

顯 微 鏡

黃 源 編 著

人 民 衛 生 出 版 社

~~0-336~~
1851

~~50.99~~

~~0357~~

显 微 镜

黄 源 编 著

人 民 卫 生 出 版 社

一 九 六 〇 年 · 北 京

內 容 提 要

本書對於顯微鏡的各个方面作了比較詳細的介紹。首先，書中介紹了光的本質及其特性，進而闡述了反射鏡、透鏡的光學原理；其次，對於複式顯微鏡的光學系統、機械裝置、附件，顯微鏡的組合、使用與保管，都有比較詳盡的說明。此外，還敘述了光學系統以外的近代顯微鏡，如電子顯微鏡及超聲波顯微鏡等。

顯 微 鏡

開本：320×2468/32

印張： $\frac{6\frac{1}{2}}$

字數：167千字

黃 源 編 著

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版業營業許可證出字第〇四六號)

·北京崇文區琉璃廠胡同一三十六號·

北 京 市 印 刷 一 廠 印 刷

新華書店科技發行所發行·各地新華書店經售

統一書號：14048·1502

電 價：0.75 元

1958年7月第 一 版 一 第 1 次印刷

1967年2月第 1 版 一 第 2 次印刷

(北京版)印數：5004—5,000

前 言

科学發展到今天，显微镜已經成为不可缺少的重要工具之一了。不管是在工業、农業、矿冶、生物学和医学等各学术部門，都几乎不能离开显微镜而进行研究或进行日常工作。由于显微镜的發明，便突破了人类的天然生理限制，把视觉伸展到肉眼所不能見到的細小結構里去了。例如，鋼鉄的結構、土壤的排列、植物纖維的性狀、有机体的細胞組成和細菌的形态等，都得到了一定的了解。从此人們得以窺探自然界的秘密，把知識范围大大地扩展开来。今天医疗、农業和工矿等方面的偉大成就，是和显微镜的应用直接关連着的，所以显微镜的光学結構和机械裝置等，都随日益增長着的需要而不断地在發展，並且有逐漸脱离光学原理而进入电学和声学范疇的趋势；这一趋势在日益增長着，于是关于显微镜的發展、構造和种类等，对于一个科学工作者是所必須知道的常識。本書准备分：光学显微镜的原理、显微镜的結構及显微镜的种类三个方面，扼要的闡述有关要点。由于編者学識有限，自然会有許多錯誤，加以近年来科学的發展很快，新的發明和創造正与日俱新，而自己的見聞不广，勢必括一漏万。希望大家予以指正，这是我所衷心企望的。

