



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材



工程光学

Gongcheng Guangxue

主编 张思祥 王红敏
主审 单越康



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

工程光学



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 提 要

本书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法及应用,其主要内容包括几何光学、物理光学及光学 CAD 等几个部分。其中几何光学部分包括几何光学的基本定律与成像概念、理想光学系统、平面光学系统、实际光学系统中的光束限制、光线的光路计算与像差理论、典型光学系统等几个部分。物理光学部分包括光的电磁性质、光的干涉和衍射及光的偏振和晶体光学基础等几个部分。光学 CAD 部分详细介绍了光学设计软件 Zemax 的使用。

本书可作为测控技术与仪器、光机电一体化、光电工程等专业“工程光学”课程的教材,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学/张思祥 王红敏 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2011.1
ISBN 978-7-5609-6779-0

I. 工… II. ①张… ②王… 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(2010)第 236770 号

工程光学

张思祥 王红敏 主编

责任编辑:刘 飞

封面设计:范翠璇

责任校对:朱 霞

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16.25

字 数:423 千字

版 次:2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:28.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

总 序

测控技术与仪器专业是在合并原来的11个仪器仪表类专业的基础上新设立的专业，目前设有该专业的高校已经超过250所，是当前发展较快的本科专业之一。经过两届全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会的努力，形成了《测控技术与仪器专业本科教学规范》（以下简称《专业规范》）。《专业规范》颁布后，各高校开始构建面向21世纪的测控技术与仪器本科专业的课程体系，并进行教学改革，以更好地满足科学技术和国民经济发展的需要。

华中科技大学出版社邀请多位全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会委员和具有丰富教学经验的专家编写了这套“普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材”，这对于满足各高校测控专业建设需要，加强高校测控专业的建设，进一步落实《专业规范》精神，具有积极的作用。

这套教材基本涵盖了测控技术与仪器专业的专业基础课程和部分专业课程，编写定位清晰，内容适应了加强工程教学的趋势，注重了教材的实用性和创新性教育的推进。这套教材的出版，是测控专业教学领域“百花齐放、百家争鸣”的一个体现，它为测控专业教学选用教材又提供了一个选择。

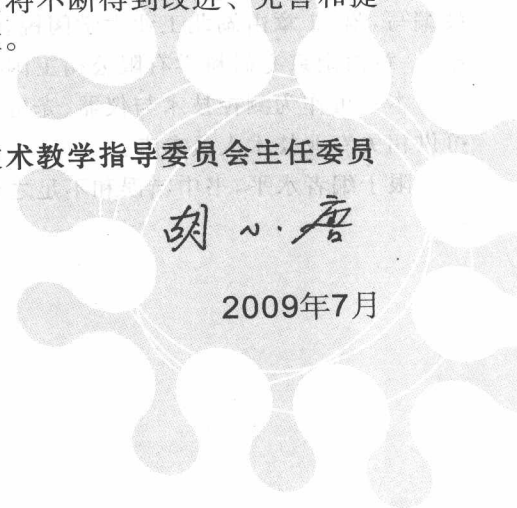
由于时间所限，这套教材可能存在这样那样的问题。随着这套教材投入教学使用和通过教学实践的检验，它将不断得到改进、完善和提高，为测控专业人才的培养做出积极的贡献。

谨为之序。

全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会主任委员

刘 唐

2009年7月



前 言

光学、机械、电子、软件是测控技术与仪器专业的四大支柱,因此“工程光学”是该专业本科生的必修课。本书是根据教育部高等学校仪器科学与技术教学指导委员会制定的《高等学校仪器科学与技术学科本科专业教学规范》精神,参考国内外有关文献资料及编者的工作实践编写而成的。

本书系统地介绍了工程光学的基本原理、方法及应用,其主要内容包括几何光学、物理光学及光学 CAD 等部分,充分体现了测控技术与仪器专业的教学要求,所有内容均为测控专业的教学而专门编写的。其中几何光学部分包括几何光学基本定律与成像概念、理想光学系统、平面光学系统、实际光学系统中的光束限制、光线的光路计算与像差理论、典型光学系统等几个部分。物理光学部分包括光的电磁性质、光的干涉和衍射及光的偏振和晶体光学基础等几个部分。光学 CAD 部分详细介绍了光学设计软件 Zemax 的使用。

