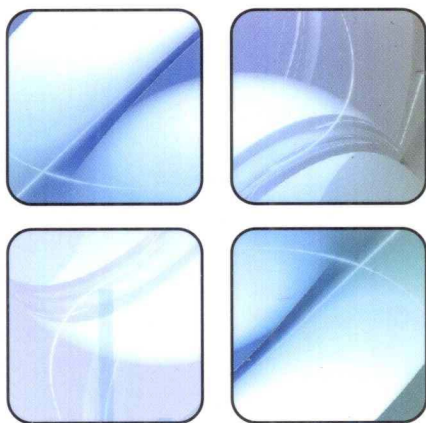




全国高等院校测控技术与仪器专业**创新型**人才培养规划教材

工程光学学习指导与习题详解



王红敏 谭保华 吴清收 编著
刘文超 张发玉 蔡海潮

理论适度，结合工程实际，利于教与学
精选习题，列举应用实例，巩固知识点
11套模拟试卷测试，全面提升应试技能



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国高等院校测控技术与仪器专业创新型人才培养规划教材

工程光学学习指导与习题详解

王红敏 谭保华 吴清收 编著
刘文超 张发玉 蔡海潮



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是在北京大学出版社的《工程光学》教材基础上编著的学习辅导用书, 蕴含了编著者多年的教学经验、科研成果和工程实践。针对工程光学课程的特点, 本书对教材中的重点、难点内容做了条理性归纳和总结, 并通过大量的典型例题和课后习题选解对考核知识点做了详细的分析与解答, 旨在给该课程的学习者以指导和参考, 也力求为准备报考同类专业研究生的考生答疑解惑。

本书力求深入浅出, 文字叙述通俗易懂, 条理清晰, 不仅注意必要的理论基础, 而且紧密结合工程实际, 既便于教学又利于自学。每章都列举了大量应用实例并精选了相关典型例题和课后习题选解, 以便读者巩固所学知识。最后附 11 套模拟试卷, 并附有参考答案, 其测试练习内容覆盖全面, 学习者通过大量的测试练习可迅速提高应试能力, 增强学习信心。

本书可作为高等院校仪器仪表类、光学工程、自动化及电子信息等专业基础课的辅助教材, 或作为自学及研究生入学考试辅导用书, 也可供其他相关专业学生和从事相关领域的工程技术人员及科技工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学学习指导与习题详解/王红敏等编著. —北京: 北京大学出版社, 2011. 10

(全国高等院校测控技术与仪器专业创新型人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-19632-8

I. ①工… II. ①王… III. ①工程光学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 208339 号

书 名: 工程光学学习指导与习题详解

著作责任者: 王红敏 谭保华 吴清收 刘文超 张发玉 蔡海潮 编著

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-19632-8/TH·0272

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 296 千字

2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

工程光学课程是高等学校光电信息类、仪器科学与技术类及相近专业的一门重要学科基础课。该课程涵盖几何光学和物理光学两部分内容,涉及基本概念、基本理论和工程光学实际问题的解决方法等方面。课程涉及知识面广,理论较深,综合性和实践性较强,在教学过程中,学生普遍反映难学,尤其是在做习题时更感困难;再加上近年来由于课程改革的需要,新知识不断补充,工程光学习题课明显不足,学生在学习过程中感觉很抽象,迫切需要与工程光学教材相配套的辅助教材,以保证和促进教学质量。因此我们在北京大学出版社《工程光学》教材基础上编著此《工程光学学习指导与习题详解》,本书是针对工程光学课程的特点而撰写的学习辅导用书,书中对教材中的重点、难点内容做了条理性归纳和总结,并通过大量的典型例题和课后习题选解对考核知识点做了详细的分析与解答,旨在给该课程的学习者以指导和参考,也力求为准备报考同类专业研究生的考生答疑解惑。

本书蕴涵了编著者多年的教学经验、科研成果和工程实践,力求深入浅出,文字叙述通俗易懂,条理清晰,不仅注意必要的理论基础,而且紧密结合工程实际,既便于教学又利于自学。在内容编排上,各章均按照“本章主要内容”、“典型例题详解”、“课后习题选解”、“单元复习提示”4部分进行编写,并附有11套模拟试卷和参考解答。

