



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工程光学

复习指导与习题解答

第2版

蔡怀宇 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工程光学复习指导 与习题解答

第2版

蔡怀宇 编著



机械工业出版社

本书基本遵循“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《工程光学》的体系框架,分11章全面系统地总结了工程光学各部分的主要学习要求和重点复习内容,精选典型例题进行了详细分析,并设置自测练习供读者自查学习效果。此外,还针对期末考试和研究生入学考试的不同需要配置了综合仿真试卷,旨在帮助读者更好地提升学习效果。

全书内容包括:几何光学的基本定律与成像概念、理想光学系统、平面与平面系统、光学系统中的光束限制、光度学和色度学基础、光线的光路计算及像差理论、典型光学系统与像质评价、光的电磁理论基础、光的干涉和干涉系统、光的衍射,以及光的偏振和晶体光学基础。共精选分析例题100个,设置自测练习346题(包括多选、填空和计算等多种题型),配置各类仿真试卷6套。

本书可作为高校光电信息科学与工程、测控技术与仪器等仪器类或相近专业正在学习“工程光学”课程的本科生、专科生的教材配套参考书,也可作为准备报考研究生或从事相关领域教学和科研人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程光学复习指导与习题解答/蔡怀宇编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2016. 1

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-52911-8

I. ①工… II. ①蔡… 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(2016)第024696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:王康 责任编辑:王康

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2016年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·340千字

标准书号:ISBN 978-7-111-52911-8

定价:29.80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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmpl1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第 2 版前言

自 2009 年 9 月《工程光学复习指导与习题解答》正式出版发行至今, 6 年期间共印刷 6 次, 受到了众多正在学习“工程光学”课程和相关学科复习考研学生的欢迎, 也得到了许多来自教学第一线教师的充分肯定。该书作为“工程光学”系列教材之一, 于 2013 年获得天津市教学成果一等奖, 并于 2014 年荣幸地入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本次修订充分借鉴了广大读者的反馈意见和多层次要求, 在保持原有基本框架体系不变的前提下新增“光度学和色度学基础”一章, 使本书内容与其对应主教材更为一致; 在相应章节中修订、补充和完善了若干知识点的表述, 对于疑问较多的习题增加了提示内容, 更有利于读者的学习和理解; 将难度较大、综合性相对较强的题目标注了“*”号, 便于有不同层次要求的读者选学选做。本次修订补充例题及各类习题 44 道, 同时更正了第 1 版中出现的错误。

本书修订得到了天津大学工程光学课程组教师及机械工业出版社的帮助和支持, 研究生武晓宇、丁蕾承担了本书稿的部分文字修订和校正工作, 在此一并表示感谢! 希望本书能够一如既往地服务广大师生, 为国家的光学教育事业尽一份力量。

蔡怀宇

第1版前言

“工程光学”是高等学校光电信息科学与工程、仪器类专业及相近专业的一门重要学科基础课程，作为开展光学理论和光学技术教育的专业基础课面向本科生开设，对于学生学习其他光电专业课程、培养综合能力具有十分重要的意义。该课程主要涵盖几何光学和物理光学两大部分内容，涉及基本概念、基本理论和实际解决工程光学问题等各个方面，其综合性、灵活性和实践性都很强，对初学者来说，具有一定的难度。近年来为了满足课程改革的需要，新知识不断扩充，各校所开设的“工程光学”课程学时都相应地有所增减，习题课明显不足，致使学生学习该课程的困难更加突出；同时由于教育规模的扩充和新办专业的出现，也迫切需要工程光学教材的配套辅导材料，以保证教学质量要求。因此，编写并出版《工程光学复习指导与习题解答》不仅能够为正在学习该课程的学生全面掌握重点知识提供有力的帮助，为准备报考同类专业研究生的学生答疑解惑，也能为新筹办专业的教学质量提供有效的指导和保障。

本书基本遵循天津大学郁道银教授主编的普通高等教育“十五”国家级规划教材《工程光学（第2版）》的体系框架，分十个章节全面系统地总结了工程光学（含几何光学和物理光学）的主要学习要求和重点复习内容，精选典型例题进行了详细分析，并设置自测练习供自查学习效果。此外还针对期末考试和研究生入学考试的不同需要配置了综合仿真试卷，能够帮助读者很好地提升学习效果。

全书共精选分析例题 93 个，设置自测练习 309 题（包括多选、填空和计算等多种题型）、各类仿真试卷及参考答案 6 套。题目一部分来自教材、国内其他参考书籍或部分院校的考试试题，另一部分来源于教学实践经验的积累，如：书中汇总的多重选择题，多数都是根据教学过程中学生们曾经出现的问题或易混淆的概念整理而成。详解例题都经过精心的筛选，不但呼应对应章节的学习要求和重点内容，而且力求做到具有典型性和启发性。在解题过程中特别注重总结知识点、明确解题思路和说明多解方法等。

