光　　学

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1

光 学 导 言

1.1 光学发展简史
1.2 波动的数学描述
1.3 费马原理

1.1 光学发展简史

- 光学的早期发展
- 微粒说
- 波动说　惠更斯原理
- 波动说的决定性胜利
- 光学的现代发展

●光学的早期发展

光学是物理学的重要分支.人们很早就开始研究那些能够引起视觉反应的现象，这种能引起视觉反应的事物就称为光.如今的光学研究对象和范围有了很大的扩充，它不是仅限于研究人眼可感知的可见光,而是研究包括微波、红外线、可见光、紫外线直到 X 射线的整个电磁波谱范围，研究它们的传播以及与物质的相互作用，其中涉及到的一个基本问题是:"光是什么?""光的本性是什么?"

光学的研究可追溯到 2000 年前.约在公元前 400 多年,中国的《墨经》记载了世界上最早的光学实验以及所获得的关于影、针孔成像和镜面成像的知识.差不多相同的时期，西方也有一些光学研究，公元前 300 年，希腊欧几里得的《反射光学》已有光的直线传播性和反射定律的叙述.

到 17 世纪，光学才有了真正的发展.1621 年斯涅耳发现光的折射定律，与早先已经发现的光的直线传播定律和反射定律一起构成几何光学的基础，使得稍早发明的望远镜、显微镜等光学仪器有了长

足的发展，并开拓了日益广泛的应用.此时，关于光的本性形成了两种激烈争论的对立的学说，一种是以牛顿为代表的微粒说，另一种是以惠更斯为代表的波动说.

● 微粒说

以牛顿为代表的微粒说认为光是由微粒组成的，这些光微粒与普通的实物小球一样遵从相同的力学规律.微粒说可以很好地说明光的直线传播和反射定律.光线在平面镜上的反射同小球与硬壁的碰撞相同，光微粒速度沿界面的分量在反射前后保持不变，而沿垂直界面的分量在反射前后保持大小不变,方向逆反.这样很容易得出光反射时反射角等于入射角.

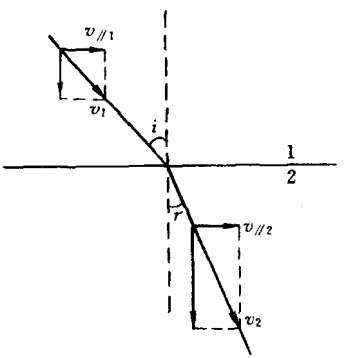


图 1-1 微粒说对折射定律的说明

微粒说对于折射定律的说明采用了相同的条件，认为微粒速度沿界面的分量在折射前后保持不变，而微粒通过界面时由于受到阻滞或相反的效应，速度由 v_1 变为 v_2,如图 1-1 所示.由于

$$v_{//1} = v_{//2},$$

于是

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_{//1}/v_1}{v_{//2}/v_2} = \frac{v_2}{v_1}. \tag{1.1}$$

这表明入射角 i 的正弦与折射角 r 的正弦之比与入射角无关，仅仅取决于光微粒在两种介质中的速度之比，这正是折射定律.

根据(1.1)式，光在光疏介质中的速度小于光密介质中的速度，例如，光从空气射向水是从光疏介质射向光密介质，入射角 i 大于折射角 r，则光在空气中的速度小于光在水中的速度.

● 波动说　惠更斯原理

以惠更斯 (C. Huygens) 为代表的波动说认为光和声一样是一种波动.1690 年惠更斯提出了一个波传播的一般原理，现在称为惠更

斯原理：波到达的任意点都可以看作新的振动中心，它们发出球面次波，这些次波的包络面就是新的波面.运用惠更斯原理，通过几何作图，容易说明光在各向同性的均匀介质中直线传播，如图 1-2 所示.