“本章主要内容”强调各章基本概念,突出重点与难点,着重对难点进行分析,便于读者掌握该章的重点与难点内容,以便巩固所学知识。

“典型例题详解”、“课后习题选解”根据课程的重点与难点内容,精选具有典型性的例题和习题做详细的分析与解答,以提高学习者的解题能力。

“单元复习提示”旨在提炼每章重点、难点内容,提示学习者对每一单元做重点回顾总结。

“模拟试卷”依据考试题目类型如填空题、选择题、解释题、简答题、作图题、计算题等多种题型做应试训练,测试练习内容覆盖全面,并附有参考答案,学习者通过大量的测试练习可迅速提高应试能力,增强学习信心。

本书可作为高等院校仪器仪表类、光学工程、自动化及电子信息等专业基础课的辅助教材或作为自学、考研用书,也可供其他相关专业学生和从事相关领域的工程技术人员及科技工作者学习参考。

本书由山东理工大学王红敏、湖北工业大学谭保华和刘文超、山东科技大学吴清收、河南科技大学张发玉和蔡海潮共同编著。谭保华撰写第1、2、6章,吴清收撰写第3、4章,刘文超撰写第5、8、9章,王红敏撰写第7章及1、2、6、7章课后习题选解和第3、4、5、8章部分课后习题选解,张发玉、蔡海潮撰写第10、11、12章,模拟试卷由谭保华、王红敏、吴清收共同撰写。全书由王红敏和谭保华统稿和定稿。

由于作者水平所限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者

2011年8月

目 录

第 1 章 几何光学基本定律与物像概念	1	第 6 章 光线的光路计算与像差理论	54
1.1 本章主要内容	1	6.1 本章主要内容	54
1.1.1 几何光学的基本概念	1	6.2 典型例题详解	57
1.1.2 几何光学的基本定律	2	6.3 课后习题选解	59
1.1.3 成像的基本概念和完善成像的条件	3	6.4 单元复习提示	59
1.2 典型例题详解	5	第 7 章 眼睛及目视光学系统	60
1.3 课后习题选解	7	7.1 本章主要内容	60
1.4 单元复习提示	8	7.1.1 眼睛及光学特性	60
第 2 章 共轴球面光学系统	10	7.1.2 放大镜	62
2.1 本章主要内容	10	7.1.3 显微镜系统	63
2.1.1 光路计算和近轴光学系统	10	7.1.4 望远镜系统	67
2.1.2 球面成像系统	12	7.1.5 目镜	69
2.2 典型例题详解	14	7.2 典型例题详解	71
2.3 课后习题选解	16	7.3 课后习题选解	81
2.4 单元复习提示	19	7.4 单元复习提示	84
第 3 章 理想光学系统	20	第 8 章 摄影系统和投影系统	86
3.1 本章主要内容	20	8.1 本章主要内容	86
3.2 典型例题详解	24	8.1.1 摄影物镜	86
3.3 课后习题选解	30	8.1.2 投影物镜	87
3.4 单元复习提示	33	8.2 典型例题详解	88
第 4 章 平面与平面系统	35	8.3 课后习题选解	89
4.1 本章主要内容	35	8.4 单元复习提示	92
4.2 典型例题详解	38	第 9 章 现代光学系统	93
4.3 课后习题选解	40	9.1 本章主要内容	93
4.4 单元复习提示	42	9.2 典型例题详解	95
第 5 章 光学系统的光束限制	43	9.3 课后习题选解	95
5.1 本章主要内容	43	9.4 单元复习提示	96
5.2 典型例题详解	45	第 10 章 光的干涉	97
5.3 课后习题选解	50	10.1 本章主要内容	97
5.4 单元复习提示	52	10.1.1 光波干涉的条件及杨氏干涉实验	97