几何光学要求学生掌握几何光学的基本定律、高斯光学原理,学会应用光线追迹方法进行光路分析、像差计算,掌握典型光学系统(放大镜、显微镜、望远镜、摄像/投影)的特性。几何光学部分在注重论述光学基本原理的同时,结合工程实际,使学生的学习过程中掌握工程光学的基本理论和计算方法,学会分析、设计光学系统,培养学生在掌握经典光学理论的基础上,为进一步研究开发光学测试仪器打下基础。

物理光学部分主要研究光的产生与传输、光信号处理及光与物质相互作用等问题,学生完成学习后,在较全面地掌握传统物理光学基本理论的同时,能紧密结合工程实际了解其实际应用,适应现代光电子技术、光通信技术等广泛应用的需求。从而使测控技术与仪器专业的学生能将光学、机械、电子、计算机等知识有机地结合在一起,为以后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等方面的工作打下坚实的基础。

本书由河北工业大学张思祥教授、山东理工大学王红敏副教授任主编,中国计量学院单越康教授任主审。具体编写分工为:第 1 章和第 2 章由河北工业大学张思祥教授编写,第 3 章和第 5 章由河北工业大学万峰副教授编写,第 4 章和第 6 章由河北工业大学张宗华教授编写,第 7 章和第 8 章由山东理工大学王红敏副教授编写,第 9 章和第 10 章由武汉理工大学戴蓉副教授编写,第 11 章由湖北工业大学闵锐老师编写,第 12 章由湖北工业大学刘文超副教授编写,第 13 章由南京光研科学有限公司王国力经理编写。

本书可作为测控技术与仪器、光机电一体化、光电工程等专业“工程光学”课程的教材,也可供相关专业技术人员参考。

限于编者水平,书中错误和不足之处在所难免,恳请各位专家和广大读者批评指正。

编 者

2010 年 8 月

目 录

第 1 章 几何光学基本定律与成像概念	(1)
1.1 光学的发展简史	(1)
1.2 几何光学的基本概念	(2)
1.3 几何光学的基本定律	(3)
1.4 成像的基本概念与成完善像条件	(7)
习题	(8)
第 2 章 球面光路计算与近轴光学系统	(10)
2.1 基本概念与符号规则	(10)
2.2 实际光线的光路计算	(11)
2.3 近轴光线的光路计算	(12)
2.4 近轴区球面光学成像系统	(13)
习题	(17)
第 3 章 理想光学系统	(19)
3.1 理想光学系统与共线成像理论	(19)
3.2 光学系统的基点与基面	(21)
3.3 理想光学系统的物像关系	(24)
3.4 理想光学系统的放大率	(29)
3.5 理想光学系统的组合	(31)
3.6 透镜	(35)
习题	(37)
第 4 章 平面与平面光学系统	(39)
4.1 平面镜成像	(39)
4.2 平行平板	(44)
4.3 反射棱镜	(46)
4.4 折射棱镜与光楔	(53)
4.5 光学材料	(57)
习题	(58)
第 5 章 实际光学系统中的光束限制	(60)
5.1 照相系统和光阑	(60)
5.2 望远系统中的光束限制	(63)
5.3 显微系统中的光束限制及远心光路	(68)
5.4 光学系统的景深	(72)
习题	(77)
第 6 章 实际光学系统的像差	(78)
6.1 球差	(78)

6.2	彗差	(80)
6.3	像散	(83)
6.4	场曲	(85)
6.5	畸变	(86)
6.6	色差	(88)
6.7	像差总结	(90)
	习题	(91)
第7章	眼睛及目视光学系统	(92)
7.1	眼睛及其光学系统	(92)
7.2	放大镜	(98)
7.3	显微镜系统	(101)
7.4	望远镜系统	(108)
7.5	目镜	(111)
	习题	(115)
第8章	摄影与投影系统	(116)
8.1	摄影系统	(116)
8.2	投影系统	(122)
	习题	(125)
第9章	光的电磁理论基础	(126)
9.1	光的电磁性质	(126)
9.2	菲涅耳公式	(133)
	习题	(141)
第10章	光的干涉	(142)
10.1	光波干涉的条件	(142)
10.2	分波面的双光束干涉	(143)
10.3	分振幅的双光束干涉	(146)
10.4	平行平板的多光束干涉	(151)
10.5	光学薄膜	(154)
10.6	典型干涉仪及其应用	(156)
	习题	(162)
第11章	光的衍射	(164)
11.1	概述	(164)
11.2	菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	(166)
11.3	夫琅和费圆孔衍射	(171)
11.4	夫琅和费单缝衍射	(173)
11.5	多缝衍射光栅	(177)
11.6	其他衍射光栅	(182)
	习题	(184)
第12章	光的偏振	(186)
12.1	偏振光概述	(186)

