

科學圖書大庫

# 工業上的光學配置

譯者 蒲慕明 周元玉 校閱 許志榮

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

# 工業上的光學配置

譯者 蒲慕明 周元玉 校閱 許志榮

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

# 科學圖書大庫

版權所有

不許翻印

中華民國六十八年三月七日再版

## 工業上的光學配置

基本定價 1.00

譯者 蒲慕明 國立清華大學理學士

周元玉 國立清華大學原子核工程研究所

校閱 許志榮 國家科學委員會科學儀器中心副工程師

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 財團法人 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號

發行者 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 15795 號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

# 原序

光學配置 (Optical Tooling) 這個目前飛機與火箭製造業所採用的名詞是描述用以測量、規一、及製造業之運作檢查所用的光學儀器，附件及設備的運用與功能。事實上，Tooling 這個字在上述各操作中絲毫沒有工具製造的意味。

本書的宗旨是提供給製造部門的工程人員予以光學配置的意義和應用的基本知識。為闡明光學配置在工業界接受之前，對機械測量方法的助長及精細化，本書亦介紹各種光學儀器，附件及設備。當描述到某種儀器在光學配置的安置和調整的需要時，我們不打算探究其詳。本書並不想成為教科書，其宗旨是：

1. 描述光學度量，準直及視準的內涵。
2. 讓一般工程人員知道光學配置的應用彈性和範圍。
3. 指出使用後時間與用度的節省情形。
4. 提出光學配置的各種實例。

本人在 Redstone Arsenal 計劃並協助裝配火箭的光學配置準直場的裝置之後，回到 Chrysler 公司火箭工廠並開始加入一光學配置系統計劃的建立工作。從其中我得到一個經驗，那就是我注意到關於這方面知識和消息的刊物非常有限，有的話也只限於目錄表及專利書。因此，此書之創作是用以彌補這些需要的。

編纂此書，我參考了各種目錄表，專利手冊和光學儀器的專家報告。在此，我還要特別感謝 K.J. Hurne 先生的工程度量衡學 (Engineering Metrology) 一書，因為我在研究該書光學部份時獲得了不少的參考資料。

就如本書原名 Optical Tooling in Industry 所示，本書欲提供光學配置細節的一般描述，據我所知，直到目前尚無一書能像本書將整個光學配置擬出一個大綱來。最後，我誠懇地要求讀者對本書加以批評指正，一則因為這方面發展的趨向一直在拓展中，二則或許本書所討論及敘述的許多問題正是讀者持有異議的。

J.D. McGrae.

I  
Hw 12

# 目 錄

## 原序

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>第一章 光學配置的認識</b> .....                                                                                           | 1  |
| 測量的標準化： ● 光學設備簡介 ● 反射 ● 折射 ● 光學基本鏡形 .....                                                                          | 6  |
| <b>第二章 透鏡</b> .....                                                                                                | 9  |
| 引言 ● 各種性質：透鏡曲度與折射力；主焦點；焦距；光軸；光心；焦聚點；焦聚面；色像差；球面像差 ● 影像的形成：實像和虛像；透鏡正立系統；像差的修正；像場彎曲；畸變；像散性 ● 複合鏡 ● 彎月形收斂透鏡和發散透鏡 ..... | 18 |
| <b>第三章 稜鏡</b> .....                                                                                                | 19 |
| 全反射與臨界角 ● 極化光 ● 典型光學稜鏡：直角稜鏡；斜方形稜鏡；五稜鏡；玻璃楔；方解石 ● 光學稜鏡之用途：軸像錐鏡；視線；纖維光學 .....                                         | 26 |
| <b>第四章 度量技術</b> .....                                                                                              | 27 |
| 機械方法：準直檢測；水平檢測；直角檢測 ● 光學方法：照準望遠鏡；經緯儀；準直儀；精密水平儀；光學直角儀；光學比較儀；自準直與自反射 .....                                           | 29 |
| <b>第五章 光學儀器及附件</b> .....                                                                                           | 31 |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 望遠鏡：鏡頭；影像的形成；放大率；鑑別力，清晰度；指向準確度；視差的消除 | 64 |
| • 自準直                                |    |
| • 自反射：自反射覘標                          |    |
| • 覘標與反射鏡                             |    |
| • 光學經緯矩                              |    |
| • 經緯儀                                |    |
| • 顯微測斜儀                              |    |
| • 稜鏡跨乘水準器                            |    |
| • 轉角目鏡                               |    |
| • 儀器架                                |    |
| • 光學平面玻璃：用途；操作原理                     |    |
| • 光學比較儀：操作方法；範圍和用途                   |    |
| • 測孔儀                                |    |
| • 垂直配置桿                              |    |
| • 白面刻度量尺                             |    |
| • 旋轉指標台                              |    |
| • 光學應變計                              |    |
| • 光學直角儀                              |    |
| • 光學測微計                              |    |
| • 光學配置場：水平配置桿；垂直配置桿                  | 64 |

