

光 学

郑植仁 编著

哈尔滨工业大学出版社

光 学

郑植仁 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书提纲挈领、深入浅出地讲述了光学的基本概念和基本规律,内容包括几何光学,光的波动性和偏振态,光的干涉,光的衍射,光的偏振,光的吸收、色散和散射,光的量子性,激光,光学信息处理和全息照相,以及非线性光学。书中附有较多习题,书后还附有 8 套模拟试题,用于检验学习效果。

本书可作为高等学校物理及相关专业光学课程的教材或教学参考书,也可作为相关专业教师教学或学生自学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光学/郑植仁编著. — 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.3

ISBN 7-5603-2240-9

I. 光… II. 郑… III. 光学-高等学校-教材
IV. O43.

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 139612 号

策划编辑 张秀华 责任编辑 康云霞 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 20.5 字数 368 千字

版 次 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

印 数 1~3 000

定 价 28.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

本书是以作者多年为物理系本科生讲授光学课的讲义为基础,参考并借鉴了国内外的教材和资料,结合多年的教学成果编写而成的。本教材适合 70 学时左右的教学需求。

“光学”是物理学科一门重要的基础课,它不像力学、电磁学那样,是由一些基本理论和相应公式建立起来的脉络清晰容易联想和掌握的学科。光学的分支较多,公式也很多,相互之间虽有联系,但基本上又是独立的,各自有着丰富的内容。同时,光学与当代许多高科技有着千丝万缕的联系,所以初学者往往感觉不容易掌握。但是,“光学”作为一门学科有着自己的脉络和特点,光学课程的重点内容是波动光学,波动光学的重点是光的干涉,只要把干涉的基本概念和规律搞清楚了,光的衍射和光的偏振的内容就容易理解了,相应的其它方面的内容也就好掌握了。

本教材通过把握经典光学内容为主,光的量子性内容为辅这条主线,突出波动光学中光的干涉这个重点内容,建立起用光的干涉内容带动整个光学课程其它内容的教学体系,力图使光学课程达到好教易学的目的。

本教材在几何光学部分注意首先讲清楚与光的干涉内容有关的成像基本概念和光程的概念。在光的波动性和偏振态部分注意交代清楚与光的干涉内容密切相关的光的波动方程、光强、相位突变和半波损等基本概念。在光的干涉部分中从两束光干涉入手,重点讲清楚什么是光的干涉,尤其注意讲清楚相干条件中的初相位差稳定的内容。

光学既是一门古老的学科,又是一门年轻的学科。说它古老是因为从公元前 500 年起人们就开始了光的观察和研究,说它年轻是因为长期以来光学一直发展缓慢,20 世纪初量子理论的兴起大大促进了光学的发展,尤其是 20 世纪中期全息术和激光出现以后,一度沉寂的光学焕发了青春,以空前的规模和速度发展。光学已经成为现代科学技术极为活跃的重要学科,正在成为人们认识自然和改造自然的强有力的武器。为了适应光学的新发展,本书注意适当加强光与物质相互作用、光的量子性和激光基本理论的讲授,注意反映光学信息处理和全息照相以及非线性光学等近代光学的新概念和新发展,力争把近代光学与传统光学紧密地衔接起来,自然地沟通近代光学与传统波动光学在概念上的联系,适当介绍光的本性和近代光学研究中的一些前沿课题。

为使读者深入学习和领会光学的基本原理和基本规律,切实掌握解决各种光学问题的基本方法,提高独立分析和解决问题的能力,在编写《光学》一书的同时,还编写了与之配套的《光学习题课教程》,给出了《光学》一书中的习题和模拟试题的解答。希望读者通过这两本书的学习,能为今后从事有关光学方面的工作和继续深造打好扎实的基础。

本书的出版得到了哈尔滨工业大学物理系有关领导的关怀和支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者的水平所限,尽管付出很大的努力,仍难免有不当之处,恳请各位读者不吝赐教。