12.2 光在晶体中的传播.....	(190)
12.3 晶体偏振器件.....	(193)
12.4 偏振光的变换与检验.....	(198)
12.5 偏振光的干涉及应用.....	(199)
12.6 电光效应与磁光效应.....	(202)
习题.....	(208)
第 13 章 光学设计软件 Zemax	(210)
13.1 概述.....	(210)
13.2 利用 Zemax 软件设计举例	(213)
部分习题参考答案	(247)
参考文献	(250)

第1章 几何光学基本定律与成像概念

几何光学主要以光线为基础,用几何的方法来研究光在介质中的传播规律及光学系统的成像特性。本章主要介绍几何光学的基本定律、成像的概念和成完善像的条件。

1.1 光学的发展简史

光学是一门有悠久历史的学科,它的发展史可追溯到 2000 多年前。人类对光的研究最初主要是试图回答“人怎么能看见周围的物体?”之类问题。约在公元前 400 多年(先秦时代),中国的《墨经》中记录了世界上最早的光学知识。自《墨经》开始,公元 11 世纪阿拉伯人伊本·海赛木发明透镜;公元 1590 年到 17 世纪初,詹森和李普希同时独立地发明显微镜;到 17 世纪上半叶,笛卡尔将光的反射和折射的观察结果归结为今天大家所惯用的反射定律和折射定律。

1665 年,牛顿进行太阳光的实验,它把太阳光分解成简单的组成部分,这些成分形成一个颜色按一定顺序排列的光分布——光谱。它使人们第一次接触到光的客观的和定量的特征,各单色光在空间上的分离是由光的本性决定的。牛顿在发现这些重要现象的同时,根据光的直线传播性,认为光是一种微粒流。微粒从光源飞出来,在均匀介质内遵从力学定律作等速直线运动。牛顿用这种观点对折射和反射现象作了解释。

惠更斯是光的微粒说的反对者,他创立了光的波动说。提出“光同声一样,是以球形波面传播的”。并且指出光振动所达到的每一点,都可视为次波的振动中心、次波的包络面为传播波的波阵面(波前)。整个 18 世纪,光的微粒流理论和光的波动理论都被粗略地提了出来,但都不很完整。

19 世纪初,波动光学初步形成,其中托马斯·杨圆满地解释了“薄膜颜色”和双狭缝干涉现象。菲涅耳于 1818 年以杨氏干涉原理补充了惠更斯原理,由此形成了今天为人们所熟知的惠更斯-菲涅耳原理,用它可圆满地解释光的干涉和衍射现象,也能解释光的直线传播。在进一步的研究中,观察到了光的偏振和偏振光的干涉。

1846 年,法拉第发现了光的振动面在磁场中发生旋转;1856 年,韦伯发现光在真空中的速度等于电流强度的电磁单位与静电单位的比值。他们的发现表明光学现象与磁学、电学现象间有一定的内在关系。

1860 年前后,麦克斯韦指出,电场和磁场的改变不能局限于空间的某一部分,而是以等于电流的电磁单位与静电单位的比值的速度传播着,光就是这样一种电磁现象。这个结论在 1888 年被赫兹的实验证实。

1900 年,普朗克从物质的分子结构理论中借用不连续性的概念,提出了辐射的量子论。他认为各种频率的电磁波,包括光,只能以各自确定分量的能量从振子射出,这种能量微粒称为量子,光的量子称为光子。

量子论不仅很自然地解释了灼热体辐射能量按波长分布的规律,而且以全新的方式提出了光与物质相互作用的整个问题。量子论不但给光学,也给整个物理学提供了新的概念,所以通常把它的诞生视为近代物理学的起点。