編 者 識 1958年1月

目 录

前言

第一章 光、反射鏡、透鏡..... 1

一、光的本質..... 1

二、光的五个基本特性..... 2

三、反射鏡..... 9

(一)球面鏡的公式及其特性..... 9

(二)几何作圖求像法..... 12

(三)球面鏡的缺点和糾正法..... 13

四、透鏡..... 13

(一)像的形成与表示法..... 15

(二)透鏡的缺点与糾正方法..... 17

1. 像差..... 18

(1)球面像差..... 18

(2)彗形像差..... 18

(3)像散和像場弯曲..... 19

(4)畸变..... 20

(5)像差之矯正..... 21

2. 色差..... 23

(1)縱向色差和橫向色差..... 23

(2)色差的矯正..... 24

第二章 复式显微镜的光学系統..... 28

一、概論..... 28

二、聚光器..... 30

(一)明視野聚光器..... 31

(二)暗視野聚光器..... 34

三、接物鏡..... 38

(一)概述..... 38

(二)接物鏡的分类..... 40

(三)鏡口率..... 49

(四)鑑別率..... 53

四、接目鏡..... 56

(一)概述..... 56

(二)接目鏡的分类..... 57

1. 陽性接目鏡..... 57

2. 陰性接目鏡..... 58

3. 補正接目鏡..... 59

4. 其他种类接目鏡..... 60

第三章 复式显微镜的机械裝置..... 64

一、鏡脚及鏡柱..... 64

二、鏡臂..... 65

三、鏡筒..... 66

四、抽筒..... 66

五、轉換器..... 67

六、接物鏡管..... 68

七、接目鏡管..... 69

八、鏡筒附着器与大調節器..... 70

九、小調節器..... 71

十、鏡台附着器..... 73

十一、鏡台..... 73

十二、聚光器支架..... 75

十三、机械移动器..... 76

第四章 复式显微镜的組合、用法与保管..... 79

一、光学結構与机械裝置的配合..... 79

二、眼和显微镜的关系..... 82

三、顯微鏡放大倍數的計算法	85
四、複式顯微鏡的有效放大率	89
五、複式顯微鏡的使用法	91
(一)標本檢查	91
(二)放映與描繪	95
(三)攝影	98
六、複式顯微鏡的保管	103
第五章 顯微鏡的附件	106
一、人工光源	106
二、濾光裝置	108
三、測微器	114
四、血球計算器	118
五、描繪器	121
六、攝影器	123
七、保溫器與冷卻器	124
八、標記器	127
九、旋轉封裝器	127
十、厚度測量器	127
十一、鏡口率測量計	127
十二、校正度測量計	128
十三、顯微解剖器	128
十四、石英桿集光器	133
第六章 顯微鏡的種類	136
一、光學顯微鏡	136

一、折射式顯微鏡	136
(一)單式顯微鏡	136
1. 擴大鏡	136
2. 解剖鏡	139
3. 稜鏡雙目鏡	142
二、複式顯微鏡	142
(一)萬能式研究顯微鏡	143
(二)大號研究用顯微鏡	146
(三)中號研究用顯微鏡	147
(四)教學用顯微鏡	147
(五)旅行顯微鏡	149
三、特種用途複式顯微鏡	149
(一)限外顯微鏡	150
(二)螢光顯微鏡	151
(三)離心顯微鏡	157
(四)比較顯微鏡	157
(五)落射顯微鏡	157
(六)極化顯微鏡	160
(七)相差顯微鏡	166
(八)攝影顯微鏡	173
(九)讀數顯微鏡	175
四、反射式顯微鏡	175
非光學顯微鏡	178
一、電子顯微鏡	178
二、超聲波顯微鏡	193
附錄 顯微鏡的簡史	198

第一章 光、反射鏡、透鏡

要了解顯微鏡，首先應該知道一些關於光學的基本知識，例如光的性質、反射鏡和透鏡的特點以及它們成像的情況等。因為這些知識都與顯微鏡有著密切的關係，物理學的光學大部份是研究光的性質、傳播和反射鏡與透鏡的成像等問題，所以本書擬先將這些基本理論作一簡要的概述。

一、光的本質 要給光下一個明確的定義，是比較困難的。萬有引力的發現者牛頓(Isaac Newton 1642—1727)創有微粒說，他相信光是由一連串無數極其細微的質點所組成，從發光體上以驚人的高速射發出去。荷蘭物理學家海根斯(Christian Huygens)于1670年另創光的波動說，後來又經蘇格蘭物理學家馬可史威爾(Clerk Maxwell)于1873年從實驗振盪電路中得到電磁波，它的傳播速度和光相等，便予以發展而成為電磁波的學說。他認為光只是一種電磁波，也屬於橫波型，有巨大的高速從發光體向空間傳播。但經典的電磁波學說不能解釋光電放射現象，即當光投射到導體表面而有電子被沖擊出來的現象。1905年愛因斯坦(Einstein)擴充了1900年卜郎克(Planck)所引導的觀念而創立光子說或量子論。它假設光線中的能量，不是分佈于電磁波的电場和磁場所在的空間里，而是集中於許多小包或光子中，即所謂量子。因此波動說只有極少部份被保留下來，那就是仍然承認光子有一定的頻率，以及光子的能量和它的頻率成正比。光電效应的機能和愛因斯坦所提出的公式完全符合。

