

应用光学

概念 题解与自测 (第2版)

李 林 黄一帆 ◎ 著

EXERCISE BOOK OF APPLIED OPTICS
(2ND EDITION)

应用光学

概念 题解与自测 (第2版)

李 林 黄一帆 © 著

EXERCISE BOOK OF APPLIED OPTICS
(2ND EDITION)

内 容 简 介

本书是光电信息科学与工程、测控技术与仪器等专业本科生专业基础课——应用光学的辅助教材,章次与《应用光学》章次相对应。本书对《应用光学》中相应的章节分别进行了总结和归纳,对重点和难点进行了分析讲解,同时给出了大量详尽的例题和习题,并给出了相应的答案,另外,本书还增加了作者近 20 年来积累的大量研究生入学考试试题。本书对相关专业领域的本科生和专业技术人员学习和掌握应用光学有重要的参考价值。

本书可作为高等院校光电专业的师生和报考光电类专业研究生的考生,以及从事光学仪器、光电技术科研、生产的工程技术人员参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

应用光学概念题解与自测/李林,黄一帆著.—2版.—北京:北京理工大学出版社,2018.9

ISBN 978—7—5682—5399—4

I. ①应… II. ①李… ②黄… III. ①应用光学—高等学校—解题 IV. ①O439—44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 046452 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 386 千字

版 次 / 2018 年 9 月第 2 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 38.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

本书是光电信息科学与工程、测控技术与仪器和电子科学与技术等专业本科生专业基础课——应用光学的辅助参考教材。本书对应用光学教材中相应的章节分别进行总结和归纳，对重点和难点进行分析讲解，同时给出了大量详尽的例题和习题，并给出了相应的答案，对于相关专业领域的本科生和专业技术人员学习和掌握应用光学有重要的辅助参考价值。本书作者从 30 多年教授应用光学的教学实践中体会到，对于光电类、测试计量和机械类本科生来说，应用光学是一门比较难掌握的课程。同数学、物理等基础课相比，应用光学表面上看似乎没有这些课程难，但是，由于应用光学既有理论知识，又有实际应用，两者紧密联系，学习这门课的本科生基本上对光学行业的实际情况知之甚少，因此学习起来特别是解应用题时甚感吃力。同时，对于大多数光电类、测试计量和机械类本科生，应用光学往往是他们考研研究生的必考科目。相对于别的科目，应用光学课程的参考资料非常少，给学生在复习应用光学时带来很多困难。为此，我们特意对李士贤等著《应用光学：理论概要，例题详解，习题汇编，考研试题》进行了修订，重新出版。重新修订的原因是随着我国教育教学的改革与发展，应用光学的教学内容有所变化，同时随着科学技术的发展应用光学领域也出现了一些新技术、新思想，另外，30 多年来作者积累了大量的研究生入学考试试题，本次修订将把这些新变化、新试题纳入本书，供广大学生和研究生考生参考。

本书是应用光学的教学参考书。应用光学课程是要让学生学会解决几何光学、典型光学仪器原理、光度学、色度学、光纤光学系统、激光光学系统及红外光学系统等的基础理论和方法。它包括了此类专业学生必备的光学知识，为光学仪器、微光夜视、激光红外等学科奠定了理论基础和应用基础，在培养光学和光电类人才中具有不可替代的地位。应用光学既有基础理论，又与实践密切相关，是非常重要的专业基础课。本书与《应用光学》教材一样，内容主要分为三部分。第一部分内容包括：学习几何光学的基本理论与应用、理想光学系统的成像性质以及共轴球面光学系统的物像关系，重点掌握近轴光学的理论与计算方法；学习眼睛和目视光学仪器的基本原理与计算方法；平面镜棱镜系统的成像特性分析、应用及计算方法，掌握光学系统中成像光束的选择方法。第二部分内容包括：学习辐射度学和光度学的基础理论，掌握各种情况下光学系统中的光能量计算方法。第三部分内容包括：学习光学系统成像质量评价的各种指标和评价方法，望远镜、显微镜、照相机和投影仪的原理和成像特性等。

与国内光电类课程参考书籍相比，本书有如下特点：(1) 本书注重实际，书中除了几何光学原理和高斯近轴光学外，加入了作者及其教研室老师长期研究的成果，特别是对军用光学系统有独特的见解。(2) 涵盖面广，内容丰富，除了经典的几何光学内容外，还有光学系统成像光束的选择、光度学、望远系统外形尺寸计算等内容，这些内容对于光电类学生今后的学习和工作是非常重要的。(3) 习题非常具有特色，几乎所有的习题均是作者及其教研室

