

# 儀器總覽 Introduction to Instrumentation

## 基本物理量量測儀器 Basic Physical Quantity Measuring Instrument

# 序言

---

工業革命以來，儀器技術伴隨科技發展、學術研究及產業需求而蓬勃發展，為人類生活帶來重大變革；近年來政府開始積極推動儀器產業發展，列為重點產業及重要關鍵技術之一，每兩年專案規劃儀器產業技術發展策略，以期帶動本土儀器產業技術發展。本中心進行精密儀器研究發展與技術服務廿餘年，深感國內儀器資訊之重要，陸續編輯出版『科儀新知』、『科儀叢書』等專業刊物及建立『全國科學儀器網路查詢系統』供各界使用。近年來科技發展一日千里，新穎設備不斷問世，系統愈形繁雜，新名詞、新術語層出不窮，本中心乃編纂兼顧廣度與普及性的儀器百科全書，有系統且廣泛地介紹各種科學儀器，『儀器總覽』便是此一構思下之產物，透由國內專家、學者參與，藉深入淺出的解說一方面為廣大青年學子與社會人士解讀各種科學儀器，另一方面亦作為相關技術人員補充專業領域之儀器知識的參考工具。

鑑於儀器係結合光、機、電、真空、控制等物理、化學及生命技術之整合系統，種類繁多，各國分類標準及涵蓋範圍亦隨該國產業現況而異，而我國在工業生產統計分類上尚無精密儀器產業類，「儀器總覽」則依儀器用途概分為八大類組，涵括基本物理量量測儀器、光學量測儀器、化學分析儀器、材料分析儀器、表面分析儀器、電子測試儀器、醫療儀器、環境及安全衛生檢測儀器等，從基本簡易的量測儀器到尖端複雜的分析儀器，盡皆包羅其中。每項儀器的內容儘可能以淺顯易懂的文字表達，避免太過專業的術語與公式，並著重基本原理的說明與實際的應用介紹。

本總覽自 84 年 11 月開始規劃，從架構的研擬，儀器項目的分類，到實際內容的撰寫與審核，共邀集了約二百位儀器相關領域的學者專家共同參與，其中包括大專院校教授、研究機構研究人員、醫學中心的醫生及技術人員等，本總覽承蒙專家學者於百忙之中鼎力協助，方能順利付梓，對所有參與撰稿、審稿及編輯的單位與人員，特致謝忱。本總覽內容如有疏漏之處，冀望各界先進不吝指正，俾供未來修訂增補時之參考。

黃文雄

謹誌

中華民國八十七年九月一日

# 編審委員

---

## 總召集人

黃文雄 國科會精密儀器發展中心主任

## 副總召集人

陳建人 國科會精密儀器發展中心副主任

## 分組召集人

張良知 國科會精密儀器發展中心顧問

## 委員

梁振民 中山科學研究院材料研發中心研究員

陳振文 中山科學研究院材料研發中心研究員

陸懋宏 國立交通大學光電工程系教授

賀方涓 工業技術研究院光電工業研究所研究員

薛新國 工業技術研究院光電工業研究所顧問

(按姓名筆畫序)

# 編輯說明

---

## 一、編輯目的

儀器在科學研究與工業生產上是極為重要的工具，且與日常生活的關係，如食品檢驗、環境偵測、醫療診斷等，亦日趨密切。環視國內現有之儀器書刊，或為龐大深入之專書，或為尖端之技術性論文，欠缺對儀器廣泛而完整的介紹。精密儀器發展中心彙編本「儀器總覽」，即希望由全面性的角度出發，以較為淺易卻不失完整的方式，向讀者介紹各種儀器。

因為內容較為淺易，故適合大專院校學生與從事儀器相關工作人員，甚或一般社會大眾，建立對儀器基本的認識與瞭解。因為涵蓋了各種領域的儀器，故也適合對某類儀器相當熟悉之研究人員或儀器廠商參考使用。

## 二、範圍與分類

本總覽收錄之儀器項目以商業化產品為原則。功能過於簡單之工具，因不具備完整的量測或分析功能，不在收錄範圍。所收錄之儀器，依其應用領域，概分為八個類組：

- 基本物理量量測儀器
- 光學量測儀器
- 化學分析儀器
- 材料分析儀器
- 表面分析儀器
- 電子測試儀器
- 醫療儀器
- 環境及安全衛生檢測儀器

各類組依其所含儀器之功能、性質，再細分為不同次項目。

## 三、基本格式

每項儀器原則上以二至四頁之版面介紹，其內容由以下項目所構成：

1. 名稱：儀器的中、英文名稱
2. 關鍵字：列出該儀器內文中重要的關鍵字與關鍵詞，中、英文並列。
3. 基本原理：說明儀器運作的基本原理與概念。
4. 結構示意圖：利用平面結構圖標明儀器的各項元件，或以方塊圖說明儀器各部份的功能。

5. 規格與特徵：說明一般商業化產品的規格及其優、缺點。
6. 應用與用途：說明儀器主要的應用及其操作技巧。
7. 參考文獻：列出相關的書籍及文獻資料，以供讀者更深入探討之參考。

極少部份的儀器，因其特殊性或解說上的需要，未完全遵循上述原則，例如部份醫療儀器，因涉及人體安全，增列儀器使用安全事項。有些儀器則因其較為簡單或較為複雜，篇幅略有增減。這些都不會影響讀者之閱讀。

#### 四、出版形式

為便於讀者閱讀與使用，本總覽依八個類組分冊編印，每一冊除有該類組收錄儀器之中、英文目錄外，並將該冊全部關鍵字，分別依中文及英文排序方式整理為索引，以利讀者查閱。全書並編印總目錄一冊，將八個類組的儀器目錄及索引彙整，除方便查閱，亦有助於不同類組間的參照。

在「基本物理量量測儀器」類組中，因收錄之儀器多與度量衡的標準檢測有關，特附錄經濟部公告之「度量衡單位及其所用之倍數、分數之名稱、定義及代號」，供讀者參考。

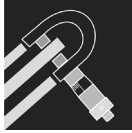
部份類組所涵蓋的儀器領域較廣，儀器種類與項目非常多，部份儀器項目於本輯中未能收錄，加上新產品陸續推出，本中心將持續增補出版。

# 目錄



## 基本量測儀器

- 1 雷射干涉儀  
Laser Interferometer
- 5 雷射都卜勒測距儀  
Laser Doppler Displacement Meter (LDDM)
- 8 經緯儀  
Theodolite (Transit)
- 12 萬能測長儀  
Universal Measuring Machine
- 15 光學投影機  
Optical Projector
- 17 工具顯微鏡  
Toolmaker Microscope
- 19 真圓度量測儀  
Roundness Measuring System
- 22 三次元量測儀  
Coordinate Measuring Machine
- 26 塊規  
Gauge Block
- 30 游標卡尺  
Vernier Caliper
- 32 分厘卡  
Micrometer
- 34 度盤規  
Dial Gauge
- 36 高度規  
Height Gauge
- 39 平台  
Surface Plate
- 42 位移感測器  
Displacement Meter
- 46 天平  
Balance
- 49 法碼  
Weight



- 52 電阻溫度計  
Resistance Thermometer
- 54 玻璃溫度計  
Glass Thermometer
- 56 熱電偶溫度計  
Thermocouple Thermometer
- 59 光高溫計  
Pyrometer

### 導出量量測儀器

- 61 氣泡水平儀  
Bubble Level
- 63 電子水平儀  
Electronic Level
- 65 萬能活動量角器  
Universal Bevel Protractor
- 66 組合角尺  
Combination Square
- 68 傾斜儀  
Inclinometer
- 70 高斯計  
Gaussmeter
- 73 通量閘磁力計  
Fluxgate Magnetometer
- 76 磁通計  
Fluxmeter
- 78 磁阻計  
Magneto-resistor Meter
- 81 超導量子干涉儀  
Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)

### 輻射度量儀器

- 85 加馬計數器  
Gamma Counter
- 87 液體閃爍計數器 / 貝他計數器  
Liquid Scintillation Counter/ Beta Counter



- 
- 89 劑量校正器  
Dose Calibrator
  - 92 輻射高性能液相層析儀  
Radio HPLC
  - 94 熱發光劑量計  
Thermoluminescent Dosimeter (TLD)
  - 96 袖珍劑量計  
Pocket Dosimeter
  - 98 化學劑量計  
Chemical Dosimeter
  - 101 電子加速器  
Cyclotron
  - 104 加馬照相儀  
Gamma Camera
  - 106 電腦斷層攝影模擬儀  
Computerized Tomographic Simulator
  - 108 單光子發射電腦斷層掃描儀  
Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)
  - 110 X 光影像增強器  
X-ray Image Intensifier
  - 112 淺部 X 光遠隔治療機  
Superficial X-ray Teletherapy Machine

#### 真空度量儀器

- 114 熱陰極離子化真空計  
Hot Cathode Ionization Gauge
- 118 冷陰極離子化真空計  
Cold Cathode Ionization Gauge (Penning Gauge)
- 121 氣體分壓分析儀  
Partial Pressure Analyzer

#### 附錄

- 125 度量衡單位及其所用之倍數、分數之名稱、定義及代號

- 
- 133 中文關鍵字索引
  - 137 英文關鍵字索引

# 雷射干涉儀

## Laser Interferometer

關鍵字：雷射干涉儀、反射原理

Keywords：laser interferometer, principle of reflection

### 一、基本原理

雷射干涉儀是目前長度量測領域最精密量測儀器之一，最早的干涉儀原係由 Albert A. Michelson 所發明的，亦即現在所通稱的 Michelson 干涉儀，其基本原理如圖 1 所示，光由光源 S (現在大都利用波長 633 nm 之氦氖 (He-Ne) 雷射) 發出後，在分光鏡 A 處因鏡片表面鍍銀部份 R 作部份反射及透射，其中反射的光束到達反射鏡 C，透射的光束則經玻璃鏡片 B 到 D 鏡片，B 鏡片的功用是用來補償使反射及透射二光束經過玻璃鏡片的次數。觀察者則位於 O 的位置，在此可看到因 AC 及 AD 二道光束干涉所產生的干涉條紋，此干涉條紋是因二光束的波峰、波谷作建設性及破壞性的重疊作用而來的，有時稱為建設性 (constructive) 干涉及破壞性 (destructive) 干涉。

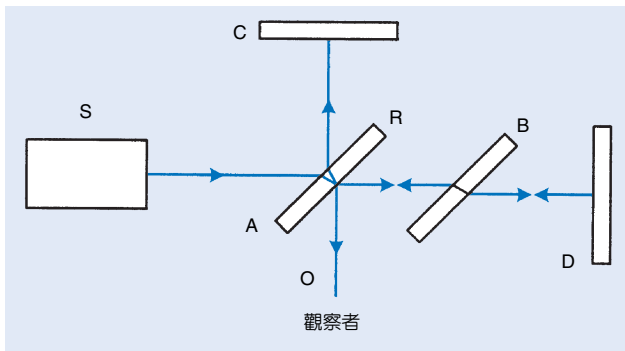


圖 1. 雷射干涉儀之基本原理。

如圖 2 所示，建設性干涉所產生的條紋為圖中的亮紋，而破壞性干涉則產生圖中間所示的暗紋，此時，若增減 AC 或 AD 的長度達二分之一倍波長時，將會使干涉條紋改變由亮變暗或由暗變亮。因此，如果把反射鏡 C 固定而移動鏡片 D 則可藉由干涉條紋之明暗變化的次數來換算鏡片 D 的位移變化量，其基本的解析度為  $\lambda/2$ ，此即干涉儀之基

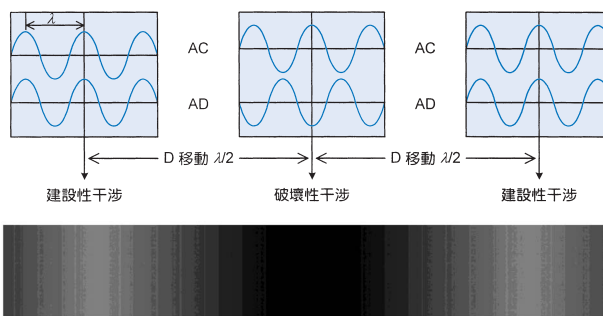


圖 2. 二道光束干涉所產生的干涉條紋。

本原理，此光干涉的基本原理在一般的光學書籍內均有詳細介紹，本文便不再贅述。

通常 Michelson 干涉儀原始的解析度只有  $\lambda/2$ ，以紅光氦氖雷射而言，解析度只有  $0.3 \mu\text{m}$ ，並無法滿足現在研究與發展或工業界需求的解析度或準確度。因此必須加以改良方能廣泛應用。

現代的干涉儀和 Michelson 原始的干涉儀比較，其改變的項目如下：

- ① 白光光源 S 由穩頻的氦氖雷射所取代。
- ② 人眼觀察由一對光偵測器及電腦化計數器所取代。
- ③ 平面反射鏡則由角隅反射鏡 (retroreflector 或稱 corner cube) 所取代。角隅反射鏡的最大特點是入射於第四面的光束在三個反射面依次反射後，再從第四面出射，出射光束的方向恆與入射光束的方向相平行。使用角隅反射鏡，不論那一方向的軸線發生微小轉動時，並不影響出射光束原來的方向。
- ④ 在新的干涉儀中，將分光鏡 A 及取代反射鏡 C 的角隅反射鏡合成一組鏡組稱為干涉鏡 (interferometer element 或簡稱 interferometer)。

雖然新的雷射干涉儀作了許多的改良及特殊安排，但在實際量測時，仍有一些限制，亦即當 D 鏡運動時干涉鏡組仍需保持不動，若二者均同時移動，則干涉儀仍無法分辨出個別的移動量。

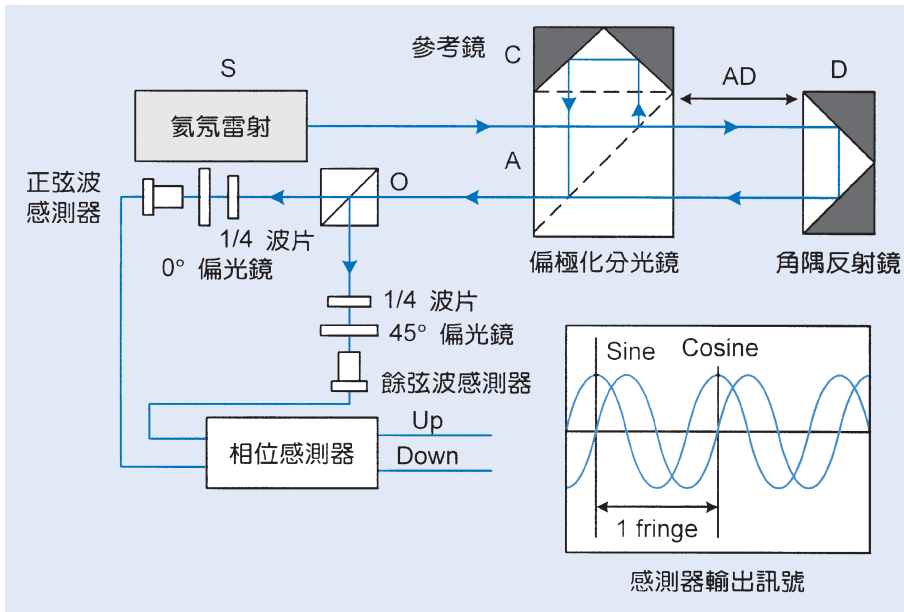


圖 3. 單頻雷射干涉儀架構示意圖。

雷射干涉儀經過了許多年的改善與發展，其技術與精準度已有相當的進步，許多廠家紛紛推出各具特色之干涉儀，但其基本仍是依照 Michelson 干涉原理；因此，雖說廠牌眾多，但依其干涉條紋處理方式來分類，大抵可分成單頻雷射干涉條紋計數法和雙頻 (two frequency) 雷射干涉條紋計數法等兩種。

## 二、結構示意圖

### 1. 單頻雷射干涉條紋計數法

圖 3 即是利用具有穩頻特性之單頻雷射干涉儀工作原理，在原先觀察點「O」的位置放置一偏極化分光鏡（偏光鏡）將光束分成一垂直及水平分量的兩道光束，其中一道光束通過 0° 的偏光鏡，另一束則通過 45° 偏光鏡，在 0° 偏光鏡後的感測器偵測到的正弦波訊號，而另一個偵測到的則是餘弦波信號，由正弦及餘弦訊號的變化方向即可用來判別反射鏡 D 的位移方向是向前或向後。而且利用正弦波及餘弦波通過零點的數目亦可使原來的  $\lambda/2$  的解析度提高到  $\lambda/8$  (即約  $0.08 \mu\text{m}$  解析度)，不過由於近年來電子技術的進步，目前單頻干涉儀的解析度已可達到  $0.01 \mu\text{m}$  或更高的解析度。

### 2. 雙頻雷射干涉條紋計數法

雙頻雷射干涉儀的光學系統架構如圖 4 所示。雷射頭發出一束有兩個不同頻率的左旋和右旋圓偏

極光，它們的頻率差大約是 1.5 MHz 左右。此雙頻雷射光束通過  $\lambda/4$  波片後，會成為兩道互相垂直的線偏極光，再經光束擴展器擴束後，雙頻雷射光束被分光鏡 1 分為兩部分：一小部分作為參考光束 ( $f_2$ ) 反射到固定的角隅反射鏡 2，再反射回分光鏡 1，另一部份 ( $f_1$ ) 則作為量測用，透射至另一 (移動) 角隅反射鏡 3，此光束同樣反射回分光鏡 1，此兩道互相垂直的線偏極光在 45° 方向上的投影，形成新的線偏極光並產生拍 (beat)。如果此時可移動之角隅反射鏡維持靜止，則這個拍的頻率就等於雷射頭所發出的兩個光頻的差值，即  $f_1 - f_2 = 1.5 \text{ MHz}$ ；當角隅反射鏡移動時，則拍的頻率將因都普勒效應產生往上或往下的偏移，其偏移之方向由角隅反射鏡之移動方向而定，角隅反射鏡每 30 cm/sec 之移動速率所產生之都普勒位移訊號約等於 1 MHz，該

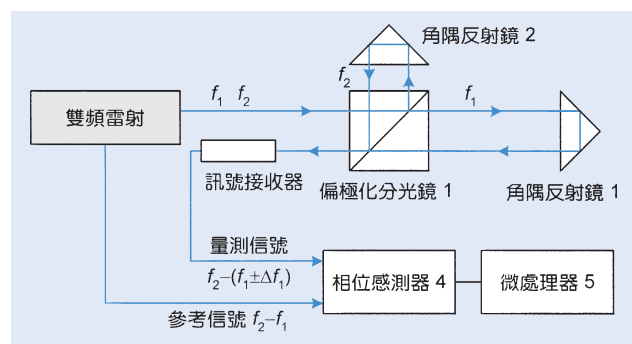


圖 4. 雙頻雷射干涉儀架構示意圖。

訊號由光電 (相位) 感測器 4 監控並轉換為電子訊號，另一方面光電感測器亦週而復始地量測兩道光束之相位差，任何的相位變化均予以數位化並加以累積，這些訊號最後均進入微處理器 5 計算分析，微處理器對兩路信號進行比較，計算出它們之間的差值  $\pm \Delta f$ ，於是便可由公式求得被測長度  $L$  值。在雙頻雷射干涉儀中，「雙頻」起了調制作用，它在被測物體相對於干涉儀靜止時，仍然保留一個 1.5 MHz 的交流信號，被測物體的運動只是使這個信號的頻率增加或減少，因而前置放大器可採用較高倍數的交流放大器，避免了直流放大器的零點漂移問題，這就是雙頻雷射干涉儀抗干擾能力較強的原因。

### 三、儀器規格與特徵

目前市面上的雷射干涉儀使用之光源多為氦氖雷射，依其干涉條紋處理方式分類，可分成單頻和雙頻雷射干涉儀等兩種，其異同點在前面章節已介紹過了，使用者可依需要選用。其他的基本規格主要有量測範圍 (measuring range)、解析度 (resolution)、量測項目等，使用者應依待測量而定，此外選擇雷射干涉儀另一重要的要務便是光學鏡組的選擇，由於使用之鏡組與附件不同，其所能達到之量測功能亦不盡相同，使用者應先確認欲量測之物理參數為何，再來選擇所需之鏡組，一般雷射干涉儀所使用的鏡組大致上有位移、角度、直角度、直線度量測和平面干涉等幾種鏡組，可用於量測線性位移、速度、角度、直角度、直線度、平行度、平面度等參數。

就使用面而言，雷射干涉儀之讀值方法分為計數器顯示或電腦操控兩種，使用者可依將來之用途選購；若對於量測精準度要求特別嚴謹時，則尚需考量雷射波長之準確度、短期穩定性、長期穩定性、線性度等，則應添購環境感測器及其補償裝置。

### 四、應用與用途

雷射干涉儀的用途極為廣泛，最主要有位移、角度、直線度和平面度等之量測，其間最大的差異點再於鏡組和組裝的不同，現分別簡述如下。

- ① 位移量測：本項功能為雷射干涉儀最基本的量測功能，主要係使用線性位移量測鏡組，來量測床台或剛體運動之位移量或速度，其鏡組組裝如圖 5 所示，此項組裝亦可用於速度之量測。

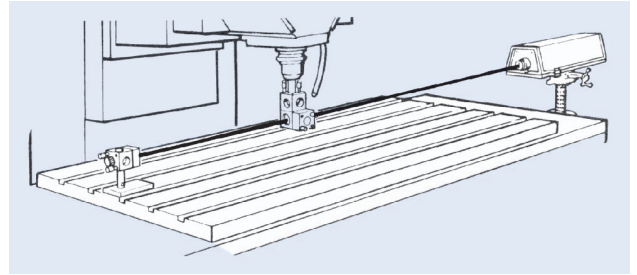


圖 5. 雷射干涉儀量測位移範例。

- ② 角度量測：使用角度位移量測鏡組，可用來量測剛體運動時之角度誤差，如滾轉 (roll)、偏擺 (yaw)、俯仰 (pitch) 等，其鏡組組裝如圖 6 所示，此項組裝亦可用於精密分度盤或旋轉盤之校正。

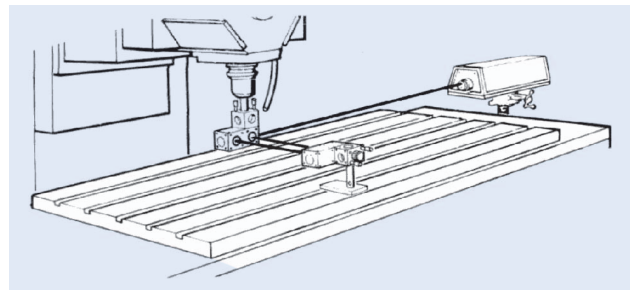


圖 6. 雷射干涉儀量測角度俯仰範例。

- ③ 直線度量測：使用直線度量測鏡組，鏡組組裝如圖 7 所示，此項組合適用於量測剛體運動之直線度，需特別注意的是某些廠牌之直線度量測鏡組，依量測範圍又分為長距離或短距離等兩種鏡組。

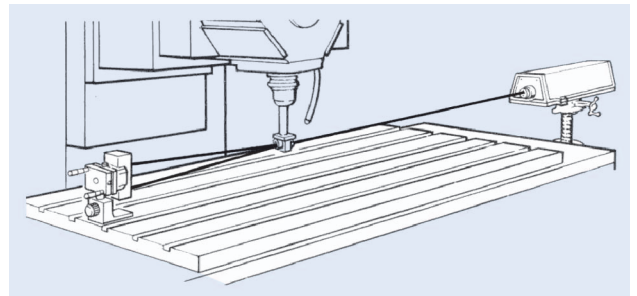


圖 7. 雷射干涉儀量測直線度範例。

- ④ 平面度量測：使用角度量測鏡組，鏡組組裝如圖 8 所示，一般均用於量測平台或床台之平面度，此種組合亦可應用於剛體 (例如直規) 本身直線度之量測。

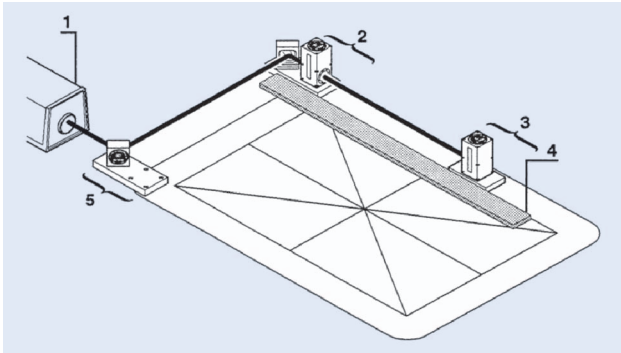


圖 8. 雷射干涉儀量測平面度範例。

- ⑤ 直角度量測：直線度量測鏡組再搭配五角稜鏡則可用來量測軸與軸之間的直角度，鏡組組裝如圖 9 所示。
- ⑥ 其他：上述的應用例指示雷射干涉儀之一般使用例，除了上述的這些量測應用之外，雷射干涉儀亦可用於各類型精密量測儀器之定位，使

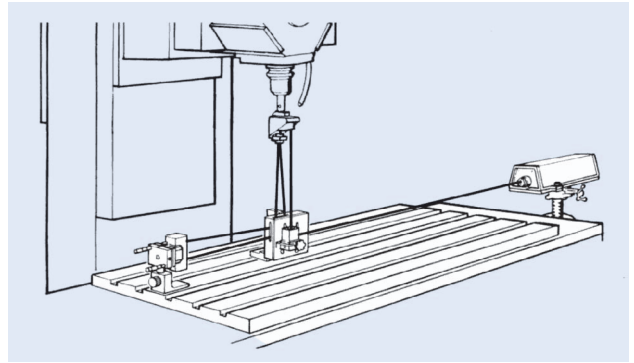


圖 9. 雷射干涉儀量測直角度範例。

用者可參考各廠牌發行的鏡組應用說明書加以應用。

#### 參考文獻

1. D. Musinski, *Interferometric Metrology: Linear and Angular Displacement*, Zygo Corporation.
2. *HP 5528A Laser Measurement System User's Guide*, Hewlett-Packard Company.

作者：方承彥先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任工研院量測技術發展中心長度研究室研究員。

# 雷射都卜勒測距儀

## Laser Doppler Displacement Meter (LDDM)

**關鍵字：**雷射都卜勒、位移量測、運動誤差

**Keywords：** laser Doppler, displacement measurement, motion error

### 一、基本原理

雷射都卜勒測距儀 (laser Doppler displacement meter, LDDM) 為一種根據雷射雷達科技所研發的精密測距儀器，此儀器精度可達次微米 (sub-micrometer)，其量測原理是利用光束射到行進間的反射鏡時會產生都卜勒效應 (Doppler effect)，導致反射後光束頻率的改變，以量取目標物的相對位移。以下將說明都卜勒位移量測的原理。

#### 1. 飛行時間 (time-of-flight) 與蜂鳴雷達量測 (chirp radar measurement)

若時間為  $t$  時，由發射器發射一個雷射脈波，此一脈波若被一離發射器與接收器距離均等於  $D$  的目標物所反射，則其到達接收器時的時間為  $t+T$ ，其中  $T$  等於  $2D/c$ ， $c$  為光速。若希望應用此飛行時間方法進行高精度的量測，則必須使用短的脈波寬度 (pulse width)，且脈波訊號之間隔頻率也需具有高的重複率 (repetition rate)。然而，重複率又受限於脈波於來回行程中傳遞時間的長短，此傳遞時間必須小於  $1/T$ ；否則將無法追蹤或識別每一發射脈波所對應的返回脈波。如此一來，將無法正確地量取脈波於雷射頭與目標物之間行進所花費的時間，因此將無法獲得目標物的位移。

為了克服上述障礙，一種可行的方法是以不同的頻率來標記發射頻率，亦即由發射器發射出不同頻率的脈波列 (pulse train)，如此每個發射脈波所對應的返回脈波就可以被追蹤及偵測。當發射脈波具有  $n$  種不同的頻率時，則脈波發射的重複率將可以增加為  $n$  倍。藉上述的方法，各發射脈波與返回脈波的對應關係即可由不同的頻率加以識別。圖 1 所示為一種蜂鳴雷達技術的位移量測法，此技術為進一步使用連續變頻式的脈波列，再應用外差干涉 (heterodyne) 技術，以獲得相對於脈波來回傳遞時

間的頻率差，此情形目標物的距離 ( $D$ ) 可表示如下式：

$$D = \frac{cT}{2} = \frac{c\Delta f}{2} / \frac{df}{dt} \quad (1)$$

其中  $\Delta f$  為拍頻 (beat frequency)， $df/dt$  為蜂鳴頻率 (chirp frequency)。

#### 2. 都卜勒效應的位移量測

LDDM 的原理類似都卜勒雷達，如圖 2 所示，由雷射頭發出的光束照射在一安裝於目標物上的角隅反射鏡 (corner cube) 之內時，此反射鏡將使被反射之光束平行原來的光束路徑，返回至雷射頭

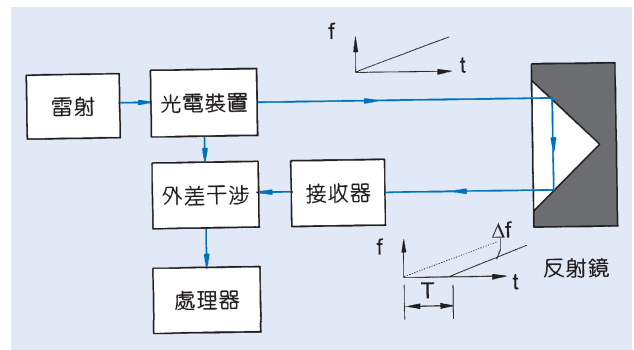


圖 1. 頻率蜂鳴偵測的示意圖。

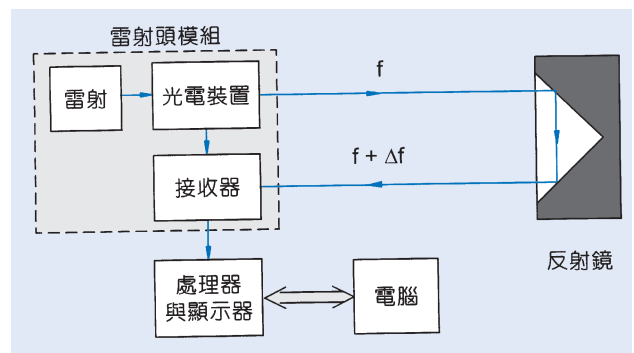


圖 2. 雷射都卜勒測距儀的示意圖。

之接收器。當目標物移動時，將造成雷射光束頻率的漂移，此都卜勒頻率漂移 (Doppler frequency shift) 可表示成以下式子。

$$f = \frac{2f_0}{c} v \quad (2)$$

或

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{2f_0}{c} \Delta x \quad (3)$$

其中  $f$  與  $\Delta\phi$  分別為頻率的漂移量與相位的漂移量， $v$  與  $\Delta x$  分別為反射鏡的速度與位移， $f_0$  為雷射的頻率， $c$  為光速。

藉著一相位偵測器 (phase detector) 可量測相位的變化，此變化與反射鏡的位置具有比例對應關係，當位移量大於半波長 ( $\lambda/2$ ) 時，處理器內之計數器可記錄相位改變之總次數。亦即

$$\Delta\phi_{\text{total}} = 2\pi N + \phi \quad (4)$$

其中  $N$  為  $2\pi$  的個數， $\phi$  為小於  $2\pi$  之相位角。因反射鏡的位移量 ( $\Delta x$ ) 與被反射的光束的相位角呈比例關係，故目標物之位移可表示成：

$$\Delta x = \frac{c}{2f_0} \left( N + \frac{\phi}{2\pi} \right) \quad (5)$$

其中  $N$  的訊號型式為相差四分之一周期的方波 (quadrature square wave)，此訊號可透過計數器記錄脈波數； $\phi$  的訊號型式為類比訊號，此訊號可透過類比數位轉換器轉換成數位訊號。因此，經由微處理器及訊號轉換介面即可讀取計數器與相位角的訊號，並經運算及轉換成位移值。另一方面，由於溫度、空氣壓力與濕度等環境變動因素將引入量測誤差，因此藉處理器也可補償這些因素所引起的誤差。在量測過程中，此儀器並可透過電腦連線，即時擷取量測資料。

## 二、結構示意圖

雷射都卜勒測距儀如圖 3 所示，它是由一個雷射頭模組、一個角隅反射鏡、一個處理器及一組顯示器等部分組成。簡述如下。

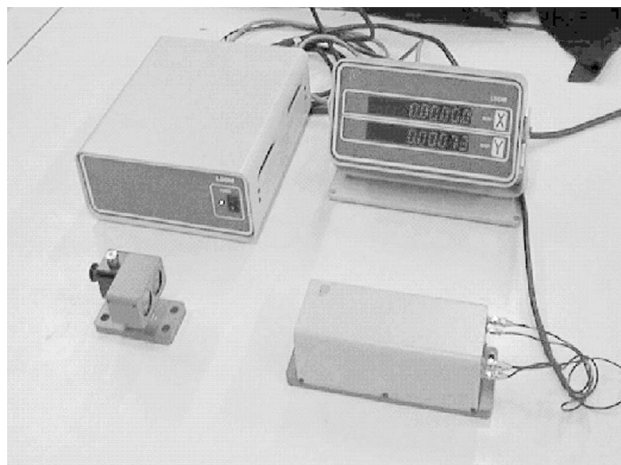


圖 3. 雷射都卜勒測距儀。

### 1. 雷射頭模組

具有雷射光源、光電裝置及接收器。光源為 1 mW 的氦氖 (He-Ne) 雷射，其波長為 632.8 nm；光電裝置可將光源作蜂鳴式調制處理；雷射頭內有接收器使用相位偵測器以量取相對於反射鏡之位移的相位變化。

### 2. 處理器

來自接收器的訊號由相位解調器 (phase demodulator) 轉成 TTL 訊號傳至計數器，再經由微處理機負責計數器及相位角之訊號讀取，位移值的運算及轉換，溫度、壓力及濕度變動的補償，以及與電腦或控制器之間的訊號傳輸。

此外，可應用另一具有雙光束 (dual-beam) 型式的雷射都卜勒測距儀，此儀器其反射鏡須配合採用雙角隅反射鏡。藉此光學設計與相關電路處理後，即可量取運動物體沿相同量測軸的二個距離資料，經運算後可獲得一個位移及一個轉動角度，此轉動角度 ( $\theta$ ) 可由下式求出。

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta L}{d}\right) \quad (6)$$

其中  $\Delta L$  為上述二個量取距離的相差值， $d$  為雙角隅反射鏡之兩尖點的距離。此設計亦可利用所量取的位移及俯仰度 (pitch) 等誤差，即時補償因阿貝誤差 (Abbe' error) 所引起的位置量測誤差。

### 三、儀器規格與特徵

典型的 LDDM 所用的光源波長穩定性為 0.1 ppm，根據飛行時間原理與光學外差干涉作用，以及在電路處理系統中使用解調器及鎖相器 (phase lock) 等技術，可計算出角隅反射鏡的位移達四分之一波長的解析度 (0.16  $\mu\text{m}$ )，若經由電子細分割技術可解析至約 10 nm 級的程度。然而，儀器本身的精度會受環境、電子雜訊及幾何失對準等因素的影響，這些因素對精確度的影響情形可表示成如下的式子。

$$\frac{\Delta x}{x} = \pm \frac{\Delta n}{n} \pm \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \pm \frac{(\langle \Phi^2 \rangle)^{1/2} \lambda}{4\pi x} \pm \theta_a^2 \quad (7)$$

其中  $\Delta x/x$  為精確度， $n$  為空氣的折射率 (refractive index)， $\lambda$  為雷射波長， $(\langle \Phi^2 \rangle)^{1/2}$  為電子雜訊的均方根 (root mean square)， $\theta_a$  為失對準角度 (misalignment angle)。其主要規格條列如下：

1. 精確度：在 1 atm 的大氣壓力及 20 °C 的溫度下，雷射的精確度為 1  $\mu\text{m}/\text{m}$ ，若採精密雷射頭則可達 0.1  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。由於量測精度會受空氣壓力、空氣溫度及材料溫度的影響，因此若使用自動溫度及壓力補償則可達到  $\pm 0.1 \mu\text{m}/\text{m}$  的精確度。
2. 解析度：典型的解析度為 0.3  $\mu\text{m}$ ，高解析設計可達 0.01  $\mu\text{m}$ 。
3. 待測目標之最大速度：典型的 LDDM 具有 3 MHz 的頻寬 (bandwidth)，即相當於可量取目標物的最大速度為 0.9 m/sec。
4. 量測範圍：30 m，最遠可達 60 m。
5. 溫度範圍：15.5 °C 至 32 °C。

此儀器作精密量測或定位具有以下優點：

1. 屬非接觸式量測，與運動平台無機械式連桿，運動零件也不會受到磨耗。

2. 可縮短待測物與儀器之間的距離，即縮短量測空程 (dead path)。
3. 易於將角隅反射鏡放置在儘可能接近量測路徑的位置上，以降低或消除阿貝誤差。
4. 易於維護及保養。

至於其缺點則為精度易受環境影響，包括溫度、壓力、濕度及空氣擾動等因素，此為一般雷射量測的共同問題，因此量測時須考慮環境的特性及變動。

### 四、應用與用途

雷射都卜勒測距儀提供高精密與低價位兼具的次微米定位功能，具有與雷射干涉儀相當的性能、而其價位介於光學尺與雷射干涉儀之間。其應用領域包括 CNC 工具機、三次元量床 (coordinate measuring machine)、X-Y 平台 (stage)、步進機 (stepper)、磁碟機及其他精密的量測機器的位移量測或校正 (calibration)。

### 五、儀器使用安全事項

1. 本儀器列為 Class II 雷射產品，請勿以眼睛凝視光束。
2. 本儀器雷射頭模組內部有高壓電源，當防護蓋被打開時，操作者將暴露於高壓電中。打開電源前，請確認雷射頭模組與處理器之間各電線是否均已接妥。

### 參考文獻

1. 范光照, 張郭益, 精密量測及機件檢驗, 高立, 302 (1996).
2. C. P. Wang, *Motion Control*, 6 (1991).
3. C. P. Wang, *Lasers & Optronics*, 9, 69 (1987).

作者：范光照先生為英國曼徹斯特大學機械工程博士，現任國立台灣大學機械系教授。

# 經緯儀

## Theodolite (Transit)

**關鍵字：**經緯儀、數位經緯儀、陀螺指北儀、全測站、電子經緯儀座標量測系統

**Keywords：** theodolite (transit), digital theodolite, gyrocompass, total station, electronic coordinate determinate system (ECDS)

### 一、基本原理

從一觀測點分別觀測兩個或兩個以上的空間點，此觀測點與各空間點連線方向之度量，均可從通過此觀測點之水準面，以水平角 (horizontal angles) 及垂直角 (vertical or zenith angles) 來表示，如圖 1。經緯儀，基本上是用來量測水平角及垂直角的儀器，西元 1831 年，美國人 William Young 研製出第一具經緯儀，稱為「轉鏡儀」(transit)，因

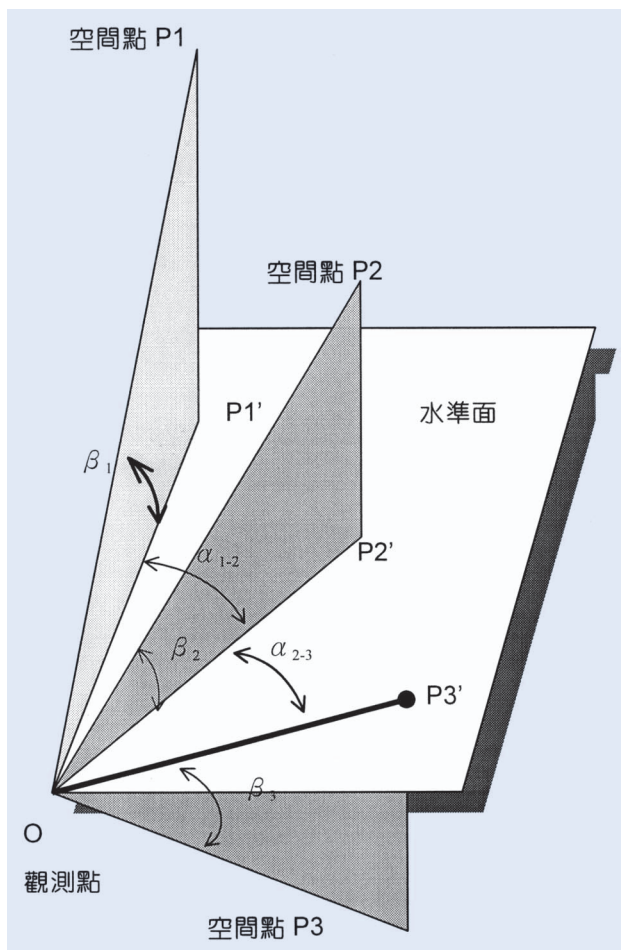


圖 1. 水平角及垂直角示意圖。

為其望遠鏡具備繞水平軸「轉動」的功能，在歐洲，起初將這種測角儀器稱為「轉鏡經緯儀」(transit theodolite)，後來歐洲人把舊型及新發展的此種測角儀器統稱為「經緯儀」(theodolite)，沿用迄今。經緯儀的組成，主要有二組測角度盤、一具觀測望遠鏡、角度讀數系統及其他附件等，其中望遠鏡及度盤組合關係如圖 2 所示。

### 二、經緯儀結構示意圖及說明

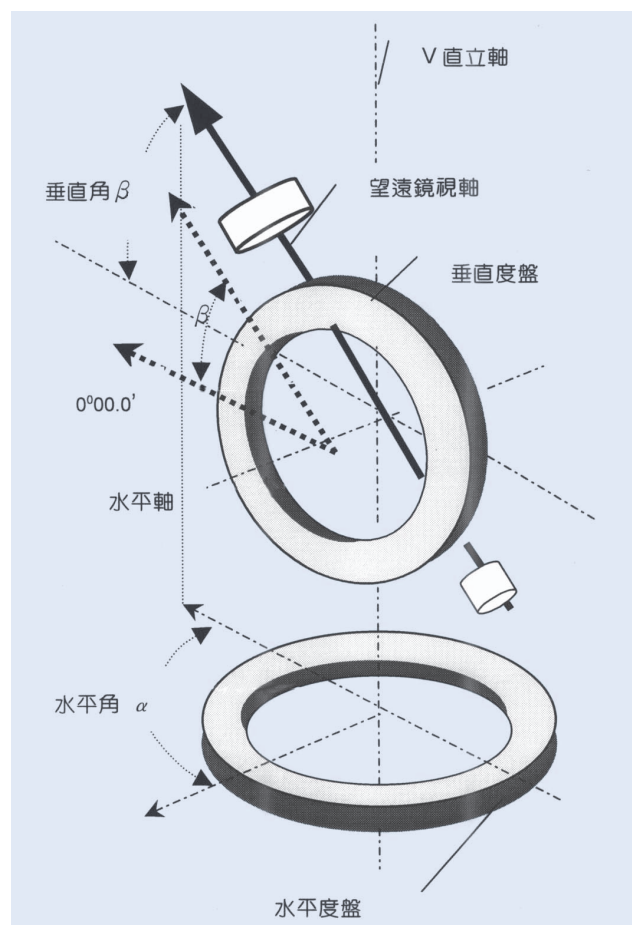


圖 2. 望遠鏡及度盤組合關係。

經緯儀結構示意如圖 3 所示，圖中重要組成功能則說明如下。

### 1. 度盤 (circles)

一經緯儀之度盤有水平度盤及垂直度盤，二者互相正交且可以繞其中心軸旋轉，水平度盤其旋轉軸稱為直立軸 (vertical axis)，垂直度盤其旋轉軸稱為水平軸 (horizontal axis)，在測角之前，水平度盤必須微調直到水平面上為止，此一作業，一般以旋轉度盤基座週邊的三個踵定螺旋，同時觀看度盤基座上的水準管氣泡是否居中來調校，當望遠鏡轉動時，此二度盤圓周一圈精密的刻度可用來度量望遠鏡視軸轉動所相對之水平角及垂直角讀值。

依功能分，度盤有開放式及密閉式二種型式，在早期，度盤通常為金屬製且為開放式設計，觀測者可直接看到度盤上的刻度，並且藉度盤上的游標 (vernier)，精確讀出角度讀值。後來，度盤改良為玻璃製且為密閉式設計，觀測者無法直接看到度盤上的刻度，得藉著內建顯微光學系統及放大目鏡精確讀出角度讀值，因此，此種經緯儀另被稱為光學讀數經緯儀 (optical-reading theodolite)，由於玻璃度盤上刻劃可較金屬度盤精密，度盤直徑可相對減小，使經緯儀更加輕巧，同時測角精確度較金屬度盤提高許多，通常透過測微計可讀到「秒」，其中垂直度盤更設有自動補償器 (automatic compensator) 等裝置，可建立一準確之水準面，做為垂直角度量的基準。垂直度盤是以天頂為 0 度，水準方向為 90 度及 270 度。

最近十年所發展出的電子數位經緯儀 (electronic digital theodolite)，則使用光電感應式度盤系統，它是由二片相疊之平行玻璃圓盤組成，其中下盤 (又稱轉動盤，rotor) 上有徑向分劃的黑色條碼及透光間隙，其刻度可達 20,000 條以上，上盤 (又稱固定盤，stator) 則有對應於下盤之同型條碼，當望遠鏡旋轉則帶動下盤轉動，此時下盤下方有一發光二極體 (light-emitting diode, LED) 會投射一束準直光透過上下盤之條碼，由上盤上方的影像感應器接收，由於上下盤相對轉動時，其上之條碼交互重疊，被投射的準直光束產生強度變化，此種疊紋與光之交互作用，光學原理上稱為疊紋

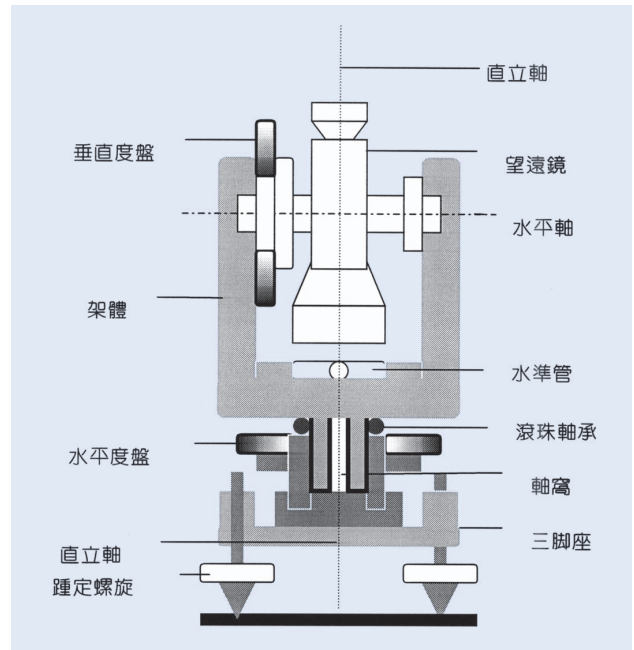


圖 3. 經緯儀結構示意圖。

(moire) 效應，影像感應器接收疊紋效應之光束後，把這種光信號轉換成電子信號，再經內建之微處理器把電子信號轉換成數位值，顯示在儀器面板上，或自動儲存在記憶體內。

### 2. 望遠鏡

經緯儀對目標的觀測，是由觀測者經由安裝在水平軸上的一具望遠鏡來觀測，此望遠鏡的視軸 (line of sight) 與水平軸互相正交且可以繞此軸旋轉，望遠鏡的成像原理，是將目標的光線透過物鏡 (object lens) 成像在十字絲 (reticle or cross hairs) 平面上，再由目鏡 (eyepiece) 放大觀測之，物鏡與十字絲平面間的調焦鏡 (focusing lens) 可將不同距離之目標成像在十字絲平面上。十字絲中心與物鏡光心 (principal point) 之連線稱為視軸，視軸為望遠鏡照準的依據。望遠鏡的放大倍率係指物體放大成像的尺寸除以肉眼裸視同物體的尺寸，不過公稱望遠鏡的放大倍率係指物鏡與目鏡的焦距比。

### 3. 角度讀數系統

當觀測者經由望遠鏡完成目標觀測後，可由度盤讀數裝置讀取 (或自動記錄) 對應的水平角及垂直角，依照度盤種類，其讀數系統可分為游標讀數、

光學讀數與光電感應數位讀數等三種，說明如下：

- (1) 游標讀數：游標為法國人 Vernier 發明，其原理為：設一游標有  $n$  格，最小刻度間隔為  $N$ ，度盤上最小刻度間隔為  $L$ ，如製造一游標使游標總長  $n \cdot N$  等於度盤上  $(n - 1) \cdot L$  的長度，如此便可讀至最小讀數為  $a$ ， $a = L/n$ 。
- (2) 光學讀數：光學讀數系統基本上是在儀器內部有一光學顯微系統 (microscope)，此顯微系統是由稜鏡與平行平面玻璃等一連串反光及折光鏡組與度盤組合，使度盤、測微尺同時成像在望遠鏡外側的一具目鏡上，大多數此種經緯儀座上另設反光鏡及內部照明以便觀測者可在光學顯微系統明亮狀況下讀數。
- (3) 光電感應數位讀數：光電感應數位讀數之經緯儀目前約有 20 餘種，讀數顯示範圍由 0.1 至 30"，相較於游標讀數與光學讀數，其特點在：
  - ① 度盤讀數可經由儀器上之鍵盤歸零或設定成任意值，此一功能便於正反鏡量測讀數之計算。
  - ② 順、逆時鐘方向皆可預設成角度遞增，複測時可設定成自動累加。
  - ③ 數位顯示讀數，其讀數可即時透過內建或外接微處理機記錄或計算，提高後續作業之效率。
  - ④ 數位顯示讀數，人為讀數之不可靠度大為降低，且現場量測速度增加。

光電感應數位讀數之經緯儀，由於具上述之優點，未來將快速取代游標讀數與光學讀數經緯儀。

### 三、儀器規格

經緯儀之規格詳列於表 1。

### 四、應用與用途

使用光學讀數經緯儀，可充分發揮經緯儀的測角功能，例如三角測量 (triangulation) 可在地球表面上依需要建立大小區域的三角網，各三角點的平差值及座標則是用經緯儀的測角資料等計算出，導線測量 (traversing) 則是建立帶狀區域的控制網，

各控制點的座標也是用經緯儀的測角資料等計算出。在工業上光學讀數經緯儀則應用在光學配置 (optical tooling) 上，光學配置應用經緯儀的自準直 (autocollimation) 與準直 (collimation) 功能，可執行大型機械或精密設施之組裝校準與定位檢測。當望遠鏡目鏡之十字絲經照明同時將望遠鏡焦距調到無窮遠，物鏡可投射出一束有十字絲影像的平行光，此時如果調整望遠鏡使視軸線與一鏡面恰好成 90 度交角，反射回來的十字絲影像會與原十字絲重合，稱為自準直。自準直最重要的應用就是快速且精確找到一基準面的法線。

當望遠鏡 A 之自準直目鏡將十字絲照明同時將焦距調到無窮遠，物鏡可投射出一束有十字絲影像的平行光，此時如果將望遠鏡 B 焦距調整，並同時調整二望遠鏡 (或只調整其中之一) 視軸線，使望遠鏡 A 投射出之負十字絲影像成像在望遠鏡 B 之十字絲面上並與該十字絲重合，稱為準直，準直代表二望遠鏡視軸線平行。準直最重要的應用就是快速且精確將一基準線平行延長或將一基準線平行傳遞給下一測站。經緯儀如裝設自準直目鏡就具有自準直或準直功能，自準直目鏡通常是將一光源通過一個負十字絲 (negative reticle) 使該十字絲影像經過一個與視軸成 45° 的光線分裂器 (beam splitter)，折射到物鏡投射出一束有十字絲影像的平行光，自準直目鏡使經緯儀具準直功能，在工業測量上至為實用。其次，光學讀數經緯儀與陀螺指北儀 (gyro compass) 組合成的陀螺經緯儀可即時精確測定子午線北，陀螺經緯儀尤適用坑道或室內測北，此為衛星定位系統 (GPS) 不及之處。

近年來，電子數位經緯儀發展成功，由於其讀數系統的自動化，可提升讀數之工作效率，降低人為讀數之誤差。更值得注意的是：由於電子數位經緯儀具內建之微處理器 (microprocessor) 可儲存大量的量測值，又可外接個人電腦工作站，透過專業程式庫，可做即時的資料處理與運算，例如電子數位經緯儀結合電子測距 (EDM) 組成的全測站 (total station) 量測系統可做測角、測距、測座標及數據即時分析；數臺電子數位經緯儀及個人電腦組成的電子經緯儀座標量測系統 (electronic coordinate determinate system, ECDS)，可建立一精確之座標

表 1. 經緯儀規格。

規格 / 儀器種類	光學讀數經緯儀	電子數位經緯儀	說明	
測量標準差	0.8"	0.5"		
望遠鏡	放大率 視角 最短聚焦距離	18×-32× 29 m/1000 m 1.5 to 2.2 m	8×-59× 20 m/1000 m 0.51 m	可換裝目鏡 用縮焦鏡可再短
度盤	度盤直徑 水平度盤 垂直度盤 最小刻劃 測微計讀數	80 to 90 mm 70 to 80 mm 20' 1"	0.1" 0.03"	密閉式 密閉式 解析度
自動垂直指標(補償器)	設計精度 補償範圍	0.3" 2' to 5'	0.1" 3.2"	
傾斜軸高	170 to 270 mm	200 mm		
水準管靈敏度	20"/2 mm	20"/2 mm		
重量	6 to 7 kg	7 to 8 kg	不含箱	
溫度	儲存溫度 量測溫度		-40 °C to + 70 °C -20 °C to + 50 °C	
其他	自準直目鏡 讀數顯示 資料記錄及儲存 讀值顯示 電源供應 電池 俯視最大角	可換裝 無 無 無 6 V (準直量測用) 1.5 V × 6	可換裝 數位顯示 7 到 8 位數 插入式記錄器或終端機連線 高程、座標或預設角 12 V DC 12 V 2Ah NiCd -50°	

系，不但可以藉各經緯儀視軸線交會法 (intersection method) 及標準尺計算被測點空間座標，更可以利用原設程式運算能力即時量測出任何形狀工業產品之加工尺度。以經緯儀檢測，具有非接觸、可攜性及高精度之優點，除傳統的量測作業外，工業產品之加工尺度及精密設施定位量測是它發揮的另一方向。

#### 參考文獻

1. B. F. Kavanagh, *Surveying*, 3rd Edition, Prentice Hall (1997).
2. P. Kissam, C. E. *Optical Tooling*, McGraw-Hill Book Company, Inc. (1962).
3. H. O. Trutmann, *The Theodolite and Its Application*, Wild Heerbrugg.