郑植仁

2005年9月6日

目 录

第 1 章 几何光学	(1)
1.1 几何光学的基本规律	(1)
1.2 费马原理	(4)
1.3 成像的概念	(8)
1.4 共轴理想球面光学系统傍轴逐次成像	(12)
1.5 薄透镜傍轴成像	(18)
1.6 光阑	(31)
1.7 光学仪器	(35)
习题 1	(40)
第 2 章 光的波动性和偏振态	(48)
2.1 光的波动性	(48)
2.2 球面波和平面波	(50)
2.3 光波的复振幅表示	(55)
2.4 光波的偏振态	(58)
2.5 光波在两种各向同性介质界面的反射和折射特性	(67)
习题 2	(80)
第 3 章 光的干涉	(83)
3.1 光波的叠加和干涉	(83)
3.2 两光束干涉	(89)
3.3 分波面干涉	(94)
3.4 光波场的空间相干性	(99)
3.5 等厚干涉	(104)
3.6 等倾干涉	(110)
3.7 迈克尔孙干涉仪	(114)
3.8 光波场的时间相干性	(116)
3.9 多光束干涉	(120)
习题 3	(128)
第 4 章 光的衍射	(138)
4.1 光波衍射的基本原理	(138)

4.2 菲涅耳衍射	(144)
4.3 单缝夫琅禾费衍射	(153)
4.4 矩孔和圆孔夫琅禾费衍射	(157)
4.5 望远镜的像分辨本领	(160)
4.6 多缝夫琅禾费衍射	(162)
4.7 光栅	(166)
习题 4	(172)
第 5 章 光的偏振	(178)
5.1 各向异性晶体的双折射	(178)
5.2 单轴晶体光学器件	(182)
5.3 圆偏振光和椭圆偏振光的产生和鉴别	(187)
5.4 平行偏振光的干涉	(191)
5.5 会聚偏振光的干涉	(197)
5.6 旋光	(199)
习题 5	(204)
第 6 章 光的吸收、色散和散射	(211)
6.1 光的吸收	(211)
6.2 光的色散	(213)
6.3 光的相速和群速	(215)
6.4 光的散射	(219)
习题 6	(223)
第 7 章 光的量子性	(225)
7.1 黑体辐射	(225)
7.2 光的粒子性和波粒二象性	(233)
习题 7	(240)
第 8 章 激光	(242)
8.1 激光产生的基本原理	(242)
8.2 激光器的基本结构和激光的产生	(247)
8.3 激光器的纵模和横模	(251)
8.4 激光的特性和应用	(254)
8.5 超短脉冲激光	(255)
习题 8	(260)
第 9 章 光学信息处理和全息照相	(262)
9.1 傅里叶变换	(262)

9.2 阿贝成像理论和空间滤波实验	(265)
9.3 光学图像处理系统和应用	(267)
9.4 全息照相的原理和过程	(271)
9.5 全息照相过程的复振幅描述	(273)
9.6 全息照相的应用	(275)
习题 9	(278)
第 10 章 非线性光学	(281)
10.1 非线性电极化强度	(281)
10.2 几种非线性电极化效应	(281)
10.3 光学双稳态和光学混沌	(286)
10.4 光折变效应	(288)
习题 10	(290)
模拟试题	(292)
模拟试题一	(292)
模拟试题二	(293)
模拟试题三	(294)
模拟试题四	(296)
模拟试题五	(297)
模拟试题六	(298)
模拟试题七	(300)
模拟试题八	(300)
参考答案	(302)
附录	(313)
参考文献	(320)

第 1 章 几何光学

几何光学是研究光线在介质中传播和成像规律的学科。在几何光学中用光线描述光传播的路径和方向,代表光能量传播的轨迹。从光的波动理论理解,把光波看做光线是一种近似处理。当光在传播过程中遇到的空间障碍物或反射和折射界面的尺寸比光的波长大多时,才可以用光线来处理光的传播问题。