關於光的光子性質還可從康普頓(A. H. Compton)氏效應得到明証。他于1921年測定光子和一個電子碰撞前后的運動時，發現它們的行為和實質完全一樣，具有動能和動量，且兩者在碰撞過程中都保持恆量。光電效應和康普頓效應兩者似乎都要求恢復光的微粒說。

在顯然的實驗矛盾面前，物理學家在目前的立場，是承認了光所表現的雙重性這一實事，即光的傳播用電磁波學說最易解釋，而

光和物質在放射和吸收過程中的互相作用，則是一種微粒現象。物質的波動性和能量的顆粒性，已成為近代物理學的理論基礎，也就是說物質和能量都是具有二重性的。

根據上面所說的情況看來，我們可以說光是能量的一種表現形式。所以有人說它是一種輻射能，正如同熱和無線電波是一樣的，它在真空中以每秒三十萬公里的高速傳播着。光通常都以直線進行，但它能受萬有引力的影響而彎曲，例如星光經過太陽附近時便稍稍折向太陽，因而常使我們產生對星球位置的錯覺。

光既然是一種能量，所以它能做功，例如它能使一個小輪軸旋轉（圖1-1）。

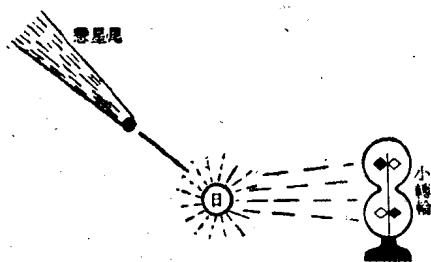


圖 1-1

當慧星受到太陽光的射擊時，便留下一條很長的尾巴。

光電效應也是光能做功的好例子，有聲電影上的光電管以及現代許多自動化的設備都是利用了光的這種本領才能實現的。例如攝影時

用以決定曝光時間的曝光計也是光電效應的直接應用。光能作功還表現在另一面，那就是攝影用的感光底片和感光紙，它能改變底片上的化學成份和若干化學性質。它能使已經處於離子狀態的溴化銀或氯化銀中的銀離子還原，而使溴或氯還原成氣體。正由於有這種效應，所以我們的攝影術才得以發展。光不僅是對溴化銀或氯化銀有這種影響，即對其他許多化合物和顏料都有影響，如對过氧化氫分解或普通的水和氧，蟻醛液氧化為蟻酸等，便是顯例。至於顏料（如花布或有色紙）經過光線照射之後而引起褪色，已是眾人皆知的事實了。

二、光的五個基本特性 上面所談的這些光的性質，都將與本書提到的一些問題有間接關係；但是與本書內容發生直接關係的，還有光的五種特性，現在分述如下：

（一）光是一種不連續體——它似乎是一束放射物，主張微粒

說的牛頓認為光是由許多獨立的小質點所組成，很像從機關槍里射發出來的子彈羣。我們所說的光之射線，實為光粒子所經過的道路（軌跡），故非連續體。至於持波動說的海根斯，他解釋光的波型，正像長江里的水波，是後浪推前浪，一個跟着一個地前進着，所以也不是連續體。這種不連續性在解釋光的功能時非常重要，因此光的性質似乎既合牛頓所說的獨立小質點，又合乎海根斯的波動說，後者實為較通俗而常被應用的學說。本書的絕大部份都是採用馬可史威爾的電磁波學說，並且都假定光是從左向右傳播的；若是上下方向，則假定光是從下向上傳播的。今假定有一束光從左向右傳播，則在整個波列中有同一的電向量與紙面平行作上下的振動，同時另有一磁向量垂直於紙面而作前后的振動，所以電向量與磁向量是互相垂直，而兩者又都與傳播的方向垂直（圖 1-2）。光在空間（真空）以每秒三十萬公里（300,000 km，實為 299,950 km）的高速以直線向各方面發射，唯當它遇到密度較大的物體如水或玻璃等，則速度便相應地減小。

（二）自然光（主要指來自太陽的可見光）看起來雖呈白色，但它却是由紅、橙、黃、綠、青、藍、紫等七種光素所組成，各個光素有它自己的波長，有它自己的屈折率，但速度則都彼此相等。所謂波長，是指一列光波中鄰近兩相似點間的距離。水的波