作者：焦經剛先生為美國南加州大學土木工程碩士，現任中山科學研究院副研究員。

# 萬能測長儀

## Universal Measuring Machine

**關鍵字：**萬能測長儀、阿貝原則

**Keywords：**universal measuring machine, Abbe's principle

### 一、基本原理

萬能測長儀為端點標準量測儀器的代表之一，主要原理係利用其內置之線性光學尺（或其他精密定位標準器，如雷射干涉儀…）作為標準，用以直接量測或比較量測待測件內外徑尺寸或螺紋特性之精密儀器，是最符合阿貝原則（Abbe's principle）之量測儀器之一，無論其光學尺或待測件之安裝均需符合阿貝原則，亦即用以量測之標準必須在量測軸的延長線上，以便獲得最佳之量測結果；此外，萬能測長儀亦可作為校正分厘卡、缸徑規等小型端點量具之標準儀器。

### 二、結構示意圖

圖 1 所示為一通用型之萬能測長儀架構示意圖，其構造一般由剛性床台、多向承載台、滑動基座、光學尺和其他選購附件等所構成，以下即針對幾項重要組件之功能與特性分別敘述。

- ① 剛性床台：如圖 1(a) 所示，主要是提供一穩定平直之參考直線（軌道），供承載台和滑動基座作直線運動，使得操作者得以在導軌上之任一位置執行量測動作，由於需克服承載台與滑動基座運動時之重心變化，維持其穩定性，故其剛性便極為重要，其材質多為鑄鐵或花崗岩；通常此床台係以三點支撐方式立於如圖 1(b) 之鋼製腳架或花崗岩平台上，以方便調整其水平傾角；床台之一端通常會有一如圖 1(c) 之固定

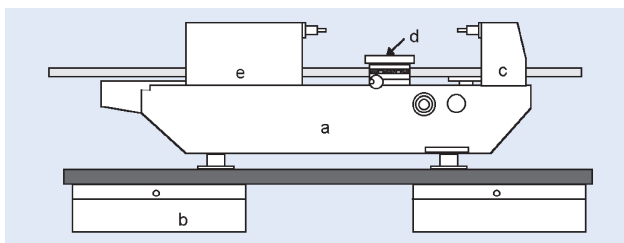


圖 1. 萬能測長儀示意圖。

基座，作為量測之基準點，有些廠牌的固定基座亦可在小範圍內移動。

- ② 承載台：如圖 1(d) 所示，主要是用以承載待測件以便於量測，通常設計為具有多軸向之調整功能，如橫向、縱向平移與滾轉（roll）、俯仰（pitch）、偏擺（yaw）等角位移，有時當待測件過長或過大時會另外增加一輔助支撐點，使用者在量測取值前應將待測件調整至最佳方位，以求得最佳之量測值，一般的原則是量測最小的外徑或最大的內徑，而這些調整一般均為手動的，但亦有些新機種採用電控調整，頗為方便。
- ③ 滑動基座：如圖 1(e) 所示，主要是用以設定量測之另一端點，其測頭依待測件量測點（面）之種類（如平面、弧面和柱面等）需要而有許多的形式（如圓形、球形和平面測頭等）；基座上一般均附有粗調與微調兩個調整鈕，粗調鈕係作為初步定位及快速移動之用，微調鈕則用以確認量測壓力及最佳量測值用，此外亦有切換內徑或外徑量測及設定量測壓力的功能。
- ④ 光學尺：主要是用以讀取量測值用，其裝置的位置常因廠牌形式不同而有所差異，有些測長儀係裝置在床台上，亦有些是裝置在滑動基座上，但不管其位置如何，均需儘量符合阿貝原則。一般測長儀用光學尺之刻畫間距多為數  $\mu\text{m}$  左右，再用光學或電子方式作細分割，以使其解析度提高至次微米或更高之等級，而近年來由於干涉儀的價格較具競爭性，亦有廠商改用雷射干涉儀作為定位裝置，以提高其解析度及準確度，雖然如此但亦須注意其是否符合阿貝原則。
- ⑤ 其他附件：由於測長儀之用途極廣，可配合各種不同的夾治具和附件，得到各種不同的量測結果，如搭配三線規可用來量測外螺紋，配合雙向測頭可用來量測內螺紋或外徑等。

### 三、儀器規格與特徵

由於萬能測長儀屬於貴重之精密量測儀器，且各廠牌所提供之規格也不盡相同，因此在選購萬能測長儀時需特別注意，以免買到不合用之儀器，萬能測長儀最基本的規格是量測範圍 (measuring range) 與最小解析度 (resolution)，此兩項規格為萬能測長儀所具有之基本性能，目前市售之萬能測長儀解析度多半是  $0.1 \mu\text{m}$  等級，也有  $0.01 \mu\text{m}$  等級，量測範圍則有相當多款式，使用者應依所欲量測之尺寸公差選定合理之範圍；但良好的解析度並非絕對代表儀器之量測能力，必須輔以其他之量測特性，如合理的精密度 (precision)、準確度 (accuracy)、重覆性 (repeatability) 和再現性 (reproducibility) 等性能，方能確保量測之品質；近年來也有部份廠商直接提供量測之不確定度 (uncertainty)，亦是相當好之評估數據；另外，有些場合必須使用萬能測長儀之直接量測功能，此時其光學尺或定位系統之線性度 (linearity) 便顯得非常重要。若是對量測精度要求特別高者，則可選用採雷射干涉儀定位之萬能測長儀，除可獲得較佳之量測能力外，亦可提升其量測標準之追溯等級。

除量測性能外，萬能測長儀的使用面積 (area usage)、總重量 (weight) 和環境條件 (environment) 等需求亦為儀器選購時之考慮因素，尤其是環境條件影響長度量測品質至巨，忽略不得。此外，量測壓力 (measuring force) 亦會嚴重影響量測品質，一般的萬能測長儀均具有雙向切換之量測壓力以便作內徑或外徑量測。有時並非所有廠商均會主動提供這些資料，使用者可斟酌需要向廠商索取。

此外，選購之附件及標準件亦是選擇萬能測長儀時須十分注意的，通常選購附件及標準件愈齊全則代表其量測之擴充性愈大，使用者需依其設定之量測功能與需求，決定其選購附件及標準件之種類和數量，同時亦需考慮這些附屬品與原儀器之相容性或配合度，以免產生多餘之誤差。

近年來由於電腦科技與自動控制技術之突飛猛進，使得萬能測長儀之功能愈來愈強大，使用也愈來愈便利，例如有些萬能測長儀已具備自動調整待測件準直與傾角之功能，除可節省大量的量測時間外，亦可提高量測之精確度；而量測數據處理的電

腦化亦使得繁雜的量測工作變得更具人性化，但在方便的同時使用者也切勿忽略了驗證其可靠性。

### 四、應用與用途

萬能測長儀之用途極為廣泛，主要可用來量測①內徑 (環規、卡規…)、②外徑 (塞規、標準桿…)、③內螺紋 (螺紋環規)、④外螺紋 (螺紋塞規) 和⑤小量具 (分厘卡、量表…) 之校正等，而這些應用除可利用其本身之光學尺直接量測取值外，亦可搭配標準塊規或環規等標準器作比較量測，使用者可視需要選用，實用上以比較量測所得之數據準確性較高，而在量測時，有時需配合其他附件或夾治具使用，以下即為幾種萬能測長儀之應用範例：

- ①內徑量測：萬能測長儀可用來量測環規、界限樣規及小孔等之內徑，一般小型待測件使用多向承載台即可，若待測件尺寸過大，則需配合輔助支架支撐，圖 2 所示即為使用一對單向測頭量測標準環規內徑之應用例；此外，有時亦可使用單一個雙向測頭來量測內徑，但準確度可能稍差，使用者可依需要選擇適當之測頭。
- ②外徑量測：萬能測長儀可用來量測標準長塊規、針規、塞規及標準桿等之外徑，若配合特殊夾具亦可量測錐度量規，一般小型待測件使用多向承載台即可，若待測件過大，則需配合輔助支架支撐，且須注意支撐點之位置需為艾里點 (Airy point)，以得到最佳之量測結果，圖 3 所示為塞規外徑量測之應用例。
- ③內螺紋量測：萬能測長儀可使用雙向測頭來量

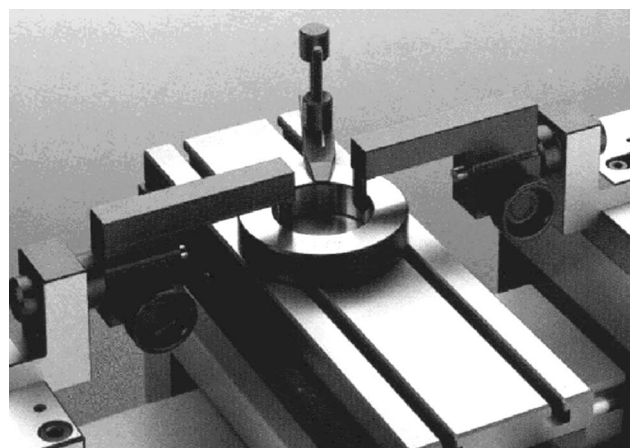


圖 2. 萬能測長儀之內徑量測。

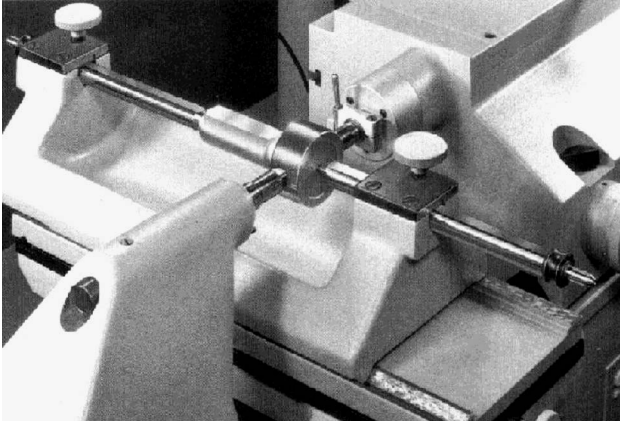


圖 3. 萬能測長儀之外徑量測。

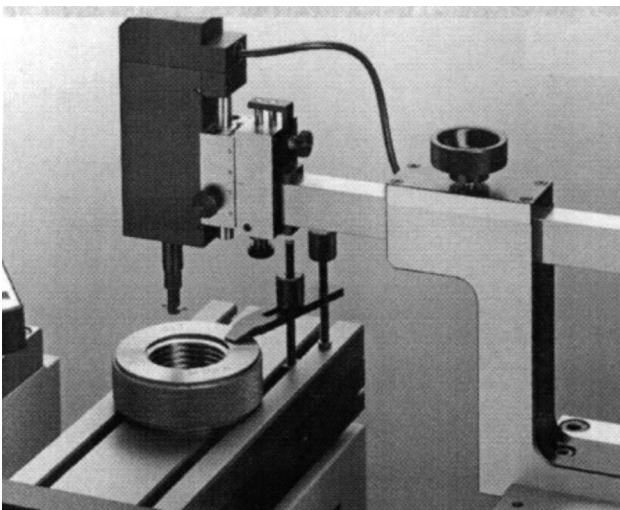


圖 4. 萬能測長儀之內螺紋量測。

測螺紋環規和界限樣規等內螺紋之各項參數，但此項量測通常無法由顯示器直接顯示，需經過數學方程式換算內螺紋之各項參數，計算公式可參考各廠牌萬能測長儀之使用手冊，有些較新型的儀器亦附有電腦輔助計算功能，可輕易量測得所須之各項參數，圖 4 所示為內螺紋量測之一種應用例。

- ④ 外螺紋量測：萬能測長儀亦可用來量測螺紋塞規和樣規等外螺紋之各項參數，一般係使用雙平面測頭再配合三線規來量測，亦有使用單一雙向測頭量測，其結果均需經過數學方程式計算分析後方能得到，計算公式可參考各廠牌萬能測長儀之使用手冊，有些較新型的儀器亦附有電腦輔助計算功能，可輕易量測得所須之各項參數，圖 5 所示為外螺紋量測之一種應用例。

- ⑤ 小量具校正：萬能測長儀亦可用於長度小量具(如分厘卡、缸徑規和量表等)的校正，使用上極為方便且快速，但限於儀器投資的經濟效益問題，通常小量具之校正僅是其附屬功能之一而已，並非作為其唯一功能，圖 6 所示為使用萬能測長儀校正分厘卡之應用例。

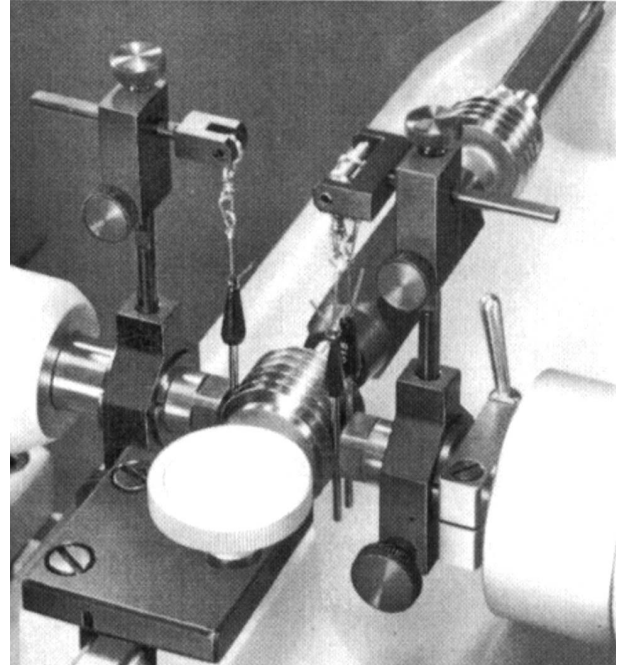


圖 5. 萬能測長儀之外螺紋量測。

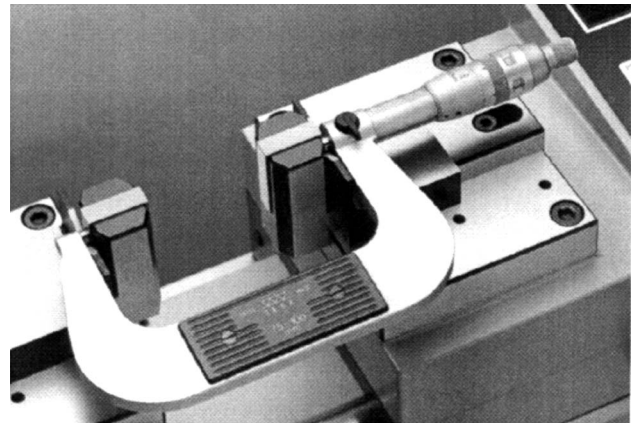


圖 6. 萬能測長儀用於小量具校正。

#### 參考文獻

1. 孫葆銓, 機械準確性之基礎, 適齊企業股份有限公司.
2. *User's Manual*, SIP Corporation.

作者：方承彥先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任工研院量測技術發展中心長度研究室研究員。

# 光學投影機

## Optical Projector

**關鍵字：**光學、輪廓、投影機、自動尋邊器

**Keywords：** optical, profile, projector, flip-up edge sensor arm

### 一、基本原理

光學投影機又稱輪廓投影機 (profile projector) 或簡稱為投影機。圖 1 所示即垂直型投影機，係利用光學原理將工件之輪廓經各種透鏡及反射鏡投影，並放大成各種倍數後，投影到半透明的投影幕上，再配合各種標準圖片，作非接觸式的量測。其投射路徑如圖 2 所示，(a) 為垂直型投影機，(b) 為落地型投影機，(c) 為水平型投影機。投影機於燈炮通電後，光線經過濾熱鏡片、透鏡組、工作台平板、反射鏡、投影幕等，將工件輪廓或表面經放大後並投影至半透明之投影幕上。通常必須調整工件與投影透鏡間至適當的焦距，使投影幕至最清楚的狀況，以確保工件量測的準確性。目前市面上可見到光學投影機之最小讀值可達  $0.01^\circ$  及  $1\ \mu\text{m}$ 。



圖 1. 投影機。

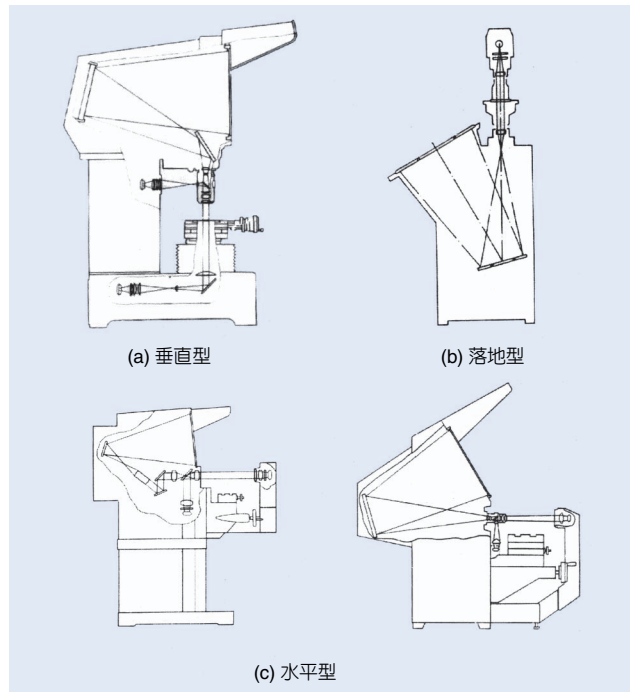


圖 2. 投影機之量測系統。

### 二、結構示意圖

光學投影機的構造，可由三個不同量測系統而有不同構造。若以垂直型投影機為例，其構造如圖 3 所示，其投影透鏡可由  $5\times$  至  $100\times$  的放大倍率，而常用者有  $10\times$ 、 $20\times$ 、 $50\times$ 、 $100\times$  等四種。量測工件則可用輪廓照明或表面反射照明。附件包括迴轉式裝物台、分厘頭 (機械式或光學式)、顯示器、V 型塊、中心頂架、各種倍率之透鏡 (可隨意更換)、投影幕、標準圖片、玻璃尺和照相設備等。

### 三、儀器規格與特徵

光學投影機其特徵為使用方便，對工件可作長度和角度量測外，在倍率大小選用之轉換也極為方便，目前輸出可用數字顯示甚至可作 SPC。光學投影機依外形可區分成垂直型、落地型、水平型等三

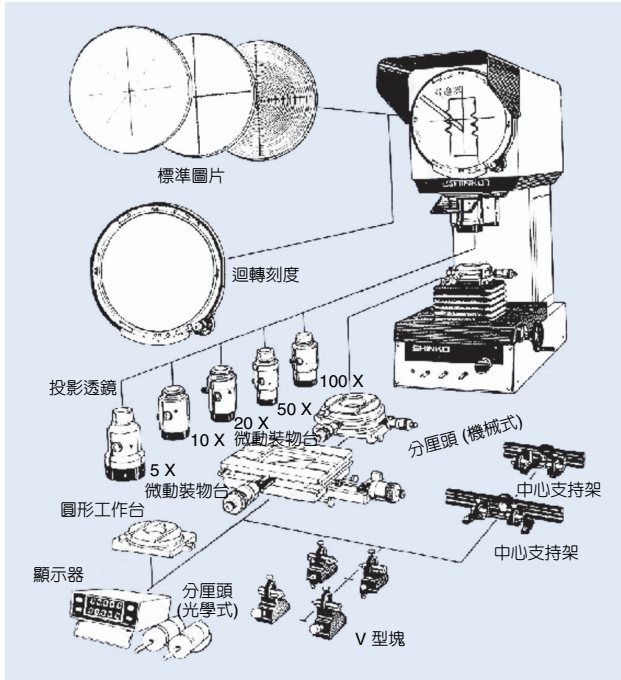


圖 3. 垂直投影機之構造圖及附件。

種。其規格可依銀幕大小、載物工作台行程、放大倍率等三種主要區別，銀幕大小從 300 mm 至 1000 mm 之間，載物工作台行程從 25 mm 至 100 mm (Y

軸) 或 200 mm (X 軸)，鏡頭放大倍率從 5×、10×、20×、25×、31.25×、50×、100× 等七種。

#### 四、應用與用途

光學投影機是應用放大作用，可作長度、角度、形狀、表面等檢驗工作。屬非接觸式、二次元量測，尤其適合彈性、脆性材料之量測。除可利用照相、二次元座標處理機、數字顯示器、光眼讀取數據或自動尋邊器 (flip-up edge sensor arm)、印表機等周邊設備，並可用 RS-232 與電腦連線以達迅速、確實及統計分析等優點。唯對透明或半透明物體量測效果稍差。

#### 參考文獻

1. 精密量具與機件檢驗, 范光照, 張郭益編著, 高立圖書有限公司出版, 三版 (1997).
2. 廠商目錄: Starrett, Topcon, Mitutoyo, Deltronic 等.

作者：張郭益先生為英國曼徹斯特大學機械碩士，現任國立虎尾技術學院機械製造工程科副教授兼主任。

# 工具顯微鏡

## Toolmaker Microscope

**關鍵字：**目鏡十字線、放大倍率

**Keywords：** eyepiece reticle, magnification

### 一、基本原理

工具顯微鏡又稱工具製造用顯微鏡，是一種工具製造時所用高精度之二次元座標量測儀，如圖 1 所示。它是利用光學原理將工件成像經物鏡投射至目鏡，即藉著光線將工件放大成虛像，再利用裝物台與目鏡十字線 (eyepiece reticle) 等輔助，以作為尺寸、角度和形狀等量測工作，可作為檢驗非金屬光澤之工件表面。此種儀器在立柱上裝有一顯微鏡，鏡頭放大倍率從 10 倍至 100 倍間等數種倍率，工具顯微鏡之量測系統如圖 2 所示。光源 (燈炮) 通電後，光線依次經過二個透鏡濾熱鏡 (片)、鏡徑薄膜、透鏡、反射鏡、裝物台、物鏡、反射鏡、目鏡等，工件與物鏡間的距離，隨著放大倍率和工件厚薄，可利用對焦旋鈕調至理想位置。

### 二、結構示意圖

工具顯微鏡的詳細構造如圖 3 所示，除圖 2 所示光學系統外，尚有照相設備、螢幕顯示器、數字顯示器、表面照明等設備。物鏡放大倍率為 3×，量測範圍為 73 mm，目鏡放大倍率固定為 10×，物

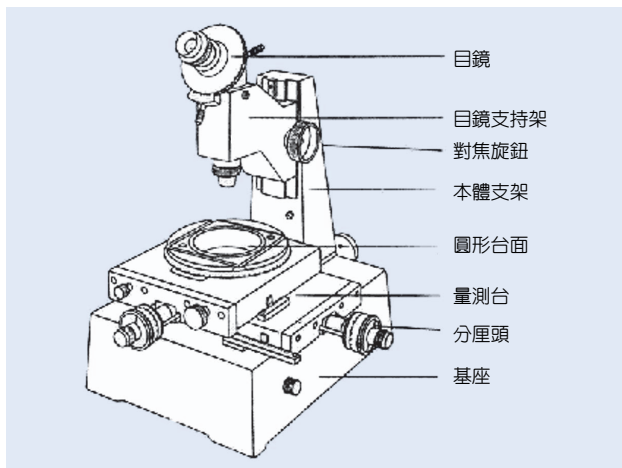


圖 1. 工具顯微鏡。

鏡可更換 5×、10×，形成 30×、50×、100× 等三種不同倍率供選用。目鏡上有許多標準片，如十字線、同心圓、螺紋牙形等網線，可依量測狀況選用如圖 4 所示。CNS 11276 為我國國家標準之工具顯微鏡有規範。量測尺寸時，可藉著分厘頭之移動量得知其長度大小，如圖 5 所示，亦可藉著圓形台面旋轉得知角度大小。目前市面上可見到工具顯微鏡之最小讀數可達 0.1  $\mu\text{m}$  及 0.1°。

### 三、儀器規格與特徵

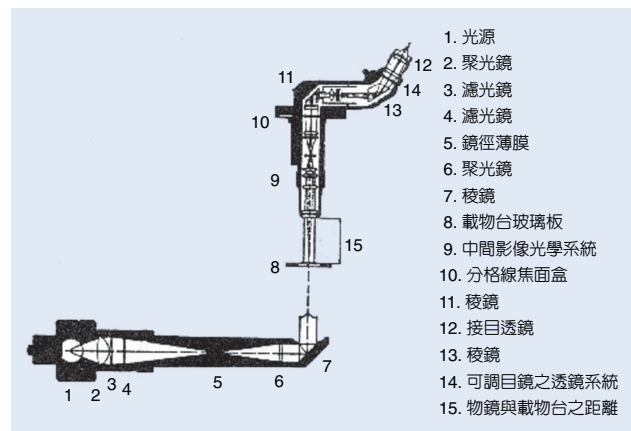


圖 2. 工具顯微鏡之光學量測系統。

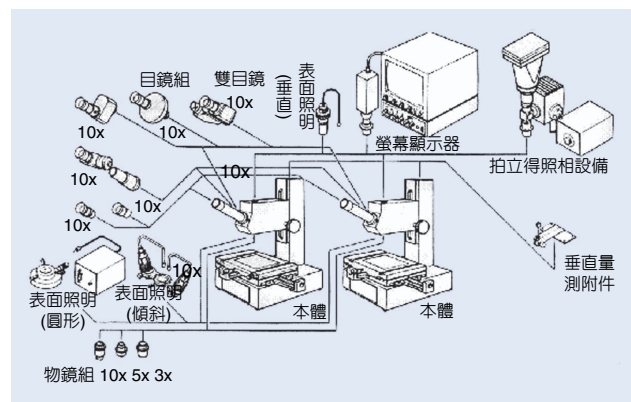


圖 3. 工具顯微鏡之詳細構造圖。

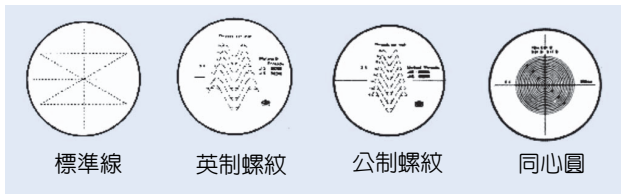


圖 4. 目鏡之標準片。

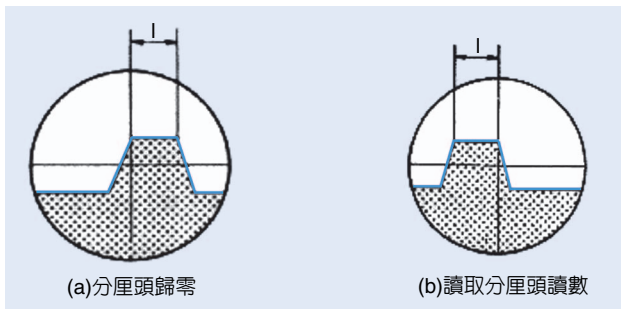


圖 5. 尺寸量測。

工具顯微鏡之規格由鏡頭放大倍率、單雙眼鏡筒、顯微鏡上下移動量、工作台移動量等情況所決定。鏡頭放大倍率從 10 倍到 100 倍之間，顯微鏡上下移動量在 50 mm 至 180 mm 之間，工作台 X、Y 軸移動量在 100 mm × 50mm 至 190 mm × 160 mm 之間。

#### 四、應用與用途

工具顯微鏡又稱工具製造用顯微鏡，是一種工具製造時所用高精度之二次元座標量測儀。工具顯微鏡最大缺點為單眼，因此觀察時易造成視覺疲

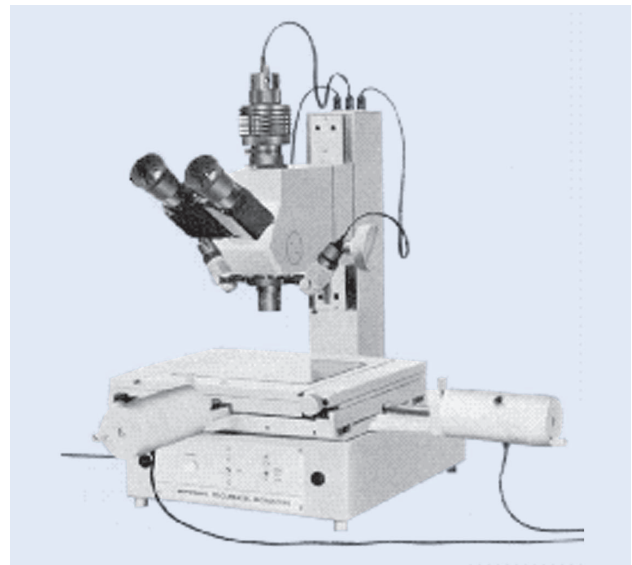


圖 6. 雙眼工具顯微鏡。

勞。目前有些廠商已改用雙眼，以矯正此缺失。較新型的則接有攝影機系統，可將畫面呈現於螢幕上觀察。

#### 參考文獻

1. 精密量具與機件檢驗, 范光照, 張郭益編著, 三版, 高立圖書有限公司 (1997).
2. 廠商目錄: Nikon, MIYUTOYO, OLYMPUS, TOPCON, Union 等.

作者：張郭益先生為英國曼徹斯特大學機械碩士，現任國立虎尾技術學院機械製造工程科副教授兼主任。

# 真圓度量測儀

## Roundness Measuring System

**關鍵字：**最小平方圓、最小環帶圓、最大內切圓、最小外接圓

**Keywords：**least squares circle, minimum zone circle, maximum inscribed circle, minimum circumscribed circle

### 一、基本原理

真圓度量測儀是藉收錄器之探針在待測件圓周作運動，將所產生的微小位置變化轉換成電子信號。同時，可由感測信號同步繪出圖形、或由電腦螢幕直接顯示量測圖形，並經微處理器或電腦作分析計算，以顯示出其相關參考圓之圖形和數據。

真圓度通常以失圓 (out of roundness) 尺寸大小表示之，即圓形工件之輪廓形狀與理想形狀的偏差量表示。換言之，即為二個能包絡圓形工件輪廓形狀的同心圓之最小半徑差異。從量測演進而言，有三種表示真圓度的方法，以量取工件之直徑、三點或半徑等，以其所量取之尺寸大小作為分析數值之依據。

#### 1. 直徑法之真圓度

係以工件圓形部分被夾持在二平行量具之測砧 (如分厘卡) 間，而求取二直線 (測砧) 間的距離，即以工件直徑最大值與最小值之差異為真圓度大小。

#### 2. 三點法之真圓度

係以量取工件圓形部分支持二點 (於 V 型塊上) 之垂直平分線上輪廓的移動量大小為真圓度大小。以上二種方式，其量測儀器本身的精度較差且放大倍率較低，因而量測精度也較差。

#### 3. 半徑法之真圓度

係以量取工件的圓形輪廓半徑之最大值與最小值之差異為真圓度大小，一般真圓度量測儀屬此方式。

### 二、結構示意圖

真圓度量測儀的主要組件有工作台、收錄器 (含探針)、放大器、記錄器 (圖形) 和微處理器或電

腦等部份所組成。工作台部份包括可作徑向運動和傾斜角度等調整；收錄器乃是將探針的微小運動之變化轉換成電子信號；放大器乃是將收錄器之電子信號放大，放大器還可用來過濾所測得型狀 (form) 的信號故又稱為濾波器 (filter)；記錄器通常可記錄極座標和線性等兩種圖形，可與工作台作同步運動；新型真圓度量測儀都設有電腦，可用螢幕直接顯示圖形、量測數據等功能，以取代昂貴記錄器和圖紙。真圓度量測儀的信號傳送如圖 1 所示。

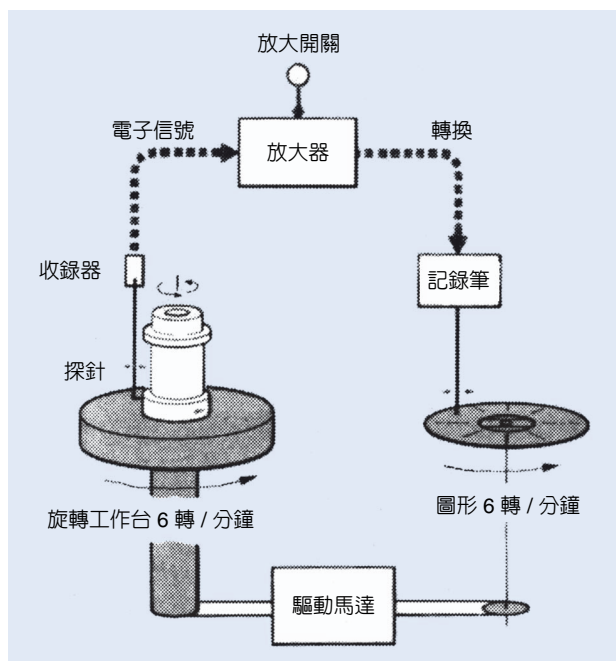


圖 1. 真圓度量測儀的信號傳送。

### 三、儀器規格與特徵

真圓度量測儀雖有不同形式和廠牌，其大致上的功能相同，除可作真圓度量測外，尚可作真直度、同心度、圓柱度、垂直度、平行度、圓偏轉度、總偏轉度等幾何公差之量測，如圖 2 所示。

真圓度量測儀的主要規格有 C 軸、C 軸 Z

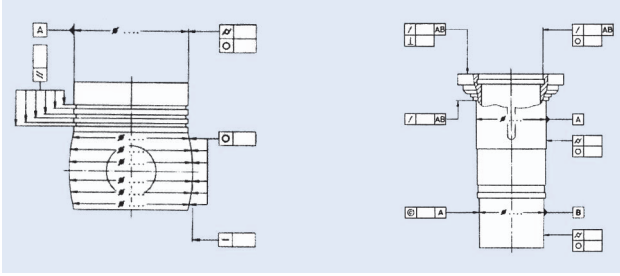


圖 2. 真圓度量測儀的量測功能。

軸、和 C 軸 Z 軸 R 軸等三種形式。C 軸形式為最簡單型，它可作真圓度、同心度、圓偏轉度、平行度、垂直度等量測功能；C 軸 Z 軸形式除可作上項量測功能外，尚可作圓柱度、真直度、傾斜角度等；C 軸 Z 軸 R 軸形式除可作上項量測功能外，尚可作總偏轉度、平行度等。

真圓度量測儀的主要形式有旋轉收錄器、旋轉工作台等兩種，如圖 3 所示。

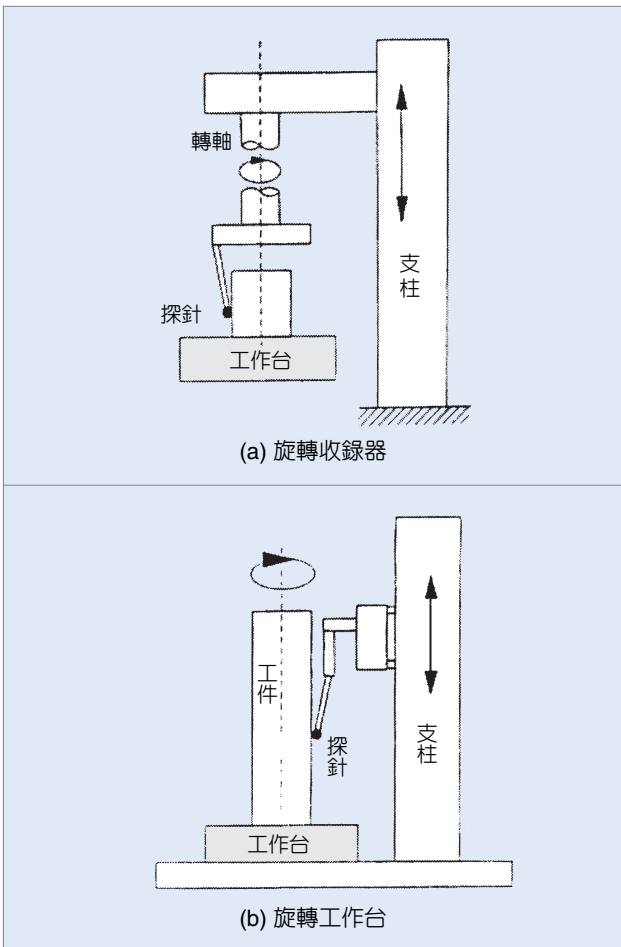


圖 3. 真圓度量測儀的形式。

- ① 旋轉收錄器：其工件為固定，主軸與收錄器需繞著待測件圓周而旋轉。因工作台不屬於量測系統的組件，有較高精度旋轉主軸、待測件尺寸太大或形狀不對稱等情況時使用。
- ② 旋轉工作台：承載待測件的工作台與主軸結為一體。因收錄器與儀器主軸不相關，操作較簡單，可同時安裝兩支收錄器，但精度較差。

#### 四、應用與用途

真圓度之量測，通常為需量測整個圓周相當多的點數 (如 720 或 1000 等點)，以觀察其變異情形，依其量測點間所連接的圖形，類似輪廓量測之輪廓形狀，以此圖形可作四種不同的參考圓，並且可將參考圓之圖形和圓心位置分別計算並繪出來。

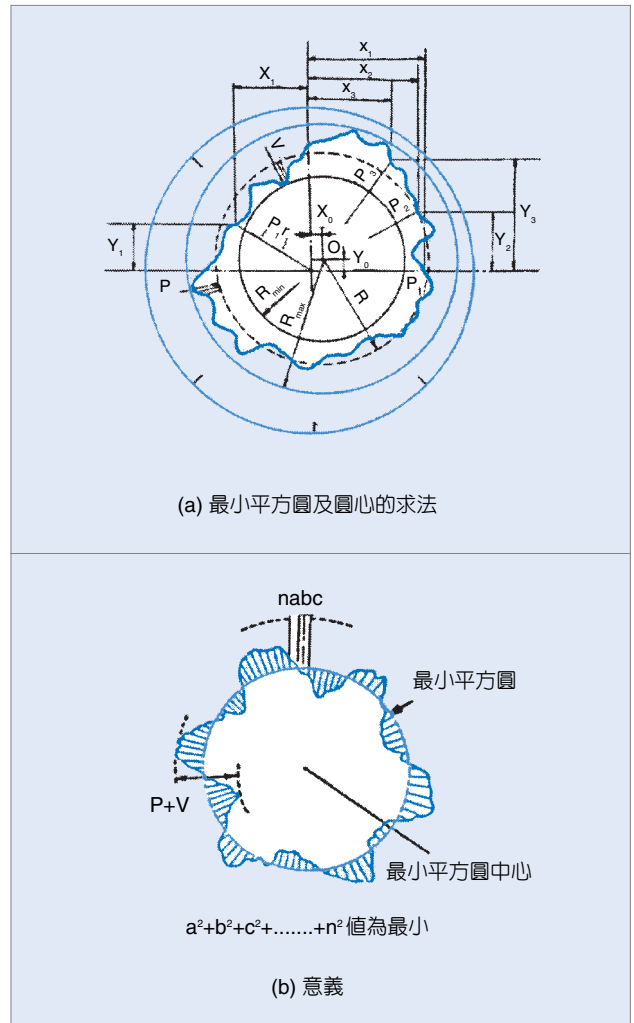


圖 4. 最小平方圓。

真圓度之量測，最主要的目的為將整個圓周所得到的數據作分析，目前有最小平方圓、最小環帶圓、最大內切圓和最小外接圓等四種。

### 1. 最小平方圓 (least squares circle, LSC)

最小平方圓如圖 4 所示，由量測點所圍成的圖形，其圓心位置為  $x_0$ 、 $y_0$  和半徑為  $R$ ，其值為  $x_0 = \frac{2\sum x_i}{n}$ 、 $y_0 = \frac{2\sum y_i}{n}$  和  $R = \frac{\sum r_i}{n}$ 。其意義為最小平方圓距輪廓形狀之徑向距離之平方和 ( $a^2 + b^2 \dots + n^2$ ) 為最小。此待測工件圓断面之失圓等於最小平方圓其偏差值的大小，失圓為其最大波峰 (peaks,  $P$ ) 至最大波谷 (valleys,  $V$ ) 的和 ( $P + V$ )。

### 2. 最小環帶圓 (minimum zone circle, MZC)

最小環帶圓如圖 5 所示，其真圓度的偏差即由二個同心圓將輪廓形狀圖形包絡起來且其徑向距離為最小。最小環帶圓是由最小區間法求得，因此又可稱最小區間圓。

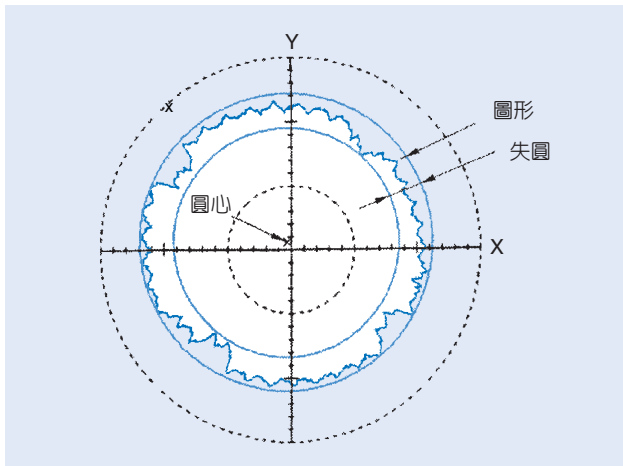


圖 5. 最小環帶圓。

### 3. 最大內切圓 (maximum inscribed circle, MIC)

這是完全被輪廓外形所包圍而無相交之最大圓，如圖 6 所示。真圓度的偏差即是沿內切圓上的最大波峰之徑向距離。最大內切圓為檢驗塞規之參考圓俗稱塞形量規圓 (plug gauge circle)。

### 4. 最小外接圓 (minimum circumscribed circle, MCC)

這是完全封閉輪廓外形而無相交的最小圓，如圖 7 所示。真圓度的偏差即是此圓周距離最大的波

谷之徑向距離。最小外接圓為檢驗環規之參考圓俗稱環形量規圓 (ring gauge circle)。

此四種真圓度量測圖形，假如量測儀器有好的數據處理器或電腦，可在量測工件後，直接進行四種不同圖形的分析而不需重新量測，即可得知失圓情形。若以失圓數據而言，最小環帶圓為最小、最小平方圓為次之、再次為最大內切圓、最小外接圓為最大。

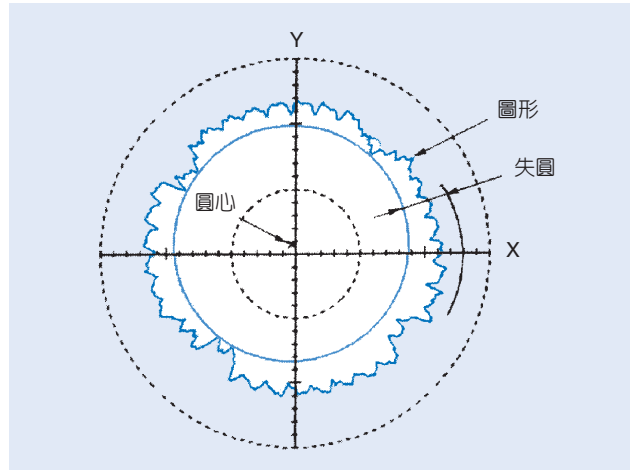


圖 6. 最大內切圓。

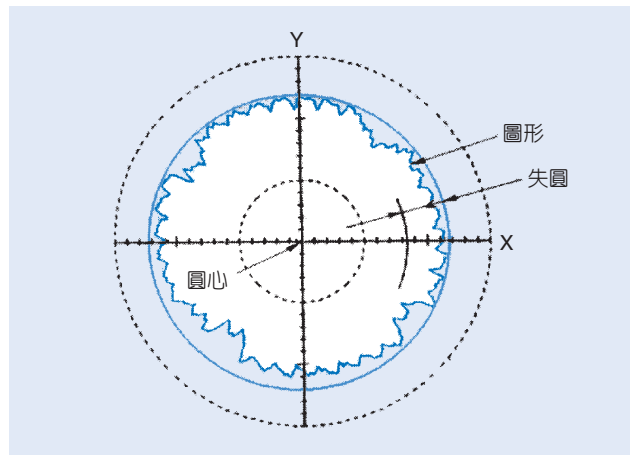


圖 7. 最小外接圓。

### 參考文獻

1. 精密量具與機件檢驗, 范光照, 張郭益編著, 三版, 高立圖書有限公司出版 (1997).

作者：張郭益先生為英國曼徹斯特大學機械碩士，現任國立虎尾技術學院機械製造工程科副教授兼主任。

# 三次元量測儀

## Coordinate Measuring Machine

**關鍵字：**移動橋架型、床式橋架型、柱式橋架型、閉環橋架型

**Keywords：** moving bridge type, bridge bed type, gantry type, ring bridge type

### 一、基本原理

三次元量測儀可定義為「一種具有可作三個方向移動的探測器，可在三個相互垂直的導軌上移動，此探測器以接觸或非接觸等方式傳送訊號，三個軸之位移量測系統 (如光學尺) 經數據處理器或電腦等計算出工件的各點座標  $(x, y, z)$  及各項功能量測的儀器」。

### 二、結構示意圖

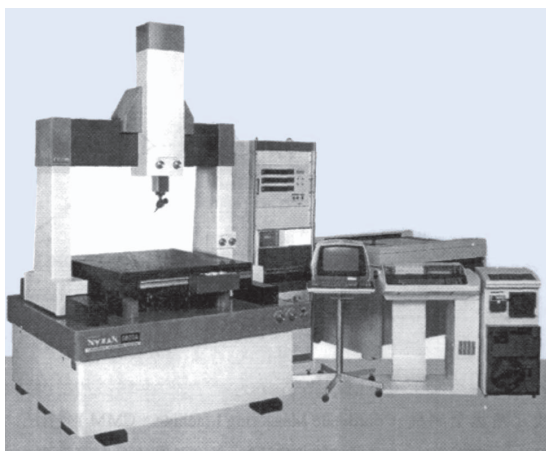


圖 1. 三次元座標量測儀。

三次元座標量測機是指在一個六面體的空間範圍內，能夠表現幾何形狀、長度及圓周分度等量測能力的儀器如圖 1 所示，又稱為三次元量測儀或三次元量床。三次元量測儀是由硬體設備及軟體兩大項組合而成。軟體部分包括量測數據處理和幾何形狀量測功能 (如量測凸輪、齒輪、曲面、輪廓等等)，需依軟體寫作多寡而定。硬體設備則包括軸向導引機構、量測系統 (光學尺)、進給機構及旋轉平台等。

### 三、儀器規格與特徵

三次元量測儀有不同的操作需求、量測範圍和

量測精度，這些對選用三次元量測儀是很重要的。各種類型的三次元量測儀結構外形敘述如下：

#### 1. 移動橋架型 (moving bridge type)

移動橋架型如圖 2 所示，為最常用的三次元量測儀之結構， $z$  軸為主軸在垂直方向移動，箱形架導引主軸沿水平樑在  $x$  方向移動，此水平樑垂直  $z$  軸且被兩支柱支撐於兩端，樑與支柱形成「橋架」，橋架沿著兩個在水平面上垂直  $x$  和  $z$  軸的導槽在  $y$  軸方向移動。因為樑的兩端被支柱支撐，所以可得到最小的撓度，且比懸臂型有較高的精度。

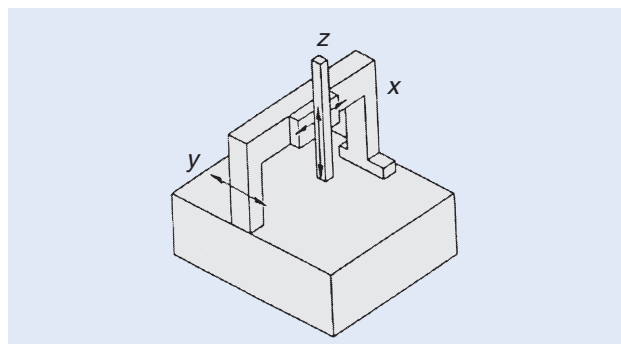


圖 2. 移動橋架型。

#### 2. 床式橋架型 (bridge bed type)

床式橋架型如圖 3 所示， $z$  軸為主軸在垂直方向移動，箱形架導引主軸沿著垂直  $z$  軸的樑而移動，而樑沿著兩水平導軌在  $y$  軸方向移動，導軌位於支柱的上表面，而支柱固定在機械本體上。此型與移動橋架型一樣，樑的兩端被支撐，因此樑的撓度為最少。此型比懸臂型的精度好，因為只有樑在  $y$  軸方向移動，所以慣性比全部橋架移動時為小，手動操作時比移動橋架型較容易。

#### 3. 柱式橋架型 (gantry type)

柱式橋架型如圖 4 所示，與床式橋架型式比較

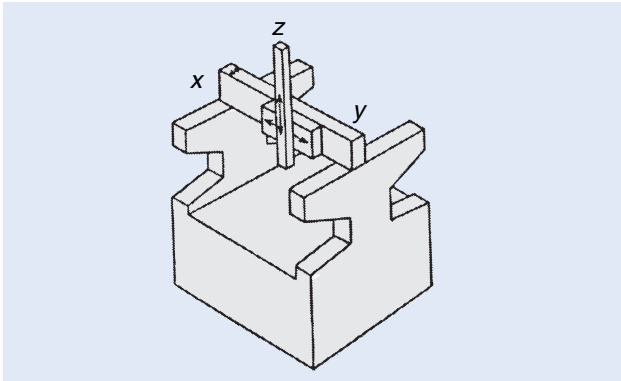


圖 3. 床式橋架型。

時，柱式橋架型其架是直接固定在地板上又稱為門型，比床式橋架型有較大且更好的剛性，大部份用在較大型的三次元量測儀上。各軸都以馬達驅動，量測範圍很大，操作者可以在橋架內工作。

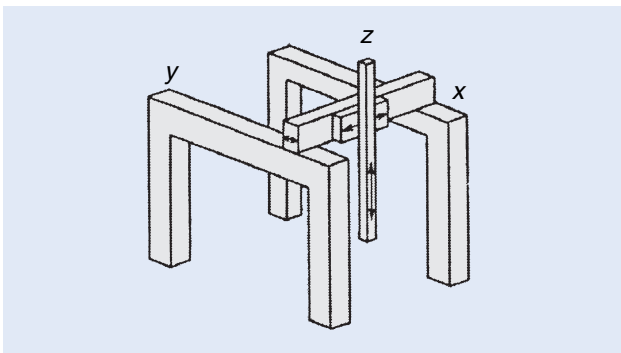


圖 4. 柱式橋架型。

#### 4. 固定橋架型 (fixed bridge type)

固定橋架型如圖 5 所示，z 軸為主軸在垂直方向移動，箱形架導引主軸沿著垂直 z 軸的水平橫樑上做 x 方向移動。橋架 (支柱) 被固定在機器本體

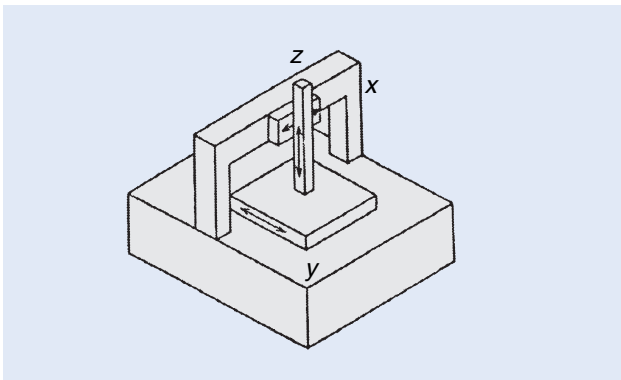


圖 5. 固定橋架型。

上，量測台沿著水平平面的導軌作 y 軸方向的移動，且垂直於 x 和 z 軸。每軸皆由馬達來驅動，可確保位置精度，此機型不適合手動操作。

#### 5. L 形橋架型 (L-shaped bridge type)

L 形橋架型如圖 6 所示，這個設計乃是為了使橋架在 y 軸移動時有最小的慣性而作的改變。它與移動橋架型相比較，移動元件的慣性較少，因此操作較容易，但剛性較差。此型屬大型機型。

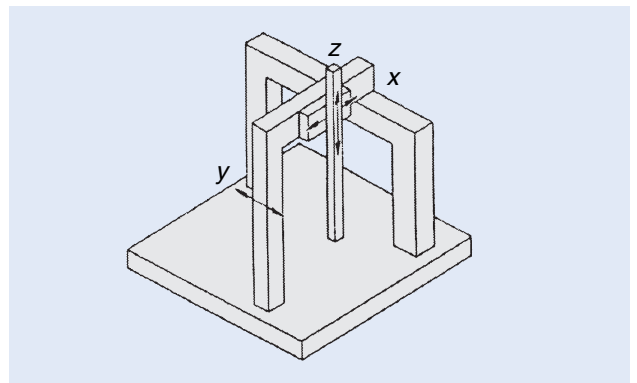


圖 6. L 形橋架型。

#### 6. y 軸移動懸臂型 (fixed table cantilever arm type)

y 軸移動懸臂型如圖 7 所示，z 軸為主軸在垂直方向移動，箱形架導引主軸沿著垂直 z 軸的水平懸臂樑在 y 軸方向移動，懸臂樑沿著在水平面的導槽在 x 軸方向移動，且垂直於 x 軸和 z 軸。此型為三邊開放，容易裝拆工件，且工件可以伸出台面即可容納較大工件，但因懸臂會造成精度不高。此型早期很盛行，現在已不普遍。

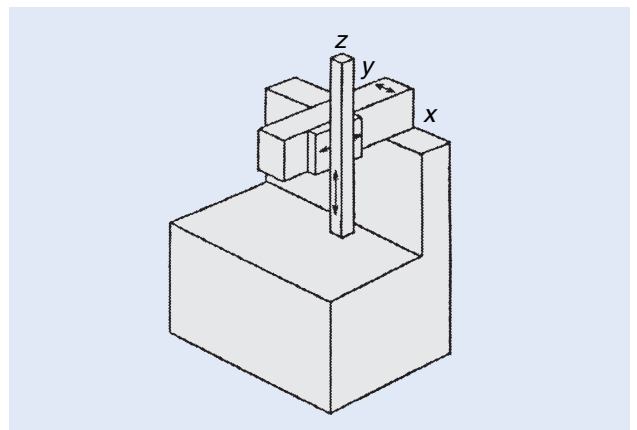


圖 7. y 軸移動懸臂型。

### 7. 單支柱移動型 (moving table cantilever arm type)

單支柱移動型如圖 8 所示， $z$  軸為主軸在垂直方向移動，支柱整體沿著水平面的導槽在  $y$  軸上移動，且垂直  $z$  軸，而  $z$  軸連接於支柱上。量測台沿著水平面的導槽在  $x$  軸上移動，且垂直  $z$  軸和  $y$  軸。此型量測台面、支柱等具很好的剛性，因此變形少，且各軸之線性刻度尺與量測軸較接近，以符合阿貝定理。

