

高等专科学学校试用教材

制版工程光学

王秋萍 曹祖植编



上海交通大学出版社

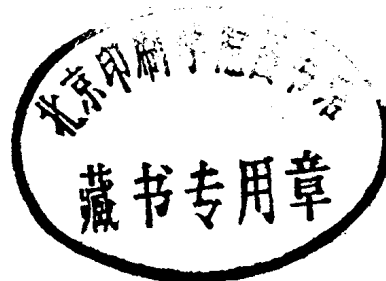
1124706

TS8

93-11

制 版 工 程 光 学

王秋萍 曹祖植 编



上海交通大学出版社

内 容 提 要

D143/32
18

本书根据印刷工业大专学校的教学大纲及历年教学实践编写而成。

全书密切结合制版印刷技术,并与大专工科院校《物理学》中的波动光学内容紧密卸接,系统论述了几何光学、物理光学的基本原理与应用;制版设备原理;光的量子性;现代光学的原理及发展。根据我国印刷专业的现状与实际需要,编写了光学系统的装配与校正、光学测量、特种光学元件及光电器件。全书着重于光学知识与制版印刷技术的应用,对制版光源、制版设备及激光原理与应用有较详细的介绍。

本书共 15 章,每章配有适当的例题与习题,是印刷工科院校的教材,亦可作为印刷中等学校和印刷技工学校教师及制版印刷研究人员的参考书,也可供设备维修人员、制版印刷技术管理人员及操作人员参阅。

沪新登字 205 号

制版工程光学

出版:上海交通大学出版社

(淮海中路 1984 弄 19 号)

发行:新华书店上海发行所

印刷:上海出版印刷高等专科学校实习工厂

开本:787×1092(毫米)1/16

印张:19

字数:466000

版次:1992 年 11 月第 1 版

印次:1992 年 12 月第 1 次

印数:1—3000

科目:264—305

ISBN7—313—01013—3/TS·8

定价:6.30 元

前 言

本书是在 1980 年上海印刷学校编写的《制版照相光学》的基础上,根据 1987 年上海出版印刷专科学校编写的“制版工程光学”教学大纲、参考国内外有关资料及历年教学经验与生产实践,重新编写而成。

《制版工程光学》是由基础课过渡到专业课的技术基础课。

本书共十五章,包括几何光学、物理光学及有关工程光学技术及其在制版印刷中的应用。编写中注意介绍光的性质与规律,同时又努力联系现代制版工程实际,并选编了习题,有助于加深对光学原理的理解和课程内容的掌握。

本书由王秋萍编写第二、三、五、六、九、十、十一、十二章并统稿全书;曹祖植编写第一、四、七、八、十三、十五章;陈夏洁编写第十四章和全书习题。

上海机械学院戈兆祥教授审订了本书,对他的热情支持与指导,深表感谢。各地印刷厂和校友对本书的编写及出版给予大力协助,谨致谢忱。

我们的学识水平有限,缺点、遗漏或错误之处,恳请批评指正。

编 者

1991 年 10 月

目 录

第一章 绪 论

第一节 课程的性质和任务	1
第二节 光的认识史	3

第二章 球面成像系统

第一节 单个球面折射在近轴区成像	7
第二节 薄透镜成像	10
第三节 物像放大率	12
第四节 理想光组的基点	15
第五节 理想光组的物像关系	17
第六节 理想光组的组合	19
第七节 薄透镜组	21
第八节 厚透镜	23
第九节 球面反射镜	25

第三章 平面成像系统

第一节 物像的坐标关系	28
第二节 平面反射镜成像	29
第三节 双平面镜 双面压缩镜	31
第四节 屋脊双反射镜(蝴蝶镜)	33
第五节 环形反射镜	35
第六节 平面折射成像	36
第七节 平行平板成像	37
第八节 反射棱镜	38
第九节 反射棱镜的展开和等效空气板	41
第十节 反射棱镜的误差	43
第十一节 反射多面棱镜(多面体)	44
第十二节 折射棱镜	45
第十三节 光楔	47

