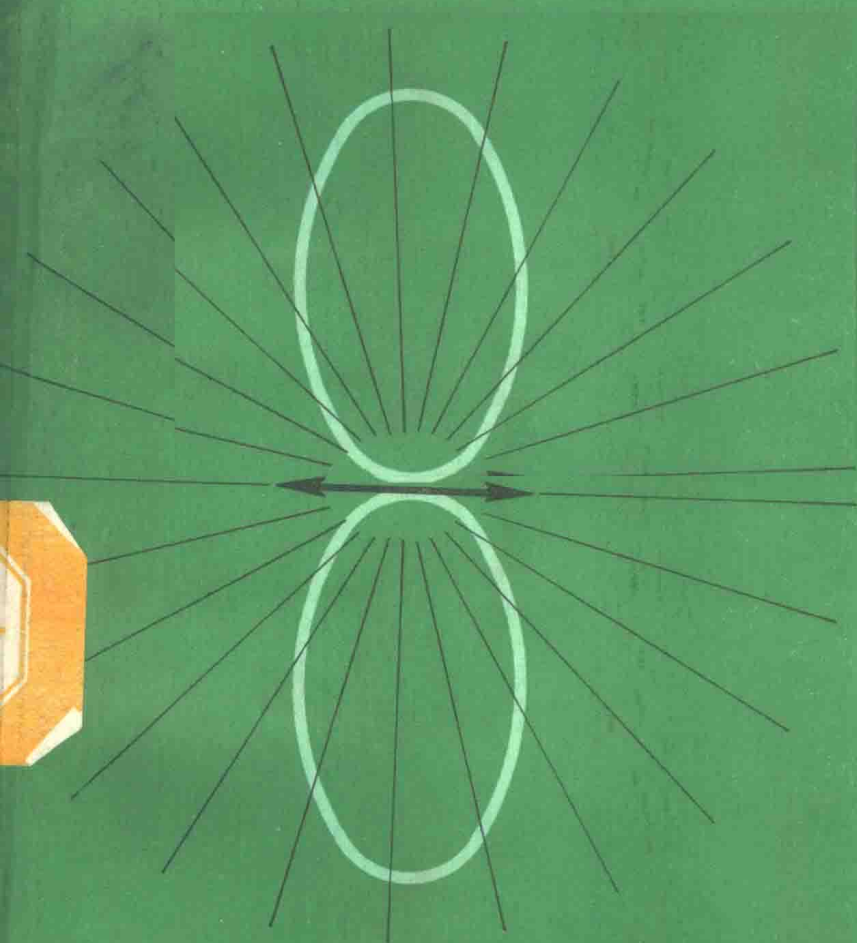


大学基础物理学习与解题指导

光学

王筱生 包 仁 朱涵如 编

上海科学技术出版社



大学基础物理学习与解题指导

光 学

王筱生 包 仁 朱涵如 编
凌德洪 校

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书为光学篇,全书共九章,根据丛书的统一格式,每章有四个部分组成。第一部分介绍目的和要求,第二部分是内容提要,提纲挈领地阐述有关主要的物理概念、定理、公式和结论。第三部分是例题,也是四个组成部分的主体部分。本书提供 186 道典型例题,介绍如何根据第二部分的提要性内容解答物理习题,以巩固深化物理概念和进一步理解物理定律,并培养解题的能力、技巧和方法。第四部分是习题(均附答案),本书共收集 247 道习题,给读者自行练习和自我检查提供相应的习题资料。

本书适用面较广,可供理工科大学学生以及有相当水平的自学者阅读,尤其适用于理科物理专业或相近专业的大学生,同时也可供有关教师参考。

大学基础物理学习与解题指导

光 学

王筱生 包 仁 朱涵如 编

凌德洪 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

发行所上海发行所发行

江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 9 字数 199,000

1988 年 10 月第 1 版 1983 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—4,800

ISBN 7-5323-0375-6/O·08

定价: 3.25 元

序 言

大学基础物理是一门概念性很强的课程,除此之外,习题训练也是这门课程的重要方面。本书是一套丛书的光学部分,这套丛书主要是为了后者的目的服务的。

本书的重点既然是解题指导,所以在物理基本概念的阐述和分析方面就不可能像一般教材那样仔细,只能就一些主要的,关键性的概念和原理,作一些概括性的总结。另一方面对如何解决问题,则给予较多的分析,问题中的关键步骤则不厌其烦地加以强调。这样做的目的,并不只是为了通过例题,让读者照葫芦画瓢,而是在思想方法上做一些引导、培养和训练,达到提高分析问题、解决问题的能力。