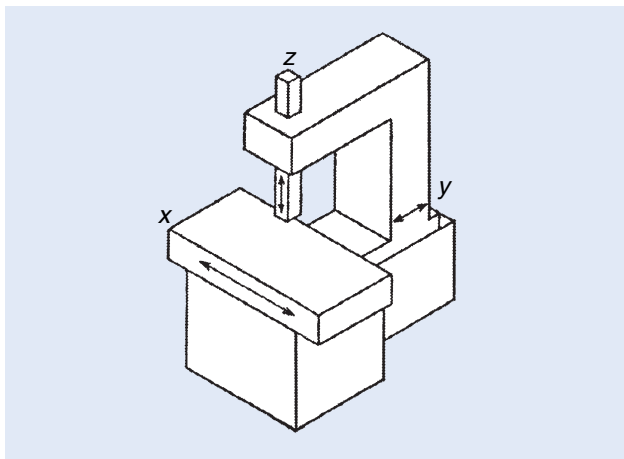


圖 8. 單支柱移動型。

### 8. 單支柱 $xy$ 量測台移動型 (single column $xy$ table type)

單支柱  $xy$  量測台移動型如圖 9 所示， $z$  軸為主軸在垂直方向移動，支柱上附有  $z$  軸導槽，支柱被固定在量測儀本體上。量測時，量測台在水平面上沿著  $x$  軸和  $y$  軸方向作移動。

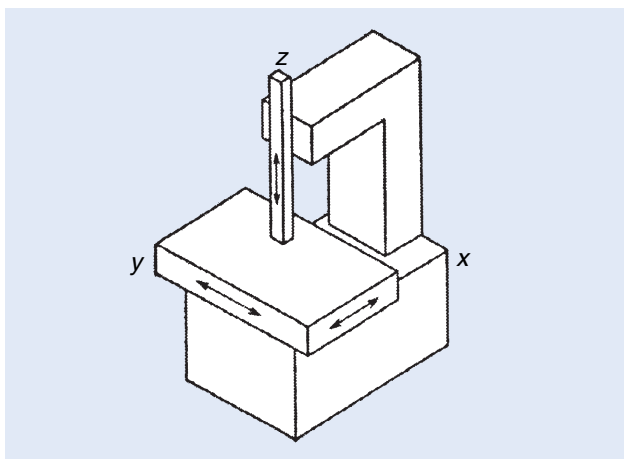


圖 9. 單支柱  $xy$  量測台移動型。

### 9. 水平臂量測台移動型 (moving table horizontal arm type)

水平臂量測台移動型如圖 10 所示，箱形架支撐水平臂沿著垂直的支柱在垂直 ( $y$  軸) 的方向移動。探頭裝在水平方向的懸臂上，支柱沿著水平面的導槽在  $x$  軸方向移動，且垂直  $y$  軸，量測台沿著水平面的導槽在  $z$  軸方向移動，且垂直於  $x$  軸和  $y$  軸。這是水平懸臂型的改良設計，為了消除水平臂在  $z$  軸方向，因伸出或縮回所產生的撓度。

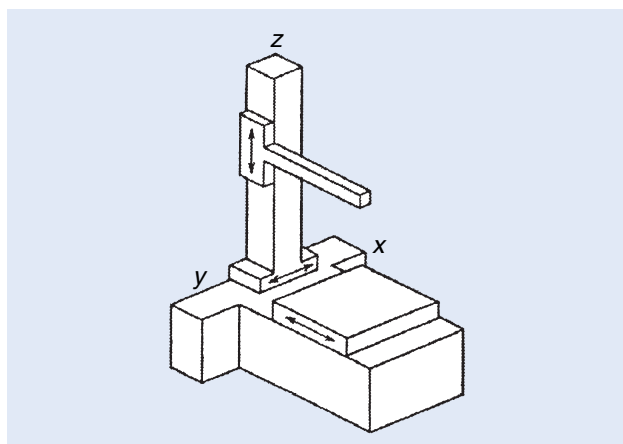


圖 10. 水平臂量測台移動型。

### 10. 水平臂量測台固定型 (fixed table horizontal arm type)

水平臂量測台固定型如圖 11 所示，其構造與量測台移動型相似。此型量測台固定， $x$ 、 $y$  軸均在導槽內移動，量測時支柱在  $y$  軸的導槽移動，而  $x$  軸滑動台面在垂直軸方向移動。

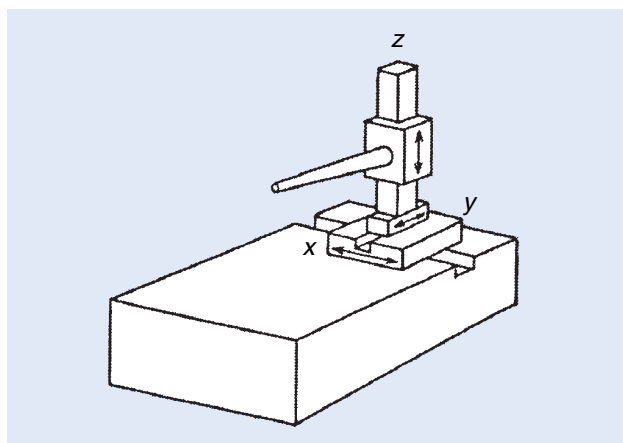


圖 11. 水平臂量測台固定型。

## 11. 水平臂移動型 (moving ram horizontal arm type)

水平臂移動型如圖 12 所示， $z$  軸懸臂在水平方向移動，支撐水平臂的箱形架沿著支柱在  $y$  軸方向移動，而支柱垂直  $z$  軸。支柱沿著水平面的導槽在  $x$  軸方向移動，且垂直  $y$  軸和  $z$  軸，故不適合高精度之量測。除非水平臂在伸出或回收時，對因重量而造成的誤差有所補償。目前應用在車輛檢驗工作。

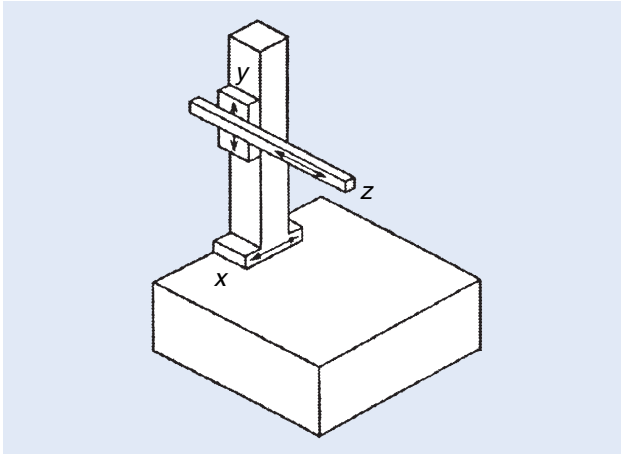


圖 12. 水平臂移動型。

## 12. 閉環橋架型 (ring bridge type)

閉環橋架型如圖 13 所示，由於它的驅動方式在工作台中心，可減少因橋架移動所造成衝擊，為所有三次元量測儀中最穩定的一種，屬於小型機型。

### 四、應用與用途

三次元量測儀之量測功能應包括尺寸精度、定位精度、幾何精度及輪廓精度等。根據使用廠商之量測功能需求、電腦設備及維護等不同，因而數據處理系統被應用於三次元量測儀。現有處理系統大致上可分為二類：

① 簡單操作型：使用者不需接受特別的訓練，即

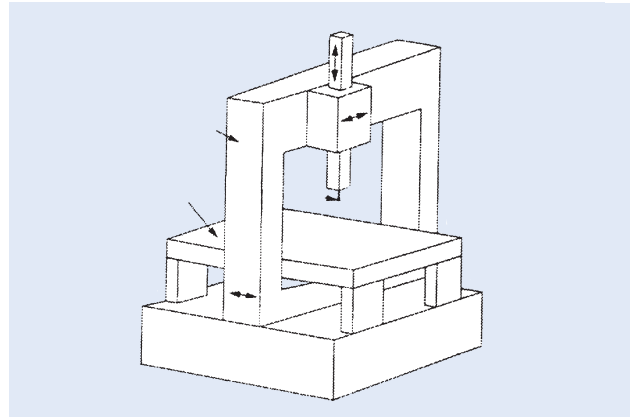


圖 13. 閉環橋架型。

可執行一般功能之量測。

② 多功能型：使用者除學會一般功能之量測外，還可以作教導功能、輪廓量測、統計處理、數據轉換和傳送等工作。

三次元量測儀之量測功能受儀器結構影響外，探頭系統也是極為重要之因素之一。因此為獲得最佳的量測效果而言，需依據量測工件的種類不同，選擇適當的探頭。三次元量測儀大致上可分接觸式與非接觸式等兩種探頭，接觸式探頭又可區分成機械式和電氣式兩種，而電氣式又可區分成觸發式探頭與掃描式探頭之分。非接觸式又可區分成中心顯微鏡、中心投影器、影像視訊螢幕和雷射等方式。而雷射方式又可分雷射掃描和雷射探頭。

### 參考文獻

1. 精密量具與機件檢驗, 范光照, 張郭益編著, 三版, 高立圖書公司 (1997).
2. *Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines*, ASME-B89.1.12M (1990).

作者：張郭益先生為英國曼徹斯特大學機械碩士，現任國立虎尾技術學院機械製造工程科副教授兼主任。

# 塊規

## Gauge Block

**關鍵字：**塊規、標稱尺寸、平行度、平面度(平坦度)

**Keywords：** gauge block, nominal length, parallelism, flatness

### 一、基本原理

1983 年第十七屆國際度量衡大會決定長度的新標準定義「一公尺等於光在真空中於 299,792,458 分之一秒時間內所行經的距離」。通常是以氦氖穩頻雷射的波長來實現此長度的標準，首先藉由塊規干涉儀以穩頻雷射校正標準塊規，再以此標準塊規校正其他塊規或長度量測儀器。

塊規 (gauge blocks) 是精密塊規的簡稱，也稱為規矩塊，是一種具有一定形狀、不同尺寸、大小的標準量規。塊規每一盒的組成片數，依各國規格而異。目前常用的塊規組 (0–100 mm) 最少為 18

表 1. 常用的塊規組。

最小尺寸差 (mm)	塊規片數	包含塊規之標稱尺寸 (mm)
0.0005	122	1.0005 1.001 1.002 1.003 ... 1.009 1.01 1.02 1.03 ... 1.49 0.5 1 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2 2.5 3 ... 25 30 40 50 60 70 75 80 90 100
0.0005	112	1.0005 1.001 1.002 1.003 ... 1.009 1.01 1.02 1.03 ... 1.49 0.5 1 1.5 2 ... 24.5 25 50 75 100
0.001	87	1.001 1.002 1.003 ... 1.009 1.01 1.02 1.03 ... 1.49 0.5 1 1.5 2 ... 9.5 10 20 30 ... 100
0.005	47	1.005 1.01 1.02 1.03 ... 1.19 1.2 1.3 1.4 ... 1.9 1 2 3 ... 9 10 20 30 ... 100
0.005	18	1.005 1.01 1.02 1.03 1.06 1.1 1.2 1.3 1.6 1 2 3 6 10 20 30 60 100

片，最多為 122 片，舉例如表 1。

當以塊規作為長度量測儀器或工件的標準件時，一般塊規的尺寸通常不會正好是工件所需要的尺寸，因此必須找出數片適當的塊規加以組合。如果塊規組的選擇正確且塊規的組合方式正確的話，不但能節省組合的時間，同時能減少因組合所產生的尺寸誤差。

由於塊規會熱漲冷縮，所以若量測時塊規之溫度不是 20 °C，則必須依下列公式修正校正數據：

$$L_t = L_{20} + \alpha_s \times (t - 20) \times L$$

其中

$L_t$ ：塊規在  $t$  °C 時的長度

$L_{20}$ ：塊規 20 °C 時的長度

$\alpha_s$ ：塊規的膨脹係數

$t$ ：執行量測時的塊規溫度

$L$ ：塊規的標稱尺寸 (mm)

由於量測儀器或工件本身也會熱漲冷縮，為了減少溫度補償修正及修正的誤差，所使用塊規的膨脹係數最好與待測工件者相等或相近。

### 二、結構示意圖

#### 1. 塊規的各部名稱

此名稱係根據 ISO (國際標準組織)、FS (美國聯邦規格) 及 CNS (中國國家標準) 的規範所制定的。其各部名稱如圖 1 所示。

#### 2. 塊規的標稱尺寸 (nominal length)、平行度 (parallelism)、平面度 (flatness)

① 塊規的標稱尺寸被定義為：塊規量測面上某一點至密接於另一同材質、同表面狀態之基準面上相對應點之距離  $L$ ，如圖 2 所示。

② 塊規的平行度係指塊規中最大尺寸  $L_1$  與最小尺

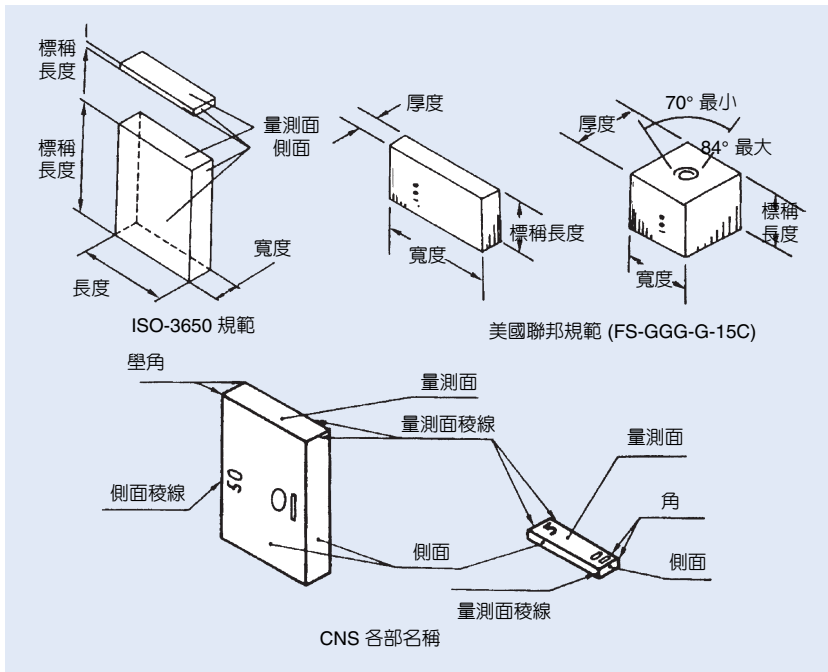


圖 1. 塊規各部名稱。

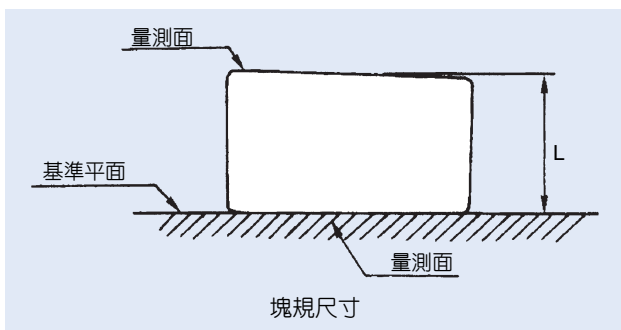


圖 2. 塊規尺寸。

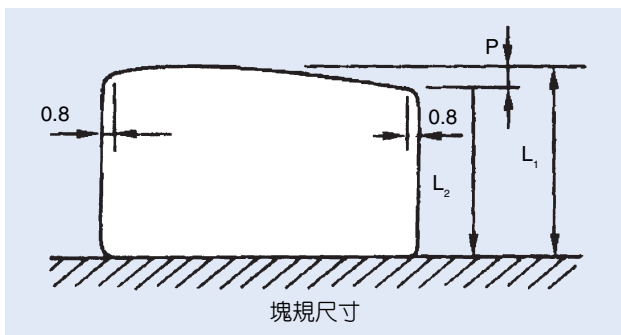


圖 3. 塊規平行度。

寸  $L_2$  之差  $P$ ，如圖 3 所示。

- ③ 塊規的平面度係指塊規量測面上所有點，能被一組具有最小距離的平行面所涵蓋，則此平行面間的距離就稱為平面度，CNS 規範中又稱平坦度。

### 3. 塊規的形狀

塊規的形狀一般可分為下列三大類：

- ① 長方形：其量測面的面積如表 2 所示，依照其標稱尺寸可分為 30 mm × 9 mm 或 35 mm × 9 mm 兩種。目前使用得最多，同時價格也較低廉。

表 2.

標稱尺寸	斷面尺寸 (mm × mm)
10.1 mm 以下 (含)	$30^{+0}_{-0.3} \times 9^{+0.05}_{-0.2}$
10.1 mm 以上	$35^{+0}_{-0.3} \times 9^{+0.05}_{-0.2}$

註：上表係依照 CNS 規格。

- ② 正方形及方形帶孔：其量測面的面積為 24 mm × 24 mm。造價比較貴，但因扭合面積較大，較容易組合長尺寸的塊規。中間有帶孔方形塊規，可用圓桿夾具從孔中穿過以協助組合較長尺寸的塊規，確保在扭合過程中緊貼的塊規不至跌落分散。
- ③ 其他特殊形狀的塊規：如三角形、圓柱型等為了特殊需求而製造出來的特殊形狀塊規。

## 三、儀器規格與特徵

### 1. 塊規的材質

由於塊規是尺寸量測的最基本標準件，所以必須謹慎選擇所使用的材質，一般所選用的材質必須

具備下列一些特性：精度高、材質穩定、硬度高。目前較常用來製造塊規的材料為：碳化鉻、碳化鎢、合金鋼、不鏽鋼、陶瓷及石英石等。各材質的熱膨脹係數如表 3 所示。

表 3. 各種塊規材質的熱膨脹係數。

材料	熱膨脹係數 $10^{-6}$ mm/mm °C
合金鋼 (硬化)	11.5
陶瓷	10.0
不鏽鋼 (401)	9.88
碳化鉻	8.08
碳化鎢	5.93
石英石	0.53

規格	材質	熱膨脹係數 $10^{-6}$ mm/mm/°C
FS	鋼	$11.5^{+0.4}_{-0.8}$
	碳化鉻	$8.5^{+0.3}_{-1.3}$
	碳化鎢	6.5 或 4.23
ISO	鋼	$11.5 \pm 1.0$
JIS	鋼	$11.5 \pm 1.0$

註：上表各種材質的熱膨脹係數僅供參考，各家廠商所用材料各有不同，每盒塊規的熱膨脹係數以原廠所附資料為準。各國塊規材料的熱膨脹係數規格 (10 °C 至 30 °C 的溫度範圍內)。

表 5. 塊規量測面尺寸、平行度容差 (單位：μm)。

標稱尺寸 (mm)		00 級		0 級		1 級		2 級	
超出	超出	尺寸容許差 (±)	平行度容許差	尺寸容許差 (±)	平行度容許差	尺寸容許差 (±)	平行度容許差	尺寸容許差 (±)	平行度容許差
0.5	10	0.06	0.05	0.12	0.10	0.20	0.16	0.45	0.30
10	25	0.07	0.05	0.14	0.10	0.30	0.16	0.60	0.30
25	50	0.10	0.06	0.20	0.10	0.40	0.18	0.80	0.30
50	75	0.12	0.06	0.25	0.12	0.50	0.18	1.00	0.35
75	100	0.14	0.07	0.30	0.12	0.60	0.20	1.20	0.35
100	150	0.20	0.08	0.40	0.14	0.80	0.20	1.60	0.40
150	200	0.25	0.09	0.50	0.16	1.00	0.25	2.00	0.40
200	250	0.30	0.10	0.60	0.16	1.20	0.25	2.40	0.45
250	300	0.35	0.10	0.70	0.18	1.40	0.25	2.80	0.50
300	400	0.45	0.12	0.90	0.20	1.80	0.30	3.60	0.50
400	500	0.50	0.14	1.10	0.25	2.20	0.35	4.40	0.60
500	600	0.60	0.16	1.30	0.25	2.60	0.40	5.00	0.70
600	700	0.70	0.18	1.50	0.30	3.00	0.45	6.00	0.70
700	800	0.80	0.20	1.70	0.30	3.40	0.50	6.50	0.80
800	900	0.90	0.20	1.90	0.35	3.80	0.50	7.50	0.90
900	1000	1.00	0.25	2.00	0.40	4.20	0.60	8.00	1.00

註：上表係 CNS 規範 (8092-B6058)

## 2. 塊規的等級劃分

塊規依照其製造精度及用途的差異可區分為四至五級，目前常用的分級體系有美國系統 (FS) 與歐洲系統 ISO 國際標準，如表 4 所示。

表 4. 塊規的等級劃分。

美國系統 FS		歐洲系統	CNS	用途
新	舊	ISO, DIN, BS		
0.5	AAA	000		參考級
1	AA	00	00	校驗級
2	A+	0	0	檢驗級
3	A/B	1	1	工作級
	C	2	2	工作級

註：德國校正服務中心 (DKD) 將塊規等級多劃分一級：K 級 (校正級)，此級的塊規是專門用來當校正標準件，其中心尺寸容差與 1 級的相等，但平行度容差卻與 00 級的相等，售價大約只有 00 級的一半。

## 3. 塊規的尺寸、平行度容差。

塊規的量測面尺寸、平行度容差及平坦度容差詳見表 5 與表 6。

## 四、應用與用途

塊規為長度的傳遞標準，適合作為各種長度

表 6. 塊規量測面平坦度容差 (單位：mm)。

標稱尺寸 (mm)		等 級			
起	至	00	0	1	2
—	150	0.05	0.10	0.15	0.25
150	500	0.10	0.15	0.18	0.25
500	1000	0.15	0.18	0.20	0.25

註：上表係 CNS 規範 (8092-B6058)

校正與量測的標準件，例如可用來校正游標卡尺、測微器、量表等，同時也可以作為測長儀等長度量測儀器的設定標準。

### 參考文獻

1. 規矩塊, CNS 8092 B6058 (1981).
2. *Gauge block*, ISO 3650 (1978).

3. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
4. *Calibration Procedure for Gage Blocks*, TO 33K6-4-1-1, 美國 (1992).
5. C. Croarkin, *Measurement Assurance Programs Part II : Development and Implementation*, NBS Special Publication 676-II, National Bureau of Standards (1984).
6. *Measurement Assurance for Gage Blocks*, NBS monograph 163 (1978).
7. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
8. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
9. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1993).
10. 楊植雄, 塊規校正程序書, 中山科學研究院.
11. Mitutoyo 公司型錄.
12. KOBA 公司型錄.
13. Starrett 公司型錄.

---

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 游標卡尺

## Vernier Caliper

**關鍵字：**游標卡尺、游標

**Keywords：**vernier caliper, vernier

### 一、基本原理

游標卡尺 (vernier caliper) 是由卡鉗 (caliper) 與鋼尺 (steel rule) 組合而成的，在 1631 年時由法國人 Pierre Vernier 設計出原始的滑動游標尺。游標卡尺係由硬質鋼料所製成，目前大多使用不鏽鋼，並經過硬化處理，以延長其使用壽命。其構造係由主刻度尺 (main scale) 或稱主尺 (本尺)，與游標刻度尺 (vernier scale) 或稱副尺所組合而成的，其上刻有清晰的刻度，而且所有的量測表面都經過研磨校正，以確保量測的準確性。

依照游標卡尺的發展情形，大致可區分為 M 型、CM 型、CB 型等三種。

#### 1. M 型游標卡尺

M 型游標卡尺是使用最普遍的一種游標卡尺，可量測外徑、內徑、深度、段差等尺寸。此型式由德國 Mauser 公司最先改良製造。可區分為 M1 與 M2 型，M1 型為標準型，副尺不能微調；M2 型的副尺加裝微調裝置。一般量測範圍在 300 mm 以下。

#### 2. CM 型游標卡尺

與 M 型游標卡尺一樣也是德國 Mauser 公司所改良的，它的特色是外側爪與內側爪在同一側，在作內外徑量測時，較 M 型游標卡尺穩定，也有微調裝置可作微細尺寸的調整，但是沒有測深桿可測深度。

#### 3. CB 型游標卡尺

外觀和 CM 型游標卡尺相似，其內、外測爪也是在同一側，同時也具有微調裝置，只是副尺的滑動部份採方框型 (box)。它是美國 Brown & Sharp 公司所生產，故又稱為 B&S 型。

另外為了配合各種不同工件的量測需要，各種特殊形狀與用途的游標卡尺以因應而生，現將常用的特殊用途游標卡尺簡介如下：

#### 4. 附表型游標卡尺

將一特殊設計的量表裝在副尺上，用以取代副尺的刻度，故可以很容易且直接的讀取工件的尺寸，同時可以避免發生視差。

#### 5. 定壓式游標卡尺

在量測爪的固定邊安裝一彈簧指針作為量測壓力的測定裝置，可將量測壓力控制在某一數值內，適合用於塑膠零件的尺寸量測。

#### 6. 數位電子式游標卡尺

數位電子式游標卡尺是利用新型靜電電容偵測器將所量測的讀值數位化，可以很簡便且直接的讀取工件的尺寸，同時可以避免視差的發生。有些更可以將量測數據連接至其他週邊設備做自動化的處理。

游標卡尺是利用主尺刻劃和副尺刻劃來讀取工件的尺寸。一般副尺的刻劃可分為兩種，第一種所謂的正游標 (或稱普通游標)，其副尺的每一個刻劃都比主尺的刻劃略小；第二種是所謂的逆游標 (或稱長游標)，其副尺的每一個刻劃都比主尺的刻劃略大。現在以普通游標為例，說明游標卡尺的使用方法。

普通游標在主尺上取  $n$  個刻劃，並在相同的距離內將副尺刻劃成  $n+1$  等分，則副尺的每一等分為主尺刻劃的  $n/(n+1)$ ，主尺一刻畫與副尺一刻劃的尺寸差為  $1-n/(n+1) = 1/(n+1)$ ，稱為最小讀值。例如若在主尺 19 mm 內將副尺等分為 20 刻劃，則副尺每一等分為 19/20 mm，最小讀值為 1/20 mm，

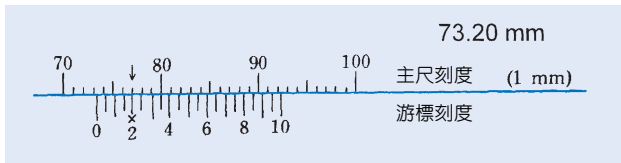


圖 1. 游標卡尺量測示意圖。

也就是 0.05 mm。在判讀游標卡尺的尺寸時，必須先了解游標卡尺的最小讀數值，再按照下列三個步驟進行 (如圖 1 所示)：

1. 讀取副尺 0 刻度前主尺刻度的整數尺寸，設為 A。
2. 找出副尺刻畫與主尺刻劃相對齊的線，並讀取副尺的刻度整數，設為 B。
3. 游標卡尺的實際讀值即為 (1)、(2) 兩項的相加。即  $A + B$ 。

## 二、結構示意圖

游標卡尺主要是由主尺、副尺、外側測爪、內側測爪、深度尺、微調裝置、固定螺絲等所組成，各部份量測項目的示意圖如圖 2 所示。

## 三、儀器規格與特徵

游標卡尺的設計受限於人類肉眼判別細線條的有限鑑別能力。一般人員肉眼所能判斷兩直線是否

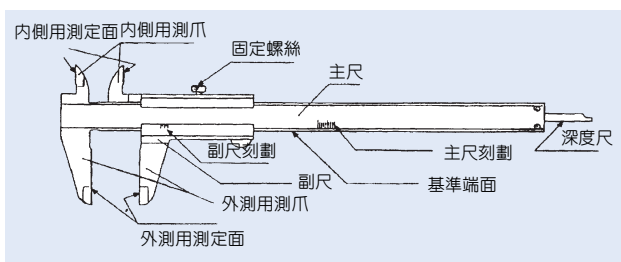


圖 2. 游標卡尺結構示意圖。

在同一直線上的鑑別能力約在 0.012—0.017 mm 之間。所以一般游標卡尺的最小讀值設計為 0.02 mm 的原因也在此。

1. 游標卡尺的刻劃規格可分公制和英制，如下表：

	最小刻劃	
公制	0.02 mm	0.05 mm
英制	1/1000"	1/128"

2. 游標卡尺的長度規格，公制的有 150 mm、200 mm、300 mm、450 mm、600 mm、1000 mm、2000 mm 等，英制的有 6"、8"、12"、18"、24"、40"、48" 等

## 四、應用與用途

游標卡尺可以說是目前工廠中使用的最多的量具，它具備有四種的量測功能：外尺寸量測、內尺寸量測、深度量測和階段差量測等。

## 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
3. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
4. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
5. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
6. 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
7. 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書 (1994).
8. 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
9. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 分厘卡

## Micrometer

關鍵字：分厘卡 (測微器)

Keywords：micrometer

### 一、基本原理

分厘卡又稱測微器，可以用來量測長度、厚度、直徑等尺寸，是目前工廠中最常使用的精密量具之一。分厘卡的原理是利用螺桿和螺帽的動作原理，將圓周的轉動運動轉變成軸向的長度位移。分厘卡的主軸螺桿旋轉一圈會使得主軸前進一節距的位移，所以只要知道螺紋的轉動角度與螺桿的節距就可以求出直線的位移距離。

設螺紋的主軸旋轉了  $\alpha$  弧度時，量測面移動了  $x$  的距離，若放大之圓周 (即外套筒) 半徑為  $r$ ，則外套筒刻劃所旋轉的距離為  $r\alpha$ 。若外套筒旋轉一圈，其旋轉的距離為  $2\pi r$ ，則主軸前進一節距  $P$ ，其關係如下列公式所示：

$$\frac{P}{2\pi r} = \frac{x}{r\alpha}$$
$$\rightarrow x = \frac{\alpha P}{2\pi}$$

其中  $x$ ：螺紋軸相位移 mm

$P$ ：螺紋節距 mm

$\alpha$ ：螺紋或外套筒之旋轉弧度

$r$ ：外套筒刻劃面半徑 mm

一般公制分厘卡螺紋節距  $P = 0.5 \text{ mm}$ ，並將其外套筒的圓周刻劃為 50 等分。由於套筒每旋轉一圈便前進 0.5 mm，則每一個刻劃所代表的位移距離便是 0.01 mm。另外有些主軸螺桿節距是 1 mm 的，並將其外套筒均分為 100 等分，則其最小讀數也是 0.01 mm。

分厘卡依照其用途可分類為外側分厘卡、內側分厘卡、深度分厘卡等。

一般常用的分厘卡依照其判讀的方式可分為下列四類：① 標準型分厘卡，② 附游標型分厘卡，

③ 直讀式數字型分厘卡，④ 數位式分厘卡。其判讀的方式簡述如下：

#### 1. 標準型分厘卡

① 先讀襯筒標線上方的刻度，此處每一個刻度代表 1 mm。在襯筒上從 0 開始每隔 5 個刻劃就標註 5 的倍數，如 5、10、15、20、25 等就分別代表 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 等長度。再讀襯筒標線下方的刻度，在每兩個 1 mm 的刻劃中間都刻有一短線以代表 0.5 mm。

② 讀取外套筒傾斜邊緣上的刻劃與襯筒標線對齊的刻劃數，此處每一個刻劃代表 0.01 mm。

將上述三項所得的數值相加的總和即是分厘卡的讀數。

#### 2. 游標型分厘卡

為了改善分厘卡的解析度使能達到 0.001 mm，分厘卡必須附有游標刻度的特殊設計以協助判讀。取外套筒 9 刻劃即 0.09 mm 的距離，在襯筒上相同距離內劃分為 10 個游標刻劃，每隔兩個刻劃分別標註 2、4、6、8、0 等數字，每一個刻劃代表 0.001 mm。在襯筒中央標線的下方則為每 0.5 mm 刻劃一格。其判讀的方式為：

① 先讀襯筒標線下方的刻度，每刻劃代表 0.5 mm。

② 讀取外套筒傾斜邊緣上的刻劃與襯筒標線的下方第一個刻數，此處每一個刻劃代表 0.01 mm。

③ 讀取外套筒傾斜邊緣上的刻劃與襯筒副尺游標刻劃對齊的刻劃數，此處每一個刻劃代表 0.001 mm。

將上述三項所得的數值相加的總和即是分厘卡

的讀數。英制原理相似，但目前已漸漸不被採用，故在此不作說明。

### 3. 直讀式數字型分厘卡

為了避免閱讀刻度時因視覺因素所造成的誤差，並減少刻度讀數相加的時間與相加時錯誤的發生，目前儀器商也製造了直讀式數字型外側分厘卡。其原理是在卡架上安裝有 0-9 數字循環的小圓環數組，如同汽車上的里程計，以齒輪機構將主軸旋轉的量傳至小圓環上，故可在小圓環組上直接讀取位移的距離。其判讀的方式為：

- ① 先讀取卡架視窗所顯示的數字讀值。要特別注意小數位數，一般四位數字組所代表的分別是十位數、個位數、十分位與百分位。
- ② 讀取外套筒傾斜邊緣上的刻劃與襯筒副尺游標刻劃對齊的刻劃數，此處每一個刻劃代表 0.001 mm。

將上述兩項所得的數值相加的總和即是分厘卡的讀數。

### 4. 數位式分厘卡

為了達到真正的正確迅速與自動化的要求，另外也發展出有一種數位式分厘卡。其原理是利用放射狀等分的格子圓盤與些許偏心重疊，因相對位移所產生的干涉條紋來計算螺桿的位移。其判讀的方式為：直接讀取視窗上所顯示的數字讀值，或依照標準型外分厘卡的方式讀取數值。

## 二、結構示意圖

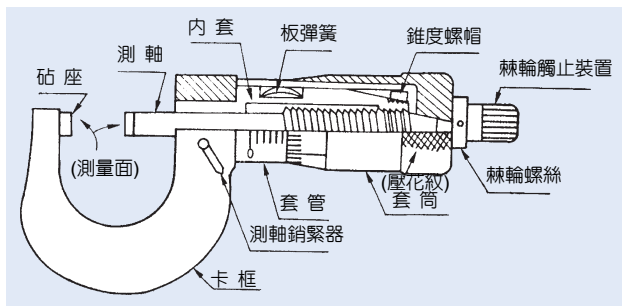


圖 1. 分厘卡結構示意圖。

一般外分厘卡的主要部份包括卡框、砧座、測軸、套管、套筒、棘輪等，如圖 1 所示。

## 三、儀器規格與特徵

分厘卡的規格可分為公制和英制兩體系，如表 1 所示。

表 1. 分厘卡規格。

單位制式規格	公制	英制
導程	0.5 mm、1 mm	0.025"
最小讀數	0.01 mm、0.001 mm	0.001"、0.0001"
量測範圍	常用的有四組 ① 0-25 mm ② 25-50 mm ③ 50-75 mm ④ 75-100 mm 每增長 25 mm 有一組	常用的有四組 ① 0"-1" ② 1"-2" ③ 2"-3" ④ 3"-4" 每增長 1" 有一組

## 四、應用與用途

分厘卡為目前現場檢驗量具中的一種量具。分厘卡依照其用途可分類為外側分厘卡、內側分厘卡、深度分厘卡等，分別用來量測外側尺寸、內側尺寸和深度尺寸。

## 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
3. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
4. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
5. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
6. 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
7. 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書 (1994).
8. 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
9. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀器校正組副工程師。

# 度盤規

## Dial Gauge

**關鍵字：**度盤規(量表)、位移

**Keywords：**dial gauge, displacement

### 一、基本原理

度盤規(俗稱量表)是用於比較式量測和量測距離變化的主要工具，它們是利用齒輪系和槓桿原理，將微小距離的長度變化加以放大並以針盤指針的方式顯現出來，使量測人員可以輕易的讀取工件尺寸的偏差量。

度盤規將微小尺寸放大的原理可分為槓桿放大、齒輪系放大和刻度盤放大三種，分述如下。

#### 1. 槓桿放大

- ① 單式槓桿：放大倍數為支點兩邊力臂長的比例，若比例為 1：10，則可以將位移量放大十倍以供判讀。
- ② 複式槓桿：為兩個或兩個以上的單式槓桿所組成，可以將放大倍率提高許多，例如兩個 1：10 的單式槓桿所組成的複式槓桿可以將位移量放大一百倍以供判讀。

#### 2. 齒輪系放大

在測頭中心軸上刻有齒條，並以此齒條和齒輪嚙合，以將空間中的直線位移傳遞為齒輪系的角度位移。

- ① 單式齒輪系：放大倍數為主動齒輪和從動齒輪齒數的比例，若比例為 10：1，則當主動齒輪旋轉  $1^\circ$  時，從動齒輪將旋轉  $10^\circ$ ，可以將轉動量放大十倍以供判讀。當然如果齒輪齒數的比例越大，可以得到越大的放大效果，但考慮到量表的體積和剛性問題，大多數都採用複式齒輪系。
- ② 複式齒輪系：在原來單式齒輪系的小從動齒輪的轉軸上安置另一個同步的大主動齒輪，並由此第二個主動齒輪帶動另一個小從動齒輪。若將兩個 10：1 的單式齒輪系組合在一起，則可達

到將旋轉角度放大一百倍的效果。

#### 3. 刻度盤放大

如果將度盤規刻度盤的直徑加大，同時將指針和刻度盤圓周加大，則原先刻劃間的距離擴大，可以再加以細分格，使得刻劃可以刻得更細，而達到增強解析度的功能。

### 二、結構示意圖

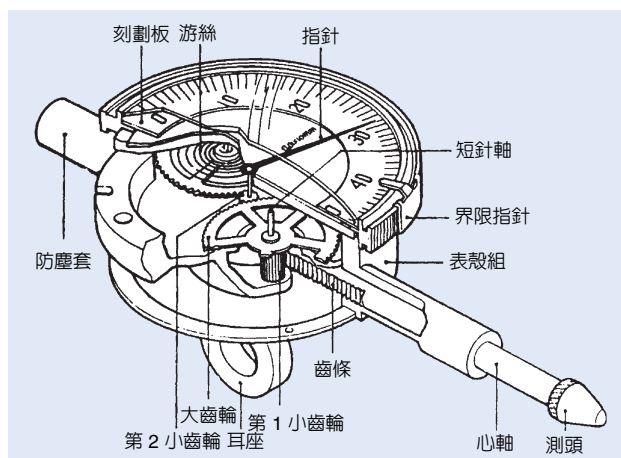


圖 1. 度盤規結構示意圖。

一般度盤規的結構如圖 1 所示。

- ① 測頭：為度盤規與待測物接觸的裝置，安置在心軸組的前端。依待測物的外型而有不同形狀的測頭設計。
- ② 心軸：前端裝有測頭，中間部份刻有齒條，與齒輪組嚙合，將直線位移轉換成角度變化，後端有防塵套。
- ③ 齒輪組：將直線位移轉換成角度變化並加以放大。
- ④ 指針：連接至齒輪組，將放大後的角度變化顯示出來。通常有兩個指針，短針的刻劃代表長

針旋轉的圈數，長針的最小刻劃代表度盤規的解析度。

- ⑤ 刻度盤：此刻度盤除了刻有長針和短針的刻劃外，本身還可以旋轉以執行量表的歸零。
- ⑥ 游絲組：介於齒輪組和心軸之間，以維持一定的量測力並消除因齒輪間隙所造成的回程誤差。

### 三、儀器規格與特徵

度盤規可以依照下列各種方式予於分類：

#### 1. 依測軸運動方式

- (1) 普通式度盤規：可以感測直線距離尺寸、位移 (displacement)。
- (2) 槓桿式度盤規：用來感測微小弧線距離、位移。

#### 2. 依指示方式

- (1) 表面指針式：將齒輪的轉動傳遞至指針上，又可分
  - ① 連續型：表面刻度從零刻劃開始，以遞增方式連續至整個圓周。
  - ② 平衡型：表面刻度從零刻劃開始，以遞增方式分別向正向及負向延伸至中間點。
- (2) 電子數位式：以數字尺的方式將類比訊號轉換成數位訊號，再以數位電表顯示量測值，同時也可以將數據經由輸出裝置執行列印功能或做自動化處理。

表 1. 度盤規常用的規格。

規格 \ 類型	普通式		槓桿式	
最小讀數	0.01 mm	0.001 mm	0.01 mm	0.002 mm
量測行程	5 mm	0.1 mm	0.5 mm	0.2 mm
	10 mm	1 mm	0.8 mm	0.28 mm

度盤規常用的規格如表 1 所示。

### 四、應用與用途

由於度盤規所能量測的範圍比較小，所以通常都是應用在比較性量測上，例如平行度、平面度、偏心率等的量測，或是車床工作的定中心等。度盤規也常配合其他量具組合成新功能的量具，如量表式缸徑規、高度規等。有時候數個度盤規可組合或多點量測設備，應用在工廠大量生產的製程中執行線上 (on line) 量測。

#### 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
3. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
4. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
5. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
6. 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
7. 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書公司 (1994).
8. 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
9. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 高度規

## Height Gauge

**關鍵字：**高度規、高度標準規

**Keywords：**height gauge, height master

### 一、基本原理

以往高度規又稱為游標高度規，由此可知高度規的基本量測原理乃是應用游標卡尺原理，有些人更將高度規視為「將游標卡尺豎立起來的量具」，只是高度規較適合用於垂直方向來量測高度方面的尺寸。

目前常用的高度規依照其量測原理可以區分為游標高度規、量表高度規、電子高度規、精密高度規(高度標準規，height master)等四種。

#### 1. 游標高度規

其游標尺刻度及各部構造與游標卡尺相同，只是在尺的一端裝置有垂直底座，以使得刻度尺能與基礎平面相垂直。游標高度尺的主尺、副尺架構與游標卡尺者相同，請參閱游標卡尺之介紹。游標高度尺又可分為下列三種：

- ① **HM 型游標高度規：**本尺為一單體的直尺，固定在基座上，副尺刻蝕有滑槽，可以扣在本尺上作上下滑動。構造簡單，價格低廉，工廠常以此型高度規執行劃線工作。
- ② **HT 型游標高度規：**是針對 HM 型游標高度規的缺點加以改良。本尺分成主刻度尺及主樑等兩部分，本樑固定在基座上，主刻度尺可沿著主樑作高低微調。若歸零時主刻度尺與副尺無法一致，則可微調主刻度尺使其一致。由於精密度較高，目前工廠使用最多。
- ③ **HB 型游標高度規：**主尺固定在基座的中央，副尺採箱型設計，因此穩定性較高，但和 HM 型游標高度規一樣，比較不容易歸零。

#### 2. 量表式高度規

採用量表齒輪系放大的原理，首先藉著主尺上的齒條和齒輪嚙合將高度方面的位移量轉換成角度

的變化，再藉著齒輪系將角度放大並以指示量表顯示出高度值。

#### 3. 電子式高度規

結構與量表式高度規類似，也是採用量表齒輪系放大的原理，將高度的位移轉換成角度的變化，但在齒輪系上安置一個光電編碼器，以將角度的轉動量轉換成數位顯示。此種電子式高度規可以在任何高度歸零，所以可以直接讀出任何兩點間的高度差。目前最新的精密電子高度規已經發展到可以量測二次元的功能、底座有內藏式空氣軸承使高度儀可以輕易移動、裝置有微處理機能列印量測數值或傳送資料至個人電腦執行統計分析。

#### 4. 精密高度規

結合精密塊規組和分釐卡特性的精密高度標準件 (height master)。精密高度規共有兩組塊規組成精密階梯尺寸，其中一組塊規作為間隔用，另外一組塊規作為量測用。分釐卡測頭藉著精密螺紋與塊規組結合，若轉動心軸則可以帶動塊規組做上下移動，藉著精密塊規階梯面高度尺寸的變化以達到提供精密高度標準的目的。

### 二、結構示意圖

1. 游標高度規的基本構造有基座、主尺、副尺及劃線刀等，如圖 1 所示。

- ① **基座：**為高度規的基準面，必須經過精密研磨，以確定基準面的平整。
- ② **主尺：**為主要量測軸，垂直安置在基座上，需經過垂直度的校正。
- ③ **副尺：**為游標尺，可沿著主尺上下移動，附有微調螺絲以執行微動調整。
- ④ **劃線刀：**刀尖為硬質材料所製成，安裝在測

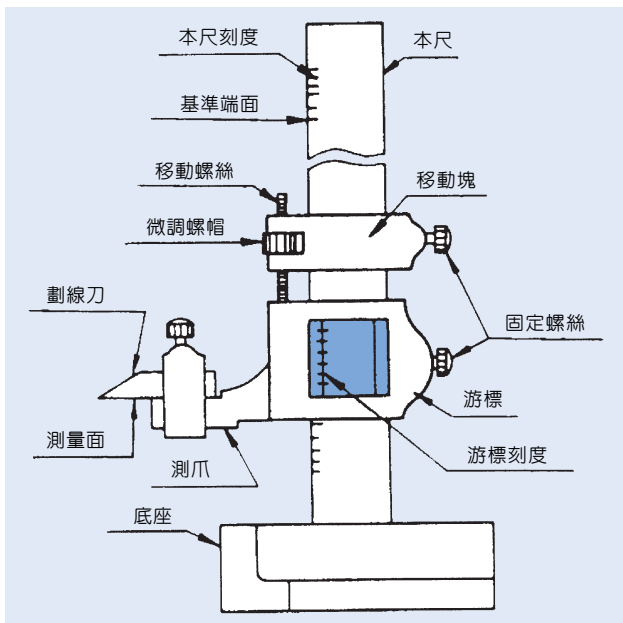


圖 1. 游標高度規基本構造。

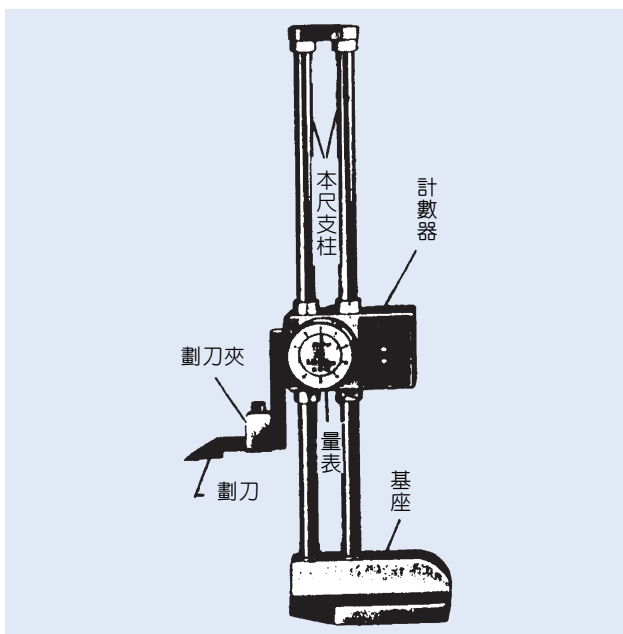


圖 2. 量表式高度規。

爪上以執行劃線或量測工作。

2. 量表式高度規的基本架構與游標高度規的構造類似，只是他們的指示機構應用齒輪系放大的原理改良成量表，如圖 2。
3. 電子式高度規的基本架構與游標高度規的構造類似，只是他們的指示機構應用光電編碼原理改良成電子數位顯示，如圖 3。

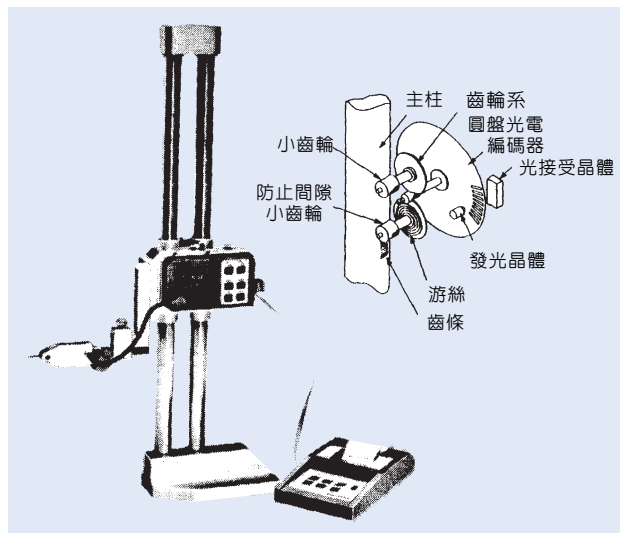


圖 3. 電子式高度規。

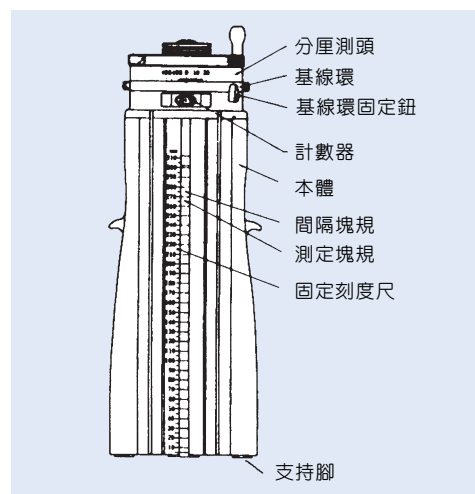


圖 4. 精密高度規。

表 1. 游標高度規規格。

	公制		英制		
主尺最小刻度	0.5 mm	1 mm	1/16"	0.025"	0.025"
最小讀數值	0.02 mm	0.05 mm	1/128"	0.001"	0.001"

4. 精密高度規的基本構造有基座、塊規組、分釐測頭等，如圖 4。

### 三、儀器規格與特徵

1. 游標高度規規格如表 1 所示。
2. 量表式高度規最小讀數為 0.01 mm。
3. 電子式高度規：最小讀數為 0.01 mm，量測範圍

表 2. 精密高度規量測規格。

	精密級	普通級
測定範圍	5—310 mm	10—310 mm
塊規架構	複列 20 mm 間隔	複列 20 mm 間隔
最小讀數	0.001 mm	0.002 mm
塊規間距離的準確度	± 0.0015 mm	± 0.0015 mm
塊規面的平行度	0.001 mm	0.002 mm
分釐測頭的節距準確度	± 0.001 mm	± 0.002 mm

為 300—1000 mm。

- 精密高度規的分釐卡測頭一般是以 0.5 mm 節距的精密螺紋所構成，有效移動量為 20 mm，其餘的規格如表 2 所示。

#### 四、應用與用途

- 劃線：利用測爪前的劃線刀在工件表面上畫出刻痕。
- 高度量測：利用量測爪的量測面或配合槓桿式量表量測待測物的高度。

- 角度量測：將量角器安裝在高度規上，則可以量測各種垂直方向的角度。
- 孔徑量測：配合測孔中心探針或槓桿式量表可測得兩孔中心的距離。
- 深度量測：配合深度測桿可量測深孔、深凹槽等的深度。

#### 參考文獻

- W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
- 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
- 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
- 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
- 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
- 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
- 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書 (1994).
- 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
- 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 平台

## Surface Plate

關鍵字：平台、平面度

Keywords：surface plate, flatness

### 一、基本原理

任何量測均需先設定一個基準，線的基準是點，面的基準是線，體的基準是面。在一般機械檢驗及量測時，即需要使用一個基準面來作為檢驗或量測的基準，此基準面即是「平台」。CNS 將平台稱之為精密平板。由於平台為檢驗或量測的基準，故此基準面的平面度直接影響檢驗或量測的準確度。因此在論及檢驗或量測的準確度時，平台的平面度是首先必須考慮到的。

平台依材質分類可分成鑄鐵平台和花崗岩平台，美國材料試驗協會又將花崗岩分成普通花崗岩及黑花崗岩等兩種，其中黑花崗岩又可分成斑禱岩、輝綠岩、玄武岩，其各項性能比較如表 1。

### 二、結構示意圖

平台依材質分類可分成鑄鐵平台和花崗岩平台。花崗岩平台為一個實心長方體。鑄鐵平台有肋可防止變形，同時在側面設計有握持孔的構造以方便安裝和搬運，如圖 1 所示。

平台一般是以製造廠商名牌的位置為北方，如圖 2 所示。

一般平台都是採用三點支撐，但有時對大型平台而言，只有一點支撐的一方無法穩固支撐，必須

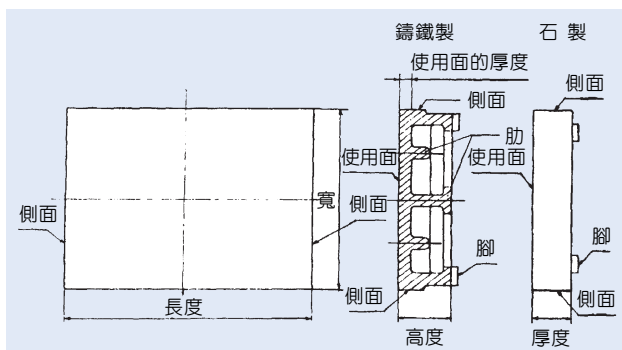


圖 1.

再增加兩點輔助支撐，或者是在兩點支撐的一方再增加一點以補強，而形成五點或六點支撐。支撐的位置在美國 (FS) 規範有詳細的規定，即支撐點必須位於從端面或側面起約等於平台長度或寬度的 1/5 處，其中一點支撐者必須位於中心線上。而德國 (DIN) 規範則是由使用面  $a \times b$  ( $a$ 、 $b$  為各邊邊長) 的大小來規定，即兩點的一方是  $0.22 \times a$ 、 $0.22 \times b$ ，一點的一方則是  $0.22 \times a$  及  $0.5 \times b$ 。

### 三、儀器規格與特徵

在平台規格中最重要的是平面度 (flatness)，在 CNS、FS、JIS、DIN、BS 等各國標準中，都有很清楚的定義：平台的平面度係指平台量測面上所有點，能被一組具有最小距離的平行面所涵蓋，則此平行面間的距離就稱為平面度。

目前世界各國對平台等級的劃分及其平面度的容差 (flatness tolerance) 並沒有一致的定義，其計算方式也非常紛亂。一般都是以平台的對角線長度為計算的依據，現在將常用的國家規範對平面度容差的計算方式簡介如下，CNS 中國國家標準 (JIS 日本工業標準) 規範詳細對照表請參考表 2。

#### 1. CNS 中國國家標準 (與 JIS 日本工業標準相同) 規範

在 CNS (JIS) 規範中，將平台分為 0、1、2 三

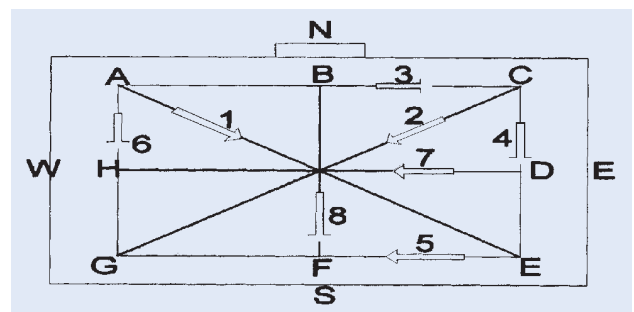


圖 2.

