

第一篇

應用光學

第一章 幾何光學基礎

- 1.1 幾何光學的基本定律
- 1.2 物像基本概念
- 1.3 球面和球面系統
- 1.4 平面與平面系統
- 1.5 光學材料

從本質上講，光是電磁波，它以波的形式傳播。這已為光的干涉、繞射和偏振等現象所證明。按照這種理論，光的傳播就是電磁波的傳播。但僅用波動的觀點來討論光經透鏡或光學系統的傳播規律和成像問題將會造成計算和處理上的很大困難，在解決實際的光學技術問題時應用不便。

按照近代物理的觀點，光具有波粒二像性。如果只考慮光的粒子性，把光源或物體看成是由許多幾何點組成，並把由這種點發出的光抽象成像幾何線一樣的光線，那麼，只要按照光線的傳播來研究這種點經光學系統的成像，問題就會變得非常簡便和實用。這種撇開光的波動本性，僅以光的粒子性為基礎來研究光的傳播和成像問題的光學學科分支稱為幾何光學。

幾何光學只是對真實情況的近似處理方法。儘管如此，按這種方法解決的有關光學系統的成像、設計和計算等光學技術問題，在大多數場合下都與實際情況相符。所以，幾何光學有很大的實用意義。

1.1 幾何光學的基本定律

1.1.1 發光點、光線和光束

1. 發光點

本身發光或被其他光源照明後發光的幾何點稱為發光點。當發光體（光源）的大小和其輻射作用距離相比可略去不計時，該發光體就可認為是發光點或點光源。在幾何光學中，發光點被抽象為一個既無體積又無大小而只有位置的幾何點，任何被成像的物體都是由無數個這樣的發光點所組成的。

2. 光線

發光體向四周發出的帶有輻射能量的幾何線條稱為光線。在幾何光學中，光線被抽象為既無直徑又無體積而只有位置和方向的幾何線，它的方向代表光能的傳播方向。物理光學認為，在各向同性介質中，光沿著波前的法線方向傳播，因此可以認為光波波前法線就是幾何光學中的光線。

3. 光束

光線的集合稱為光束。無限遠處發光點發出的是平面波，對應於平行光束；有限遠處發光點發出的是球面波，對應於會聚或發散光束；其光線既不相交於一點，又互不平行的光束稱為像散光束，如圖 1-1 所示。

幾何光學中的發光點、光線實際上是不存在的，只是一種假設。但是，利用它們可以把光學中複雜的能量傳輸和光學成像問題歸納為簡單的幾何運算問題，從而使所要處理的問題大為簡化。

1.1.2 幾何光學的基本定律

幾何光學理論把光的傳播歸結為四個基本定律：光的直線傳播定律、光的獨立傳播定律、反射定律和折射定律。這是我們研究光的傳播和成像的基礎。

1. 光的直線傳播定律

在各向同性的均勻介質中，光線按直線傳播，這就是光的直線傳播定律。它是一種普遍存在的現象。該定律可以很好地解釋影子的形成、日蝕、月蝕等現象，很多光學測量和光學儀器的應用也都以這一定律為基礎。但該定律並不是在所有場合都正確，當光路中放置很小的不透明的障礙物或是小孔時，光的傳播將偏離直線，這就是物理光學中所描述的光的繞射現象。可見，光的直線傳播定律只有光在均勻介質中無阻攔地傳播時才成立。

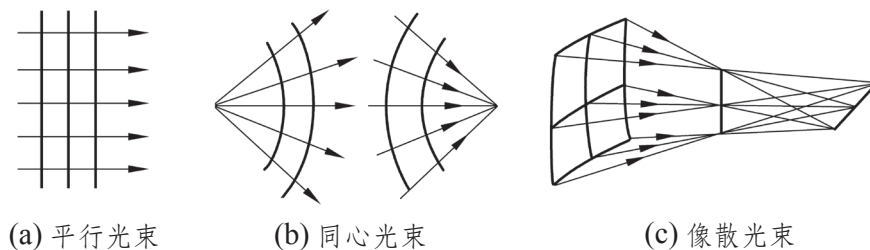


圖 1-1 各種光束

2. 光的獨立傳播定律

從不同光源發出的光線，以不同的方向通過空間某點時，彼此互不影響，各光線獨立傳播，這就是光的獨立傳播定律。利用此定律，我們對光線傳播的研究就可以大為簡化，因為研究某一光線傳播時，可不考慮其他光線的影響。