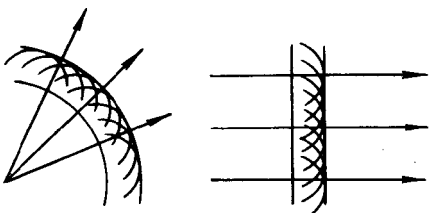


图 1-2　球面波和平面波的传播

波动说关于光在两种介质界面上的反射简要说明如下.如图 1-3 所示，在各向同性均匀介质中，斜入射向界面的波到达界面 AC 是不同时的，一边的波到达 A 点，另一边的波才到达 B 点,随着时间的推移，在界面上从左到右，波依次先后到达.依照惠更斯原理，

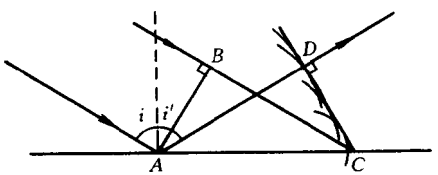


图 1-3　波动说对反射定律的说明

界面上各点振动中心发出的次波的半径是不同的，波先到达的点发出的次波较大，后到达的点发出的次波较小.由于在同一种介质中波传播的速度相同，因此当波从 B 点传播到 C 点时，A 点反射发出的次波的半径已为 AD,而且 $AD=BC$. 这些大小不一的次波的包络面是 CD,反射光线则为 AD.从图中容易看出

$$\triangle ABC \cong \triangle ADC,$$

所以

$$\angle BAC = \angle DCA,$$

而

$$i = \angle BAC, \quad i' = \angle DCA.$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

因此,反射角等于入射角

$$i' = i.$$

波动说关于光在两种介质界面上的折射亦可简要说明如下.如图 1-4 所示，设波在两种介质中的波速分别为 v_1 和 v_2,与上面同样的考虑，斜射向界面的波到达界面的时间先后不一，它们发出的次波大小不同，它们的包络面是 CD,折射光线则是 AD,于是

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \angle BAC}{\sin \angle ACD} = \frac{BC/AC}{AD/AC} = \frac{BC}{AD} = \frac{v_1}{v_2}^{①}. \qquad (1.2)$$

同样得出，入射角的正弦与折射角的正弦之比仅仅取决于波在两种介质中的速度之比，与入射角无关.但是波动说得出的速度比与微粒说得出的速度比是相反的.根据(1.2)式，光在光疏介质中的速度大于光密介质中的速度，例如光在空气中的速度大于光在水中的速度.当时两种学说争论得颇为激烈，在那个年代还不可能作出实验判决谁是谁非.由于牛顿的权威，光的微粒说颇占优势，占据着统治地位.

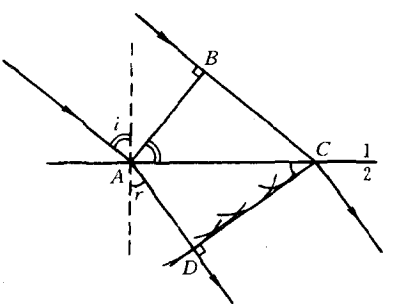


图 1-4　波动说对折射定律的说明

- **波动说的决定性胜利**

1801 年医生出身的英国物理学家杨氏（T. Young）发展了惠更

①考虑光由真空射向某种介质，光在真空中的传播速度 $v_1 = c$,光在介质中的传播速度 $v_2 = v$,由此,$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v}$,而折射的实验定律 $\frac{\sin i}{\sin r} = n$，$n$ 为介质的折射率,因此 $\frac{c}{v} = n$ 或 $v = \frac{c}{n}$.这是介质中光速与真空中光速的基本关系.

斯的波动学说,他做了一个著名的光的双缝实验,并且用他提出的干涉原理很好地说明了双缝干涉实验中观察到的强度周期性分布，为光的波动说的发展奠定了基础. 1818 年法国的菲涅耳（A. J. Fresnel）将杨氏的干涉原理和惠更斯原理结合起来，提出惠更斯-菲涅耳原理，完满地解释了早在 1665 年发现而微粒说一直无法说明的光的衍射现象，光的波动说从此蓬勃地发展起来. 1850 年法国物理学家傅科（J. B. L. Foucault ）实验测得光在水中的传播速度为光在空气中速度的 3/4 ,无可怀疑地支持了光的波动说,这对于微粒说不多的支持者是一个致命的打击.

1865 年，英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立电磁场理论，并得出光是电磁横波，为光的波动说建立起更为坚实的理论基础.