10.1.2 平板的双光束干涉	100	工程光学模拟试卷(3)	147
10.1.3 平行平板的多光束干涉及其应用	103	工程光学模拟试卷(3)参考答案	152
10.2 典型例题详解	105	工程光学模拟试卷(4)	154
10.3 课后习题选解	107	工程光学模拟试卷(4)参考答案	158
10.4 单元复习提示	108	工程光学模拟试卷(5)	160
第11章 光的衍射	109	工程光学模拟试卷(5)参考答案	164
11.1 本章主要内容	109	工程光学模拟试卷(6)	166
11.1.1 菲涅尔衍射	109	工程光学模拟试卷(6)参考答案	170
11.1.2 夫琅和费衍射	110	工程光学模拟试卷(7)	172
11.1.3 光学成像系统的分辨率	116	工程光学模拟试卷(7)参考答案	174
11.1.4 衍射光栅	116	工程光学模拟试卷(8)	178
11.2 典型例题详解	119	工程光学模拟试卷(8)参考答案	180
11.3 课后习题选解	121	工程光学模拟试卷(9)	183
11.4 单元复习提示	121	工程光学模拟试卷(9)参考答案	185
第12章 光的偏振	123	工程光学模拟试卷(10)	187
12.1 本章主要内容	123	工程光学模拟试卷(10)参考答案	189
12.1.1 偏振光概述	123	工程光学模拟试卷(11)	191
12.1.2 布儒斯特定律	123	工程光学模拟试卷(11)参考答案	194
12.1.3 马吕斯定律	124	参考文献	196
12.1.4 偏振器件的原理及特点	125		
12.1.5 圆偏振光和椭圆偏振光	128		
12.1.6 偏振光的干涉	128		
12.2 典型例题详解	130		
12.3 课后习题选解	132		
12.4 单元复习提示	133		
工程光学模拟试卷(1)	134		
工程光学模拟试卷(1)参考答案	138		
工程光学模拟试卷(2)	140		
工程光学模拟试卷(2)参考答案	145		

第 1 章

几何光学基本定律与物像概念

1.1 本章主要内容

1.1.1 几何光学的基本概念

1. 光的本质

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。

2. 可见光、紫外光和红外光

可见光：波长为 400~760nm 的电磁波，可以为人眼感知，称为可见光。

紫外光：波长小于 400nm 的电磁波称为紫外光。

红外光：波长大于 760nm 的电磁波称为红外光。

3. 光速

真空中的光速为 $c=3.0\times 10^8\text{m/s}$ ，即每秒 30 万千米。

光在介质中的传播速度小于 c ，而且随着光波长的不同而不同。

4. 单色光和复色光

可见光随着波长的不同引起人眼不同的颜色感觉。

单色光：具有单一波长的光称为单色光。

复色光：由不同单色光混合而成的光称为复色光。太阳光和日光灯的光都是复色光。

5. 光源

能够辐射光能量的物体称为发光体或者光源。

6. 光线、波面与光束

光线：在几何光学中，通常将发光点发出的光抽象为许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。

波面：当发光点发出的光线向四周传播时，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。

光束：在各向同性介质中，波面上某点的法线代表了该处光线的传播方向，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。

1.1.2 几何光学的基本定律

注意：在几何光学对光线传播的研究中，一般不考虑光的波动性。

1. 光的直线传播定律

在几何光学的各向同性的均匀介质中，光是沿着直线方向传播的。

2. 光的独立传播定律

在几何光学中，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。

3. 光的反射定律

光的反射定律如图 1.1 所示，其要点有 3 点：①反射光线位于法线和入射光线所决定的平面内；②入射光线和反射光线位于法线的两侧；③反射角与入射角绝对值相等，符号相反，即 $I'' = -I$ 。

4. 光的折射定律

光的折射定律，如图 1.2 所示，其要点有 2 点：①折射光线位于法线和入射光线所决定的平面内；②入射角的正弦与折射角的正弦之比和入射角的大小无关，只与两种介质的折射率有关。 $n \sin I = n' \sin I'$ 。

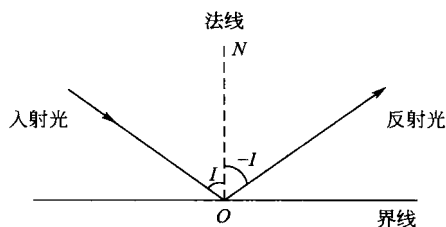


图 1.1 光的反射定律

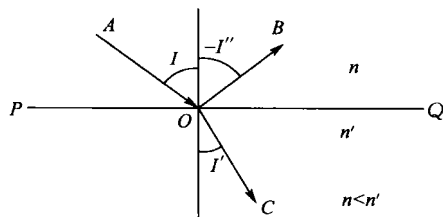


图 1.2 光的折射定律

5. 全反射现象

光线从 n 介质射向 n' 介质，其中 $n > n'$ ，当入射角度持续增大时，就会发生全反射现象，如图 1.3 所示。

全反射现象发生时，有 3 个要点：①光从光密介质向光疏介质传播；②入射角大于临界角；③临界角 $I_m = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right)$ ，其中 n' 为光密介质的折射率。