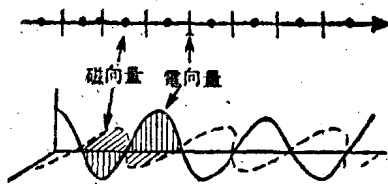


圖 1-2 電磁波之傳播

箭頭表示傳播的方向；圓點表示磁向量，垂直於紙面；直線表示電向量，與紙面平行。

長很大，可以設法測量它的幅度，並且肉眼很容易察覺到；但是光波的長度是無法測量的，因為它太小了。光波的長度只是將週波數除速度推算出來的，這結果只是一個概念而已。所謂波頂、波谷這些名詞，對光波來說並沒有任何意義，它只是利用速度、週波率（頻率）和波長三者的關係推求出來的。即：

$$\text{速度} = \text{頻率} \times \text{波長} \quad \text{波長} = \frac{\text{速度}}{\text{頻率}} \text{ 或, } \text{頻率} = \frac{\text{速度}}{\text{波長}}$$

光的波長既然小到只有一个概念，很显然便不能用一般的長度單位去量它，也不能用一般的長度單位来表示它，而是用一种特殊的長度單位来表示的，那就是“埃”(Å)。每一埃等于万万分之一厘米($\frac{1}{100,000,000}$ cm)，或千万分之一毫米($\frac{1}{10,000,000}$ mm)。十埃叫做一个毫微米(millimicron)，即每一埃等于十分之一毫微米($\text{Å} = \frac{1}{10} \text{m}\mu$)；而一千个毫微米才等于一个微米(micron μ)；每一微米則又只為千分之一毫米(millimeter mm)，現將四者的相当值列表于下，以便推算时互換。

埃(Å) (Ångström)	毫微米(mμ) (millimicron)	微米(μ) (micron)	毫米(mm) (millimeter)
0.01	0.001	0.0,000,001	0.000,000,001
1	0.1	0.00,001	0.0,000,001
10	1	0.001	0:00,001
10,000	1,000	1	0.001
10,000,000	1,000,000	1,000	1

現在將已經求得的可見光中，各光素的波長列表于下：

光素	Å	μ
最長的可見紅色光	7,700	0.77
紅光	6,800	0.68
橙光	6,500	0.65
黃光	5,700	0.57
綠光	5,200	0.52
青光	4,800	0.48
藍光	4,500	0.45
紫光	4,000	0.40
最短可見紫光	3,800	0.38

不过，这七种光素在自然光里面並不是均等地混合的，而是黄色光和綠色光兩者的成份最多。因此，人眼在适应这种环境的情况之下，故对黄色光和綠色光兩者很敏感，其中尤以綠色光最灵敏。在一般情况下，我們說自然光波的波長為 5,000 Å，即 0.5 μ，这实在是七种光素波長的平均值而言，約与綠色光的波長相接近。

此外，还有一事必須指出，即每一光素之波長也並不是絕對的，而是在其光素的領域之内，还有各种不同長度的波長同时存

在。因此每一光素仍然还是一种混合波，正像海里的大浪上还有各式各样的小波一样。例如，紅色光波这一領域中便有从 6500 埃至 7700 埃各种各样波長的紅色光，其他各光素也是同样情形，各光素所含的能量是与其波長成反比的，即波長愈長則所含的能量較小，如紅色光波是；反之，波長愈短者則所含能量較大，如紫色光波是，这一点也是我們應該注意的。