表 1. 各種平台材質性能比較表。

性能 \ 類型	鑄鐵平台	普通花崗岩平台	黑花崗岩平台
材質	GC20 (灰口鑄鐵)	石英、長石、雲母	斜長石、輝石、橄欖石
穩定性	稍差	佳、不易變形	佳、不易變形
剛性 (相同重量下)	較佳 (因有加強肋)	較差	佳，為普通花崗岩的 2-3 倍
耐磨耗性	稍差	佳	最佳
碰撞傷痕	容易突起毛邊	不會突起毛邊	不會突起毛邊
溫度	吸熱快、散熱快	吸熱慢、散熱慢	吸熱慢、散熱慢
濕度	會生銹但不扭曲	不生銹但會扭曲	不生銹但會扭曲
保養	不易保養	容易保養	容易保養

種等級，其中 1 級平台的平面度容差為

$$T = \frac{D}{100}$$

其中  $T$ ：平面度容差 ( $\mu\text{m}$ )

$D$ ：對角線長度 (mm)

0 級的容差是 1 級的 1/2 倍，

2 級的容差是 1 級的 2 倍。

詳細規格如附錄所示。

## 2. BS 英國國家規範

在 BS 規範中，將平台分為 0、1、2、3 四種等級，其中 0 級平台的平面度容差為

$$T = 2.5 \left( 1 + \frac{D}{1000} \right)$$

其中  $T$ ：平面度容差 ( $\mu\text{m}$ )

$D$ ：對角線長度 (mm)

1 級的容差是 0 級的 2 倍，

2 級的容差是 1 級的 2 倍，

3 級的容差是 2 級的 2 倍。

## 3. DIN 德國工業標準規範

在 DIN 規範中，將大理石平台分為 00、0、1、2 四種等級，其平面度容差如下：

$$00 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 2 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$0 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 4 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$1 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 10 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$2 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 20 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

其中  $T$ ：平面度容差 ( $\mu\text{m}$ )

$l$ ：長邊長度 (mm)

在 DIN 規範中，將鑄鐵平台分為 00、0、1、2、3 五種等級，其平面度容差如下：

$$00 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 2 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$0 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 4 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$1 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 10 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$2 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 20 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

$$3 \text{ 級平台的平面度容差為 } T = 40 \left( 1 + \frac{l}{1000} \right)$$

其中  $T$ ：平面度容差 ( $\mu\text{m}$ )

$l$ ：長邊長度 (mm)

表 2. CNS 7549 B6048 平台等級劃分 (中華民國)。

工作面尺寸 (mm)	工作面平面度之許可差 ( $\mu\text{m}$ )			對角線長度 (mm) (參考)
	0 級	1 級	2 級	
250 × 250	2	4	8	354
400 × 250	3	5	10	472
400 × 400	3	6	12	566
630 × 400	4	8	16	746
630 × 630	5	9	18	891
1000 × 630	6	12	24	1132
1000 × 1000	8	15	30	1414
1600 × 1000	10	19	38	1887
2000 × 1000	12	23	46	2236
2500 × 1000	15	30	60	2968

#### 4. FS 美國聯邦規範

在 FS 規範中，將平台分為 AA、A、B 三種等級，其中 AA 級平台的平面度容差為

$$T = 1 + 1.6 D^2 \times 10^{-6}$$

其中  $T$ ：平面度容差 ( $\mu\text{m}$ )

$D$ ：對角線長度 (mm)

A 級的容差是 AA 級的 2 倍，

B 級的容差是 A 級的 2 倍。

#### 四、應用與用途

平台在精密量測工作中是一個不可或缺的輔助量具，因為很多的精密量測工作都必須以一個平面為基準面，平台就是提供此基準面的最好工具。舉

凡高度規、正弦桿等檢驗工具，都必須在平台上才能順利進行量測檢驗比對劃線等工作。

#### 參考文獻

1. 精密平板, CNS 7549 B6048 (1981).
2. *Calibration Procedure for Plates*, TO 33K6-4-137-1, 30 December (1991).
3. *Plate*, FS GGG-P-463C (1977)
4. *Precision Surface Plates*, JIS B 7513 (1978).
5. *Surface Plates*, DIN 876 (1984).
6. *Surface Plate*, BS 817 (1988).
7. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
8. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 位移感測器

## Displacement Meter

**關鍵字：**位移感測器、線性變量差動變壓器

**Keywords：** displacement meter, linear variable differential transformer

### 一、基本定義

「位置」及「位移」是許多不同的量測上常用的基本參數，「位置」只是空間中某一個特定的地方，而不論此空間的大小。圖 1(a) 中，表示了這個概念。假想一個球放在刻度尺或其他量測器的刻度旁，若要表示出球的位置，我們就必須在刻度尺上選一個參考點，以做為基準點，再根據不同的點與參考點之間的距離來表示出它們的位置。以圖 1(a) 中觀察到，球是在「0」點三單位的位置處。假如不考慮其他參考座標系統，我們可將「0 點」設定在刻度尺上的任何一個位置，在 0 點右邊就稱為「+x」，在 0 點左邊則稱為「-x」。在相同的參考座標下，我們也可藉由和其他物體間的距離關係來表示位置。例如圖 1(a) 中的六邊形物體，在位置 5，圓球在位置 3，於是，我們便可說：六邊形在位置 5；或是離球「+2」單位 (或許也可說是圓球離六邊形「-2」單位處)。通常，為了分辨方便起見，我們把相對於「原點 0」的位置，稱為「絕對位置」，而相對於原點以外的點，稱為「相對位置」。

而「位移」的觀念，代表了物體移動的距離與方向，即位置的變化。其數學式的定義為：「末位置」-「初始位置」=「位移」，其中位移的正負號

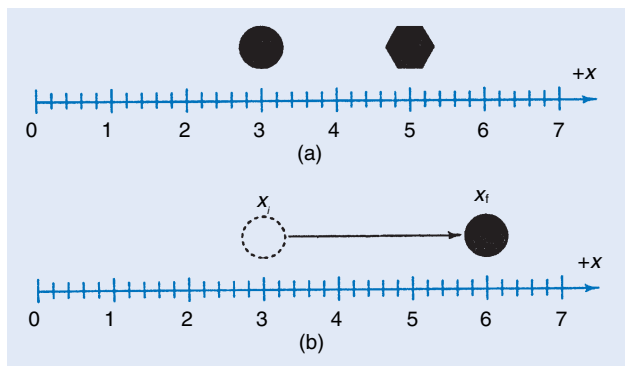


圖 1. 位置與位移的關係圖。

代表方向性。如在圖 1(b) 中，球由 x 軸上位置 +3 處的  $x$ ，移動到 +6 處的  $x_i$ ，因此，球移動了  $(+6) - (+3) = +3$  單位。且方向朝「+」方向。同樣的，為了分辨起見，當「初始位置」為「原點 0」時，我們稱此為「絕對位移」；當初始位置不是原點時，則稱為「相對位移」。

我們也可由一維的線，推論到二維的平面，其原理大致相同，只是，必須以兩個變數來表示位置。如「卡氏直角座標系」或「極化座標系」等，通常，在處理線性位移的時候，我們使用直角座標；而處理角度的位移時，則使用極座標。而本文所提的，便是測量線性絕對位移的感測器。

### 二、傳統式測量一維線性絕對位移之方法及理論

在本節舉出幾種市面上常見之一維線性位移感測器，分別加以討論，並列出其優點及缺點。

#### 1. 分壓計位置／位移感測器

分壓計其實就是可變電阻器之兩端加上激勵電路後，由碳刷在不同位置取出電壓，此即分壓電路。圖 2(a) 是最簡單型的分壓計位置／位移感測器，其中，A 點接地，B 點則接到參考電壓  $V_{ref}$ ，

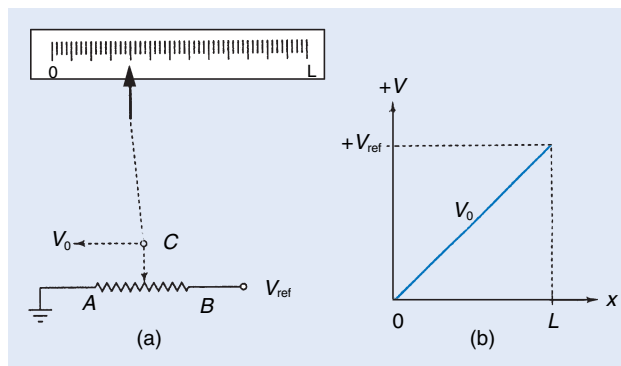


圖 2. 分壓計位置／位移感測器的電路圖。

輸出電壓  $V_0$  則如圖 2(a)，隨著滑動器由 0 滑到 L， $V_0$  則由 0 變化到  $V_{ref}$ 。激勵電路應當穩定和精確，所以點 C 的電壓，可以表示出滑動器的位置。圖 2(b) 是輸出電壓對移動器位置之理想特性曲線。

但實際應用時，由於輸出的負載效應，因此不會呈現如此理想的線性關係，茲分析如下：

如圖 3 所示，假設分壓計長度為  $l$ ，電阻值為  $R$ ，負載為  $R_L$ ，位移為  $d$

(1)  $R_L = \infty$  (理想狀況)

$$V_{out} = \frac{R_{bc}}{R} \times V_{in} = \frac{d}{l} \times R \times V_{in} = \frac{d}{l} V_{in}$$

$$\Rightarrow d = \frac{l}{V_{in}} \times V_{out}$$

$\Rightarrow$  位移  $d$  正比於輸出電壓  $V_{out}$

(2)  $R_L \neq \infty$  (非理想狀況)

$$V_{out} = \frac{R_{bc} // R_L}{(R_{bc} // R_L) + R_{ab}} \times V_{in}$$

$$\text{而其中 } R_{bc} // R_L = \frac{dRR_L}{\left(\frac{d}{l}R + R_L\right)} = \frac{dRR_L}{dR + lR_L}$$

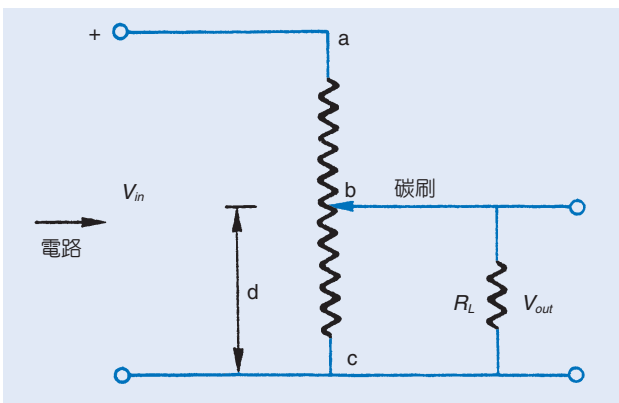


圖 3. 分壓計負載效應的示意圖。

可見，不同的負載即使在相同的位移下，也會有不同的輸出。故為消除負載的影響，通常使  $R_L$  大於  $10R$ ，或於電位輸出端加裝緩衝放大器 (如 op 之電壓隨耦器)。

優點：結構簡單，因此造價低廉。

缺點：1. 線性度因電阻本身的均勻度而異 (通常不佳)。(4)

2. 工作時會產生磨耗，故壽命不長。

## 2. 電容式位移感測器

電容式位移感測器是利用電容值的改變量會正比於位移量的性質所構成，其基本架構如圖 4 所示。其中介電物質是可動的，而電極是固定的，並且介電物質的介電常數要和空氣不同。當介電物質被推出或拉入時 (即產生了位移)，由於介於兩電極板之間的介電物質的量有改變，這導致了此感測器的電容值發生了變化；且這電容值變化量正比於位移量，因此，可利用此特性量測位移。

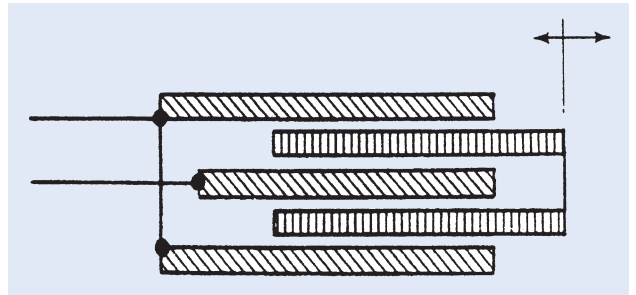


圖 4. 電容式位移感測器的基本架構圖。

優點：1. 結構簡易，成本低。

2. 為非接觸式的，可避免磨損。

缺點：1. 容易受溫度影響，而使電容值不穩定。

2. 連接感測器的電線，其中的電容效應會影響到準確度，所以電線必須短且固定。

## 3. 電感式位移感測器

所有能將位移量轉換成單一線圈的自感值 (也就是電感值) 的改變之感測器，皆屬電感式位移感測器。其設計如圖 5 所示：有個導磁係數高的鐵心可在線圈中自由滑動，當這鐵心移動時 (也就是產生了位移)，線圈的電感值就會發生變化 (由於線圈中的磁通量改變，即鐵心的插入量愈大，磁通量愈大；反之愈小)。而這線圈可被連接到 LC 振盪器線路中，如此一來，電感值的改變，將會造成頻率的變化。利用上述的物理現象，便能達到量測位移的目的。

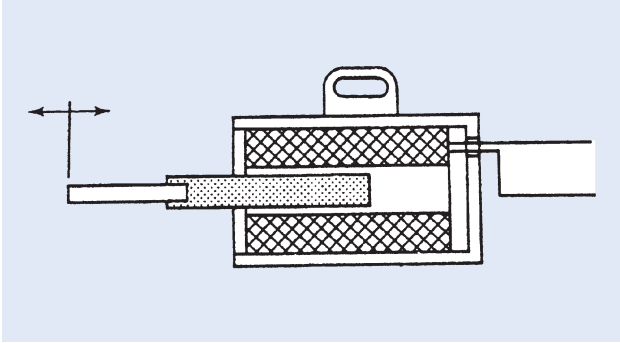


圖 5. 電感式位移感測器的結構圖。

- 優點：1. 非接觸式。  
2. 解析度高。  
3. 成本低。

缺點：只能量測較短的位移。

#### 4. 互感式位移感測器

所有藉由兩個或更多線圈（其中一個有 AC 電源輸出）之間的互感路徑的變化，而將位移量轉換成 AC 電壓變化輸出者，都屬互感式位移感測器。最常見的例子為線性變量差動變壓器（linear variable differential transformer, LVDT）。

LVDT 所利用的原理和變壓器的原理類似，唯一的差別是，變壓器的鐵心是固定的，而 LVDT 的導磁鐵心則是可移動的，且因為鐵心是可移動的，也就會影響次級線圈的電壓感應量，使次級線圈的電壓隨著鐵心的移動而變化，其構造如圖 6(a) 所示。二次線圈中為逆極性串聯。加一定交流電壓  $E_p$  於一次線圈中，則產生和二次線圈  $S_1$  和  $S_2$  交互作用的磁通，其感應電動勢  $E_{S1}$  和  $E_{S2}$  的差  $E_s$  可當二次電壓取出。考慮其對應性，若鐵心在中間位置，則  $E_{S2} = E_{S1}$ ，二次電壓  $E_s$  為 0。若將鐵心往上移動，則  $E_{S1} > E_{S2}$ ；若往下移動，則  $E_{S1} < E_{S2}$ ，鐵心離中心越遠，則二次電壓越大，若將此關係圖形化，就如圖 7 的實線，隨著鐵心的移動，二次電壓  $E_s$  成線性變化。隨著鐵心位置的正負，如圖 7 的右半面和左半面，二次電壓的相位角相差 180 度。

LVDT 的原理構造很簡單，但實際的二次電壓並不是圖 7 的實線 V 字型，而是如虛線所示，鐵心在中心時，二次電壓也不完全為零，而有殘留的電壓  $E_0$ 。

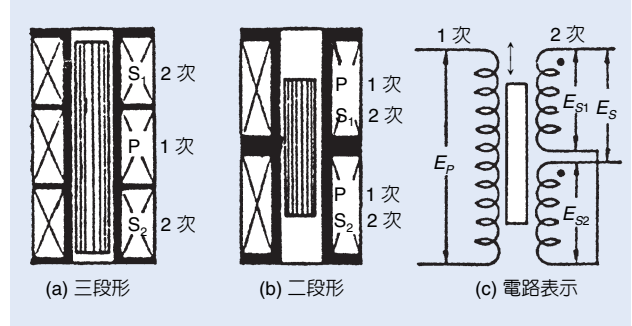


圖 6. LVDT 的構造示意圖。

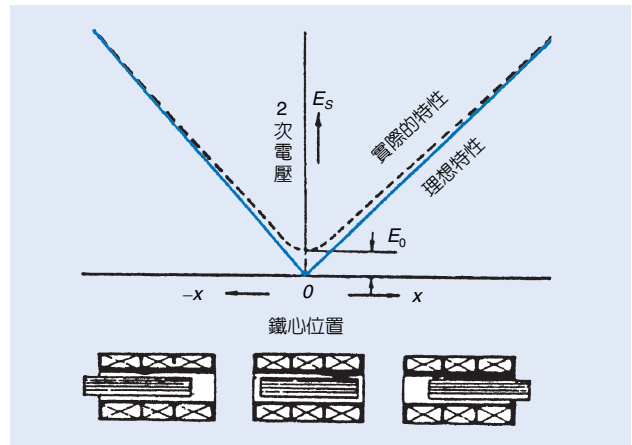


圖 7. LVDT 的二次電壓與鐵心位置關係圖。

優點：1. 輸出的電壓和鐵心的位移成正比，其線性範圍約正負 2 英寸之間。

2. 解析度極高，約 2 mm。  
3. 為非接觸性，無磨耗之虞。

缺點：1. 要設計高精確度的差動變壓器，必須有良好的經驗和技術。

2. 有溫度誤差和頻率誤差。  
3. 易受周圍磁場影響。  
4. 由於構造及處理電路較複雜，故價格昂貴。

#### 5. 線性編碼器

透過編碼器，能直接將位移量轉換成數位信號輸出（不必使用 A/D 轉換器）者，皆屬之。所謂編碼器是將待測之物理量，如位移、頻率、速度等（此處是指位移）的大小編成不同的代碼，即由代碼可知現在的物理量的大小。而編碼器又可分為下列兩種。

- ① 增量式：編碼器上有等距離分佈孔洞。可量測任意兩點的相對位移量。
- ② 絕對式：此編碼器能產生數位式編碼。它是藉由一組讀取頭，來讀出編碼器的數字碼。如「010」代表位移 2 單位。

以下將只就「增量式編碼器」加以詳細說明。其原理乃利用一組或多組光耦合器，來拾取編碼器上透光和不透光部分在移動時交替出現的信號，以量度待測量。如圖 8 所示。此信號為近似正弦波，經整形電路可得方波，如圖 9 所示。每一脈波代表一個孔距  $L$  的位移，亦即此編碼器之解析度 (resolution)。孔距越小，解析度越高。當以待測物驅動編碼器之光耦合器 (或光柵)，移動一段距離，則位移量為  $D = L \times P$ ；其中  $L$  為孔距， $P$  為經「計數器」所測得的脈波數。

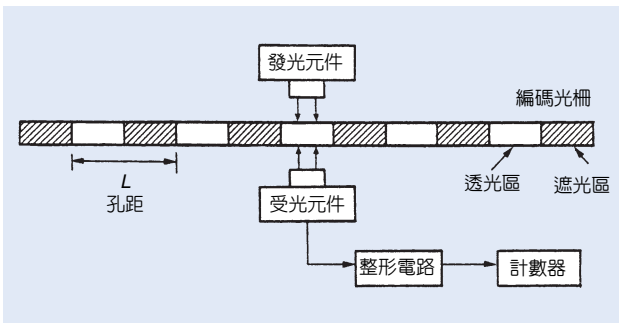


圖 8. 增量式編碼器的結構示意圖。

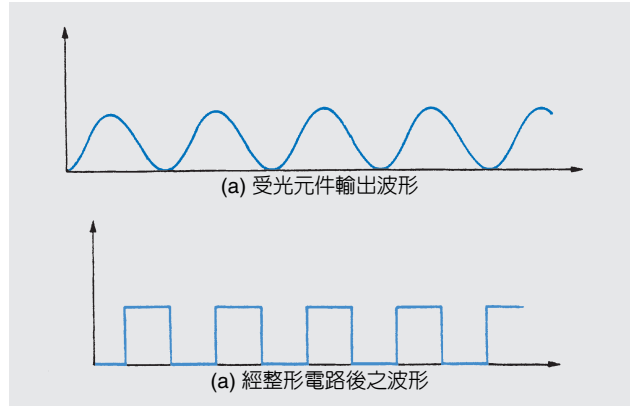


圖 9. 增量式編碼器的量測信號。

優點：1. 為非接觸式的，故不會磨損。

2. 精確度及解析度均極高。

缺點：1. 由於要製造高精密度的編碼器不易，故成本較高。

3. 在常有水、油等的場所，由於光耦合器可能因油、水的污染，而產生錯誤動作。

#### 參考文獻

1. 薛明輝, 察覺器原理與應用, 全華, 141 (1983).
2. H. N. Norton, *Handbook of Transducers*, Prentice Hall, 90.
3. Joseph J. Carr 原著, 感測電路 (*Sensors and Circuit*), 高立, 137 (1993).
4. 楊善國, 感測與量度工程, 全華 (1994).

作者：邱文昱先生為國立成功大學電機碩士，現任友聲電子公司經理。

# 天平

## Balance

**關鍵字：**天平、質量、法碼

**Keywords：**balance, mass, weight

### 一、基本原理

質量是用來描述一個物體所含有物質的量，質量的基本單位是公斤 (kg)。由於質量不能直接量測，而在地球的重力場中，每一個物體都受到地球重力的吸引，所以利用地球的重力加速度，以天平或磅秤來秤量比較各物體的重力質量 (gravitational mass)。在地球的重力場中，每一個物體受力的大小為

$$W = m \cdot g \quad (1)$$

其中  $m$  為質量， $g$  是當地的重力加速度 (在地表上  $g \approx 9.8 \text{ m/sec}^2$ )。

質量量測儀器雖然是在用來量測物體的質量，但它們本質上仍是應用公式 (1) 量測物體所受的力量再將輸出轉換成質量的單位，公斤 (kg)。地球上的重力加速度因場所而異，大約  $9.7 - 9.9 \text{ m/sec}^2$ ，不過在小範圍的區域內重力加速度變化不大，例如龍潭中科院儀校組的重力值為  $9.788707261 \pm 0.000000051 \text{ m/sec}^2$ ，新竹工研院量測中心的重力值為  $9.78914009$ 。由於在同一地點的重力值相等，故可由重力質量的比較來比較質量，亦即由標準法碼的數值推知待測物的質量。當要進行精密質量量測時，除了要考慮重力值的變化外，還要考慮空氣浮力的影響。

### 1. 量測的方法

一般質量的量測的方法可分為下列二種：

#### (1) 間接比對 (直接由天平測量)

此方法是先以標準法碼校正天平，再用此已經校正過的天平秤量待測件，而直接由天平的讀值得知待測件的質量。除等臂天平及質量比較儀外均可使用此方法。

#### (2) 直接比對 (用天平與標準法碼比對)

在此方法中是將天平當作比較儀，即以天平來比較待測物與標準法碼的差異，所以必須要有一組已經校正過的標準法碼，而且此法碼可以組合成與待測物相類似的質量。利用天平在相同的狀況下，例如溫度、濕度、地點、操作人員等，短時間內測量已知標準法碼與待測物體，經比較測量結果，求得待測件的質量。一般精密的量測均採用此種方法，其優點如下：

- ① 可以刪除天平之內藏法碼的誤差。在比較秤重時，天平的內藏法碼僅充當平衡法碼，它們並不會影響待測法碼與標準法碼之間的差值。
- ② 利用適當的秤重方法可刪除天平的漂移誤差。

### 2. 量測的儀器

歷史上最早的天平是單樑天平，接著是羅馬帝國的鋼秤 (steel yard)，到了十九世紀就發展出平台磅秤、吊掛秤、形變天平、彈簧天平等機械天平。二次世界大戰後開始發展電子式機械天平，及各式各樣的電子天平等，但如今世界上準確度最高的天平仍是等臂天平，主要是用來校正  $1 \text{ kg}$  的標準法碼，量測數據的標準差為  $3 \times 10^{-10}$ 。目前世界上常用的天平依其量測原理可分為下列幾類：

#### (1) 機械天平

- ① 雙盤三刀口天平 (two-pan, three-knife-edge balance)：可分為等臂天平 (equal-arm balance) 和不等臂天平，原理為利用待測物和標準件 (法碼) 相對於中央支點力矩平衡的關係來求得待測物質的質量。
- ② 單盤雙刀口天平 (one-pan, two-knife-edge balance)：單盤天平為雙盤天平的改良，操作方便。大部分在秤盤機構中都附有內建法碼，當秤量待測物的同時會提起相類似質量的內建法碼，使得不論秤重大小，在天平量測範圍內每

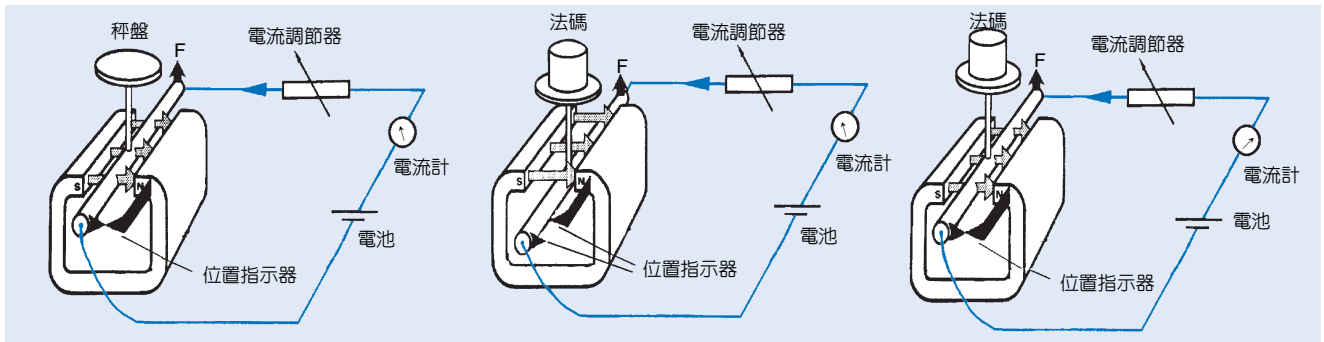


圖 1. 電子天平結構示意圖。

次測量的荷重均保持大致相等，天平樑受力形變一定，穩定性易控制。以前的此類天平傳統上都附有光學顯示裝置，現在大多已經改成電子數位顯示。

(2) 電子天平

① 應變計式 (strain-gauge type)：一般應變計天平是應用在解析度要求不是非常高的環境，此類天平的解析度範圍可達最大量測能量的十萬分之一，例如，能量為 100,000 g 的天平，最高解析度為 1 g。

此類天平是將應變計 (通常是四片) 黏貼在可撓曲的機械結構上，當天平受力時，此四片應變計的電阻就會改變，再以惠斯登電橋 (Wheatstone bridge) 感應此電阻值的微小改變，從惠斯登電橋會輸出一個與荷重相對應的電壓值，再將此電壓放大、數位化，然後顯現在顯示幕上。

② 電磁力補償式 (electromagnetic force compensation)：此類天平的解析度非常高，有

些可以高達五千萬分之一，例如能量為 1000 g 的天平，最高解析度可達 0.02 mg。此類天平是利用所謂的勞倫茲力 (Lorentz force)，即在磁場中的導體如果有電流流過，則會有力量產生，此力的大小為

$$F = (I \times B) \cdot L$$

其中 **F** = 磁場強度

**B** = 電流

**L** = 導線在磁場中的強度

示意結構如圖 1 所示。首先利用電流調節器調整電流，使得天平秤盤未受任何荷重時，兩個位置指示器能指到相同位置。當某一個法碼放在秤盤上時，秤盤就會被往下壓，使得兩個位置指示器不在相同平面上。利用電流調節器調整電流，當電流逐漸增加時，秤盤也隨之向上移，增加電流直到兩個

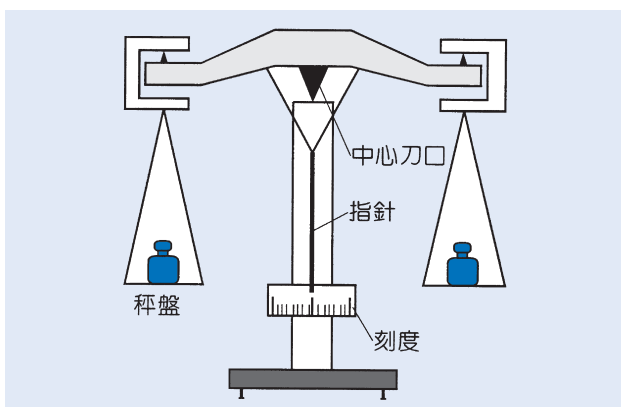


圖 2. 雙盤三刀口天平結構示意圖。

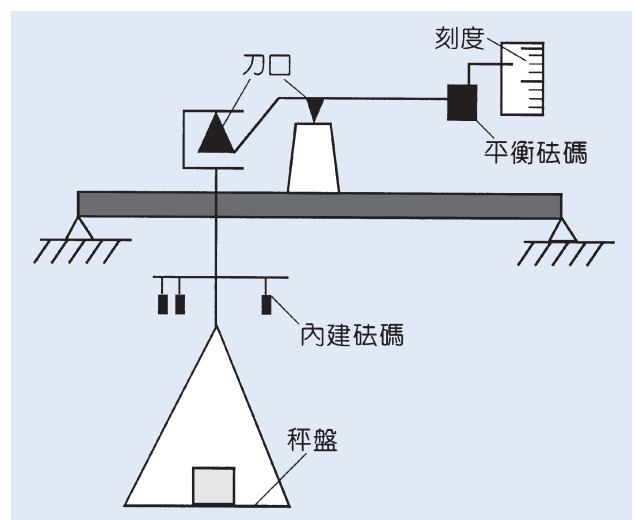


圖 3. 單盤雙刀口天平結構示意圖。

指示器又回復到相同位置。由於電流是和荷重成正比，只要知道電流大小就可以求得荷重的大小。目前此類天平都已被設計成完全自動化，因此我們只要將待測物放在秤盤上，就可以從顯示幕上讀取待測物的重量。

## 二、結構示意圖

1. 雙盤三刀口天平，如圖 2 所示。
2. 單盤雙刀口天平，如圖 3 所示。
3. 電子天平，如圖 4 所示。

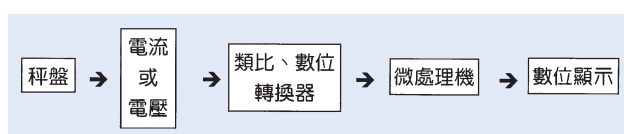


圖 4. 電子天平功能方塊圖。

## 三、儀器規格與特徵

一般實驗室用的天平可依據它們的最小可讀值 (readability) 來分類：

最小可讀值	分類	一般最大能量
0.1 $\mu\text{g}$	超微量天平 (Ultra-microbalance)	可達 5 g
1 $\mu\text{g}$	微量天平 (Microbalance)	1—25 g
10 $\mu\text{g}$	半微量天平 (Semi-microbalance)	30—200 g
0.1 mg	分析天平 (Analytical Balance)	50—500 g
$\geq 1$ mg	精密天平或磅秤 (Precision Balance or Scale)	$\geq 100$ g

在歐聯 (European Union) 中，又依照天平的準確度分類為下面四個準確等級：

等級	分類	驗證刻劃區間 $e$	驗證刻劃區間數量	最小能量
I	超準確度	$1 \text{ mg} \leq e$	$\geq 50000$	$100 d$
II	高準確度	$1 \text{ mg} \leq e \leq 50 \text{ mg}$	100...100000	$20 d$
		$0.1 \text{ g} \leq e$	5000...100000	$50 d$
III	中準確度	$0.1 \text{ g} \leq e \leq 2 \text{ g}$	100...10000	$20 d$
		$5 \text{ g} \leq e$	500...10000	$20 d$
III	一般準確度	$5 \text{ g} \leq e$	100...1000	$10 d$

其中驗證刻劃區間數量 = 最大能量  $\div$  驗證刻劃區間  
 $= \text{Max} \div e$

$d =$  刻劃區間

等級 III 和 IIII 的天平必須滿足  $e = d$ 。等級 I 和 II 的天平允許  $d < e$  (例如某些輔助指示裝置為  $e = 10 d$ )

各等級的最大允許誤差如下：

等級	各負荷範圍的最大允許誤差		
	$\pm 0.5 e$	$\pm e$	$\pm 1.5 e$
I	$\leq 50,000 e$	$> 50,000 e \dots \leq 200,000 e$	$> 200,000 e$
II	$\leq 5,000 e$	$> 5,000 e \dots \leq 200,000 e$	$> 20,000 e$
III	$\leq 500 e$	$> 500 e \dots \leq 2,000 e$	$> 2,000 e$
IIII	$\leq 50 e$	$> 50 e \dots \leq 200 e$	$> 200 e$

## 四、應用與用途

天平可以用來直接量測物體的質量，或是用來比較兩個物體之間的質量差異；適用的場合從傳統市場的買賣交易，到國際貿易；可量測的範圍從 1 mg 到數百公噸。

## 參考資料

1. Satorius, *The Fundamentals of Weighing Technology*, Sartorius AG Germany (1996).
2. Mettler-Toledo, *Fundamentals of Mass determination*, Mettler-Toledo AG Switzerland (1991).
3. D. B. Prowse, *The Calibration of Balances*, CSIRO Australia (1985).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀器校正組副工程師。

# 法碼

## Weight

**關鍵字：**法碼、質量、慣用質量、天平

**Keywords：** weight, mass, conventional mass, balance

### 一、基本原理

質量是用以描述物體所含有物質的量，其基本單位是公斤 (kg)。現今國際公制單位的七個基本單位中，只有質量單位是由人造物所構成，其餘六個單位均可追溯至物理常數或物理現象。目前國際公斤原器 (international prototype kilogram, IPK) 是由 90 % 鉑和 10 % 銥的合金所製成，其密度為 21.5 kg/m<sup>3</sup>。此國際公斤標準原器係由國際度量衡局 (BIPM) 提供。其他實驗室質量標準必須追溯至該局公斤標準原器，於是各等級法碼因應而生，成為質量標準傳遞鍊。

質量比較天平是用於比較法碼質量之大小，因法碼在空氣中有浮力存在，即使是真實質量 (true mass) 相同，若法碼密度不同，其所受浮力則不同，而產生誤差。為避免干擾，國際度量衡界引用慣用質量 (conventional mass) 以取代真實質量。法碼在空氣中慣用質量的定義是依據國際法定計量組織 (International Organization of Legal Metrology, OIML) 國際建議 R33：在溫度為 20 °C、空氣密度為 1.2 kg/m<sup>3</sup>、參考法碼密度為 8000 kg/m<sup>3</sup> 時，待測法碼的慣用質量等於與其平衡參考法碼之質量。

目前常用的法碼範圍為 1 mg – 1000 kg，為以最少數量的法碼能組合所需質量而發展出各種不同的法碼組。在 OIML 規範中，法碼分成 E1、E2、F1、F2、M1、M2、M3 等七個等級。OIML 國際建議 R111，法碼的組合可依下列四種方式：

$$(1;1;2;5) \times 10^n \text{ kg}$$

$$(1;1;1;2;5) \times 10^n \text{ kg}$$

$$(1;2;2;5) \times 10^n \text{ kg}$$

$$(1;1;2;2;5) \times 10^n \text{ kg}$$

$n$  可代表正、負整數或零。

法碼也曾以 1;2;3;5 的方式組合。目前其常用組合方式為 1;2;2;5，即當  $n = 1$  時，法碼組合為 1 kg、2

kg、2 kg 和 5 kg，藉由此四個法碼可組合出 1 kg 至 10 kg 各個整數質量。

現以範例說明法碼質量比較的原理(參見圖 1)，例如將標準法碼和待測法碼分別放置在雙盤三刀口天平 (two-pan, three-knife-edge balance) 兩端秤盤上，予以平衡後，找出其質量。

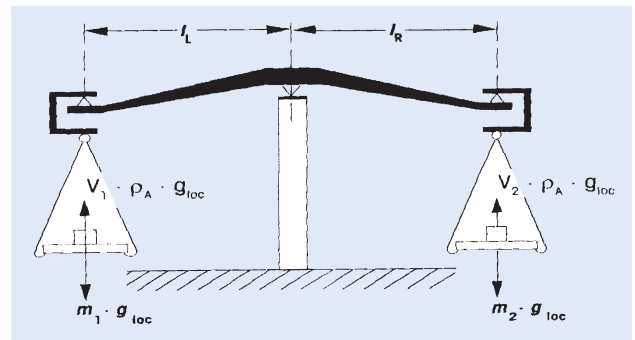


圖 1. 法碼質量比較的原理。

一般質量量測工作多在空氣中進行，其法碼會受到空氣浮力的影響，依照力矩平衡的原理，可列出下列方程式

$$l_L (m_1 g_{loc} - V_1 \rho_A g_{loc}) = l_R (m_2 g_{loc} - V_2 \rho_A g_{loc})$$

其中  $m_1$ 、 $m_2$  代表法碼 1、法碼 2 的質量

$V_1$ 、 $V_2$  代表法碼 1、法碼 2 的體積

$l_L$ 、 $l_R$  代表天平左右兩邊的有效力臂

$g_{loc}$  代表當地的重力加速度

$\rho_A$  代表秤量時的空氣密度

若 (1) 以  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分別代表法碼 1、法碼 2 的密度，

即  $V = m/\rho$

(2) 天平左右兩邊的有效力臂相等，即  $l_L = l_R$

(3) 當地的重力加速度  $g_{loc}$  是一個常數

$$\text{則推演可得 } m_2 = m_1 \cdot \frac{1 \pm \frac{\rho_A}{\rho_1}}{1 \pm \frac{\rho_A}{\rho_2}}$$

由上式可知，精密法碼質量量測時，法碼與空氣的密度都必須考慮。如果標準法碼和待測法碼的密度相等，即  $\rho_1 = \rho_2$ ，上式  $m_1 = m_2$ ，或量測的不確定度大於  $10^{-3}$  時，則空氣浮力的修正可以省略。

## 二、結構示意圖

### 1. 法碼的形狀

#### (1) 一般要求

為了易於製造，法碼外形需為一簡單幾何形狀；不可有尖銳的邊以免產生形變；不可有明顯凹處以免存積灰塵。除 1 g 或 1 g 以下的法碼，同一組法碼須有同形狀者。

#### (2) 1 g 以下法碼

小於 1 g 法碼必須為多邊形片狀或線狀，且須易於取放及能顯示法碼的器示值。1 g 以下法碼形狀如表 1。

表 1. 1 g 以下法碼形狀。

器示值 (mg)	多邊形片狀	線狀
5-50-500	五邊形	五邊形 五段
2-20-200	四邊形	四邊形 或 二段
1-10-100-1000	三邊形	三邊形 一段

#### (3) 1 g (含) 以上法碼

1 g 至 50 kg 法碼是圓柱體或稍微傾斜的圓錐體。高度要接近直徑的平均值，或在直徑的 3/4 至 5/4 之間。此法碼有一提起鈕，其高度在平均直徑和半徑之間。5 kg 至 50 kg 的法碼亦有不同形狀之適當提拿處以取代提起鈕，例如與法碼一體成形的堅固把手等。

### 2. 法碼的結構

#### (1) E1 級和 E2 級法碼

E1 級和 E2 級法碼必須是堅固而露向大氣表面無任何孔洞者，且必須是整體結構，由單一塊材料所組成。

#### (2) F1、F2、M1、M2 和 M3 級法碼

此種等級法碼範圍從 1 g 到 50 kg，原由同一塊或數塊相同金屬材料所組成，上有一個調整孔，其體積不能超過法碼總體積的五分之一，而且調整

孔必須以提起鈕或其他裝置密封。

## 三、儀器規格與特徵

1. 在 OIML 規範中之法碼等級及其最大允許誤差如表 2。

表 2. OIML 規範中之法碼等級及其最大允許誤差。

最大 允許 差 示 值	$\pm \delta m$ (mg)						
	E1 級	E2 級	F1 級	F2 級	M1 級	M2 級	M3 級
50 kg	25	75	250	750	2500	7500	25000
20 kg	10	30	100	300	1000	3000	10000
10 kg	5	15	50	150	500	1500	5000
5 kg	2.5	7.5	25	75	250	750	2500
2 kg	1.0	3.0	10	30	100	300	1000
1 kg	0.5	1.5	5	15	50	150	500
500 g	0.25	0.75	2.5	7.5	25	75	250
200 g	0.10	0.30	1.0	3.0	10	30	100
100 g	0.05	0.15	0.5	1.5	5	15	50
50 g	0.030	0.10	0.30	1.0	3.0	10	30
20 g	0.025	0.080	0.25	0.80	2.5	8.0	25
10 g	0.020	0.060	0.20	0.60	2	6.0	20
5 g	0.015	0.050	0.15	0.50	1.5	5.0	15
2 g	0.012	0.040	0.12	0.40	1.2	4.0	12
1 g	0.010	0.030	0.10	0.30	1.0	3.0	10
500 mg	0.008	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5	
200 mg	0.006	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0	
100 mg	0.005	0.015	0.05	0.15	0.5	1.5	
50 mg	0.004	0.012	0.04	0.12	0.4		
20 mg	0.003	0.010	0.03	0.10	0.3		
10 mg	0.002	0.008	0.025	0.08	0.25		
5 mg	0.002	0.006	0.020	0.06	0.20		
2 mg	0.002	0.006	0.020	0.06	0.20		
1 mg	0.002	0.006	0.020	0.06	0.20		

註：表列最大誤差係相對於慣用質量而非真實質量。

#### 2. 密度規格

一般用來做為法碼之金屬或合金材料，其密度須滿足下列條件：即當空氣密度 ( $1.2 \text{ kg/m}^3$ ) 漂移 10% 時，所造成的誤差不得超過最大容許差的四分之一。法碼密度的上下限 ( $\rho_{\min}, \rho_{\max}$ ) 如表 3。

表 3. 法碼密度的上下限。

標稱值	$\rho_{\min}, \rho_{\max}$ ( $10^3 \text{ kg m}^{-3}$ )					
	Class E <sub>1</sub>	Class E <sub>2</sub>	Class F <sub>1</sub>	Class F <sub>2</sub>	Class M <sub>1</sub>	Class M <sub>2</sub>
≥ 100 g	7.934...8.067	7.81...8.21	7.39...8.73	6.4...10.7	≥ 4.4	≥ 2.3
50 g	7.92...8.08	7.74...8.28	7.27...8.89	6.0...12.0	≥ 4.0	
20 g	7.84...8.17	7.50...8.57	6.6...10.1	4.8...24.0	≥ 2.6	
10 g	7.74...8.28	7.27...8.89	6.0...12.0	≥ 4.0	≥ 2.0	
5 g	7.62...8.42	6.9...9.6	5.3...16.0	≥ 3.0		
2 g	7.27...8.89	6.0...12.0	≥ 4.0	≥ 2.0		
1 g	6.9...9.6	5.3...16.0	≥ 3.0			
500 mg	6.3...10.9	≥ 4.4	≥ 2.2			
200 mg	5.3...16.0	≥ 3.0				
100 mg	≥ 4.4	≥ 2.3				
50 mg	≥ 3.4					
20 mg	≥ 2.3					

表 4. 法碼的用途。

等級	用途
E1	1. 用於國家標準 (由國際原型公斤導來) 和 E2 或更低等級法碼間之追溯校正。 2. E1 級法碼或法碼組，需附校正證明。
E2	1. 用於 F1 級法碼初級驗證。 2. E2 級法碼或法碼組，需附校正證明。如果能滿足 E1 級法碼所需表面粗度及磁感應性，而且於校正證明上已有記載，即可當 E1 級法碼使用。 3. 用於精確等級 I 級秤重儀器校正。
F1	1. 用於 F2 級法碼初級驗證。 2. 用於精確等級 I 級秤重儀器校正。
F2	1. 用於 M1 級及 M2 級法碼初級驗證。 2. 用於重要商業交易 (如黃金和珠寶等)、精確等級 II 級秤重儀器。
M1	1. 用於 M2 級法碼初級驗證。 2. 用於精確等級 II 級秤重儀器。
M2	1. 用於 M3 級法碼初級驗證。 2. 用於一般的商業交易及精確等級 III 級秤重儀器。
M3	1. 用於一般的商業交易級精確等級 III 級或 IV 級秤重儀器。

註：用於秤重儀器法碼的最低精確等級，係依照 OIML R 76 「非自動秤重儀器」規範要求選取。

#### 四、應用與用途

法碼的用途如表 4 所示。

#### 參考資料

1. OIML R 33 (OIML International Recommendation).

2. OIML R 76 (OIML International Recommendation).

3. OIML R 111 (OIML International Recommendation).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 電阻溫度計

## Resistance Thermometer

**關鍵字：**電阻溫度計、電阻溫度係數、自熱效應

**Keywords：**resistance thermometer, temperature coefficient of resistance, self-heating effect

### 一、基本原理

電阻溫度計是利用其電阻隨溫度變化之材料而設計，純金屬的電阻溫度係數  $\alpha$  (temperature coefficient of resistance, TCR)，一般約在 0.3 %/°C 至 0.7 %/°C 之間，白金 (Pt) 為 0.385 至 0.392 %/°C，銅 (Cu) 為 0.347 %/°C，鎳 (Ni) 為 0.675 %/°C，由於白金適用於 -260 °C 至 +1000 °C 溫度範圍最為寬廣，且其電阻對溫度之線性優良，為目前使用最普遍的電阻溫度計，稱為白金電阻溫度計 (platinum resistance thermometer)，其中又以溫度為 0 °C 時輸出 100  $\Omega$  之電阻溫度計最為常用。

白金電阻溫度計之輸出電阻與其接觸之溫度成正比，例如 0 °C 時輸出 100  $\Omega$ ，100 °C 時輸出約 139  $\Omega$ ，電阻與溫度之對照可使用轉換公式計算，較常使用的方程式 Callendar Van Dusen (CVD) Equation 如下：

$$\frac{R}{R_0} = 1 + \alpha \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right) - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right)^3 \right]$$

$$\alpha = \frac{R_{(100\text{ }^\circ\text{C})} - R_0}{100 R_0}$$

其中  $T$  = 測試溫度 (°C)， $R_0$  = 0 °C 之電阻值 (此為 100  $\Omega$ )， $R$  = 溫度  $T$  時之電阻值， $\alpha$  = 溫度係數 ( $\Omega/\Omega\text{ }^\circ\text{C}$ )， $\delta$  = 常數， $\beta$  = 常數 (0 °C 以上為 0)。目前 DIN 43760 與 MIL-T-24388 兩種規範之  $\alpha$ 、 $\delta$ 、 $\beta$  係數參考值如表 1。

表 1. 內插方程式之係數。

係數	DIN 43760	MIL-T-24388
$\alpha$	0.00385	0.00392
$\delta$	1.507	1.49
$\beta$	0.111 ( $T < 0\text{ }^\circ\text{C}$ ) 0 ( $T \geq 0\text{ }^\circ\text{C}$ )	0.1 ( $T < 0\text{ }^\circ\text{C}$ ) 0 ( $T \geq 0\text{ }^\circ\text{C}$ )

CVD 為一內插方程式，先須測得白金電阻溫度計在 0 °C 與 100 °C 之輸出電阻，求得係數  $\alpha$ ，再於 0 °C 以上另一點溫度求得  $\delta$  及 0 °C 以下一點溫度求得  $\beta$ ，即可得到完整的 CVD 方程式及電阻與溫度之對照關係式，根據測得之電阻值即可換算成溫度值。

量測電阻時須將電流通過電阻溫度計，為避免產生焦耳 (Joule) 熱而影響溫度量測精度，應盡量降低電流值，一般皆使用 1 mA 的電流，此過高電流產生熱的現象稱為自熱效應 (self-heating effect)。此外，電阻溫度計之端子若連接不同金屬於不同溫度的情況下，則會產生熱電壓效應 (thermoelectric emf effect)，為避免此端子效應可將讀取裝置正負端子反向，再將兩次量測值平均，即可消除此效應所造成之誤差。

電阻溫度計除了輸出  $R_0$  為 100  $\Omega$  外，尚有 25  $\Omega$ 、2.5  $\Omega$  與 0.25  $\Omega$  等標準白金電阻溫度計 (standard platinum resistance thermometer, SPRT)，此類型溫度計之精密度與穩定度非常高，多作為精密溫度校正之標準件，其使用方法與環境規定相當嚴格，溫度與電阻對照之內插方程式複雜，牽涉層面較廣，在此不詳述。此型溫度計須使用標準溫度定

表 2. 國際溫標 ITS-90 規定之溫度定點。

純質	符號	平衡狀態	溫度值 (K)	溫度值 (°C)
汞	Hg	三相點	234.3156	-38.8344
水	H <sub>2</sub> O	三相點	273.16	0.01
鎩	Ga	熔解點	302.9146	29.7646
銦	In	凝固點	429.7485	156.5985
錫	Sn	凝固點	505.078	231.928
鋅	Zn	凝固點	692.677	419.527
鋁	Al	凝固點	933.473	660.323
銀	Ag	凝固點	1234.93	961.78

點設備搭配精密電阻讀取裝置始能完成校正，根據國際溫標 ITS-90 規定，從  $-270^{\circ}\text{C}$  至  $+1100^{\circ}\text{C}$  溫度定點約有十七點，其常用定點如表 2。

## 二、結構示意圖

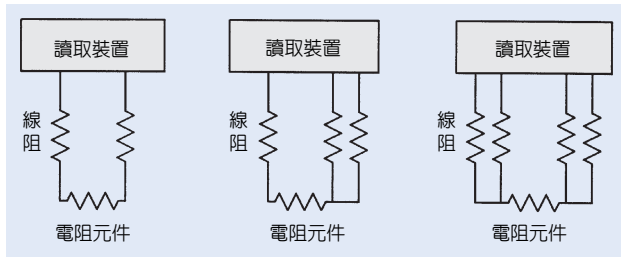


圖 1. 電阻溫度計的连接方式。

電阻溫度計的結構最主要部份為感溫棒，其感測元件為線繞型電阻，置於感溫棒的尖端，其間包覆著陶瓷絕緣材料，電阻線經延伸後接至讀取裝置，其連接方式有兩線、三線及四線等三種，如圖 1 所示。兩線式結構最為簡單，由於導線電阻的影響，故僅用在較粗略的檢測。三線式其精確度適合於一般工業應用。四線式精確度最高，價格亦最為昂貴，適合精密量測或實驗室使用，由於導線電阻的補償可以作長距離量測。無論是那種連接方式，大多可使用惠斯頓電橋作為量測線路，除連接方式外，電阻補償電路之功能，以及金屬電阻線的純度與品質等對溫度量測精確度亦是非常重要。

## 三、儀器規格與特徵

電阻溫度計係運用金屬其電阻值隨溫度變化之原理，亦稱電阻式溫度偵測器 (resistance temperature detector, RTD)，在溫度  $0^{\circ}\text{C}$  時輸出電阻為  $100\ \Omega$  的白金電阻溫度計俗稱 Pt100 RTD，目前用在溫度測試非常頻繁，其基本規格與特性如下：

- (1) 溫度使用範圍： $-200^{\circ}\text{C}$  至  $+800^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 溫度  $0^{\circ}\text{C}$  時的電阻溫度係數約為 0.0039。
- (3) 自熱效應： $0.02$  至  $0.75^{\circ}\text{C}/\text{mW}$ 。
- (4) 溫度  $100^{\circ}\text{C}$  時的容許差約為  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 解析度： $0.29$  至  $0.39\ \Omega/^{\circ}\text{C}$ 。

(6) 漂移量： $0.01$  至  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。

目前溫度計電阻與溫度之對照有兩種規範：德國電工標準委員會 DIN 43760 規範，以及美國國防部 MIL-T-24388 規範。其中溫度係數 DIN 43760 規範為 0.00385，MIL-T-24388 規範為 0.00392，雖然係數有些差異，但於溫度  $0^{\circ}\text{C}$  時的電阻值皆為  $100\ \Omega$ 。

## 四、應用與用途

目前測試或實驗皆講求品質與可靠度，溫度量測亦然，電阻溫度計的穩定性與準確性能滿足精密量測要求，此外電阻溫度計使用範圍相當寬廣，線性非常好及在高溫測試環境仍有極佳特性等，都是電阻溫度計的優點。

除精密溫度量測與試驗之外，許多精密溫度控制的感溫棒多採用電阻溫度計，甚至經由介面接至電腦作溫度控制與紀錄，在許多複雜的測試系統中亦採用電阻溫度計以截取數據或作溫度補償。由於電阻溫度計之感測部分大多製作成不鏽鋼探棒，對於一般惡劣或腐蝕的測試環境仍有基本的抵抗作用，可適用於一般化學物品之溫度檢測。但是電阻溫度計也有一些缺點，例如價格較為昂貴，溫度變化的靈敏度較低，容易受接觸電阻與震動的影響，需要三或四線的工作電路，不適於快速量測與微量溫度感測工作等。不過，電阻溫度計能定期校正，並按照規定使用，卻是很好的溫度感測儀器。

## 參考文獻

1. NBS Monograph 126, *Platinum Resistance Thermometry* (1973).
2. NIST Technical Note 1265, *Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)* (1990).
3. PTB Report E-13e, *Principles of Electric Temperature Measurement* (1981).