本书的体系基本上参考现行物理专业的普通物理教学大纲光学部分。光学是一个古老的学科,但在激光问世以后,新的领域在急剧发展。由于这是基础课,对经典部分要牢固掌握,对发展现状和前景,也应有所考虑。为了与现行的光学教材相互配合,还是按旧系统选材,而把有关激光和信息光学内容,另列章节处理。但由于要求不同,只给出少量的习题,深入的研讨超出了本书范围,须阅读有关专业著作。选题的深浅,基本根据教学大纲的目的要求,偏重基础方面,亦有少量稍难一些的问题,以加深对概念的理解和技巧的训练。

参加本书编写工作的人员,除王筱生、包仁、朱涵如外,尚有屠传士(第九章)、过祥龙(第七、八章)、冷永章(第四章)、禅

跃新(第三章)等。由于水平有限,错误和不妥之处在所难免,请读者提出批评指正。

编写本书所选材料多系根据编者参与教学的积累,阅读本书可与当前通用的几种光学教材如

母国光、战元龄: 光学

姚启钧: 光学

龚家虎、陈昇: 大学基础物理自学丛书 光学
参照学习,可以起到相辅相成的效果。

编 者

1987年6月

目 录

第一章 几何光学的基本原理	1
本章目的	1
内容提要	1
解题示例	16
习题	41
第二章 光学仪器的基本原理	47
本章目的	47
内容提要	47
解题示例	65
习题	78
第三章 光的干涉	88
本章目的	83
内容提要	83
解题示例	101
习题	124
第四章 光的衍射	128
本章目的	128
内容提要	128
解题示例	146
习题	162
第五章 光的偏振	167
本章目的	167
内容提要	167

解题示例	178
习题	195
第六章 光的吸收、散射和色散	202
本章目的	202
内容提要	202
解题示例	209
习题	215
第七章 光的量子性	219
本章目的	219
内容提要	219
解题示例	225
习题	247
第八章 激光基础知识	249
本章目的	249
内容提要	249
解题示例	255
习题	258
第九章 傅里叶光学简介	259
本章目的	259
内容提要	259
解题示例	266
习题	273
习题答案	275

第一章 几何光学的基本原理

本章目的

1. 理解光线、光程、光学系统、像等概念。
2. 掌握费马原理, 光的直线传播、独立传播和光路可逆原理及反射、折射定律。
3. 牢固掌握几何光学采用的符号法则。熟练地掌握理想光学系统成像规律及其计算技能。

内容提要

I. 基本概念

光线与波面 光在传播过程中的径迹可以用光线来描述, 光线就是没有横截面而具有一定方向的几何线。光携带的能量沿光线方向传播。光的本质是电磁波。光源向四周发出光波, 在媒质中沿着光线方向传播时, 任意一瞬间等位相点在空间形成一个相应的波面, 波面可以是平面、球面或任意曲面。在各向同性媒质中, 光的传播方向总是和波面的法线方向相重合, 这样, 光线与波面法线相当。在一般情况下, 人们经常考虑的只是光的传播方向问题, 可以不去考虑位相, 这时的波面就是垂直于光线的几何平面或曲面。在这极限情况下, 实质上光线和波面都可看作是抽象的数学概念。在许多实际问

题中,特别是在光学技术成像问题和照明工程问题中,借助于光线(有时用波面)的概念,应用某些基本实验定律和几何定律,可以进行一切必要的计算而不必涉及光的本性问题。

光程 假设光在折射率为 n 的均匀媒质中传播速度为 v , 走过的几何路程为 d , 所经历的时间为 t , 则

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d}{c/n}。$$

用这相同的时间,光在真空中所走的距离

$$L = c \cdot t = c \frac{d}{c/n} = n \cdot d。$$

这个 n 和 d 的乘积定义为光程。借助于光程这个概念,可以将光在媒质中所走过的几何路程换算为光在真空中的等价路程。这就可以对光在不同媒质中所走的路程用折算后的光程进行比较。

单心光束和像散光束 有一定关系的一些光线的集合称为光束。从一个发光点发出的光线组成的光束和会聚于一点的光线组成的光束都称为同心光束。有些光束中的光线在空间看不出相交与否,若反向或正向延长都通过同一点,也是同心光束。光束中的光线不相交于一点,但又有一定关系的光线的组合称为像散光束。