本书吸收了天津大学几代人的“工程光学”教学传统和经验，得到了来自学院和“工程光学”课程组等各方面的支持。特别是在本书的编写过程中，郁道银教授在百忙之中认真仔细地审阅了 1~6 章的全部内容，提出了许多中肯的修改意见；谢洪波副教授、江俊峰副教授和任坤讲师审阅校正了 1~6 章；吕且妮副教授、刘宏利副教授和赵宁波讲师审阅校正了 7~10 章；研究生范立强、孙立彬、李妍、尤勐为本书的编写进行了部分习题试做和收集资料的工作，在此表示衷心的感谢！同时对所参考书籍的作者、对所选题目的作者表示深切的谢意！

谨以此书作为自己从事连续十年“工程光学”教学工作的小小纪念，希望它能够对我的学生们有所裨益，也希望它不辜负来自同行、学生和家人的期望。

蔡怀宇

目 录

第2版前言

第1版前言

第一部分 复习重点和例题分析

几何光学篇

第一章 几何光学的基本定律与成像概念	2
一、学习要求	2
二、重点内容	2
三、例题分析	5
四、自测练习	12
第二章 理想光学系统	16
一、学习要求	16
二、重点内容	16
三、例题分析	20
四、自测练习	28
第三章 平面与平面系统	34
一、学习要求	34
二、重点内容	34
三、例题分析	40
四、自测练习	43
第四章 光学系统中的光束限制	48
一、学习要求	48
二、重点内容	48
三、例题分析	52
四、自测练习	57
第五章 光度学和色度学基础	60
一、学习要求	60
二、重点内容	60
三、例题分析	65
四、自测练习	68
第六章 光线的光路计算及像差理论	71
一、学习要求	71
二、重点内容	71
三、例题分析	76
四、自测练习	80

第七章 典型光学系统与像质评价	85
一、学习要求	85
二、重点内容	85
三、例题分析	93
四、自测练习	102
物理光学篇	
第八章 光的电磁理论基础	108
一、学习要求	108
二、重点内容	108
三、例题分析	115
四、自测练习	119
第九章 光的干涉和干涉系统	124
一、学习要求	124
二、重点内容	124
三、例题分析	131
四、自测练习	138
第十章 光的衍射	147
一、学习要求	147
二、重点内容	147
三、例题分析	153
四、自测练习	159
第十一章 光的偏振和晶体光学基础	165
一、学习要求	165
二、重点内容	165
三、例题分析	173
四、自测练习	180
第二部分 仿真试题	
一、几何光学期末考试仿真试卷 1 (120 分钟)	188
二、几何光学期末考试仿真试卷 2 (120 分钟)	192
三、物理光学期末考试仿真试卷 1 (120 分钟)	197
四、物理光学期末考试仿真试卷 2 (120 分钟)	200
五、工程光学考研仿真试卷 1	204
六、工程光学考研仿真试卷 2	209
参考文献	214



第一部分

复习重点和例题分析

几何光学篇

第一章 几何光学的基本定律与成像概念

一、学习要求

通过对本章的学习,应掌握几何光学的基本定律(光的直线传播定律、独立传播定律、反射定律和折射定律),光的全反射性质,费马原理、马吕斯定律以及二者与几何光学基本定律之间的关系;明确完善成像概念和相关表述;会熟练应用符号规则进行单个折射球面的光线光路计算,掌握单个折射球面和反射球面的成像公式,包括物像位置、垂轴放大率 β 、轴向放大率 α 、角放大率 γ 、拉赫不变量等公式及其各量的物理意义,并推广到共轴球面系统的成像计算。

二、重点内容

1. 几何光学的基本定律

光是一种电磁波,它在介质中的传播规律可概括为以下四个基本定律,见表 1-1。

折射率是表征透明介质光学性质的重要参量,它可以用来描述介质中的光速 v 相对于真空中光速 c 的减慢程度,定义为: $n=c/v$ 。

费马原理和马吕斯定律从另外的角度描述了光在介质中的传播规律,它们与几何光学的四个基本定律是完全等价的,可以相互推导证明。

费马原理可以表述为:光从一点传播到另一点,其间无论进行了多少次反射和折射,其光程为极值(极大值、极小值或常数)。光是沿着光程取极值的路径传播的。

马吕斯定律的表述是: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。

2. 成像的基本概念与完善成像条件

光学系统的作用之一是对物体成像。若一个物点对应的一束同心光束,经光学系统后仍为同心光束,该光束的中心即为该物点的完善像点。物体上每个点经光学系统后所成完善像点的集合就是该物体经光学系统后的完善像。物所在的空间称为物空间,像所在的空间称为像空间,物像空间的范围均为 $(-\infty, +\infty)$ 。物像有虚实之分,由实际光线相交所形成的物或像为实,由光线的延长线相交所形成的物或像为虚。