第四章 光导纤维及特种光学元件

第一节 光导纤维	51
第二节 梯度折射率透镜	54
第三节 非球面光学元件	55
第四节 菲涅耳透镜	57
第五节 网格透镜 柱镜光栅板	58

第五章 光学系统中的光阑与像差

第一节	光阑	62
第二节	孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	62
第三节	视场光阑、入射窗和出射窗	64
第四节	景深	65
第五节	远心光路	67
第六节	像差概述	69
第七节	球差	69
第八节	彗差	71
第九节	像散与像场弯曲	72
第十节	畸变	74
第十一节	色差	75
第十二节	制版物镜设计	77
第六章 制版设备的光学系统		
第一节	光源照明系统	80
第二节	制版照相机的光学系统	82
第三节	制版物镜	86
第四节	变焦距物镜	92
第五节	制版照相分色放大机的光学系统和自动倍率测定机	93
第六节	电子分色机的光学系统	98
第七节	照相排字机的光学系统	105
第八节	密度仪	108
第七章 光学测量		
第一节	概述	112
第二节	光学测量仪器简介	113
第三节	焦距和截距的测量	115
第四节	平面光学元件的角度测量	116
第五节	球面曲率半径的测量	117
第六节	折射率的测量	118
第七节	光学传递函数及其测定	118
第八节	滤光片透过曲线的测定	120
第八章 光学系统的装配与校正		
第一节	概述	123
第二节	光学系统零部件误差的来源	124
第三节	装校误差和尺寸链的计算	126
第四节	光学系统装配校正的结构	132
第九章 光学系统中光能的计算		
第一节	视见函数 光通量	135
第二节	立体角	136
第三节	发光强度	137

第四节	面发光度与照度·····	138
第五节	亮度与朗伯定律·····	142
第六节	余弦发射面的亮度·····	143
第七节	面光源产生的照度·····	144
第八节	像平面的照度·····	146
第九节	光学系统中光能损失的计算·····	148
第十节	照度计·····	149
第十章 制版光源与曝光计算		
第一节	制版光源的必备条件·····	152
第二节	黑体辐射·····	154
第三节	制版光源的特性·····	155
第四节	热辐射光源·····	158
第五节	气体放电光源的基本原理·····	160
第六节	低气压气体放电光源·····	161
第七节	高气压气体放电光源·····	165
第八节	特种光源·····	170
第九节	光学密度·····	172
第十节	制版照相曝光的基础·····	177
第十一节	直接加网获得网点阴图的曝光·····	178
第十一章 光的干涉现象的应用		
第一节	光的干涉的基本原理·····	182
第二节	平行平板的双光束干涉·····	188
第三节	制版过程中的牛顿环·····	189
第四节	多光束干涉·····	192
第五节	光学镀膜的基本原理·····	194
第六节	增透膜·····	195
第七节	增反膜·····	197
第八节	干涉滤光片·····	199
第十二章 衍射光栅与计量光栅技术		
第一节	光的衍射 惠更斯——菲涅耳原理·····	204
第二节	单缝衍射·····	205
第三节	光学成像系统的衍射和分辨本领·····	208
第四节	双缝夫琅和费衍射·····	211
第五节	衍射光栅·····	212
第六节	光栅光谱仪·····	217
第七节	计量光栅 长光栅莫尔条纹·····	218
第八节	圆光栅莫尔条纹·····	221
第九节	光电转换与光栅读数头·····	223
第十节	自动连续照相机的光栅定位系统·····	225

第十一节 电子分色机的光栅稳速系统·····	227
第十二节 制版网线量规的原理·····	228
第十三章 光学晶体及其应用	
第一节 光在单轴晶体中的传播·····	234
第二节 偏振棱镜和偏振片·····	237
第三节 波片 椭圆偏振光和圆偏振光的形成·····	241
第四节 偏振光的干涉·····	244
第十四章 光电转换及光电器件	
第一节 光电效应·····	247
第二节 光电器件基本特性·····	248
第三节 光敏电阻·····	249
第四节 光电池·····	251
第五节 光敏二极管·····	253
第六节 光敏三极管·····	255
第七节 光电倍增管·····	256
第八节 摄像管·····	259
第九节 CCD 器件 ·····	261
第十节 光电光学系统·····	263
第十一节 光电系统的匹配·····	264
第十五章 激光原理及应用基础	
第一节 激光原理·····	266
第二节 激光器的基本结构及激光的形成·····	267
第三节 激光的特性·····	268
第四节 制版技术常用激光器介绍·····	271
第五节 激光选模技术·····	273
第六节 激光调制·····	276
第七节 激光偏转技术·····	280
第八节 激光在制版技术中常用的光学系统·····	282
第九节 激光在制版技术中的应用·····	284
第十节 全息术·····	286
部分习题答案 ·····	291

第一章 绪 论

第一节 课程的性质和任务

一、课程的性质

《制版工程光学》是把光的现象和规律应用于印刷制版技术中的一门课程。它阐述制版技术中使用的光学仪器、制版设备及有关工艺过程的光学原理和技术,是由基础课过渡到专业课的课程之一,是印刷系制版专业的技术基础课程。它的先导课程是数学、物理等基础课,相关课程有《照相制版工艺原理》、《制版工艺设计》、《电子分色机基本原理》及《自动照相排版技术》等。

近年来,印刷技术不断发展,制版技术发展尤为迅速,各种新技术、新设备与光学仪器等日益广泛地应用于制版工艺,制版工程光学越来越显示了它的重要作用和广阔前景,成为印刷工业技术管理人员必需具备的基础知识。

