节 颜色匹配 .....	87
第二节 照相系统中的光阑 .....	60	一、颜色匹配和颜色匹配实验 .....	87
第三节 望远镜系统中成像光束的		二、颜色方程式 .....	88
选择 .....	62	三、颜色匹配实验的结论 .....	88
第四节 显微镜系统中的光束限制		第七节 色度学中的几个概念 .....	88
与分析 .....	65	一、颜色刺激 .....	88
一、简单显微镜系统中的光束限制 .....	65	二、三原色 .....	88
二、远心光路 .....	65	三、三刺激值 .....	88
三、场镜的应用 .....	66	四、光谱三刺激值或颜色匹配函数 .....	89
第五节 光学系统的景深 .....	67	五、色品坐标及色品图 .....	89
一、光学系统的空间像 .....	67	六、色度学中常用的光度学概念 .....	89
二、光学系统景深的含义 .....	68	第八节 颜色相加原理及光源色和物体	
第六节 数码照相机镜头的景深 .....	72	色的三刺激值 .....	91
习题 .....	73	一、颜色相加原理 .....	91
<b>第五章 光度学和色度学基础</b> .....	75	二、光源色和物体色的三刺激值 .....	92
第一节 辐射量和光学量及其单位 .....	75	第九节 CIE 标准色度学系统 .....	92
一、辐射量 .....	75	一、CIE1931 标准色度学系统 .....	92
二、光学量 .....	76	二、CIE1964 补充标准色度学系统 .....	98
三、光学量和辐射量间的关系 .....	77	三、CIE 标准照明体和标准光源 .....	99
第二节 光传播过程中光学量的变化		四、CIE 关于照明和观察条件的规定 .....	100
规律 .....	78	五、CIE 色度学系统表示颜色的方法 .....	101
一、点光源在与之距离为 $r$ 处的表面上		第十节 均匀颜色空间及色差公式 .....	101
形成的照度 .....	78	一、 $(x, y, Y)$ 颜色空间是非均匀	
二、面光源在与之距离为 $r$ 处的表面上		颜色空间 .....	101
形成的照度 .....	79	二、均匀颜色空间及相应的色差	
三、单一介质元光管内光亮度的		公式 .....	102
传递 .....	79	习题 .....	104
四、光束经界面反射和折射后的		<b>第六章 光线的光路计算及像差</b>	
亮度 .....	79	<b>理论</b> .....	105
五、余弦辐射体 .....	81	第一节 概述 .....	105
		一、基本概念 .....	105

二、像差计算的谱线选择	106	七、显微镜的物镜	145
第二节 光线的光路计算	106	第四节 望远镜系统	145
一、子午面内的光线光路计算	107	一、望远系统的分辨率及工作放大率	146
二、沿轴外点主光线细光束的光路计算	109	二、望远镜的视场	147
三、计算举例	110	第五节 目镜	148
第三节 轴上点的球差	111	第六节 摄影系统	150
一、球差的定义和表示方法	111	一、摄影物镜的光学特性	150
二、球差的校正	113	二、摄影物镜的景深	152
第四节 正弦差和彗差	115	三、摄影物镜的类型	152
一、正弦差	115	四、数码相机 (digital camera)	154
二、彗差	117	第七节 投影系统	155
第五节 场曲和像散	118	一、基本参数	155
一、场曲与轴外球差	118	二、投影物镜的结构型式	156
二、像散	120	三、照明系统	156
第六节 畸变	121	第八节 变焦距光学系统	157
第七节 色差	123	一、变焦距光学系统的原理	157
一、位置色差、色球差和二级光谱	123	二、变焦距系统的变焦方程	159
二、倍率色差	125	三、机械补偿变焦系统	162
第八节 像差特征曲线与分析	126	第九节 光学系统的外形尺寸计算	164
一、像差特征曲线	126	一、转像系统和场镜	164
二、像差特征曲线分析	127	二、带有对称透镜转像系统的望远镜	165
第九节 波像差	129	习题	169
习题	131	<b>第八章 现代光学系统</b>	171
<b>第七章 典型光学系统</b>	133	第一节 激光光学系统	171
第一节 眼睛及其光学系统	133	一、高斯光束的特性	171
一、眼睛的结构——成像光学系统	133	二、高斯光束的传播	172
二、眼睛的调节及校正	133	三、高斯光束的透镜变换	173
三、眼睛——辐射接收器	135	四、高斯光束的聚焦和准直	175
四、眼睛的分辨率	135	第二节 傅里叶 (Fourier) 变换光学系统	176
五、眼睛的对准精度	136	一、相干光学处理系统	176
六、眼睛的景深	136	二、傅里叶变换物镜的光学设计要求及结构型式	177
七、双目立体视觉	137	第三节 扫描光学系统	178
第二节 放大镜	138	一、扫描方程式	178
一、视觉放大率	138	二、常用光学扫描系统	179
二、光束限制和线视场	139	三、扫描物镜—— $f\theta$ 物镜	180
第三节 显微镜系统	140	第四节 光纤光学系统	181
一、显微镜的视觉放大率	140	一、阶跃型光纤的基本原理	181
二、显微镜的线视场	141	二、梯度折射率光纤	183
三、显微镜的出瞳直径	141	三、光纤束的传光、传像特性	186
四、显微镜的分辨率和有效放大率	141		
五、显微镜的景深	142		
六、显微镜的照明方法	143		