光学系统成完善像应满足以下三个等价条件之一:①入射波面是球面波时,出射波面也是球面波;②入射光是同心光束时,出射光也是同心光束;③物点及其像点之间任意两条光路的光程相等。

表 1-1 几何光学基本定律

名 称	内 容 表 述	实 例	补 充 说 明
直线传播定律	在各向同性的均匀介质中, 光是沿直线传播的	影 子、日 蚀、月 蚀	当光传播遇到波长量级的障碍物(如小孔或狭缝)时, 会发生“衍射”现象, 破坏了该定律的成立条件
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	两个探照灯的光束交会和分离	当两束光由同一单色点光源发出、经不同路径传播后在空间某点相遇时, 会发生“干涉”现象, 破坏了该定律的成立条件
反射定律	反射光线位于由入射光线和分界面上入射点的法线所决定的平面内; 反射光线和入射光线位于法线的两侧, 且反射角和入射角的绝对值相等、符号相反, 即: $I' = -I$	平面反射镜改变光线方向	1. 通常情况下, 光入射到两种均匀介质分界面上时, 会同时出现反射现象和折射现象 2. 若光线从光密介质进入光疏介质, 且入射角大于临界角, 会出现全反射现象 3. 将 $n' = -n$ 代入折射定律则可推导出反射定律的表达式
折射定律	折射光线位于由入射光线和分界面上入射点的法线所决定的平面内; 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。折射定律可表示为: $n' \sin I' = n \sin I$	插入水中的筷子看上去是弯折的	

3. 几何光学中的符号规则和单个折射球面的光线光路计算

为保持几何光学公式的一致性和讨论问题的方便, 特确定了如下的符号规则: ①光线的传播方向由左向右。沿轴线段以折射面顶点为原点度量, 若与光线的传播方向相同, 其值为正, 反之为负; ②垂轴线段以光轴为基准, 在光轴以上为正, 光轴以下为负; ③光线与光轴的夹角用由光轴转向光线形成的锐角度量, 顺时针为正, 逆时针为负; ④光线与法线的夹角用由光线转向法线形成的锐角度量, 顺时针为正, 逆时针为负; ⑤光轴与法线的夹角用由光轴转向法线形成的锐角度量, 顺时针为正, 逆时针为负; ⑥折射面间隔从前一面的顶点到后一面的顶点, 与光线的传播方向相同, 其值为正, 反之为负。符号规则是人为规定的, 所有公式都在此规则基础上推导出来, 因此解题时必须严格遵守。如遇到光线由右向左传播的情况, 一定要做适当的变通后, 才可使用公式。

如图 1-1 所示, 折射球面曲率半径为 r , 介质折射率分别为 n 和 n' , 若已知光线物方坐标 L 和 U , 应用折射定律和三角函数关系, 可推导出下列光线光路计算公式:

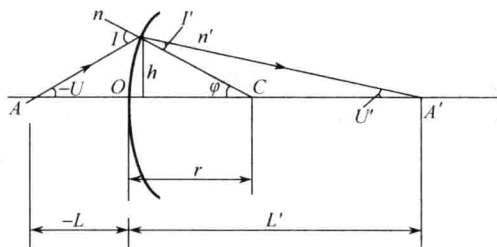


图 1-1 单个折射球面的折射

$$\sin I = (L - r) \frac{\sin U}{r} \quad (1-1)$$

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

$$U' = U + I - I' \quad (1-3)$$

$$L' = r \left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right) \quad (1-4)$$

从而得到光线的像方截距 L' 和孔径角 U' 。式 (1-4) 表明：对于确定的一个轴上物点 (L 不变) 以不同宽度的成像光束成像时 (U 值不同)，所得像点的位置不同。

当光线为近轴光线时，式 (1-1) ~ 式 (1-4) 可简化为

$$i = \frac{l-r}{r}u \quad (1-5)$$

$$i' = \frac{n'}{n}i \quad (1-6)$$

$$u' = u + i - i' \quad (1-7)$$

$$l' = r \left(1 + \frac{i'}{u'} \right) \quad (1-8)$$

$$\text{在近轴区, 有关系式} \quad l'u' = lu = h \quad (1-9)$$

由式 (1-5) ~ 式 (1-9) 可推导出

$$n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \quad (1-10)$$

$$n'u' - nu = (n' - n) \frac{h}{r} \quad (1-11)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明在近轴区，对于确定的物点存在唯一的一个像点与之对应，由此可确定物像共轭位置关系。