二、制版工程光学在印刷业中的地位

我国是印刷术的发源地,早在7世纪的唐代,就已经采用雕版印刷。雕版印刷是世界印刷史上的一个重大里程碑,其原理一直沿用至今。现在应用激光能量密度高的特点,可以在金属和塑料上进行激光雕刻,代替手工雕刻,以降低劳动强度,提高雕刻精度,加快生产速度,缩短制版周期,从而使雕版印刷出现崭新的局面。据沈括《梦溪笔谈》的记载,我国宋代的毕昇,于11世纪初发明活字排版印刷,是世界印刷史上的又一个重大里程碑,在这基础上发展的铅印技术,在印刷业使用了许多世纪。直至今日,我国很多印刷厂还在采用铅印。但传统的手工铅字排版和铸版,生产工序复杂,工艺流程长,占用生产场地大,劳动强度高,还会产生铅污染。这样,铅字排版近年来逐渐被光学方法即照相排版所替代。1896年制成第一台手动照相排字机,称一代机。它是打字机和照相机相结合的产物,将字模版上的字符以手工选字方式,通过照相机在感光片的乳剂膜上曝光成像,再由感光片制成印版。这种制版方式没有热源,所以又称“冷排”,代替铅字制版时需要熔化铅合金的“热排”。1954年应用氙灯频闪曝光成像原理,研制成第二代自动照相排字机。二代机按照拍摄形式从静态拍摄发展到动态拍摄。1965年在阴极射线管成像的基础上,首创了数字化字库的第三代自动照相排字机。由于阴极射线管成像光点大,亮度低,有余辉,所需的感光时间长,影响拍摄速度。1976年将激光扫描和调制技术应用于照相排版,研制成自动激光照排机,即四代机。近半个多世纪,印刷技术正从“铅与火”向“光与电”时代的历史性转变中,但我国印刷技术却由于种种原因而落后了。近年来,急起直追,在振兴我国印刷工业方面取得较大进展。如1985年我国研制成功的第四代自动激光照排机,采用氦氖激光作为光源,声光调制器作为控制激光束的开关,声光调制器由文字信息控制,被调制的激光束通过扩束器和高速旋转的偏转器,由 F_θ 物镜汇聚到感光材料上,使

感光膜曝光成像(参见图 15-27)。在这套系统中,汉字字形的高倍率压缩技术和高保真还原技术及高分辨率汉字字形发生器,均具有国际先进水平。从以上介绍中,可以看出光学在文字排版中的地位 and 作用。再从图像制版技术的发展来看,光学也具有举足轻重的地位。书籍,报刊、杂志及包装等印刷品作为传递视觉信息的重要手段,与日益发展与普及的彩色摄影、彩色电影、彩色电视一样,迅速向彩色化方向发展。彩色复制和印刷,长期以来,一直沿用繁复冗长的手工操作,不但生产周期长,而且质量难以保证。1886 年,在美国首先采用玻璃网屏,以间接加网法进行连续调图像的制版,从而获得印刷品的中间层次。但玻璃网屏加网,使原稿的层次损失很多。那时候用的光源为碳弧灯,发光不稳定,需要经常调节,而且污染环境。到了本世纪 70 年代,采用脉冲氙灯等强光源,并用接触网屏以直接加网法制作分色软片,由此复制的图像,层次大为丰富。这样的彩色复制工艺,用手工和照相方法来完成,其中的分色、彩色校正、层次校正等,需要高超的操作技术和实践经验,工序复杂而效率低。现在用电子扫描分色机来承担这些传统的手工操作和照相制版方法,它是由光学、精密机械和电子技术相结合的多功能制版设备。电子扫描分色机根据照相分色的原理,对彩色原稿进行输入扫描、光电转换、模拟计算、数字计算、激光挂网、电光转换、曝光记录等过程,实现颜色的分解,色彩、层次的校正、黑板计算、底色去除、中性灰平衡,尺寸缩放等工艺,一次可分出 1~4 色的连续调或半色调的阳图或阴图底片。而且质量好,图像清晰、色彩鲜艳,不需大量修正,已成为彩色制版的重要设备。电子扫描分色机的出现,为彩色制版的标准化、规范化、数据化以及自动化创造了有利条件,给彩色复制业以很大推动,使之面貌一新。电子扫描分色机,从本世纪 50 年代初问世起,就受到彩色复制业的欢迎和高度重视。随着光学和电子技术的飞跃发展,经历了一个从低级到高级逐步革新的过程,它的第一代和第二代机已被第三、四代机所淘汰。现在各种电子扫描分色机已被广泛应用于彩色复制行业,而第四代的电子扫描分色机正在向全能化的方向发展。所谓全能化,就是把彩色原稿的复制工艺,前后各环节串联起来,统筹解决,如分色前的效果预显示即打样,整页拼版和图像信息的存储等。其中各个环节的革新,都直接和间接地与光学有关。近年来又研制成激光直接制版机,激光复印机,并向“即期发行”的方向迈进。所谓即期发行,是把书刊的全部信息存储在光盘里,然后根据书刊的销售量,立即用高速激光印字机印出,当场供应给读者。这样,就有可能将出版、印刷和发行变成三位一体。以上这些例子表明,印刷业的发展离不开光学,光学技术的发展,一步步地推动印刷业的技术革新,迅猛地促进着印刷技术现代化的进程。