## 第六章 光學配置的應用 ..... 65

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 輪機發電機軸承的準直                                                 |    |
| • 車床的準直：車床心軸的校準                                            |    |
| • 機車的校準                                                    |    |
| • 飛機工業上的光學配置                                               |    |
| • 固定光學配置                                                   |    |
| • 銑、磨機械的光學配置                                               |    |
| • 平板面的水平校正                                                 |    |
| • 火箭裝配的光學準直                                                |    |
| • Saturn 火箭的裝配                                             |    |
| • Jupiter 火箭的裝配：Jupiter 的自準直；推力室中心的檢驗；焊接火箭中段；連接火箭尾段；檢驗導航系統 |    |
| • 光學配置在放射科學上的應用：步驟描述；對準的要點                                 |    |
| • 結論                                                       | 88 |

## 字彙 ..... 89

## 索引 ..... 99

# 第一章 光學配置的認識

## 測量的標準化

本世紀初，底特律有一位汽車廠主，指出了汽車零件相互置換的可能性。在一個全國性的汽車展覽會上，他叫機械師把他的兩部車子完全拆散，然後將各部份混雜在一起又合併成兩輛車子。這項表演，並沒有事先選擇好適當的零件。（請注意！在那個時候，各部份零件能有標準化是非常難得的）。這項表演也顯出了相當高的遠見，那就是標準化零件的可能性以及達到高精確度所需的技術。

當汽車漸漸開始普遍時，萌芽的汽車工業立刻發現製造標準化零件的新方法，尤其是測量上的方法是最重要的一環。國際間的測量方法差異很大，有時候，就是當地的各工廠之間，測量標準亦有不同。製造零件的工廠提供的產品常常會因度量標準有差異而被裝配商所退貨。

測量標準化的實施是本世紀初始於瑞典，由所謂“約翰遜規矩塊”<sup>\*\*\*</sup> (Johansson gauge block) 的產生而發展出來的。汽車工業很快地採用了規矩塊作為測量的標準。規矩塊系統現在已經是工業上公認的度量標準了。

當機械師度量一樣機件時，通常使用的標準量尺的長度有：6吋，12吋，或24吋三種。量尺分刻為“吋”的單位，每一吋再度分刻，通常分為八份，十六份，三十二份或六十四份。在尺的兩面邊緣上可以看到刻度分劃。工具製造師和精確機械師當製作藍圖上要求最大偏差量是幾千分之一吋時，還需要使用測微計 (micrometer) 和游標卡尺 (Vernier calipers) 等工具。

要達到現代化的精確製造，度量上就需要更大的精確度以維持國際標準

<sup>\*\*</sup>光學配置 (Optical Tooling)：此名詞乃用來描述由精確光學儀器與規標 (targets) 所作的檢驗或測量。工作中作為參考線的視軸 (the line of sight) 是由光學方法而非機械設備來完成的。

<sup>\*\*\*</sup>約翰遜規矩塊：此規矩塊有102條鋼塊，厚度從0.10005吋到4吋。藉其厚度的逐漸變化，將所需數目和各種厚度的鋼塊併合在一起可用來測量從0.1到12.000吋的各種長度或高度的機件。其準確度可達 $\pm 0.000001$ 吋（百萬分之一吋）。