1.2 几何光学的基本概念

1. 光波

光就其本质而言是一种电磁波,只是光波波长比普通无线电波的波长要短。波长在 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 之间的电磁波能为人眼所感知,称为可见光;波长小于 $0.38 \mu\text{m}$ 的部分为紫外光,其中波长小于 $0.19 \mu\text{m}$ 的部分叫做真空紫外光(即该部分紫外光只能在真空中存在,在大气中会被强烈吸收而所剩无几)。波长大于 $0.78 \mu\text{m}$ 的为红外光,其中 $0.78 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 为近红外光, $1.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 为中红外光, $10 \mu\text{m}$ 以上为远红外光,红外光的波段有时也用波数(常用符号 k 来代表波数)来表示,它的意义为一个厘米的长度内有多少个单周期的光波,在使用式(1-1)计算波数时先将波长 λ 用 μm 来表示。

$$k = \frac{10^4}{\lambda} \quad (1-1)$$

波数的单位是 cm^{-1} 。

2. 折射率

光波在真空中的传播速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,在其他介质中传播速度小于 c ,且随着介质折射率的不同而不同,介质的折射率是用来描述介质中光速减慢程度的物理量,折射率分为相对折射率与绝对折射率。

光从真空射入介质发生折射时(见图 1-1),入射角 I 与折射角 I' 的正弦之比 n 称为介质的绝对折射率,简称“折射率”,绝对折射率的表达式为

$$n = \frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{c}{v} \quad (1-2)$$

式中: v 是光在介质中的传播速度,由于光在真空中的传播速度最大,故从真空射入其他介质的折射率都大于 1。

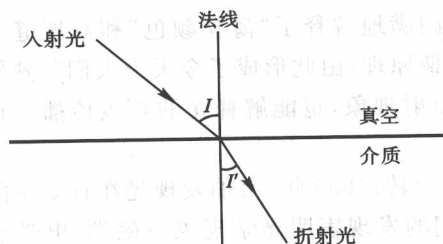


图 1-1 光从真空射入介质

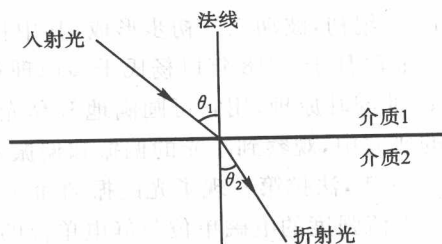


图 1-2 光从介质 1 射入介质 2

光从介质 1 射入介质 2 发生折射时(见图 1-2),入射角 θ_1 与折射角 θ_2 的正弦之比 n_{21} 称为介质 2 相对介质 1 的折射率,即相对折射率,它表示的是在两种(各向同性)介质中光速比值的物理量。相对折射率的表达式为

$$n_{21} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-3)$$

两种介质进行比较时,折射率较大的称为光密介质,折射率较小的称为光疏介质。

3. 单色光与复色光

单一波长的光为单色光,由不同单色光混合而成的光称为复色光。太阳光是由无限多种

单色光组成的,很显然是一种复色光,在可见光范围内,太阳光可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色的光。

4. 光源

能够辐射光能量的物体称为发光体或光源。发光体可看做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。发光点是一个具有能量但是体积为零的几何点,实际中并不存在,但是在几何光学中可以抽象出来,这给研究问题带来很大的方便。

5. 光线

在几何光学中,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,光线的方向代表光的传播方向。

6. 波面与光束

发光点发出的光波向四周传播时,某一时刻其振动相位相同的点所构成的面称为波阵面,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,即光沿着波面法线方向传播,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。

波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光束称为平行光束,与球面波对应的光束称为同心光束,如图 1-3 所示。根据波动光学的基本理论,光波的标准方程为 $E = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{s}{\lambda} \right)$, 其中 A 为光波的振幅,而余弦项 $2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{s}{\lambda} \right)$ 称为相位。在相位的表达式中, t 表示时刻; T 为光波的周期(常数); λ 为光波的波长(常数); s 为光程, $s = nl$, n 为介质的折射率, l 为振动点到发光点的距离。从光波方程可以看出,对于点光源所发出的光在某一个时刻 t_1 , 相位相同的点就是离发光点距离相同的点,因此这些点所构成的曲面是球面;而点光源所发出的光束为同心光束,所以球面波对应的是同心光束。下面取一个特例,当 s 趋于 $+\infty$ 时,点光源所发出的光束是平行光束,而在半径趋于 $+\infty$ 时球面是平面,所以平面波对应的是平行光束(注:在工程光学中,平面用半径为 $+\infty$ 的球面代替)。