作者：李國琪先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院助理研究員。

# 玻璃溫度計

## Glass Thermometer

**關鍵字：**玻璃溫度計、膨脹係數、浸沒線

**Keywords：** glass thermometer, expansion coefficient, immersion line

### 一、基本原理

玻璃溫度計為最早設計且廣為使用之溫度量測儀具，於西元 1654 年第一支簡單的酒精玻璃溫度計出現，直到 1724 年 Fahrenheit 始作出第一支較精密的水銀溫度計，即為華氏溫度計。玻璃溫度計為利用玻璃與液體的膨脹係數不同，使置於玻璃管內液體之長度隨溫度成線性膨脹之現象而設計，僅須在玻璃管上賦予刻度即可判讀溫度，其推導之計算式為：

$$\text{膨脹係數 } K = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$$

$V$ ：測溫液體體積

$T$ ：溫度

$$\text{體積變化 } \Delta V = KV\Delta T = A\Delta L$$

$A$ ：毛細管截面積

$$\text{分度長度 } \Delta L = \frac{KV\Delta T}{A} = \frac{\Delta T}{A} \frac{dV}{dT}$$

$\Delta T$ ：溫度變化區間

由分度長度計算式可知，若玻璃毛細管截面積 ( $A$ ) 為均勻定值，體積之溫度變化率固定不變，則長度變化 ( $\Delta L$ ) 與溫度變化 ( $\Delta T$ ) 成正比，因此由玻璃溫度計上的分度可知當時的溫度讀值。

### 二、結構示意圖

玻璃溫度計之結構非常簡單，係將液體置入玻璃管 (stem) 內，並刻劃溫度主標 (main scale) 而成

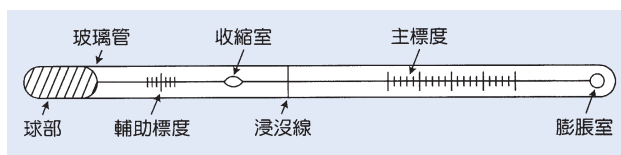


圖 1. 玻璃溫度計之結構示意圖。

雙重管溫度計是為了避免因接觸腐蝕性液體而破壞了刻劃而有不同設計。如圖 1 所示，球部 (bulb) 長度與量測溫度範圍之寬窄有關，溫度範圍寬者球部長度較長。一般情況輔助標度 (auxiliary scale) 以  $0^{\circ}\text{C}$  為主要範圍，作為校正時之參考點 (reference point)。收縮室 (contraction chamber) 用於溫度範圍較寬時可避免玻璃管過長。浸沒線 (immersion line) 與浸入深度有關，膨脹室 (expansion chamber) 可避免量測溫度超過時造成玻璃管脹裂。

### 三、儀器規格與特徵

玻璃溫度計之量測範圍與玻璃管及其液體之耐溫性有關，由於玻璃在製程中所攙入成份不同，其耐溫極限亦不同，一般玻璃可耐溫  $350^{\circ}\text{C}$ ，其他特殊玻璃如硼矽酸鹽 (borosilicate) 玻璃可耐溫  $450^{\circ}\text{C}$ ，耐火玻璃可至  $600^{\circ}\text{C}$ ，而以石英玻璃耐溫  $1050^{\circ}\text{C}$  為最高，目前使用在白金電阻溫度計的材質上。

理想的測溫液體應為溫度範圍寬廣、材質特性穩定，以及對於溫度變化相當線性。如表 1 為各種測溫液體的溫度使用範圍，常用的水銀玻璃溫度計範圍從  $-50^{\circ}\text{C}$  至  $+350^{\circ}\text{C}$ ，其中低溫部分使用了水銀含鈹的材質。限於酒精的沸點，酒精玻璃溫度計僅適用於  $75^{\circ}\text{C}$  以下的溫度。

玻璃溫度計量測範圍是從  $-50^{\circ}\text{C}$  至  $350^{\circ}\text{C}$ ，每支  $50^{\circ}\text{C}$ ，全套八支，標度為  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，範圍最廣且為連續。精密的玻璃溫度計其標度為  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，量測範圍在  $5^{\circ}\text{C}$  以內 (如  $18^{\circ}\text{C}$  至  $21^{\circ}\text{C}$ )，又稱定點玻璃溫度計，係使用於溫度範圍窄或固定溫度之量測方面。其他以酒精作介質但標度較粗者，以水銀作傳導介質而控制溫度者，及亦有玻璃溫度計以  $^{\circ}\text{F}$  為單位者。

測溫液體於玻璃管中同時受熱膨脹，由於測溫

表 1. 各種測溫液體。

測溫液體材質	凝固點 (°C)	沸點 (°C)	使用下限 (°C)	使用上限 (°C)
酒精 (Ethanol)	-112	78.5	-100	75
水銀 (Mercury)	-38.84	356.66	-35	350
水銀-鉍 (Mercury-Thallium)	-59	—	-55	—
甲苯 (Toluene)	-95	110.6	-90	100
鎡 (Gallium)	29.77	2000	30	1050

液體的膨脹係數遠大於玻璃，因此僅能看到測溫液體的膨脹（伸長），此現象係由於測溫液體相對於玻璃的膨脹係數；亦稱為視膨脹係數  $k$ ，水銀之視膨脹係數  $k$  值約為  $1.6 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ （華氏溫標之  $k$  值約為  $0.9 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{F}$ ），而酒精之  $k$  值約為  $10.4 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。

玻璃溫度計設計上有三種浸入方式：

1. 全部浸入 (total immersion)：溫度計球部至全部液柱之區域浸入待測液體中。
2. 部分浸入 (partial immersion)：溫度計球部至浸沒線之區域浸入待測液體中。
3. 整體浸入 (complete immersion)：溫度計整體包括膨脹室之區域浸入待測液體中。

當全部浸入式溫度計以部分浸入方式使用時須作管部溫度修正，將輔助溫度計置於待測溫度計水銀頂部與液面中間量測平均溫度，則管部溫度修正值為  $kn(T-t)$ ，其中  $k$  為前述之視膨脹係數， $n$  為水銀露出液面之溫度差值， $T$  為玻璃溫度計之讀值， $t$  為水銀露出液面之平均溫度，玻璃溫度計讀值須加上此修正值方為實際溫度讀值。

#### 四、應用與用途

玻璃溫度計的主要特色為：讀值穩定、漂移率低、操作簡單、費用經濟，以及無需電源等，其缺點為易碎與測溫範圍較窄，溫度超過時須更換溫度計。目前玻璃溫度計較常使用在化學分析、材料試驗、熱卡計測試、恆溫監測、環境監測等應用範圍之溫度量測。

玻璃溫度計不僅用在單純溫度量測上，如應用

在溫度控制方面，將一般水銀玻璃溫度計頂部延伸同樣範圍的標度，兩分度間連接一金屬螺桿，螺桿可調至所需的溫度標度，當昇溫時水銀上昇並接觸螺桿底部形成通路，利用導線傳出接通訊號，代表設定溫度已到達，作為加熱器關閉之依據，達成控溫之功能。

利用兩支玻璃溫度計亦可量測相對濕度，其作法為將兩支玻璃溫度計同時置於環境中，其中一支溫度計球部包著紗布，紗布底部垂入水中並吸收水份，此溫度計稱為濕球 (wet bulb) 溫度計，另一支稱為乾球 (dry bulb) 溫度計，兩支溫度計測得之溫度值不相同，經查對照表可求得當時之相對濕度，亦有廠商直接將乾濕球溫度計搭配對照表組製成商品，非常方便。

目前雖然電子測溫儀器相當普遍，但是在某些化學分析與材料試驗等方面，溫度範圍不寬、系統亦不複雜之情況下，玻璃溫度計仍是常用溫測儀器，若能正確使用且定期校正，玻璃溫度計是非常經濟方便的。

#### 參考文獻

1. NBS Monograph 150, *Liquid-in-Glass Thermometry* (1976).
2. NIST Technical Note 1265, *Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)* (1990).
3. T. W. Kerlin, *Temperature Measurement*, Instrument Society of America (1981).

作者：李國琪先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院助理研究員。

# 熱電偶溫度計

## Thermocouple Thermometer

**關鍵字：**熱電偶、電動勢、熱電效應

**Keywords：**thermocouple, electromotive force, thermoelectric effect

### 一、基本原理

在西元 1821 年 T. J. Seebeck 首先發現兩種不同金屬導線兩端連接在一起時，且兩個接點是在不同溫度，則在此迴路中將會產生淨電動勢 (electromotive force, emf) 而感應一連續電流，此即為熱電效應 (thermoelectric effect)。此效應用於溫度量測方面，即溫度感測器，又稱熱電偶 (thermocouple)。熱電偶的結構非常簡單，是由兩種金屬導線連接而成，其中一接點稱為熱接點 (hot junction) 或量測接點 (measuring junction)，用於直接感測溫度；另一端接至電動勢 (電壓) 量測儀器，此端點稱為冷接點 (cold junction) 或參考接點 (reference junction)。

熱電偶的熱電效應可用以下三種效應說明。

#### 1. 席貝克效應 (Seebeck effect)

兩種不同金屬導線兩端連接在一起之熱電偶，其兩個接點在不同溫度，則在此迴路中將會產生淨電動勢而感應一連續電流，此電流的大小和所使用的材質以及接點的溫差有關，且只要這兩個接點一直保持在不同的溫度，電流就會一直存在，稱為席貝克效應，其函數關係式為  $E = \int \alpha dT$ ，其中  $E$  為淨電動勢， $T$  為溫度， $\alpha$  為兩導線間的相對席貝克係數 (Seebeck coefficient)。

#### 2. 柏爾提效應 (Peltier effect)

實驗證明電流流經熱電偶兩種導線所構成之迴路時，依據電流不同的流動方向，其接點會有放熱或吸熱的現象，稱為柏爾提效應，這種效應現今已廣泛的使用在許多加熱和冷卻系統設計的基礎上。電流以某一方向通過熱電偶之接點時，該接點發生吸熱現象且溫度降低，電流反向則該接點放熱且昇溫，此吸放之熱量稱為柏爾提熱量 (Peltier heat)，

函數關係式為  $Q = \int \pi I dt$ ，其中  $\pi$  為柏爾提係數 (Peltier coefficient) 或柏爾提電壓 (Peltier voltage)， $I$  為電流， $t$  為時間。

#### 3. 湯姆生效應 (Thomson effect)

在沿著溫度梯度之單一均質導線上有電流通過時，此溫度梯度會發生改變，亦即發生可逆的熱量釋放或吸收的現象，稱為湯姆生效應。其釋放或吸收的湯姆生熱量 (Thomson heat) 與溫差、電流成正比，函數關係式為  $Q = \int \sigma dT I dt$ ，其中  $\sigma$  為湯姆生係數 (Thomson coefficient)， $T$  為溫度， $I$  為電流， $t$  為時間。湯姆生係數代表單位溫差之電動勢，因此在單一導線上之湯姆生電壓 (Thomson voltage)  $E = \int \sigma dT$ ， $T$  為溫度。

熱電偶在應用上有三個基本定律如下說明。

#### 1. 均質金屬定律 (law of homogeneous metals)

單一均質金屬材料若僅受到熱的作用，無論如何改變其截面，熱電電流皆無法存在於此均質金屬材料所形成的迴路中，此定律稱為均質金屬定律，亦即熱電電流產生於不同金屬材質所組成的迴路中，故熱電偶須由兩種不同材質之金屬所構成。

#### 2. 居間金屬定律 (law of intermediate metals)

由多種不同材質金屬所構成的迴路整個放置於同一溫度中，則迴路中各熱電動勢的代數和為零，稱為居間金屬定律。由兩種不同金屬材質所組成的迴路中加入另一種金屬材質並不改變其熱電動勢，如同量測電動勢的儀器中所使用的電路不會影響熱電偶之電壓量測結果。

#### 3. 接續溫度定律 (law of successive temperature)

兩種均質金屬材料組成迴路之接點溫度為  $T_1$

與  $T_2$ ，其產生之熱電動勢為  $E_1$ ，若接點溫度改為  $T_2$  與  $T_3$  時，所產生熱電動勢為  $E_2$ ，如迴路之接點溫度為  $T_1$  與  $T_3$  時，其所產生的熱電動勢將是  $E_1 + E_2$ 。此定律說明補償導線具有與熱電偶相同之熱電特性，於搭配共用之情況下並不會改變熱電偶之淨電動勢。

由前述之熱電偶效應與基本定律得知，當兩種不同金屬材質的導線之兩接點溫度不同時，就會產生電動勢。若其輸出電壓很低，材質不均勻及熔點低，均不適作熱電偶，故實際上理想熱電偶材質並不多。下列條件為選用熱電偶材質的參考：

- ① 材質必須均勻：有許多材質的成份很難做到均勻一致，若組合成熱電偶勢必有偏差且特性不穩定。
- ② 電阻不可太高：熱電偶電阻過高會限制電流的流通能力，改變電動勢值的大小，亦造成低電阻量測裝置之負載效應，影響輸出顯示的讀值。
- ③ 席貝克係數差距要大：組成熱電偶材質之席貝克係數 (熱電靈敏度) 差距要大就可用來作為熱電偶。
- ④ 熔點高且不易氧化：熱電偶材質的熔點須高於量測溫度，且不易被氧化，因材質氧化後會變得較不均勻，以銅組成熱電偶無法使用在  $350^\circ\text{C}$  以上的環境，因為銅在  $350^\circ\text{C}$  以上會氧化很快。

## 二、結構示意圖

熱電偶主要用途是溫度量測，其結構是由兩種不同材質的金屬導線組成，一端接點作為溫度量測點，另一端為冷接點或為參考接點，此點應先接至

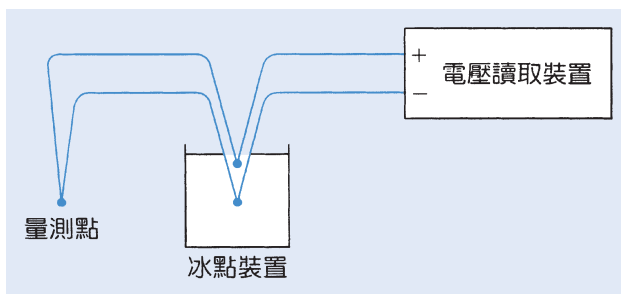


圖 1. 基本的熱電偶裝置圖。

冰點裝置，以銅線接至電壓量測裝置，其結構如圖 1 所示，測得之電壓值，再查表換算成溫度值。冰點裝置可利用冰塊製成冰泥狀，或使用電子式冰點裝置，以確保參考接點為  $0^\circ\text{C}$ 。電壓量測裝置須具有直流電壓量測功能之電表，量測範圍為  $\pm 100\text{ mV}$ ，解析度為  $1\ \mu\text{V}$  以下。熱電偶之正 (+) 端與負 (-) 端分別以絕緣銅線接至電表之正負端。

## 三、儀器規格與特徵

表 1 為常用熱電偶型式，美國國家標準協會 (ANSI) 將熱電偶分為基本型 (J、K、T、E) 與貴金屬型 (R、S、B)。參考表 1 及考量測試溫度範圍，可選擇適合的熱電偶型式。但貴金屬熱電偶輸出電壓較小，在  $0^\circ\text{C}$  以下很少使用。

表 1 所列出熱電偶使用溫度範圍相當廣，但實際並不盡然，尤以高溫部份為然，因熱電偶對不同線徑之極溫亦不同，例如 J 型熱電偶之極溫為  $1200^\circ\text{C}$ ，如線徑代號為 AWG No.20 Gage (約  $0.81\text{ mm}$ )，其極溫僅為  $480^\circ\text{C}$ ，AWG No.8 Gage (約  $3.25\text{ mm}$ ) 可耐溫至  $760^\circ\text{C}$ ，其線徑粗細與耐溫高低有相當大關係。另一影響因素為包覆熱電偶之絕緣材料，不同材質其耐溫亦不相同，有關極溫如鐵弗龍 (teflon) 為  $200^\circ\text{C}$ ，玻璃纖維 (fiber glass) 為  $480^\circ\text{C}$ ，陶瓷 (ceramic) 為  $1000^\circ\text{C}$ ，因此慎選熱電偶型式、線徑大小，以及包覆絕緣材料，方能確實量測所需之溫度範圍。

## 四、應用與用途

熱電偶是非常普遍的溫度感測元件，量測範圍寬廣，價格亦不昂貴，使用上僅須搭配冰點與電壓讀取裝置，目前廣泛應用在工業上，尤其是高溫量測方面。在商品方面，目前已改進冰點與電壓讀取裝置，具有將接點溫度由室溫修正至  $0^\circ\text{C}$  之溫度補償功能，並整合溫度電壓對照表之積體電路，製成直接顯示溫度值的數字溫度計，使用方便。一般而言，熱電偶線僅用絕緣材料包覆者稱為裸線型熱電偶，可用以量測空氣與非腐蝕性氣體之溫度。若熱電偶之絕緣材料外包覆著不鏽鋼並做成直桿形，稱為感溫棒型熱電偶，可用以量測氣體與液體之溫度。

表 1. 常用的熱電偶型式。

ANSI 型式	熱電偶材質 (正極／負極)	溫度範圍 (°C)
J	Iron/Copper-Nickel Alloy	-210 至 1200
K	Nickel-Chromium/Nickel-Aluminum	-270 至 1372
T	Copper/Copper-Nickel Alloy	-270 至 400
E	Nickel-Chromium/Copper-Nickel	-270 至 1000
R	Platinum-13 % Rhodium/Platinum	0 至 1767
S	Platinum-10 % Rhodium/Platinum	0 至 1767
B	Platinum-30 % Rhodium/Platinum-6 % Rhodium	0 至 1820

在材料熱處理、化學分析與環境溫度試驗，均須使用溫度爐或溫度櫃，其設定恆溫之控制器多使用熱電偶為感溫元件，將測得之溫度與設定值作比較，作為昇溫與降溫之依據，熱電偶結構簡單，且容易更換。此外，將熱電偶之量測接點與一熱傳良好且均勻之金屬片接在一起，可量測固體表面之溫度則稱為表面溫度計。

溫度量測無論是在製造、分析與試驗上皆非常重要，若能正確使用熱電偶溫度計，且定期校正以確保其準確度，熱電偶溫度計對溫度量測是非常方

便實用的。

### 參考文獻

1. ASTM STP 470B, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement* (1981).
2. NIST Technical Note 1265, *Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)* (1990).
3. T. W. Kerlin, *Temperature Measurement*, Instrument Society of America (1981).

作者：李國琪先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院助理研究員。

# 光高溫計 Pyrometer

**關鍵字：**光高溫計、黑體、發射率

**Keywords：**pyrometer, blackbody, emissivity

## 一、基本原理

物體的熱能會輻射電磁波，而光高溫計即利用此特性量測其光譜強度，轉換為電訊號，再轉為溫度值。

光高溫計之熱輻射定律，主要如下：

### ① 史帝芬波茲曼定律 (Stefan Boltzman law)

$$Q_r = \sigma AT^4$$

$Q$ ：理想黑體表面的總體輻射，W

$\sigma$ ：史帝芬波茲曼常數， $5.669 \times 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$A$ ：輻射面的面積， $\text{cm}^2$

$T$ ：輻射面的絕對溫度，K

### ② 偉氏置換定律 (Wien's displacement law)

$$T\lambda_{\text{MAX}} = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \mu\text{M}$$

$T$ ：絕對溫度，K

$\lambda_{\text{MAX}}$ ：黑體輻射光譜最大之波長

### ③ 蒲朗克輻射定律 (Planck's radiation law)

$$W_\lambda = C_1 \varepsilon_\lambda / \lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)$$

$W_\lambda$ ：波長  $\lambda$  時輻射面每一立體角面積之功率， $\text{W/m}^2 \text{sr}$

$C_1$ ：第一輻射常數， $1.191 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$

$C_2$ ：第二輻射常數， $0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$

$\varepsilon_\lambda$ ：波長  $\lambda$  時輻射面之發射率 (emissivity)，理想黑體為 1

$e$ ：2.71828

光高溫計大致可分為二大型態，即光學式光高溫計 (optical pyrometer) 及輻射式光高溫計 (radiation pyrometer)。

## 1. 光學式光高溫計 (optical pyrometer)

此型又稱為亮度光高溫計 (brightness pyrometer)。於量測被測物所產生之窄波帶輻射功率，通常使用紅色濾鏡，過濾  $0.63 \mu\text{m}$  以下之波長，並利用人眼對  $0.63 \mu\text{m}$  以上之波長有較差之靈

敏度，而形成一帶寬 (band pass)。被測物體熱輻射線在光學架構上形成一背景光，若調整亮度光高溫計之燈絲電流，使燈絲顏色與其背景光顏色相同而重合，此時燈絲似消失，記下燈絲電流，即可查得校正燈絲相對於黑體 (blackbody) 溫度值。

## 2. 輻射式光高溫計 (radiation pyrometer)

此式光高溫計依感測波長之範圍不同，可分如下三種：

① 全色光高溫計 (total radiation pyrometer)：此種光高溫計量測全波長輻射功率，再根據史帝芬波茲曼定律 ( $\sigma T = \sigma AT^4$ ) 算出溫度，但由於光高溫計上之護鏡片及蒸汽等影響導致輻射功率可能未與  $T^4$  成正比。此外，須先知被測物總發射率，方能測出精確的溫度，但總發射率不易精準，故導致溫度的誤差。

② 比色光高溫計 (ratio pyrometer)：又稱兩色光高溫計 (two color pyrometer)，依據蒲朗克輻射定律，量測兩特定波長之輻射功率比，此種光高溫計可減低發射率對溫度之影響。

③ 單色光高溫計 (narrow-band pyrometer)：依據蒲朗克輻射定律，量測固定波長之輻射功率，是高溫量測中最精準的光高溫計。

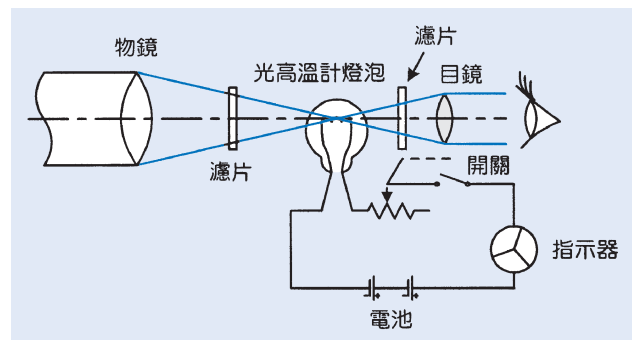


圖 1. 光學式光高溫計。

表 1. 各式之光高溫計比較。

分類	感測器	測定波長	溫度範圍	距離係數	反應速度
亮度式	人眼	0.65 $\mu\text{m}$ 左右	中高	大	慢
全色式	熱電型 (thermopile)	8 至 13 $\mu\text{m}$	低	小	慢
單色式	光電型		中高	大	快
	Si	0.9 $\mu\text{m}$			
	Ge	1.6 $\mu\text{m}$			
	PbS	2.0 $\mu\text{m}$			
比色式	光電型		中高	大	快
	Si	0.85/1.0 $\mu\text{m}$			
	Ge	1.5/1.65 $\mu\text{m}$			
	PbS	2.05/2.35 $\mu\text{m}$			

## 二、結構示意圖

光學式光高溫計 (亮度式光高溫計) 之結構示意圖如圖 1，輻射式光高溫計 (單色光高溫計) 如圖 2；光學結構部分之距離係數  $L/D$  為考慮之重點，如圖 3。

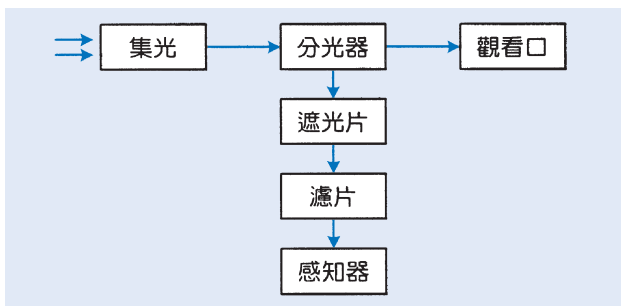


圖 2. 單色光高溫計。

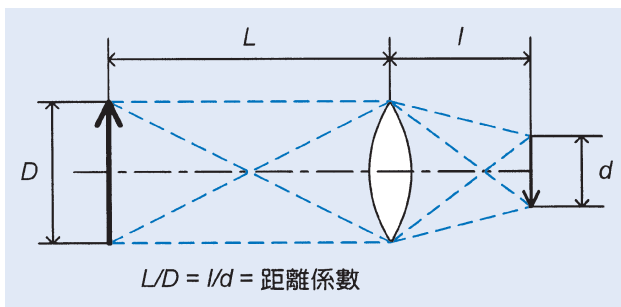


圖 3. 光學結構部分之距離係數  $L/D$ 。

## 三、儀器規格與特徵

目前光高溫計型式甚多，使用者依其需求及下列原則而選定。

### 1. 應考慮事項

- ① 被量測物之溫度範圍，溫度變化速度，發射率

大小及其變化。

- ② 需求精度，反應速度。
- ③ 量測距離，觀察區域。
- ④ 周邊情況：有無蒸汽、塵埃、黑光、火焰等之影響。
- ⑤ 置放空間：有無溫度、振動及濕度之影響。
- ⑥ 溫度指示方式。
- ⑦ 費用，維修 (含校正)。

### 2. 儀器規格選定

- ① 感測器；② 波長範圍；③ 距離係數；④ 精度；⑤ 反應速度；⑥ 發射率補償；⑦ 峰值擷取，輸出訊號大小；⑧ 防護鏡片之透光率；⑨ 維修零件之取得；⑩ 價格。

## 四、應用與用途

光高溫計用以高速與非接觸式測溫，亦可用於遠端量測之用如氣象觀測、真空爐、連續熱處理、1500  $^{\circ}\text{C}$  以上高溫物體、熱源金屬表面溫度、高分子低熱傳導等溫度之量測。

### 參考文獻

1. H. J. Kostkowski and R. D. Lee, *Theory and Methods of Optical Pyrometer.*
2. H. N. Norton, *Handbook of Transducers.*
3. *IR-Thermometer Selection Guide and Application*, 日本 Chino 公司。

作者：吳清吉先生畢業於中正理工學院電子系，現任中山科學研究院校正實驗室負責人。

# 氣泡水平儀

## Bubble Level

**關鍵字：**水平儀、水平、平面

**Keywords：**level meter, level, plane

### 一、基本原理

氣泡水平儀是利用容器內的液體在靜止時會呈現水平的現象，及在地球重力場中氣體會浮出液體表面的原理，在一個弓形密閉的透明玻璃管中充填黏滯性小的液體 (如酒精)，僅留極小的空間以形成一小氣泡在玻璃管內。由於液體的比重較氣體大，所以液體會充滿於密閉玻璃管的底部，促使氣泡浮至弓形玻璃管的最高點。當基座面傾斜時，水平儀也會傾斜某一角度，氣泡也會在玻璃管內移動某一段距離而到達弓形玻璃的最高點。由此氣泡位移的距離，即可算出平面傾斜的角度，如圖 1 所示。

圖 1 表示弓形玻璃管的曲率半徑為  $R$ ，當氣泡移動了  $d$  的距離時，由三角函數關係可知移動的經度  $\theta$  為

$$\theta \approx \tan \theta \approx \frac{d}{R}$$

若曲率半徑為  $R = 1000 \text{ mm}$ ，當氣泡位移  $0.5 \text{ mm}$  時，可知傾斜角度為

$$\theta = 0.5 \text{ mm/m} = 0.0005 \text{ 經度} = 0.02865 \text{ 度} = 1' 43.1''$$

(1 經度 = 57.2957795 度)

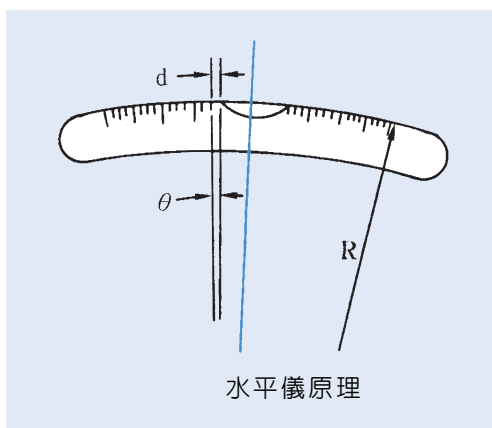


圖 1. 氣泡水平儀原理示意圖。

目前氣泡水平儀的刻劃精度有  $0.02 \text{ mm/m}$ 、 $0.05 \text{ mm/m}$ 、 $0.1 \text{ mm/m}$  等幾種。

水平儀弓形玻璃管的製造可分為兩種：一種是直接製成彎曲的玻璃管，另一種是將直玻璃管的內部精密加工成圓弧形。前者的準確度較差，價格也較便宜；後者加工不易，但準確度較高，價格也較貴。

影響氣泡水平儀精度的因素有：

- ① 水平儀弓形玻璃管的圓弧並不是真圓。
- ② 玻璃管上的刻劃不正確 (所以需要經過校正)。
- ③ 玻璃管或管內液體受溫度的影響產生熱漲冷縮，導致刻劃的變形或氣泡體積改變 (所以最好備有隔熱把手)。
- ④ 水平儀的基座平面有偏差。

### 二、結構示意圖

一般水平儀的基本結構包括下列四個部份：

- ① 基座：一般水平儀的基座平面為碳鋼材質，經過精密研磨加工後，使其表面非常平坦準確。基座的形狀大多為長方形或正方形，長度尺寸視水平儀的種類和大小而不同，量測時被測平

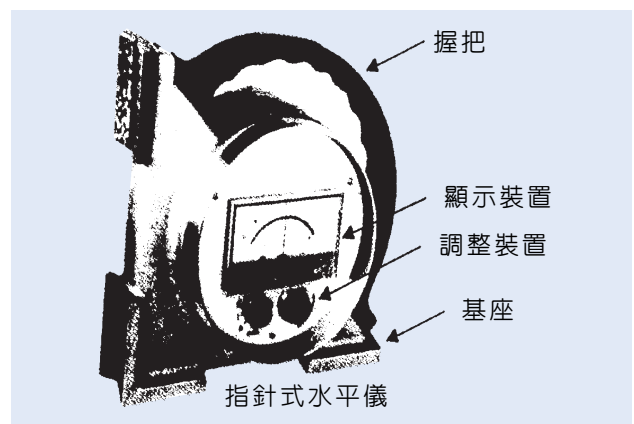


圖 2. 指針式水平儀的結構圖。

面與此平面密接，有製成平面也有製成 V 型槽面，一般較常製成 V 型槽面，便於在弧面或圓形物上使用。

- ② 顯示裝置：由氣泡玻璃管刻劃顯示 (如圖 2 所示)。
- ③ 調整裝置：供顯示器的歸零調整與檢查之用。
- ④ 握把：供水平儀握持移動之用，有些在握把處附有隔熱裝置以避免體溫影響量測的準確性。

### 三、儀器規格與特徵

公制水平儀的精密度 (或稱靈敏度) 是以 mm/m 為單位，即一公尺長的基座兩端水平高度的差異 (以 mm 為單位) 來區分等級。一般氣泡水平儀常用的靈敏度規格有 0.02 mm/m ( $\approx 4$  秒)、0.05 mm/m ( $\approx 10$  秒) 和 0.1 mm/m ( $\approx 20$  秒) 等三種。公制水平儀以基座的長度與寬度來區分其尺寸，如下表：

規格 (mm)	底座長 (mm)	底座寬 (mm)
150	150	35—45
200	200	40—56
250	250	45—55
300	300	50—60

### 四、應用與用途

水平儀是用來檢驗或校正各種機械儀器、工具機床台、平台等的平面是否呈水平的一種量測儀器，並非單純的量測平面傾斜的程度，所能量測的傾斜角範圍很小，一般僅達 0.3 mm/m，故水平儀的最大用途是用來校正或調整平面的水平狀態。由於電子水平儀的靈敏度高，一般均用來調整高精度的工作母機，如 NC 車床、銑床、綜合切削加工機等。

### 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990)
3. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
4. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
5. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
6. 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
7. 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書公司 (1994).
8. 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
9. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 電子水平儀

## Electronic Level

關鍵字：擺錘、真直度、平面度、三電極、文氏橋

Keywords：pendulum, straightness, flatness, tripolar, Wien bridge

### 一、基本原理

電子水平儀是藉著電子元件對待測件感測到其有微小角度變化，以作為機器或機件的水平位置或垂直位置之量測。其主要形式有電容式和電感式等兩種，將分別敘述如下。

#### 1. 電容式電子水平儀 (capacitive electronic level)

電容式電子水平儀其量測原理也與電容式電子比測儀 (capacitive comparators) 相似，主要是利用擺錘 (pendulum) 自由懸掛在細線上，擺錘受地心重力所影響，且懸浮於無摩擦狀況；擺錘兩邊均設有電極，當擺錘與電極間隙相同時電容為相等，若水平儀受待測件所影響，其內部的擺錘即產生微小角度的變化，造成兩間隙改變，即產生電容不同。

數字式電子水平儀是採用高靈敏度的三電極 (tripolar) 空心電容器作為敏感元件，由文氏橋 (Wien bridge) 震盪器和反相器 (inverter) 作為電容感測器的激勵電源，由偏擺角度反應電子水平儀的傾斜角度大小之感測器輸出信號，經放大器放大，再

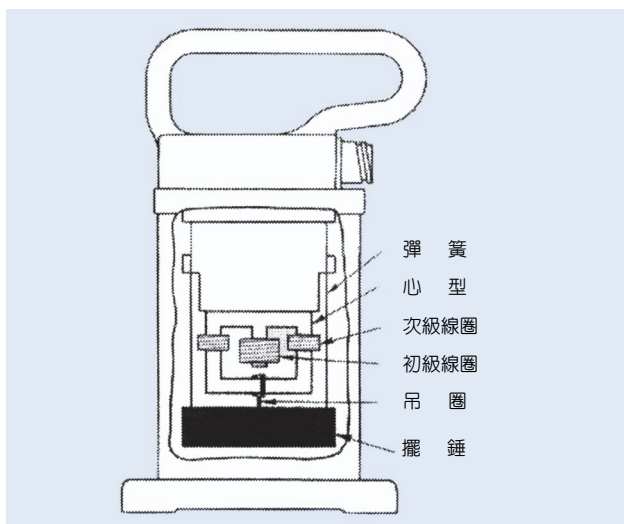


圖 1. 電感式電子水平儀。

經檢相 (phase-detection) 處理和濾波後，由數字電壓表顯示出來，如圖 2 所示。

#### 2. 電感式電子水平儀 (inductive electronic level)

電感式電子水平儀其量測原理與電感式電子比測儀相似，乃是將微小的尺寸變化透過測桿之鐵心在感應線圈內作移動，使初級線圈與次級線圈間產生電壓差異，而此種差異與測桿移動距離成比例。圖 1 所示為電感式電子水平儀。當水平儀之基 (底) 座因待測工件傾斜而傾斜，其內部也是利用擺錘自由懸掛在細線上，擺錘受地心重力所影響，且懸浮於無摩擦狀況；擺錘因移動所造成的感應線圈的電壓變化。當待測件真正水平時，水平儀內的擺錘會在中心位置，此時讀數為零。

### 二、結構示意圖

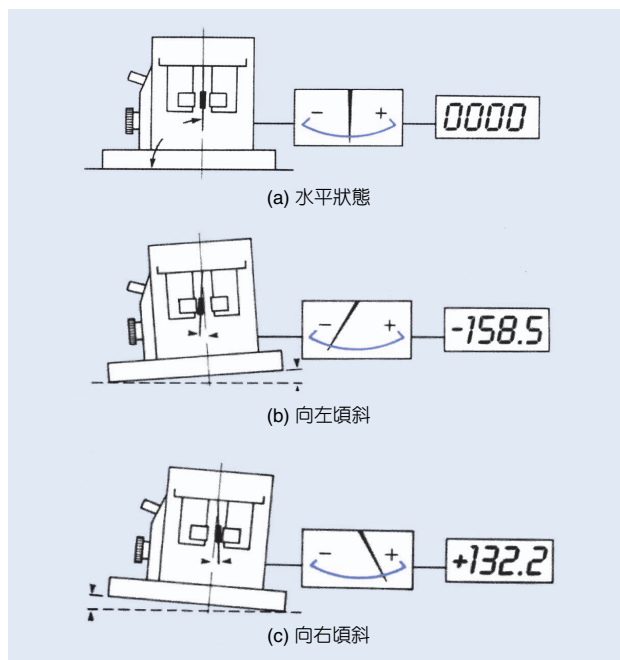


圖 2. 電容式電子水平儀。

數字式電子水平儀是由主體、底座和手柄等三部份所組成，主體部份包括激勵電源、放大器和顯示器等；底座部份包括量測底座和感測器；手柄部份包括隔熱手柄、供電電池組和連接插頭座等。

數字式電子水平儀的信號傳送示意圖如圖 2。

### 三、儀器規格與特徵

目前商業化的電子水平儀型式很多，主要規格差異在於外型、靈敏度。

#### 1. 外型

以外型而分類：有水平型 (block level) 和直角型 (square block level) 等兩種，如圖 3 所示。外框由高品質且耐磨鑄鐵製成，底座造成可由平面或 V 字型兩種，以 V 字型底座可用來檢查平面或圓柱面之水平程度。

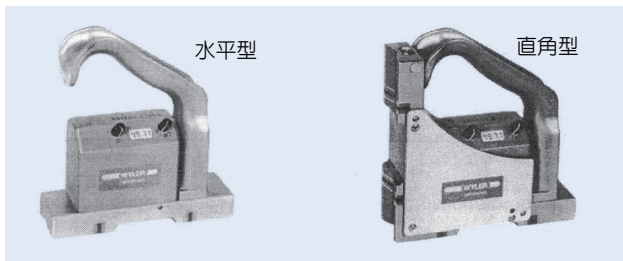


圖 3. 電子水平儀之外型。

#### 2. 靈敏度

不論水平儀底座長度規格大小，通常靈敏度表示與一般氣泡水平儀相似，以待測件每 1 米長度其兩端在水平誤差有多少  $\mu\text{m}$  或  $\text{mm}$  表示 (即  $\mu\text{m}/\text{m}$  或  $\text{mm}/\text{m}$ )，或可用弧度秒 (secs of arc) 表示。

電子水平儀的靈敏度有 I、II 等兩個檔可供選用，其量測範圍分別為  $\pm 1999$  和  $\pm 199$  個數字 (digits)，正負符號分別代表不同方向傾斜，每 1 個數字可由下列公式計算出其偏差量。

一個數字之偏差量

$$= (\text{靈敏度} \times \text{底座長度 mm}) \div 1000 \text{ mm}$$

例如：

有一靈敏度為  $10 \mu\text{m}/\text{m}$  之水平儀，其底座長度為  $200 \text{ mm}$ ，求其一個數字之偏差量？

答：

$$(10 \mu\text{m}/\text{m} \times 200 \text{ mm}) / 1000 \text{ mm} = 2 \mu\text{m}/\text{m} \text{ 或 } 2 \text{ secs of arc}$$

### 四、應用與用途

電子水平儀和傳統的水平儀相比，它最主要的特色為高靈敏度、速度快、數字直讀、穩定性佳、結構簡單、體積小、重量輕、可與個人電腦連線作數位輸出等特點，廣泛應用於平板、角尺、直尺等精密量測儀器的真直度、垂直度和平行度的量測。可作為對於精密儀器和機器的生產、安裝等方面的檢驗工作。可藉著 RS-232 介面卡與個人電腦連線作數位輸出，對於待測件的數據可作真直度 (straightness) 與平面度 (flatness) 的分析。

為了避免作量測過程中，因量測基礎變化帶來的誤差，可同時採用兩個水平儀，一個作為參考用，一個作為量測用，如圖 4 所示。



雙電子水平儀

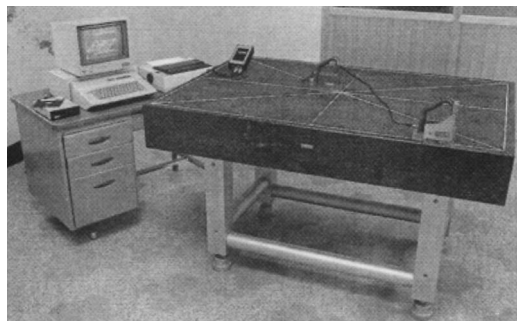


圖 4. 雙電子水平儀使用情形。

若同時採用兩方向 (X、Y) 量測組，則可以量測滑軌的變形、機器俯仰 (pitch) 和滾轉 (roll) 的誤差。

#### 參考文獻

1. 精密量具與機件檢驗，范光照，張郭益編著，三版，高立圖書有限公司 (1997)。
2. Users manual: Digital Electronic Levelmeter.
3. 瑞士 Wyler 水平儀目錄。

作者：張郭益先生為英國曼徹斯特大學機械碩士，現任國立虎尾技術學院機械製造工程科副教授兼主任。

# 萬能活動量角器

## Universal Bevel Protractor

**關鍵字：**萬能活動量角器、游標

**Keywords：**universal bevel protractor, vernier

### 一、基本原理

萬能活動量角器是從事直接量測角度的量具，其量測範圍大，而且精密度較一般量角器高（最小解析度可達  $5'$ ）。萬能活動量角器是由圓形主尺、游標副尺、活動尺片及銳角附件等四部分所組成的。萬能活動量角器所採用的游標原理與長度量測用的游標卡尺的原理相同，一般是採用長游標原理製成，以達到角度精密量測的目的。圓形主尺將圓周分成 360 等分，每刻劃為  $1^\circ$ ，副尺取主尺 23 刻度的弧長分成 12 等分。即

① 主尺和副尺同取角度  $\theta = 23^\circ$

② 主尺等分刻劃數  $2N - 1 = 23$

③ 副尺等分數  $N = 12$

④ 刻度分劃公式：
$$\frac{L}{(2N-1)N} = \frac{23^\circ}{(2 \times 12 - 1) \times 12} = 5'$$

即副尺刻度每格為  $5'$ ，則主尺上每兩個刻劃與游標每一刻劃的差為  $2^\circ - \frac{23^\circ}{12} = \frac{1^\circ}{12} = 5'$ 。

萬能活動量角器的圓形主尺和游標副尺的刻度盤都做雙向刻劃，可分別執行正向和反向角度量測。在進行角度判讀時，首先讀取主尺的刻度，必須特別注意在  $0^\circ$  的正向或負向。接著讀取副尺的刻劃，判讀副尺的刻度時一定要和主尺刻度一致，否則會產生錯誤，即當主尺在  $0^\circ$  的正方向時，就要讀取副尺的正方向刻度，如圖 1 所示。

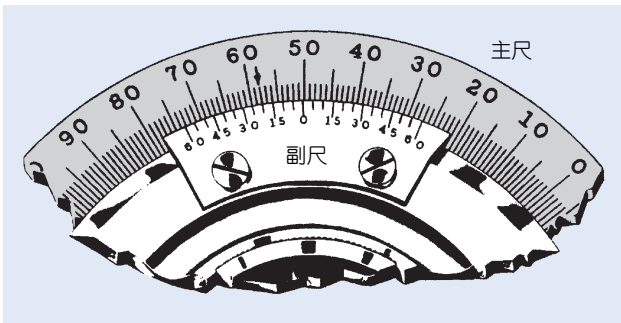


圖 1. 萬能活動量角器的刻度判讀。

### 二、結構示意圖

萬能活動量角器的主要構件有圓形主尺、游標副尺、活動尺片及銳角附件等，如圖 2 所示。

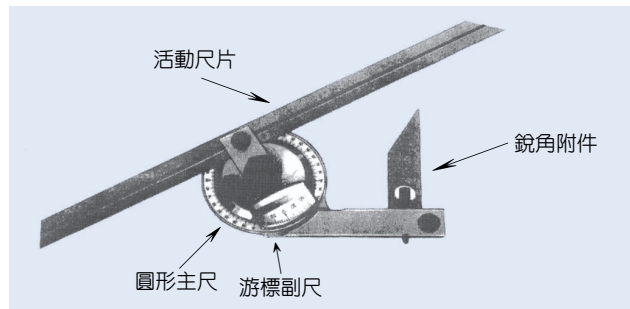


圖 2. 萬能活動量角器的主要構件。

### 三、儀器規格與特徵

萬能活動量角器的型式頗多，最主要的規格差異在量測精密度上，目前市面上的產品依其量測精密度可分為  $5'$  及  $2'$  等兩種。

### 四、應用與用途

萬能活動量角器的用途極廣，搭配銳角附件可以執行廣泛的角度量測，只要方法正確，將可獲得既準確又迅速的結果。若配合高度規，更可以在平台上執行較大型機件的角度量測。

### 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
3. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
4. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
5. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
6. 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
7. 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書公司 (1994).
8. 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
9. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 組合角尺

## Combination Square

**關鍵字：**組合角尺

**Keywords：**combination square

### 一、基本原理

組合角尺是由直尺(鋼尺)、直角規、角度規、中心規等所組合而成的，一般在直角規及角度規上附有簡單水平儀，角度規上具有角度刻劃，可以量測物體的角度。擁有的功能可涵蓋：普通直尺、高度規、水平規、垂直規、直角規、深度規、中心規、量角規等的功能。在直尺的背面沿著中心線有一條凹槽可供另外三種量規(直角規、角度規、中心規)的配合，使其在直尺上可以做左右移動，並藉著此三種量規上的固定螺絲可固定在直尺上的任何一個位置，由此四部分量規的適當組合可執行多樣的量測或劃線工作。如直角規和直尺所夾的角度為 $45^\circ$ 及 $90^\circ$ ，且在直角規上具有水平儀裝置，不僅可用來檢查工作母機的水平程度，也可以檢查工件是否水平或垂直，若在其末端插入劃針，則可執行劃線或平面度檢查。角度規與直尺組合則可執行高度、深度、直角、 $45^\circ$ 角等的量測，也可以執行劃平行線、垂線、 $45^\circ$ 線等。

### 二、結構示意圖

各部結構如圖1、圖2所示，各部功能如下：

- ① 鋼直尺：可直接量測長度或配合其他構件執行量測。

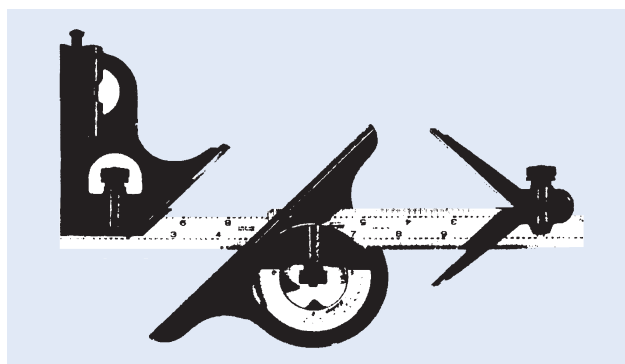


圖1. 組合角尺結構圖。

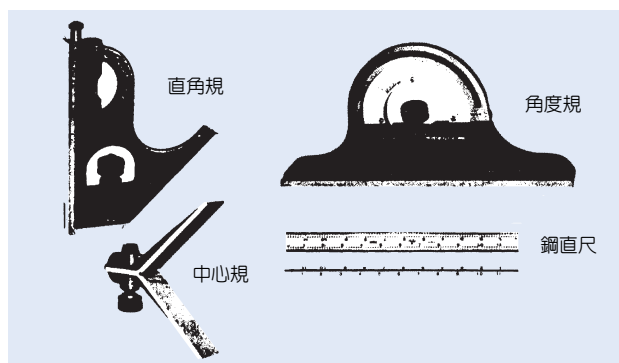


圖2. 組合角尺分解圖。

- ② 直角規：配合直尺可執行直角、深度、高度的量測，若在直角規上裝置水平儀則可執行水平量測。若在直角規尾端裝置一劃線針則可執行劃線功能。
- ③ 角度規：配合直尺執行角度量測、劃線等工作。
- ④ 中心規：配合直尺可在圓面或對稱物上畫出中心線。

### 三、儀器規格與特徵

#### 1. 鋼直尺

公制鋼尺的刻度一般以 $1\text{ mm}$ 或 $0.5\text{ mm}$ 為單位，有些刻度為 $1\text{ mm}$ 的直尺會在前端附有 $0.5\text{ mm}$ 為單位的刻度以作為較精密的量測。尺的長度有 $150\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm}$ 、 $450\text{ mm}$ 、 $600\text{ mm}$ 等規格。英制直尺一般的解析度有 $1/64''$ 和 $1/32''$ 等兩種，另外還有特殊規格的如 $1/100''$ 或 $1/50''$ 等，長度則有 $6''$ 、 $12''$ 、 $18''$ 、 $24''$ 等規格。也有在鋼尺上兼具公制與英制尺寸刻劃的。直尺一般刻劃的種類如表1所示。

#### 2. 角度規

有一個具 $180$ 度的刻度圓盤，一般刻度圓盤的最小刻劃為 $1$ 度或 $0.5$ 度等兩種。

表 1. 直尺一般刻劃的種類。

單位制度	規格	刻度分級					寬度 (mm)	寬度 (mm)
		代號	第一邊	第二邊	第三邊	第四邊		
英制	6"	3R	1/50"	1/10"	1/32"	1/64"	19	1.2
	12"						25	
	18"						30	
	24"						30	
	6"	4R	1/64"	1/32"	1/8"	1/16"	19	
	12"						25	
	18"						30	
	24"						30	
	6"	5R	1/100"	1/10"	1/32"	1/64"	19	
	12"						25	
	18"						30	
	24"						30	
	6"	16R	1/100"	1/50"	1/32"	1/64"	19	
	12"						25	
	18"						30	
	24"						30	
公英制混合	6"×150	1/64"	1/32"	0.5 mm	1 mm	19		
	12"×300					25		
	18"×450					30		
	24"×600					30		
	6"×150	1/100"	1/50"	0.5 mm	1 mm	19		
	12"×300					25		
	6"×150	1/100"	1/10"	0.5 mm	1 mm	19		
	6"×150					19		
公制	150 mm	1 mm	0.5 mm	0.5 mm	1 mm	19		
	300 mm					25		
	450 mm					30		
	600 mm					30		

#### 四、應用與用途

組合角尺具有多種用途，所擁有的功能可涵蓋：直尺、高度規、水平規、垂直規、直角規、深度規、中心規、量角規等的功能。

#### 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).

3. 謝文隆, 機工精密量測學, 三文出版社 (1983).
4. 江俊賢, 精密量具與機具檢驗, 文京圖書公司 (1995).
5. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
6. 張笑航, 精密量具及機件檢驗, 全華科技圖書股份有限公司 (1996).
7. 林宸生等, 實用精密量測及機件檢驗, 全欣科技圖書公司 (1994).
8. 唐文聰, 精密量具選用要領, 全華科技圖書股份有限公司 (1993).
9. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 傾斜儀

## Inclinometer

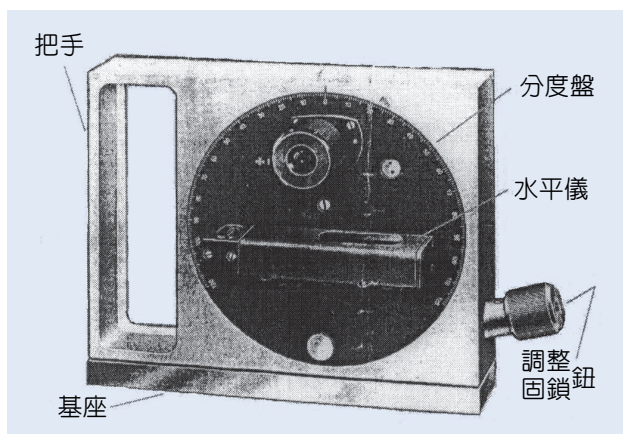
關鍵字：傾斜儀、水平儀

Keywords：inclinometer, level meter

### 一、基本原理

一般水平儀 (level meter) 所能量測的傾斜角度範圍很小，大約僅可達  $0.3 \text{ mm/m}$  ( $\approx 1$  分)，如果所要量測的傾斜角度大於 1 分，就必須利用傾斜儀。傾斜儀在結構上可視為是由一個氣泡水平儀和一個精密分度盤的組合。傾斜儀和水平儀類似，也有一個精密的底座，在與此底座平面垂直的法面上安置一個精密分度盤，在分度盤的轉軸上安置一個參考用的氣泡水平儀。當傾斜儀是放置在一個確實水平的平面上時，將傾斜儀上的分度盤調整至零分格時，氣泡水平儀中的氣泡將呈現在中央的位置。如果傾斜儀是放置在一個傾斜的平面上時，則氣泡水平儀中的氣泡將呈現偏移的現象，若調整分度盤的刻度，直到氣泡水平儀中的氣泡重新呈現在中央的位置時，則此時分度盤的刻度上的刻度即是此平面傾斜的角度。

### 二、結構示意圖



一般傾斜儀的基本結構包括下列六個部份：

1. 基座：一般傾斜儀的基座平面為碳鋼材質，經過精密研磨加工後，使其表面非常平坦準確。基座的形狀大多為長方形或正方形，長度尺寸

視水平儀的種類和大小而不同，量測時被測平面與此平面密接，有製成平面也有製成 V 型槽面，一般較常製成 V 型槽面，便於在弧面或圓形物上使用。

2. 氣泡水平儀：由氣泡玻璃管刻劃顯示。
3. 精密分度盤：依顯示原理可分為
  - ① 機械刻劃式
  - ② 電子數位顯示
4. 調整裝置：供顯示器的歸零調整與檢查之用。
5. 固鎖裝置：可固鎖分度盤的齒輪機構以供讀取數值，或是鬆開分度盤的齒輪機構以供分度盤快速旋轉角度之用
6. 握把：供水平儀握持移動之用，有些在握把處附有隔熱裝置以避免體溫影響量測的準確性。

### 三、儀器規格與特徵

靈敏度為以分度盤對於檢測角度最小單位(度、分、秒)變化的解析能力。目前常用的傾斜儀靈敏度規格有  $1'$  (分) 和  $10''$  (秒) 等兩種，有些特殊設計可達  $1''$  (秒)，但因在判讀數據時需以水平儀為基準，故越好的傾斜儀需配合越高解析能力的水平儀。分度盤上的刻度的最大量測範圍可分為兩種，有些是標註  $0^\circ$  至  $360^\circ$ ，另外一些則標註  $0^\circ$  至  $\pm 180^\circ$ 。

### 四、應用與用途

傾斜儀是用來檢驗各種機械儀器、工具機床台、平台等的平面的傾斜程度的一種量測儀器，可應用在絕對傾斜度量測和相對傾斜度量測等兩種量測上：

- ① 絕對傾斜度量測：即量測某一傾斜表面對基本水平面之傾斜程度。應用時，只要將校正過的傾斜儀安置在所要量測的斜面上，並旋轉分度

盤的調整鈕，直到氣泡水平儀的氣泡呈現在中央的位置時，則此時分度盤的刻度上的刻度即是此平面傾斜的角度。

- ② 相對傾斜度量測：即量測某一傾斜表面對另一平面之傾斜程度。只要順序將傾斜儀置於每一個待量測的平面上，並量取它們相對於基本水平面之傾斜程度，此兩個讀值相減所得的差異即是它們的相對傾斜角度值。

## 參考文獻

1. W. R. Moore, *Foundations of Mechanical Accuracy*.
2. 三豐儀器, 精密量測便覽, 松祿文化公司 (1990).
3. 徐萬春, 尺寸度量學, 徐氏基金會 (1980).
4. 楊植雄, 各類型量具校驗程序書, 中山科學研究院 (1993).