- 光学的现代发展

19 世纪末发现了一些光的波动说不能说明的现象，如黑体辐射现象和光电效应等，人们在解释这些光和物质相互作用的现象时，认识到必须认为光具有粒子性 ,1900 年普朗克提出辐射的量子论，1905 年爱因斯坦则进一步提出光是由光子组成的、因此，光是既具有波动性又具有粒子性的客体，即光具有波粒二象性.光的粒子性决不是牛顿时代的微粒，而是遵从崭新量子规律的粒子，这一崭新的量子规律正是在对于光和原子现象的研究中逐渐认识到的. 另一方面，利用光现象探测地球绝对运动的失败引导狭义相对论的诞生，从而现代物理学中两个最重要的基础理论——量子力学和狭义相对论，都是在人类关于光的研究中诞生和发展的. 现代物理的发展反过来又推动光学的进展,1960 年发明的激光器就是量子理论下的产物. 激光具有极好的单色性、相干性、高亮度和良好的方向性，广开现代光学许多崭新研究领域,如傅里叶光学、全息术、非线性光学、光纤光学、集成光学等，推动现代科学技术迅猛发展.

本教程的光学部分主要介绍波动光学方面的内容，有关光的粒子性方面的内容则放在近代物理的量子物理部分，结合量子概念的诞生予以介绍.

为了适应讨论波动光学和近代物理的需要，下面对以前学过关于光和波动的知识作简要的回顾.

1.2 波动的数学描述

- 光波的波长和光强
- 波动的复数表示
- 简谐波的数学表达式

● 光波的波长和光强

麦克斯韦电磁理论的重要成果是存在电磁波，而且光是电磁波.光与无线电波、微波、X 射线、γ射线等其他电磁波无本质的不同，只是它们的波长范围不同.通常的可见光是指能引起人眼视觉反应的那部分电磁波，它在整个电磁波频谱范围中只占极窄的部分.在此间隔内不同波长（频率）的光波引起人眼的不同色觉.下表列出各种色光的大致波长范围和频率范围.

表 1.1 各种色光的波长范围和频率范围

色 光	波长范围/nm	频率范围/$\times 10^{14}$ Hz
红色光	640～750	4.69～4.00
橙色光	600～640	5.00～4.69
黄色光	550～600	5.45～5.00
绿色光	500～550	6.00～5.45
青色光	480～500	6.25～6.00
蓝色光	450～480	6.67～6.25
紫色光	400～450	7.50～6.67

电磁波在介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r \mu_r}},$$

式中 ε_0 是真空介电常数，μ_0 是真空磁导率，ε_r 是介质的相对介电常数，μ_r 是介质的相对磁导率.对于真空，$\varepsilon_r = 1$，$\mu_r = 1$，光在真空中的速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s},$$

于是，

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n}. \tag{1.3}$$

n 为该种介质的折射率. 介质中的光速等于真空中的光速除以介质的折射率，这一基本关系在惠更斯原理对于折射现象的说明中已经得到.

麦克斯韦电磁理论还指明电磁波是横波，变化的电场和磁场垂直于波的传播方向. 实验表明，是电场矢量 E 对光和物质发生作用引起多方面的效应，例如对人眼的感觉细胞起生理作用和对感光乳胶起化学作用的都是电场，因此通常所说的光波的光矢量就是指电场矢量.

任何波动过程都伴随着能量的传递。电磁波传递的是电磁场能量，用能流密度(坡印亭矢量)来描述，它表示单位时间内通过单位垂直面积的能量. 对于光波来说，它是一个随时间变化很快的量. 通常定义能流密度的时间平均值，即单位时间内通过单位垂直面积的平均能量，称为辐照度，简称光强. 对于简谐波计算表明光强 I 为

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\mu_0 \mu_r}} E_0^2, \tag{1.4}$$

式中 E_0 为电场矢量的振幅. (1.4)式表明，光强与电矢量振幅二次方成正比. 对于更一般类型的光波，光强与电矢量振幅平方成正比的关系仍然有效. 因此在以后的讨论中，我们常常就直接引用光强等于光振动振幅二次方的结论.

● 简谐波的数学表达式

一维简谐波的数学表达式为

$$\begin{aligned} U &= A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi\right] \\ &= A\cos(\omega t - kx + \varphi), \end{aligned} \tag{1.5}$$

式中 A 为振幅，是常数；ω 为角频率；v 为波速；φ 为 $t=0$ 时刻坐标原点的初相位. U 为作简谐振动的量，对于光波，U 为光矢量. 第二等式中的 $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ 称为波数. (1.5)式 k 前面为负号，成 kx 项与 ωt 项的符

号相反,表示的是向 x 正方向传播的波,沿 x 正方向随着 x 增大,相位逐次落后 若 k 前面为正号,或 kx 项与 ωt 项的符号相同,则表示的是向 x 负方向传播的波,沿 x 正方向随着 x 增大,相位逐次趋前.

