



物理实验丛书

WULISHIYAN CONGSHU

几何光学实验

杨之昌 编



上海科学技术出版社

53.73
720

物理实验丛书

几何光学实验

杨之昌 编

上海科学技术出版社

物理实验丛书

— * * * —

几何光学实验

杨之昌 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 7.875 字数 172,000

1984 年 1 月第 1 版 1984 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—10,000

统一书号: 13119·1086 定价: (科五) 0.90 元

出版说明

物理学是一门以实验为基础的科学。每个物理概念的确立以及原理和定律的发现无不具有坚实的实验基础，而且只有经过实验的检验，才能得到公认。所以，物理实验在物理学中起着非常重要的作用。

为了实现我国四个现代化的要求，需要迅速培养大批科学技术专门人材。在整个物理学的教学过程中，物理实验是培养物理工作者和其他科学技术专门人材不可缺少的组成部分。可是在物理实验的教学中，深感这方面书籍的不足，以及实验仪器和实验设备的缺乏。鉴于上述情况，为了提高物理实验的水平，适合我国的实际情况，推广实验中的新技术、新仪器和新方法，我们请国内有关高等院校从事物理实验教学时间较长、经验丰富的教师编写这套《物理实验丛书》。

本丛书内容包括当前我国高等院校正在开设和准备开设的普通物理实验。每一分册集中介绍一个专题。本丛书采用章节式的实验参考书编写方式，注意到专题的系统性与完整性，中间插入有关的实验，并有备查的附录，内容简明扼要，重点突出。此外，为了适应科研部门和工矿企业实验工作者的需要，还适当增加了一些实际应用的内容。本丛书不但可供大专院校物理专业师生参考，亦可供中等专科学校和中学物理教师以及科研单位与工矿企业从事物理实验工作的技术人员参考。

本丛书已拟定的普通物理实验方面的分册有：《力学实验》、《静电实验》、《几何光学实验》、《物理光学实验》、《电磁学实验》、《热学实验》、《真空实验》、《气垫导轨实验》等，将陆续出版。

前 言

几何光学实验是物理实验丛书——光学实验的第一部份，主要根据作者在复旦大学物理系长期从事实验教学工作实践的经验编写而成。

本书与一般实验书不同，采用章节形式系统地介绍了几何光学实验。第一章介绍几何光学实验的基础知识，第二章介绍光的反射、折射和全反射的有关实验，这两章是几何光学实验的基础。第三章、第五章、第六章主要介绍对光学元件和光学材料基本参数的测定，第四章集中介绍助视光学仪器、摄影仪器及其特性的测定方法。在介绍实验的同时，对分光计、平行光管、单色仪等仪器的调节进行了详细的说明。另外还结合近代光学的发展增加了一些激光在几何光学实验中的应用及光学纤维参数测定等新的实验内容。

书中实验内容的安排尽量做到由浅入深，逐步展开。为了便于进行教学及科研工作，编写方式以小实验形式为主，以利于根据要求及需要选做部份实验。在实验数据的处理方面，考虑到光学实验的数据处理方法相同，所以仅对个别实验数据进行分析，以免内容重复以致所占篇幅太多。

在本书的编写过程中曾得到复旦大学物理系凌佩玲、王潜智、邱榴贞、马秀芳四位同志的帮助，他们在这方面提供了一些实验的资料和数据；此外还得到曾与我在一起工作过的章志鸣、钱钟华等同志的帮助和指导。特别应该提到的是姚世亨同志以他过去多年在南开大学物理实验室工作的教学经

验对本书作了认真仔细的校阅,并且提出了许多宝贵意见,仅在此一并表示感谢。

由于编写时间紧迫,作者水平有限,本书肯定存在一些不足之处,希望读者指正。

编者 1983年6月

内 容 提 要

本书系根据我国高等院校普通物理实验中有关几何光学实验内容以及结合复旦大学基础光学实验教学的经验编写而成。全书共分六章。前二章主要介绍几何光学实验的方法及有关光的反射、折射和全反射的实验。后四章分别介绍焦距的测量、光学仪器参数的测量、折射率和透射率的测定。同时结合近代光学的发展增加了一些激光在几何光学实验中的应用和光学纤维参数测定等新的实验内容。