3. 光的反射定律和折射定律

當光傳播到兩種不同介質的理想光滑分介面時，繼續傳播的光線或返回原介質，或進入另一介質。前者稱為光的反射，後者稱為光的折射，其傳播的規律遵循反射定律和折射定律。一般而言，拋光的金屬鏡面為反射介面，兩種透明介質的光滑分介面為折射介面。

如圖 1-2 所示， PQ 表示兩種介質的光滑介面， AO 為入射光線，相應的 OC 為反射光線， OB 為折射光線， NN' 為介面上 O 點處的法線，入射光線和介面法線所構成的平面稱為入射面。按照角度符號法則的規定，入射角 $\angle AON$ 和折射角 $\angle BON'$ 均應以銳角來量度。由入射光線沿銳角轉向法線，順時針轉成的角為正，反之為負。習慣上入射角以 I 表示，折射角以 I' 表示，反射角以 I'' 表示。

反射定律和折射定律可分別描述如下。

反射定律：反射光線與入射光線和法線在同一平面內；入射光線與反射光線分別位於法線的兩側，與法線夾角大小相同。即

$$I = -I'' \quad (1-1)$$

折射定律：折射光線和入射光線與法線在同一平面內；折射角與入射角的正弦之比與入射角的大小無關，僅由兩介質的性質決定，當溫度、壓力和光線的波長一定時，其比值為一常數，等於前一介質與後一介質的折射率之比。即

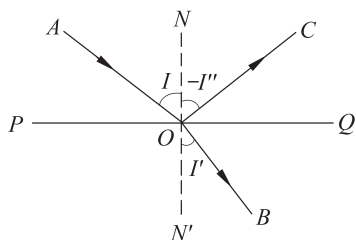


圖 1-2 光的反射與折射

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'} \quad (1-2)$$

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1-2')$$

其中 n 和 n' 分別是入射和折射介質的折射率。折射率是表徵透明介質光學性質的重要參數之一。我們知道，光在不同介質中的傳播速度各不相同，在真空中光速最快，以 c 表示。介質的折射率正是描述光在該介質中傳播速度 v 減慢程度的一個量，即

$$n = c/v$$

如果在式 (1-2) 中，令 $n' = -n$ ，則得 $I' = -I$ ，此即反射定律的形式。這表明，反射定律可以看作是折射定律的特殊情況。凡是由折射定律導得的所有適合於折射情況的公式，只要令 $n' = -n$ ，便可應用於反射的場合，直接導出其相應的公式。這在處理反射系統時有重要應用。

在圖 1-2 中，若光線自 C 點或 B 點投射到介面 O 點時，光線必沿 OA 方向射出，這說明光的傳播是可逆的，此即光路的可逆性。

1.1.3 全反射

一般情況下，光線射至透明介質的分介面時，將同時發生反射和折射現象。但在特定條件下，介面可將入射光線全部反射回去，而無折射現象，這就是光的全反射。

習慣上，我們把介面兩邊折射率較大的介質稱為光密介質，折射率較小的介質稱為光疏介質。當光線由光密介質進入光疏介質時， $n' < n$ ，由公式 $n \sin I = n' \sin I'$ ，可知 $I' > I$ ，折射光線較入射光線更偏離法線。如圖 1-3 所示，當逐漸增大入射角 I 到某一值時，折射角 I' 達 90° ，折射光線沿介面掠射而出。若繼續增大入射角，則有 $\sin I' > 1$ ，這是不可能的。實驗證明，這時光線不能折射入另一介質，而將按反射定律在介面上全部反射回原介質，這就出現了所謂的全反射現象。