老师多年来从科研工作中提炼出来的,具有针对性和实用性。(4)与本书配套的教材齐全。作为本书的相关系列教材,作者出版的教材有:《应用光学》(国家“十二五”规划教材、北京市高等教育精品教材、兵总95重点教材),北京理工大学出版社,2017年;《计算机辅助光学设计的理论与应用》(国防科技图书出版基金资助),国防工业出版社,2002年;《工程光学》(北京市精品教材),北京理工大学出版社,2003年;《应用光学》(英文版,北京市精品教材),北京理工大学出版社,2014年;《现代光学设计方法》(工信部“十二五”规划教材、“十一五”国防特色教材),北京理工大学出版社,2015年;《飞行模拟器》(国家“十二五”规划专著、国家出版基金),北京理工大学出版社,2013年;《光学设计手册》,北京理工大学出版社,1996年;《现代仪器仪表设计(现代光学设计篇)》,科学出版社,2003年。作者希望通过本书的出版,对于国内相关专业的学生和研究生考生有所帮助,完成他们的宏伟志向,为我国的光电事业作出新的贡献。

现代科学技术在不断进步,新思想、新方法层出不穷,应用光学也将不断发展,本书的不足之处敬请读者不吝指正。

北京理工大学

李林

黄一帆

2018年1月

目 录

第一章 几何光学基本原理	1
一、本章要点和主要公式	1
二、典型题解与习题	5
第二章 共轴球面系统的物像关系	8
一、本章要点和主要公式	8
二、典型题解与习题	19
第三章 眼睛和目视光学系统	38
一、本章要点和主要公式	38
二、典型题解与习题	41
第四章 平面镜棱镜系统	47
一、本章要点和主要公式	47
二、典型题解与习题	55
第五章 光学系统中的成像光束和光阑	60
一、本章要点和主要公式	60
二、习题	74
第六章 辐射度学和光度学基础	76
一、本章要点和主要公式	76
二、典型题解与习题	100
第七章 光学系统成像质量评价	109
一、本章要点和主要公式	109
二、习题	117
第八章 望远镜和显微镜	119
一、本章要点和主要公式	119
二、望远镜的外形尺寸计算	135
三、典型题解与习题	141
第九章 照相机和投影仪	150
一、本章要点和主要公式	150
二、典型题解与习题	159
二、习题	165
第十章 光纤光学仪器	167
一、本章要点和主要公式	167
二、习题	171

第十一章 激光束光学..... 172

 一、本章要点和主要公式 172

 二、典型题解与习题 175

第十二章 光谱仪器..... 181

 一、本章要点和主要公式 181

 二、习题 187

第十三章 红外光学系统..... 189

 一、本章要点和主要公式 189

 二、习题 195

习题答案..... 196

硕士研究生入学考试《应用光学》试题..... 204

参考文献..... 257

第一章 几何光学基本原理

一、本章要点和主要公式

(一) 光线的概念

人类对光的研究分为两个方面:一方面是研究光的本性,并根据光的本性来研究各种光学现象,称为“物理光学”;另一方面是研究光的传播规律和传播现象,称为“几何光学”。

光具有波动性也具有粒子性。一般来说,研究光和物质作用的情况必须考虑光的粒子性,其他情况下都把光作为电磁波看待,称为“光波”。光既然是电磁波,研究光的传播问题,应该是一个波动传播问题。但是,在几何光学中研究光的传播,并不把光看作电磁波,而是看作“能够传输能量的几何线”,即光线。光线的概念是几何光学最基本的概念,目前使用的光学仪器,绝大多数是应用几何光学的原理(把光看作“光线”)设计出来的。

(二) 几何光学基本定律

本章首先在光线这一概念的基础上给出光的传播规律——几何光学的基本定律,并分别以直线传播、反射和折射定律,马吕斯定律,费尔马原理三种形式表述。

直线传播、反射和折射定律:直线传播定律——光线在均匀透明介质中按直线传播;反射定律——反射光线位于入射面内,反射角等于入射角,即 $I_1 = I_2$;折射定律(也称斯涅耳定律)——折射光线位于入射面内,入射角和折射角的正弦之比对两种特定的介质来说,是一个和入射角无关的常数,即

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-1)$$

式中, $n_{1,2}$ 称为第二种介质对第一种介质的相对折射率; n_1 、 n_2 分别为第一种介质相对空气的折射率和第二种介质相对空气的折射率,也称绝对折射率。反射定律和折射定律均是描述光线在两种均匀透明介质分界面上的传播规律。

马吕斯定律:假定一束光线为某一曲面的法线汇,这些光线经过任意次折射、反射后,该光束的全部光线仍与另一曲面垂直,构成一新的法线汇,而且位于这两个曲面之间的所有光线的光程相等。