四、光纤光学系统的构成	189	一、望远物镜和显微物镜的像差公差	216
第五节 红外光学系统	191	二、望远目镜和显微目镜的像差公差	217
一、红外光学材料	192	三、照相物镜的像差公差	218
二、红外光学系统的探测器	193	习题	218
三、红外光学系统的结构型式	193	<b>第十章 光学设计</b>	219
四、红外光学系统的冷阑与冷阑效率	195	第一节 $PW$ 形式的初级像差系数	219
五、红外光学系统的无热化设计	196	一、 $PW$ 的定义及 $PW$ 形式的初级像差系数	219
第六节 特殊面型及特殊结构光学系统	196	二、薄透镜系统初级像差的 $PW$ 表示式	221
一、自由曲面光学系统	196	第二节 薄透镜系统的基本像差参量	221
二、折/衍混合成像光学系统	198	一、对像差参量 $P$ 、 $W$ 进行规化	222
三、离轴反射式光学系统	200	二、对物体位置进行规化	222
四、微透镜及微透镜阵列	201	三、规化色差系数 $\overline{C}_1$	223
五、自适应光学系统	201	四、用规化像差参量 $\overline{P}$ 、 $\overline{W}$ 表示的初级像差系数	224
习题	203	第三节 双胶合薄透镜组的基本像差参量与结构参数的关系	224
<b>第九章 光学系统的像质评价</b>	204	一、双胶合薄透镜组的独立结构参数	224
第一节 瑞利判断与波前图	204	二、基本像差参量 $\overline{P}^\circ$ 、 $\overline{W}^\circ$ 和 $\overline{C}_1$ 与结构参数的关系	225
一、瑞利判断 (Rayleigh Judgement)	204	三、 $\overline{P}^\circ$ 、 $\overline{W}^\circ$ 与玻璃材料的关系	226
二、波前图 (Wavefront Map)	205	四、求解双胶合薄透镜组结构参数的步骤	227
第二节 中心点亮度与能量包容图	205	第四节 单薄透镜的 $\overline{P}^\circ$ 、 $\overline{W}^\circ$ 和 $\overline{C}_1$ 与结构参数的关系	228
一、中心点亮度 (Brightness of Center Disk)	205	第五节 用 $PW$ 方法求解初始结构参数实例	229
二、能量包容图 (Encircled Energy)	205	一、双胶合物镜的初始结构设计	229
第三节 分辨率与点扩散函数	206	二、双分离物镜的初始结构设计	234
一、分辨率 (Resolving Power)	206	第六节 光学系统的像差校正方法	236
二、点扩散函数 (Point Spread Function)	208	一、系统中各光组 (以至各面) 的像差分布合理, 尽量减小高级像差	237
第四节 星点检测法与点列图	208	二、系统的像差具有合理的匹配	237
一、星点检测法 (Star Test)	208	三、改变单个面的曲率半径	237
二、点列图 (Spot Diagram)	209	四、整体弯曲	237
第五节 光学传递函数评价成像质量	210	五、利用特殊位置的透镜或透镜组的像差特性	237
一、利用 MTF 曲线来评价成像质量	211	六、利用对称型结构的像差特性, 成	
二、利用 MTF 曲线的积分值来评价成像质量	211		
第六节 其他像质评价方法	212		
一、方均根 (Root-Mean-Square, RMS) 统计评价	212		
二、光程差曲线与光线差曲线	213		
三、照度分析与光谱分析	214		
四、杂散光分析	215		
第七节 光学系统的像差公差	216		