對應於 $\sin I' = 1$ 的入射角 I_m 稱為臨界角，由式 (1-2) 可知：

$$\sin I_m = \frac{n'}{n}$$

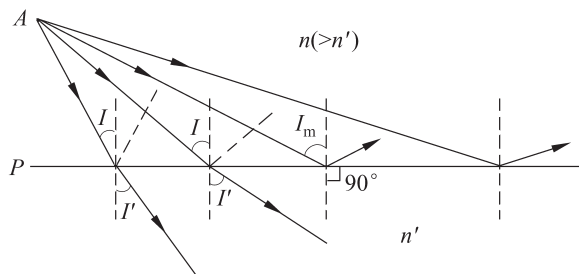


圖 1-3 全反射現象

全反射優於一切鏡面反射，因為鏡面的金屬鍍層對光有吸收作用，而全反射在理論上可使入射光的全部能量反射回原介質。因此全反射在光學儀器中有廣泛的應用。例如，在光學系統中，經常利用全反射稜鏡代替平面反射鏡，以減少光能的反射損失。光纖也是利用全反射原理來傳輸光的。光纖由高折射率的蕊子和低折射率的包層構成，使得入射角大於臨界角的光線能連續全反射，直至傳輸到光纖的另一端，從而保證能量損失非常小。

1.1.4 費馬原理

幾何光學的基本定律描述了光線的傳播規律。費馬原理則從光程的角度來闡述光的傳播規律，更簡明、更具普遍意義。

光程定義為光在介質中經過的幾何路程 s 和該介質折射率 n 的乘積，用字母 L 表示。由折射率的定義可知：

$$L = ns = \frac{c}{v} v \Delta t = c \Delta t \quad (1-3)$$

其中， n 為介質的折射率， c 為真空中的光速， v 為在均勻介質中光的傳播速度， Δt 為光在介質中經過幾何路程 s 所需的時間。可見，光在介質中的光程，即為該時間間隔 Δt 內，光在真空中所傳播的路程，所以也稱為折合路程。

費馬原理：光線從 A 點到 B 點，是沿著光程為極值的路徑傳播的。也就是說，光由 A 點到 B 點的傳播在幾何方面存在著無數條可能的路徑，每條路徑都

對應著一個光程值。根據費馬原理，實際光路所對應的光程，或者是所有光程可能值中的極小值，或者是所有光程可能值中的極大值，或者是某一穩定值。不失一般性，設光在非均勻介質中傳播，即介質的折射率 n 是位置的函數，則光在該介質中所經過的幾何路程不是直線而是一空間曲線，如圖 1-4 所示。這時，從 A 點到 B 點的總光程可用曲線積分來表示：

$$L = \int_A^B n(s) ds \quad (1-4)$$

其中， s 為路徑的座標參量， $n(s)$ 為路徑 AB 上 s 點處的折射率。

根據費馬原理，此光程應具極值。即式 (1-4) 微分為零：

$$\delta L = \delta \int_A^B n(s) ds = 0 \quad (1-5)$$

這就是費馬原理的數學運算式。

費馬原理描述了光線傳播的基本規律，無論是光的直線傳播定律，還是光的反射定律與折射定律，都可以利用費馬原理直接導出。比如，對於均勻介質，由兩點間的直線距離為最短這一定理，可以立即證明光的直線傳播定律。至於光的反射定律與折射定律，請讀者自行證明。

光在均勻介質中的直線傳播及在平面介面上的反射和折射，都是光程最短的例子。其實按費馬原理，光線也可能按光程極大的路程傳播，或按某一穩定值的路程傳播。如圖 1-5 所示，一個以 F 和 F' 為焦點的橢球反射面，按其性質可知，由 F 點發出的光線都被反射到 F' 點，其光程都相等，因為 $FMF' = FM + MF' = \text{常數}$ 。這是光程為穩定值的一個例子。如果另一反射鏡 PQ 和橢球相切於 M 點，鏡上其餘各點均在橢球內，則對橢球的兩個焦點 F 和 F' 來說， $(FM + MF')$ 對應於最大光程，即光按光程極大的路程傳播。對於反射鏡 ST ，則 $(FM + MF')$ 可對應最小光程。