1.1 几何光学的基本规律

1. 光的直线传播定律

在各向同性介质中光沿直线传播。

2. 光的反射和折射定律

当光入射到两种各向同性介质的分界面时,一部分光被反射,形成反射光线,一部分光透射,形成折射光线,如图 1.1 所示。

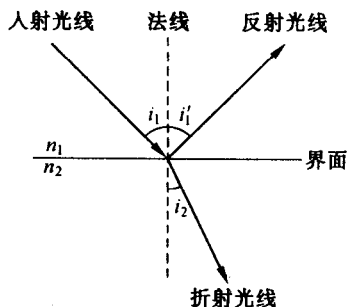


图 1.1 光的反射和折射

实验表明,反射光线处于入射光线和入射点处界面法线构成的入射面内,反射光线和入射光线分居法线两侧,反射角等于入射角,称为反射定律,即

$$i_1' = i_1 \quad (1.1)$$

折射光线处于入射面内,与入射光线分居法线两侧,入射角的正弦和折射角的正弦之比等于光在两种介质中的传播速度之比,比值 n_{21} 是一个与入射角无关的常数,称为折射

定律,即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} \quad (1.2)$$

式中 v_1 、 v_2 是光在不同介质中的传播速度; n_{21} 是第二种介质相对于第一种介质的相对折射率。令 $v_1 = c$, $v_2 = v$, 可得介质的绝对折射率为

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

式中 c 是光在真空中的传播速度。由此可以将折射定律改写为经常使用的形式

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.4)$$

介质的折射率是材料的光学参数,随入射光的波长变化。折射率较大的介质称为光密介质,折射率较小的介质称为光疏介质。

任何波长的光在真空中的传播速度都相同,真空中光的波长和频率与传播速度之间的关系为 $c = \nu \lambda_0$ 。光由真空进入介质后,频率不变,波长和传播速度发生变化,三者之间的关系变为 $v = \nu \lambda$ 。

3. 全反射临界角

由折射定律可知,当光从折射率为 n_1 的光密介质入射到折射率为 n_2 的光疏介质时,折射角大于入射角。若入射角增大到小于 90° 的 i_c 时,折射角增大到 90° ,此时折射光强减小到零。继续增大入射角,入射光的能量全部按反射定律被反射回光密介质,这种现象称为全反射, i_c 称为全反射临界角。由折射定律得到的全反射临界角表示式为

$$i_c = \arcsin(n_2/n_1) \quad (1.5)$$

4. 光的可逆性原理

从光的反射和折射定律可以看出,当光线传播的方向反转时,它将沿着同一路径反向传播,这个普遍性的推论称为光的可逆性原理。利用光的可逆性原理,常常可以得到一些重要的结论。

5. 三棱镜的最小偏向角

由透明介质制成的棱柱体称为棱镜,其中截面呈三角形的棱镜称为三棱镜,与棱边垂直的平面称为三棱镜的主截面,三棱镜的主截面是等腰三角形时称为等腰三棱镜。

图 1.2 是等腰三棱镜的主截面图,其中 α 是三棱镜的顶角, n 是三棱镜介质的折射率,直线 MG 和 NG 分别是垂直棱边的法线。

让入射光线沿三棱镜的主截面传播,设入射光线 DM 首先在分界面 AB 的点 M 处发生折射,第一入射角和折射角分别是 i_1 和 i_1' , 折射光线 MN 在分界面 AC 的点 N 处再次发生

折射,第二入射角和折射角分别是 i_2' 和 i_2 ,第二次折射后光线沿 NE 方向出射。

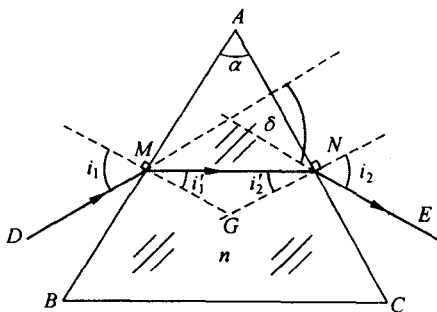


图 1.2 光线在三棱镜主截面内的折射

三棱镜入射光线 DM 的延长线与折射光线 NE 的反向延长线形成的夹角 δ 称为三棱镜的偏向角。由图 1.2 可知

$$\begin{aligned}\delta &= (i_1 - i_1') + (i_2 - i_2') = (i_1 + i_2) - (i_1' + i_2') \\ \alpha &= i_1' + i_2'\end{aligned}\quad (1.6)$$