三、学习《制版工程光学》的任务

1. 课程的任务

本书将较为系统地介绍几何光学、物理光学、薄膜光学、光栅技术、光电和电光转换器件、激光技术等基础知识,以及光学测量、光学系统装配校正等基本技能,为分析和解决制版技术中的一般光学问题,并为掌握不断发展的制版新技术及研制制版印刷中的光学和光电部件或设备打下一定的光学基础。

2. 光学系统的功用

为了明确本课程的任务,下面扼要介绍光学系统的功用。制版设备,一般说来,由机械结构、电气系统及光学系统组成。光学系统在制版设备中的功用,主要有以下一些方面:

(1) 成像 在制版工艺过程中,经常要遇到物体经光学系统成像。例如制版镜头将原稿

在感光膜上成像,以拍摄制版用的底片。电子分色机的扫描物镜将原稿逐点成像在光电倍增管的光孔上,进行电子扫描等。这些都是光学系统成像的作用。

(2) 变倍 物体通过光学系统成像,像的大小根据技术要求往往被放大或缩小。只有少数情况像和物的尺寸一样。除了像面均匀缩放,应用柱面镜等光学系统,还可以在像面的横向和纵向得到不同的放大率,从而使正方形的字体变成偏体或长体,这就是照相排字机中的变形镜头。

(3) 转移 光学系统具有将像面根据需要进行反转和移位的作用。例如晒版使用的阴图正片,若制版照相机上装有转像棱镜,这样拍得的正片可直接用来晒版。否则图像是反的,还要经过“翻底”工艺,即将感光膜加厚后浸泡,再揭下翻一个面,贴到另一玻璃版表面上,才可用来晒版。在照相排字机和电子分色机中,利用棱镜、透镜和光学纤维,使像反转和移位,达到结构紧凑,设计合理的目的。

(4) 传递 光作为传递信息的媒介,通过光学系统传递光信号,并采用传递函数评价光学系统的质量。信号经光电、电光的转换,打破了光和电的界限,发展成为一门新兴的光通信技术。光通信与电通信相比,具有许多优越性而得到广泛的重视和应用,对印刷业将产生非常深远的影响。

(5) 解析 通过滤光镜、光栅、分光棱镜或色散棱镜等的作用将复色光分解。将复色光分解成3原色是电子扫描分色机,将彩色原稿拍摄成分色片的基本原理。各种单色仪和光谱仪也是按照对光的解析作用设计制造的。

(6) 记录 照相是传统的光学记录方法,即感光膜经光化作用将文字、符号、图像等信息记录下来,以便保存。由于激光技术的发展,近年来,制成可靠性高、容量大、记录和再现快的激光记录介质。还有把光学信息存储在象唱片那样的圆盘上,这种圆盘称为光盘。一张光盘可以存储几百万字的信息。

(7) 测量 通过光学系统的成像、放大、移位、偏转等作用 and 光的干涉、衍射、偏振等性质,对几何量或物理量进行测量,可以达到较高的测量精度。在制版工艺过程中,常用光学方法进行测量。光学测量是应用光学的重要分支。

(8) 加工 利用大功率激光器的光能,经光学系统聚焦后,进行打孔、切割和雕刻,对材料精密加工,雕刻印版。激光雕刻机能简化制版工艺,缩短制版周期。

光学系统对制版工艺和设备的主要功用,也可概括为“察、倍、转、移、析、录、测、工”八个字。成像和观察、变倍、转像、移像、录像等结合在一起,传递的功用也可看作转和移的功用。必须指出,以上所说,只是大致描述光学系统的功用,它的功用还远不止这些,随着光学技术的进步,还将变得更加重要。

第二节 光的认识史

光学是一门古老而又年轻、富有生命力的学科。在开始学习本课程之际,概略地了解一下人们对光的认识史,对今后的学习是很有益处的。

人类是从“人怎能看见周围物体”这样的问题开始研究光的。古希腊的哲学家欧几里德(Euclid 公元前330年至前275年)认为人所以能看见周围物体,是由于从人眼发出视线,视线的作用犹如触须能触摸物体一样。如果视觉是由视线探索的结果,那么怎样去解释人看不