费尔马原理:实际光线沿着光程为极值(或稳定值)的路线传播。

上述三条定律可以互相推导、互相证明,其中任意一个均可以作为几何光学的基础。

在研究各种具体的光的传播规律和现象时,常用直线传播、反射和折射定律。它可以用三角公式表达,在复杂的光的传播情况下,为了使用方便,又常用向量公式表达,即

$$n\mathbf{Q} \times \mathbf{N} = n'\mathbf{Q}' \times \mathbf{N} \text{ 或 } (n\mathbf{Q} - n'\mathbf{Q}') \times \mathbf{N} = 0 \quad (1-2)$$

式中, n 、 n' 为入射光线和折射光线或反射光线所在介质的折射率; $\mathbf{Q}$ 为入射光线方向的单位

向量; $\mathbf{Q}'$ 为折射光线方向的单位向量; $\mathbf{N}$ 为介质界面法线方向的单位向量。

在均匀介质的情形, $n=n'$,向量公式成为

$$\mathbf{Q}=\mathbf{Q}' \quad (1-3)$$

这就是均匀介质中的直线传播定律。

对反射的情况,可以看作 $n'=-n$,有

$$\mathbf{Q} \times \mathbf{N} = -\mathbf{Q}' \times \mathbf{N} \quad (1-4)$$

故向量公式 $n\mathbf{Q} \times \mathbf{N} = n'\mathbf{Q}' \times \mathbf{N}$ 描述了同一种均匀介质中直线传播,在两种介质分界面上折射、反射情况下光的传播规律。

(三) 全反射现象及光路可逆定理

在光线概念和几何光学基本定律的基础上,本章又研究了两种重要的光的传播现象——光路可逆和全反射。

光路可逆定理:假定某一条光线,沿着一定的路线,由A点传播到B点,如果在B点沿着与出射光线相反的方向投射一条光线,则此反射光线仍沿着同一条路线,由B点传播到A点。

全反射现象:当光线由高折射率介质进入低折射率介质时,如果入射角 I 大于临界角 I_0 ,折射光线不复存在,入射光线全部反射回原介质,这种现象称为“全反射”。

临界角可以按下式求出

$$\sin I_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-5)$$

式中, n_1 、 n_2 分别为第一种介质和第二种介质的折射率, $n_1 > n_2$ 。

光线的传播除了上述在均匀介质中的情况外,还需研究在非均匀介质中的情形。近年来出现的梯度折射率元件、自聚焦透镜等,都是利用光线在非均匀介质中的传播规律制造的光学元件。

若设 $n(x, y, z)$ 为折射率分布函数, S 为光线弧长, $\mathbf{Q}$ 为入射光线方向的单位向量,则有

$$\frac{dn}{dS} \mathbf{Q} + n \frac{d\mathbf{Q}}{dS} = \text{grad} n$$

或

$$\frac{d}{dS}(n\mathbf{Q}) = \text{grad} n \quad (1-6)$$

此式即光线在非均匀介质中的微分方程式。如用直角坐标系中分量的形式表示,则有

$$\frac{d}{dS}\left(n \frac{dx}{dS}\right) = \frac{\partial n}{\partial x}, \frac{d}{dS}\left(n \frac{dy}{dS}\right) = \frac{\partial n}{\partial y}, \frac{d}{dS}\left(n \frac{dz}{dS}\right) = \frac{\partial n}{\partial z} \quad (1-7)$$

(四) 几何光学的应用范围

本章最后讨论了几何光学的误差和它的应用范围。结论是:

① 限制光束的光阑口径很小,不能在光阑口的波面上做出足够数量的半波带,就不能使 u_k (第 k 个半波带的振幅)变得很小,这时几何光学误差就很大。

② 近似聚交一点的光束,在聚交点附近,几何光学的误差很大。

③ 在一定口径范围内,波长越长,可做出的半波带越少,几何光学的误差越大。

(五) 光学系统的有关概念

光学系统——根据需要改变光线传播方向以满足使用要求的光学零件的组合。

共轴光学系统——具有同一对称轴线的光学系统。

非共轴光学系统——没有同一对称轴线的光学系统。

光轴——构成系统的各零件表面均为球面(平面可被视为半径无限大的球面),所有球面的球心均位于同一直线上,这条直线就是光轴。

非球面光学系统——含有非球面的光学系统。

共轴球面光学系统——光学零件表面为球面,且球心位于同一直线上的光学系统。

目前广泛使用的系统大多数是共轴球面系统和平面镜棱镜系统的组合。

(六) 透镜

透镜是组成光学系统最基本的元件,它的主要作用是成像。按面形划分,可分为球面透镜和非球面透镜;按使光线折转的作用来分,可分为会聚透镜(正透镜)和发散透镜(负透镜)。