。我們所熟悉的度量工具如量尺及測微計等都不夠精確，同時長時期使用也會因磨損而減低它們的精確性。

## 光學設備簡介

到了精確製造時代的來臨，光學儀器才被引進到工業上。它最初的用途祇是作為測量上的幫助。工具製造師和檢測師在觀察游標尺 (vernier)，測高計 (height gauge) 及類似儀器上的讀數時，利用了放大鏡。另一個早期的光學器具是光學陰影器 (shadow graph)，它可以用來將反射像放大於影幕上，然後操作員就可以在幕上仔細檢視，並與原設計圖比較。這個器具可使我們很快而且很精確地檢視不規則形狀的機件，這是任何其他儀器無法做得令人滿意的。

第二次世界大戰造成了飛機和船艦的大量生產，也造成了光學儀器在工業上的廣泛使用。美國軍方的一個考察團在考察了英國的飛機製造設施之後作了一份報告，使得美國工業上開始大量使用光學儀器。他們的報告說：經緯儀 (transit) 目前正被採用來建立及確定參考線並能更準確地對機身骨架和機翼作準直檢驗。以前所使用的方法是在兩支柱之間拉直一條鋼琴絃 (piano wire) 作為底線，再用量尺來度量，此種老方法的精確度很低。

飛機製造師與儀器製造師共同的合作，已經改良了經緯儀和準直望遠鏡 (alignment telescope)，使它們今天都具有高度的精確性和應用上的彈性。改良的經緯儀和準直望遠鏡已被認為是目前光學配置中最主要的儀器。

在過去幾年裡，太大的物體不能使用平板或其他類似的以固定機械面作為基礎的測量方法，光學配置法很快的已經成為獨一無二的精確方法了。光學配置法可使操作者確立視線 (establish line of sight)、判定準直 (autocollimating)，並且可在面積達  $150 \times 150 \times 15$  呎的機械或裝備內的任何平面上作線性測量，同時精確度可保持千分之一吋。這種特殊的適應性使得光學配置法成為今日許多工業上最了不起的技術，尤其是本書中所提到的火箭與船隻的製造、動力廠、軋壓廠、金屬工廠等工業上的應用。光學儀器有放大的功能，所以可以幫助——也常常取代——傳統的測量技術。

## 光 (Light)

對“光”的研究本身就是一門科學。為了適合我們的需要，我們將祇介紹最廣泛而易為人們接受的理論，光是放射能 (radiant energy) 的一種形式，藉波前電磁振動 (electromagnetic vibration) 而傳播。這種放射能可以藉一

組同心圓狀的波前來描述，其傳播的情形很像將一個石子投入水池中所產生的水波。當光離開了點光源時，每一個波的球狀波峯（或稱波前）就向四面八方傳播。光前進的方向與它的波前是垂直的，見圖1-1。當波前遠離了光源之後，波前（其半徑已非常大）的小部份看起來就像是一層層的平行面。光在真空裏傳播的速度大約是每秒186,300哩；但是在地球濃密的大氣中，其速度要比上面這速度小一點。

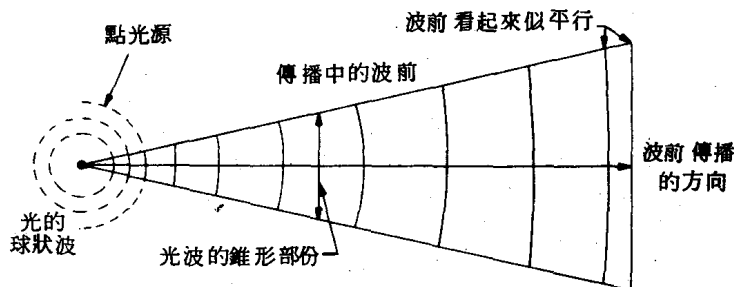


圖1-1 點光源放射出的光，在傳播中波前的一部份。傳播進行的方向與波前成直角。注意在最右端，波前似乎彼此平行。

白色光是由許多色光混合而成的——紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫。這個序列是根據波長漸小的順序，紅光的波長最長，紫光最短。有些光學測量的情況需要利用單一波長的光，也就是單色光 (monochromatic light)。然而，本書中所敘述的各種光學配置法，全部都是使用白色光，因為我們涉及的是廠房裡的操作 (shop practice)，除非是要得取干涉儀讀數或作特殊實驗，不然使用單色光是不實際的。