对地修改结构参数	238	第九节 He-Ne 激光光束聚焦物镜优化设计	
七、增加胶合面, 校正色差或单色像差	238	实例	250
八、更换玻璃, 校正色差或单色像差	238	一、设计任务	250
九、加入无光焦度校正板	238	二、镜头片数及玻璃选择的考虑和初步分析	250
十、移动光阑至合适的位置	238	三、高折射率双片透镜	252
十一、通过拦光, 改善轴外点成像质量	238	四、小结	258
十二、加入非球面	238	第十节 激光扫描物镜优化设计实例	258
第七节 光学系统的优化设计	238	一、设计要求	258
一、概述	238	二、优化设计过程与结果	259
二、光学镜头设计中常用优化方法的数学原理	240	第十一节 非球面镜头优化设计实例	269
三、阻尼因子 $p$ 、权因子 $\mu_j$ 和评价函数 $\phi$	241	一、概述	269
四、边界条件	243	二、非球面激光聚焦物镜优化设计实例	271
五、小结	244	三、孔径角 $U' = 61^\circ$ 、后工作距 $l' \geq 20\text{mm}$ 的非球面聚光镜的优化设计	275
第八节 $-5\times$ 显微物镜的优化设计实例	244	习题	285
一、方法 1	244	上篇习题参考答案	287
二、方法 2	246	上篇主要参考文献	290

## 下 篇 物 理 光 学

第十一章 光的电磁理论基础	291	二、金属表面的反射	314
第一节 光的电磁波性质	291	第四节 光的吸收、色散和散射	316
一、电磁场的波动性	291	一、光的吸收	316
二、平面电磁波及其性质	294	二、光的色散	318
三、球面波和柱面波	297	三、光的散射	321
四、光波的辐射和辐射能	298	第五节 光波的叠加	323
第二节 光在电介质界面上的反射和折射	300	一、波的叠加原理	323
一、电磁场的连续条件	300	二、两个频率相同、振动方向相同的单色光波的叠加	324
二、光在两电介质分界面上的反射定律和折射定律	301	三、驻波	326
三、菲涅耳公式	302	四、两个频率相同、振动方向互相垂直的单色光波的叠加	327
四、反射和折射时的振幅关系	304	五、两个不同频率的单色光波的叠加	330
五、相位变化	305	第六节 光波的傅里叶分析	332
六、反射比和透射比	306	一、非简谐周期波的傅里叶级数表示	332
七、反射和折射时的偏振特性	307	二、非周期波的傅里叶积分表示	334
八、全反射	309	三、实际光源发出的光波的分析	335
第三节 光在金属表面的反射和透射	313		
一、金属中的光波	313		