---

作者：楊植雄先生為國立中央大學機械碩士，現任中山科學研究院品保中心儀具校正組副工程師。

# 高斯計

## Gaussmeter

**關鍵字：**霍爾元件、高斯計、平面霍爾效應

**Keywords：** Hall device, Gaussmeter, planar Hall effect

### 一、基本原理

高斯計是利用霍爾效應 (Hall effect) 所產生的霍爾電壓 (Hall voltage) 來量測磁場的大小與方向。一般的霍爾效應是用來分辨半導體是  $n$  型或  $p$  型，以及用來量測主要載子的濃度 (majority carrier concentration) 和移動率 (majority carrier mobility)。此處是利用霍爾元件 (Hall device) 置於磁場中所產生的霍爾效應來量測磁場。

圖 1 所示，當一個霍爾元件在  $z$  方向給予一穩定的霍爾電流源 (Hall current)  $I_x$ ，而磁場  $B_y$  在垂直軸  $y$  上，假設使用的材料為  $p$  型，則根據勞倫斯 (Lorentz) 方程式  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  可知電洞會受到一個往正  $x$  方向移動的力量 (根據佛來明左手定則)。由於電洞往正  $x$  軸方向聚集的結果會形成一個由正到負  $x$  方向的電場  $E_x$ 。由於  $x$  方向並沒有淨電流移動，因此在  $x$  方向的電場  $E_x$  將與勞倫斯力達到平衡  $\mathbf{F}_x = q(\mathbf{E}_x + \mathbf{v}_z \times \mathbf{B}_y) = 0$ 。此時電洞在  $z$  方向雖然還在移動但將不會再有  $x$  方向的靜力產生。因此  $x$  方向所產生的電場  $E_x = v_z B_y$ ，假如霍爾元件的寬度為  $W$ ，

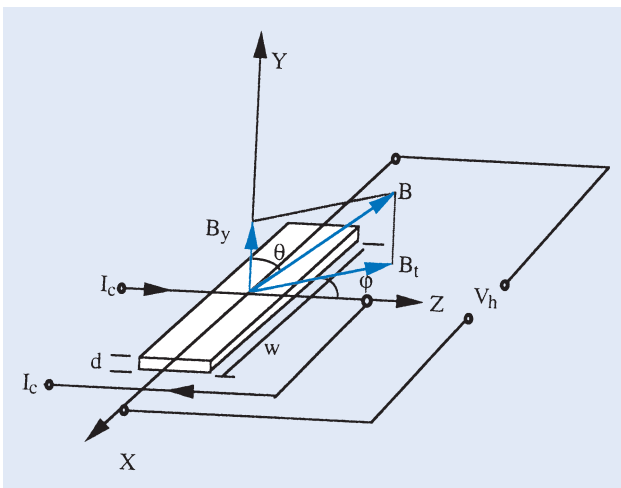


圖 1. 霍爾電壓  $V_h$ ，霍爾電流  $I_c$  及磁場方向互相垂直， $d$  為厚度而  $W$  為寬度。

則跨過半導體兩邊因電場  $E_x$  會製造出一電壓  $V_h = E_x W$ 。這個電壓叫霍爾電壓。因此霍爾電壓可寫成如 (1) 式所示。

$$V_h = v_x B_y W \quad (1)$$

對一個  $p$  型半導體而言，其電洞的漂移速度  $V_{dx}$  (drift velocity) 可以寫成 (2) 式。

$$V_{dx} = \frac{J_z}{ep} = \frac{I_z}{(ep)(Wd)} \quad (2)$$

$e$  為帶電量， $p$  為電洞濃度而  $d$  為半導體厚度。因此從 (1) 與 (2) 式可得

$$V_h = \frac{I_z B_y}{epd} = \left( \frac{R_h}{d} \right) I_z B_y \quad (3)$$

這裡的  $R_h = \frac{1}{ep}$  為霍爾係數 (Hall coefficient)。霍爾係數  $R_h$  會隨著溫度而變化，一般所採用的霍爾元件的霍爾係數是負溫度係數。假如需考慮霍爾元件的磁阻變化關係以及殘存電壓 (residual voltage)  $V_0$ ，則 (3) 式應改寫 (4) 式。

$$V_h = V_0 + \left( \frac{R_h}{d} \right) I_z B_y - P_h B_t^2 I_z \sin(2\phi) \quad (4)$$

$P_h$  即所謂的平面霍爾係數 (planar Hall coefficient)，它是由橫向磁阻  $\alpha_t$  與縱向磁阻  $\alpha_l$  係數的不同而引起的。因此  $P_h$  可以寫成  $P_h = k(\alpha_t - \alpha_l)$ 。而 (4) 式中的最後一項  $P_h B_t^2 I_z \sin(2\phi)$  就叫做平面霍爾效應 (planar Hall effect)，這項也會引起磁場的量測誤差。此處的  $\phi$  角是橫向磁場  $B_t$  與電流  $I_z$  之間的夾角。因此只要  $\phi$  角儘量的小，則平面霍爾效應所引起的磁場誤差會減到最小。

### 二、結構示意圖

高斯計的最大好處是簡單的零件組合即可用來量測磁場，一個基本的高斯計的裝置圖如圖 2 所

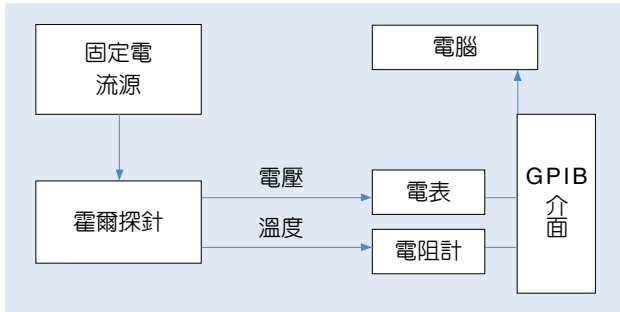


圖 2. 基本高斯計的裝置圖。

示。霍爾元件的兩端提供一穩定電流  $I_m$ ，同時在這兩端接上溫度偵測線來量測霍爾元件的溫度  $T_{out}$ ，如此裝置可以得到一輸出的電壓，輸出電壓的型式可以是類比 (analog) 輸出，假如不需快速量測則可以轉換成數位信號 (digital) 輸出。如果需要自動量測的話，則可以加一些自動控制的配備，如高斯計加裝 IEEE-488 或 RS232 等介面做自動量測。

### 三、儀器規格與特徵

上面已提到高斯計是利用霍爾效應來量測磁通密度 (magnetic flux density)，高斯計不僅可量測磁場的強弱，還具有磁極的判別能力。高斯計所使用的偵測器是半導體材料，總稱這些元件為霍爾元件，從 (4) 式可知霍爾係數愈大以及厚度愈小的元件感度 (sensitive) 愈高。而平面霍爾係數愈小則量測時因定位誤差所引起的磁場誤差會愈小。一般霍爾元件的磁場與霍爾電壓  $B-V_h$  特性有寬廣的線性特性，可當磁通計。而另一種  $B-V_h$  特性在低磁場即飽和的霍爾元件則常用做近接開關。表 1 收集一些比較常用的霍爾元件的特徵及規格。高斯計所採用的霍爾元件的材料也是決定高斯計量測結果的精確度，霍爾元件的面積愈小則解析度愈高，為了提高高斯計長時間的準確度就必須具有低的溫度係數，目前比較低的溫度係數為  $-0.01\%$ ，如果要再

表 1. 霍爾元件的種類以及其特性與規格

半導體	能隙 (eV)	電子移動率 (cm <sup>2</sup> /V-sec)	霍爾係數 (cm <sup>3</sup> /°C)	溫度係數 (%/°C)	內部阻抗 (Ω)	趨動電流 (mA)
銻化銻 (InSb)	0.17	$7 \times 10^4$	$-4 \times 10^2$	-2	300	10
砷化銻 (InAs)	0.36	$2.3 \times 10^4$	$-1.2 \times 10^2$	-0.01	5	250
砷化砷 (GaAs)	1.4	$5 \times 10^3$	$-6 \times 10^2$	-0.06	500	5

進一步提高溫度，則霍爾探針的溫度量測是有必要的，也就是對溫度做校正。霍爾元件除了表中的規格與特性之外，還要考慮其積感度，霍爾元件材料一般使用 III-V 族的化合物半導體，這種半導體比其他元素的霍爾輸出大。因此其積感度高而提高高斯計的解析度。

霍爾元件的溫度係數也是影響高斯計的穩定度之一，霍爾元件的溫度係數包括霍爾元件的輸出電阻係數，移動度的溫度係數、霍爾係數的溫度特性以連接霍爾元件的負載電阻溫度係數。因此在量測高精度磁場時對霍爾元件做一溫度控制，或者直接對溫度與磁場做校正，可以去除因溫度的變化而引起的磁場誤差。目前世界上具有量測霍爾元件溫度的製造商有 GMW 公司。

除了溫度效應之外，霍爾元件其性質上有高頻率特性，其頻率響應可達到幾十 MHz 以上。但如果霍爾元件有磁性護套時則只能達到幾百 kHz。從表 1 中比較霍爾元件的電子移動度，這些電子移動度會直接影響霍爾電壓，電子移動度愈大霍爾電壓愈大。因此霍爾元件使用電子移動度大的如表中三種化合物。但電子移動度大，相反的溫度影響也非常大。所以最常用的元件是採用砷化銻 (InAs)，雖然其移動度只有銻化銻 (InSb) 的一半但其溫度的影響卻很小。然而砷化鎵 (GaAs) 的電子移動度只有銻化銻的 1/10，但其半導體的禁止帶寬度大，溫度特性提高，故高溫裝置幾乎使用砷化鎵。

### 四、應用與用途

高斯計主要可應用來量測均勻或不均勻磁場的磁通密度，可以判別磁場的方向，直流與交流磁場，還有因其面積小 (大約可做到  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ ) 可以做點與點之間的量測。尤其在應用到同步輻射加速器磁鐵的量測時更是不可或缺的工具，可以利用

它來量測點磁場的分佈，再根據磁場分佈找出磁鐵的缺陷並改進之。

高斯計的使用技巧可分為低精度與高精度的操作模式，假如量測磁場的精度只要求在 1% 以上，則使用高斯計時可以不用考慮溫度與平面霍爾效應，只要儘量維持霍爾元件的平面與要量測的磁場的方向垂直即可。但是假如要利用高斯計來量測高精度 (量測精度高於 0.1%) 磁場時，必須考慮幾個因素。

- (1) 霍爾元件必須做溫度的補償，使得霍爾元件的溫度在任何磁場或溫度下都能維持在一定的溫度，因為霍爾係數很容易受溫度的影響。假如霍爾元件不做溫度補償就必須同時對磁場與溫度做校正，如此才不致於因溫度與時間的變化因素而引起磁場的變化。
- (2) 選擇平面霍爾係數較小者，如此可以避免因定位不好而產生平面霍爾效應所引起的磁場誤差。
- (3) 小心定位霍爾元件的平面使得  $\theta$  與  $\varphi$  角儘量接近零。
- (4) 由於霍爾元件流著霍爾電流，因元件內阻而自己會發熱，這種現象對元件的特性會有不良的

影響，因此選擇霍爾元件時內電阻愈小愈好。

- (5) 霍爾元件的面積愈小愈好，則由六極項磁場或更高諧磁場所引起的磁場誤差就愈小。

高斯計用來驅動霍爾元件的方式一般有二種：一種是定電流驅動，另一種為定電壓驅動。定電流驅動方法是因霍爾元件內電阻會隨不同的磁場而變化，但這種方法是不管內阻如何變化，通過霍爾元件的電流是維持不變，使得感測的磁場較不隨溫度變化而改變。然而此時霍爾元件內部電壓降的大小隨溫度而變化，使得殘存電壓變大。至於定電壓驅動方式是由於加一固定的電壓，所以殘存電壓變化較小，但相反的，感測的磁場隨溫度變化較大。

### 參考文獻

1. C. S. Hwang, et al., *Review of Scientist Instrument*, 65 (8) (1994).
2. *The Hall effect and its applications*, edited by C. L. Chien and C. R. Westgate, New York: Plenum Press (1980).
3. 張連璧編著, 磁感測器及使用法, 文笙書局 (1996).
4. 陳瑞和編著, 感測器, 全華科技圖書出版 (1992).
5. *CERN Accelerator school-magnetic measurement and alignment*, editor by S. Turner (1992).

---

作者：黃清鄉先生為國立交通大學電子物理博士，現任行政院同步輻射研究中心副研究員。

# 通量閘磁力計

## Fluxgate Magnetometer

**關鍵字：**通量閘磁力計、有效導磁係數、驅動線圈

**Keywords：** fluxgate magnetometer, effective permeability, driving coil

### 一、基本原理

通量閘磁力計就是利用一種含鐵蕊磁性材料當做偵測器元件的一種裝置，這種鐵蕊磁性材料具有非線性的磁特性。通量閘磁力計不僅可以用來量測很低磁場，還可以做磁場極性的判斷。

目前有很多理論提供來解釋通量閘磁力計的原理，不同的理論有不同的操作原理。這是由於感測器結構、驅動源 (driving source)，以及偵測方法的改變而產生各種不同的理論模式。但是一般的通量閘磁力計都是利用含鐵磁蕊材料做偵測器元件，然後再配合利用最恰當的週期電流的波形，這種波形的電流被循環地驅動到驅動線圈上達到飽和磁場區。這些驅動線圈是包圍著鐵蕊。當沒有磁場信號時，儀器本身經常是提供直流或非常低頻的交流驅動源，此時在偵測線圈上的感應電壓是對稱的。然而當有磁場信號時偵測線圈上的感應電壓就變成不對稱。這種不對稱的信號對有沒有磁場信號是相當敏感的。

典型的通量閘偵測器的幾何形如圖 1 與圖 2 所

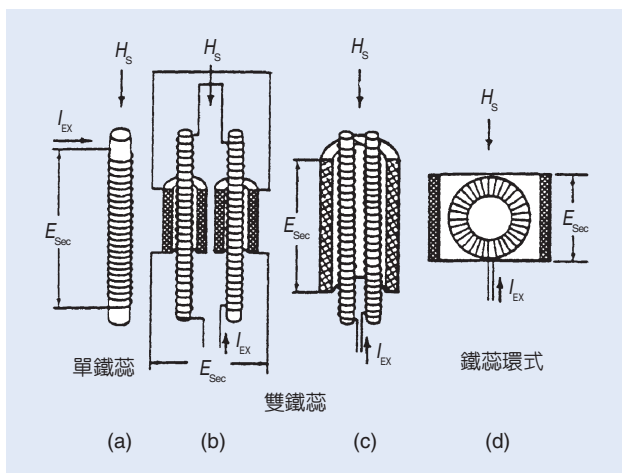


圖 1. 平行閘通量感測元件， $H_s$  為信號場與驅動電流  $I_{EX}$  所產生的磁場平行。(摘自 F. Primdahl 的文章)

示。圖 1 所示的磁場 ( $H_s$ ) 方向與激發場 (excitation field 或 driving field) 的方向是平行的，此種偵測器叫「平行閘」(parallel-gating) 的通量閘。另一種如圖 2 所示，其信號磁場方向與激發場的方向是互相垂直的，這種偵測器叫「正交閘」(orthogonal-gated) 的通量閘。

以上簡介通量閘使用的幾種模式，但不管那一種模式其原理都一樣。而其基本原理就是鐵蕊材料 (ferromagnetic core) 外纏繞  $n$  圈的信號檢測線圈 (pick-up coil)，然後改變鐵蕊的導磁係數就會引起鐵蕊磁場的變化。這些變化會在檢測線圈感應出電壓值。所以當有外在磁場  $B_e$  沿著鐵蕊軸的截面積  $A$  上就會產生磁通量  $BA$ ， $B$  為檢測線圈所量測到的信號。假如鐵蕊的導磁係數  $\mu_r$  被改變，則磁通量  $BA$  也會被改變。導磁係數  $\mu_r$  的改變可藉由驅動源來改變，而驅動源可為電流源加在驅動線圈上。此時  $n$  圈檢測線圈上會感應出電壓值  $V_e$ 。

$$V_e = n \frac{d\phi}{dt} = nA \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

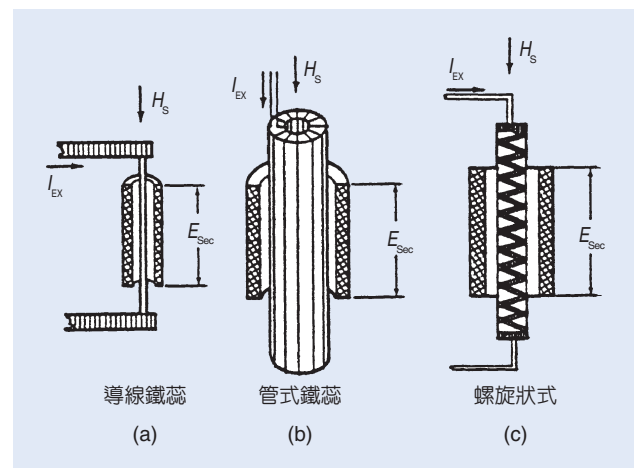


圖 2. 正交閘通量感測元件， $H_s$  的信號場與驅動電流所產生的磁場垂直。(摘自 F. Pprimdahl 的文章)

磁場  $B$  是比例於外磁場  $B_e$  (當  $B_e$  很小時)，而比例值  $\mu_a$  是與鐵蕊材料及鐵蕊的幾何形狀有關，因此  $B$  可寫成

$$B = \mu_a B_e \quad (2)$$

而鐵蕊內部的磁場  $B = \mu_0 \chi H$ ， $\chi$  為磁化係數 (susceptibility)， $\mu_0$  為真空導磁係數。此處的  $H = H_e - DM$ ， $D$  為去磁因子而  $M = \chi H$  為磁化強度。同時由於  $B_e$  在空氣中，因此  $B_e = \mu_0 H_e$ ，從以上的相關性可以導出所量測到的磁場  $B$

$$B = \frac{\mu_r B_e}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad (3)$$

$\mu_r = 1 + \chi$  為相對的導磁係數 (relative permeability)，從方程式 (2) 與 (3) 可知

$$\mu_a = \frac{\mu_r}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad (4)$$

$\mu_a$  即所謂的有效導磁係數 (effective permeability)，把 (4) 代入 (1) 即可得到從偵測線圈上所量到的電壓值  $V_e$

$$V_e = \frac{d\mu_r}{dt} \frac{nAB_e(1 - D)}{[1 + D(\mu_r - 1)]^2} \quad (5)$$

這個方程式代表一般所謂的通量閘方程式 (fluxgate equation)。

## 二、結構示意圖

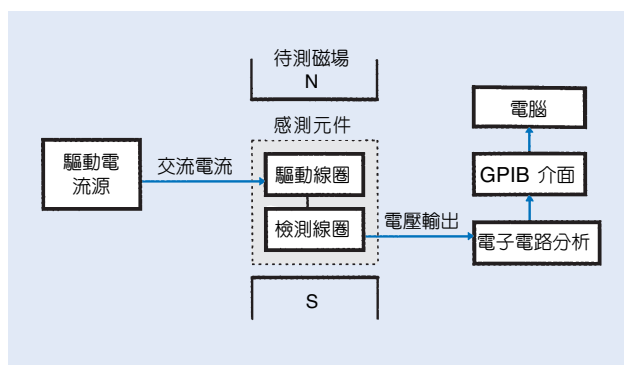


圖 3. 通量閘磁力計的結構示意圖。

依據上面所述的基本原理，整個通量閘磁力計的結構示意圖表示如圖 3。首先需有一驅動電流源，此驅動電流源為一正弦波或方波來產生一交流

的電流 (圖 1 或 2 的  $I_{EX}$ ) 提供給驅動線圈，利用驅動線圈的信號來改變 (5) 中的相對導磁係數  $\mu_r$ ，當有磁場強度  $B$  通過感測元件時，檢測線會感應出如方程式 (5) 中的  $V_e$  值。此  $V_e$  值的信號經過電子電路的分析可以轉換成待測磁場的大小與  $V_e$  值的關係，這個磁場大小的信號變成數位信號，經 GPIB 介面傳送到電腦，儲存到電腦的硬碟，或者直接顯示在通量閘磁力計的顯示器上。

驅動線圈必須產生一均勻磁場，假如磁場不均勻則會引起反相正弦波信號出現在檢測線圈的輸出信號上。其次由於驅動電流源的阻抗會衰減到輸出信號，因此一般都設計用高輸出阻抗的電流源，但是如此又會增加額外的電壓信號的漂移 (drift) 及偏移 (offset)，因此解決這個問題最理想的方法就是選擇與偵測鐵蕊通量有比較低的耦合係數 (coupling coefficient)。同時感測元件最好放在固定及共用的無作用場 (constant (common) null field)，避免橫向磁場的磁化效應產生在一些其他系統上，以及降低因驅動磁場與檢測磁場軸的定位誤差所產生的磁場誤差。

## 三、儀器規格與特徵

通量閘磁力計可量測的磁場大約可分成三範圍  
① 低磁場 (小於 100 nT)；  
② 高磁場範圍 (小於 100  $\mu$ T)；  
③ 非常高磁場範圍 (大於 100  $\mu$ T)。其靈敏度的大小根據  $V_e/B_e = nA \frac{d\mu_a}{dt}$  來決定，而  $\mu_a$  決定於鐵蕊的幾何形狀及導磁係數。

根據待測磁場與外在磁場的相關方向來歸類感測元件是屬於「平行」或「正交」感測器。去磁因子很明白地限制了導磁係數的最大值。而且敏感度最主要是與  $A/D$  成比例。例如管狀 (tubular) 及雙棒 (double-rod) 的磁蕊有最大的  $A/D$  值。檢測線圈的輸出電壓  $V_e = nAw (\mu_{amax} - \mu_{amin}) B_e$ ，對於「平行」感測器的  $\mu_{amin}$  可以忽略，而「正交」感測器會降低  $D/A$  值。一般通量閘磁力計的檢測線圈可以同時用來做回授線圈 (feedback coil) 來產生零磁場兼量測輸出電壓，但是檢測線圈做回授線圈的功能時也會產生一些負作用，因此一般都在感測元件上再加上一組回授線圈，因此磁場強度的校正都依靠回授線圈，同時感測元件之鐵蕊的定位誤差所引起的

表 1. 各種感測元件的特性比較。

研發者	感測元件型式	驅動頻率 (kHz)	頻率範圍 (Hz)	偏移量 (nT)	溫度 (°C)	偏移量穩定度 (nT)
Primdahl	正交管式 (orthogonal tubular)	29	—	2—8	—	± 1.5
Hedgecock	螺旋狀式 (helical)	—	0.01—2.5	—	—	± 0.1
Acuna	鐵蕊環式 (ring-core)	15	0.025—12.5	—	-40, + 60	± 0.2
Dyal and Gordon	鐵蕊環式 (ring-core)	6	0.01—10	—	-40, 70	± 0.1
McPherron	雙棒式 (double-rob)	—	0.001—1	—	—	—

磁場校正誤差就不敏感。

當感測元件暴露於磁場極限時，感測元件的感應即會產生非線性，而整個感測元件會進入反相模式而被鎖住，為了避免在量測高磁場時產生這種問題，一種開迴路 (open-loop) 技術必須加到回授儀器上。一般感測元件的雜訊來源有溫度的改變或者是改變去磁電流而產生的雜訊，其中又是以去磁電流所引起的雜訊最嚴重。溫度引起的雜訊是在高磁場時才有比較明顯的影響。在 0.01—10 Hz 的頻寬裡，雜訊量大約在 8 pT 到 0.3 nT 之間。這個雜訊量的大小也是依據感測元件的設計及材料而定。在高磁場的溫度係數大約在  $26-50 \times 10^{-6}/K$ 。

通量閘的偏移量 (offset) 會隨著鐵蕊材料、驅動波的飽和以及起始去除過程有關。不同通量閘磁力計的規格歸納如表 1 所示。比較好的感測元件在很寬的溫度變化下，其偏移量在經幾個月之後還可以保持在 0.1—0.4 nT。

對於低磁場，其長時間的穩定度與偏移量差不多，但是在量測高磁場範圍的長時間的穩定度在一年左右大約為 3—4 nT。至於通量閘磁力計不僅可以量測直流的磁場分量，同時可以量測交流的磁場而且頻率響應可以達到 100 Hz，磁場愈低頻率響應可以愈高。

#### 四、應用與用途

通量閘磁力計最早期 (大約在 1930 年代) 是用

來做空降導航的磁場量測，以及在二次世界大戰時當做偵測潛水艇的工具。後來又被更進一步用來量測地球場 (geomagnetic)、礦物的探勘，以及外太空的磁場量測。雖然對於磁場量測方法有新的技術發展，但是由於通量閘磁力計為具有可靠度、相當簡單、經濟的儀器，因此它還是很廣泛地被使用。尤其其他被用來描繪太空的地磁分佈圖，還有磁場分佈以及行星與行星間的磁場分佈。

目前這種磁力計已被發展成一種可以隨身攜帶的量測儀器，雖然可攜帶式的磁力計的精度會差一點，但其便宜、面積小而又低消耗功率，因此使用起來很方便。這種儀器可以決定磁場方向性，並可以用來偵測隱藏式武器。在操作上，它除了可以量測直流磁場之外，一般通量閘磁力計還可以量測交流磁場，但頻率響應大約最快到 10 Hz，因此太快的交流磁場就沒辦法量測。

#### 參考文獻

1. D. I. Gordon, *IEEE Trans. on Magns*, vol. MAG-8, no. 1 (1972).
2. F. Primdahl, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 12 (1979).
3. F. Primdahl, *Bibliography of Fluxgate Magnetometers*, Publ. Earth Phys. Branch, vol. 41, no. 1 (1970).
4. D. I. Gordon, R. H. Lundsten and J. F. Scarzello, *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-6 (1970).
5. S. V. Marshall, *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-7 (1971).

作者：黃清鄉為國立交通大學電子物理博士，現任行政院同步輻射研究中心副研究員。

# 磁通計 Fluxmeter

**關鍵字：**磁通計、積分器、磁滯曲線

**Keywords：**fluxmeter, integrator, hysteresis curves

## 一、基本原理

磁通計是專門用來量測磁性物質的磁通量 (magnetic flux)，所謂的磁通量就是由各種不同磁場通過某一截面積 (cross section area) 的所有磁力線 (magnetic lines of force) 的總和。因此磁通量  $\phi$  可以式 (1) 來表示。

$$\phi = \int_0^A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1)$$

此處的  $\mathbf{B}$  為磁通量密度而  $A$  為截面積。如果在一均勻的磁場 (homogeneous field) 則  $\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$ 。磁通量沒辦法用直接的方式來量測，但是可藉由量測一組線圈所環繞的磁通量變化所感應的電動勢來量測磁場。

$$V(t) = \pm \frac{Nd\phi}{dt} \quad (2)$$

因此藉由積分器來對感應電動勢積分來得到磁通量。

$$\phi = \pm \frac{1}{N} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (3)$$

$N$  為線圈的圈數。利用這種來量測磁通量的儀器稱為磁通計，此磁通計可以當做一種積分器 (integrator)。磁通量的單位為 1 volt-second (Vs) = 1 Weber (Wb)，而磁通量與磁通密度的單位轉換為 1 Vs/cm<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup> Tesla。由於一般感應電動勢都是 mV 或  $\mu$ V 那麼小的信號，因此這種敏感度高的積分器很適合用來量測磁通量。

磁通計本身具有低漂移而高輸入阻抗的高敏度積分器。當磁通計用來量測磁通量時必須配合各種不同的偵測元件，一般的偵測元件都是利用迴路線圈組合，依各種不同的線圈形狀與大小來量測各種不同的磁場，偵測元件的線圈可以做的很小，如點

線圈 (point coil) 來量測點磁場，也可以設計一很長的迴路線圈 (long loop coil) 來量測積分場，或者設計成 Helmholtz coil 的形狀來量磁塊的磁偶極矩 (magnetic dipole moment)。由磁通量的量測結果可以借由 (1) 式的轉換而得到磁通量密度大小。

## 二、結構示意圖

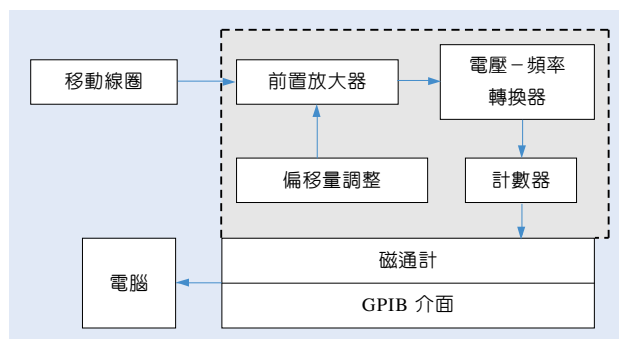


圖 1. 線圈在變化磁場下感應的信號經電壓頻率轉換器 (VFC) 後被計數器積分後的數位信號經 GPIB 傳輸到電腦作數據處理。

一般磁通計是一種高敏度的積分器，其基本結構如圖 1 所示。由線圈所組成的迴路當做偵測器，由線圈所量測到的電壓變化藉由前置放大器來增強低信號的量測能力，此前置放大器擁有一高穩定度的參考電壓，輸入電壓經放大之後再藉由電壓-頻率轉換器 (VFC) 轉換成頻率，同時此頻率由計數器 (counter) 來對頻率積分，此計數器有一高穩定的參考振盪器來產生一個固定的頻率。一般的積分器必須具有零點偏移量 (offset) 的調整功能，以降低量測時的信號漂移 (drift)。此積分值可藉由數位輸出，透過 IEEE-488 或 RS-232 等介面來傳送信號，假如要做快速量測時，可先將量測的資料暫存在積分器的暫存器，等待量測完畢再藉由介面傳送到電腦做分析。有些磁通計還具有很多功能，如由

內部或外部做觸發信號來讀取資料；有些磁通計還具有區段積分，或者從頭到尾全部積分，或者只儲存最後的積分值，這幾種不同的積分型式可以讓使用者應用到不同的需求。

### 三、儀器規格與特徵

磁通計通常用來量測磁通量大小。目前商業化的磁通計頗多，主要的產品有 Walker、Magnet - physik，以及 Metrolab 等三家公司，內部構造都差不多，各個廠牌不一樣在於其資料處理的方式不同，尤其像 Metrolab 公司的積分器還包括很多其他的功能，其內部外部觸發信號，以及其有不同的積分模式。一般磁通計的規格可歸納如表 1 所示。一般磁通計的特徵是信號漂移 (signal drift) 會一直存在，因此在量測磁通量時必須小心調整積分器的信號漂移，使得信號的漂移能在量測時間的範圍內維持不變，假如不能避免量測時的信號漂移，則必須考慮如何把信號漂移量扣除。除了信號漂移量之外還需考慮雜訊的降低，因此當偵測器接到積分器時必須去除雜訊以提高量測的精度，去除雜訊同時也提高 S/N 比。當增益愈高，相對比率的雜訊與信號漂移量就相對增加。

### 四、應用與用途

磁通計與高斯計相比，它最主要的特色就是量測速度快、精度高，但其缺點就是信號漂移。表 2

表 1. 磁通計的主要零件功能及其規格。

規格單元	規格需求
輸入電壓	± 5V 到 ± 5 mV
輸入阻抗	MΩ 到 1000 MΩ
電腦介面	IEEE 488 或 RS 232
積分區間	0.001 秒
信號漂移量	200 μV/月或 ± 500 μV/年
增益線性度	± 30 ppm/月或 ± 50 ppm/年
增益線性度對溫度	+ 10 ppm/°C
雜訊	± 5 ppm
增益穩定度	± 30 ppm

※不同的增益有不同的精確度，本表以最大增益的規格為準。

表 2. 兩種量測技術的比較。

量測特性	線圈式的磁通計	高斯計
磁通量測	優	不良
空氣間隙量測	優	優
在材料上量測	優	不良
量測時的信號漂移	大	很小
溫度影響量測	不敏感	很敏感
量測的靈敏度	高	有極限
線性度	高	不好
可量測的最大磁場	高	普通
磁通密度量測	尚可	優

歸納出磁通計與高斯計特性之間的比較。雖然磁通計可以配合小線圈來量測磁通量密度 (magnetic flux density)，但其磁場解析度不如高斯計。

一般磁通計配合各種不同的線圈形狀以及不同的組合，可以量測不同磁性材料的特性。它可以配合小面積線圈來量測磁通密度；配合位能線圈 (potential coil) 可以量測某個磁區的磁位場 (magnetic potential field)；配合 Helmholtz 線圈可以量測磁塊的磁偶極矩 (magnetic dipole moment)，除了配合以上的特殊線圈之外，它還可以用來量測硬鐵 (hard magnet) 與軟鐵 (soft magnet) 的磁滯曲線 (hysteresis curves)，尤其我們可以從硬鐵的磁滯曲線量測圖來定出磁塊的工作點。磁場積分量測如旋轉線圈 (rotating coil) 或長迴路線圈 (long loop coil) 配合磁通計可以很精確地來量測各極磁鐵的各極分量大小，這種方法的量測方式不僅精確而具比一般的電表 (DVM) 的積分量測方式要快很多。為了解決信號漂移量，一般磁通計都有漂移量的調整功能，因此每過一段時間必須重新調整信號漂移量 (參考表 1)。

### 參考文獻

1. E. Steingroever, *Magnetic measuring techniques*, MAGNET-PHYSIK.
2. *High precision digital integrator*, edited by Metrolab.
3. E. Steingroever, *IEEE Transactims on magnetics, Mag-14, 5* (1978).

作者：黃清鄉先生為國立交通大學電子物理博士，現任行政院同步輻射研究中心副研究員。

# 磁阻計

## Magneto-resistor Meter

**關鍵字：**磁阻計、核磁共振儀、電子自旋共振儀

**Keywords：** magnetoresistor meter, nuclear magnetic resonance, electron spin resonance

### 一、基本原理

磁阻計 (magneto-resistor meter) 是利用磁阻感測器 (magneto-resistor sensor, MRS) 來量測半導體元件磁阻的變化，根據磁阻的大小來決定磁場大小。一般磁阻感測器是采用化合物半導體，例如銻化銻 (InSb) 或砷化鎵 (GaAs) 等等，而採用最多的是銻化銻。也有利用強磁性體的磁電阻元件，例如高導磁合金 Ni-Fe、Ni-Co 等等。

雖然磁阻感測元件是半導體元件，但是並不像霍爾元件可以量測磁場方向，這種的磁阻感測元件只能量測磁場強度大小。因此這種元件的用途自然受到限制。但是也有其優點之處。一般霍爾元件是四個端點，而磁阻元件只需兩個端點，因此變成十分容易處理。

磁阻計的基本原理可以從圖 1 來說明。假設磁感測元件的電阻為  $R$  與一參考電阻  $R_f$  串聯，當這兩個電阻串接於一固定電壓  $V_p$ ，則量測  $R_f$  兩端的輸出電壓  $V_f$ ， $V_f$  可寫成式 (1) 式

$$V_f = \frac{R_f}{R + R_f} V_p \quad (1)$$

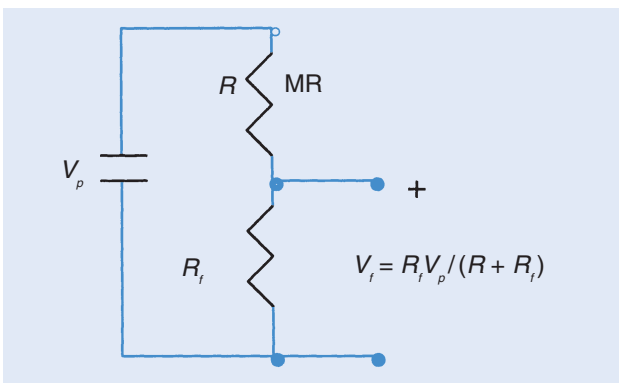


圖 1. 電磁感測元件 MR 的電阻  $R$  與一參考電阻  $R_f$  一起與一固定電壓源  $V_p$  串聯，從量測值  $V_f$  可知磁場大小。

當磁感測元件置於不同磁場大小時，磁感測元件的電阻  $R$  隨著改變，因此從 (1) 式在  $R_f$  端的輸出電壓也隨著改變。量測  $R_f$  兩端電壓的大小就可得到磁場大小。但是一般磁感測元件又容易受溫度的影響，因此市面上的磁感測器都是由兩個磁電阻構成如圖 2 所示。 $R_f$  由另一磁電阻來代替，這兩個磁電阻元件會互相差動補償，因而抵消磁電阻元件的溫度變化，所以在 MR2 的兩端點輸出幾乎不受溫度的影響。因此串聯兩個相同磁電阻下的溫度影響因素會比單一磁電阻降低一個數量級。

而磁阻的變化是由於當磁阻元件有一電流  $I$  流過時，磁阻元件內部的電流分佈會如圖 3 所示。當外加磁場  $B$  不等於 0 時，而且以垂直的角度進入元件時，由於霍爾效應的關係使得電流、磁場與霍爾角度成一個傾斜角，而增長電流的路徑 (如圖 3(b))，電流路徑的增長代表單位時間內流過的電流變小，此時的磁電阻元件的電阻就變大，而由 (1) 式知此時的輸出電壓也增加。當外加磁場  $B = 0$  時就如圖 3(a) 所示，電流的路徑沒變，因此輸出電壓沒變。

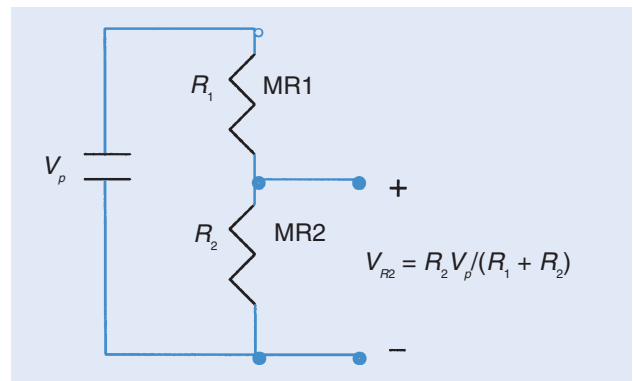


圖 2. 兩個磁感測元件 MR1 與 MR2 的電阻  $R_1$  和  $R_2$  共同與一個固定電壓源串聯，量測  $V_{R2}$  的值即可知磁場大小，此時具有溫度的補償效果。

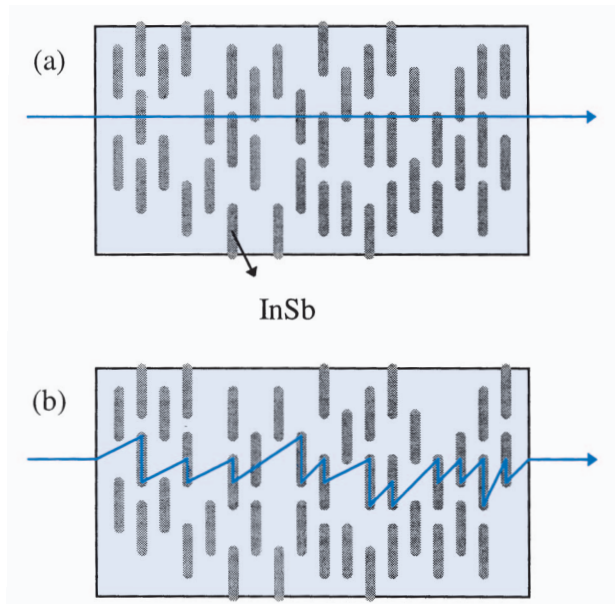


圖 3.(a) 當磁場  $B=0$  時，電流經過 InSb 時不轉彎，表示電阻值不變，(b) 當磁場  $B \neq 0$  時，電流經過 InSb 時路徑增長，此代表電阻值增加。

## 二、結構示意圖

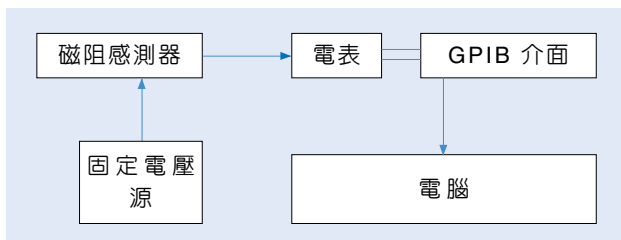


圖 4. 一個固定電壓源供給磁阻感測器，經磁阻感測器的電阻變化而有不同的電壓輸出到電表，而電表經介面傳到電腦儲存資料。

磁阻計的最大好處是整個儀器設備相當簡單，操作方便，一個基本的磁阻計的裝置如圖 4 所示。一穩定電壓源並與磁感測元件串聯，電壓信號從磁感測元件的一端與電壓源的地線端輸出，此輸出信號再接到一般的電壓表 (voltage meter) 以數位信號顯示在面板上，如果要做自動量測，則可以把信號接到具有介面 (如 IEEE488 或 RS232) 的電壓表上，透過此介面與電腦連接，直接由微電腦操作控制及資料擷取。根據霍爾效應原理，由電表量測到的電壓變化量會與元件的形狀有關，電極間的距離愈長 (如圖 1)，會導致電阻值變化率不高，圖 1 中的 InSb 針棒串聯起來交互排列，而電極部份則以金屬連接。

## 三、儀器規格與特徵

市面上所能買到的磁電阻元件大都是化合物半導體的銻化銻為材料，因銻化銻材料具有較高的磁場感測度。而此種磁電阻元件只受磁場強度的影響，而和磁場方向無關，因此為了改善這種缺點，在磁電阻元件上又加一偏壓磁場強度，如此可以增加其判別磁極能力，同時又可以增加其對磁場的敏感度。這是由於這種磁電阻特性在弱磁場強度區域元件的電阻變成非線性，此區域的磁場敏感度比較差，在這個區域的磁場與電阻的關係可寫成 (2) 式。

$$R = R_0 (1 + mB^2) \quad (2)$$

$R_0$  為零磁場時的內電阻， $B$  表示磁通密度而  $m$  代表偏離零磁場的大小。但是當磁電阻元件操作在高磁場強度區域則此時的電阻值  $R$  以 (3) 式表示

$$R = R_0 (1 + mB) \quad (3)$$

從 (3) 式可知元件的電阻變化幾乎成線性的變化，因此其對磁場的敏感度就增加很大。這些是半導體元件的主要特徵。它除了以上的特徵之外，還具有兩端元件、電阻變化率高、低雜訊等等，同時對磁場具有正的磁特性。

另一種磁電阻元件為強磁性體高導磁合金如 Ni-Fe 或 Ni-Co 等等，這些元件若加磁場則元件的內電阻會減少，對磁場有負的磁特性。同時這種元件可以使用在較高的頻率範圍 (大約 100 MHz)。以上兩種元件的特徵綜合於表 1。

一般磁阻計元件的使用規格相差不多，現在市面上有日本東京三洋電機、松下電子、村田製作所，以及德國西門子公司都有產品，在本文內只單獨拿日本村田製作所製產品規格如表 2 所示。以上所談的這些磁電阻元件除了價錢上便宜之外，對於角度的定位誤差比較不敏感，同時也比較容易做校正。

## 四、應用與用途

磁阻計和其他如高斯計方法相比，它最主要的特色有：更高的靈敏度，可工作在較大的溫度範圍，使用在比較高頻率範圍 (數 MHz)。一般的半導體電磁感測器有正的磁特性，而強磁性體的金屬

表 1. 磁阻感測元件的種類及其特性。

磁阻感測元件種類	材料的種類	特性
化合物半導體元件	1. 銻化銦 (InSb) 2. 砷化鎵 (GaAs) 3. 砷化銦 (InAs) 4. 銻化鎳 (NiSb)	1. 低雜訊 2. 正的磁場特性
強磁性體金屬元件	1. 鎳 (Ni) 2. 鎳鈷 (Ni-Co) 8:2 3. 鎳鐵 (Ni-Fe) 9:1	1. 負的磁場特性 2. 可操作在較高頻率

表 2. 磁阻感測器元件的規格。

元件	使用溫度範圍	線電阻	工作電壓	輸出電壓
InSb	-20° - 60 °C	0.5 - 5 kW	7 V	0.3 - 0.8 mV
強磁性薄膜	-30° - 130 °C	2.2 - 3.2 kW	16 V	90 - 110 mV

電磁感測器則有負的磁特性。雖然電磁感測器 (MR) 無磁極的判別能力，但是經加一偏壓磁場即能作磁極的判別。

在操作磁阻計之前需確定磁場的校正，一般可以把 MR 與核磁共振儀探針 (NMR probe) 或電子自旋共振儀探針 (ESR probe) 來校正磁場，NMR 用來

校正高磁場部份而 ESR 用來校正低磁場部份。校正磁場完之後，在量測磁場時必須旋轉探針使得探針面與磁場垂直時量到的值才是真正的磁場大小。其操作方式近似於高斯計的方法。一般的 NMR 或 ESR 就不受垂直度的影響。

磁阻計的原理除了可以用來量測磁場之外，還可以利用此原理來當作一個非接觸型的角度感測器，一般使用在錄影機中的影帶張力或筆桿記錄器等之伺服系統。它可以當作旋轉感測器，類似於旋轉編碼器等的感測元件等等。一般在磁阻計的製作上是採用二個電磁感測器來做差動性的溫度補償，使得磁阻計在量測磁場時不受溫度的影響。

### 參考文獻

1. C. Brouwer, *Nucl. Instr. and Meth.*, A 313 (1992).
2. J. Onvlee, *Ph. D. Thesis*, University of Amsterdam (1989).
3. 張連璧, 磁感測器及使用法, 再版, 台北: 文笙書局 (1996).
4. 陳瑞和, 感測器, 初版, 台北: 全華科技圖書 (1992).
5. 許溢適, 感測器的使用方法與電路設計, 初版, 台北: 文笙書局 (1997).

作者：黃清鄉先生為國立交通大學電子物理博士，現任行政院同步輻射研究中心副研究員。

# 超導量子干涉儀

## Superconducting Quantum Inteference Device (SQUID)

**關鍵字：**超導量子干涉儀、通量子、約瑟夫遜接合結

**Keywords：**superconducting quantum interference device (SQUID), fluxon, Josephson junction

### 一、基本原理

超導量子干涉儀是利用宏觀長程量子干涉 (macroscopic long-range quantum interference) 原理所設計出來的一種磁場量測儀器。經過環的通量總和是外來源通量  $\Phi_e$  和環表面流動的超導電流所產生的通量  $\Phi_s$  的和  $\Phi = \Phi_s + \Phi_e$ ，通量  $\Phi$  是量子化的，通常外來源的通量沒有量子化的條件，所以  $\Phi_s$  須通當地調整 (modulate) 超導電流的通量使總磁通量是量子化的值。超導量子干涉儀可分為兩種，一種叫高頻超導量子干涉儀 (rf SQUID)，另一種叫直流超導量子干涉儀 (dc SQUID)。市面上到目前還是採用高頻超導干涉儀比較多，但由於直流超導干涉儀的敏感度改良很多，因此往後應會朝向直流超導干涉儀發展。以上這兩種方法的基本操作原理分別描述如下。

#### 1. 直流超導量子干涉儀

直流超導量子干涉儀是由兩個約瑟夫遜接合結 (Josephson junction) 裝置在超導環上 (如圖 1 所示)。當有一外加磁通量  $\Phi_e$  通過兩個結的超導迴路

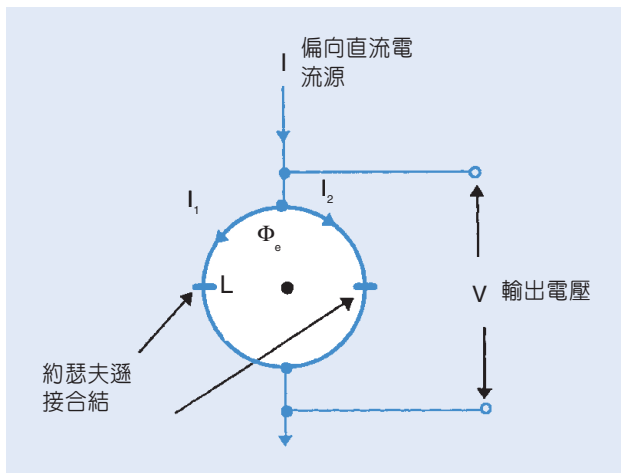


圖 1. 直流量子干涉儀的偵測元件結構。

上，將造成最大電流會以磁場強度為函數的干涉現象。超導環的電感為  $L$  而每個結的臨界電流與轉移電阻 (shunt resistance) 分別為  $I_c$  與  $R$ 。SQUID 被加一固定電流源  $I = I_1 + I_2$ ， $I_1$  與  $I_2$  個別為通過兩個結的電流。因此通過節的電流分別為：

$$I_1 = I_c \sin \theta_1 + \frac{V_1}{R} \quad (1)$$

$$I_2 = I_c \sin \theta_2 + \frac{V_2}{R}$$

$V_1$ 、 $V_2$  與  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分別為跨過節的電壓與相位差。根據磁通量子化原理可以得到相位差與總磁通量的關係

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \quad (2)$$

$\Phi$  為在 SQUID 上的總磁通量， $\Phi_0$  為通量化的基本單位稱為通量子 (fluxon)。 $\Phi$  為由電流  $I_1$  與  $I_2$  所引起的磁通量  $\Phi_1$  與  $\Phi_2$  以及外加磁通量  $\Phi_e$  的和 (因為 SQUID 的信號會隨著外加磁通量  $\Phi_e$  的變化而產生以  $\Phi_0$  為週期的變化)，因此總磁通量

$$\Phi = \Phi_e + LJ \quad (3)$$

此處的  $J = (I_2 - I_1)/2$ 。所以在超導環上得到的電壓  $V$

$$V = V_1 - \left(\frac{L}{2}\right) \frac{dJ}{dt} = V_2 + \left(\frac{L}{2}\right) \frac{dJ}{dt} \quad (4)$$

我們定義  $\beta = 2LI/\Phi_0$ ，因此方程式 (2) 與 (3) 可以整理成

$$\frac{J}{I_c} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\pi\beta} - \frac{2\Phi_e}{\beta\Phi_0} \quad (5)$$

同時從相位與電壓的關係  $\frac{d\theta_1}{dt} = \left(\frac{2e}{\hbar}\right)V_1$  與  $\frac{d\theta_2}{dt} = \left(\frac{2e}{\hbar}\right)V_2$  和方程式 (2)、(4) 的相關性可以得到在環上的總電

壓  $V$  的大小。

$$V = \frac{\hbar}{2e} \left( \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{d\theta_2}{dt} \right) \quad (6)$$

從 (1) 到 (4) 可以導出以下的關係

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{2eR}{\hbar} \left[ \frac{I}{2} - J - I_c \sin \theta_1 \right] \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{2eR}{\hbar} \left[ \frac{I}{2} + J - I_c \sin \theta_2 \right]$$

因此從方程式 (5)、(6) 和 (7) 經數值計算即可得到直流超導量子干涉儀的所有特性。

## 2. 高頻超導量子干涉儀

這種感測器是由具有電感  $L$  (典型的量為  $10^{-9}$  H) 的超導環，此超導環包含有臨界電流  $I_c$  的一個約瑟夫遜接合結 (如圖 2 所示)，同時包含有電容  $C$  與轉移電阻  $R$ ，而且這個接合結是遵守正弦波的電源一相位關係而  $\beta_c \ll 1$ ，因此 I-V 曲線具有非滯迴路。一般臨界電流都設定為  $\Phi_0/L$ 。

根據通量子原理可知當總磁通量通過環而在結處會有相差  $\theta$ ，這相差會決定流過環電流  $I_s$

$$I_s = \pm I_c \sin \left( \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \right) \quad (8)$$

而外部磁通量  $\Phi_e$  (待測磁場) 將產生總磁通量大小在此環上

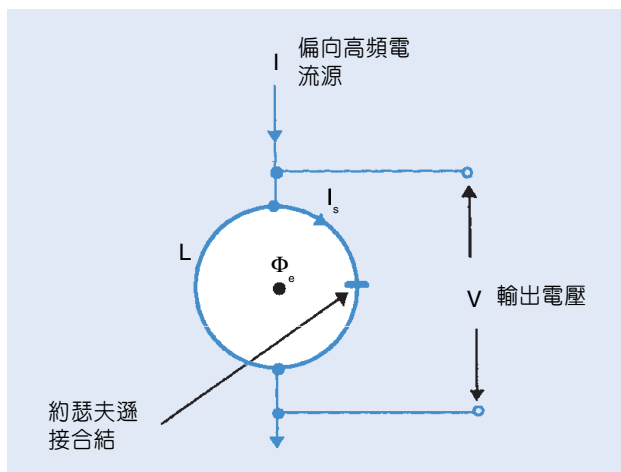


圖 2. 高頻量子干涉儀的偵測元件結構。

$$\Phi = \Phi_e - LI_c \sin \left( 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \quad (9)$$

當 (9) 式中的  $\Phi_e$  再加上一高頻電流  $I_{rf}$  所引起的磁通量變化，則可從  $\Phi$  與  $\Phi_e$  的變化中經數學分析即可到待測場的大小。

## 二、結構示意圖與操作說明

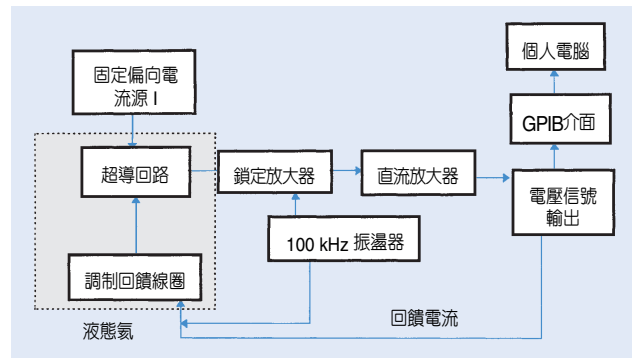


圖 3. 直流量子干涉儀的量測系統結構圖。輸出電壓等比例於回饋電流，此回饋電流為保持總磁通量在  $\Phi_e = n\Phi_0$  值的環路上不變，使得 100 kHz 的最小分量給予鎖定放大器如圖 4 所示。因此輸出電壓與外加磁通量是等比例的關係。

超導量子干涉儀的結構示意圖分成直流與高頻兩部份來描述。直流超導量子干涉儀的結構示意圖如圖 3 所示。兩組電流源 (一種為偏向直流電流源另一種為 100 kHz 的回饋電流源) 分別提供給超導回路線圈與調制回饋線圈在 SQUID 回路上產生磁通量。當使用一穩定的偏向電流使得 SQUID 的電壓不等於零，同時再加上一正弦波在 100 kHz 時的最大調制磁通量大約在  $\frac{\Phi_e}{2}$  (如圖 4(a) 所示)，如此在跨過 SQUID 的交流電壓在  $\Phi_e = (n + \frac{1}{2})\Phi_0$  時與頻率在 200 kHz 時有最大分量，而在 100 kHz 時有最小分量。當外加磁通量從  $\Phi_e = (n + \frac{1}{2})\Phi_0$  增加到  $\Phi_e = (n + 1)\Phi_0$  時，跨過 SQUID 上的交流信號的電壓值  $V_f$  在基頻率上的分量會慢慢增加而 200 kHz 的分量會慢慢下降，直到  $\Phi_e = (n + \frac{3}{4})\Phi_0$  時在基頻 100 kHz 會達到最大值 (如圖 4(b))，而在  $\Phi_e = (n + 1)\Phi_0$  時又下降至零。這個電壓變化耦合到鎖定放大器而鎖定在 100 kHz，這種行為對所有  $n$  值都一樣。鎖定放大器量測到的 100 kHz 的電壓輸出，這電壓輸出會回饋到 SQUID 的回饋線圈上，使得