简谐振动与旋转矢量有对应关系，利用这种对应关系容易计算简谐振动或简谐波的叠加，特别是计算振动方向相同频率相同的简谐波的叠加.

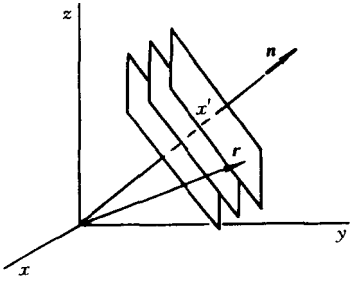


图 1-5 平面波

一维简谐波的表达式容易推广到三维情形. 三维平面波的波面（等相面）是一组平行平面族，它们垂直于波的传播方向，如图 1-5 所示. 设三维平面波沿 $\boldsymbol{n}$ 方向传播，$\boldsymbol{n}$ 为波传播方向的单位矢量. 设沿 $\boldsymbol{n}$ 方向的坐标为 x'，三维平面波的表达式可仿照一维简谐波写成

式中 A 为振幅,是常数,而 $t=0$ 时刻坐标原点的初相位 φ 设为零. 由于 $kx'=\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}$,其中 $\boldsymbol{k}$ 称为波矢，其大小等于波数，$k=\frac{2\pi}{\lambda}$,其方向为波传播方向,即 $\boldsymbol{k}=\frac{2\pi}{\lambda}\boldsymbol{n}$,因此,

$$\begin{aligned} U &= A\cos(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}) \\ &= A\cos[\omega t-(k_x x+k_y y+k_z z)], \end{aligned} \tag{1.6}$$

式中 k_x,k_y,k_z 分别为波矢在 x,y,z 轴上的分量.

与一维简谐波情形一样，当 $\boldsymbol{k}$ 前面为负号,或 $\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}$ 项与 ωt 项的符号相反时,(1.6)式表示向 $\boldsymbol{n}$ 正方向传播的波 当 $\boldsymbol{k}$ 前面为正号,或 $\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}$ 项与 ωt 项的符号相同,则表示向 $-\boldsymbol{n}$ 方向传播的波.

因此，只要给出平面波表达式的具体形式，就不难看出波的传播方向和传播速度.

球面波是波动的另一种简单的形式. 从点源发出的波在各向同性均匀介质中传播时，其波面是以点源为球心的同心球面族. 由于球面波的传播，随距离的增大，波动涉及的范围扩大，因此可以预料球

面波的振幅应该随距离增大而减小.根据能流密度概念,如图 1-6 所示,单位时间内通过球面 Σ_0 的能量为 $4\pi r_0^2 I_0 = 4\pi r_0^2 A_0^2$,式中 A_0 和 I_0 是 Σ_0 面上的振幅和相应的光强.同理,单位时间内通过球面 Σ 的能量为 $4\pi r^2 I = 4\pi r^2 A^2$,式中 A 和 I 是 Σ 面上的振幅和相应的光强.考虑到介质对波无吸收,由能量守恒定律可知有

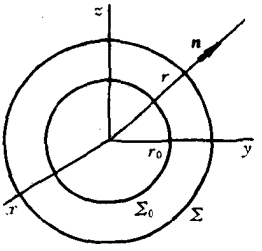


图 1-6 球面波

$$4\pi r^2 A^2 = 4\pi r_0^2 A_0^2.$$

即

$$A \propto \frac{1}{r}.$$

于是球面波的表达式可写成

$$\begin{aligned} U(r,t) &= A\cos(\omega t - kr) \\ &= \frac{A_0}{r}\cos(\omega t - kr). \end{aligned} \tag{1.7}$$

式中 A 是球面波传播到 r 处的振幅,A_0 是离波源单位距离处的振幅.