光学系统 透明的、均匀的各向同性媒质为一组具有规则几何形状的界面所分开,光通过这些界面时发生折射或反射,这就构成一个光学系统。

理想光学系统 光束经过光学系统就成为另一光束,凡能将同心光束变换成另一个同心光束,且变换前的同心光束的心和变换后的心是一一对应的、唯一的,这种光学系统叫做理想光学系统。实际光学系统除平面反射镜外全不是理想光

学系统,同心光束经它们变换后就成为像散光束了。

物 物是未经变换前无穷多个同心光束的心的集合。实物乃是实际发光点的集合,或是好像由发光点发出来的许多发光点的集合。虚物乃是要会聚到一点但实际没有会聚于一点的同心光束的心的集合。

像 像是物经系统变换后的无穷多个同心光束的心的集合。光束实际通过的心的集合为实像。若是光束延长线的交点的集合,则为光学系统的虚像。

要谈到物和像,必须先把光学系统提出来。所有物和像都必须是对某一光学系统而言的,同样一个画面可以是某一系统的物,但却可以是另一系统的像。

在理解物和像时必需注意:物是指入射线而言的,像是指出射线而言的。此外,还要注意:对一个界面(或光具组)而言,某一光束是出射线,但它对另一个界面(或光具组)而言则可能是入射线。图 1-1 表示由三个界面构成的光学系统,实际光线进行的方向如带箭头实线所示。

对 S_1 而言: P 为实物, P_1 为虚像;

对 S_2 而言: P_1 为实物, P_2 为实像;

对 S_3 而言: P_2 为虚物, P' 为实像;

对整个系统而言: P 为实物, P' 为实像。

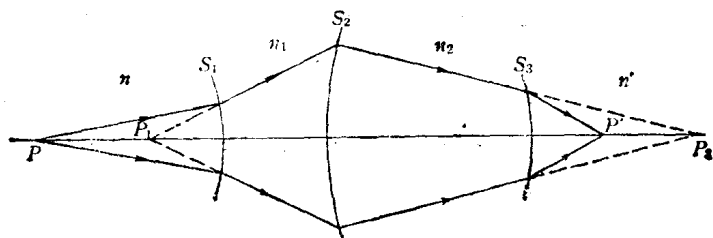


图 1-1

物方空间和像方空间 物方空间和像方空间是针对某一光学系统而言的。未经变换前入射同心光束的所在空间称为物方空间,而不能认为是物所在的空间。物方空间的媒质折射率称为物方折射率 n 。经过系统变换后的出射同心光束所在的空间称为像方空间。像方空间不一定是像的所在空间。像方空间的媒质折射率称为像方折射率 n' 。

II. 几何光学的基本原理和定律

费马原理 光线从空间一点 A 到另一点 B , 中间经历任意的折射率可连续改变的媒质或折射率不同的媒质的光总是沿着光程为极值(极小值、极大值或稳定值)的路径传播的。这就是费马原理。费马原理数学表达式可表示为光程 L 定积分的变分等于 0, 也就是

$$\delta L - \delta \int_A^B n \cdot ds = 0, \quad (1-1)$$

式中 n 是媒质折射率是沿路径 S 的空间函数。

光的直线传播定律 在几何光学中, 常用一条有向线段表示光的传播方向, 这条几何线称做光线。光在均匀媒质中是沿着直线传播的, 所以在均匀媒质中光线是一条直线。

光的独立传播定律和光路可逆原理 自不同方向或由不同物体发出的若干条光线相交时, 每条光线仍按原方向传播, 并不受其他光线的影响, 称做光的独立传播定律。

光线自媒质 1 向媒质 2 入射, 入射角 i_1 、以折射角 i_2 出射, 如果光线自媒质 2 向媒质 1 入射, 入射角为 i_2 , 则媒质 1 中的折射线的位置就是原来的入射线的位置, 其夹角为 i_1 。入射线和反射线也可以进行同样的论证。也就是说, 从物点发出的光线, 经光学系统出射后通过像点, 反过来如让光线从像

点沿反方向进行，经光学系统后必通过物点。这称为光路的可逆原理。

光的反射定律 如图 1-2 所示，光入射到两个均匀媒质的分界面上时，一部分光能从界面反射回原媒质中称为反射光线。反射光线位于入射光线和法线所决定的平面内，反射光线和入射光线分居法线两侧。反射角 i_1' 等于入射角 i_1 ，这就是反射定律。