会聚透镜的特点:中心厚边缘薄,焦距 $f' > 0$ 。

发散透镜的特点:中心薄边缘厚,焦距 $f' < 0$ 。

(七) 成像的有关概念

由一点 A 发出的光线经过光学系统后聚交在一点 A' ,则 A 点为物点, A' 点为物点 A 通过光学系统所成的像点。

物与像之间的对应关系称为“共轭”。

物像都有虚实之分:

实物点——实际入射光线的出发点。

虚物点——实际入射光线延长线的交点。

实像点——实际出射光线的交点。

虚像点——实际出射光线延长线的交点。

这里要注意,物点不管是虚的还是实的,都是入射光线的交点,像点则是出射光线的交点。无论是物还是像,光线延长线的交点都是虚的,而实际光线的交点都是实的。

物像空间——光学系统第一个曲面以前的空间称为“实物空间”,第一个曲面以后的空间称为“虚物空间”;光学系统最后一个曲面以后的空间称为“实像空间”,最后一个曲面以前的空间称为“虚像空间”。整个物空间(包括实物空间和虚物空间)是无限扩展的,整个像空间(包括实像空间和虚像空间)也是无限扩展的。但是,物空间(不论是实物还是虚物)介质的折射率是指实际入射光线所在空间介质的折射率,像空间(不论是实像还是虚像)介质的折射率是指实际出射光线所在空间介质的折射率。

(八) 理想像和理想光学系统的概念

由同一物点 A 发出的全部光线,通过光学系统后仍然相交于唯一的像点 A' ,则像点 A' 称为物点 A 的理想像点。有一定大小的物体,可看作若干物点的集合,它们通过光学系统后的理想像点的集合,就称作该物体通过光学系统成的理想像。在大多数情况下,物像空间均为均匀透明介质,物像之间不仅符合点对应点的关系,还符合直线对应直线、平面对应平面的关系。

因此,在物像空间符合“点对应点、直线对应直线、平面对应平面”关系的像称为理想像。

理想光学系统指能成理想像的光学系统。在物像空间均为均匀透明介质的条件下,物像空间符合“点对应点、直线对应直线、平面对应平面”的光学系统称为理想光学系统。

光学系统一般是用来成像的,而且要求成像清晰,理想像就是绝对清晰的像。实际光学系统所成像与理想像的差异可以描述光学系统的品质;理想像的位置和大小可以代表一个质量好的实际光学系统成像的位置和大小。所以理想像和理想光学系统的概念,对研究实际光学系统成像位置、大小和像质都具有十分重要的价值。

通常使用的实际光学系统大多数是共轴光学系统。共轴理想光学系统具有以下成像性质:

- ① 位于光轴上的物点,其对应的像点也一定位于光轴上。
- ② 位于过光轴的某一截面内的物点,其对应的像点也一定位于此平面内。
- ③ 过光轴的任意截面内的成像性质都相同,因此可用一个过光轴截面内的成像性质代表一个光学系统的成像性质。
- ④ 垂直于光轴的物平面的共轭像面也一定垂直于光轴。
- ⑤ 位于垂直于光轴的同一直平面内的物所成的像,其几何形状与物完全相似。
- ⑥ 一个共轴理想光学系统,如果已知两对共轭面的位置和放大率,或者已知一对共轭面的位置和放大率,以及轴上两对共轭点的位置,则其他一切物点的共轭像点都可以根据已知的共轭面和共轭点确定。

这些能确定共轴理想光学系统成像性质的共轭面和共轭点称为“基面”和“基点”。

(九) 发光点理想成像的条件——等光程条件

发光物点 A 通过光学系统理想成像于像点 A' 时,物点和像点间所有光线的光程均相等。

(十) 任意光学系统中微小线段理想成像的条件——余弦条件

$$n \overline{AB} \cos \theta - n' \overline{A'B'} \cos \theta' = c \quad (1-8)$$

式中, c 为与 θ 无关的常数。余弦条件适用于任意光学系统。式(1-8)中各参数的意义如图 1-1 所示。

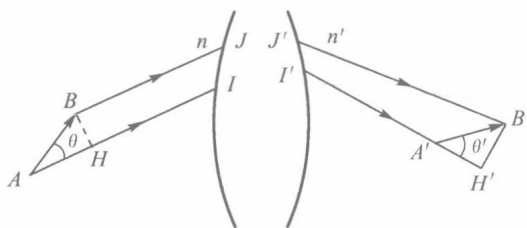


图 1-1 任意光学系统微小线段理想成像的余弦条件

(十一) 共轴理想光学系统中微小线段成像的条件

- ① 垂直于光轴的微小线段理想成像的条件——阿贝条件。

$$n \overline{AB} \sin U = n' \overline{A'B'} \sin U' \quad (1-9)$$

阿贝条件也称正弦条件、等明条件或齐明条件。式(1-9)中各参数的意义如图 1-2 所示。

- ② 与光轴重合的微小线段理想成像的条件——赫谢尔条件。

$$n \overline{AB} \sin^2 \frac{U}{2} = n' \overline{A'B'} \sin^2 \frac{U'}{2} \quad (1-10)$$