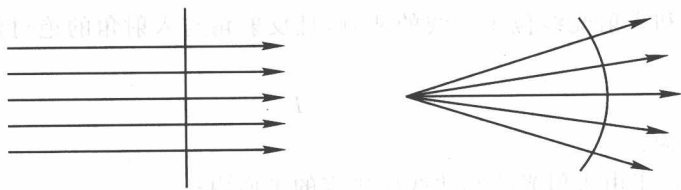


图 1-3 平行光束与同心光束

1.3 几何光学的基本定律

1. 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基本定律,它是我们研究各种光的传播现象和规律及物体经过光学系统的成像特性的基础。

1) 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。

2) 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。在各束光的同一交会点上,光的强度是各束光强度的简单叠加,离开交会点后,各束光仍按各自原来的方向传播。

3) 光的反射定律与折射定律

当一束光投射到两种均匀介质的分界面上时,一部分光被光滑面反射回原介质中,这种现象称为光的反射,反射回原介质的光称为反射光;另一部分将透过光滑表面,进入第二种介质,这种现象称为光的折射现象,透过光滑表面的这部分光称为折射光。与反射光和折射光相对应,投射到光滑表面发生折射和反射之前的光称为入射光。

如图 1-4 所示,入射光 1 入射到两种介质的分界面 AB 上,在 O 点发生折射,NN' 为界面上 O 点处的法线。入射光 1 与法线的夹角 I 为入射角、反射光 2 与法线的夹角 I'' 为反射角、折射光 3 与法线的夹角 I' 为折射角,它们的正负按照“符号规则”来进行规定(详细内容在第 2 章介绍),请注意这里的反射角 I'' 为负值,入射角 I 和折射角 I' 为正值。

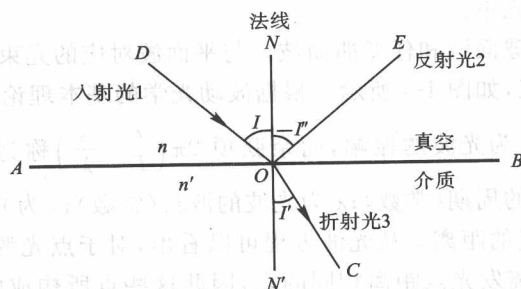


图 1-4 反射定律与折射定律

反射定律归结为:

- (1) 反射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内;
- (2) 反射光线和入射光线位于法线的两侧,且反射角与入射角的绝对值相等,符号相反,

即

$$I'' = -I \quad (1-4)$$

折射定律归结为:

- (1) 折射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内;
- (2) 折射角的正弦与入射角的正弦之比与入射角的大小无关,仅由两种介质的折射率决定。对一定波长的光线而言,在一定温度和压力下,该比值为一常数,等于入射光所在介质的折射率 n 与折射光所在介质的折射率 n' 之比,即

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'}$$

通常写为

$$n' \sin I' = n \sin I \quad (1-5)$$

式(1-5)即为折射定律的表达式,若令 $n' = -n$,则有 $I' = -I$,即折射定律可转化为反射定律。这一结论是很有意义的,许多由折射定律得出的结论,只要令 $n' = -n$,就可以得出相应反射定律的结论(这个结论在第 2 章中会有应用)。

2. 全反射现象

光线入射到两种介质的分界面时,通常都会发生折射与反射。但在一定条件下,入射到介质上的光会全部反射回原来的介质中,而没有折射光产生,这种现象称为光的全反射现象。

当入射角 I 增大到某一程度时,折射角 I' 达到 90° ,折射光线沿界面掠射出去,这时的入射角称为临界角,记为 I_m 。将折射角 $I' = 90^\circ$ 代入折射定律公式(1-5)得

$$\sin I_m = \frac{n' \sin I'}{n} = \frac{n' \sin 90^\circ}{n} = n'/n \quad (1-6)$$

若入射角继续增大,使 $I' > I_m$,光线全部反射回第一种介质,即发生了全反射现象。

发生全反射的条件可归结为:

- (1) 光线从光密介质射向光疏介质;
- (2) 入射角大于临界角。

光学仪器中,常常根据全反射原理制成转折光路的各种全反射棱镜,代替平面反射镜,以减少反射时的光能损失。从理论上说,全反射棱镜可以将入射光全部反射,而镀有反射膜层的平面反射镜只能反射 90% 左右入射光能。