习题	337	四、圆孔的夫琅和费衍射	395
<b>第十二章 光的干涉和干涉系统</b>	<b>340</b>	第四节 光学成像系统的衍射和分辨本领	397
第一节 光波干涉的条件	340	一、成像系统的衍射现象	397
第二节 杨氏干涉实验	342	二、在像面观察的夫琅和费衍射	398
一、杨氏干涉条纹的分析	342	三、成像系统的分辨率	399
二、两个单色相干点源在空间形成的干涉场	344	第五节 多缝的夫琅和费衍射	401
第三节 干涉条纹的可见度	344	一、多缝衍射的强度分布公式	401
一、干涉条纹可见度的定义	345	二、多缝衍射图样特征	402
二、影响条纹可见度的因素	345	第六节 衍射光栅	403
第四节 平板的双光束干涉	349	一、光栅的分光性能	404
一、干涉条纹的定域	349	二、正弦(振幅)光栅	406
二、平行平板产生的等倾干涉	349	三、闪耀光栅	408
三、楔形平板产生的等厚干涉	352	四、阶梯光栅	409
四、斐索干涉仪和迈克耳逊干涉仪	354	五、体光栅	410
第五节 平行平板的多光束干涉及其应用	357	第七节 二元光学元件	412
一、平行平板的多光束干涉	357	一、二元光学概述	412
二、法布里-珀罗干涉仪	359	二、二元光学元件的结构、特性与制造	412
三、光学薄膜与干涉滤光片	362	三、二元光学元件应用举例	416
第六节 现代干涉技术和干涉系统	367	习题	416
一、外差干涉和泰曼-格林系统	368	<b>第十四章 傅里叶光学</b>	<b>421</b>
二、剪切干涉和马赫-曾德系统	369	第一节 平面波的复振幅分布和空间频率	421
三、傅里叶变换光谱仪	371	一、光场中任一平面上的复振幅分布	421
四、用于制作光学元件的干涉系统	372	二、复振幅分布的空间频率及物理意义	422
习题	373	第二节 复杂复振幅分布及其分解	423
<b>第十三章 光的衍射</b>	<b>378</b>	一、单色波场中复杂的复振幅分布	423
第一节 光波衍射的基本理论	378	二、复杂复振幅分布的分解	425
一、光的衍射现象	378	第三节 光波衍射的傅里叶分析方法	425
二、惠更斯-菲涅耳原理	379	一、夫琅和费衍射与傅里叶变换的关系	426
三、菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	380	二、夫琅和费衍射图样的特点	427
四、巴比涅原理	381	三、夫琅和费衍射的傅里叶变换处理实例	428
五、基尔霍夫衍射公式的近似	382	四、菲涅耳衍射的傅里叶变换处理	433
第二节 菲涅耳衍射	384	第四节 透镜的傅里叶变换性质和成像性质	433
一、菲涅耳波带法	384	一、透镜的透射函数	434
二、菲涅耳圆孔衍射	386		
三、菲涅耳圆屏衍射	386		
四、菲涅耳波带片(菲涅耳透镜)	386		
五、泰伯(Talbot)效应	389		
第三节 典型孔径的夫琅和费衍射	390		
一、夫琅和费衍射公式的意义	391		
二、矩孔衍射	392		
三、单缝衍射	394		

二、透镜的傅里叶变换性质	434	一、光在晶体表面的折射定律和反射定律	484
三、透镜的成像性质	436	二、光在单轴晶体中传播方向的确定	484
第五节 相干成像系统分析及相干传递函数	437	第五节 晶体偏振器件	489
一、成像系统的普遍模型	438	一、偏振棱镜	489
二、成像系统的线性和空间不变性	438	二、波片	491
三、扩展物体的成像	439	三、补偿器	492
四、相干传递函数 (CTF)	439	四、退偏器	493
第六节 非相干成像系统分析及光学传递函数	442	第六节 偏振的矩阵表示	494
一、非相干系统的成像	442	一、偏振光的琼斯矢量表示	494
二、光学传递函数 (OTF)	443	二、正交偏振	496
三、OTF 与 CTF 的关系	444	三、偏振器件的琼斯矩阵表示	496
四、衍射受限系统的 OTF	445	第七节 偏振光的变换和测定	499
第七节 阿贝成像理论与波特实验	447	一、偏振光的变换	499
一、阿贝成像理论	447	二、偏振光的测定	500
二、波特实验	449	第八节 偏振光的干涉	502
第八节 光学信息处理	451	一、平行偏振光的干涉	503
一、相干光学信息处理	452	二、会聚偏振光的干涉	506
二、非相干光学处理	456	三、偏光干涉仪	507
三、白光信息处理	458	第九节 磁光、电光和声光效应	509
第九节 全息术	459	一、旋光现象和磁致旋光效应	510
一、全息术的原理	460	二、电光效应	514
二、基元全息图	461	三、声光效应	520
三、全息术的特点	464	第十节 液晶	523
四、全息术的应用	464	一、液晶的光学各向异性性质	523
习题	468	二、液晶的电光效应	525
<b>第十五章 光的偏振和晶体光学</b>		三、液晶的应用	527
<b>基础</b>	471	习题	529
第一节 偏振光概述	471	<b>第十六章 导波光学基础</b>	533
一、偏振光和自然光	471	第一节 光在平板波导中的传播	533
二、产生线偏振光的方法	471	一、平板光波导的射线理论	533
三、马吕斯定律和消光比	473	二、平板光波导的波动理论	536
第二节 光在晶体中的传播	473	三、耦合模理论	538
一、晶体的双折射现象	473	第二节 光在光纤中的传播	540
二、晶体的各向异性和介电张量	474	一、光纤的结构特性	540
三、单色平面波在晶体中的传播	475	二、阶跃光纤的射线理论	541
第三节 晶体光学性质的几何表示	478	三、阶跃光纤的模式理论	543
一、折射率椭球	478	四、光纤的传输损耗与色散	545
二、法线面、光线面和波矢面	479	第三节 导波光学的应用	546
三、单轴晶体光学性质的几何表示	481	一、导波光学的典型器件与应用	546
第四节 光波在晶体表面的折射和反射	484	二、光纤的应用	547
		习题	549