于是

$$\delta = i_1 + i_2 - \alpha \quad (1.7)$$

由折射定律可知,第二折射角 i_2 是第一入射角 i_1 的函数,(1.7) 式表明,三棱镜的偏向角 δ 随第一入射角 i_1 变化。进一步的分析和实验显示,当第一入射角 i_1 由 0° 逐渐增大到 90° 时,三棱镜的偏向角 δ 先是逐渐变小,然后又逐渐变大,偏向角 δ 随第一入射角 i_1 变化的函数曲线有一个最小值,称这个最小值为最小偏向角 δ_m 。从(1.7) 式出发可以推导出最小偏向角的表示式。

将(1.7) 式两边对 i_1 微商,并令其等于零,可得

$$\frac{d\delta}{di_1} = 1 + \frac{di_2}{di_1} = 0$$

即

$$\frac{di_2}{di_1} = -1$$

将(1.6) 式两边对 i_2' 微商,得

$$\frac{di_1'}{di_2'} = -1$$

若三棱镜周围介质的折射率为 n' ,分别对 AB 和 AC 分界面上相应折射定律的入射角和折射角微分,可得

$$\begin{aligned}n' \cos i_1 di_1 &= n \cos i_1' di_1' \\ n' \cos i_2 di_2 &= n \cos i_2' di_2'\end{aligned}$$

将两式相除,得

$$\frac{\cos i_1}{\cos i_1'} = \frac{\cos i_2}{\cos i_2'}$$

将上式平方,再利用相应的折射定律,可得

$$\frac{\cos^2 i_1}{(n/n')^2 - \sin^2 i_1} = \frac{\cos^2 i_2}{(n/n')^2 - \sin^2 i_2}$$

显然,上式只有当 $i_1 = i_2$ 时才能成立,由此可以得到 $i_1' = i_2'$ 。因此有

$$i_1' = \frac{\alpha}{2} \quad (1.8)$$

$$i_1 = \frac{\alpha + \delta_m}{2} \quad (1.9)$$

将上述两式代入折射定律公式,可以得到最小偏向角的表示式为

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_m}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.10)$$

若三棱镜周围介质的折射率 $n' = 1$, 则最小偏向角的表示式为

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_m}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.11)$$

从上面的推导过程可以看出,当光线在三棱镜的主截面内按最小偏向角方向传播时,等腰三棱镜内的折射光线 MN 与底边平行。利用三棱镜的最小偏向角表示式可以求得三棱镜材料的折射率。

顶角很小的三棱镜称为镜楔,此时对(1.10)和(1.11)式做近似处理,可以将最小偏向角表示式分别简化为

$$\delta_m = \left(\frac{n}{n'} - 1\right)\alpha, \quad \delta_m = (n - 1)\alpha \quad (1.12)$$

1.2 费马原理

费马原理是描述光线在介质中传播的实际路径的原理,为了讨论费马原理,需要首先引入光程的概念。

1. 光程

光在传播过程中经过的实际路径长度与所在介质折射率的乘积称为光程。如图 1.3 所示,在均匀介质中光线从点 Q 传播到点 P 的光程是

$$L(QP) = nl \quad (1.13)$$

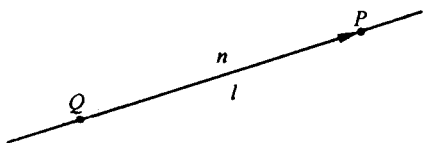
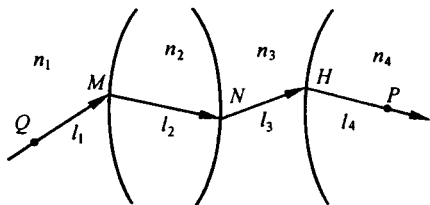