同时我們还应该知道，自然光只是宇宙間輻射能的一个極小部份，其余絕大部份都是不能为我們的感官所察覺的，列表于下：

波長(厘米)	射線种类	頻率(秒)
10^{11} 100,000,000,000	} 电波	10^{-1}
10^{10} 10,000,000,000		10^0
10^9 1,000,000,000		10^1
10^8 100,000,000		10^2
10^7 10,000,000		10^3
10^6 1,000,000		10^4
10^5 100,000..... 1km	} 無線电波	10^5
10^4 10,000		10^6
10^3 1,000		10^7
10^2 100		10^8
10^1 10		10^9
10^0 1..... 1cm		10^{10}
10^{-1} 0.1..... 1mm	10^{11}	
10^{-2} 0.01	10^{12}	
10^{-3} 0.001..... 紅外線	10^{13}	
10^{-4} 0.0001..... 1 μ	} 可見光波	10^{14}
10^{-5} 0.00,001		10^{15}
10^{-6} 0.000,001..... 紫外線	10^{16}	
10^{-7} 0.0,000,001..... 1m μ	} X射線	10^{17}
10^{-8} 0.00,000,001..... 1 μ		10^{18}
10^{-9} 0.000,000,001..... 射線	10^{19}	
10^{-10} 0.000,000,001..... 1m μ	10^{20}	
10^{-11} 0.00,000,000,001..... 1X	} 宇宙射線	10^{21}
10^{-12} 0.000,000,000,001		10^{22}

(三) 前面說过，光綫在空間傳播时，是以直綫进行的，但当它遇到障碍物体时，則一部份为該物体所吸收，而另一部份則依反射定律而反射；以一假想綫垂直于光綫所落射之处作为法綫，于是

入射光綫与法綫所成的入射角 i ，將与反射綫和法綫所成的反射角 B 恒相等(圖 1-3)。

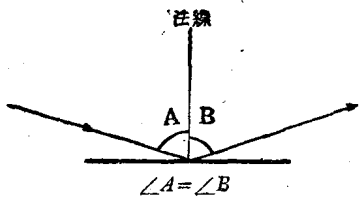


圖 1-3

(四) 当光在空間傳播时，是以每秒約三十万公里的高速进行的，但如遇到密度較大的物質时，則速度減慢。又如从一介質进入另一介質时，則光綫便分为兩支，

一支依反射定律回入原介質，而另一部份則依折射(屈折)定律而进入另一介質。如新介質之密度大于原介質者，則折向法綫；反之，即离开法綫。今假定有一束光綫，从一片玻璃的左方射入(圖 1-4)。

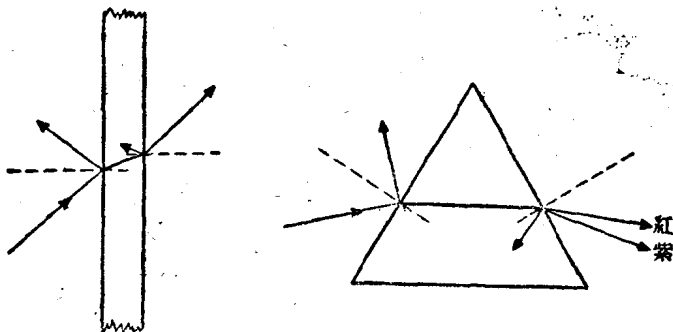


圖 1-4

然后經過玻璃的右面又进入空气，于是这一光束就連續地屈折了兩次。第一次是屈向法綫，第二次是离开法綫。原因是玻璃的密度要比空气大些，所以光在經過它时速度就減慢了，便向法綫而屈折。同样，当一束光通过三稜鏡时也引起屈折，而且按照法綫原則，光束总是屈向稜鏡的底部，至于光束屈折的程度，則須看稜鏡的形狀和它的密度来决定。又因任何一束光是由七种光素所組成的，而且各光素的屈折率彼此不同，波長愈短者屈折率愈大，稜鏡的厚薄既不一致，如是便將光束分散成为原来七种不同的光素(色散現象)名为光譜。故当自然光通过稜鏡之后，就再也不是白

光了，並且發現光譜的中段最亮，即黃綠光最多的地方；兩端則逐漸暗淡下去。如仔細觀察，則這七種光素的界限並不明顯地分開，而是彼此連續的，逐漸由一種光素過渡到另一種光素，這現象稱為連續光譜。但如光譜散佈得愈廣，則各光素的區別就愈明顯，可是始終是連續的。