● 波动的复数表示

由于数学上复数的实部和虚部分别是 cos 函数和 sin 函数,

$$\tilde{U} = Ae^{i\alpha} = A(\cos\alpha + i\sin\alpha).$$

因此,振动和波与复数之间有一一对应的关系,

$$U = A\cos\omega t \longleftrightarrow \tilde{U} = Ae^{i\omega t}, \tag{1.8}$$

$$U = A\cos(\omega t - kx) \longleftrightarrow \tilde{U} = Ae^{i(\omega t - kx)}. \tag{1.9}$$

由此,可引入复数描述振动和波.复数的模为振动或波的振幅,复数的辐角是振动或波的相位,复数的实部为振动或波.

根据波的复数表示,当 k 前面的符号为负(或 kx 项与 ωt 项的符号相反)时,则波的复数形式表示向 x 正方向传播的波 当 k 前面的符号为正(或 kx 项与 ωt 项的符号相同)时,则表示向 x 负方向传播

需要全本请访问 www.ertongbook.com

的波.

引入振动和波的复数表示，常常可以使振动和波的计算简化.

1.3 费马原理

- 光程
- 费马原理
- 关于透镜物像等光程性的说明
- 费马原理的启迪

● 光程

费马(P. de Fermat)原理是普遍情形下光传播的一条高度概括的原理.它是用光程的概念来表述的.

如图 1-7 所示,考虑光由 Q 点沿着一条路径经过 m 种不同的均匀介质,到达 P 点,所经历的时间为

$$t=\frac{s_1}{v_1}+\frac{s_2}{v_2}+\cdots+\frac{s_m}{v_m}=\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i}{v_i},$$

式中 s_i 和 v_i 分别为光在第 i 种介质中的几何路程和速率. 由于 $v_i=c/n_i$,上式可写成

$$t=\frac{1}{c}\sum_{i=1}^{m}n_i s_i, \tag{1.10}$$

式中路程与相应折射率乘积之和称为光从 Q 到 P 的光程,用 L 表示

$$L=\sum_{i=1}^{}n_i s_i. \tag{1.11}$$

如果介质的折射率连续变化，上述求和化为积分，相应于几何路程的光程为

$$L=\int_Q^P n\mathrm{d}s. \tag{1.12}$$

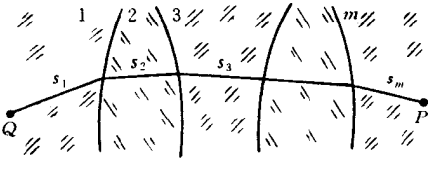


图 1-7 光程

由(1.10)式可以看出，一段路程的光程等于相同时间内光在真空中传播的距离.

● 费马原理

费马于 1657 年提出一条关于光传播的普遍原理，称为费马原理，它可表述为，光从空间一点传播到另一点是沿着光程为极值的路径传播的.具体地说就是把光传播的实际路径与其邻近的其他路径相比较，光的实际路径的光程为极小、极大或稳定值.根据费马原理可以导出几何光学的三条基本定律.

1. 导出直线传播定律

由于直线是两点间最短距离，因此由费马原理直接得出均匀介质中光沿直线传播.

2. 导出反射定律

如图 1-8,设两种介质的分界面是 Σ 平面,光从 Q 点经界面反射到达 P 点.过 Q 点和 P 点作一平面 Π 与界面 Σ 垂直,Π 平面即为入射面,它与 Σ 平面的交线为 OO'.考虑 OO' 线外的任意点 M',它到 OO' 的垂足为 M''.不难看出 $QM''<QM'$，$PM''<PM'$，因此相应 $QM''P$ 的光程要小于 $QM'P$ 的光程.可见，光程最短的路径应在 Π 平面内寻找，这表明实际的入射光线和反射光线都应在入射面内.

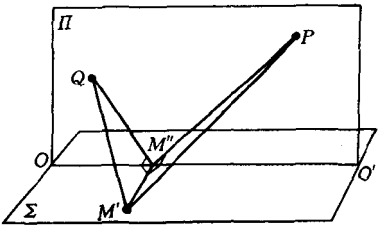


图 1-8 由费马原理推导反射定律 步骤

其次,如图 1-9 所示,画出 Π 平面内的情形,考虑由 Q 点出发经界面 Σ 反射到达 P 点的各种可能的光线.取 P 相对于界面 Σ 镜像对称点 P',由于对称性,从 Q 到 P 任意可能路径 $QM''P$ 的长度与 $QM''P'$ 相等.显然直线 QMP' 是其中最短的一条，从而 QMP 的长度

最短. 根据费马原理，QMP 是实际光线的路径. 从图中不难看出 $\angle MPP' = \angle MP'P$，而 $i = \angle MP'P$，$i' = \angle MPP'$，因此 $i' = i$.