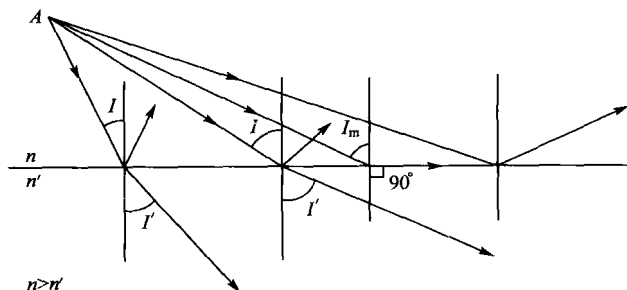


图 1.3 全反射现象

6. 光路的可逆性

光线的传播是可逆的，这就是光路的可逆性。

注意：由于全反射现象的存在，并不是所有光路都是可逆的。

7. 费马原理和马吕斯定律

1) 费马原理

光程表示光线在介质中传播的几何距离 l 与介质折射率的乘积，在数值上等于同一时间内光在真空中所走过的几何路程，即

$$S = nl = ct = c \cdot \frac{l}{v}$$

式中， $n = c/v$ 为介质的绝对折射率(简称折射率)； v 为光在介质中传播的速度； c 为光在真空中传播的速度。

光从一点通过任意一组介质到达另一点时，光沿光程为极值的路径传播，此原理就是费马原理。所谓极值，它有 3 种情况：极大值、极小值、稳定值。在多数场合下光程具有极小值或稳定值，少数场合是极大值。

如图 1.4 所示为非均匀介质的光线与光程。如用数学语言表示，即

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

式(1-1)表示在光线的实际路径上光程的微分为零。

利用费马原理可以导出光的直线传播定律和反射、折射定律。

2) 马吕斯定律

当光线束在各向同性的均匀介质中传播时，光线束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，即 A_1 与 A_2 之间任意两条光线的光程相等，如图 1.5 所示。

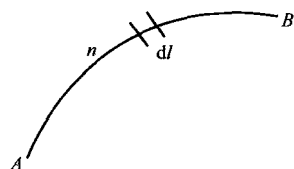


图 1.4 非均匀介质的光线与光程

1.1.3 成像的基本概念和完善成像的条件

1. 成像的基本概念

光学系统的作用：对物体成像。

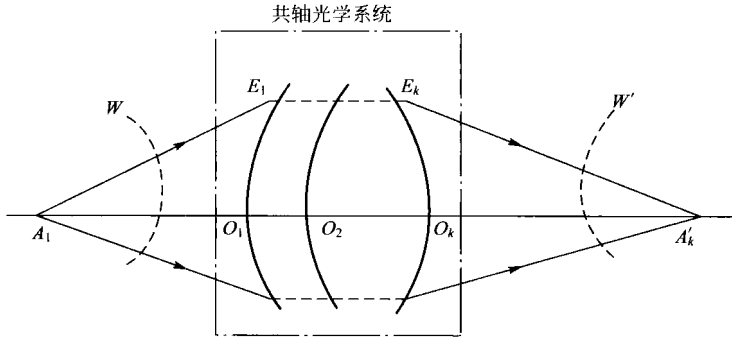


图 1.5 马吕斯定律配图

完善像点：若物点发出的球面波经过光学系统后仍为一球面波，则称该同心光束的中心为物点经过光学系统形成的完善像点。

完善像：物体上每个点经过系统后形成完善像点的集合就是该物体经过光学系统后的完善像。

物空间：物体所在的空间称为物空间。

像空间：像所在的空间称为像空间。

共轴光学系统：若光学系统中各个光学元件表面的曲率中心在一条直线上，则该光学系统是共轴光学系统。

光轴：光学系统中各个光学元件表面的曲率中心的连线称为共轴光学系统的光轴。

2. 完善成像的条件

完善成像的条件有 3 种表述方法。

- (1) 入射波面为球面波时，出射波面也为球面波；
- (2) 入射波面为同心光束时，出射波面也为同心光束；
- (3) 物点与像点之间任意 2 条光路的光程相等。