见黑暗中的物体呢?和欧几里德的观点相反,早在我国先秦时代,墨翟(公元前468—376年)在他的代表作《墨经》中载有“人以目见,而目以火见”的说法。意指物体发出光线(火)射入眼后,才产生视觉。墨翟的观点正确且比欧几里德的观点要早一百多年。《墨经》中有关影的定义与形成、光与影的关系、光的直进性、针孔成像、平面镜、凹球面镜和凸球面镜的物像关系等,总结了八条之多,称得上是世界上有关光学知识的最早记录。宋代沈括(1031—1095年)在《梦溪笔谈》中描述了平面镜、球面镜的成像规律,凹面镜焦点位置和曲率半径的关系,虹和海市蜃楼的成因。那时对光线的几何性质已有一定认识,但折射定律直到1621年才由荷兰的斯涅耳(Snell, 1591—1626年)从实验总结得到。从墨翟开始的近二千年漫长岁月,是光学发展的萌芽时期,那时对光的本性、亮度和颜色等还是很无知的。

17世纪下半叶出现了光的微粒说和波动说之争,人类才认真开始了对光的本性的研究。

微粒说把光看成一束微粒,在均匀介质中作匀速直线运动,能自由穿过透明介质,撞到视网膜上可以引起视觉,牛顿主张微粒说。微粒说很自然地解释了光的直线传播和反射定律,在解释折射定律时,则须假定在两介质界面层小范围内,介质对微粒的作用力发生跃变,它改变了微粒过界面时速度的法向分量,但不会改变速度的切向分量,微粒过界面层后以另一种速率作匀速直线运动。

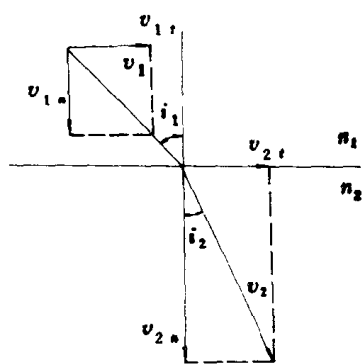


图1-1 微粒说对折射定律的解释(设 $n_1 < n_2$)

图1-1中 v_1 、 v_2 分别表示光微粒在折射率为 n_1 、 n_2 的介质中的速度(光速),用脚标 t 、 n 分别表示速度在界面切向、法向上的分量; i_1 、 i_2 分别表示入射角、折射角。

按微粒通过界面时速度的切向分量不变,

$$v_{1t} = v_{2t}, \text{ 得: } v_1 \sin i_1 = v_2 \sin i_2$$

即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1-1)$$

式(1-1)是按微粒说导出的折射定律。实验事实是:光由折射率较小的介质(称光疏介质)进入折射率较大的介质(称光密介质)时,靠近法线方向折射。图1-1画的就是这种情形($n_1 < n_2$, $i_2 < i_1$),按式(1-1)应有 $v_2 > v_1$ 。换句话说,按微粒说,光由光疏介质进入光密介质时,光速增大。

1678年惠更斯在《论光》一文中,首次提出了光的机械波动说,波动说以光现象和声现象相类似为主要依据。为了说明波在空间传播的机制,惠更斯提出一种假设(惠更斯原理):波所到达的各点都可以看作次波波源,这些次波的包络面就是新的波面。用惠更斯原理能很自然解释光的直线传播和反射定律,但在解释折射定律时,却得出和式(1-1)相反的结果。

1678年惠更斯在《论光》一文中,首次提出了光的机械波动说,波动说以光现象和声现象相类似为主要依据。为了说明波在空间传播的机制,惠更斯提出一种假设(惠更斯原理):波所到达的各点都可以看作次波波源,这些次波的包络面就是新的波面。用惠更斯原理能很自然解释光的直线传播和反射定律,但在解释折射定律时,却得出和式(1-1)相反的结果。

图1-2中 AB 是入射平面波波面, DC 是折射平面波波面,令 Δt 为波面 AB 传播到 DC 所需时间, $BC = v_1 \Delta t$, $AD = v_2 \Delta t$, 而:

$$\sin i_1 = \frac{BC}{AC} = \frac{v_1 \Delta t}{AC}, \sin i_2 = \frac{AD}{AC} = \frac{v_2 \Delta t}{AC}$$