式(1-10)中各参数的意义如图1-3所示。

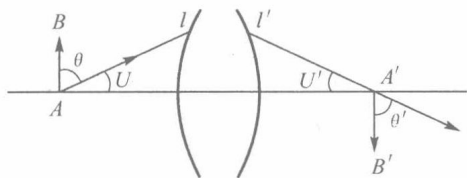


图1-2 垂直于光轴的微小线段理想成像的阿贝条件

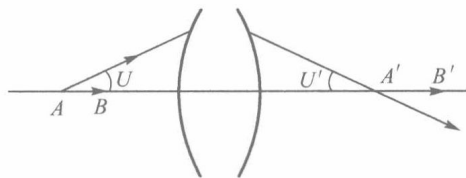


图1-3 与光轴重合的微小线段理想成像的赫谢尔条件

一般来说,阿贝条件和赫谢尔条件不能同时满足,即共轴系统不能使整个空间理想成像。我们设计光学系统时,一般是使垂直于光轴的物平面成一接近理想的像。

(十二) 麦克斯韦鱼眼

麦克斯韦鱼眼是一种由非均匀介质构成的特殊光学系统,它可以使整个空间理想成像。它的折射率按以下公式对称分布

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (1-11)$$

式中, n_0 为球心处的折射率; r 为球面半径,当 $r=a$ 时,折射率 $n=n_0/2$,当 r 趋于无穷大时, n 趋于零。

应用非均匀介质中光线的微分方程可以导出麦克斯韦鱼眼光线的极坐标方程并可据此讨论麦克斯韦鱼眼的成像性质。结论是:坐标轴上每一点都能理想成像。由于麦克斯韦鱼眼相对球心 O 点对称,过 O 点任意一轴线,成像性质完全相同,所以麦克斯韦鱼眼能使空间任意物点理想成像,是一个理想光学系统。

二、典型题解与习题

(一) 典型题解

例1-1: 游泳者在水中向上仰望,能否感觉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 $n_{\text{水}}=1.33$,空气的折射率 $n_{\text{空}}=1$ 。当光线由水进入空气时,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临界角 I_0 。在以水中一点 A 为锥顶,半顶角为 I_0 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,圆的大小当然与游泳者所在的水深有关,如图1-4所示。

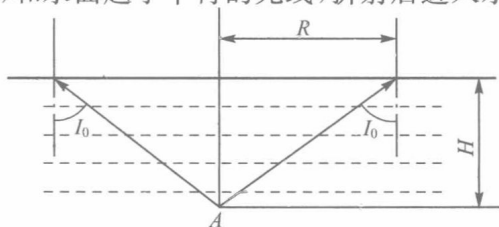


图1-4 游泳者水中仰视天空示意图

下面求出临界角 I_0 的大小

$$\sin I_0 = \frac{n_{\text{空}}}{n_{\text{水}}} = \frac{1}{1.33} = 0.75$$

设水深为 H , 则明亮圆半径 $R = H \tan I_0$ 。

例 1-2: 一束光由玻璃($n=1.5$)进入水($n=1.33$)中, 若以 45° 入射, 试求折射角。

解: 本题直接应用斯涅耳定律即可。

$$\begin{aligned} n_1 \sin i_1 &= n_2 \sin i_2 \\ n_1 &= 1.5, n_2 = 1.33, i_1 = 45^\circ \\ 1.5 \sin 45^\circ &= 1.33 \sin i_2 \\ \sin i_2 &= 0.794 \\ i &= 52.6^\circ \end{aligned}$$

折射角为 52.6° 。

本题入射光线所在介质的折射率高, 折射光所在介质的折射率低, 即 $n_1 > n_2$, 由斯涅耳定律的特定形式可知入射角应小, 折射角应大, 即 $\sin i_2 > \sin i_1$, 或 $i_2 > i_1$ 。据此可判断计算结果是否有误, 画出示意图时, 也可以判断折射光线的大致走向。