注意：完善成像的条件的 3 种表述是对同一条件的 3 种不同表述，而不是 3 个不同的条件。

3. 物像的虚实

根据同心光束的会聚与发散，物像有虚实之分。

由实际光线相交形成的点为实物点或实像点，而由光线的延长线相交形成的点为虚物点或虚像点，如图 1.6 所示。

实像不仅能为人眼观察，还能用屏幕、胶片或者光电成像器件记录；而虚像只能为人眼观察，但不能被记录。

4. 物像的相对性

物像都是相对于某一个光学系统的。当几个光学系统组合在一起时，前一系统的像是后一系统的物。

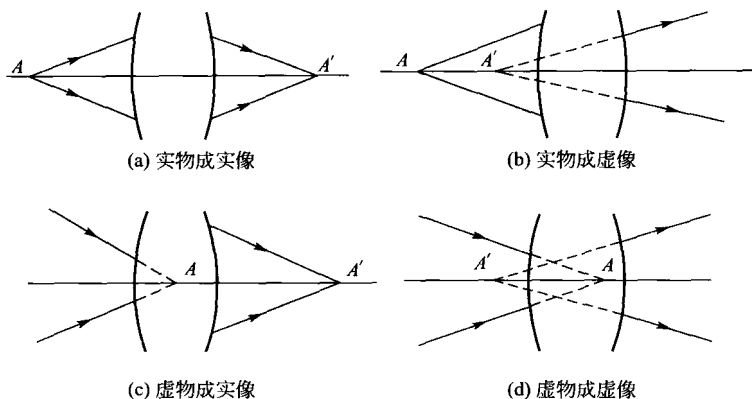


图 1.6 物像的虚实

1.2 典型例题详解

例 1.1 已知真空中的光速为 $c=3\times 10^8\text{m/s}$, 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($n=2.417$)介质中的光速。

分析: 光的传播问题, 本题主要考查对相对折射率 n 的基本公式 $n=c/v$ 的认识和理解。

解:

$$n=\frac{c}{v}\Rightarrow v=\frac{3\times 10^8}{n}$$

则当光在水中, $n=1.333$ 时, $v=2.25\times 10^8\text{m/s}$; 当光在冕牌玻璃中, $n=1.51$ 时, $v=1.99\times 10^8\text{m/s}$; 当光在火石玻璃中, $n=1.65$ 时, $v=1.82\times 10^8\text{m/s}$; 当光在加拿大树胶中, $n=1.526$ 时, $v=1.97\times 10^8\text{m/s}$; 当光在金刚石中, $n=2.417$ 时, $v=1.24\times 10^8\text{m/s}$ 。

例 1.2 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 NA (即 $n_0\sin I_0$, 其中 I_0 为光在光纤内能以全反射方式传播时在入射端面的最大入射角)。

分析: 全反射现象的应用问题, 本题主要考查对全反射现象的认识和理解。

解: 光纤内的全反射现象如图 1.7 所示。位于光纤入射端面, 满足由空气入射到光纤芯中, 应用折射定律则有

$$n_0\sin I_0=n_1\sin I'_0 \quad (1-2)$$

而当光束由光纤芯入射到包层时满足全反射, 使得光束可以在光纤内传播, 则有

$$\sin I_m=\sin(90^\circ-I'_0)=\frac{n_2}{n_1} \quad (1-3)$$

由式(1-2)和式(1-3)联立可得

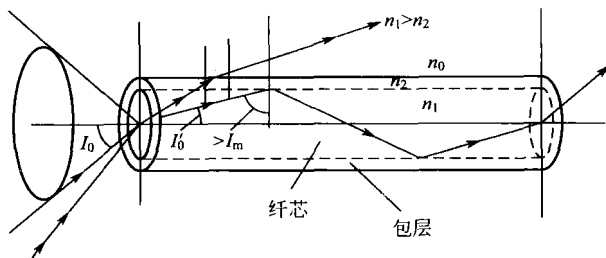


图 1.7 光纤内的全反射现象

$$NA = n_0 \sin I_0 = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

例 1.3 证明当平面镜的法线以入射点为中心在入射面内转过 θ 角时，反射光线将改变 2θ 角。

分析：反射定律的应用。

证明：因为入射光线方向不变，平面镜转过 θ 后，法线也转过 θ 至 ON' 位置，如图 1.8 所示。

此时，入射角 $\angle AON' = i + \theta$ ，反射角 $\angle B'ON' = i' + \theta = i + \theta$ ，所以反射线转过的角度为 $\angle BOB' = \angle AOB' - \angle AOB = 2(i + \theta) - 2i = 2\theta$ 。