目前,广泛应用于光通信的光导纤维(简称光纤),其最基本的原理就是利用全反射原理传光。

3. 光路的可逆性

在图 1-4 中,若光线在折射率为 n' 的介质中沿 CO 方向入射,由折射定律可知,折射光线必沿 OD 方向出射。同样,如果光线在折射率为 n 的介质中沿 EO 方向入射,则由反射定律可知,反射光线也一定沿 OD 方向出射。由此可见,光线的传播是可逆的,这就是光路的可逆性。

4. 费马原理

光的直线传播定律、光的独立传播定律、折射率定律和反射定律表达了光线的传播规律,而费马原理则是用光程的概念对光的传播规律作了更简明的概括。光程是指光在介质中传播的几何路程 l 与该介质折射率 n 的乘积 s ,即

$$s = nl \quad (1-7)$$

将式(1-2)及 $l = vt$ 代入式(1-7),有

$$s = ct \quad (1-8)$$

由此可见,光在某种介质中的光程等于同一时间内光在真空中所走过的几何路程。

费马原理的内容是:光从一点传播到另一点,其间无论经过多少次折射或反射,按光程为极值(极小值、极大值和常量)的路径传播。所以费马原理又称为极端光程定律。

在均匀介质中光是沿直线方向传播的。但是,在非均匀介质中,由于折射率 n 是空间未知的函数,光线将不再沿直线方向传播,其轨迹是一空间曲线,如图 1-5 所示。

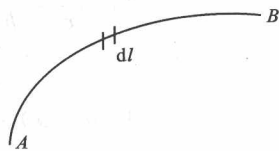


图 1-5 非均匀介质中光线的运行

此时,光线从 A 点传播至 B 点,其光程由以下曲线积分来确定,根据费马原理,此光程应具有极值,即式(1-7)表示的一次变分为零,即

$$\delta_s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-9)$$

这就是费马原理的数学表示。

费马原理是描述光线传播的基本规律,无论是光的直线传播定律,还是光的反射定律与折射定律,均可以由费马原理直接导出。比如,对于均匀介质,由两点间的直线距离为最短的公理,可以立即证明光的直线传播定律。下面利用费马原理证明光的反射定律。

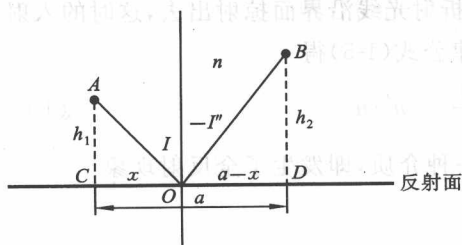


图 1-6 用费马原理证明反射定律

如图 1-6 所示,由发光点 A 发出的一条光线,经过反射面的反射后经过 B 点,A 和 B 分别是固定点,到底光线以何种路径由 A 点到 B 点呢? 这里我们的目标就是要证明 $I = -I''$ 。

分别过 A 点和 B 点作垂直于反射面的直线,垂足分别为 C 和 D,入射光线、反射光线和反射面相交于 O 点。设 $CD = a$,为定值, $CO = x$ 为变量(当 A 点发出的光线以不同路径经过 B 点时, CO 的长度就不

同), $DO = a - x$,则 A 点到 B 点的光程为

$$L = n(AO + OB) = n(\sqrt{h_1^2 + x^2} + \sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}) \quad (1-10)$$

式(1-10)中只有 x 是变量,根据费马原理光程 L 为极值,这时光程的导数为零,即 $\frac{dL}{dx} = 0$,可得

$$\frac{dL}{dx} = n \left(\frac{1}{2} \times \frac{2x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} + \frac{1}{2} \times \frac{-2(a - x)}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}} \right) = 0 \quad (1-11)$$

对式(1-11)进行运算,可以得到

$$\frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = \frac{a - x}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}}$$