(五) 光的繞射現象：所謂光的繞射，是指光波能繞過障礙物的能力而繼續向前傳播的現象。其實這種能夠繞過障礙物的本領，是任何波動的一種基本特性。所以我們先來看一下水波對於障礙物的情形，也就可以了解光波的繞射現象了。水波在傳播途中，若是遇到了比它的波長大得多的礁石或船舶，便都粉碎為浪花而消失，而在礁石或船舶的後面變成平靜的水面，再也沒有波浪了。可是，如果水波所遇到的不是礁石或船舶，而是細小的竹竿或一根蘆葦，它們的管徑都比水波的波長小得多，則水波便會很容易地繞過竹竿或蘆葦而繼續向前傳播，波形沒有絲毫損壞，就好像沒有碰得任何障礙似的。波能夠繞過比它的波長小的物體而繼續向前傳播的現象，便是繞射現象。光既然是一種波，所以也同樣有繞過障礙物的本領。前面說過，可見的光波是非常小的，平均只有 0.5μ ，所以當它碰到一些我們肉眼可見的塵粒時，仍然是很大的物體，所以光波碰到了它們便被阻擋住了，而在它們的另一面便會留下一個很清楚的影子。但是，如果粒子愈來愈小，以至小於光的波長，於是繞射現象就開始出現，若粒子小於光的波長很多，光就很容易繞過它而繼續前進，粒子也就失去了影子。換句話說，就是粒子成為不能為我們所察見的東西了。物體所以能被我們察覺，是由于彼此之間有着明暗度的差別所顯現出來的（即對比度）。差別愈大，就看得愈清楚，現在粒子失去了影子，也就是沒有明暗上的差別了，所以無法識別出來。物理學證明，當粒子約等於光的波長一半時，光波就完全很容易地繞過它而不留下任何可見的影子。正由於這一現象，便限制了光學顯微鏡的前途，詳細情形留待以後再詳細加以討論。

光的繞射現象還表現在另一方面，即當一束光通過一個小孔、細縫或越過某物的銳利邊緣之後，再落射到屏幕上，首先看到光因

有繞過障礙物的本領，所以在孔縫或銳緣的邊緣處都彎曲而向外擴展開來，所以在屏幕上的景像要比孔縫的本形大得多；其次，可看到景像的亮度中央最亮，向四周則逐漸暗淡下去，而景像之外緣顯出一環有色光帶，紅色光在最外，紫色光在內環，形成一環短的光譜。因為當光從孔或縫處擴展開了之後，再落到屏幕上，中央部份距離孔縫最近，如圖 1-5 甲之 $OP = r$ ，今假定以 O 為中心，畫半徑等於 $r + \lambda/2, r + \lambda, r + 3\lambda/2$ 等等圓錐，則此等圓錐之底與屏幕相交，成為以 P 為圓心的同心圓，如圖 1-5 乙。連續兩圓間之面積名為半周期帶，圖中 λ 為光波之長度。

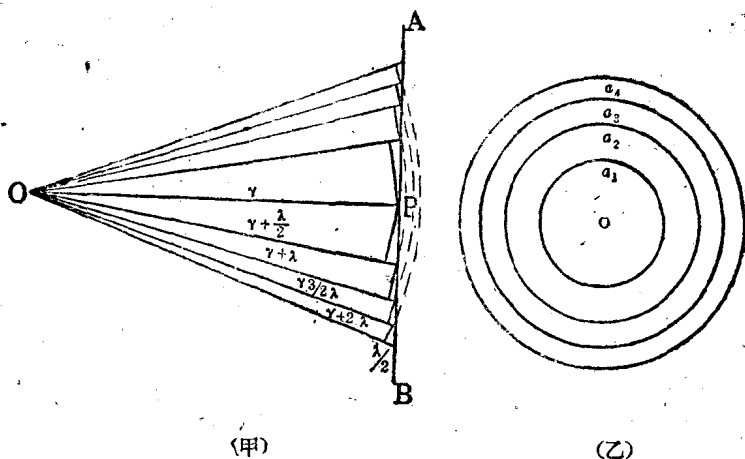


圖 1-5

此等面積大約相等，可見半徑增加，斜度也就增加，所以亮度也就相應地減小，而顯暗淡了。又白光中各光素的繞射本領是與其波長成正比的，即波長愈大者則繞過障礙物的本領愈強，反之，則較小。所以顯現在屏幕邊緣上的有色光帶，紅色光居于最外環，而紫色光居于最內，上圖是光通過一個小孔後所見的景像，若是一條細縫，則在細縫的兩邊出現許多明暗相間的條紋。