從點光源放射出來的光所行走的路徑稱為光線 (Light ray)。所謂光線這種東西，實際上並不存在；但是定義它可以有利於科學家和光學儀器設計師預測光遭遇各種型式的物質時會發生的情況，以及研究光學理論。光所遭遇到的物質稱為介質，介質通常區分為三種——透明的、半透明的、不透明的。透明的介質，光很容易就穿過，透過介質我們可以清晰地看見置於其背後的物體。光也可以穿過半透明的介質，但是在它背面的物體就不容易分辨出來了。不透明的介質則會藉光反射或吸收而阻擋了光的前進，有些透明介質較易讓光穿過，有些則較難。譬如，光在真空裡的速度是每秒186,300哩，在一些密度較大的光學玻璃裡，光速要小於每秒100,000哩。就是因為光從一種介質進入另一種介質時會改變其速率，我們才能夠設計出各種透鏡 (lens)，用於望遠鏡 (telescopes) 等光學儀器之中。

藉著透鏡或反射鏡面 (mirrors) 的使用，光可以被發散，也可以被加強 (收斂)。通常，透鏡是用來儘可能地將光集中在一個小區域，以適合各種特殊用途。

## 反射 (Reflection)

當光線遇到了兩種介質間的界面 (interface) 時，將會被反射，吸收或折射。反射光就是返折回原介質的光，見圖 1-2，光線的折射和反射都有一定的規則，這可以用反射定律和折射定律來描述。在敘述反射定律時，要用到兩項定義：(1) 法線 (Normal) —— 在一個平面上某一點的法線就是在該點對該面的垂線。(2) 入射角與反射角 (Angles of incidence and reflection) —— 入射光線與反射光線和在射入點的法線所夾的角。

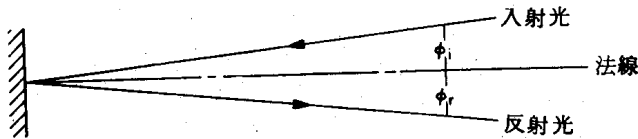


圖 1-2 反射定律。入射光遭遇界面時反射，反射角與入射角相等。入射線、反射線及法線都在同一平面上。

反射定律有兩條：

- (1) 入射線、法線和反射線三者在同一平面上。
- (2) 入射角和反射角相等。

反射第二定律可用來推測反射面傾斜對反射光的影響。假如反射面轉了一個角度  $d\phi$ ，入射光不變動，則反射角增加了反射面轉動角的 2 倍，也就是  $2d\phi$ ，見圖 1-3。這個說明了為什麼有時候可以利用旋轉鏡來放大微小的角度變動。

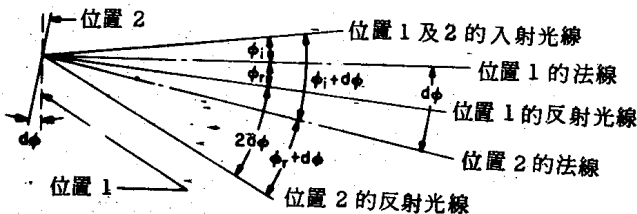


圖 1-3 轉動鏡面。將鏡面旋轉  $d\phi$ ，反射角增加轉動角的兩倍  $2d\phi$ 。

假如這道反射光再度被對面另一固定的鏡面反射回原轉動了的鏡面再反射時，則最後反射角就增加了原鏡轉動角的四倍  $4d\phi$ 。

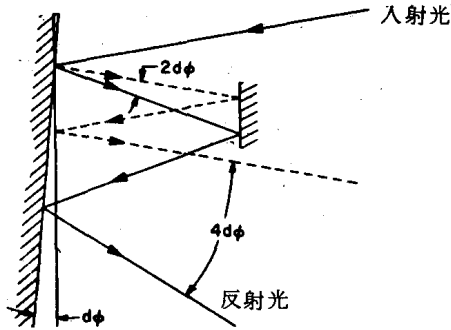


圖 1-4 在轉動鏡面的對面再放置第二塊固定鏡面，反射角可以增加轉動角的四倍， $4d\phi$ 。

圖 1-5 中繪出一塊有後反射面的鏡面反射情形。有兩道反射，一道從鍍銀的後反射面所得，另一道較微弱的是前反射面的反射光。由於這種情形有雙重反射的緣故，所以在光學儀器中所使用的鏡面大都是祇有前反射面的。