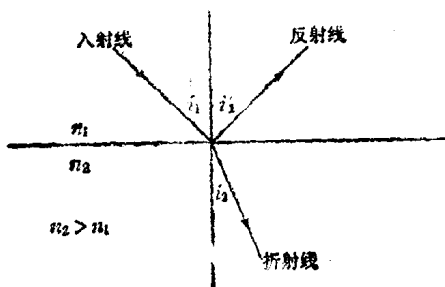


图 1-2

光的折射定律 入射光线到达两媒质界面时，除反射外将有一部分光按新的传播方向进入另一媒质，称为折射现象。折射光线位于入射光线和法线所决定的平面内，折射光线和入射光线分居法线的两侧。折射线方向由下式

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1-2)$$

确定，式中 i_1 为入射角， i_2 为折射角， n_1 、 n_2 为媒质 1、2 的折射率。上式也称斯涅耳公式。

媒质的折射率 它的定义为

$$n = \frac{c}{v},$$

c 为光在真空中的传播速度， v 为光在媒质中的传播速度。因 c 比 v 大，故 n 恒大于 1。两种媒质相比较时，光传播慢的其折射率一定较大称为光密媒质，光传播速度较快的其折射率一定较小称为光疏媒质。

真空的折射率等于 1。空气的折射率也近似等于 1。这

样,光线从真空入射到某媒质时,

$$n_{\text{媒质}} = \frac{n_{\text{真}}}{n_{\text{真}}} = n_{\text{真}}$$

故某媒质的折射率也可以这样定义。即光线从真空向某媒质界面入射时,入射角的正弦与折射角的正弦之比称做某媒质的折射率,即

$$n_{\text{媒}} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$

当 $n_1 < n_2$ 时,则 $\sin i_2 < \sin i_1$, 故 $i_2 < i_1$, 即光线从光疏媒质射入光密媒质时,折射光线向靠近法线的方向偏移。

当 $n_1 > n_2$ 时,则 $\sin i_2 > \sin i_1$, 故 $i_2 > i_1$, 即光线从光密媒质射入光疏媒质时,折射光线向远离法线的方向偏移,折射角 i_2 总要大于入射角 i_1 。

全内反射 当光线从光密媒质进入光疏媒质时,折射角 $i_2 = 90^\circ$ 相对应的入射角 i_c 是两种给定媒质时的最大入射角。这时 $\sin i_c = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}$, i_c 称为全反射临界角。如果入射角再超过 i_c , 则入射光线不能因折射进入界面另一侧的光疏媒质而全部返回原媒质,这种现象称做全反射。它被

广泛应用于各种转向棱镜、正像棱镜、潜望镜和光学纤维之中。

偏向角 入射光经三棱镜折射后改变了方向,出射线与入射线之间的夹角称为偏向角。当入射线与折射线对棱镜折射面

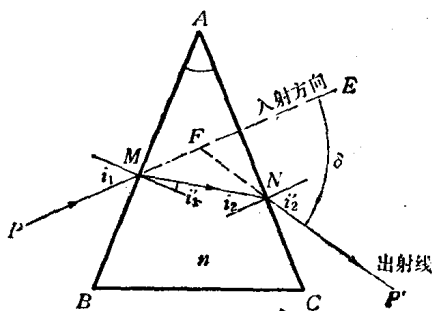


图 1-3

成对称的时候,入射角等于出射角,则由棱镜折射的偏向角为最小。它与顶角 A 的关系为

$$\sin\left(\frac{\delta_m + A}{2}\right) = n \sin \frac{A}{2}, \quad (1-3)$$

式中 δ_m 为三棱镜的最小偏向角, A 为棱镜角, n 为棱镜玻璃的折射率。

III. 单一球面光学系统

符号法则 为了研究光通过光具组的界面时的折射情况,也就是根据进入光具组光线的位置和方向,算出从光具组出射光线的位置和方向,牵涉到的一些角度和线量,这些量都是有正负的代数量,为此,特规定出以下的符号法则,作为计算的依据。

- a) 光线必须从左向右入射。
- b) 所有距离都规定从折射面的顶点 A 量起,向右为正,向左为负。
- c) 角度的量度从主轴(或球面法线)沿锐角方向量起,顺时针方向为正,反时针方向为负。
- d) 垂直于主轴线段的长从主轴量起,向上为正,向下为负。

应用图形中的几何关系时,线段与角都是正值,因此,用文字注明图中的线段与角时,必须根据上述符号法则,在文字前面冠以符号,如图 1-4 所示。

单一球面折射成像 绝大多数光学系统都是由许多球面组成的。两种媒质由单一球面分开构成一最简单的光学系统。我们对单一球面成像规律掌握了,就可以对整个球面系统进行逐个的相继的单一球面成像计算,就可以求出整个复