4. 单个折射 (反射) 球面的成像

为讨论单个折射球面成像的大小、倒正和虚实，引入垂轴放大率、轴向放大率和角放大率的概念。它们的定义、计算公式和物理意义见表 1-2。

表 1-2 单个折射球面的放大率

名 称	定 义	计 算 公 式	物 理 意 义
垂 轴 放 大 率 β	像的大小与物的 大小之比 $\beta = \frac{y'}{y}$	$\beta = \frac{n'l'}{n'l}$ 当 $n=n'$ 时, $\beta = \frac{l'}{l}$	可以确定物体的成像性质，即像的正倒、虚实、放大与缩小： 1. 若 $\beta > 0$ ，即 y' 与 y 同号，表示成正像；反之， y' 与 y 异号，表示成倒像 2. 若 $\beta > 0$ ， l' 与 l 同号，物像位于系统的同侧，表示物像虚实相反；反之，即 l' 与 l 异号，表示物像虚实相同 3. 若 $ \beta > 1$ ，即 $ y' > y $ ，成放大的像；反之， $ y' < y $ 成缩小的像
轴 向 放 大 率 α	轴上物点沿光轴 做微小移动时，所 引起的共轭像点移 动量 dl' 与物点移动 量 dl 的比 $\alpha = \frac{dl'}{dl}$	$\alpha = \frac{n'}{n}\beta^2$ 当 $n=n'$ 时, $\alpha = \beta^2$	1. 折射球面的轴向放大率恒为正，表明当物点沿轴移动时，其像点沿光轴同向移动 2. 通常 $\alpha \neq \beta$ (除 $\beta=1$ 情况外)，表明空间物体成像时要变形，比如一个正方体成像后，将不再是一个正方体

(续)

名 称	定 义	计 算 公 式	物 理 意 义
角放大率 γ	近轴区一对共轭光线, 它们与光轴的夹角 u' 和 u 之比 $\gamma = u'/u$	$\gamma = \frac{n'}{n} \cdot \frac{1}{\beta}$ 当 $n = n'$ 时, $\gamma = 1/\beta$	表示折射球面有将光束变宽或变窄的能力。它只与共轭点的位置有关, 而与光线的孔径角无关

三种放大率之间的关系

$$\alpha\gamma = \beta$$

将 $n' = -n$ 代入单个折射球面成像和放大率公式, 可得相应的反射球面公式

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r} \quad \text{和} \quad \begin{cases} \beta = y'/y = -l'/l \\ \alpha = dl'/dl = -(l'/l)^2 = -\beta^2 \\ \gamma = u'/u = -1/\beta \end{cases} \quad (1-13)$$

拉赫不变量是表征光学系统性能的重要参数, 其公式为

$$J = n'u'y' = nuy \quad (1-14)$$

式 (1-14) 表明: 实际光学系统在近轴区成像时, 物像共轭面内, 物体的大小、成像光束的孔径角和介质折射率的乘积为一个常数。

5. 共轴球面系统的成像

由 k 个折射球面构成的共轴光学系统相邻各面间折射率、孔径角、物像大小、物像距及拉赫不变量之间存在下面过渡关系

$$\begin{cases} n_2 = n'_1, & n_3 = n'_2 \cdots & n_k = n'_{k-1} \\ u_2 = u'_1, & u_3 = u'_2 \cdots & u_k = u'_{k-1} \\ y_2 = y'_1, & y_3 = y'_2 \cdots & y_k = y'_{k-1} \end{cases} \quad (1-15)$$

$$l_2 = l'_1 - d_1, \quad l_3 = l'_2 - d_2 \cdots \quad l_k = l'_{k-1} - d_{k-1} \quad (1-16)$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u'_1, \quad h_3 = h_2 - d_2 u'_2 \cdots \quad h_k = h_{k-1} - d_{k-1} u'_{k-1} \quad (1-17)$$

$$n_1 u_1 y_1 = n_2 u_2 y_2 = \cdots = n'_k u'_k y'_k = J \quad (1-18)$$

系统的成像放大率为各面放大率的乘积, 即

$$\begin{cases} \beta = \frac{y'_k}{y_1} = \frac{y'_1}{y_1} \cdot \frac{y'_2}{y_2} \cdots \frac{y'_k}{y_k} = \beta_1 \beta_2 \cdots \beta_k \\ \alpha = \frac{dl'_k}{dl_1} = \frac{dl'_1}{dl_1} \cdot \frac{dl'_2}{dl_2} \cdots \frac{dl'_k}{dl_k} = \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_k \\ \gamma = \frac{u'_k}{u_1} = \frac{u'_1}{u_1} \cdot \frac{u'_2}{u_2} \cdots \frac{u'_k}{u_k} = \gamma_1 \gamma_2 \cdots \gamma_k \end{cases} \quad (1-19)$$

三个放大率之间的关系仍为

$$\alpha\gamma = \beta \quad (1-20)$$

三、例题分析

例 1-1 一厚度为 200mm 的平行平板玻璃 (设 $n = 1.5$), 下面放一直径为 1mm 的金属薄片。若在玻璃板上盖一圆形的纸片, 使得在玻璃板上方任何方向上都看不到该金属薄片, 问纸片的最小直径应为多少?