本书可供大专院校、中等专科学校物理教师及有关从事物理实验的科技工作者参考。

DT21/02



目 录

前 言

第一章 基础知识	1
§ 1 几何光学实验的基本原理	1
§ 2 几何光学实验的观察方法	9
§ 3 几何光学实验中常用仪器的介绍	18
第二章 光线的反射和折射	31
§ 1 平面镜和球面镜	31
§ 2 光在光学透明介质表面的反射和折射	52
§ 3 透镜成像规律	75
§ 4 象差的简单介绍	81
第三章 透镜焦距的测定	93
§ 1 薄透镜焦距的一般测定法	94
§ 2 透镜焦距的精确测量方法	105
§ 3 厚透镜和透镜组焦距的测定	112
第四章 常用光学仪器	124
§ 1 常用光学仪器的基本参数	124
§ 2 放大镜和目镜	129
§ 3 显微镜	133
§ 4 望远镜	141
§ 5 照相机和幻灯片的制备	145
§ 6 光学仪器和氦-氖激光器	153
第五章 光学材料折射率的测定	156
§ 1 一般测定方法	157
§ 2 通过透镜的焦距公式测定透镜材料或液体的折射率	164
§ 3 掠入射线法测量折射率	168

§ 4 最小偏向角法	177
第六章 光学材料的透射特性	182
§ 1 光学材料的光谱透射特性及其测定方法	182
§ 2 测定光谱透射曲线的实验	185
§ 3 光学纤维和它的透射特性	206
附 录	215
一、实验结果的误差处理方法	215
二、最小偏向角公式的严格推导	220
三、激光束的传播特性	222
四、常用物理量及数表	233
实验索引	241

第一章 基础知识

§1 几何光学实验的基本原理

一、几何光学实验的研究范畴和意义

光是一种电磁波。在可见光的范围内，它的频率极高（ $\nu \sim 10^{14}$ 赫）或者说它的波长非常短（ $\lambda \sim 10^{-5}$ 厘米）。假如我们在研究某些对象时，它的几何尺寸远大于光波的波长，那么可以把波长的大小忽略不计，也就是当波长 $\lambda \rightarrow 0$ 时，从光的波动方程可以得到光波传播问题的一级近似，即认为光在均匀介质中是直线传播的。通常以光的直线传播为基础去观察一些光学现象，探索和研究光在各种均匀介质界面中传播的基本规律，测定光学材料的特性和光学元件的基本参数，这些都是几何光学实验研究的范畴。

几何光学实验可以为几何光学的理论研究提供可靠的依据，帮助我们了解光学材料和光学元件的基本特性，同时为探索其它领域的学科提供实验手段和技能。大量的实验证明，在几何光学研究的范畴内用理论得出的结果与实验的结果相一致。（例如有一定几何尺寸的透镜、球面镜成象的规律等。）通过实验我们可以定量地测定光学材料的折射率，透镜的焦距，光束经过透镜后会聚或发散……这些实验的结果为生产、教学、科研提供了必要的数据和方便，同时实验的手段和技能也可应用在各个方面。由于几何光学实验在各个方面有着广泛的应用，因此它的重要性也就可以理解了。

二、几何光学实验中的基本现象及其原理

我们从人们熟知的几何光学四个基本定律出发(即光的直线传播定律,光的独立传播定律,光的反射定律和光的折射定律)来讨论光学实验中的一些基本现象。

1. 光学系统的成像问题: 研究成像规律,测定成像位置和大小是几何光学实验的重要内容。光学系统的成像可以分为以下几个方面:

(1) 平面镜成像

平面镜是最简单的光学系统。如图 1-1 所示,从点光源 S 发出的光线是一组发散的光束,分别经一平面镜反射,根据光的反射定律,反射后的光束仍然是一组发散光束,它们不可能有相交点。但是我们若将反射光线向反方向延长,则有相交点 S' ,该点与 S 正好以镜面为对称面,相互对称。我们通常称 S' 是虚象。

因为在光线前进方向没有会聚点,所以用一般屏幕是找不到象点的。一定要用有一定会聚能力的光学仪器(包括人的眼睛)才能使发散光束会聚在一起,相交于一点。虚象位置就是通过这个方法进行测量的。

(2) 折射成像

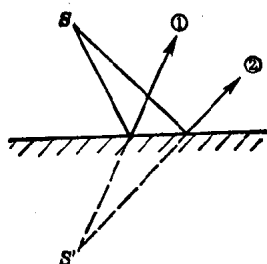


图 1-1

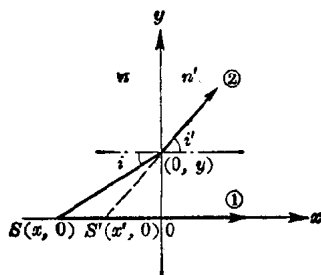


图 1-1

一介质中的点光源 S 发出的发散光束折射到另一介质中去, 光束的每一条光线都遵循光的折射定律, 如图 1-2 所示。由于折射到另一介质的光束仍然是发散的, 所以在光线的前进方向没有相交点。我们任意选择其中的两条光线, 假设光线①正入射到界面上, 即在图 1-2 的坐标系 Ox 方向, 光线②在坐标系上的一点 $(0, y)$ 上按折射定律折射。它们在光线的传播方向上没有交点, 若朝光线①、②的反方向延伸, 就相交于 S' , S' 是点光源 S 所发出的光束经分界面折射后的虚象。

$$\therefore \sin i = \frac{y}{\sqrt{y^2 + x^2}},$$

$$\therefore \sin i' = \frac{y}{\sqrt{y^2 + x'^2}}.$$

利用折射定律 $n \sin i = n' \sin i'$,

$$\therefore x' = \frac{n'}{n} \sqrt{x^2 + \left(1 - \frac{n^2}{n'^2}\right) y^2}. \quad (1-1)$$