例 1-3: 一束与凹面反射镜轴对称的平行光束, 投射到凹面镜表面后成会聚光束, 且聚焦于一点, 试用费尔马原理证明该凹面镜为抛物面镜。

解: 根据题意, 光线进行情况如图 1-5 所示。

对应平面波 Σ 的平行光线射到凹面镜上, 反射后会聚到一点 F' 。根据费尔马原理, 波面 Σ 上各条光线到达 F' 点的光程应相等, 即

$$n(AH + HF') = n(BI + IF') = \dots = n(GN + NF') \dots$$

如把 AH 延长至 O 使 $HO = HF$, 把 BI 延长至 P 使 $IP = IF'$, 其他光线作同样延长。这样上式可写成

$$n(AH + HO) = n(BI + IP) = \dots = n(GN + NU)$$

去掉 n , 可知 $AO = BP = \dots = GU$, 入射为平行光, Σ 为平面波面, 由上述相等的关系可知 $O, P, Q, \dots, U$ 各点的连接必形成一直线 Σ' , 凹面镜上各点到此直线 Σ' 和 F' 的距离相等。根据曲面的特征, Σ' 为准线, F' 为焦点, 这样的凹面镜的截面为一抛物线, 该凹面镜为抛物面镜。

例 1-4: 某物通过一透镜成像在该透镜内部, 透镜材料为玻璃, 透镜两侧均为空气, 试问该物所处的像空间介质是玻璃还是空气?

解: 像虽然成在透镜中, 但成像光线在透镜最后一面之后, 介质为空气, 像空间介质不是取决于像的位置, 而是取决于成像光线所在的实际空间, 所以应该是空气, 而不应该是玻璃。试想像是虚像还是实像? 学完共轴球面系统的物像关系之后, 还可以分析计算此时物的位置。

例 1-5: 如图 1-6 所示, 探照灯经常采用回转抛物面做反射镜, 此时做光源的灯泡应放在什么位置?

解: 对回转抛物面来说, 它的焦点和无限远轴上点满足等光程条件。即由焦点处发出的射到回转抛物面上任意一点的光线均以与光轴平行的方向射出, 即反射

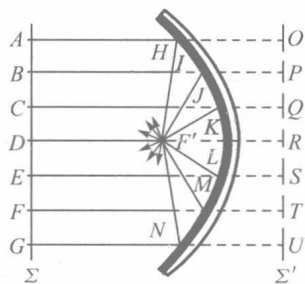


图 1-5 抛物面成像示意图

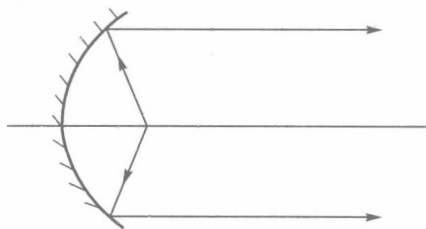


图 1-6 探照灯示意图

光束交于无限远处。探照灯需要向远处(可以理解为无限远)射出一束平行光,所以灯泡应位于抛物面的焦点处。

(二) 习题

1-1 有时看到窗户玻璃上映射的太阳光特别耀眼,这是否是由于窗玻璃表面发生了全反射?

1-2 射击水底目标时,是否可以和射击地面目标一样进行瞄准?

1-3 证明光线通过二表面平行的玻璃板时,出射光线与入射光线永远平行。

1-4 汽车驾驶室两侧和马路转弯处安装的反光镜为什么要做成凸面,而不做成平面?

1-5 观察清澈见底的河床底部的卵石,看起来约在水下半米深处,问实际河水比半米深还是比半米浅?

1-6 人眼垂直看水池 1 m 深处的物体,水的折射率为 1.33,试问该物体的像到水面的距离是多少?

1-7 为了从坦克内部观察外边目标,需要在坦克壁上开一个孔。假定坦克壁厚为 200 mm,孔宽为 120 mm,在孔内安装一块折射率 $n=1.5163$ 的玻璃,厚度与装甲厚度相同,问在允许观察者眼睛左右移动的条件下,能看到外界多大的角度范围?

1-8 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。

1-9 有一由若干种透明介质组成且各介质间分界面均为平面的多层板料,试证明:当入射光线照射到板料上时,出射光线的折射角仅由入射角、入射光空间和出射光空间介质的折射率决定。

1-10 试由费尔马原理导出反射定律和折射定律。

1-11 平行光束投射到一水槽中,光束的一部分在顶面反射而另一部分在底面反射,如图 1-7 所示。

试证明两束返回到入射介质的光线是平行的。

1-12 一束光线投射到夹角为 α 的两平面反射镜上,在第一面上入射角为 I ,该光线在反射镜间经 k 次反射后,又沿原路径返回并射出,求入射角 I 、反射次数 k 与两反射镜夹角 α 之间的关系。

1-13 构成透镜的二表面的球心相互重合的透镜称为同心透镜,同心透镜对光束起发散作用还是会聚作用?

1-14 物体通过透镜成一虚像,用屏幕是否可以接收到这个像?如果用人眼观察,是否可以看到这个像?

1-15 共轴理想光学系统具有哪些成像性质?

1-16 光学系统第一面前边的空间为物空间,最后一面后边的空间是像空间,这种说法对吗?