【提示】 若要从玻璃板上方看不到金属薄片, 就应使金属薄片上所有点发出的光线在

玻璃板的上表面纸片遮盖区域以外发生全反射。

【解】 如图 1-2 所示, 设纸片的最小直径为 L , 考虑边缘光线满足全反射条件时

$$\sin I_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin 90^\circ = 0.666667$$

$$\cos I_2 = \sqrt{1 - 0.666667^2} = 0.745356$$

$$x = 200 \tan I_2 = 200 \times \frac{0.666667}{0.745356} = 178.8855$$

$$L = (2x + 1) \text{ mm} = 358.77 \text{ mm}$$

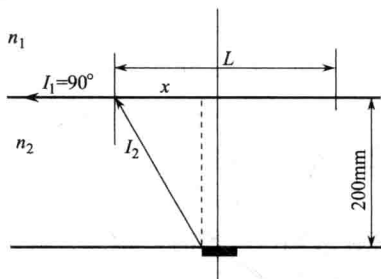


图 1-2 例 1-1 图

例 1-2 一个直径为 400mm, 折射率为 1.5 的玻璃球中有两个小气泡, 一个位于球心, 另一个位于 $1/2$ 半径处, 如图 1-3a 所示。沿两气泡连线方向在球的两边观察, 问看到的气泡在何处?

【提示】 由于式 (1-12) 建立在光线从左至右传播的符号规则基础上, 使用公式时一定要注意题目条件是否一致。当从右侧观察时, 气泡经玻璃球右侧球面成像, 符合公式使用条件; 而从左侧观察时, 气泡经玻璃球左侧球面成像, 即物发出的光线由右向左传播成像, 不符合公式使用条件, 故应做相应变通。具体方法有三种: ①将光路倒置, 计算后再还原; ②根据物像互为共轭关系, 将物看成像, 将像看成物以使光路符合符号规则; ③定义光线从右向左传播为正, 重新定义符号推导适用公式, 但不推荐使用此方法。

【解】 从右侧观察时, 将 $r = -200 \text{ mm}$, $n = 1.5$, $n' = 1$ 和物距 $l_A = -300 \text{ mm}$, $l_B = -200 \text{ mm}$, 分别代入公式 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$, 即 $l' = \frac{n'lr}{l(n' - n) + nr}$

解得 $l'_A = -400 \text{ mm}$, $l'_B = -200 \text{ mm}$

物像位置如图 1-3b 所示。

从左侧观察时:

方法 1: 将实际位置图 1-3c 等价为图 1-3d, 即可采用“从右侧观察时”的方法求解, 但求解后还要将结果转换成实际情况。

此时 $l_B = -200 \text{ mm}$, $l_A = -100 \text{ mm}$, $r = -200 \text{ mm}$, $n = 1.5$, $n' = 1$, 分别代入公式求解得

$$l'_A = -80 \text{ mm}, l'_B = -200 \text{ mm}$$

放回原题中得 $l'_A = 80 \text{ mm}$, $l'_B = 200 \text{ mm}$ 。如图 1-3e 所示。

方法 2: 认为 A、B 均为像点, 求其物。

此时, 将 $r=200\text{mm}$, $n=1$, $n'=1.5$ 和 $l'_A=100\text{mm}$, $l'_B=200\text{mm}$, 分别代入公式 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n'-n}{r}$ 解得 $l_A=80\text{mm}$, $l_B=200\text{mm}$ 。如图 1-3f 所示。