从(1-1)式可以知道, x' 的大小不仅与 x , 折射率 n , n' 有关, 而且与 y 有关, 也就是与入射角 i 的大小有关。所以虚象 S' 将不是一点, 而是线状的交点。这种现象在象差理论中称为象散。所以测量折射后的成像位置将因象散而带来测量误差。

(3) 球面镜成像

在均匀介质中球面镜的成像性质与介质的折射率无关, 故不会存在色差。所以在光学实验以及光学仪器中经常要用到球面镜。球面镜成像规律可以用下式表示:

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}, \text{ 而 } f = \frac{r}{2}. \quad (1-2)$$

式中, S 是物距, S' 是象距, f 是球面镜的焦距, r 是球面镜

的曲率半径。

球面镜成象可以建立确定的坐标系,如图 1-3 所示。图中

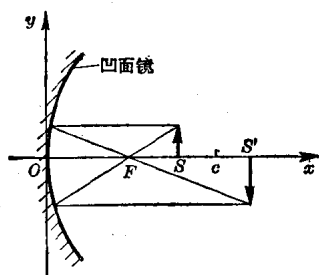


图 1-3

$Oc=r$, $OF=f$, 凹面镜 r 和 $f>0$, 凸面镜 r 和 $f<0$, 以镜面来划分,物点、象点在光线照到的部份 S, S' 取正值。在光线没有照到的部份 S, S' 取负值。

因为凹面镜有会聚作用,在实验中使用它就会使从点光源 S 发出的发散光束,经凹面镜反射后会聚成一点,即可以用屏幕直接找到象点位置,所以称该象为实象。这时象距 $S'>0$,这样实象的位置也就可以确定了。假如发散光束经凹面镜反射,仍然是发散光束,那么象点就会出现在镜子的背光部份,这就是虚象。此时象距 $S'<0$ 。

球面镜成象存在球面象差,在离轴远的物点还存在象散等其它象差,这些都会对测量带来误差。

(4) 透镜的成象

几何光学实验和各种光学仪器的成象系统部份多数是透镜在空气中成象。所谓透镜,就是由两个共轴的折射曲面构成的光学系统。薄透镜在空气中成象的光路如图 1-4 所示。图中 $OF=OF'=f$, 其成象公式如下:

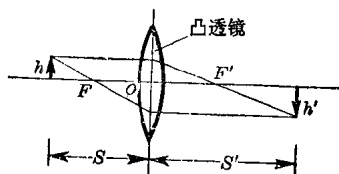


图 1-4

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} = \phi, \quad (1-3)$$

其中 S 是物距, S' 是象距, ϕ 是焦距的倒数, 称为光焦度, f 是薄透镜焦距, 而

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

r_1, r_2 分别是第一折射曲面和第二折射曲面的曲率半径, n 是透镜的折射率。若从 O 点算起, 与光线传播方向一致, r 取正值, 反之 r 取负值。

在实验中要正确运用(1-3)式必须注意以下几个问题:

① 成象规律是从实验中得到的, 成象的运算符号是人为规定的

对于(1-3)式, 我们作如下的规定: 以透镜中心 O 为坐标原点, 光线进入透镜之前的空间为物空间的正方向, 光线经透镜折射后的空间为象空间的正方向。若物在物空间的正方向, 则物距取正值, 虚物或会聚光点在物空间的负方向则为负值。象在象空间的正方向则象距取正值, 反之则取负值。

② 薄透镜的条件

假如当透镜厚度与透镜焦距相比可以忽略不计, 或者说在实验中透镜的厚度不会影响测定焦距、物距、象距的准确度, 这种透镜称为薄透镜。能满足以上条件的凸透镜和凹透镜在作图时凸透镜用“ $\downarrow$ ”表示, 凹透镜用“ $\times$ ”表示。

③ 近轴条件

透镜成象也存在着各种象差, 对于测量象的位置与大小都会引起误差。为了减少测量误差, (1-3)式的应用要在近轴区域。近轴区域是指通过共轴光学系统的光线必须接近共轴系统的光轴, 而且入射光线和经透镜折射后的光线与光轴所夹的角 u 是非常小的, 也就是在应用折射定律时 $\sin u$ 或 $\tan u$ 可以用 u 的弧度值来表示。现将从三角函数表中查得的 $\sin u$,