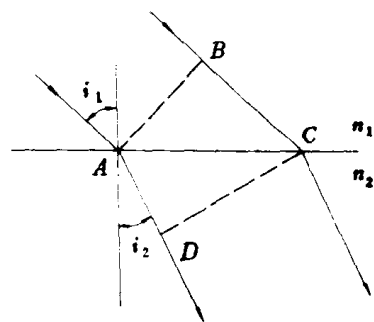


图1-2

因此

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-2)$$

式(1-2)是按波动说导出的折射定律,和式(1-1)不同。若 $n_1 < n_2$, $i_2 < i_1$, 按式(1-2)应有 $v_2 < v_1$ 。换句话说,按波动说,光由光疏介质进入光密介质时,光速减小。遗憾的是,在17、18世纪虽然从天文观测中粗略地得知真空中的光速,当时还没有测量不同介质中光速差异的科技水平。无法从判断式(1-1)、式(1-2)的正确性来裁决微粒说和波动说之争。再有,微粒说把光看成是一束发射的微粒,为什么两个普遍光源发出的光相交时,不改变各自的运动方向呢?微粒说对此无法解释。此外,微粒说还有一些其它困难。由于牛顿在天文学、力学方面的成就而享有极高威望,人们还是比较相信微粒说。虽然作为波动光学的基本现象(干涉、衍射和偏振)在17世纪中、后期先后被发现,但微粒说在17世纪和18世纪还是占统治地位。

19世纪开头的约30多年内,波动说走向复兴:1801年杨氏实现了光的双缝干涉,并提出了“光的干涉原理”;1808年吕斯发现光的横波性;1815年法国工程师菲涅耳在前人的工作基础上,用次波干涉原理发展和完善了光的机械波动说,使波动说理论臻于完成。19世纪上半叶波动说已取代微粒说占据了主导地位。1850年傅科测得光速在水和空气中的比值约为2/3。进一步肯定了波动说。

光的机械波动说本身包含着致命的弱点。机械波只能在介质中发生和传播,因此光的机械波动说必须假设一种宇宙中无所不入的介质——以太。光是横波,而机械横波只能在固体中产生,按弹性力学理论:固体的切变模量与其密度之比等于横波速度的平方。

为了解释光何以有 3.0×10^5 km/s 的高速度,就必须假定作为光波的载体——以太的切变弹性很大(比钢铁大千万倍),而密度却要求是微不足道的,否则难以理解何以物体在以太中运动,未受到任何可觉察的阻力;为了解释光在不同介质中有不同的速度,还要认为以太的特性随介质而变;为了说明光波中完全没有纵振动(固体介质中激起横波时,一般同时会激起纵波,而且后者传播速度要大些)还得承认以太具有更奇特的性质……等等。总之,以太有许多难以理解和自相矛盾的人为性质。

1865年麦克斯韦建立了光的电磁理论,断言光是一种电磁现象,并预言电磁波存在。

电磁波是一种横波,见图1-3。其中电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H 和传播速度 v 互相正交, E 和 H 以相同位相在互相正交的平面内振动。电磁波在真空中的传播速度即真空中光速 c 为 2.99792458×10^8 m/s。光在折射率为 n 的介质中的传播速度为 $v = c/n$ 。

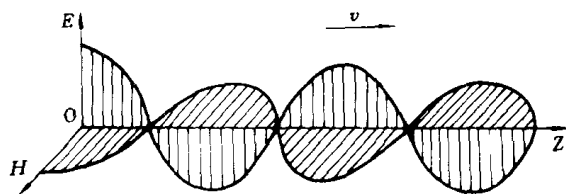


图1-3

19世纪末到20世纪初,研究涉及光的发射、吸收等光与物质相互作用的一系列问题时,例如:热辐射、光电效应、 x 光的散射、弱光流起伏……等等,用光的经典电磁波理论来解释遇到了严重困难。1900年普朗克为解释黑体辐射的规律,提出了微观振子能量量子化的观念。1905年爱因斯坦在此基础上提出了光的量子理论:光是一种由光子组成的物质,光子具有一定的能量、动量和质量。频率为 ν 的光是由能量为 $h\nu$ 的光子组成, h 为普朗克常数。

然而,光子并不同于遵守经典力学的粒子。光的量子理论不是简单地回到微粒说,而是否

定之否定,是人类对光本性认识的更高水平的飞跃。20 世纪初光子理论的成功,使物理学面临一个令人费解的严重局面。到底光是电磁波还是光子呢?现代量子理论认为光同时具有波动和粒子两重性质,即波—粒两象性。其它微观粒子也是这样。“粒子”和“波动”原本都是经典物理中不可兼容的概念。现代量子理论说光具有粒子性,意即光的能量($h\nu$)、动量(h/λ)、质量($h\nu/c^2$)的确是一份份集中分布在光子上,而不是连续地分布在波场所在的整个空间;说光具有波动性,意即只能指出光子在空间各点出现的概率而不能同时指出光子的坐标、动量及其轨迹。光子的统计分布,和波动理论算出的振幅平方分布是一致的。因此波—粒两象性在统计的意义上统一起来了。但是必须强调指出:量子理论中的粒子性主要指作用的定域性、整体性和不连续性,轨道的概念不复存在;波动性主要指传递过程的空间弥散性和状态可叠加性。