图 1.3 光线在均匀介质中传播的光程

如图 1.4 所示,在 m 种不同介质中光线从点 Q 传播到点 P 的光程是

$$L(QP) = \sum_{i=1}^m n_i l_i \quad (1.14)$$

图 1.4 光线在 m 种不同介质中传播的光程

如图 1.5 所示,在折射率连续变化的介质中光线从点 Q 传播到点 P 的光程是

$$L(QP) = \int_{(l)Q}^P n(l) dl \quad (1.15)$$

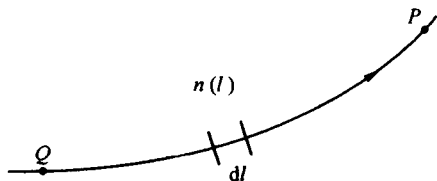


图 1.5 光线在折射率连续变化介质中传播的光程

2. 光程的物理意义

光在某种介质中传播的光程可以理解为在相同时间里光在真空中传播的实际路径长度。也就是说,若在 Δt 时间里光在折射率为 n 的介质中经过的实际路径长度为 l ,在相同时间里光在真空中经过的实际路径长度为 l_0 ,则有 $l_0 = nl$ 。

很容易证明这个等式。设光在折射率为 n 的介质中传播的速度为 v ,光在真空中传播的速度为 c ,由上面的叙述可知

$$\Delta t = \frac{l_0}{c} = \frac{l}{v}$$

将 $n = \frac{c}{v}$ 代入上式, 即得

$$l_0 = nl \quad (1.16)$$

3. 相同光程中含有相同的波数

光在某种介质中传播的实际路径长度 l 中包含的波长数目称为光在该介质中的波数, 记为

$$N = \frac{l}{\lambda} \quad (1.17)$$

如图 1.6 所示, 设真空中波长为 λ_0 的光在折射率为 n_1 的介质中的波长为 λ_1 , 从点 Q_1 到点 P 传播的实际路径长度为 l_1 , 包含的波数为 N_1 ; 在折射率为 n_2 的介质中的波长为 λ_2 , 从点 Q_2 到点 P 传播的实际路径长度为 l_2 , 包含的波数为 N_2 。若两条路径的光程相等, 即 $n_1 l_1 = n_2 l_2$, 则有 $N_1 = N_2$ 。

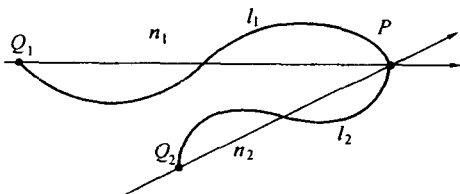


图 1.6 相同光程中包含相同的波数

这个结论也不难证明, 由波数定义可知

$$N_1 = \frac{l_1}{\lambda_1}, \quad N_2 = \frac{l_2}{\lambda_2}$$

由 $n = \frac{c}{v}$, $c = \nu \lambda_0$ 和 $v = \nu \lambda$ 可得

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (1.18)$$

将 $n_1 = \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ 和 $n_2 = \frac{\lambda_0}{\lambda_2}$ 分别代入波数的定义式, 可得

$$N_1 = \frac{n_1 l_1}{\lambda_0}, \quad N_2 = \frac{n_2 l_2}{\lambda_0}$$

已知 $n_1 l_1 = n_2 l_2$, 因此得

$$N_1 = N_2 \quad (1.19)$$

如果点 Q_1 和点 Q_2 处的两束光波的振动状态相同, 经过不同路径传播到点 P 处时相遇, 即使两条光线的实际路径长度不同, 只要传播的光程相同, 两束光波在点 P 处的振动状态就相同, 由此可以通过比较光程来比较两个波动的振动状态。

4. 费马原理的表述

一般来说,光从一点传播到另一点有各种可能的路径,但是只有满足特定条件的路径才是光线传播的实际路径,这个特定条件由费马原理给出,即光线沿光程取平稳值的路径传播。取平稳值的含义是取常数值、极小值或极大值。图 1.7 给出了反射实际光线取平稳值的实例,图中的点 F_1 和 F_2 是椭圆的两个焦点。