根据图 1-6 中的三角几何关系,即可得到

$$\sin I = \sin(-I'') \quad \text{即} \quad I = -I''$$

故反射定律得证。另外在 $\sin I = \sin(-I'')$ 时,光程取得极值,而对于此极值是极大值还是极小值,还要进行 $\frac{d^2L}{dx^2}$ 运算。如果 $\frac{d^2L}{dx^2} > 0$,则光程为极小值;如果 $\frac{d^2L}{dx^2} < 0$,则光程为极大值,计算过程如下。

$$\begin{aligned} \frac{d^2L}{dx^2} &= n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} + x \frac{2 \times \left(-\frac{1}{2}\right) \times x}{\sqrt{x^2 + h_1^2}^{\frac{3}{2}}} \right] - \left[-\frac{1}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}} \right. \\ &\quad \left. + (a - x) \frac{2 \times \left(-\frac{1}{2}\right) \times (a - x) \times (-1)}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}^{\frac{3}{2}}} \right] \\ &= n \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} \left(1 - \frac{x^2}{x^2 + h_1^2} \right) + \frac{1}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}} \left(1 - \frac{(a - x)^2}{h_2^2 + (a - x)^2} \right) \right) \\ &= n \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} (1 - \sin^2 I) + \frac{1}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}} (1 - \sin^2(-I'')) \right) \\ &= n \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} \cos^2 I + \frac{1}{\sqrt{h_2^2 + (a - x)^2}} \cos^2(-I'') \right) > 0 \end{aligned}$$

二阶导数大于零,这显然是一个极小值。对于折射定律的证明也可以采用同样的方法(本

书中留给读者做进一步的思考)。

5. 马吕斯定律

在各向同性的均匀介质中,光线为波面的法线,光束对应着波面的法线束。马吕斯定律描述了光经过任意多次折射、反射后,光束与波面、光线与光程的关系。

马吕斯定律指出,光线束在各向同性的均匀介质中传播时,始终保持着与波面的正交性,并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。这种正交性表明,垂直于波面的光线束经过任意多次折射、反射后,无论折射、反射面形如何,出射光束仍垂直于出射波面。

折射、反射定律,费马原理,马吕斯定律中的任意一个均可视为几何光学的基本定律,而把另外两个作为这个基本定律的推论。

1.4 成像的基本概念与成完善像条件

1. 光学系统与成像概念

光学系统的作用之一是对物体成像。一个被照明的物体(或自发光物体)总可以看成是由无数多个发光点或物点组成的,每个物点发出一个球面波,与之对应的是一束以物点为中心的同心光束。如果该球面波经过光学系统后仍为一球面波,那么对应的光束仍为同心光束,则称该同心光束的中心为物点经过光学系统所成的完善像点。物体上每个点经过光学系统后所成完善像点的集合就是该物体经过光学系统后的完善像。

通常,我们把物体所在的空间称为物空间,把像所在的空间称为像空间。物像空间的范围均为 $(-\infty, +\infty)$ 。

光学系统通常是由若干个光学元件(如透镜、棱镜、反射镜等)组成,而每个光学元件都是由表面为球面、平面或非球面组成的具有一定折射率的介质构成。如果组成光学系统的各个光学元件的表面曲率中心同在一条直线上,则该光学系统称为共轴光学系统,该直线叫做光轴。光学系统中的大部分系统为共轴光学系统,非共轴光学系统较少使用。

2. 完善成像条件

图1-7所示为一共轴光学系统,由 $O_1, O_2, \dots, O_k$ 等 k 个面组成。轴上物点 A_1 发出一球面波 W (与之对应的是以 A_1 为中心的同心光束),经过光学系统后仍为一球面波 W' ,对应的是以球面 A'_k 为中心的同心光束, A'_k 即为物点 A_1 的完善像点。

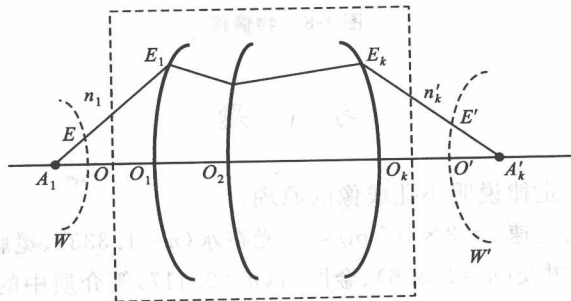


图1-7 共轴光学系统

光学系统成完善像应满足的条件为:入射波面为球面波时,出射波面也为球面波。由于球

面波与同心光束对应,所以完善成像条件也可以表述为:入射光为同心光束时,出射光亦为同心光束。根据马吕斯定律,入射波面与出射波面对应点间的光程相等,则完善成像条件还可以表述为:物点 A_1 和像点 A'_k 之间任意两条光路的光程相等,即

$$n_1 A_1 O + n_1 O O_1 + n_2 O_1 O_2 + \cdots + n'_k O_k O' + n'_k O' A'_k$$

$$= n_1 A_1 E + n_1 E E_1 + n_2 E_1 E_2 + \cdots + n'_k E_k E' + n'_k E' A'_k = \text{常量}$$