例 1.4 当一束光从空气进入水中时，光束的截面积会发生怎样的变化？

分析：折射定律的应用。

解：一束光从空气进入水中，由折射定律 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ ， $n_1 < n_2$ 应有 $i_1 > i_2$ 。如图 1.9 所示， $OO' = d$ ，光束在空气中的横截面积为 $\pi(d \cos i_1 / 2)^2$ ，在水中为 $\pi(d \cos i_2 / 2)^2$ 。因为 $i_1 > i_2$ ， $\cos i_2 > \cos i_1$ ，所以光束在水中的横截面积大于在空气中的横截面积。

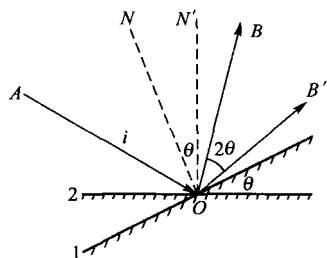


图 1.8 反射定律的应用证明题图

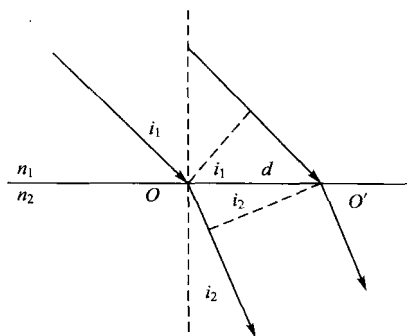


图 1.9 例 1.4 光路图

例 1.5 物体经针孔相机在屏上成一个 60mm 大小的像，若将屏拉远 50mm，则像的大小变为 70mm，求屏到针孔的初始距离。

分析：本题主要考查对光的直线传播定律的认识和理解。

解：在同种均匀介质空间中光线直线传播。

设屏到针孔的初始距离为 x ，如图 1.10 所示，则可以根据三角形相似得

$$\frac{60}{70} = \frac{x}{x + 50}$$

所以

$$x = 300\text{mm}$$

即屏到针孔的初始距离为 300mm。

例 1.6 一厚度为 200mm 的平行平板玻璃(设 $n=1.5$)下面放一直径为 1mm 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方向上都看不到该金属片,则纸片最小直径应为多少?

分析: 本题主要考查对全反射现象的认识和理解。

解: 令纸片的最小半径为 x , 其光路图如图 1.11 所示。

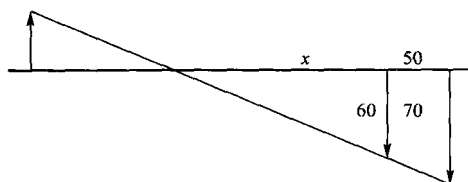


图 1.10 例 1.5 光路图

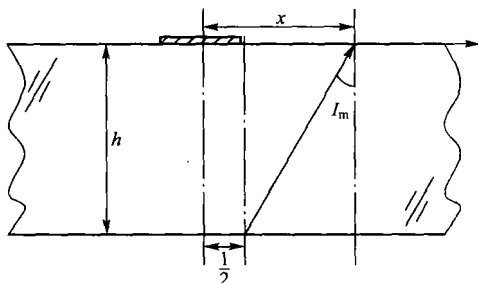


图 1.11 例 1.6 光路图

根据全反射原理, 光束由玻璃射向空气时满足入射角度大于或等于全反射临界角时会发生全反射, 而这里正是由于这个原因导致在玻璃板上方看不到金属片。而求全反射临界角的公式为

$$\sin I_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-4)$$

式中, $n_2=1$, $n_1=1.5$ 。

同时根据几何关系, 利用平板厚度和纸片以及金属片的半径得到全反射临界角的计算公式为

$$\tan I_m = \frac{x - \frac{1}{2}}{200} \quad (1-5)$$

联立式(1-4)和式(1-5)可以求出纸片的最小半径为 $x=179.385\text{mm}$, 所以纸片的最小直径为 358.77mm。

1.3 课后习题选解

1-3 潜水员在水下向上仰望, 能否感觉到整个水面都是明亮的?