<b>第十七章 光子学基础</b> .....	550	三、压缩态光	564
<b>第一节 光的量子性</b> .....	550	<b>第六节 应用举例</b> .....	565
一、光电效应与爱因斯坦光子学说 .....	550	一、量子保密通信 .....	565
二、光的波粒二象性 .....	552	二、光子晶体激光器和光子晶体滤 波器 .....	566
<b>第二节 光谱振腔的辐射模</b> .....	552	三、光子学的应用前景 .....	568
一、谐振腔及其特性 .....	552	习题 .....	569
二、腔模 .....	553	<b>下篇附录</b> .....	570
<b>第三节 光子的特性</b> .....	555	附录 A 矢量分析及场论的主要公式 .....	570
一、光子的能量 .....	555	附录 B 二维傅里叶变换关系及其基本 定理 .....	571
二、光子的定位 .....	556	附录 C 几个常用函数的定义及傅里叶 变换 .....	572
三、光子的动量 .....	556	附录 D 卷积和相关 .....	574
四、光子的偏振 .....	556	附录 E $\delta$ 函数 .....	575
五、光子的自旋 .....	557	附录 F 贝塞尔函数 .....	578
<b>第四节 光子流</b> .....	558	附录 G 矩阵 .....	580
一、光子简并度 .....	558	<b>下篇习题参考答案</b> .....	583
二、平均光子通量 .....	558	<b>下篇主要参考文献</b> .....	589
三、光子通量的随机性 .....	559		
四、光子数的统计分布 .....	560		
<b>第五节 光的量子态</b> .....	561		
一、光的量子态及其描述 .....	561		
二、相干态光 .....	563		

# 上篇 几何光学与光学设计

## 第一章 几何光学基本定律与成像概念

几何光学是以光线作为基础概念，用几何的方法研究光在介质中的传播规律和光学系统的成像特性的一门学科。本章首先介绍几何光学的基本概念和基本定律，建立光学系统成像的基本概念和完善成像条件，然后讨论光学系统的光路计算、近轴光学系统和球面光学系统的成像。

### 第一节 几何光学的基本定律和原理

#### 一、光波与光线

光就其本质而言是一种电磁波，光波的频率比普通无线电波的频率高，光波的波长比普通无线电波的波长短。把电磁波按其波长或频率的顺序排列起来，形成电磁波谱，如图 1-1 所示。光波波长范围大致为  $1\text{mm} \sim 10\text{nm}$ ，其中波长在  $380 \sim 760\text{nm}$  之间的电磁波能为人眼所感知，称为可见光。波长大于  $760\text{nm}$  的光称为红外光，而波长小于  $400\text{nm}$  的光称为紫外光。光波在真空中的传播速度为  $c \approx 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ ，在介质中的传播速度都小于  $c$ ，且随波长的不同而不同。