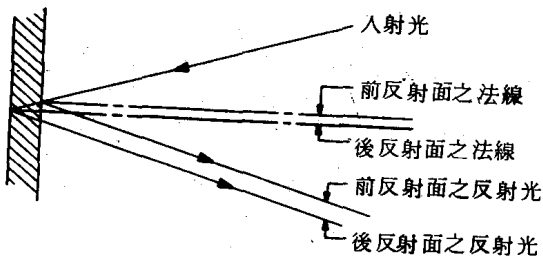


圖 1-5 有後反射的鏡面造成兩道反射光，其反射角均與入射角相等，但彼此略有位差。

## 折射 (Refraction)

折射是光穿過界面進入新介質時，方向和速率改變的現象。光所取的方向和速率的改變要根據它的顏色（即波長）所來自的介質的性質，以及它所進入的新介質的性質而定。

折射量根據光在兩種介質裡的速率比，以及光進入新介質的入射角度而定，光自一介質到另一介質所經過的面稱為界面 (interface)。

要決定光線自一介質進入另一介質的彎折情況，最普通的方法如下：若光線非垂直地射入一種光學上較稠密的介質，將偏折向法線。若非垂直地射入一種光學上較稀疏的介質，將偏離法線。見圖 1-6。

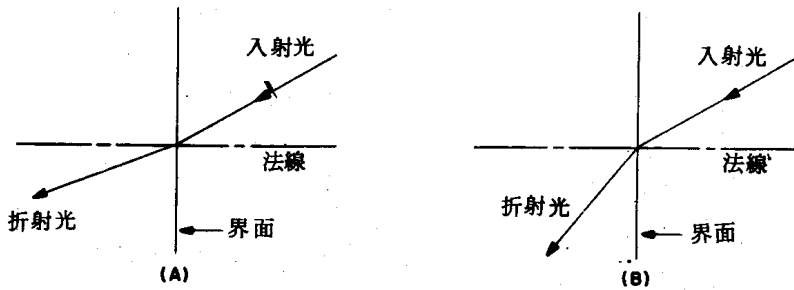


圖 1-6 折射定律，入射光從一介質進入另一介質，折射光改變了方向及速率。(A)光進入較稠密的介質，偏折向法線而且速率變慢。(B)光進入較稀疏的介質，將偏離法線而且速率較快。

光從一介質進入另一介質偏折情形的度量就是所謂的“**折射率**”(index of refraction)。數學上，它可以由下面兩種方法算出：(1)光在真空（在空氣中也差不多）中的速率與在該介質中的速率之比。(2)入射角的正弦值( $\sin$ )與折射角的正弦值之比。在此要特別聲明的是空氣並不一定是光所來自的介質。通常，折射率有兩種表示方法：(1)光在介質 1 與介質 2 裡的速度比。(2)光在介質 1 裡的入射角的正弦值與光在介質 2 裡的折射角的正弦值之比。

## 光學鏡形 (Optical Shapes)

前述三種介質的各種性質被廣泛地應用於五種光學的玻璃鏡上，它們都在光學配置法裡佔重要的地位。這五種是光學平面玻璃 (Optical flat)，稜鏡 (prism)，玻璃楔 (wedge)，透鏡 (lens)，反射鏡 (mirror)。

**光學平面玻璃 (optical flat)** 是有兩平行面的玻璃，經過高精確度的加工，並加磨光打亮而成。它可以應用在光學測微計，反射鏡和規標以及干涉技術上。

**稜鏡 (prism)** 是具有兩個或多個折射面的玻璃物。藉稜鏡可以達到最大反射量，稜鏡也可以用來分離並鑑定光譜的顏色，見圖 1-7。當一個稜鏡祇有兩個面可產生平面折射時，就稱為玻璃楔 (wedge)。稜鏡和玻璃楔的一個重要用途是用於光學直角儀 (Optical square) 上。

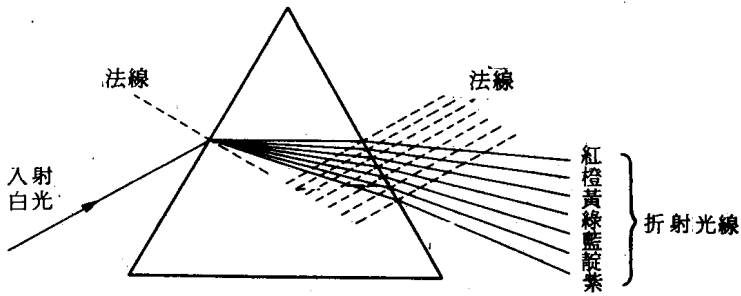


圖 1-7 白光經過稜鏡後的折射。白光被分離成各種組成的色光：紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫。