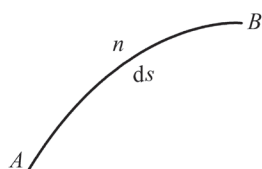


圖 1-4 光在非均勻介質中的幾何路程

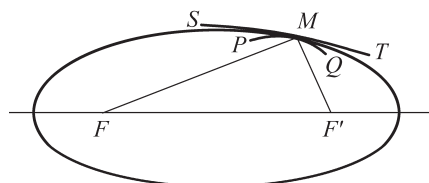


圖 1-5 光的極值傳播

1.2 物像基本概念

1.2.1 光學系統與完善像概念

光學系統的作用之一是對物體成像。光學系統由一系列的光學元件所組成，常見的光學零件有：透鏡、稜鏡、平行平板和反射鏡等，其截面圖如圖 1-6 所示。每個光學元件都是由一定折射率介質的球面、平面或非球面組成。如果光學系統的所有介面均為球面，則稱為球面光學系統。各球面球心位於一條直線上的球面光學系統，稱為共軸球面光學系統。連接各球心的直線稱為光軸，光軸與球面的交點稱為頂點。相應地，也有非共軸光學系統。由於大多數光學系統都是共軸光學系統，所以我們重點討論共軸光學系統。

一個被照明的物體（或自發光物體）總可以看成由無數多個發光點或物點組成，每一個物點發出一個球面波，與之對應的是一束以該物點為中心的同心光束。如果該球面波經過光學系統後仍為球面波，那麼對應的光束仍為同心光束，則稱該同心光束的中心為物點經光學系統所成的完善像點。物體上每個點經光學系統所成的完善像點的集合就是該物體經過光學系統後的完善像。

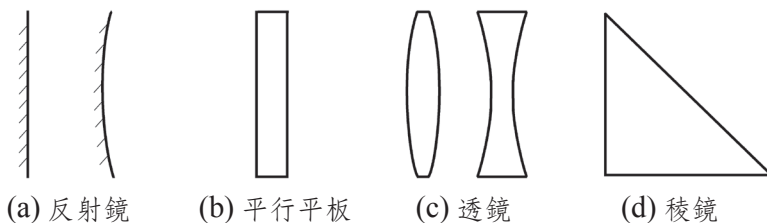


圖 1-6 光學零件

1.2.2 物和像的概念

在幾何光學中，物和像的概念是這樣規定的：把光學系統之入射線會聚點的集合或入射線之延長線會聚點的集合，稱為該系統的物；把相應之出射線會聚點的集合或出射線之延長線會聚點的集合，稱為該系統對物所成的像。

由實際光線會聚所成的點稱為實物點或實像點，由這樣的點構成的物或像稱為實物或實像。實像可以被眼睛或其他光能接收器（如照相底片、干板、螢幕等）所接收。

由實際光線的延長線會聚所成的物點或像點稱為虛物點或虛像點，由這樣的點構成的物或像稱為虛物或虛像。虛像可以被眼睛觀察，不能被其他光能接收器所接收。但可通過另一光學系統使虛像轉換成實像，從而被任何光能接收器接收。

物和像的概念具有相對性。在圖 1-7(a) 所示的光學系統中， A' 點既是物點又是像點。對光組 I 來說， A 是物點， A' 是像點；對光組 II 來說， A' 是物點， A'' 是像點。通常，對某一光組來說，當物體的位置固定後，總可以在一個相應的位置上找到物體所成的像。這種物像之間的對應關係在光學上稱之為共軛。共軛的概念反映了物像之間的對應關係。

在闡明了物像概念後，引入物像空間的概念。通常，把物體所存在的空間稱為物空間，把像所存在的空間稱為像空間。兩個空間是無限擴展的，並不是由光學系統的左邊或右邊簡單地分開的。在某些情況下，物空間和像空間分居於光組的兩側；在另外一些情況下，物空間和像空間的一部分重合，如圖 1-7(b)

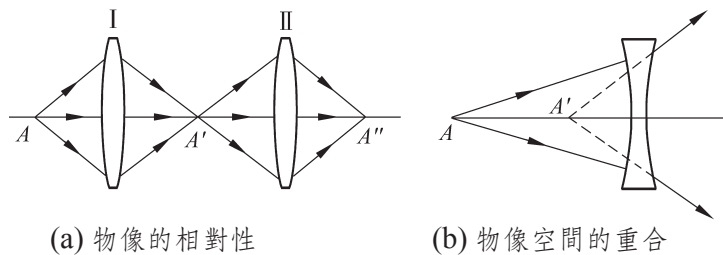


圖 1-7 物像關係