繞射經過孔縫等的情形，還與干涉現象有關，詳細理論請參閱高等物理學的 optics 部份，這裡不能細說了。但從上述現象可以看

出,即光实际并非直线前进;盖因一般在空旷或宽敞地方,无法察觉而已。因此,我们又可得一同样的结论,即依几何方法所作的像,也都只是近似的,而非绝对准确。

三、反射镜 光学可以分为两大类,一部份是研究光的性质和光的传播,称为理论光学;另一部份则是讨论反射镜和透镜的成像问题,称为几何光学,后者完全可以用波动说来解释。

在薄玻璃片的一面镀上银,则当光线投射到它上面时,除有少部份被吸收外,将全部依反射定律反射回来,所以称为反射镜。假如镀银面是在光源这面(左面),我们称为阳性反射镜;若镀银面是在右面,它和光源之间还有一片玻璃的厚度,就称为阴性反射镜,一般以后者为多。反射镜有平面型和曲面型的区别,平面反射镜是最常见的镜子,不拟加以讨论,这里只想就曲面镜述说一下。

曲面镜:它和一般的平面镜不同,因为它的反射面不是平面的,而为各种几何曲线绕一固定轴旋转而成的曲面,如球面、柱状面、抛物线及椭圆面等。凡曲面朝向光源为凹面者,则我们称之为凹面镜,反之,凸面向着光源的则称之为凸面镜。它们都是构成显微镜的重要部份,必须首先加以了解。反射镜往往不用玻璃镀银,而用金属直接磨出来,其效果将更好些,惟须高度的技术经验,才能得到满意的精密度。

(一) 球面镜的公式及其特性:凡反射面为一圆球面的一部份,则名为球面镜(图 1-6)。

AB 即代表一块球面镜,其中心点 O 名为顶点或光心,球面的中心 C 名为镜的曲度中心也就是球面 AB 的曲度半径, CO 线则称为镜的

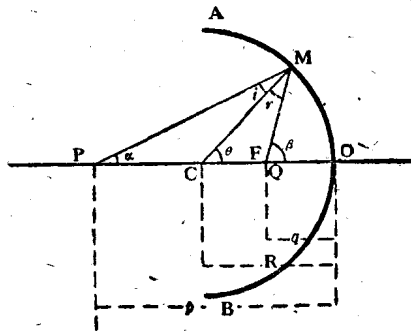


图 1-6

主轴或简称轴,而通过曲度中心划任何一直线到镜面也可称之为轴,但我们名之为辅轴,如图中的 CM 。今设有一物点 P 位于主轴上, PM 为入射线之一,依反射定律,入射角等于反射角,则反射线

必落在 F 点 (即 Q 点), 这时作为法线的 CM 将平分 $\angle PMQ$, 即 $\angle PMC = \angle CMQ$, F 点便称为焦点, 它刚好位于 CO 的中点。如所用的各入射线与主轴所作的角很小, 这些线便称为副轴线或旁轴线, 其结果各反射线都将集中于焦点 F , 则 P 的像 Q 也就与 F 点重合。现在令 OQ 距离为 q , OP 距离为 p , OC 距离为 R , 便可求出 p 、 q 、 R 三者的关系如下:

因 $\angle r = \angle i$, 且从 $\triangle PMC$ 及 $\triangle CMQ$ 两个三角形得知:

$$\theta = i + \alpha$$

$$\beta = r + \theta$$

$$\therefore \beta - \theta = \theta - \alpha \text{ 或 } \alpha + \beta = 2\theta$$