1-17 垂直于光轴的微小线段和与光轴重合的微小线段满足什么条件才能理想成像?

1-18 什么叫理想光学系统?理想光学系统具有哪些性质?

1-19 什么叫理想像?理想像有何实际意义?

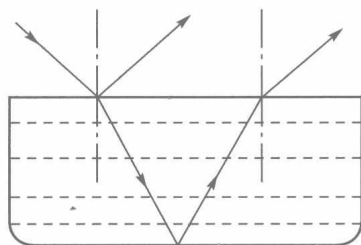
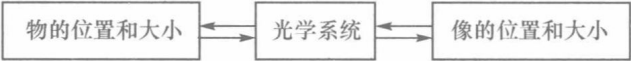


图 1-7 习题 1-11 示意图

第二章 共轴球面系统的物像关系

近轴光学主要是解决共轴球面系统的物像关系问题,也就是根据已知的光学系统的结构参数(半径 r , 折射率 n, n' , 厚度或间隔 d), 由给定的物平面位置(l)和物的大小(y)来求像平面的位置(l')和像的大小(y'), 即



解决这一问题的基本方法是: 根据几何光学的基本定律, 找出由物体上的某一物点发出的一系列光线通过光学系统以后的出射光线的位置, 由这些出射光线与光轴和像面的交点决定像的位置和大小。

贯穿本章的主要思路可由图 2-1 表示。

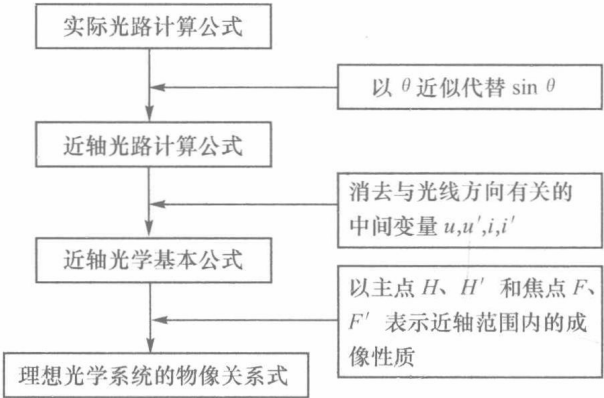


图 2-1 物像关系计算示意图

一、本章要点和主要公式

(一) 实际光路计算公式

根据给定的光学系统的结构参数 r, n, n', d , 由入射光线的坐标 L, U , 求出相应的出射光线的坐标 L', U' 。公式为

$$\begin{aligned} \sin I &= \frac{L-r}{r} \sin U, \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \\ U' &= U + I - I', L' = r + \frac{r \sin I'}{\sin U'} \end{aligned} \tag{2-1}$$

转面公式为

$$U_2 = U'_1, L_2 = L'_1 - d \tag{2-2}$$

对于具有任意个折射球面的共轴球面系统,只要连续应用上述公式,就可由入射光线的坐标 (L, U) ,求出通过光学系统后的实际出射光线的坐标 (L', U') 。

以上公式适用于已知光学系统各面的半径 r 、透镜厚度和各面之间的间隔 d 以及介质的折射率 n, n' ,由入射光线的坐标 (L, U) ,求出最后一面的出射光线的坐标 (L', U') 。

根据以上公式计算得到的结果是实际光线在光学系统中所走过的路线。由同一物点发出的不同光线(L 相同, U 不同),用以上公式计算的出射光线并不交于一点(L' 不同),但当入射光线的 U 角度较小时,出射光线的 L' 变化不大,这说明靠近光轴的光线,对应的出射光线聚交比较好。因此,对近轴范围内光线的成像性质有必要作进一步的研究。

(二) 近轴光路计算公式

如图 2-2 所示,对于靠近光轴的光线——近轴光线,由于角度 U 和 I 较小,可以用角度本身代替角度的正弦值 $\sin U$ 和 $\sin I$,这样就得到近轴光路计算公式为

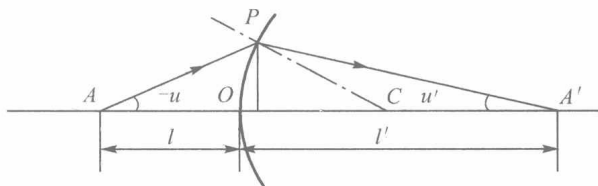


图 2-2 近轴光路计算

$$\begin{aligned} i &= \frac{L-r}{r}u, i' = \frac{n}{n'}i \\ u' &= u + i - i', l' = r + \frac{ri'}{u'} \end{aligned} \quad (2-3)$$