或写为 $(AA'_k) = \text{常量}$

3. 物、像的虚实

根据同心光束的会聚和发散,物、像有虚实之分。由实际光线相交所形成的点为实物点或实像点,而由光线的延长线相交所形成的点为虚物点或虚像点。在图 1-8 中,图(a)为实物成实像,图(b)为实物成虚像,图(c)为虚物成实像,图(d)为虚物成虚像。这里需要说明的是,虚物不能人为设定,它是前一系统所成的实像被当前系统所截而得。实像能用屏幕或胶片记录,而虚像只能为人眼所观察,而不能被记录(虚像一定是发散光线,该类光线可以被人眼汇聚到视网膜上,因为人眼可以看做一个正透镜)。由图 1-8 可以看出,实物、虚像对应发散同心光束,虚物、实像对应会聚同心光束。

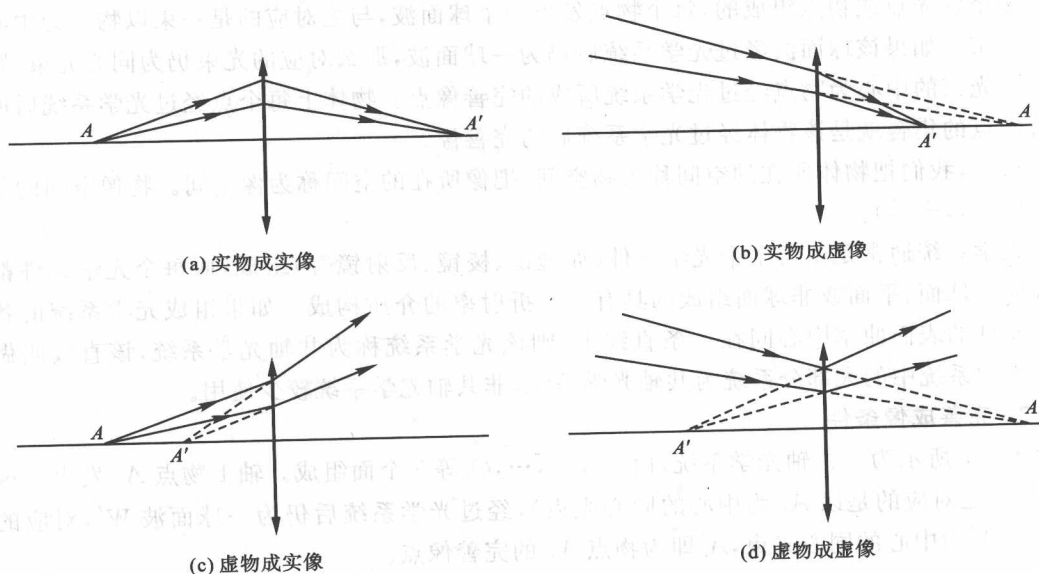


图 1-8 物像图

习 题

- 1-1 利用光的基本定律说明小孔成像的原理。
- 1-2 已知真空中的光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 求光在水 ($n = 1.333$)、冕牌玻璃 ($n = 1.51$)、火石玻璃 ($n = 1.65$)、加拿大树胶 ($n = 1.526$)、金刚石 ($n = 2.417$) 等介质中的光速。
- 1-3 一物体经针孔相机在屏上成一 60 mm 的像, 若将屏拉远 50 mm , 则像的大小变为 70 mm , 求屏到针孔的初始距离。
- 1-4 一厚度为 200 mm 的平行平板玻璃 ($n = 1.5$), 下面放一直径为 1 mm 的金属片。若

在玻璃板上盖一圆形纸片,要求在玻璃板上方任何地方都看不到金属片,问纸片最小直径为多少?

1-5 试分析,当光从光疏介质到光密介质时,发生全反射的可能性。

1-6 如图 1-5 所示,光纤芯的折射率为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 ,光纤所在介质的折射率为 n_0 ,求光纤的数值孔径。

1-7 由费马原理证明光的折射定律。

1-8 证明光学系统的垂轴放大率公式。

图 1-5 光纤结构示意图



图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图

图 1-5 光纤结构示意图