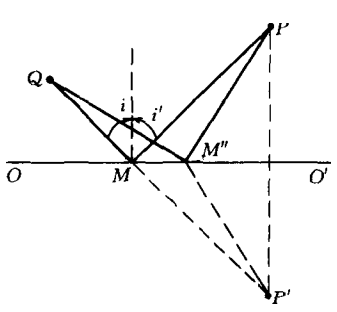


图 1-9　由费马原理推导反射定律　步骤 I

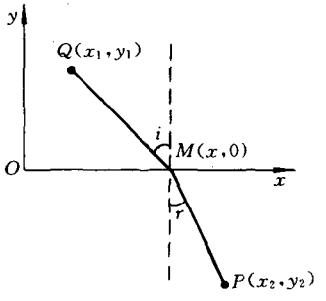


图 1-10　由费马原理推导折射定律

3. 导出折射定律

推导也分为两步，第一步证明光程最短的路径应在入射面 Π 内寻找，其证明方法与上相同，不再赘述. 第二步如图 1-10 所示，在 Π 平面内建立直角坐标系，Q 点的坐标为 (x_1, y_1)，P 点的坐标为 (x_2, y_2)，光在 M 点折射，M 点的坐标为 $(x, 0)$，则光从 Q 点到达 P 点的光程为

$$\begin{aligned} L &= n_1 \overline{QM} + n_2 \overline{MP} \\ &= n_1 \sqrt{y_1^2 + (x - x_1)^2} + n_2 \sqrt{y_2^2 + (x_2 - x)^2}. \end{aligned} \tag{1.13}$$

根据费马原理，光程取极值，则应有 L 对 x 的一阶导数为零，

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dx} &= n_1 \frac{x - x_1}{\sqrt{y_1^2 + (x - x_1)^2}} - n_2 \frac{x_2 - x}{\sqrt{y_2^2 + (x_2 - x)^2}} \\ &= n_1 \sin i - n_2 \sin r \\ &= 0, \end{aligned}$$

于是有

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r. \tag{1.14}$$

可见，满足费马原理的光线，必然遵从折射定律.

以上几种情形都是光程为极小值情形，费马最初提出原理也是指光程最小，所以他称之为最短光程原理，实际上光程为稳定值和极

大值的例子也是存在的.

- 关于透镜物像等光程性的说明

物光通过凸透镜成像就是光程为稳定值的例子. 从图 1-11 可以看出不同光线的几何路径的长度显然是不等的，但是考虑到折射率的因素，不同光线的光程可以是相等的. 进一步考虑，以光源 S 为球心作球面 abc，abc 显然是波面，同样以像点 S' 为球心作球面 $a'b'c'$，$a'b'c'$ 显然也是波面. 波面上各点的振动相位是相等的，因此光从 a 传播 a' 的时间与光从 b 传播到 b' 以及从 c 传播到 c' 的时间相等. 根据光程的性质，光从 a 传播到 a' 的光程与光从 b 传播到 b' 以及从 c 传播到 c' 的光程相等. 进一步可推论透镜成像中物点 S 和像点 S' 之间各光线的光程都相等，即透镜成像中物像间光程为稳定值，或者说透镜物像具有等光程性.

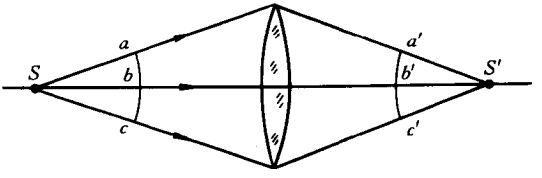


图 1-11　透镜物像的等光程性

透镜物像等光程性还包含以下两种情形，平行光截面上各点到透镜焦面上光的会聚点之间的光程相等，或者反过来，焦面上物点经过透镜到平行光截面上各点的光程相等，如图 1-12 所示.