解: 本题是全反射现象和光路可逆现象的综合运用。

水的折射率为 $n_{\text{水}}=1.33$, 空气的折射率 $n_{\text{空}}=1$ 。当光线由水进入空气, 是由高折射率介质进入低折射率介质, 可以发生全反射, 即由水中一点发出的光线射到水面上时, 如果入射角达到临界角, 出射光线将掠过分界面。换一个角度看, 和水面趋于平行的光线折射后进入水中一点 A, 它在水面下的折射角即为临界角 I_m 。在以水中一点 A 为锥顶、半顶

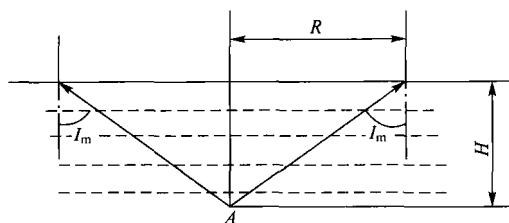


图 1.12 习题 1-3 图

角为 I_m 的圆锥范围内, 水面上的光线可以射到 A 点, 所以游泳者在水中仰望天空, 不能感觉整个水面都是明亮的, 而只能看到一个明亮的圆, 圆的大小与游泳者所在的水深有关, 如图 1.12 所示。

$$\sin I_m = \frac{n_{\text{空}}}{n_{\text{水}}} = \frac{1}{1.33} = 0.75$$

得

$$I_m = 48^\circ 36'$$

设水深度为 H , 则明亮圆的半径为 $R = H \tan I_m$ 。

1-9 一个等边三角棱镜, 若入射光线和出射光线对棱镜对称, 出射光线对入射光线的偏转角为 40° , 求该棱镜材料的折射率。

解题提示: 入射光线和出射光线对棱镜对称, 如图 1.13 所示。说明 $I_1 = -I_2'$, $I_1' = -I_2$, 得 $n = 1.532$ 。

1-11 为了从坦克内部观察外界目标, 需要在坦克壁上开一个孔, 假定坦克壁厚 200mm, 孔大小为 120mm, 在孔内装一块折射率 $n = 1.5163$ 的玻璃, 厚度与装甲厚度相同, 则在允许观察者眼睛左右移动的情况下能看到外界多大的角度范围?

解题提示: 如图 1.14 所示, $\tan I' = \frac{120}{200}$, $\sin I = n \sin I'$, 故 $I = 51.27250^\circ$, 则 $2I = 102^\circ 32' 42''$ 。

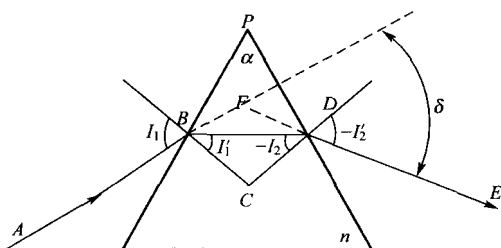


图 1.13 习题 1-9 图

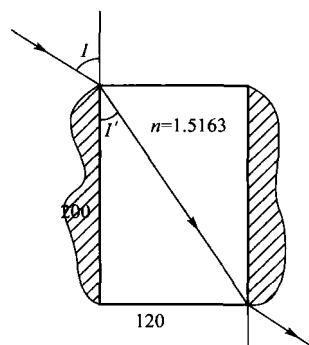


图 1.14 习题 1-11 图

1.4 单元复习提示

(1) 光传播的基本定律有哪些? 举例说明符合光传播的基本定律的生活现象及各个定律的应用。

(2) 什么是完善成像? 完善成像的条件是什么?

(3) 什么是虚像? 什么是实像? 如何判断像的虚实?

(4) 当逆着光线的方向观察时, 能看到实像和虚像吗? 凭眼睛看能否辨别是实像还是虚像? 照相机能否拍摄虚像的照片?

答：实像对应的出射光束从系统出射后为会聚的同心光束，当逆着光线的方向观察时，眼睛看不到实像，但可以用屏接收实像。虚像对应的出射光束从系统出射后为发散的同心光束，当逆着光线的方向观察时，眼睛能看到虚像。所以凭眼睛看能辨别是实像还是虚像。照相机可以拍摄虚像的照片。因为虚像对应的出射光束从系统出射后为发散的同心光束，而照相机一定在成像系统的前方拍摄，所以系统的虚像对于照相机是成发散的同心光束，是照相机镜头的实物，因此照相机可以拍摄虚像的照片。

(5) 为什么日出或日落时太阳看起来是扁的？

答：当日出或日落时，太阳位于地平线附近。对于地球的一点，来自太阳顶部、中部和底部的光线射向地球大气层的入射角依次增大。同时，由于大气层的密度不均匀，引起折射率 n 随着接近地面而逐渐增大。所以当光线穿过大气层射向地面时，折射率 n 逐渐增大，其折射角逐渐减少，光线的传播路径发生弯曲。沿着光线看去，看到的发光点位置比其实际位置高。另外，折射光线的弯曲程度还与光线入射角有关，入射角越大的光线弯曲越厉害，视觉位置被抬得越高。因此从太阳上部到太阳下部发出的光线的入射角逐渐增大，下部的视觉位置就依次比上部抬得更高。所以，日出和日落时太阳看起来呈扁椭圆形。