转面公式为

$$u_2 = u'_1, l_2 = l'_1 - d_1 \quad (2-4)$$

以 $l=h/u$, $l'=h/u'$ 代入并消去中间变量 i 和 i' ,就可得到另一种形式的近轴光路计算公式

$$n'u' - nu = \frac{h}{r}(n' - n) \quad (2-5)$$

转面公式为

$$u_2 = u'_1, h_2 = h_1 - d_1 u'_1 \quad (2-6)$$

对于具有任意一个折射球面的光学系统,也必须连续应用上述公式,才能由入射光线的坐标 (l, u) 或 (h, u) ,求出最后一面的出射光线的坐标 (l', u') 或 (h, u') 。

以上公式适用于已知光学系统的结构参数 r, n, n', d ,由给定的近轴入射光线的坐标求出射光线的坐标。

以上公式计算得到的结果 l' 实际上与 i, u 无关,也就是说,由同一物点发出的不同方向的入射光线,利用近轴光路计算公式求出的出射光线都交于同一点 l' ,与中间变量 u, i, u', i' 无关,符合点对应点的理想成像条件,这是我们设计一个光学系统所要达到的目标,同时也是判断一个光学系统成像质量好坏的标准。

(三) 近轴光学基本公式

在上述近轴光路计算公式中,由于结果 l' 与 u, u', i, i' 无关,消去这些中间变量之后,就可得到近轴光学基本公式

$$\left. \begin{aligned} \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} &= \frac{n' - n}{r} && \text{单个球面物像位置关系} \\ \beta = \frac{y'}{y} &= \frac{nl'}{n'l} && \text{单个球面物像大小关系} \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

转面公式为

$$l_2 = l_1 - d_1, y_2 = y_1' \quad (2-8)$$

近轴光学基本公式是近轴光路计算公式的简化形式,它建立了物像之间的直接关系。两种形式的公式适用范围和得到的结果是完全一致的。

例 2-1: 一玻璃棒($n = 1.5$),长 500 mm,两端面为半球面,半径分别为 50 mm 和 100 mm,一箭头高 1 mm,垂直位于左端球面顶点之前 200 mm 处的轴线上,如图 2-3 所示。试求:

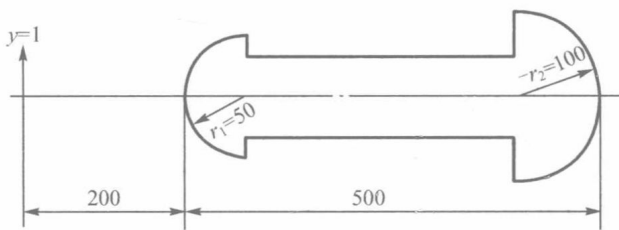


图 2-3 玻璃棒成像

① 箭头经玻璃棒成像后的像距为多少?

② 整个玻璃棒的垂轴放大率为多少?

解: 已知玻璃棒的结构参数:两端面的半径、间隔和玻璃棒材料的折射率 n ,以及物体的位置和大小,求经玻璃棒之后所成像的位置和大小。解决这个问题可以采用近轴光学基本公式(2-7)和式(2-8)。

① 首先计算物体(箭头)经第一球面所成像的位置和垂轴放大率,利用式(2-7),有

$$\frac{n'_1}{l'_1} - \frac{n_1}{l_1} = \frac{n'_1 - n_1}{r_1}$$

将 $n_1 = 1, n'_1 = n = 1.5, l_1 = -200 \text{ mm}, r_1 = 50 \text{ mm}$,代入上式得像的位置

$$l'_1 = 300 \text{ mm}$$

垂轴放大率

$$\beta_1 = \frac{n_1 l'_1}{n'_1 l_1} = \frac{1 \times 300}{1.5 \times (-200)} = -1$$

第一球面所成的像作为第二球面的物,根据转面公式(2-8)可求出第二面物距

$$l_2 = l'_1 - d = 300 - 500 = -200 (\text{mm})$$

又已知 $n_2 = n = 1.5, n'_2 = 1, r_2 = -100 \text{ mm}$,对第二球面再用式(2-7)得

$$\frac{n'_2}{l'_2} - \frac{n_2}{l_2} = \frac{n'_2 - n_2}{r_2}$$

求得像距 $l'_2 = -400 \text{ mm}$,即箭头经玻璃棒成像后,所成的像位于第二球面前方 400 mm 处。

垂轴放大率

$$\beta_2 = \frac{n_2 l'_2}{n'_2 l_2} = \frac{1.5 \times (-400)}{1 \times (-200)} = 3$$

② 整个玻璃棒的垂轴放大率应为第一球面放大率和第二球面放大率的乘积,即

$$\beta = \beta_1 \beta_2 = (-1) \times 3 = -3$$

(四) 理想光学系统的物像关系式

以上三种公式都必须逐面计算,才能够得到整个光学系统的物像关系。为了更直观地表