由此可见, 两种方法得到相同的结果。

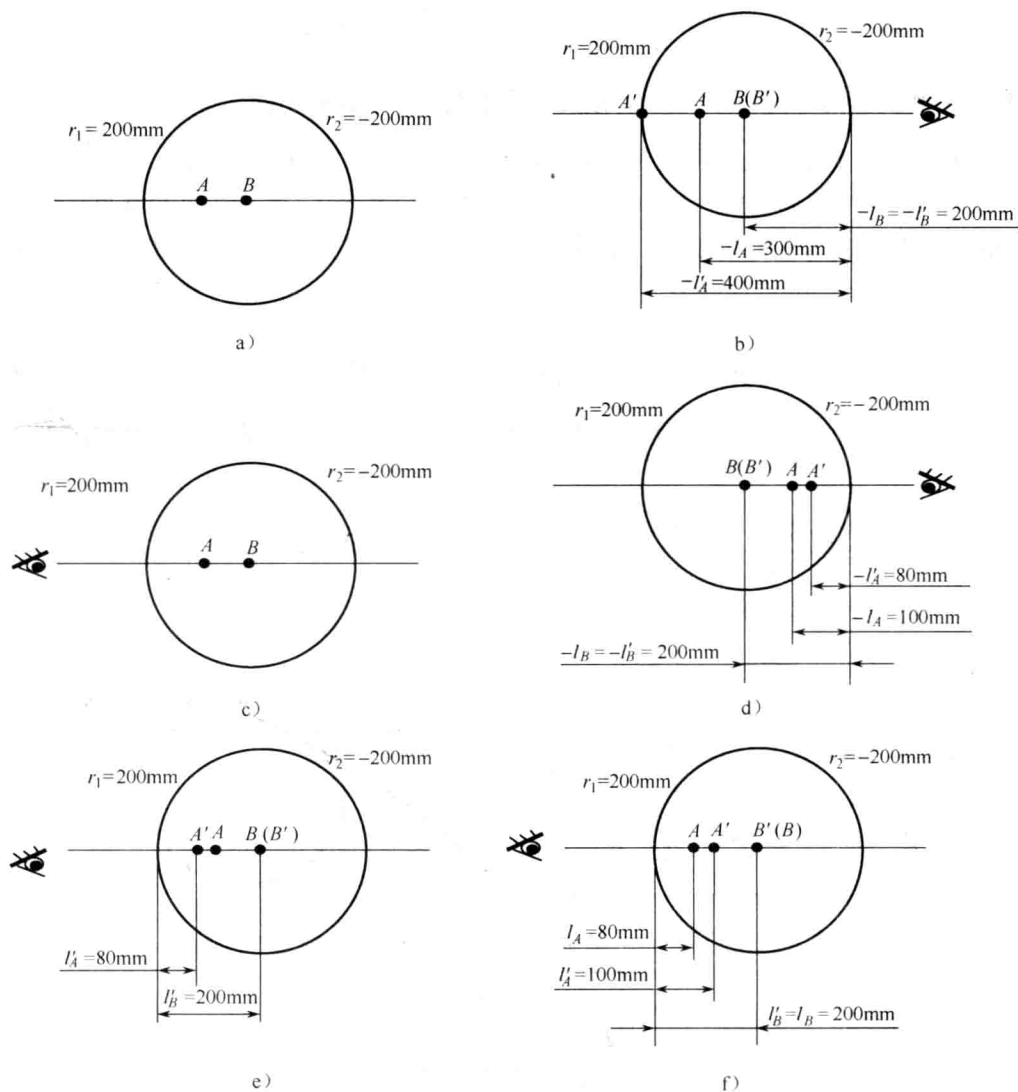


图 1-3 例 1-2 图

例 1-3 一束平行细光束入射到一半径 $r=30\text{mm}$ 、折射率 $n=1.5$ 的玻璃球上, 求经玻璃球折射后会聚点的位置。如果在凸面(第一面)镀反射膜, 其会聚点应在何处? 如果在凹面(第二面)镀反射膜, 则反射光束在玻璃中的会聚点又在何处? 反射光束经前表面折射后, 会聚点又在何处? 说明各个会聚点的虚实。

【提示】 解题时应首先分析清楚成像过程: 即经过几个折射球面成像和中间像所在的物像空间。根据物像空间正确选择折射率代入成像公式, 物像的虚实可根据 β 的符号性质, 也可根据是否是实际光线相交点来判断。

【解】 (1) 此时的成像过程如图 1-4a 所示：平行细光束入射到玻璃球上，经左侧球面折射后形成中间像 A'_1 ，它又是右侧球面的物 A_2 ，经右侧球面再次成像于 A'_2 。

将 $l_1 = -\infty$, $n_1 = 1$, $n'_1 = 1.5$, $r_1 = 30\text{mm}$ 代入单个折射球面成像公式 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$ 得

$$l'_1 = \frac{n'_1 r_1}{n'_1 - n_1} = \frac{1.5 \times 30}{0.5} \text{mm} = 90\text{mm}$$

由于 l_1 和 l'_1 异号, $\beta_1 = \frac{n_1 l'_1}{n'_1 l_1} < 0$, 故无限远物与像 A'_1 虚实相同, 即 A'_1 为实像。但由于右侧球面的存在, 实际光线不可能到达此处, 故对于右侧球面 A_2 为虚物。

将 $l_2 = l'_1 - 2r = (90 - 60) \text{mm} = 30\text{mm}$, $n_2 = 1.5$, $n'_2 = 1$, $r_2 = -30\text{mm}$ 再次代入单个折射球面成像公式得 $\frac{1}{l'_2} = \frac{-0.5}{-30} + \frac{1.5}{30} = \frac{1}{15}$

所以 $l'_2 = 15\text{mm}$

此时 $\beta_2 = \frac{n_2 l'_2}{n'_2 l_2} > 0$, 物 A_2 与像 A'_2 虚实相反, 即 A'_2 为实像。

(2) 当凸面镀反射膜时, 平行细光束入射到玻璃球上, 经左侧球面反射后成像, 如图 1-4b 所示。

将 $l = -\infty$ 代入公式 $\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r}$ 得