(6) 全反射有什么特性？试分析当光从光疏介质进入到光密介质时，可能发生全反射吗？

(7) 证明光线经过透明平行平板时，出射光线与入射光线平行。

(8) 设想一下：在鱼的眼睛里，天空是什么样子的？

第 2 章

共轴球面光学系统

2.1 本章主要内容

2.1.1 光路计算和近轴光学系统

折射球面具有普遍意义。

注意：①平面可以看作是曲率半径 $r \rightarrow \infty$ 的特例，因此不再考虑平面成像系统；②光的反射现象可以看作是光的折射现象中 $n' = -n$ 的特例，因此在几何光学中，不再单独研究光的反射。

1. 基本概念

如图 2.1 所示， C 为折射球面的球心，通过球心 C 的直线即为光轴，光轴与折射球面的交点 O 称为球面顶点。

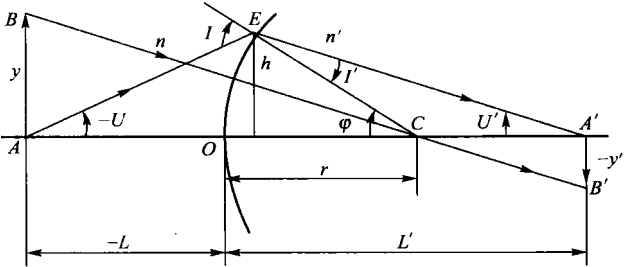


图 2.1 单个折射面成像

子午面：轴外物点的主光线与光学系统主轴所构成的平面，称为光学系统成像的子午面；

物方截距 L ：顶点 O 与物点 A 的距离；

物方孔径角 U ：入射光线与光轴的夹角；

像方截距 L' : 顶点 O 与像点 A' 的距离;

像方孔径角 U' : 出射光线与光轴的夹角。

2. 符号规则

国家标准 GB/T 1224—1999 有如下规定。

(1) 沿轴线段(如 L 、 L' 和 r): 规定光线的传播方向自左向右为正方向, 以折射顶点 O 为原点, 由顶点到光线与光轴的交点的方向和光线传播方向相同时取正, 相反时取负。因此, 图中 L 为负, L' 和 r 为正。

(2) 垂轴线段(如光线投射高度 h): 以光轴为基准, 在光轴上方为正, 在光轴下方为负。

(3) 光线与光轴的夹角(如 U 、 U'): 用光轴转向光线形成的锐角度量, 顺时针为正, 逆时针为负。因此, 图中 U 为负, U' 为正。

(4) 光线与法线的夹角(如 I 、 I' 和 I''): 由光线以锐角方向转向法线, 顺时针为正, 逆时针为负。

(5) 光轴与法线的夹角(如 φ): 由光轴以锐角方向转向法线, 顺时针为正, 逆时针为负。

(6) 相临两折射面间隔(用 d 表示): 由前一面的顶点到后一面的顶点, 顺光线方向为正, 逆光线方向为负。在折射系统中, d 恒为正值。

3. 实际光线的光路计算

实际光线的光路计算图如图 2.1 所示, 计算公式为

$$\begin{cases} \sin I = (L - r) \frac{\sin U}{r} \\ \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \\ U' = U + I - I' \\ L' = r \left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right) \end{cases} \quad (2-1)$$

由式(2-1)可知, L 一定时, L' 是 U 的函数, 因此同心光束经过单个折射面后, 出射光束不再是同心光束(这种现象称为球差), 单个折射面成像是完善的。

4. 近轴光线的光路计算

为了解决单个折射面成像不完善的问题, 将光线限定在近轴区(光轴附近很小的区域)内, 将角度的正弦值用相应的弧度值代替, 可以得到新的推导公式为

$$\begin{cases} u' = \frac{n'l - nl + nr}{n'r} u \\ l' = \frac{n'lr}{n'l - nl + nr} \end{cases} \quad (2-2)$$

由式(2-2)可知, 在近轴区, 细光束经单个折射面可以成完善像, 该像一般称为高斯像。一对构成高斯像的物像关系的点称为共轭点。

将式(2-2)变形后的式子更为通用, 常称为高斯像求解公式。近轴区域高斯像求解公式为

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (2-3)$$