应该指出,到目前为止,人类对光的本性虽然有了比较深刻的认识,但认识是无止境的,只能从不断的科学实践中才能日益接近更完善的认识。

本世纪 50 年代以来,在激光技术不断发展的带动下,光学这门古老的科学新枝茁壮成长,成为现代科学技术最活跃的前沿阵地之一。

第二章 球面成像系统

本章应用几何光学中光线的传播规律,研究光学系统成像。光学系统可分为共轴球面系统和平面系统两类。实际的光学系统均由上述两类系统组成。本章仅讨论球面成像系统及高斯光学。

光学系统中,单个折射球面不能成为光学零件,但透镜是由折射球面组成的。在光学设计时必须对各折射面进行计算和分析。因此单个球面的折射和反射,是研究光学系统成像的基础。先从单个折射球面入手,然后讨论薄透镜成像的特征及规律。在此基础上,进一步由薄透镜过渡到实际透镜的成像规律。光学系统在近轴区成像是完善的,本章仅讨论近轴区成像,即高斯光学。

第一节 单个球面折射在近轴区成像

如图 2-1 所示, OM 为折射球面,它是折射率为 n 与 n' 两种介质的光滑分界面。 C 是球心, OC 为球面半径,标以 r 。对于单个球面,通过球心的直线就是光轴。从光轴上任一点 A 发出的一束光线,经球面折射后会聚于 A' 。 A 点是入射到光学系统的一束同心光束的交点,称物点。 A' 为出射同心光束的交点,称像点。

已知折射面结构参数 n 、 r 、 n' , 如何由 A 来确定 A' 的位置? 由于球面的轴对称性, 只需讨论几条光线即可。如图, 选择一条沿光轴入射、入射角为零的光线 AO , 与另一条任选光线 AM 。包含物点与光轴的光路截面称子午面, 亦称含轴面。在子午面内, 入射光线 AM 位置可用两个参量, 即物方截距 l 和物方孔径角 u 表示。物方截距(物距) l 为入射光线与光轴交点(物点 A)到球面顶点 O 的距离, 物方孔径角 u 为入射光线与光轴的夹角。同样, 折射光线 MA' 也可用两个相应的参量表示: 像方截距(像距 l') 是折射光线 MA' 与光轴交点 A' 至顶点 O 的距离, 像方孔径角 u' 为折射光线与光轴的夹角。通常, 像方空间的量值以物方对应值相同字母, 并在右上方加撇“'”表示。

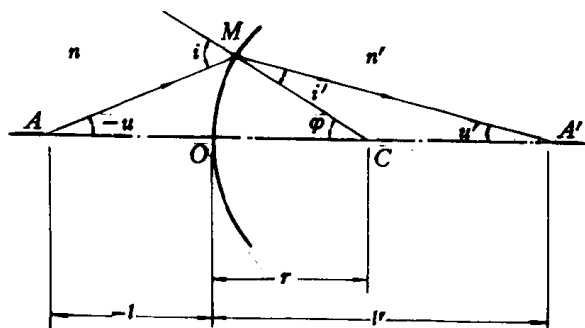


图 2-1 光线通过单个球面的折射

显然, 上述对光线位置的规定是不明确的, 如光线与光轴交点在顶点之左、右, 光线在光轴之上、下, 折射球面之凸、凹等均未区分。为确切描述光路的各种量值和光组的结构参数, 并使所导出的公式在各种情况下都能适用, 必须对各种量值规定其正负。本书所采用的符号规则如下:

沿轴线段: 是由点的运动所构成。如截距 l , l' , 球面曲率半径 r 等。由指定的点(如折射面

或反射面的顶点)为原点,沿光线进行方向运动所构成的线段为正,反之为负。光线的传播方向规定自左向右。

垂轴线段:以光轴为准,轴上者为正,轴下为负。

角度:是由轴线绕一定的点旋转而成,如孔径角 U 、 U' 和 u 、 u' ,入射角 I 、 i 和折射角 I' 、 i' ,球心角 φ 等。由指定的轴(光轴)起始,依顺时针方向旋转所构成的锐角为正,反之为负。

入射角 i , 折射角 i' :以光线按锐角方向转向法线,依顺时针方向旋转所构成的锐角为正,反之为负。

图 2-1 就是按上述规定标记的,通常,光路图上只列出线段或角度的绝对值,对于负值须在该量的字母前加负号。严格遵守符号规则,才能依据光路图导出正确而有普遍意义的公式并在应用公式时获得正确结果。