透鏡 (lenses) 是具有兩個面的透明玻璃品，其中一面或兩面為凸、凹或平的。當幾種透鏡組合在一起，就構成望遠鏡最主要的部份。

當玻璃鏡的某一面被加鍍某種東西後（最好使用銻 rhodium），就稱為反射鏡 (mirror)，用來反射光線。



## 第二章 透鏡

### 引言

簡單的透鏡有兩種型式——收斂性 (converging) 的與發散性的 (diverging)。收斂性透鏡，或稱凸透鏡 (convex lens)，可以使光線偏折而集中至一點。發散性透鏡，或稱凹透鏡 (concave lens)，可使光線偏折而發散開來。在光學系統裡，這兩種透鏡，或是彼此的組合，有很重要的功能和應用。

### 各種性質

• **透鏡曲度與折射力** (Lens Curvature and Refractive Power)：透鏡收斂與發散光線的能力要看透鏡曲度而定。而曲度又視鏡面半徑而定。半徑較小的凸透鏡有較大的收斂力。相似地，半徑較小的凹透鏡有較大的發散力。當然，上述的這些情形都是拿大小相同（截面直徑相同）的透鏡來比較。見圖 2-1，2-2，2-3，那是收斂和發散鏡的幾種例子。

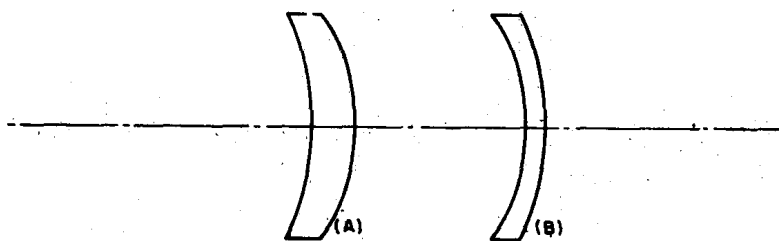


圖 2-1 利用不同的鏡面半徑來組合，可以造出發散鏡與收斂鏡。(A) 彎月形 (Meniscus) 收斂鏡：左邊鏡面的半徑大於右邊鏡面的半徑。(B) 彎月形發散鏡：右邊鏡面的半徑大於左邊鏡面的半徑。

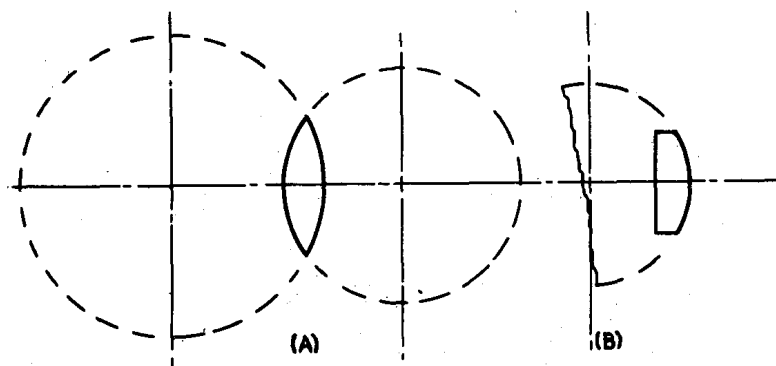


圖 2-2 (A) 不同曲度鏡面組成的雙凸透鏡 (Concavoconvex lens) (B) 平凸透鏡 (Plano-convex lens)

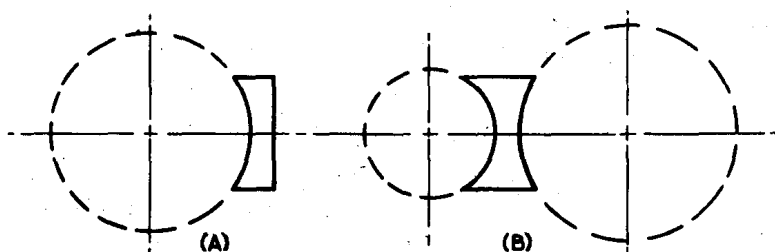


圖 2-3 兩種發散鏡：(A) 平凹透鏡 (Plano-Concave lens) (B) 不同曲度鏡面組成的雙凹透鏡 (Concavo-Concave lens)