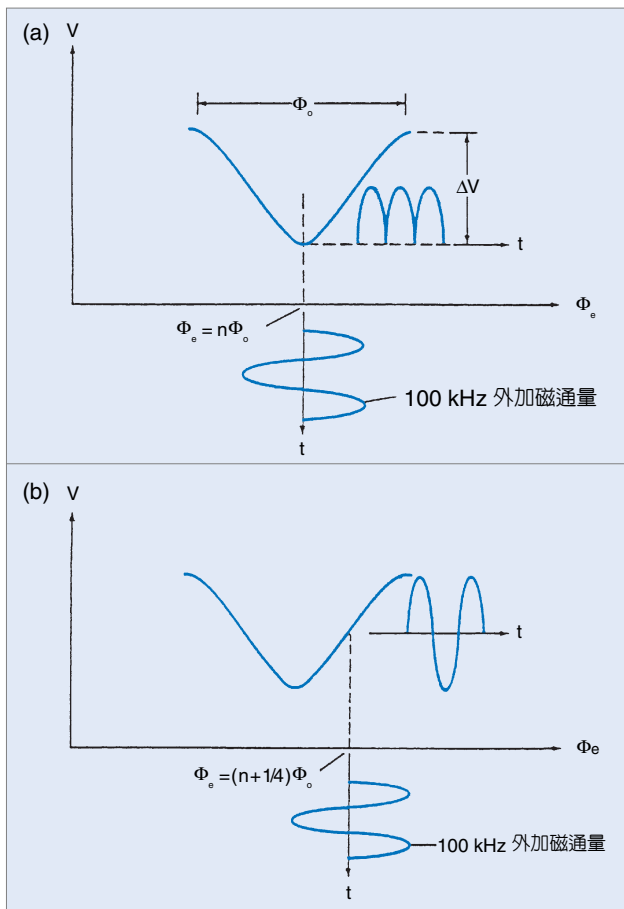


圖 4. 外加磁通量與 SQUID 上的電壓關係 (a)  $\Phi_e = n\Phi_0$ ，在 100 kHz 沒有電壓，(b)  $\Phi_e = (n + \frac{1}{4})\Phi_0$ ，只有在 100 kHz 才有電壓分量。(摘自參考文獻 3)。

100 kHz 的信號永遠保持在最大或最小值。此回饋系統會保持總磁通量在  $n\Phi_0$  或  $(n + \frac{1}{2})\Phi_0$ ，是被回饋信號的正負符號來決定，當待測磁場被改變了  $\delta\Phi_e$ ，因此 SQUID 總是保持在固定的磁通量。這種操作方法叫磁通鎖定超導量子干涉儀 (flux-locked SQUID)。

另一種高頻超導量子干涉儀的結構示意圖如圖 5 所示，高頻 SQUID 有兩種不同的操作模式，分別為磁滯模式 (hysteretic) ( $\frac{2\pi LI_c}{\Phi_0} > 1$ ) 與非磁滯模式 (nonhysteretic or inductive) ( $\frac{2\pi LI_c}{\Phi_0} \leq 1$ ) 兩種，而大部份的高頻 SQUID 都使用磁滯模式。在磁滯操作模式下的高頻 SQUID 有一 30 MHz 的高頻電流  $I_H$  被激發到 SQUID 上，而共振頻率為  $\omega/2\pi$ ，因此供給

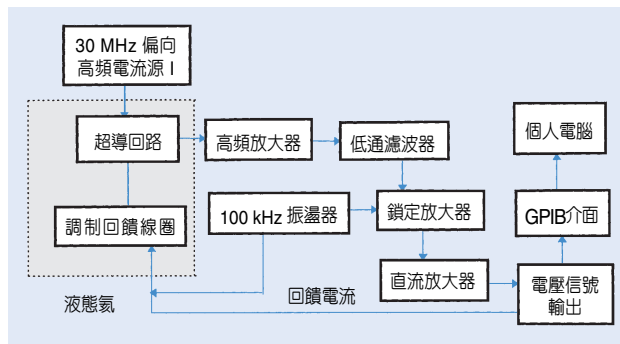


圖 5. 高頻量子干涉儀的量測系統結構圖，100 kHz 的調制振幅用來控制鎖定放大器，經鎖定放大器送出的回饋電流會與輸出電壓成等比例的關係。

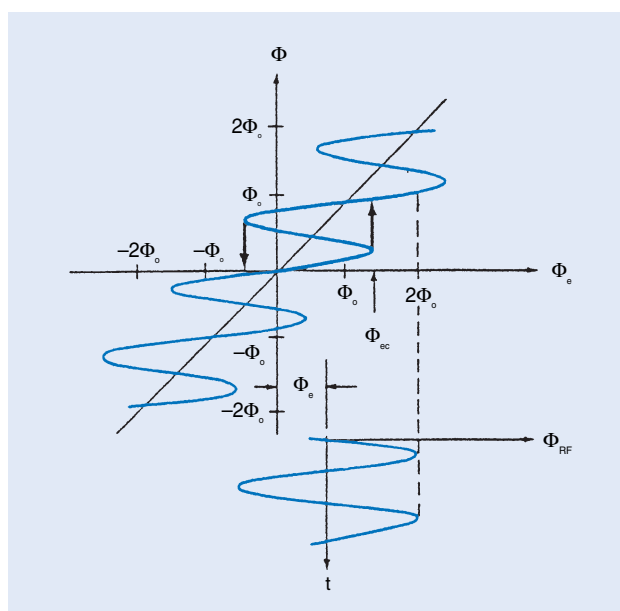


圖 6. 外加磁通量與總磁通量的關係，由於外加高頻磁通量  $\Phi_{RF}$  使得外加磁通量與總磁通量有一偏移量出現。(摘自參考文獻 3)。

SQUID 的電流可寫成  $I_H \sin \omega t$ ，此時橫跨 SQUID 的電壓由高輸入阻抗的高頻放大器放大信號，此信號經低通濾波器後平穩的隨著外加磁通量  $\Phi_e$  以週期  $\Phi_0$  作變化，比如說當  $\Phi_e$  慢慢從零開始增加時，總磁通量增加的量比  $\Phi_e$  的增加量少，這是由於環電流  $I_s$  會降低由  $\Phi_e$  所增加的量，總磁通  $\Phi$  與外加磁通量  $\Phi_e$  的關係如圖 6 所示會成週期性的輸出。當一交流調制磁通量藉由 100 kHz 的振盪器產生一大約為  $\frac{\Phi_0}{2}$  的磁通量到 SQUID 上。同時圖 6 中的週期性輸出也被 100 kHz 的振盪器與鎖定放大

器鎖住後，經直流的放大器把量測到的電壓信號輸出。這種操作模式類似於上述直流 SQUID 的操作模式。

### 三、儀器規格與特徵

SQUID 是目前所有量測磁場儀器最能量測到最低磁場的一種儀器。而目前商業化的產品都是高頻式的 SQUID，這是由於高頻式的 SQUID 只需一個約瑟夫遜接合節，因此使用比較普遍，而且這類的電子電路設計也相當的成熟。但是最近由於超薄膜穿透接合節的直流 SQUID 也已被發展到可以使用到室溫的電子電路零件。雖然直流 SQUID 需兩個接合結，但其雜訊的性能確比高頻 SQUID 要好。基本上兩者的操作模式以及整個電子電路的邏輯都差不多，只是在 SQUID 檢測元件的設計，以及偏向電流源不同之外，其餘都差不多。表 1 為兩者之間的一些差別以及有關 SQUID 的一些規格與特徵的比較。

SQUID 的一般規格是牽涉到儀器本身的雜訊的克服，雜訊包含 SQUID 本身以及放大器的雜訊。因此在改進 SQUID 的精度上是藉著下降總電感  $L$  或增加接合結的電阻  $r$ ，因 SQUID 的雜訊是正比於  $\frac{L}{r}$ ，因此要提高 SQUID 的精度就必須建立信號與  $L$  和  $r$  之間一最佳化的標準。

### 四、應用與用途

SQUID 可被當作磁力計 (magnetometer) 來量測磁場或具有梯度磁場 (magnetic field gradient)，以及可當作磁化量測儀 (susceptometer) 與電表 (voltmeter) 來量測磁比係數 (susceptivity) 與電壓。SQUID 當磁力計可應用在地球物理學 (geophysics) 來量測地磁的變化。因此有一種三軸互相垂直的 SQUID 的磁力計用來量測地磁大小與地表深度的關係。利用它可以測量到  $10^{-8}$  G 的極低磁場。同時

表 1. 高頻與直流量子干涉儀的特徵比較。

特性	種類	高頻量子干涉儀	直流量子干涉儀
偵測元件		單結點超導環	雙結點超導環
偏向源		30 MHz 電流或更高	直流電流
調制頻率		100 kHz 或更高	100 kHz
雜訊源		前置放大器，環電流以及感測元件本身	前置放大器與感測元件本身
雜訊量		$\sim 10^{-5}\Phi_0/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$	$\sim 2 \times 10^{-5}\Phi_0/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$
解析度		$\sim 10^{-5}\Phi_0/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$	$\sim 2 \times 10^{-5}\Phi_0/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$
漂移量		$\sim 2 \times 10^{-5}\Phi_0/h$	$\sim 2 \times 10^{-5}\Phi_0/h$

可以用來追蹤磁物件的運動狀況。SQUID 磁化量測儀可量測在極低溫度與極低磁場下的電子與原子核的磁力現象。尤其在研究人體內心臟、腦、神經等會發生磁場的一種不可或缺的儀器，同時可藉由 SQUID 的磁力計來量測身體內部是否有微小磁性物質，如此來測定與診斷身體活動的數據。或者可除去外來雜信，設遮蔽室，或使檢測線圈成為梯度量測儀 (gradiometer) 來量測磁場的梯度場。

SQUID 已經很廣泛地被使用在高解析度的電表，此功能是用在量測低溫下的超導體內通量的緩慢變化，以及超導與一般金屬之間的熱電子電動勢 (thermoelectric emfs)，其量測精度可達到  $1 \times 10^{-8}$ 。

### 參考文獻

1. J. Clarke, *IEEE Trans. Electr. Device*, ED-27, 1896 (1980).
2. J. Clarke, *Superconducting Quantum Interference Devices for Low Frequency Measurements*, New York: Plenum Press, 67 (1977).
3. J. Clarke, W. M. Goubau and M. B. Ketchen, *J. Lower Temp. Phys.*, 25, 1/2, 99 (1976).
4. S. N. Erne, H. D. Hahlbohm and H. Lubbing, *J. Appl. Phys.*, 47, 5440 (1976).

作者：黃清鄉為國立交通大學電子物理博士，現任行政院同步輻射研究中心副研究員。

# 加馬計數器

## Gamma Counter

**關鍵字：**加馬計數器、輻射偵測器、閃爍分析

**Keywords：** gamma counter, radio detector, scintillation analysis

### 一、基本原理

由於放射性同位素蛻變釋出輻射線的特質不受一般物理及化學因素影響，放射性追蹤法一直廣受生物醫學、自然科學及工程學等所偏好的實驗確認方式之一。加馬射線之穿透性強，使得加馬同位素易於偵測，使用上亦較簡易。自從放射免疫分析法發明後，加馬計數器在臨床醫學及生物科學研究的應用日益廣泛，雖然近年來酵素免疫分析法、螢光免疫分析法相繼流行，但利用加馬計數器之放射免疫分析法依舊是最敏感、最穩定的方式。

加馬計數器之發展由單一偵檢器至多偵測頭，由手動發展至自動化樣品處理，其基本原理即為固態閃爍分析。加馬計數器最常見的是利用碘化鈉 (NaI) 含鉍 (Tl) 之結晶體吸收加馬射線之能量 (鉍的作用為使碘化鈉結晶體能在室溫下使用)，加馬射線穿透晶體外殼之包裝撞擊碘化鈉結晶時發生光電效應、康普吞效應或成對發生，這些效應促使碘之外圍電子躍升至激發態，當激發態之碘原子恢復為穩定態時，多餘能量以光子型態釋出，此光子穿透帶藍色之碘化鈉結晶撞擊至光電管，光電管將入射之光子轉換成電子訊號，電子訊號經放大器放大後直接經由類比數位之轉換傳輸至多頻道分析儀，即可呈現出加馬能譜。

在現行市場上加馬計數器採用之碘化鈉偵測器有下列幾種：

- 2 吋 × 1.25 吋直徑井型偵檢器
- 1.5 吋 × 1.5 吋直徑穿孔式偵檢器
- 2 吋 × 2 吋直徑井形偵檢器
- 3 吋 × 3 吋直徑井型或穿孔式偵檢器

其樣品圖如圖 1 所示。

井型偵測器與穿孔式偵檢器之差異在於效率上會有些許之不同，一般來說穿孔式偵檢器效率較低，但自動化設計較為容易；井型偵測器效率稍

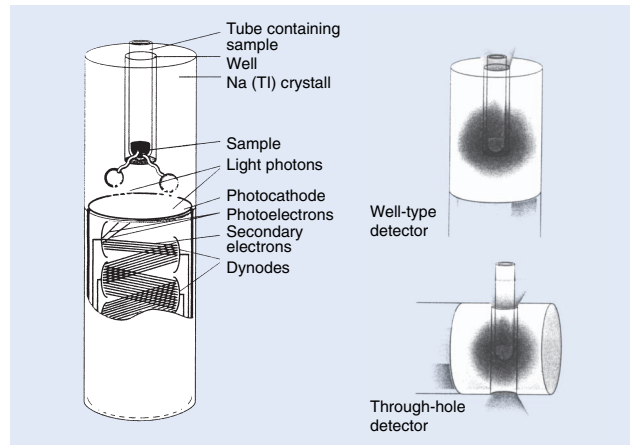


圖 1. 碘化鈉偵測器樣品圖。

高，但自動化設計須採機械手臂。

上述所列常用偵測器中前兩項體積較小，係為多偵測頭加馬計數器設計，後兩項則為單一偵測器所採用。多偵測頭計數器之設計係基於臨床檢體之計測數量多，且採用之加馬核種均為低能量核種 (如 I-125、Co-57)，故既使在小偵測器亦有很高之計測效率；後兩種偵檢頭由於晶体之體積較大，接受加馬射線撞擊機率高，既使能量高至 2000 keV 之加馬核種，其計測效率仍可接受，但因體積較大，不易設計成為多偵測頭加馬計數器。

現今的加馬計數器均以電腦控制為主體，故相對配合之軟體亦甚為重要，一般除 cpm 計算外，尚有一些肝炎篩選、放射免疫、Cr- release 計算分析軟體可供選擇。

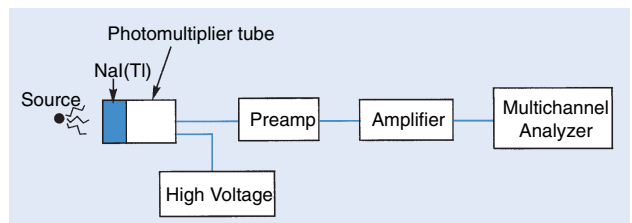


圖 2. 加馬計數器功能方塊圖。

## 二、結構示意圖

加馬計數器之功能方塊圖如圖 2 所示，其碘化鈉偵測器樣品圖請參見圖 1。

## 三、儀器規格與特徵

1. 碘化鈉 (鈉) 偵測器  $2 \times 1.25''$  及  $3 \times 3''$  之效率及解析度比較如下：

Isotope	Energy (keV)	Eff. (%)		Res. (%)	
		$2 \times 1.25''$	$2 \times 1.25''$	$3 \times 3''$	$3 \times 3''$
Co-57	122	90	12	90	13
Cr-51	320	3.7	9	7	9
I-125	29	82	24	82	25
I-131	360	15	9	43	10
Cs-137	662	26	9	47	8
I-129	31	64	24	57	24
Na-22	510	51	9	89	--
F-18	510	11	9	48	--
Ga-67	185	70	10	89	--

2. 加馬計數器之設計，其偵測器外圍通常包上一層厚厚之鉛屏蔽，用來防止宇宙射線或環境天然放射線之干擾，在此設計之原則下，背景值一般應在 50 cpm 以下。
3. 碘化鈉晶體非常容易受濕而潮解，故空氣之溼度須控制良好。各廠牌所生產之偵測器，解析度相當接近，但若受潮，則解析度會改變。
4. 儀器校正在輻射偵測上至為重要，一般小偵檢頭、適用於偵測低加馬能量者，採用 I-129 校正射源；而對大偵檢器、可用於偵測中高加馬能量者，宜採用 Cs-137 為校正射源。
5. 能量偵測範圍一般考量係以 2000 keV 以下為基準，超過 2000 keV 以上之核種用於放射性追蹤應用者較少，多頻道分析儀之配合則多以 1 keV/ch 為基準。
6. 在儀器規格之考量上，核種資料庫亦是須參考的因素之一，資料庫上必須儲存能量點、計測範圍、半衰期、計測效率與核種基本資料，如此可避免在計測上發生錯誤。
7. 活度 (activity) 高低與計測效率之關係如圖 3 所示。

當活度值愈高，計測效率逐漸降低，主要原因在於計測無感時間以及雙分裂同時計測比例增加所致。

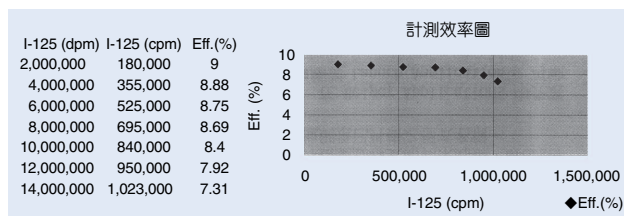


圖 3. 活度高低與計測效率之關係。

8. 樣品體積對於計測效率之影響如圖 4 所示。當樣品量體積增加，射線由偵測器之井口散射出去的比例增加，造成偵測效率降低。

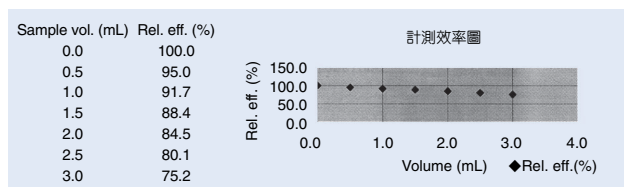


圖 4. 樣品體積對於計測效率之影響。

## 四、應用與用途

加馬計數器最普遍之用途首推放射免疫分析，在臨床或醫學研究上之首要工具非它莫屬，其他生物醫學上之放射線追蹤亦常使用，加馬同位素之實驗均可利用加馬計數器確認數據，其他運用之場所所有核能工業、保健物理、農牧、海洋科學等。

### 參考文獻

1. G. F. Knoll, *Radiation Detection and measurement*, New York: John Wiley (1979).
2. P. R. Bell, *The Scintillation Method in Beta and Gamma Ray Spectroscopy*, Amsterdam: North-Holland Publ. Co. (1955).
3. W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, New York: Springer-Verlag (1987).
4. W. Oy, *System 1470 Gamma Counters*, An EG&G Company (1995).
5. W. Oy, *The Wizard Gamma Counting Handbook*, An EG&G Company (1993).

作者：王信二先生為台灣大學化學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 液態閃爍計數器／貝他計數器

## Liquid Scintillation Counter/Beta Counter

**關鍵字：**液體閃爍計數器、貝他計數器、輻射偵測器、閃爍分析

**Keywords：**liquid scintillation counter, beta counter, radio detector, scintillation analysis

### 一、基本原理

液態閃爍計數器最常用於貝他核種 ( $\beta$ -emitter) 之定量分析。放射性同位素進行貝他衰變 ( $\beta$ -decay) 時，釋出之貝他粒子與微中子共享分裂之能量，故貝他核種釋出之貝他射線為具有某一特定最高能量 ( $\beta_{\max}$ ) 之連續能譜。若同時有多種貝他核種存在，其能譜必定混合重疊在一起，使得貝他能譜之定性分辨較加馬核種能譜辨別來得困難，以液態閃爍分析法進行貝他核種之定量分析，是目前最佳也是最有效率的方式。

$\beta$  粒子利用連續碰撞將其本身之能量轉釋出來，每 1 keV 能量之貝他粒子平均可撞擊 10 次，因此將具有貝他核種之樣品與易接受撞擊能量、並可將能量轉成閃爍發光之有機溶液混合，即可依發光的強度及次數判斷該樣品核種釋出之貝他粒子能量及劑量，此項程序即為液態閃爍。

在液態閃爍之能量轉移程序中，有兩項因素可能嚴重影響閃爍發光，造成劑量計測上的誤差，必須特別加以注意或補償。

#### 1. 化學消光 (chemical quench)

當貝他粒子由原子核釋出，在其連續碰撞途徑中，有的碰撞能量被樣品本身之化學成分吸收，結果有部分能量轉換成熱而未轉成光子，或是能量吸收後未能即時轉移發光，此種現象稱為化學消光。例如水分子就是最常見到的化學消光物質。

#### 2. 顏色消光 (color quench)

基本上液態閃爍液受激發時產生近紫外線波長之光子。當計測樣品本身帶有顏色 (如尿液、血液等) 時，由於樣品顏色造成的濾光作用，使得閃爍發光釋出之光子能量被衰減，造成入射到偵測器之光子能量降低而不易激發偵測器，此種現象稱為顏色消光。

這兩項消光因素均使能譜向低能量移動且計測數降低，因此造成計測值較實際值為低，必須進行消光補償。

貝他計數器之本體結構，一般使用光電管來收集因貝他粒子能量轉移至閃爍液後釋出的光子，但硬體設計上多使用兩組光電管來進行光子收集，其原因在於貝他粒子激發閃爍液後，可同時釋出多個光子，與一般螢光所出現之單一光子不同；由貝他粒子產生之多數光子可同時激發兩組光電管，當兩組光電管同時被激發時，推動了一組同步線路 (coincidence circuit) 及閘門，因而可鑑別樣品內貝他粒子—多數光子與其他螢光—單一光子，隨後經由訊號合成線路及多頻道分析儀完成計數，此即為整個液態閃爍計數器之硬體設計。

在液態閃爍計數中，由於消光作用造成計測值偏低，因此在消光補償上即須利用一些消光參數 (quench index parameter, QIP) 作補償運算，以下為常見的幾種消光參數：

- ① SQP (I)：以對數能譜之樣品平均能量點為指示，判斷樣品計測效率。
- ② SQP (E)：以 Eu-152 對數能譜之平均能量點為指示，判斷樣品計測效率。
- ③ H#Plus：以 Cs-137 對數能譜之康普吞邊沿半高度之相對差為依據，判斷樣品計測效率。
- ④ DOT-DPM：建立各核種之消光能譜資料庫，直接比較後再確認其效率。
- ⑤ Efficiency Tracing：利用外差推算 100% 效率點之活度 (activity, dpm)。

消光參數的運用在於建立消光曲線。首先調配不同條件之消光標準樣品，計測其效率及其相對消光參數，依此繪出消光曲線如圖 1 所示。當消光曲線完成後，待測樣品便可依圖推算計測效率。

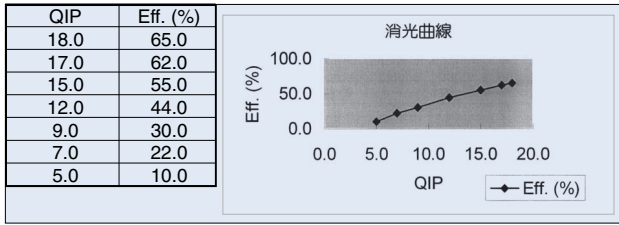


圖 1. 消光曲線。

## 二、結構示意圖

液態閃爍計數器之結構示意圖如圖 2。

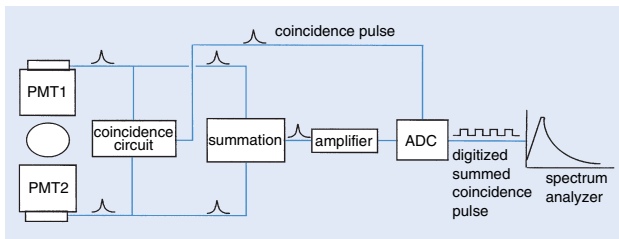


圖 2. 液態閃爍計數器結構示意圖。

## 三、儀器規格與特徵

一般來說液態閃爍計測中，未消光條件下各核種之計測效率如下：

H-3 (0 – 18.6 keV)	68 %
C-14 (0 – 156 keV)	96 %
S-35 (0 – 168 keV)	96 %
P-32 (0 – 1.71 MeV)	100 %

背景值：傳統設計 H-3 BKG < 20 cpm

低背景設計 H-3 BKG < 3 cpm

在整體性之要求下，液態閃爍計數器之首要參考數據為優美率 (figure of merit, FOM)：

優美率 (FOM) = (效率)<sup>2</sup> × (樣品體積)<sup>2</sup> ÷ 背景值

上式中樣品體積並不包括液體閃爍液在內。液態閃爍計數器之 FOM 值越高，則可偵測值越低；當然 FOM 受儀器效率及背景值影響，同時亦受閃爍液種類、樣品瓶材質及樣品與閃爍液混合比例所影響。

一般液體閃爍計數器廠商為追求更低的背景值，經常會採用加裝一組偵測器 (通稱 guard detector) 來監測背景；當環境背景 (如宇宙射線、鉀-40 和氬氣等環境天然同位素) 同時激發 guard detector 及主偵測器時，此計數扣除。低背景偵測頭設計如圖 3 所示。

使用液態閃爍計數器計測放射性同位素劑量，除上面所述消光補償及低背景值設計外，其他尚需

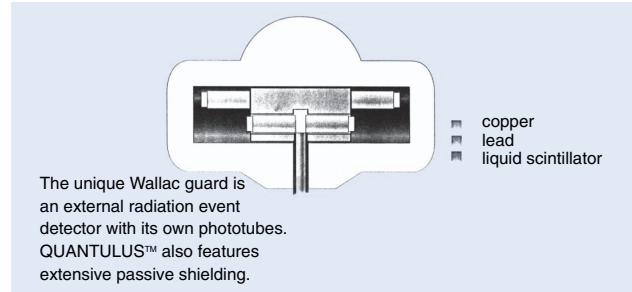


圖 3. 背景偵測頭設計。

考量之條件如下：

1. 可使用之樣品瓶體積、種類：如 Eppendorf：4 mL、7 mL、20 mL。
2. 能譜顯示：可直接顯示計測中之能譜變化。
3. 靜電消除器：避免靜電激發閃爍。
4. 雙核種、參核種運算：既使能譜混合，亦可推算出雙核種或參核種之個別劑量。
5. 螢光補償校正：避免大量螢光造成之誤判。
6. 異狀樣品 (heterogeneous sample solution) 偵測設計：監視樣品狀態是否穩定，可提高數據可信度。
7.  $\alpha/\beta$  分辨偵測：分別計算  $\alpha$  及  $\beta$  核種劑量。

## 四、應用與用途

液態閃爍計數器之用途甚為廣泛，生物醫學、農牧業、化學、地質、考古、水文、海洋、核能工業、環境及保健物理等均需使用此項設備，基本上生物醫學、生命科學及農牧、工業界的研究係使用已知同位素作為示蹤劑，地質、考古及環境科學則是偵測環境中之放射性同位素，但在使用液體閃爍計數器時需非常注意樣品的調配，勿使樣品溶液出現不均勻之異狀。

## 參考文獻

1. G. F. Knoll, *Radiation Detection and measurement*, New York: John Wiley (1979).
2. P. R. Bell, *The Scintillation Method in Beta and Gamma Ray Spectroscopy*, Amsterdam: North-Holland Publ. Co. (1955).
3. W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, New York: Springer-Verlag (1987).
4. Wallac Oy, An EG&G Company, System 1470 Gamma Counters (1995).
5. Wallac Oy, An EG&G Company, Low Level Liquid Scintillation Counters (1995).

作者：王信二先生為台灣大學化學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 劑量校正器

## Dose Calibrator

**關鍵字：**劑量校正器、游離腔偵測器、劑量計測

**Keywords：** dose calibrator, ionization chamber detector, dose measurement

### 一、基本原理

基本設計上劑量校正器就是一個體積較大的井型游離腔偵測器 (well type ionization chamber detector)，其功能主要用於放射性核種之活度 (activity) 確認，採用井型游離腔之原因為樣品可以在近似  $4\pi$  的偵測環境下度量，同時井底深、偵測器大，可適用於各種式樣的計測瓶，並減低井口散射之比率，如此偵測出之劑量方較精確。

劑量校正器之輻射偵測值校正，一般均採國家級標準射源 (如 NIST、NBL) 為計測標準參考值。在劑量校正器之設計上，原始內部之核種資料庫，都是利用各種標準射源推算出其校正參數，而此校正參數即為劑量校正器之頭腦，必須靠此運算出實際劑量值，因此劑量校正器本身就是由許多放射性核種校正出來的校正器。

游離腔偵測器與其他偵測器硬體設計上較不同的是它採用電流模式系統 (electrometer)，而不採用脈衝模式計測 (pulse counting)。採用電流模式的優點是計測得到的電流數值較穩定精確，而缺點則是劑量計測變化反應時間較慢。當游離腔因輻射線照射而腔內產生電流，此電流經放大器放大後推動線性轉數位線路，直接提供給電腦作數據處理，而電腦數據處理就是將此電流值乘上待測射源之校正參數，就可得到劑量值。

劑量校正器設計上並不用來做放射性核種的定性分析，而僅用來提供精確的核種活度定量分析數據，同時一般游離腔大多數僅適合計測中、高劑量之放射性同位素，並不適合低劑量計測。日常使用劑量校正器最重要之工作是使用前開機預熱時間須足夠使高壓穩定，接著就是歸零以避免設備本身造成之誤差，其次是背景計測及自動扣除。

近年來由於腫瘤治療研究大量使用高能量貝他同位素，已有廠商提供可用於計測高能量貝他核種

之貝他劑量校正器，此型劑量校正器採用碘化鈉偵測器，而一般用於計測加馬核種者則採游離腔偵測器。高能量貝他射線在固定距離下，對於碘化鈉偵測器有固定比例之穿透率，依據此特性建立相當之資料庫，就可成為貝他劑量校正器。

### 二、結構示意圖

劑量校正器如圖 1 所示，貝他劑量校正器如圖 2 所示。

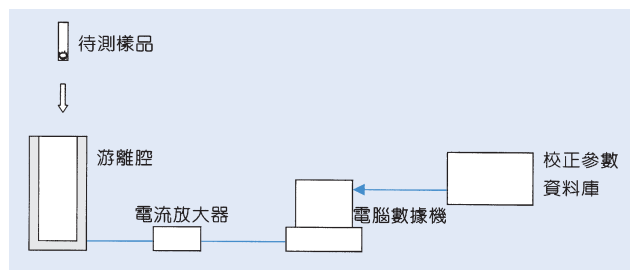


圖 1. 劑量校正器。

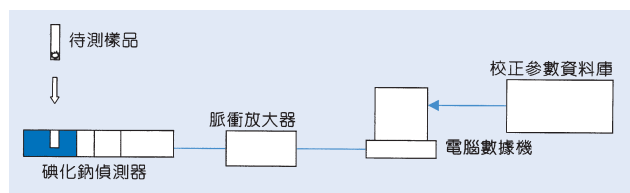


圖 2. 貝他劑量校正器。

### 三、儀器規格與特徵

劑量校正器的第一項注意規格就是游離腔之大小及深度。一般來說深井式設計有較佳的  $4\pi$  計測效果，且井部愈深計測結果受計測樣品瓶之式樣影響愈小，而游離腔內充填加壓氬 (argon) 氣體，可有較高之計測靈敏度 (較低之計測下限值)。

第二項注意規格就是測量範圍。雖然測量值可高至居里單位，但是解析度則須低至 0.01 微居里以下為佳，如此可使此設備有較寬之適用範圍。

第三項注意規格就是電子線路 (電流計) 之精確性及再現性均需甚高。一般要求大致為 1 % 誤差，而 24 小時之變化率為 0.5 % 以內。

第四項注意規格就是可運用之校正參數種類有多少。劑量校正器之主要智慧財產就是放射性核種校正參數，每一個核種均有其校正參數，每一個參數均是由一個標準射源計測確認的。一般在選擇劑量校正器時，須知道該機種是否有足夠的校正參數。無校正參數之核種，必須自行購買標準射源，

測試後建立其校正參數，才能用於該核種之劑量計測，甚為不便。常見之放射性核種及其校正參數列舉如表 1。

最後須注意的就是劑量校正器之游離腔對溼度非常敏感，必須在乾燥環境下使用，同時欲得到精確之量測，電流歸零及背景值扣除是必要的。一般來說輻射偵測器大多數是全天候開機，劑量校正器亦是如此，主要原因在於保持高壓電源供應器輸出電壓及系統之穩定。

表 1. 常見之放射性核種及其校正參數。

放射性核種	校正參數設定值	半衰期 (NCRP-58)	參考來源	備註
碳-11	457	20.38M 2	ORNL76	
氮-13	457	9.965M 4	ORNL76	
氧-15	462	122.24S 14	ORNL76	
氟-18	439	109.71M 2	ORNL76	
磷-32	750 × 100	14.29D 2	NBS76	Estimation use only
鈷-57	112	271.7D 2	NBS76	Ref. for 122 keV
鐵-59	430	44.51D 2	ORNL76	
鈷-60	990	5.2714Y 5	NBS75	Ref. for 1.17, 1.33 MeV
鎡-67	100	3.261D 1	NBS78	
鉀-81	174	4.58H	NM75	Pure
氬-81m	915 × 10	13S 1	NM75	Pure
溴-82	536 ÷ 2	35.34H 2	ORNL76	
釷-90	48 × 10	64.0H 1	NIST92	Estimation use only
鉬-99 (in Std. Mo Kit)	080 × 5 or 246 × 10	65.92H 2	NBS78	
鎳-99m	080	6.007H 1	NBS76	
鈮-111	303	2.805D 1	NBS77	
碘-123	277	13.221H 3	NBS77	Ref. for 28 keV X-ray
碘-125	319	59.6D 2	NBS76	
碘-131	151	8.021D 1	NBS76	Decays to <sup>131m</sup> Xe, 1.1% feeding
氙-133	188	5.243D 1	NBS76	
銫-137 銻-137m	220	30.0Y 2 2.553M 1	NBS73	Ref: 661.6 & 32.9 keV. Often referred to as “Cs-137” Source
銻-192	408	73.83D 1	NDS 73	
金-198	149	2.696D 2	NBS78	
鉑-201	205	72.91H 2	NBS76	

The calibration numbers given in this table are based on the latest available published data and the NIST, SRM geometry and are believed to be accurate.

#### 四、應用與用途

由於劑量校正器之計測範圍可由微居里至居里，故最適合中、高劑量之核種活度計測。在各核子醫學中心、核醫藥局、正子斷層掃描中心、腫瘤科、核能研究機構、放射校正實驗室及放射化學實驗室等單位，放射藥物及各種放射性物質之劑量計測幾為日常之例行工作，欲獲得方便又準確之劑量計測，此項設備實為不可缺少的工具。

#### 參考文獻

1. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, New York:

John Wiley (1979).

2. B. B. Rossi and H. H. Staub, *Ionization Chambers as Counters*, New York: McGraw-Hill (1949).
3. W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, New York: Springer-Verlag (1987).
4. *CRC-35 Specifications*, Capintec Inc., N.J., USA.
5. *Beta counter Specifications*, Capintec Inc., N.J., USA.

---

作者：王信二先生為台灣大學化學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 輻射高性能液相層析儀

## Radio HPLC

**關鍵字：**高性能液相層析儀、輻射偵測器、閃爍分析

**Keywords：** high performance liquid chromatography, radio detector, scintillation analysis

### 一、基本原理

輻射高性能液相層析儀就其整體來說，即為具備輻射偵測器之高性能液相層析儀 (high performance liquid chromatography, HPLC) 系統，主要組合包括移動相溶液 (mobile phase solvent)、溶媒輸送系統 (solvent delivery system)、樣品注入器 (injector)、分離管柱 (column)、偵測器 (detector，通常包括輻射偵測器與另一種光學偵測器) 和資料處理系統 (data processing system)，其層析分離原理與一般的高性能液相層析儀並無二致。不同物質進入層析管柱後依其與固定相和移動相間作用力的不同，於不同時間被移動相帶出管柱而完成分離過程；若依分離原理的不同，HPLC 可分為四大類：① 正相層析法 (normal phase chromatography)、② 逆相層析法 (reverse phase chromatography)、③ 離子交換層析法 (ion-exchange chromatography)、④ 膠體層析法 (gel permeation chromatography)。

當樣品經過管柱分離並通過光學偵測器 (如 UV/VIS、IR 或螢光偵測器) 後，接著進入輻射偵測器。輻射偵測器基本上可分成兩種型態，一為固態閃爍方式，一為液態閃爍方式，當然亦有兩相一體之機種。

首先討論固態閃爍方式，亦可再分兩種，一為樣品接觸式，亦即樣品直接接觸發光材料如 CaF、Glass Scintillator 或 Yttrium-glass，此時貝它或加馬放射性同位素釋出之能量直接撞擊閃爍發光材料，再利用光電管偵測此閃爍光。接觸式固態閃爍之計測元結構設計有兩種形式，一為將粉末狀之閃爍發

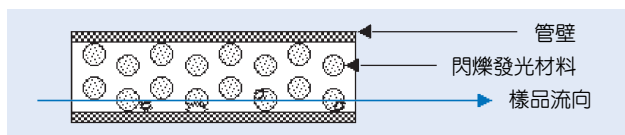


圖 1. 充填式固態閃爍計測元示意圖。

光材料以類似裝填 HPLC 分離管柱之方式裝入計測元，如圖 1 所示。

另一種形式係將發光材料直接鍍上管壁內緣，如圖 2 所示。

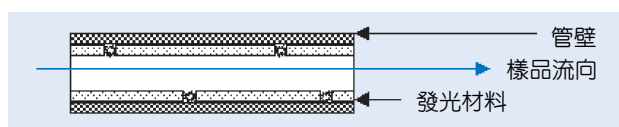


圖 2. 鍍壁式固態閃爍計測元示意圖。

以上是接觸式固態閃爍之計測元設計方式，唯須注意的是 CaF 材料會稍溶於水，故樣品須先除水；此種方式之好處是不須利用液態閃爍方式 (須添加液態閃爍液) 就可計測貝它核種，雖然計測效率較低，但計測成本亦較低。幾種常用固態閃爍式偵測器之參考效率如下：

Yttrium Glass Scintillator：H-3 7-8%，C-14 80-85%，充填式  
Yttrium Glass Scintillator：H-3 4-5%，C-14 70-80%，鍍壁式  
Glass Scintillator：H-3 1-1.5%，C-14 50%，充填式

固態閃爍方式的另一種為間接式固態閃爍計測元 (如圖 3)，此時放射性能量必須先穿透管壁再進入偵測頭，一般來說此方式較適用加馬放射性同位素，因其穿透性較佳。

間接式固態閃爍計測元採用之發光材料通常以

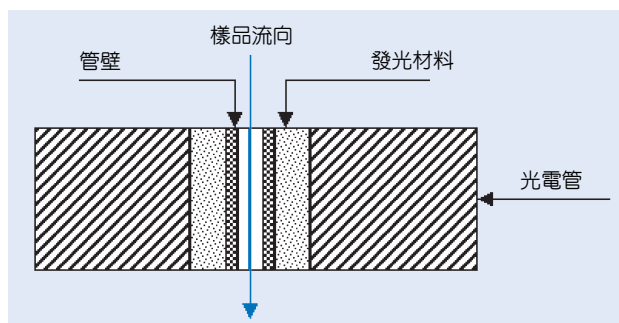


圖 3. 間接式固態閃爍計測元示意圖。

碘化鈉偵測器或 BGO 偵測器為主，一般效果如下：

NaI cell：60 % efficiency for I-125 (35 keV)

BGO for all  $\gamma$ -emitter up to 1MeV：80 % efficiency at 100 keV，30 % at 500 keV

其次討論液態閃爍方式，其原理如同液態閃爍分析儀。樣品在進入輻射偵檢器前即先與液態閃爍液混合，由樣品釋出之輻射衰變能量被閃爍液吸收、發光而被偵測。進行液態閃爍分析時常有化學消光及顏色消光的問題，因而計測效率會因樣品調配方式而變化。

在固定比例沖提模式 (isocratic mode) 中，由於溶劑是以固定比例混合樣品，而混入液態閃爍液之比例亦是固定，其計測效率也是固定，因此不需做效率補償；但在梯度沖提模式 (gradient mode) 中，沖提液隨時間而混合比例在變化，化學消光亦隨之變化，因而計測效率亦隨時在變化；因此，在整個時序中必須先做出一條效率圖 (gradient curve)，以便進行效率補償。由於採用液態閃爍液為發光材料，液態閃爍計測元基本上只是一條鐵氟龍 (Teflon) 管。

固態閃爍計測元與液態閃爍計測元在計測貝他核種如氫及碳-14 時，其背景及敏感度數據參考如下：

		體積 ( $\mu\text{L}$ )	H-3	C-14
背景	Yttrium Glass	150	8 cpm	12 cpm
	Liquid cell	1000	4-5 cpm	5-7 cpm
敏感度	Yttrium Glass	150	500 dpm	40 dpm
	Liquid cell	1000	50 dpm	35 dpm

以上 liquid cell 樣品與閃爍液比率為 1：3。

有關 gradient curve 之建立，首先以固定濃度劑量之放射性同位素混合足夠一完整梯度沖提實驗使用之液態閃爍液，將此混合液體直接取代實驗用之液態閃爍液，以之完成一次梯度沖提實驗 並記錄完整之時序效率圖，以後之實驗則依此圖做效率補償。

## 二、結構示意圖

輻射高性能液相層析儀的結構如圖 4 所示。

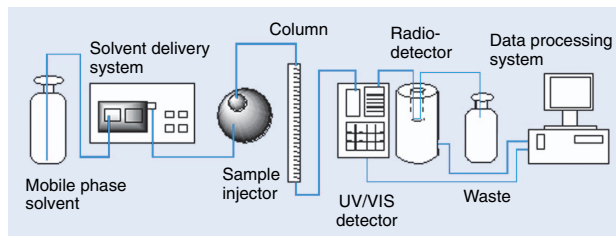


圖 4. 輻射高性能液相層析儀結構示意圖。

## 三、儀器規格與特徵

輻射高性能液相層析儀在使用上比單純的固態或液態閃爍計數器較為困難，由於樣品是流動的，且流速須配合前段的高性能液相層析儀，其最低可測值遠高於其他計測方式，因此流速是第一個要考慮之因素；第二要考慮的是樣品計測體積，體積越大，可測值越低，但圖譜顯示解析度變差；第三在液態閃爍方式上，必須考慮採用何種閃爍液，如果造成膠狀混合時，流速會減慢，時序會有偏差。此外，混合比例的考量亦是非常重要的，增加閃爍液，樣品計測效率增加，但通過計測元的時間變短，結果可能反而更差；第四是效率與背景之要求，當追求更高的效率時，背景值同時亦會增加，必須找出最佳之計測條件，使優美率 (figure of merit,  $E^2/B$ ) 最高；第五是配合實驗，選擇最適合之偵測方式。

## 四、應用與用途

輻射高性能液相層析儀在生命科學研究、放射製藥、放射藥物在體內的代謝產物等的鑑定、分離、純化與分析上極為有用，它極佳的再現性已成為這方面研究不可或缺、最快速且最正確的定量與定性分析儀器。

## 參考文獻

1. G. F. Knoll, *Radiation Detection and measurement*, New York: John Wiley (1979).
2. P. R. Bell, *The Scintillation Method in Beta and Gamma Ray Spectroscopy*, Amsterdam: North-Holland Publ. Co. (1955).
3. W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, New York: Springer-Verlag (1987).
4. *HPLC Radioactivity monitors LB 506 AT and LB 507 A*, Berthold, An EG&G Company (1995).

作者：王信二先生為台灣大學化學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 熱發光劑量計

## Thermoluminescent Dosimeter (TLD)

**關鍵字：**熱發光劑量計、電子陷阱、活化劑、有效原子序、輝光曲線

**Keywords：** thermoluminescent dosimeter, electron trap, activator, effective atomic number, glow curve

### 一、基本原理

熱發光材質是種絕緣體的鹽類結晶 (insulator salts)，自然界約有 3000 種，但大部分不符合劑量計所要求的條件。目前熱發光劑量計所用的材料，都是在實驗室以長晶體方法製造，並在結晶體內添加定量的特殊雜質 (impurities)，具有良好的熱發光特性。雜質可以在晶體的價帶 (valence band) 和傳導帶 (conduction band) 間的禁止帶 (forbidden band，或稱 band gap) 內產生分離的量子態 (quantum state)，這種狀態稱為電子陷阱，因其可以捕獲一個電子 (圖 1)。如此製成的晶體受游離輻

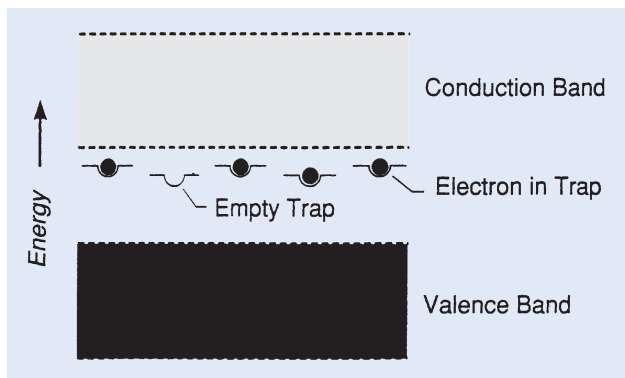


圖 1. 熱發光材質因為摻有雜質，可在禁止帶內產生電子陷阱的構造。

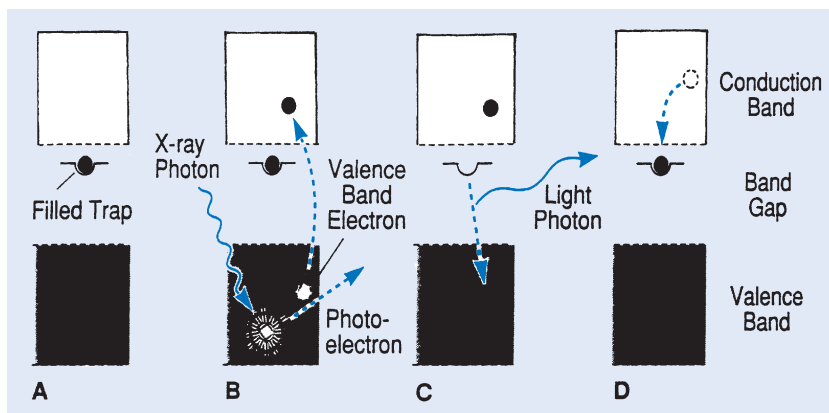


圖 2. 受輻射照射之熱發光劑量計，加熱計讀時放光之過程。

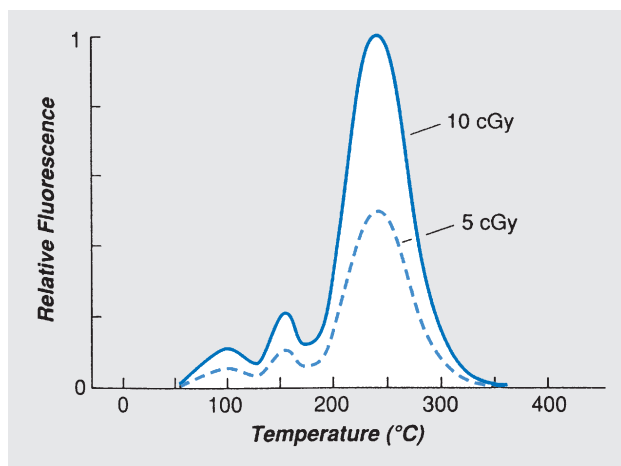


圖 3. 熱發光劑量計加熱計讀後之輝光曲線。接受不同劑量之熱發光劑量計，其輝光曲線亦不同。

射照射後，吸收輻射線的能量使其原子呈激發態 (excited state)，晶體內價帶之電子被激發至傳導帶，同時在價帶內產生一個電洞 (hole)。部分電子在激發時被電子陷阱捕獲而以介穩 (meta-stable) 態暫存於晶體內。計讀加熱時，暫存於介穩態之電子與電洞復合，放出可見光 (圖 2)，總放光量與其接受之劑量成正比，圖 3 所示為放光量與加熱溫度之關係曲線，稱為輝光曲線，將輝光曲線下之面積積分即可求得接受之劑量。

## 二、結構示意圖

熱發光劑量計的結構如圖 1 至圖 5 所示。

## 三、儀器規格與特徵

常用的熱發光劑量計有  $\text{LiF}$  (Mg, Ti)、 $\text{CaF}_2$  (Mn)、 $\text{CaSO}_4$  (Dy) 及  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (Mn) 等，其中  $\text{LiF}$  之有效原子序為 8.1，與軟組織 (有效原子序 7.4) 非常接近，而且  $\text{LiF}$  偵測 100 keV 至 1.3 MeV 的加馬射線之靈敏度都一樣好，不受射線能量高低的影響，所以  $\text{LiF}$  是很理想的測量人體劑量之熱發光劑量計。括弧內之元素是晶體內所添加之活化劑，其目的在產生介穩態能階。不同材料的劑量計有不同的特性，商用成品有粉狀 (可填充於小膠囊內)、棒狀和片狀 (圖 4) 等，可視實際被量測之物體或場所，選擇適當的材料和形狀使用。這些熱發光劑量計偵測 X 光、加馬射線、貝他射線及質子輻射的劑量範圍為  $10^{-2}$  cGy 到  $10^4$  Gy。

受輻射照射後之熱發光劑量計需要被加熱放光，因此計讀的儀器需有電子加熱裝置、光電倍增管 (PMT)、高壓電源供應器、前置放大器 (Pre-Amp)、脈高分析儀 (PHA)、顯示器等零件，其分布流程圖如圖 5 所示。目前已有許多商業化全自動

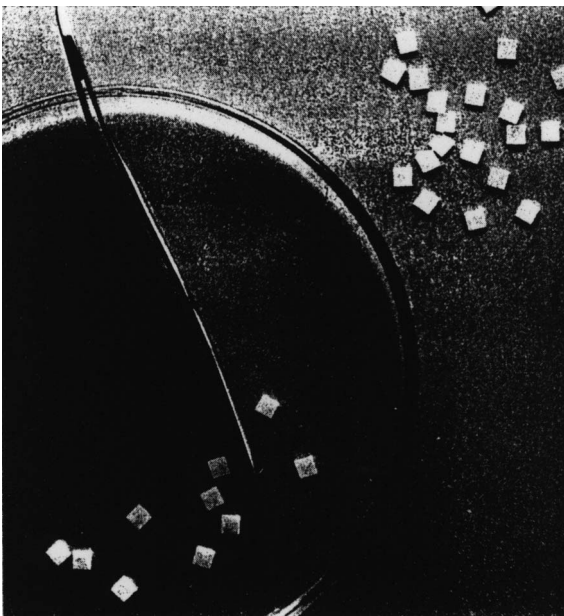


圖 4. 片狀熱發光劑量計，其邊長約只有數毫米 (mm)，使用時以鑷子夾取。

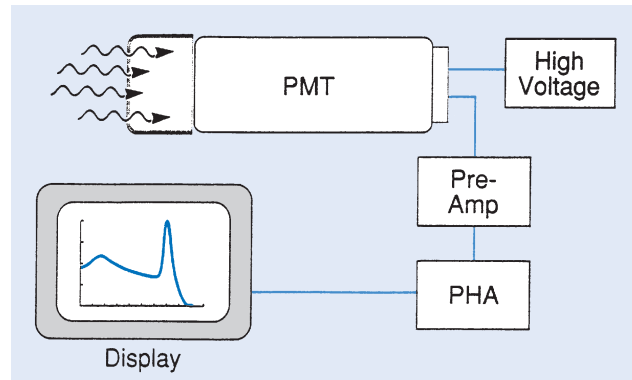


圖 5. 熱發光劑量計加熱計讀之流程圖。

計讀儀系統，且與自動控制的電腦連線，使用非常方便。此外，將被計讀過的  $\text{LiF}$  等熱發光劑量計置於具溫度自動控制的烤爐內，經數小時的長時間加熱回溫，稱為迴火 (annealing)，便可重複使用而節省成本。

## 四、應用與用途

熱發光劑量計對各種游離輻射都有反應，如欲鑑別輻射種類及能量，可加上適當的濾器，藉其對不同的輻射及能量有不同的穿透能力而加以區分。如欲度量熱中子，則藉  $^6\text{LiF}$  和  $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$  中之  $^6\text{Li}$  和  $^{10}\text{B}$  可與熱中子作用而測得。

熱發光劑量計因體積小，可塑性高，計讀誤差小，操作簡易，又有各種材料和形狀可供選擇，因此幾乎已取代傳統的膠片佩章，成為目前最廣泛使用的人員劑量計。

## 參考文獻

1. A. B. Wolbarst, *Physics of Radiology*, Prentice-Hall International, Inc., UK (1993).
2. W. R. Hendee and E. R. Ritenour, *Medical Imaging Physics*, 3rd ed., Mosby-Year Book, Inc., USA (1992).
3. H. E. Johns and J. R. Cunningham, *The Physics of Radiology*, 4th ed., Charles C. Thomas Publisher, USA (1983).
4. C. Herman, *Introduction to Health Physics, International Series of Monographs in Nuclear Energy*, Vol. 105 (1969).