$l' = \frac{r}{2} = 15\text{mm}$, 为虚像。

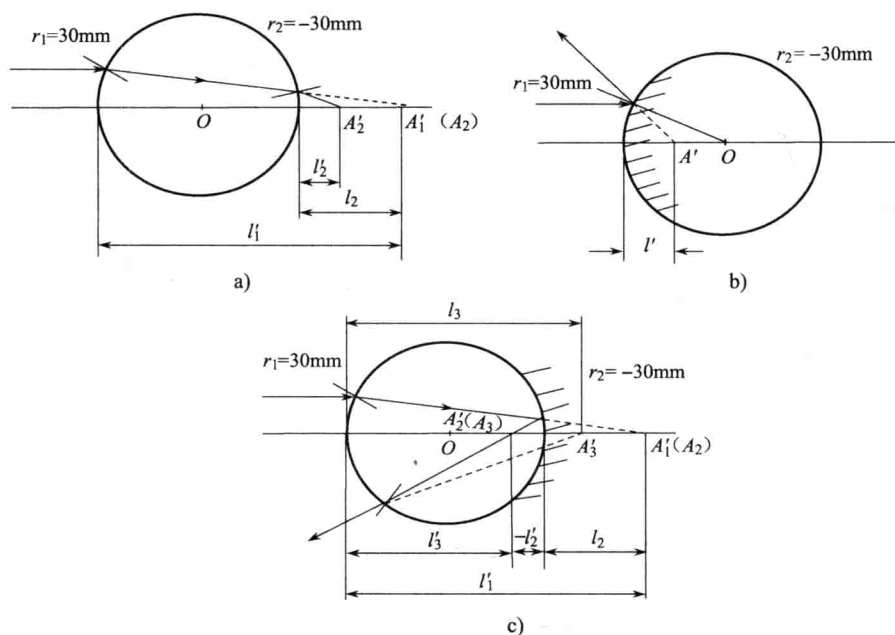


图 1-4 例 1-3 图

(3) 当凹面镀反射膜时, 成像过程如图 1-4c 所示：平行细光束入射到玻璃球上, 经左侧球面折射后形成中间像 A'_1 ，它又是右侧反射球面的物 A_2 ，经右侧反射球面再次成像于

A'_2 ，再经过前表面折射，最后成像于 A'_3 。

由 (1) 知 $l_2=30\text{mm}$ ，代入公式 $\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r}$ 得

$$\frac{1}{l'_2} + \frac{1}{30} = -\frac{2}{30}$$

所以 $l'_2 = -10\text{mm}$ ，为实像。

(4) 再继续经前表面折射时，光线由右向左传播成像，需根据光路的可逆性原理，将物看成像，将像看成物，即将 $l'_3=50\text{mm}$ 代入单个折射球面成像公式得

$$\text{即 } l_3 = \left(\frac{1.5}{50} - \frac{1.5-1}{30} \right)^{-1} = 75\text{mm}, \text{ 为虚像。}$$

例 1-4 已知一个曲率半径均为 20mm 的双凸透镜，置于空气中。物 A 位于第一球面前 50mm 处，第二面镀反射膜。该透镜所成实像 B 位于第一球面前 5mm 处。若按薄透镜处理，求该透镜的折射率 n 。

【提示】 分析成像过程，画出光路图是解决本题的关键。

【解】 如图 1-5 所示。物点 A 经过 3 次成像到达 B 。

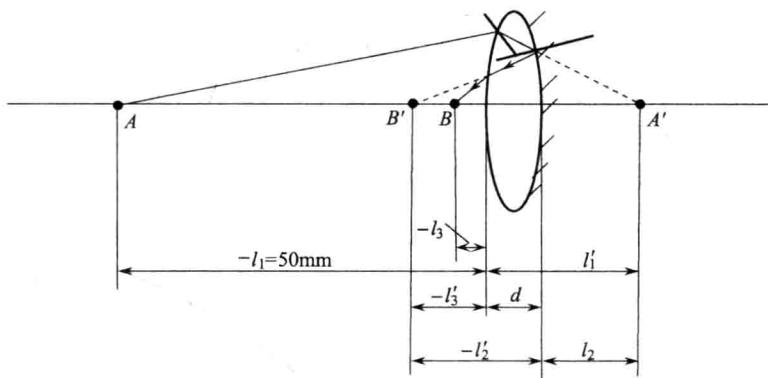


图 1-5 例 1-4 图

物点 A 经 r_1 折射成像在 A' 处，将已知条件 $l_1 = -50\text{mm}$ 代入公式 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n'-n}{r}$ 得

$$\frac{n}{l'_1} - \frac{1}{-50} = \frac{n-1}{20}$$

A' 经 r_2 反射后，成像于 B' 点。故将 $l_2 = l'_1 - d = l'_1$ ，代入反射面公式 $\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r}$ ，

$$\text{得 } \frac{1}{l'_2} + \frac{1}{l'_1} = -\frac{1}{10}$$

B' 点再经 r_1 折射成像在 B 点。根据光路的可逆性，将 B 点视为物， B' 点视为像，有 $-l_3 = (d+5)\text{mm} = 5\text{mm}$ ， $l'_3 = l'_2$ ，代入折射公式，得 $\frac{n}{l'_2} + \frac{1}{5} = \frac{n-1}{20}$