$\operatorname{tg} u$ 的结果整理在表 1-1 中。

表 1-1

u (度)	u 的弧度值(弧度)	$\sin u$	$\operatorname{tg} u$	百分偏差
1.0°	0.017453	0.017452	0.017455	1×10^{-4}
2.5°	0.04363	0.04362	0.04366	7×10^{-4}
5.0°	0.0873	0.0872	0.0875	2×10^{-3}
10.0°	0.1745	0.1736	0.1763	1×10^{-2}

从这个结果可以看到近轴条件与实验要求的精度有关。若精度要求是 3~4 位有效数字, 其成像系统的 u 应小于 5° 。

在几何光学实验中, 薄透镜的成象是最常用的, 而厚透镜和共轴透镜组的成象则复杂得多, 一般是用等效的薄透镜来代替复杂的共轴光学系统。关于这一问题将在第三章中讨论。

④ 成象系统的放大率问题

成象系统的放大率可分为横向放大率和轴向放大率。

成象系统的横向放大率

$$|\beta| = \frac{h'}{h} = \left| \frac{S'}{S} \right|, \quad (1-4)$$

上式中 h 表示物高, h' 表示象高, 如图 1-4 所示。

成象系统的轴向放大率

$$\alpha = \frac{dS'}{dS}。 \quad (1-5)$$

对(1-3)式求微分, 得到

$$-\frac{dS}{S^2} - \frac{dS'}{S'^2} = 0,$$

$$\therefore \alpha = -\frac{S''}{S^2}.$$

利用公式(1-4)可得到

$$\alpha = -\beta^2. \quad (1-6)$$

从(1-6)式可以看出,如果横向放大率 $\beta = 0.010$,例如用照相机拍摄照片的情况,则轴向放大率 α 的数量级在 0.0001,因而我们在拍摄自然景物时就可以估计到拍摄景物的深度。

2. 光在真空和介质中的速度: 光是一种电磁波,光的传播速度与电磁波传播的速度是一致的。光速的测定是物理学的一个十分重要的课题。实验的结果证明光在不同介质中的传播速度是不一样的。在真空中的光速 c 最大,在其它介质中的光速 v 则小于 c 。这样对于频率一定的单色光来讲,在真空中的波长 λ_0 就和在介质中的 λ 不一样。

$$\begin{aligned} \therefore c &= \lambda_0 \nu, \quad v = \lambda \nu, \\ \frac{\lambda_0}{\lambda} &= \frac{c}{v}, \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\therefore c \geq v, \quad \therefore \lambda_0 \geq \lambda.$$

我们在本书中提到的波长值都是指在 15°C 和 76cm 汞柱高条件下而言。

3. 光学材料的折射率和科希公式: 折射率 n 是光学材料的基本特性,也是衡量光学材料的重要参数。在光学实验中经常要测定折射率。那么什么是光学材料的折射率呢? 我们定义,光在真空中的速度 c 和光在介质中的速度 v 之比就是这个光学材料的折射率。

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1-8)$$

所以光在任意介质中的折射率总是大于或近似等于 1。大部分的光学材料对不同波长的光的折射率是不一样的。也

就是说折射率 n 是 λ 的函数。

$$n = F(\lambda)。$$

实验证明, 光学介质在没有特征吸收的情况下, 折射率可以用科希公式来描述。

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}。 \quad (1-9)$$

式中 A, B, C 表示光学材料特征的常数。对 A, B, C 的测定可以在实验中先分别测出光学材料对三个已知波长的不同折射率, 代入(1-9)式, 然后解联立方程求得。

4. 光学材料的透射特性: 光在光学介质中传播时, 随着光的传播将有一小部分被介质吸收, 另一小部分被介质散射。余下的仍按原来的方向传播。光强随着光传播路程的延伸将逐渐减弱。当光射到二介质界面上, 将引起反射和折射(也因界面的不平整可能引起散射)。由于界面上的反射, 也将使透射的光强减弱。对光学材料或光学元件的这一特性, 我们用透射率 T 来表示。

$$T = \frac{\text{透射光强}}{\text{入射光强}}。$$

任何光学材料的透射率 T 都是光波波长的函数。测量这一关系也是光学实验的一个重要内容。

在实验中假如只考虑光学系统的透射特性, 如在成像系统中考虑象的明暗, 光经过光学纤维后的损失等都可以认为是属于几何光学实验范围。若进一步探讨光的透射特性, 包括光在二透明界面的折射。反射和全反射现象的本质等等完全依靠几何光学的实验方法是不行的, 而是要进一步讨论光的波动性以及光波在介质中的波动特性, 这就超越了几何光学实验的范畴。我们必须强调指出几何光学和物理光学都是