下面根据光路图 2-1,推导单球面折射的近轴区成像公式。

在 $\triangle AMC$ 中按正弦定律有:

$$\frac{-AM}{\sin \varphi} = \frac{r}{\sin(-u)} = \frac{r-l}{\sin \angle AMC}$$

所以

$$\frac{-AM}{\sin \varphi} = \frac{r}{\sin(-u)} = \frac{r-l}{\sin i} \quad (2-1)$$

同理,由 $\triangle A'MC$ 得:

$$\frac{MA'}{\sin \varphi} = \frac{r}{\sin u'} = \frac{l'-r}{\sin i'} \quad (2-2)$$

在折射点 M , 按折射定律:

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (2-3)$$

图中各角度间的关系:

$$\varphi = u + i = u' + i' \quad (2-4)$$

以上 4 个公式是光线经球面折射,决定光路的基本公式。由式(2-1)、(2-2)和(2-3)可得:

$$\frac{n(l-r)}{AM} = \frac{n'(l'-r)}{MA'} \quad (2-5)$$

图 2-1 中,若 $-u$ 很小,与 $-u$ 相应的 i 、 i' 、 φ 亦很小,则这些角度的正弦值可用弧度代替, $\sin u \approx u$ 。为区别起见用小写字母表示。这样的光线很靠近光轴,称近轴光线。光学系统满足这样条件的区域称近轴区域。研究近轴区域内物、像关系的光学称近轴光学或高斯光学。至于 u 角小到什么程度,取决于用弧度代替角度的正弦值所产生的相对误差的允许值。

在式(2-5)中,令 $AM=l$, $MA'=l'$,则近轴球面折射公式为:

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (2-6)$$

若物点不在 A 而在 A' ,则 A 成为像点。即:若 A 和 A' 之一为物,则另一为其相应的像。这样一对相应的点,称共轭点。

式(2-6)可写为:

$$n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'}\right) = Q \quad (2-7)$$

式中, Q 称为阿贝不变量。

由式(2-6), 当物点在无限远, $l = -\infty$, 则共轭点位置为:

$$l' = -\frac{n'}{n'-n}r$$

由 l' 所确定的点称像方焦点或第二焦点 F' ; O 到 F 的距离, 称像方焦距或第二焦距。如图 2-2(b) 所示。

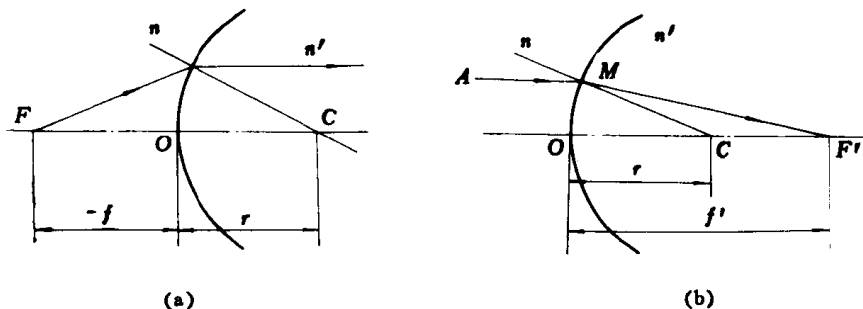


图 2-2 单球面折射的焦距

(a) 第一焦距 $-f$ (b) 第二焦距 f'

$$f' = -\frac{n'}{n'-n}r \quad (2-8)$$

若成像于无限远, $l' = \infty$, 则物空间共轭点为物方焦点或第一焦点 F 。 O 到 F 的距离为物方焦距或第一焦距 f , 如图 2-2(a) 所示。

$$f = -\frac{n}{n'-n}r \quad (2-9)$$

显然, 折射面的两个焦距有下列关系:

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n}{n'} \quad (2-10)$$

将式(2-6)乘以 $\frac{r}{n'-n}$, 利用式(2-8)和(2-9), 得到以焦距 f' 及 f 表示的近轴区球面折射公式:

$$\frac{f'}{l'} - \frac{f}{l} = 1 \quad (2-11)$$

[例] 设有一玻璃棒, 折射率为 1.50。一个端面研磨并抛光成凹球面, 其曲率半径是 40 mm。空气中有一小物体离玻璃棒折射面顶点 100 mm。试求①此折射球面的物方焦距、像方焦距。②小物体经球面折射成像的位置。

[解] 由图 2-3 已知: $n = 1.00$; $n' = 1.50$, $r = -40$ mm, $l = -100$ mm,

(1) 求物方焦距 f 。由式(2-9):

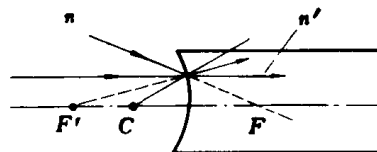


图 2-3