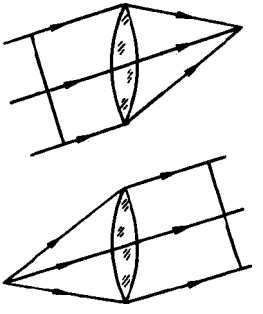


图 1-12　等光程性例了

此外,对于一个椭球面反射镜,从一个焦点发射出来的光经椭球面反射会聚于另一个焦点也是光程为稳定值的例子.

下面举一个光程为极大值的例子.如图 1-13 所示，在椭球面的位置放置一个与之内切的曲率较大的反射曲面，考虑从一

个焦点反射向另一个焦点的光线，显然只有在切点反射的光线是遵从反射角等于入射角的，是实际可能的光线，而其他经该反射面反射的光线的光程与之比较，这条光线的光程最长.

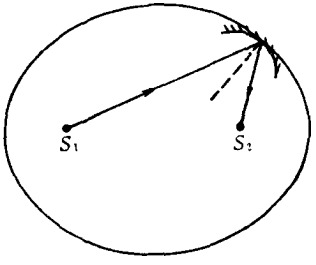


图 1-13　光程为极大值的例子

● 费马原理的启迪

费马原理对于物理学的发展曾经起过重要的推动作用，它表明关于光的传播规律还存在另外一种表述形式，它摆脱了光传播有如反射、折射、入射面、入射角、反射角、折射角等的一些细节，而是指明实际光线是各种可能的光线中满足某个条件，即光程取极值的那一条. 由于它比较抽象和含蓄，因而概括的面也就更广阔，这一点曾启发物理学家探索物理规律的其他形式，于是找到了被称之为最小作用原理（或哈密顿变分原理），它可表述为系统的各种相邻的经历中，真实经历使作用量取极值. 这种表述显然也是比较抽象而含蓄的，因而概括的面也比较广阔，不仅适用于机械运动场合，可以导出关于质点运动的牛顿第二定律；而且也适用于电磁场情形，可以导出电磁场的麦克斯韦方程组；甚至还可适用于其他场合，导出其他领域的基本定律. 它真可谓是综合整个物理学的真正的基本原理，物理学家们利用它来探索未知领域的基本定律.

习　题

1.1　频率为 4.5×10^{14} Hz 的红光在真空中的波长是多少？在折射率为 1.5 的玻璃中的速率是多大？

1.2　求频率为 4.9×10^{14} Hz 的光在水中的波长，水的折射率

$n=1.33$.光在水中传播了距离 $6\mu m$ 后，相位滞后了多少？

1.3 对眼睛最灵敏的光波($\lambda=5500$ Å)穿过厚度为 0.11 mm 的空气层时，在空气层厚度内包含多少个完整波形？同样的光波穿过同样厚度的熔凝石英片时，在石英片厚度范围内大约包含多少个完整的波形？熔凝石英的折射率 $n=1.46$.

1.4 一平面波在坐标原点的振动为 $U=A\cos\omega t$，波的传播方向与 x,y,z 轴的夹角分别为 $\alpha=60°,\beta=0,\gamma=30°$，空间一点 P 的坐标为$(10\lambda,3\lambda,6\sqrt{3}\lambda)$，$\lambda$ 为平面波的波长. 问 P 点的振动相位比坐标原点落后多少？

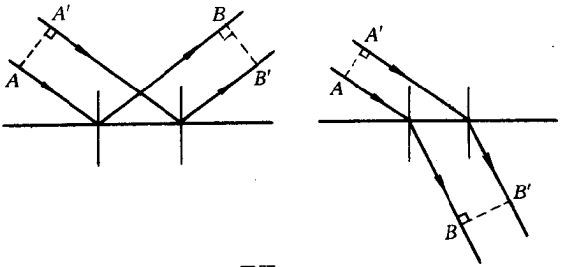
1.5 已知一平面波的波动表示式为

$$U=A\cos\left[\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x+\frac{1}{2}z\right)\right],$$

(1) 求该平面波传播方向与 x,y,z 轴的夹角；

(2)空间一点 $P(2\sqrt{3}\lambda,5\lambda,9\lambda)$ 的振动相位比原点落后多少？当原点振动的瞬时值是最大时，P 点的瞬时值等于多少？

1.6 试分别证明一束平行光在反射或折射时，AA'到 BB'之间各光线都是等光程的.



习题 1.6

需要全本请访问 www.ertongbook.com