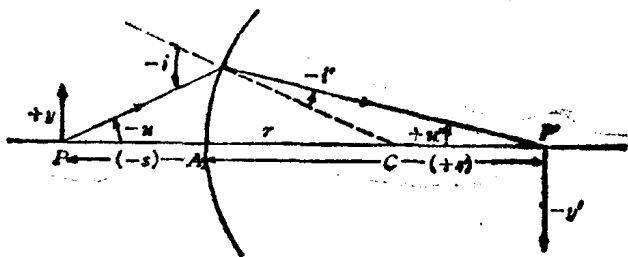


图 1-4

察球面系统的物像关系。下面对单一折射球面各公式作一介绍:

a) 单球面成像公式:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (1-4)$$

s 为物距, 小于 0 为实物, 大于 0 为虚物。 s 为自球面顶点算起的。 s' 为像距, 自球面顶点算起, 小于 0 为虚像, 大于 0 为实像。 r 为自球面顶点算起的半径, 它可正可负, $r = \infty$ 时为平面。 n 、 n' 分别为单一球面的物方、像方折射率。

b) 光焦度

$$\phi = \frac{n' - n}{r}$$

是描写单一折射球面折光本领的。它由三个量决定, 即球面的半径 r , 球面两边的折射率 n 、 n' 。显然 n 、 n' 、 r 定了以后, 球面的光学特性就被完全地确定了。 ϕ 大则偏折得厉害, $\phi > 0$ 时, 球面对平行光的偏折是会聚的; $\phi < 0$ 时, 则球面对平行光的偏折是发散的。 $\phi = 0$ 时, 则球面对平行光无偏折本领, 与之相应的 $r = \infty$, 界面为一平面。单一折射球面的 ϕ 是不随光自那边入射而变的。当光向改变时, 物方、像方折射率互换了, 可是, r 也变号了, 所以, ϕ 还是原来的值、原来的正负号。

c) 焦点和焦距 物方焦点 F 和物方焦距 f , 或称第一焦点、第一焦距。 f 定义为当 $s' = \infty$ 时的 s 值。即

$$\frac{n'}{\infty} - \frac{n}{f} = \frac{n' - n}{r},$$

故

$$\frac{n}{f} = -\phi_0. \quad (1-5)$$

同样, 像方焦点 F' 和像方焦距 f' , 或称第二焦点、第二焦距。 f' 定义为当 $s = -\infty$ 时的 s' 值。即

$$\frac{n'}{f'} = \phi_0. \quad (1-6)$$

合并上列关系式得出普遍的 f 、 f' 关系式

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (1-7)$$

光焦度的单位是 m^{-1} , 其数值乘以 100 就是通常所谓“度数”。焦距的单位是 m 。

单一球面折射成像公式也可写成高斯公式

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1. \quad (1-8)$$

需要说明的是上列含 f (或 f') 的四个表达式 (1-5) 至 (1-8) 不只适用于单一折射球面系统, 且普遍适用于其他光学系统。而含球面半径 r 表达式的两个式子则仅适用于单一折射球面。

放大率 如果物体不是轴上一点, 而是较小的、近轴的、有一定大小的物体, 成像公式

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}$$

还是成立的。像的大小与物的大小之间也有确定关系视物的大小和方位而定。

横向放大率 β 它是像高 h' 和物高 h 的比。

$$\beta = \frac{h'}{h} = \frac{ns'}{n_s} \quad (1-9)$$

角放大率 γ 设 u, u' 分别为入射光线和出射光线与光轴的夹角。角放大率由下式定义

$$\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{s}{s'} \quad (1-10)$$

轴向放大率 α 物沿主光轴位移，则像也相应沿主光轴位移。轴向放大率由下式定义

$$\alpha = \frac{ds'}{ds} = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad (1-11)$$

三个放大率之间的关系为

$$\beta = \alpha \cdot \gamma \quad (1-12)$$

拉氏不变式 把(1-11)式和(1-12)式合并起来，并整理即得拉氏不变式。

$$n \cdot h \cdot u = n' \cdot h' \cdot u' \quad (1-13)$$

单一球面反射成像 在这种情况下，物方折射率和像方折射率一致，但光线方向相反，形式上把 n' 看成与 n 有相反的符号，则上面单球面折射成像的一些公式仍然成立。

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r} \quad (1-14)$$

反射球面的第一焦距和第二焦距相等，与折射率 n 无关。

$$f = f' = \frac{r}{2} \quad (1-15)$$

而光焦度却和 n 有关，即

$$\phi = -\frac{2n}{r} = \frac{2n'}{r} \quad (1-16)$$

反射球面的横向放大率