而 α 、 θ 、 β 各角都很小, 我们便可直接用正切来表示:

$$\alpha = \frac{OM}{OP} = \frac{OM}{p}, \beta = \frac{OM}{OQ} = \frac{OM}{q}; \theta = \frac{OM}{OC} = \frac{OM}{R}$$

将这些值代入 $\alpha + \beta = 2\theta$ 并消去 OM , 则得:

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$$

上面这一公式是从凹面镜求出来的, 但在凸面镜也同样真实 (图 1-7)。

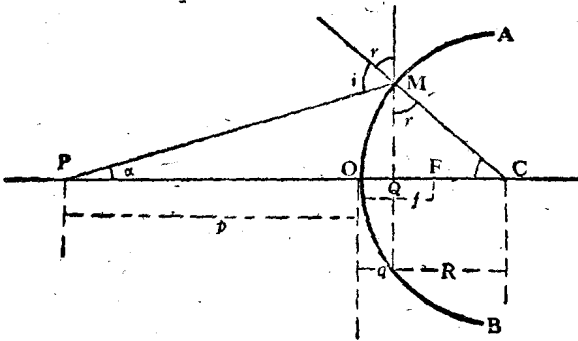


圖 1-7

现在假如我们把物点 P 放在像点 Q , 则像将在原来 P 点出现, 这种 P 与 Q 可以互换的关系, 在光学上称为共轭焦点。又用凹面镜所造成的像, 不仅可以看到并且可以用屏幕显出, 因此称为实像;

反之，用凸面鏡所造成的像，只能看見却不能用屏幕显出，所以叫做虚像。

在推求上述公式时，我們是假定 α, β 及 θ 各角都很小，而 p, q 及 R 等值也都不太大，現在假如 R 之值无限增大，則鏡的曲度將无限减小而成一平面鏡，如是 $2/R = 0$ ，而 $p = q$ ，这和平面鏡的情形完全符合。从焦点 F 到鏡頂的距离称为焦距 f ，常为曲率半径的二分之一，即 $f = R/2$ ，代入上述公式，則我們可簡写如下：

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

当光綫从无限远 ($P = \infty$) 射向凹面鏡，則必然焦集于焦点。若令物体从无限远向凹面鏡移近，則其像將从 F 点离开鏡面向曲度中心 C 移动；而且像也逐漸扩大，但仍比实物为小。当物体移到曲度中心之时，像也出现在 C 点，即物与像二者重合为一，像与物同大。若繼續將物体向鏡面移近，則像將繼續远离曲率中心，並且逐漸比实物为大。及至实物移到焦点 F ，反射出去的光綫都与主軸平行，这时像就成为无限大了。从較远处把物移到焦点稍前处所得一系列的像，都是上下倒立，左右翻轉的实像，並且可用屏幕显出。

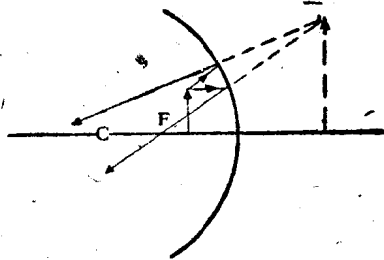


圖 1-8

但从 F 点再向鏡面接近，則所成的像都是直立的放大虚像，位于鏡后，只可用眼看到，不能用屏幕显出 (圖 1-8)。待实物到达鏡頂时，像也回到了頂点，二者又重合在一起，像与物同大了。

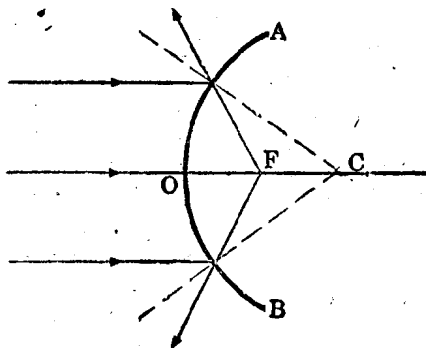


圖 1-9

至于凸面鏡，其情形便有所不同，当物在極远处时 ($P = \infty$)，像在 F (圖 1-9)。