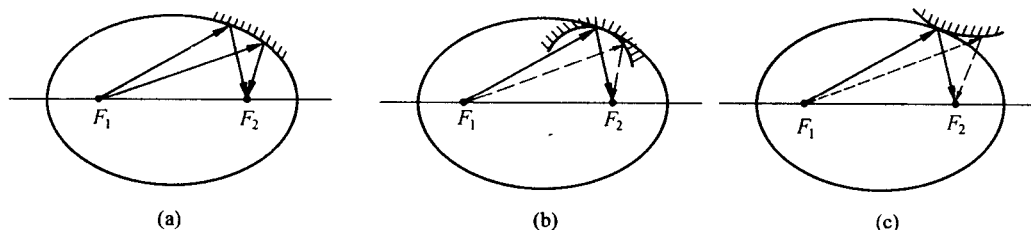


图 1.7 实际光线取平稳值的实例

图 1.7(a) 以椭圆界面为反射面,从点 F_1 发出的各条光线经过椭圆界面反射后都会聚到点 F_2 ,每条光线都是实际光线,各条光线的光程都相等,此时实际光线取常数值。图 1.7(b) 以曲率半径小于椭圆界面曲率半径的内切圆面为反射面,实线表示从点 F_1 发出的在椭圆界面与内切圆面的切点处反射后到达点 F_2 的实际光线的路径,虚线表示非切点处的任意一条可能光线的路径。此时,实际光线的光程大于虚线路径的光程,实际光线取极大值。图 1.7(c) 以曲率半径大于椭圆界面曲率半径的外切圆面为反射面,实线表示从点 F_1 发出的在椭圆界面与外切圆面的切点处反射后到达点 F_2 的实际光线的路径,虚线表示非切点处的任意一条可能光线的路径。此时,实际光线的光程小于虚线路径的光程,实际光线取极小值。

费马原理可以用数学公式表示为

$$\delta[L(QP)] = \delta\left[\int_Q^P n(l)dl\right] = 0 \quad (1.20)$$

这是一个泛函的变分方程,由这个方程可以求出光线取平稳值的实际路径。其中 δ 是变分符号,在这里,它的运算类似于一元函数的微分运算。

5. 由费马原理推导几何光学的基本规律

1) 光的直线传播定律是费马原理的直接推论

在各向同性介质中,光在任意两点之间沿直线传播的光程最短,此时光程取极小值。因此,光的直线传播定律是费马原理的直接推论。

2) 光线的可逆性原理是费马原理的自然结论

费马原理只涉及实际光线的传播路径,未涉及实际光线的传播方向。若光线沿正方向

传播时取平稳值,成为可能的实际光线,则它沿逆方向原路返回时也应取平稳值,也是可能的实际光线。因此,由费马原理可以很自然地得出光线的可逆性原理。

3) 由费马原理推导折射定律

如图 1.8 所示,平面 Σ 是折射率分别为 n_1 和 n_2 的各向同性透明介质的分界面,从介质 1 中的点 Q 发出的光线透过分界面 Σ 后折射到介质 2 中的点 P 处。可以由费马原理出发推导出,从点 Q 发出,折射到点 P 的实际光线处于入射面内,且满足折射定律 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ 。