● **主焦點 (Point of Principle Focus)：** 對凸透鏡來說，這就是外面射來的平行光線通過鏡片以後收斂集中的那一點。見圖 2-4A。對凹透鏡來說，是將平行光線通過鏡片以後的發散光線向後延伸而會聚的那一點。見圖 2-4B。

● **焦距 (Focal Length)：** 焦距是從鏡片的中心沿著光軸到主焦點的距離。見圖 2-4。

● **光軸 (Optical Axis)：** 光軸是穿過鏡片中央而同時垂直於鏡片兩面的直線。著將此軸線延伸，將會通過鏡面的曲率中心和主焦點。見圖 2-4。

● **光心 (Optical Center)：** 這是光軸上的一點，一道斜向射入的光線若經過這一點，不會被折射。利用下面的方法可以找到光心：先在光軸上方鏡面上某一點繪一條直線切於鏡面，然後在相對的鏡面上再繪一條切線與先

前的那一條線平行。連接這兩個切點的直線將與光軸交於一點，那就是光心。祇有當兩鏡片的曲率半徑相等時，光心才會正好在兩鏡面間的正中央。圖 2-5 可以看出如何找到光心。

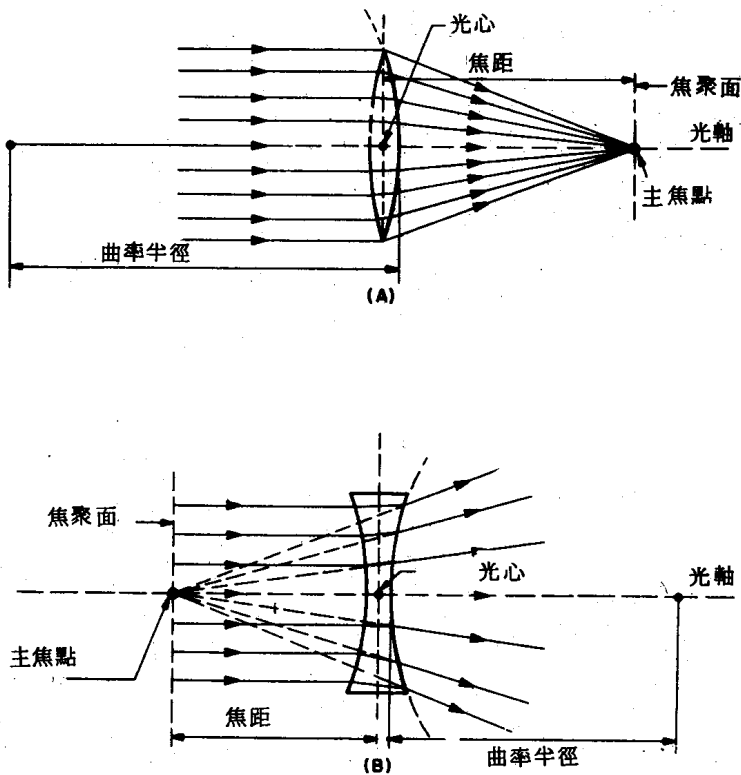


圖 2-4 (A) 收斂鏡 (B) 發散鏡的主要部份。

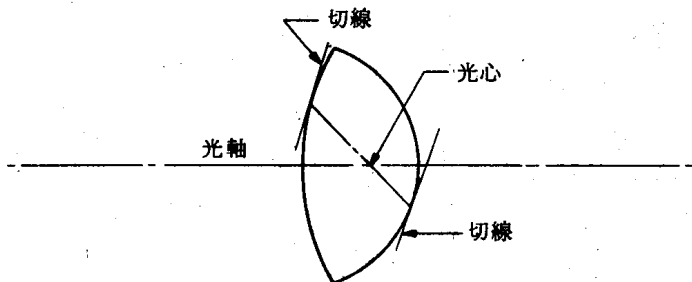


圖 2-5 找出鏡片的光心。光心可以由鏡面兩平行切線切點連線與光軸之交點決定之。