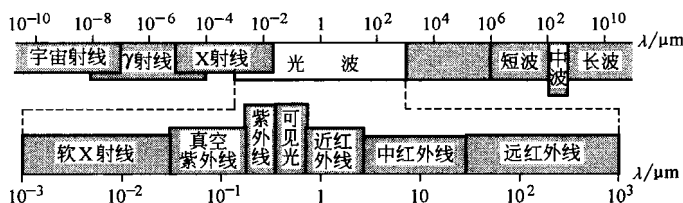


图 1-1 电磁波谱

可见光随波长的不同而引起人眼不同的颜色感觉。我们把具有单一波长的光称为单色光，而由不同单色光混合而成的光称为复色光。单色光是一种理想光源，现实中并不存在。激光是一种单色性很好的光源，可以近似看作单色光。太阳光是由无限多种单色光组成的。在可见光范围内，太阳光可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫这七种颜色的光。

通常，我们把能够辐射光能量的物体称为发光体或光源。发光体可看作是由许多发光点或点光源组成，每个发光点向四周辐射光能量。为讨论问题的方便，在几何光学中，我们通常将发光点发出的光抽象为许许多多携带能量并带有方向的几何线，即光线。光线的方向代



表光的传播方向。发光点发出的光波向四周传播时,某一时刻其振动位相相同的点所构成的等相位面称为波阵面,简称波面。光的传播即为光波波阵面的传播。在各向同性介质中,波面上某点的法线即代表了该点处光的传播方向,即光是沿着波面法线方向传播的。因此,波面法线即为光线。与波面对应的所有光线的集合称为光束。

通常,波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光线束相互平行,称为平行光束。与球面波对应的光线束相交于球面波的球心,称为同心光束。同心光束可分为会聚光束和发散光束,如图 1-2a、b、c 所示。同心光束或平行光束经过实际光学系统后,由于像差的作用,将不再是同心光束或平行光束,对应的光波则为非球面光波。图 1-2d 所示为非球面光波和对应的像散光束。

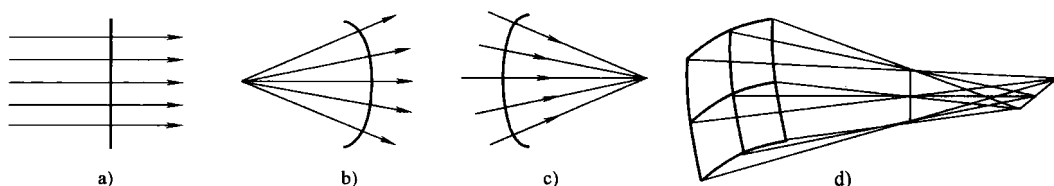


图 1-2 光束与波面的关系

a) 平行光束 b) 发散同心光束 c) 会聚同心光束 d) 像散光束

## 二、几何光学的基本定律

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为如下几个定律、现象、原理,其中“直线传播”、“独立传播”、“折射”与“反射”定律被称为四个基本定律,它们是研究光的传播现象、规律以及物体经过光学系统成像特性的基础。

### (一) 光的直线传播定律

几何光学认为,在各向同性的均匀介质中,光是沿着直线方向传播的。这就是光的直线传播定律。影子的形成、日蚀和月蚀等现象都能很好地证明这一定律。“小孔成像”即是运用这一定律的很好例子,许多精密测量,如精密天文测量、大地测量、光学测量及相应光学仪器都是以这一定律为基础的。

但这一定律是有局限性的。当光经过小孔或狭缝时,将发生“衍射”现象,光将不再沿直线方向传播。另外,光经过各向异性的晶体介质时,将产生“双折射”现象;在非均匀介质中传播时,光线传播的路径为曲线,也不再是直线。

### (二) 光的独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时,彼此互不影响,各光束独立传播,这就是光的独立传播定律。在各光束的同一交会点上,光的强度是各光束强度的简单叠加,离开交会点后,各光束仍按原来的方向传播。

光的独立传播定律没有考虑光的波动性质。当两束光是由光源上同一点发出、经过不同途径传播后在空间某点交会时,交会点处光的强度将不再是二束光强度的简单叠加,而是根据两束光所走路程的不同,有可能加强,也有可能减弱。这就是光的“干涉”现象。

### (三) 光的折射定律与反射定律

光的直线传播定律与光的独立传播定律概括的是光在同一均匀介质中的传播规律,而光的折射定律与反射定律则是研究光传播到两种均匀介质分界面上时的现象与规律。