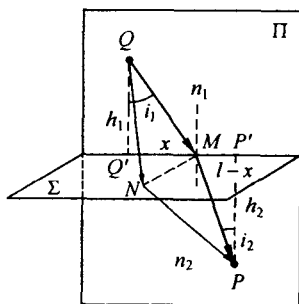


图 1.8 由费马原理推导折射定律

由点 Q 和点 P 作平面 Σ 的垂线 QQ' 和 PP' , 高度分别为 h_1 和 h_2 , 两平行垂线构成平面 Π , 平面 Π 与平面 Σ 的垂直交线为 $Q'P'$, 设 Q' 、 P' 两点间的距离为 l , 在交线上任取一点 M , 将 l 分割成如图 1.8 所示的 x 和 $l-x$ 两段, 连接直线 QM 和直线 PM , 直线 QQ' 与直线 QM 的夹角为 i_1 , 直线 PP' 与直线 PM 的夹角为 i_2 。过点 M 在平面 Σ 上作两平面交线的垂线 NM , 连接直线 QN 和直线 PN 。由直角三角形 $\triangle QNM$ 和 $\triangle PNM$ 的斜边大于直角边可知, 平面 Π 外的任意一条可能光线 QNP 的光程总是大于平面 Π 上的相应可能光线 QMP 的光程。由此可以断定, 实际的入射和折射光线一定位于平面 Π 内, 称平面 Π 为入射面。然后计算在入射面 Π 内从点 Q 发出经分界面 Σ 折射到点 P 的光线 QMP 的光程, 可得

$$L(QMP) = n_1 \overline{QM} + n_2 \overline{MP} = n_1 \sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}$$

$$\frac{d}{dx} L(QMP) = \frac{n_1 x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{n_2 (l-x)}{\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} = n_1 \sin i_1 - n_2 \sin i_2 = 0$$

即 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ 。仿照上面的推导过程, 也可以由费马原理推导出光的反射定律。

1.3 成像的概念

1. 同心光束

若一束光线中的各条光线或其延长线相交于一点, 则称此光束为同心光束, 交点称为

同心光束的中心。有会聚和发散两类同心光束,其交点分别称为会聚中心和发散中心。图 1.9 中的点 Q 是发散或会聚同心光束的中心,发出一束会聚或发散的同心光束。在各向同性介质中,从点光源发出的光束就是一束同心光束;平行光束也是同心光束,只是它的中心位于无穷远处。

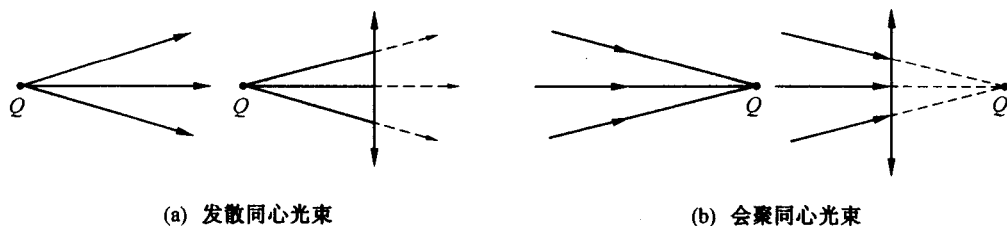


图 1.9 同心光束

2. 共轴理想球面光学系统的成像

若干个折射球面和反射球面的组合称为球面光学系统,能保持光束同心性的球面光学系统称为理想球面光学系统。

由球心在同一条直线上的若干个折射球面和反射球面组成的理想球面光学系统称为共轴理想球面光学系统,简称为理想光学系统,该直线称为光轴。

入射到理想光学系统上的同心光束通过系统后转化成出射同心光束的过程称为成像。

在单球面成像系统或由两个单球面组成的薄透镜成像系统中,只有傍轴(或称为近轴)光束成像才能近似保持光束的同心性。因此,共轴理想球面光学系统的成像是傍轴条件下的近似成像。

3. 物与像

在共轴理想球面光学系统中,入射同心光束的中心称为物点,出射同心光束的中心称为像点。

物点和像点都有虚实之分,不同类型的物点与像点的成像如图 1.10 所示。若入射到理想光学系统的同心光束是发散的,则称其发散中心为实物点,如图 1.10(a) 和(b) 中的点 Q 所示;若入射到理想光学系统的同心光束是会聚的,则称其会聚中心为虚物点,如图 1.10(c) 和(d) 中的点 Q 所示。图中通过理想光学系统会聚到虚物点的实际光线的延长线用虚线表示。

若从理想光学系统出射的同心光束是会聚的,则称其会聚中心为实像点,如图 1.10(a) 和(c) 中的点 Q' 所示;若从理想光学系统出射的同心光束是发散的,则称其发散中心为虚像点,如图 1.10(b) 和(d) 中的点 Q' 所示。