以上三式联立，解得 $n=1.6$ 。

例 1-5 一个折射球面 $r=150\text{mm}$ ， $n=1$ ， $n'=1.5$ ，当物距分别为 $-\infty$ ， -1000mm ， -100mm ， 0 ， 100mm ， 150mm 和 200mm 时，垂轴放大率各为多少？

【提示】 本题知识点：单个折射球面的放大率。

【解】 由公式
$$\begin{cases} n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \\ \beta = \frac{nl'}{n'l} \end{cases}$$
, 可得 $\beta = \frac{nr}{l(n'-n) + nr}$, 将已知条件折

射球面半径 $r=150\text{mm}$, 折射率 $n=1$ 和 $n'=1.5$, 及对应的物距代入:

(1) $l=-\infty$ 时, $\beta=0$

(2) $l=-1000\text{mm}$ 时, $\beta=-0.429$

(3) $l=-100\text{mm}$ 时, $\beta=1.5$

(4) $l=0$ 时, 由 $l' = \frac{n'lr}{l(n'-n) + nr} = \frac{n'r}{(n'-n) + nr/l}$ 解得 $l'=0$ 。说明物和像都位于单

个折射球面的顶点处, 根据几何光学的性质知, 此时 $\beta=1$

(5) $l=100\text{mm}$ 时, $\beta=0.75$

(6) $l=150\text{mm}$ 时, $\beta=0.667$

(7) $l=200\text{mm}$ 时, $\beta=0.6$

例 1-6 有平凸透镜 $r_1=100\text{mm}$, $r_2=\infty$, $d=300\text{mm}$, $n=1.5$, 当物体在 $-\infty$ 时, 求高斯像的位置。在第二面上刻一个十字丝, 问其通过球面的共轭像在何处? 当入射高度 $h=10\text{mm}$ 时, 实际光线的像方截距为多少? 与高斯像面的距离为多少?

【提示】 近轴光线和远轴光线在计算中应选用不同公式, 且光线行进过程中所有的折射面对光线的折射都有贡献。

【解】 (1) 根据近轴光的光线光路计算公式可求高斯像位置。将 $l_1=-\infty$, $n'_1=1.5$, $n_1=1$, $r_1=100\text{mm}$ 代入单个折射球面成像公式 $\frac{n'_1}{l'_1} - \frac{n_1}{l_1} = \frac{n'_1 - n_1}{r_1}$, 解得 $l'_1=300\text{mm}$

$$l_2 = l'_1 - d = (300 - 300) \text{ mm} = 0 \text{ mm}$$

所以 $l'_2=0\text{mm}$

即: 物体位于 $-\infty$ 时, 其高斯像点在第二面的中心处。

(2) 由光路的可逆性可知: 第二面上的十字丝, 其共轭像在物方 $-\infty$ 处。

(3) 当 $h_1=10\text{mm}$ 时, 如图 1-6 所示。利用式 (1-1) ~ 式 (1-4) 求得

$$\text{光线经第一面折射, } \sin I_1 = \frac{h_1}{r_1} = \frac{10}{100} = 0.1,$$

$$\sin I'_1 = \frac{n_1}{n'_1} \sin I_1 = \frac{1}{1.5} \times 0.1 = 0.06667$$

$$\text{所以 } I'_1 = \arcsin 0.06667 = 3.822^\circ$$

$$U'_1 = U_1 + I_1 - I'_1 = (0 + 5.739 - 3.822)^\circ = 1.9172^\circ$$

$$L'_1 = r_1 \times \left(1 + \frac{\sin I'_1}{\sin U'_1} \right) = 100 \times \left(1 + \frac{0.06667}{0.0334547} \right) \text{ mm} = 299.374 \text{ mm}.$$

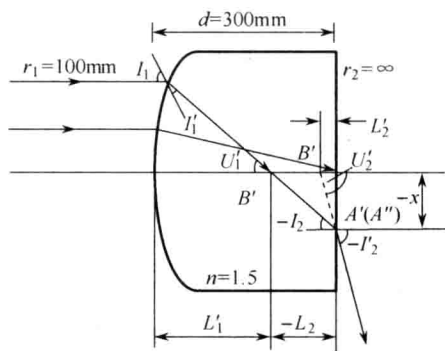


图 1-6 例 1-6 图

光线再经第二面折射, $L_2 = L'_1 - d = -0.626\text{mm}$, $-I_2 = U'_1 = 1.9172^\circ$, 则

$$\sin I'_2 = \frac{n_2}{n'_2} \sin I_2 = -1.5 \sin 1.9172^\circ = -0.05018, I'_2 = -2.87647^\circ$$