作者：黃正仲先生為美國科羅拉多州立大學放射科學博士，現任國立陽明大學放射醫學科學研究所副教授。

# 袖珍劑量計

## Pocket Dosimeter

**關鍵字：**袖珍劑量筆、游離腔、鍍金石英絲陽極

**Keywords：** pocket dosimeter, ionization chamber, gold-leaf quartz-fiber electrode

### 一、基本原理

袖珍劑量計俗稱袖珍劑量筆，乃根據自由空氣游離腔之原理 (圖 1) 所設計之儀器，劑量筆管壁是由與空氣性質相近 (air equivalent) 之物質所構成，其對於游離輻射之反應，在適當的輻射能量範圍內，會正比於其所吸收之輻射劑量。

### 二、結構示意圖

袖珍劑量計的結構如圖 1 至圖 4 所示。

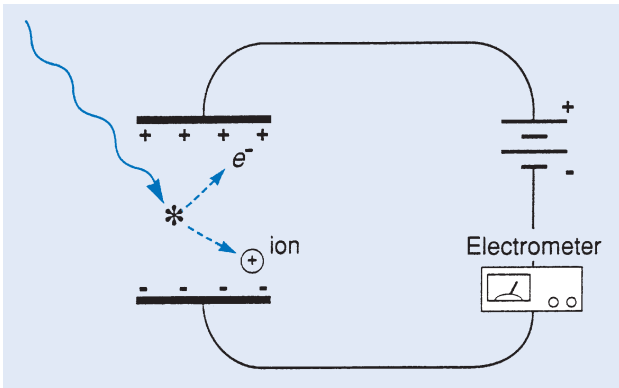


圖 1. 自由空氣游離腔偵測游離輻射之原理。

### 三、儀器規格與特徵

袖珍劑量計依其設計方式之差異，又可分兩型。第一型為電容器型 (condenser-type, 圖 2)，此型劑量筆又稱間接計讀型 (indirect-reading type)，

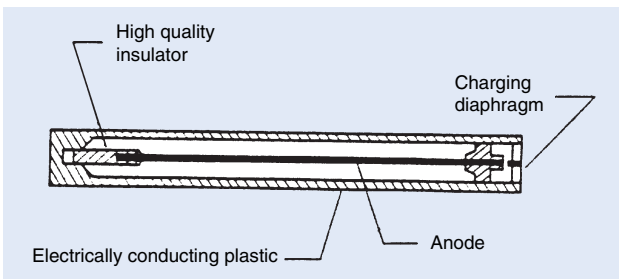


圖 2. 電容器型間接計讀式袖珍劑量筆結構圖。

乃因其被照射後，需要另一輔助儀器，靜電伏特計 (electrostatic voltmeter) 又稱為充電—計讀儀 (charger-reader)，來測其照射前後電壓之變化，並代入公式  $C \times \Delta V = \Delta Q$  而測得劑量。

此型劑量筆之游離腔體積約為  $2 \text{ cm}^3$ ，照射前需先以充電—計讀儀充電，方可使用。茲舉例說明其劑量之計算如下：

條件：電容 =  $5 \mu\text{F}$

照射前電壓 = 180 V

照射後電壓 = 160 V

暴露時間 = 1/2 hr

劑量計算：

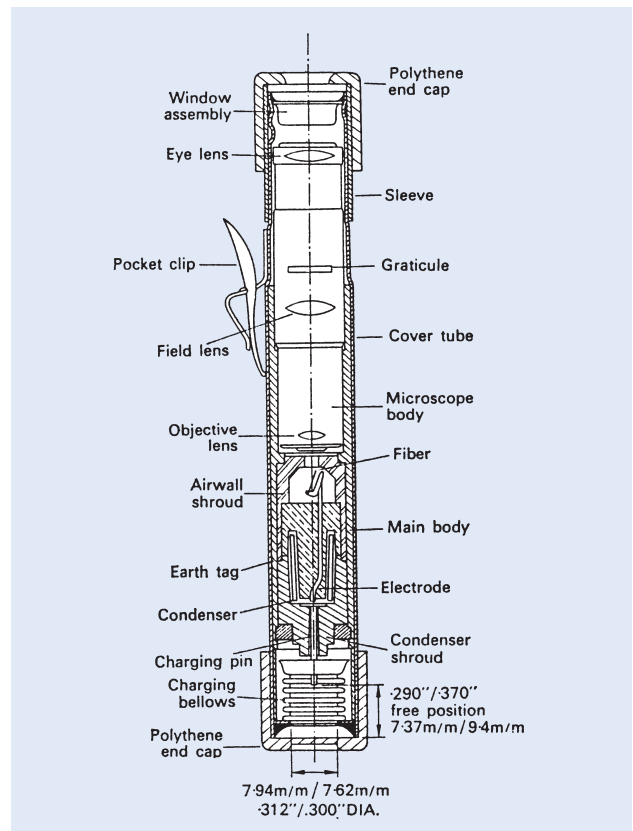


圖 3. 標準型直接計讀式袖珍劑量筆結構圖。

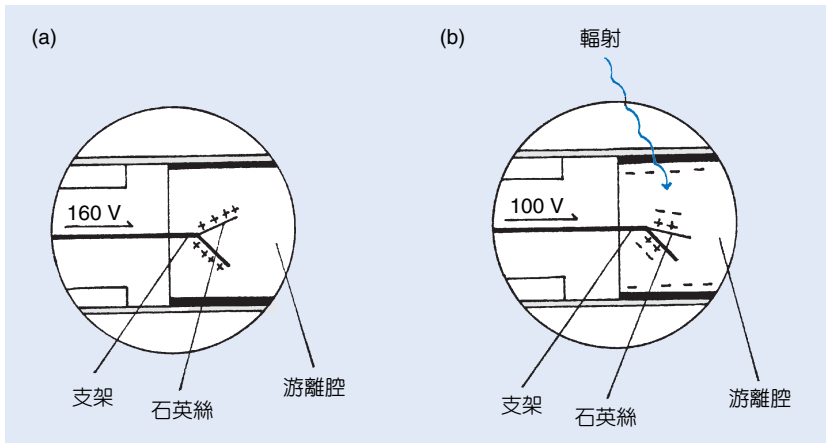


圖 4. 直接計讀式袖珍劑量筆內鍍金石英絲陽極張開 (a) 與閉合 (b) 的情形。

$$5 \times 10^{12} \text{ F} \times (180 - 160) \text{ V} = 1 \times 10^{10} \text{ coulombs (C)}$$

$$\frac{1 \times 10^{10} \text{ C} \times 3 \times 10^9 \text{ sC/C}}{2 \text{ cm}^3} = 0.150 \text{ sC/cm}^3$$

$$\frac{0.150 \text{ sC/cm}^3}{(1 \text{ sC/cm}^3)/\text{R}} = 0.150 \text{ R} = 150 \text{ mR}$$

$$\frac{150 \text{ mR}}{0.5 \text{ hr}} = 300 \text{ mR/hr}$$

以電容器型袖珍劑量筆度量 0.05–2 MeV 之 X 光或加馬射線，若劑量在 200 mR 以下時，其準確度約為 ± 15 %。若欲度量之射線能量超過 2 MeV 以上時，則以製造商提供之修正因素計算之。第一型袖珍劑量筆除可以度量 1 MeV 以上之貝他射線外，若在游離腔壁鍍上硼元素，則也可以度量熱中子。

第二型的袖珍劑量筆又稱標準型，是專為度量 X 光與加馬射線而設計的 (圖 3)。此型劑量筆通常以標準射源鐳錠或鈷-60 校正。標準型劑量筆也要以電容器充電，使其鍍金石英絲陽極因帶正電互相排斥，而張開至劑量刻度表上「零」的位置，稱為「歸零」。使用時，游離輻射穿過游離腔，腔內空氣

因被游離而產生離子對，其中之負電荷受電場之作用被陽極吸引，中和陽極上之正電荷，而使石英絲閉合靠攏。使用後由劑量筆內之透鏡裝置及內部指針所指刻度，可以直接顯示所受總劑量 (圖 4)，因此第二型袖珍劑量筆也被稱為直接計讀型 (direct-reading type)。

#### 四、應用與用途

袖珍劑量筆因類似鋼筆，短小輕巧，可夾於胸前衣服或口袋內，特別適用於訪客及短期或特殊工作人員進入輻射管制區時配戴使用。

#### 參考文獻

1. A. B. Wolbarst, *Physics of Radiology*, Prentice-Hall International, Inc., UK (1993).
2. H. E. Johns and J. R. Cunningham, *The Physics of Radiology*, 4th ed., Charles C. Thomas Publisher, USA (1983).
3. C. Herman, *Introduction to Health Physics, International Series of Monographs in Nuclear Energy*, Vol. 105 (1969).

作者：黃正仲先生為美國科羅拉多州立大學放射科學博士，現任國立陽明大學放射醫學科學研究所副教授。

# 化學劑量計

## Chemical Dosimeter

**關鍵字：**化學劑量計、輻射劑量計

**Keywords：**chemical dosimeter, radiation dosimeter

### 一、基本原理

以量測化學物在游離輻射後之數量或濃度變化，並據而直接或間接的計算出游離輻射的劑量，即為化學劑量計。

當物質受到輻射照射時，在物質內沿著輻射線穿過的路徑，會產生一些激動或游離現象。這些被激動或游離的物質在一連串的變化中，可以產生化性活潑的游離基，如被照射的水溶液會生成  $\text{H}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 、 $e_{\text{aq}}^-$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\cdots$ 等，這些物質再與其周圍之物質作用，便產生了一些化學變化，此化學變化與吸收劑量若可成一相關性，即可藉由此化學變化量直接或間接的計算出物質吸收的輻射劑量，此即為化學劑量計發展的基本原理。

### 二、儀器規格與特徵

化學劑量計的種類相當多，有的是固態的，有的是液態的，也有的是氣態的，較有名的固態化學劑量計如：丙胺酸 (alanine) 劑量計、radiochromic 劑量計及 red perspex 劑量計，而較有名的液態化學劑量計則有硫酸亞鐵劑量計 (fricke dosimeter) 和硫酸三、四價鈾劑量計 (ceric-cerous sulfate dosimeter)，至於氣態的化學劑量計因很少使用，在此不特別介紹。

#### 1. 丙胺酸劑量計 (alanine dosimeter)

丙胺酸劑量計為目前量測劑量範圍涵蓋最廣的化學劑量計，對劑量的可量測範圍為 1 Gy 至 100 kGy；目前因國際原子能總署 (IAEA) 和美國國家標準暨技術局 (NIST) 使用此劑量計來校正全世界各委託單位的劑量計，此劑量計已成為全世界最重要的高劑量劑量計。

丙胺酸 (alanine) 為一種氨基酸，當輻射能被丙胺酸劑量計吸收後即產生自由基，此自由基能量被

固定在不同能階未配對電子間，且可以用電子順磁共振 (electron paramagnetic resonance, EPR) 效應偵測到；此種被固定於電子型態的能量相當穩定，可以保持很長的時間，對環境的穩定性相當好。丙胺酸劑量計對劑量率的接受性很大，適用範圍可大到  $10^2$  Gy/s，甚至對瞬間照射適用範圍最高可到  $10^8$  Gy/s；丙胺酸劑量計對能量適用範圍也很廣，如對光子能量可以從 0.1 MeV 至 50 MeV，對電子束能量可以從 0.3 MeV 至 50 MeV。丙胺酸劑量計之化學機制如圖 1。

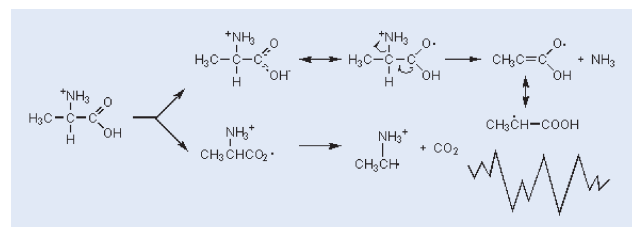


圖 1. 丙胺酸劑量計之化學機制。

#### 2. Radiochromic 劑量計

Radiochromic 劑量計在美國為使用最多的一種高輻射劑量計。一般照射廠皆以此一膠片劑量計做為例行劑量計，radiochromic 劑量計在市面上主要以美商遠西 (Far West) 公司所提供的 FWT-60 膠片劑量計為主，遠西同時提供廉價而單一用途的分光光度計做為量測儀器，同時也提供劑量校正服務，故至今已成為美國照射廠例行照射中最有公信力的劑量計之一。

Radiochromic 劑量計相當穩定，照射前同一批次的產品每半年至一年校正一次即可，照射完後一小時即可達到穩定態可立刻進行量測；radiochromic 劑量計對劑量的可量測範圍從  $5 \times 10^2$  Gy 至  $3 \times 10^5$  Gy，可量測劑量率範圍則從 0.5 Gy/s 至  $10^{13}$  Gy/s，可量測能量範圍包括有鈷-60、銻-137

及 10 MeV 電子束等各種射源，對溫度相當穩定且組成分子為原子量很小的元素 (C、H、O、N)，近於水分子，量測方法也很簡單。

Radiochromic 劑量計的原理相當簡單，主要是利用尼龍片上的氨基三苯基甲烷 (aminotriphenyl methane) 染料在吸收輻射能後分子內產生電子重組，並形成穩定而有顏色的穩定物的現象來間接的量測劑量，其實際反應如圖 2。

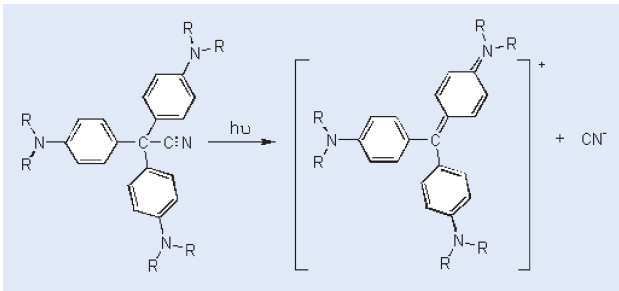


圖 2. Radiochromic 劑量計之反應機制。

Radiochromic 劑量計對紫外線相當敏感，一定要有密閉遮光包裝，量測室之照明設備要有過濾紫外線裝置，一般在其密封包裝內保持一定溼度以減低環境因素之干擾。

### 3. Red perspex 劑量計

Red perspex 劑量計為英國 Harwell 實驗室所發展出來最有名的商用化學膠片劑量計，此劑量計為世界最早的一種照射廠例行劑量計，目前在世界上尤其是在歐洲也是使用最廣泛的劑量計之一。Red perspex 劑量計主要是一片 30 × 11 mm 長方形，3.0 ± 0.55 mm 厚度的紅色透明壓克力膠片，當接受 1 Gy 以上劑量照射時，紅色會加深，雖然最高吸收波長點在 615 nm，在量測劑量時則以 640 nm 波長的吸光度為準。

Red perspex 劑量計的特性相當優異，它的主要特點如下：

- ① 可量測劑量範圍和一般商業照射廠的最大服務項目—輻射滅菌相當，以 red perspex 4034 劑量計而言，可量測範圍在 5 至 50 kGy 之間。
- ② 適用的劑量率範圍相當廣，約為 2 至 26 kGy/s，劑量率的影響也很小，大約在 ± 2% 或 ± 3% 之間。

- ③ 同一批次生產的劑量計在同一溫度同一劑量下，差異值約在 ± 2% 之內。
- ④ 對溫度變化的忍受度也很大，在 20 kGy 下，在 -78 °C 至 +100 °C 範圍內，溫度效應約為 -0.13 % / °C。
- ⑤ 照射後劑量計的穩定度也很大，Harwell 實驗室曾將經照射 25、30 至 35 kGy 的劑量計置放於 25 °C 環境中 27 天，結果讀數只降低了 2%。
- ⑥ 未照射的劑量計也很穩定，若將未照射的 red perspex 劑量計封入密封多元酯／鋁／多元酯／聚乙烯的多層鋁箔包內，五年後品質還是很一致。

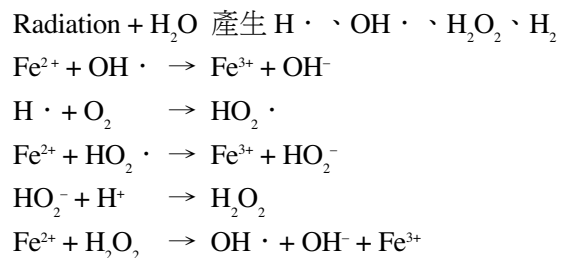
Harwell 實驗室對每一批次的 red perspex 劑量計，皆經過英國標準實驗室的校正，故每一批 red perspex 劑量計皆有英國標準實驗室國家標準的確認，在使用上品質獲得了確保。

### 4. 硫酸亞鐵劑量計 (fricke dosimeter)

硫酸亞鐵劑量計為化學劑量計中最常被使用的液態化學劑量計，它的正確性、再現性及線性反應被公認為最好的一種，硫酸亞鐵劑量計被廣泛的使用於一般實驗室中，且被認為係吸收劑量計的標準，它具有如下之優點：

- ① 使用一般的 UV-Visible 分光光度儀即可。
- ② 適用劑量率可大到 10<sup>6</sup> Gy/s。
- ③ 因為硫酸亞鐵劑量計為水溶液，在換算成實際之照射劑量時比一般固態劑量計較不易受輻射品質 (radiation quality) 的影響。
- ④ 硫酸亞鐵劑量計與水的線性衰減係數 (linear attenuation coefficient) 幾乎一樣，故對輻射場 (radiation field) 較不易形成顯著的干擾。

硫酸亞鐵劑量計反應的主要機制為放射線可將二價鐵氧化成三價鐵，反應如下：



硫酸亞鐵劑量計的缺點也不少，如可量測照射範圍只有 20 至 400 Gy，對溶液中之雜質相當敏感，所幸加入少量的 NaCl 即可克服，硫酸亞鐵劑量計對溫度相當穩定，一般照射溫度效應為  $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ ，對溼度沒有影響，對一般光照也很穩定，封裝安培瓶則以密閉乾淨帶有棕色者為要，配好瓶裝之硫酸亞鐵劑量計應置放於陰暗陰涼處，且置放時間不可超過半年。

### 5. 硫酸三、四價鈾劑量計 (ceric-cerous sulfate dosimeter)

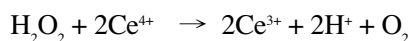
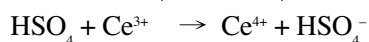
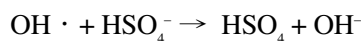
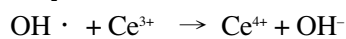
硫酸三、四價鈾劑量計為硫酸四價鈾劑量計的改良型，且幾乎取代了硫酸四價鈾劑量計，1962 年時，國際輻射單位與量測委員會 (ICRU) 認為此劑量計為僅次於硫酸亞鐵劑量計之最有用及最穩定的劑量計。

硫酸三、四價鈾劑量計可量測的劑量範圍為  $10^3$  至  $10^5$  Gy，其特色為：

- ① 計讀相當簡單，儀具也很方便。
- ② 對雜質的干擾忍受度遠高於硫酸四價鈾劑量計。
- ③ 反應機制非常清楚。
- ④ 已有商業產品。

硫酸三、四價鈾劑量計主要是利用計算輻射將四價鈾離子還原成三價鈾離子之量間接的來量測劑量，其反應機制如下：

Radiation + H<sub>2</sub>O 產生 H·、OH·、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>



硫酸三、四價鈾劑量計優於硫酸四價鈾劑量計的原因在於前者的三價鈾離子有去除劑量計溶液內雜質的能力，例如若劑量計內沒有三價鈾離子，20 ppm 的蟻酸即可將 G (Ce<sup>3+</sup>) 值從 2.50 提升至 3.55，若劑量計溶液內含有 0.08 molar 三價鈾離子，即使 1000 ppm 的蟻酸也只能將劑量計內 G (Ce<sup>3+</sup>) 值從 2.50 提升至 2.54。

硫酸三、四價鈾劑量計之量測方法有二種，一種為直接用 UV-Visible 分光光度計直接來量測鈾離子變化量，另一種方法為量測劑量計溶液照射前後的電位差。目前加拿大諾迪安 (Nordian) 公司已有利用量測電位差的產品。

### 三、應用與用途

化學劑量計的種類相當多，上面僅提出一些較常用的化學劑量計作為參考。由於化學劑量計可量測劑量範圍相當大，適用的領域自然也廣，如醫療器材滅菌照射、昆蟲／害蟲控制照射、食物保存照射、聚合物熟化照射及醫學治療照射等。一個好的劑量計將可確保照射處理之品質，在輻射應用及研發方面，一定要有一個可靠的劑量計輔助才能完成照射目的，而化學劑量計不論是自配或外購，都是一個容易取得又可靠的劑量計，故很值得推廣。

### 參考文獻

1. 陳家杰, 連清宏, 核研季刊, **12**, 69 (1996).
2. R. W. Matthews, *Int. J. Appl. Radia. Isotopes*, **22**, 199 (1971).
3. R. W. Matthews, *Int. J. Appl. Radia. Isotopes*, **23**, 179 (1972).
4. ASTM Standard E1205 (1993).
5. W. L. McLaughlin, A.W.Boyd, K.H.Mcdonald and A.Miller, *Dosimetry for Radiation Procession*, Great Britain: Tayllor & Francis (1989).

作者：陳家杰先生現任原子能委員會核能研究所副研究員。

王信二先生為台灣大學化學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 電子加速器 Cyclotron

**關鍵字：**迴旋加速器、正電子放射電腦斷層掃描儀、放射性核種

**Keywords：** cyclotron, positron emission tomography, radionuclide

## 一、基本原理

依據待加速粒子的路徑區分，帶電粒子的加速器可以分為兩類：直線型及圓型。其中圓型的電子加速器又稱為迴旋加速器 (cyclotron)，是美國物理學家 E. O. Lawrence 和 Livingston 於 1930 年發明的，他們並於 1932 年成功地將質子加速至 1 MeV 的能量。根據帶電粒子的電性區分，迴旋加速器又可以分成兩類：正離子與負離子型裝置。迴旋加速器如圖 1 所示，可以分為四個主要部份：離子源、磁鐵、射頻 (radiofrequency, RF) 系統和引出 (extraction) 系統。

### 1. 離子源 (ion source)

離子源顧名思義即是用來產生待加速離子的來源。離子源位於兩個 D 形物之中心 (圖 1 中之 S)。將  $H_2$  或  $D_2$  氣體注入介於二個陰極間的容器中(負的高電壓約 1 至 3 kV)。電子從陰極發射出來由於受到磁鐵所產生的磁場之限制以致在容器中形成電漿 (plasma)。氫原子可能被此電漿游離而失去一個電子形成  $H^+$ ，也可能獲得一個電子而變成  $H^-$ 。這些離子由於受到 D 形物電極的靜電吸引而從一射束出口狹縫 (beam exit slit) 跑出來。D 形物因形狀而得名，是以銅製作而成的二塊電極 D1 及 D2。D1 與 D2 彼此絕緣，有一個交流電源連接在 D1 及 D2 上。該交流電源的頻率是介於 10–26 MHz 的射頻範圍。

### 2. 磁鐵 (magnet)

磁鐵可以是一般的電磁鐵 (electromagnet) 或是超導磁鐵。在磁極面 (magnet pole faces) 的中心處之磁場可達 10 仟至 20 仟高斯 (1–2 T)。當離子進入 D 形物內它就不受到電場的作用，這是因為導體內部無電場之故。但是離子仍會受到磁場的影響

而繞著圓形軌道作運動 (當然正、負離子的運動方向是相反的)。當交流電源的角頻率被調整到等於離子在磁場內運動的迴旋角頻率時,共振情形便會產生。此時當離子在 D 形物內運動半週後，D 形物間的電位差的極性也剛好會顛倒過來。在邊緣處離子會受到此 D 形物的斥力及另一個 D 形物的吸力，故當離子通過 D 形物間的空隙時會受到加速而增加能量，以致離子進入另一個 D 形物作半圓運動的軌道半徑會增大。

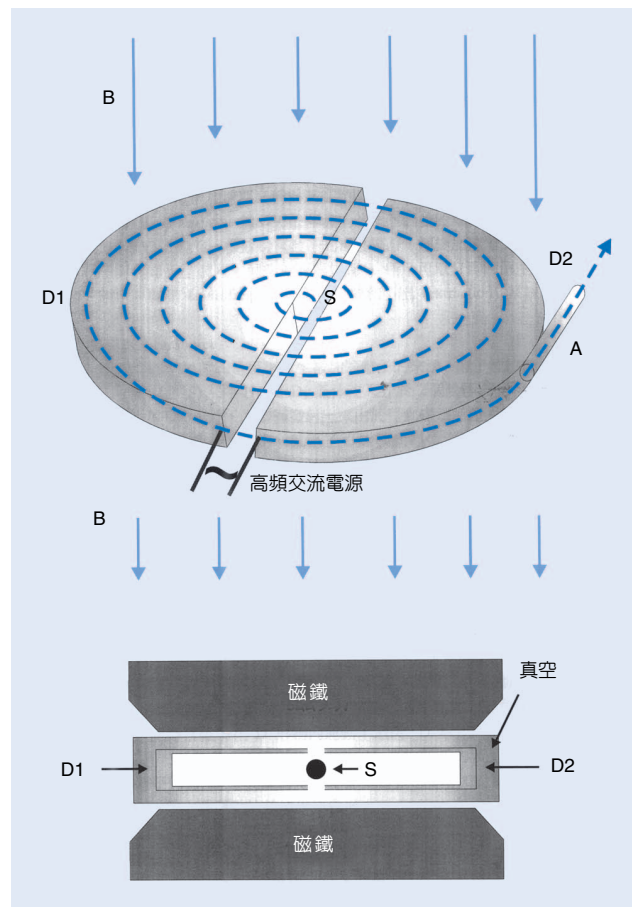


圖 1. 迴旋加速器的示意圖。上圖是俯視圖，下圖是側視圖。

### 3. 射頻系統 (radio-frequency system)

操作在射頻範圍的交流電源是用來將離子引出離子源並加速該離子直到其運動的軌道半徑大約等於 D 形物的半徑。在這過程中離子每轉一圈所獲得的能量是和交流電源的最大加速電壓成正比。假設離子每繞一圈的能量增益是 100 keV，而該離子的最大能量是 17 MeV，那麼該離子就須運行 170 圈。

### 4. 引出系統 (extraction system)

前面提到加速粒子可分為帶正電及負電的離子。這兩者受到同一磁場的影響時，其運動方向正好相反。引出系統也隨著這兩類離子而不同。在正離子迴旋加速器中，有個操作在 -30 至 -50 kV 的靜電變流裝置 (electrostatic deflector) 如圖 1 中標示 A 所示。該裝置是用來吸引最外層軌道的離子。由於在 D 形物的邊緣磁場突然減小，當離子穿過此處便會沿著切線方向自一開口射出，以便轟擊位在靶區的原子核。

至於負離子型的迴旋加速器中則有一薄碳片 (carbon foil) 位於圓形軌道的末段以攔截負離子束，並奪去負離子兩個電子。此時該離子之電性由負轉為正 ( $H^- \rightarrow H^+$ )，並且在相同磁場的影響下，隨即改變運動方向而往反方向衝向靶區。

迴旋加速器除了上述的四個主要部份外，還有其他幾個部份略述如下。整個的 D 形物、離子源和引出系統是處在超高真空的環境中。其中正離子型須在  $10^{-9}$  torr 的環境中運轉，而負離子型則須有  $10^{-10}$  torr 的環境。如此超高真空的環境是為避免離子束在 D 型物中很快就因碰撞到其他粒子而散射掉。目前新型迴旋加速器的運轉皆已經交由控制系統的電腦來統合各系統運作及操作介面，操作人員只須輸入必要的參數即可。另外有的迴旋加速器配備有診斷系統 (diagnostic system) 可用來監測加速中之離子束電流及其損耗。

## 二、結構示意圖

圖 1 所示的是屬於正離子型迴旋加速器。圖中的 S 是離子源。從離子源可產生質子或氘子等離子。D1 與 D2 是 D 型物，其間被供以高頻率振盪的高電壓以交替加速離子。離子由於受到磁鐵之磁

場 B 的影響而作圓周運動，最後由引出系統 A 射出而衝向靶區。

## 三、儀器規格與特徵

前面已提過迴旋加速器可以分為正、負離子型兩類。不管是哪一類，根據相對論，當質點的速度增大後其運動中的慣性質量也增加，這時如果要維持離子的迴旋頻率固定不變就必須讓磁場強度也隨著軌道半徑增大而增加。目前有的加速器的磁鐵採用此法作修正的稱為方位變化場 (azimuthally varying field) 或扇形聚焦式 (sector focused) 迴旋加速器。還有另一種磁鐵，其磁極面並非平的而是有高 (hills) 有低 (valleys)。其中在高的部分磁場增加，在低的部分磁場減小。這樣做是為要改善射束的聚焦情形，以避免加速器內部材質被活化 (activation)，進而可以減少工作人員的輻射曝露與降低屏蔽需求。

傳統的 D 型物是兩個半圓形，目前也有 D 型物的方位角 (azimuthal angle) 是  $90^\circ$  或  $45^\circ$ ，甚至最新的機器具有四塊「D 型物」。這種比起只有兩塊 D 型物的好處是在每一軌道的運行都可提供原來兩倍的加速脈衝數以增加效率，進而可縮小加速器的尺寸和減少能源的消耗。

負離子型的加速器和正離子型比起來具有以下幾項優點：① 引出系統比較簡單而且效率也比較好，② 因為內部材質較少被活化所以放射活性比較低，③ 射束均勻性 (beam uniformity) 較佳且射束電流較高，④ 因採用射束攔截式的引出系統故可同時瞄準多個靶區進行核反應。

一般醫用的小型迴旋加速器其交流電源的振盪頻率約在 10—26 MHz 間，磁極直徑約 50—80 公分，故又稱為「嬰兒」加速器 ("baby" cyclotron)，可以安裝在  $6\text{ m} \times 7\text{ m}$  的房間內。其所產生的磁場強度約 1—2 T，所能加速的離子最大動能是介於 3—50 MeV 間。至於引出的最大射束電流在負離子型加速器中可達 500 微安培 ( $\mu\text{A}$ )。

## 四、應用與用途

迴旋加速器可以說是所有加速器中最廣泛地被用來生產人工放射性同位素的工具，尤其是臨床核

醫用之短半衰期正電子放射同位素，如  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{18}\text{F}$ 。正電子放射電腦斷層掃描儀 (positron emission tomography, PET) 是進行心、腦代謝造影非常重要的儀器。由於 PET 作這些代謝與功能檢查所需要的正電子放射同位素大多屬短半衰期核種，如半衰期較長的  $^{18}\text{F}$  也不過是 110 分鐘而  $^{15}\text{O}$  之半衰期則只有 2 分鐘，故須配合迴旋加速在場使用。近來隨著 PET 的發展逐漸成熟與受到重視，因而迴旋加速器的重要性也就日見增加了。

#### 參考文獻

1. M. N. Croll, *Nuclear Medicine*, St. Louis: Mosby-Year Book, Inc., Vol. 1, Chap. 1 (1996).
2. R. D. Hichwa, *Nuclear Medicine*, St. Louis: Mosby-Year Book, Inc., Vol. 1, Chap. 23 (1996).
3. L. F. Mausner, *Nuclear Medicine*, St. Louis: Mosby-Year Book, Inc., Vol. 1, Chap. 28 (1996).
4. T. Nozaki and M. Hazue, *Principles of Nuclear Medicine*, 2nd ed., Philadelphia: W. B. Saunders Co., Chap. 10, Sec. 2 (1995).
5. J. C. Harbert, *Nuclear Medicine: Diagnosis and Therapy*, New York: Thieme Medical Publishers, Inc., Chap. 9 (1996).

---

作者：陳志成先生為美國亞利桑那大學光學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術系副教授。

# 加馬照相儀

## Gamma Camera

**關鍵字：**加馬照相儀、閃爍晶體、光電倍增管、準直儀

**Keywords：** gamma camera, scintillation crystal, photomultiplier tube, collimator

### 一、基本原理

加馬照相儀或攝影儀也可以稱為閃爍攝影儀 (scintillation camera)，它是核子醫學部門使用得最多的造影儀器。它又可以稱為 Anger 氏攝影機 (Anger camera) 因為它是由 Hal O. Anger 在 1950 年代晚期所發明的。核醫造影即是用加馬攝影儀去偵測人體內經由注射、口服或吸入之放射性核種 (radionuclide) 所放射出的  $\gamma$  射線的空間分佈和時間關係 (spatial and temporal distribution pattern)，以觀察人體構造及其功能之非侵害性診斷方法。加馬攝影儀可以看成是一種二階段的轉換器 (transducer)：它首先將入射之  $\gamma$  射線轉換成為可見光，接著再轉換可見光使成為電脈衝。在可以預見的未來，Anger 氏攝影機仍將是核醫臨床應用最重要的診斷儀器之一。

由於單一大面積碘化鈉 (鉍) 閃爍晶體 (NaI (Tl) scintillation crystal) 的技術發展，以致促成了 Anger 氏閃爍攝影儀的發明，並進而對放射性同位素造影產生了莫大的影響。Anger 氏攝影機可以算是一種位置靈敏偵測器 (position-sensitive detector)。其裝置主要包括閃爍晶體 (scintillation crystal) 和光電倍增管 (photomultiplier tubes)，詳細之裝置圖請見圖 1。由光電倍增管所得到的輸出訊號可以用來估計入射  $\gamma$  光子和晶體起交互作用之位置。這項特點是和直線型掃描器 (rectilinear scanner) 大為不同，因為直線型掃描器之入射  $\gamma$  光子之位置是由和被攝物體面對面的晶體之實際位置決定的。

在 Anger 氏攝影機裡，每一顆入射到 NaI (Tl) 的  $\gamma$  光子會和閃爍晶體起交互作用並且產生一堆可見光子。這些可見光子有一部分會被光電倍增管偵測到並轉換成為電訊號。由所有光電倍增管所得到的訊號是用來比較和結合，以估計  $\gamma$  光子在 NaI (Tl) 中之交互作用位置以及  $\gamma$  光子之能量。

總括而言，閃爍攝影儀的工作原理可用下列幾個步驟來描述：

- ①  $\gamma$  光子由人體內四面八方地輻射出來，部分光子會碰到準直儀 (collimator)。
- ② 通過準直儀之  $\gamma$  射線打在 NaI (Tl) 晶體之某個位置  $(x, y)$ ，產生交互作用而發出可見光 (閃爍光)。
- ③ 閃爍光有部分光子會運動到和 NaI (Tl) 晶體相連接之光電倍增管陣列之光陰極 (photocathodes) 上。
- ④ 各光陰極所收集到的閃爍光子數量是由該光電管和閃爍發光位置之距離所決定。
- ⑤ 這些光子打在光陰極上有一部分將可敲出光電子 (photoelectrons)，這些光電子再經由光電管之電子放大過程 (electron-multiplication process) 而後到達陽極 (anode)。
- ⑥ 陽極訊號再經轉換成電壓脈衝輸出，因此每一光電管之輸出訊號高低是正比於其光陰極所接收到的閃爍光子數目。
- ⑦ 將每一光電管的輸出電壓脈衝輸入數位位置電路 (digital positioning circuitry)，以估計每一閃爍光發生在晶體中的位置即  $(x, y)$  座標。
- ⑧ 將所有光電管的輸出加在一起而得到一個總和的訊號，其高度是正比於該閃爍事件所轉移給晶體的總能量，這個訊號一般稱為 Z 訊號。
- ⑨ 使用波高分析器 (pulse height analyzer) 去分析 Z 訊號，只有當 Z 訊號所對應的能量大小是落在預先設定的能窗 (energy window)，該訊號才會被紀錄下來，這步驟是為了減少在人體中產生的康普吞散射 (Compton scattering) 之光子所形成的事件 (event) 也被紀錄到。
- ⑩ 將所有通過波高分析器的事件所對應的  $(x, y)$  座標存在電腦記憶體中，就可以得到一張投影影像。

## 二、結構示意圖

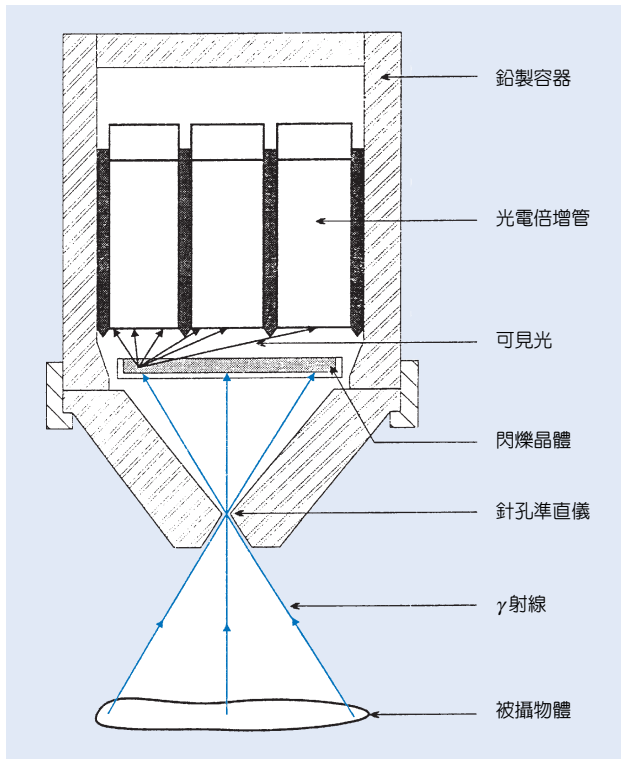


圖 1. Anger 氏閃爍攝影儀的裝置圖<sup>(2)</sup>。

如圖 1 所示，Anger 氏攝影機一般是搭配針孔準直儀 (pinhole aperture) 或平行式準直儀 (parallel collimator) 使用。攝影機之偵測器部分是使用單一大面積的 NaI (Tl) 閃爍晶體，直徑大小約 30–60 公分。目前的攝影機大多是在 NaI (Tl) 和光電管陣列間夾進一層透明導光片 (light guide) 以增進光子傳送到各光陰極的機率。導光片的另一邊一般是接上 37 個或更多的光電管陣列，且排列多為六角形。通常晶體和光電管部分是放在不透光的鉛製容器中，以避免溼氣、光線和碰撞，原因是晶體和光電管都很容易破裂。

## 三、儀器規格與特徵

一般加馬攝影儀適於偵測的  $\gamma$  射線能量範圍是 50 keV–400 keV。固有空間解析度 (intrinsic spatial resolution) 是介於 3 mm FWHM 至 5 mm FWHM 間，而固有能量解析度大約是 10 %。攝影儀的計數率 (count rate) 在 20 % 能窗之常規操作下可以達到 100,000 cps，在高速模式操作下則最快以可達到 300,000 cps。加馬攝影儀的優點是它可以作為生理功能及代謝方面的診斷儀器，缺點是它的空間解析度目前還不夠好，而且使用時必須搭配不同型式的準直儀，故偵測效率不高，以至於攝影儀的系統靈敏度 (sensitivity) 很低。另外一個缺點是能量解析度也不夠好，故造影時會接收到部分經過人體散射之  $\gamma$  光子，以致影響影像品質。

## 四、應用與用途

加馬攝影儀在平面核醫影像的應用包括：全身骨骼掃描、甲狀腺掃描、心臟掃描、腦掃描、肺掃描、肝及膽道掃描、腎掃描、出血掃描及食道穿流檢查 (oesophageal transit time study)。其中心臟掃描可以分為以首次穿流 (first-pass) 方法和以 MUGA (multi-gated) 方法做的心室功能檢查。

## 參考文獻

1. H. O. Anger, *Rev. Sci. Instrum.*, 29, 27 (1958).
2. J. C. Chen, *Ph.D. Dissertation*, Univ. of Arizona, Tucson, Arizona (1995).
3. M. G. Strauss and I. S. Sherman, *Phys. Med. Biol.*, 24 (4), 702 (1979).
4. Z. -H. Cho, J. P. Jones and M. Singh, *Foundation of Medical Imaging*, New York: Wiley (1993).
5. N. P. Alazraki and F. S. Mishkin, *Fundamentals of Nuclear Medicine*, 2nd ed., New York: The Society of Nuclear Medicine, Inc. (1991).

作者：陳志成先生為美國亞利桑那大學光學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術系副教授。

# 電腦斷層攝影模擬儀

## Computerized Tomographic Simulator

**關鍵字：**電腦斷層攝影、攝影模擬、放射治療、治療計畫

**Keywords：** computer tomographic scan, image simulation, radiation therapy, treatment planning

### 一、基本原理

電腦斷層攝影模擬儀與一般之電腦斷層攝影儀 (computerized tomography) 在基本原理上幾乎是一樣的，是以 X 光經由圓周 (或扇形，fan；螺旋，spiral) 的方式對病人做斷層式的掃描，再經由電腦軟體以影像重組 (image reconstruction) 的方式，將體內之不同組織、器官的電子密度以影像灰白、明暗的方式表示出來。其應用上除了供臨床診斷外，也提供了放射治療時所需要病人的一些重要資料。首先吾人必須明白，傳統之攝影模擬儀，是以一透視用 X 光機配合影像倍增管 (image intensifier)，再增置遠隔放射治療時所需之準直儀 (collimator) 於 X 光管上而成，並利用房間上、下二側的雷射束來達到病灶的定位 (localization) 處理。

傳統攝影模擬儀於定位攝影時因非完全斷層取像，加上影像倍增管之解析度有限，使得所攝影之病人影像輪廓往往無法滿足放射治療時的臨床需求。而電腦斷層攝影模擬儀則可以利用其細小之光束限制器，提高其影像解析度，又其俱備非常細薄之斷層切片能力，對於病灶之診斷較為準確。電腦斷層數位式影像也可以經由影像重組的方式，以三度空間立體方式來表現，於診斷與確定腫瘤位置、大小上均有非常大的幫助。

電腦斷層攝影模擬儀除了上述之功能外，其軟體之內容除了一般性攝影外，仍必須間具有電腦模擬計畫 (treatment planning) 的功能。尤其在定位方向、角度必須與放射治療之直線加速器上定義一致外，還必須能準確告知腫瘤位置、大小等數據供臨床醫師與物理師做參考。

### 二、結構示意圖

電腦斷層攝影模擬儀之結構示意圖如圖 1 所示，圖 2 則為其實體照片。

### 三、儀器規格與特徵

電腦斷層攝影模擬儀在規格上，其基本配備與電腦斷層攝影儀十分類似。但在考慮模擬攝影時則有下列特點必須加以注意：

1. 斷層攝影模擬儀之 gantry aperture 必須儘可能寬大，使得在以多角度 (oblique scan) 攝影時能有足夠的空間。
2. 斷層攝影模擬儀之床架必須與直線加速器之床架 (couch) 儘可能一致，尤其在非共面 (non-coplanar) 治療時之模擬定位，此模擬儀必須提供該項功能。

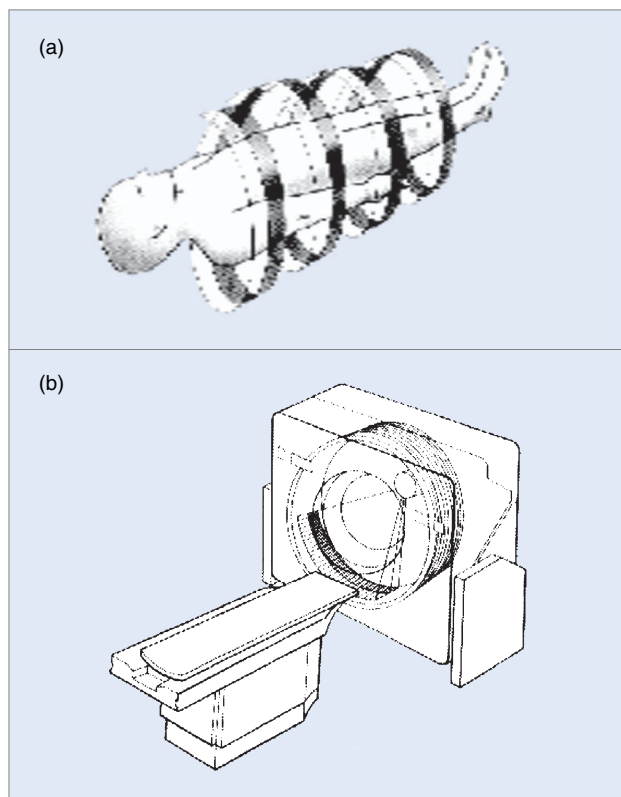


圖 1. 電腦斷層攝影模擬儀可以依簡單斷層 (b) 或螺旋斷層方式 (a) 來取像。

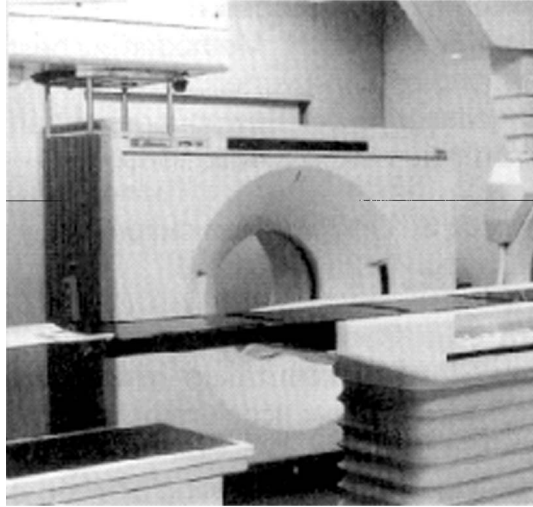


圖 2. 傳統攝影模擬儀 (前) 與電腦斷層攝影模擬儀 (後)。

3. 該模擬儀之治療計畫軟體必須能提供組織間非均質密度修正 (inhomogeneous correction) 的功能，尤其對於 CT number 與組織電子密度之間的校正，必須確實存在。

4. 該模擬儀之軟體必須提供影像網路功能，以供其他電腦治療計畫系統之使用。

#### 四、應用與用途

電腦斷層攝影模擬儀主要之用途是在臨床放射治療時，提供必要之病人正確的身體輪廓、腫瘤大小與其在影像中之正確位置，供醫師及醫學物理師在進行治療計畫時之參考。由於該模擬儀也是一功能完整之電腦斷層攝影儀，故也可用於一般放射診斷的用途。

#### 參考文獻

1. E. Alexander III, J. S. Loeffler and L. D. Lunsford, *Stereotactic radiosurgery*, McGraw-Hill, Inc. (1993).
2. D. P. Radan, J. D. Forman and C. F. Mesina, *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.*, **34** (3), 691 (1996).

---

作者：李俊信先生為美國依利諾大學醫學 (放射) 工程博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 單光子發射電腦斷層掃描儀

## Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)

**關鍵字：**單光子發射電腦斷層掃描儀、核醫藥物、影像重建

**Keywords：**single photon emission computed tomography, radiopharmaceuticals, image reconstruction

### 一、基本原理

單光子發射電腦斷層掃描儀 (SPECT) 的發展是為了提供一種非侵害性的生理功能診斷方式。SPECT 是屬於發射型電腦斷層掃描 (emission computed tomography, ECT)，有別於穿透型電腦斷層掃描 (transmission computed tomography, TCT) 之解剖上的結構診斷。SPECT 中之單光子是指放射性核種每次的衰變僅產生一個  $\gamma$  光子，而 SPECT 即是計測此單一光子，這是有別於另一種功能性造影方式即正電子發射電腦斷層掃描儀 (positron emission tomography) 之偵測兩個互毀  $\gamma$  光子 (annihilation photons)。

傳統二維核子醫學影像無法提供器官某一切面的清楚影像，也無法得到造影劑 (radiotracer) 在器官內的三度空間分佈。要達成上列的目標唯有採用三度空間斷層 (tomographic) 方法。SPECT 造影時，特定的放射性同位素 (radioactive isotope) 或核醫藥物 (radiopharmaceutical) 須先以靜脈注射或口服方式進入人體內，而後被某些特定的器官攝取，隨後  $\gamma$  射線會四面八方地發射出人體。最普遍的 SPECT 影像系統的基本元件是安裝在固定或旋轉機架 (gantry) 上的單個伽馬照相儀配上平行式準直儀 (如圖 1 所示)。造影時閃爍攝影儀之探頭以電腦控制，並以病人之長軸為中心成 360 度或 180 度自動旋轉，以從多個角度收集足夠的  $\gamma$  光子來提供斷層影像重建 (tomographic image reconstruction) 所需之計數數據。典型的 SPECT 造影系統是每旋轉相同的角度時，停留短時間以獲取投影的影像資料。通常的照影方式是每隔 6 度旋轉一次共旋轉 60 次，且在每個角度的停留時間為 30 秒，故一般的 SPECT 造影時間需 30 分鐘。當放射性核種 (radionuclide) 的分佈經過多重角度投影而完整的資料 (含有許多經過核種分佈的線積分) 被收集到

後，再借助於電腦，病人體內的核醫藥物分佈之橫切面斷層影像就可以被重建出來。

估計放射活性 (radioactivity) 在感興趣的器官內之三度空間分佈稱為斷層影像重建。因為 SPECT 是屬於間接成像之造影方式，故也須要以電腦影像重建技術將影像獲取 (image acquisition) 所得到的一系列投影資料經過各種數學演算法求得放射活性在病人體內的空間分佈影像。

有好幾種斷層重建演算法 (tomographic reconstruction algorithms) 可應用於影像重建上，如濾波反投影 (filtered back projection) 和疊代式重建算法 (iterative reconstruction)。其中疊代法又可以分為帶有衰減補償 (attenuation correction) 和散射補償

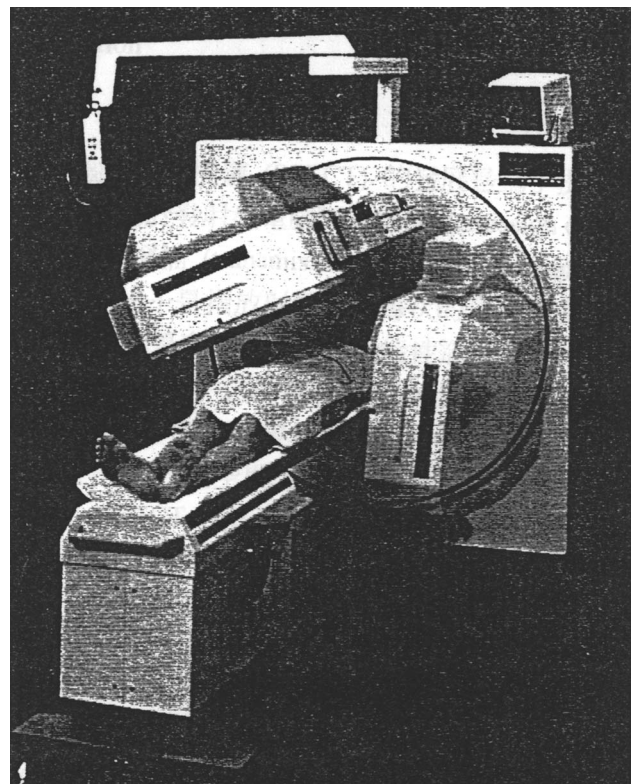


圖 1. 一台傳統的單光子發射電腦斷層掃描儀。

(scatter correction) 及不帶補償的方法等。這些帶有補償的方法是為了改善重建影像的品質和定量精確度。限於篇幅關於這些重建演算法的詳細描述便不是本文所探討的範圍，有興趣的讀者可參閱參考文獻 2。

## 二、結構示意圖

如圖 1 所示，傳統的 SPECT 系統主要是由平行式準直儀和閃爍攝影儀組合安裝在機架上，且整個攝影儀—準直儀組合可繞著病人作 360 度旋轉以獲取多方向投影的影像。至於影像的處理 (包括重建)，則是由位於控制台的電腦來處理，並將結果顯示於顯示器上。

## 三、儀器規格與特徵

目前市面上的 SPECT 型式頗多，主要的差異在加馬照相儀的數目、是否能作全身顯像及所搭配的準直儀型式等。其中加馬照相儀的數目大多是一、二、三或四。當然多探頭 SPECT 系統之優點為偵測效率 (efficiency) 可以提高及造影時間可以縮短。

SPECT 的出現克服了傳統平面掃描影像前後重疊的缺失，而且也可以提供較二維成像更好的影像對比度與空間解析度。不過傳統 SPECT 的共同缺點是影像重建後的空間解析度仍然不夠好 (7–10 mm FWHM)，偵測效率低，以致於系統靈敏度 (sensitivity) 也低。而由於  $\gamma$  光子散射 (scatter) 的影響，影像的對比度也不夠好。另外一個缺點則是信噪比 (signal-to-noise ratio) 低。傳統 SPECT 只能得

到靜態 (static) 的三度空間立體影像，而無法作快速動態 (fast dynamic) 造影檢查，如首次穿流 (first-pass) 心室功能檢查。由於  $\gamma$  光子衰減 (attenuation) 等的因素，SPECT 影像一般是只作定性分析。

## 四、應用與用途

由於放射性同位素如 Tc-99m 和 I-123 等可以和有機配位子 (organic ligands) 結合形成具病原或器官選擇性之核醫藥物，因此 SPECT 可以顯示人體器官隨時間的代謝與生理過程變化 (metabolic and physiologic processes)，例如心肌灌注 (myocardial perfusion) 和腦部攝影 (brain imaging) 等。其中腦部攝影可提供血流檢查和判定是否有腦部異常功能，如腦中風與腦癲癇等。

## 參考文獻

1. J. C. Chen, *Ph. D. Dissertation*, Univ. of Arizona, Tucson, Arizona (1995).
2. H. H. Barrett and W. Swindell, *Radiological Imaging: The Theory of Image Formation, Detection, and Processing*, New York: Academic Press (1981).
3. W. L. Rogers, *Comput. Instr. Council. Newsletter*, 7 (3), 5 (1990).
4. N. P. Alazraki and F. S. Mishkin, *Fundamentals of Nuclear Medicine*, 2nd ed., New York: The Society of Nuclear Medicine, Inc. (1991).
5. G. Ting, *Nuclear Medicine Update*, 85 (1992).

---

作者：陳志成先生為美國亞利桑那大學光學博士，現任國立陽明大學醫學放射技術系副教授。

# X 光影像增強器

## X-ray Image Intensifier

**關鍵字：**磷光體、光陰管、靜電聚焦鏡面、加速陽極

**Keywords：** phosphor, photocathode, electrostatic focusing lens, accelerating anode

### 一、基本原理

X 光影像增強器是密封在一個真空管內，其內部包含有四組主要的部分 (圖 1)，即入射磷光體及光陰管 (input phosphor and photocathode)、靜電聚焦鏡面 (electrostatic focusing lens)、加速陽極 (accelerating anode) 及輸出磷光體 (output phosphor)。

當 X 光射束穿過人體進入影像增強器時，其輸入螢光屏吸收 X 光光子並將其能量轉換為可見光光子的形式，而這些可見光光子打擊到光陰極時，會使得其發射光電子，藉由影像增強管內由加速陽極與光陰極之間所外加的高電位差，使得光電子以非常快速的運動從陰極跑向陽極，並利用靜電鏡面使其聚焦，並導引至輸出螢光屏，同時亦不會使得其光子束幾何形狀產生變形。當電子打擊到輸出螢光屏後，便會使這些亮度放大的螢光影像傳入觀察者的眼中，因此在影像增強管產生的流程為首先為影像藉由 X 光子產生後再轉為可見光光子，再轉為電子，最後再轉為可見光光子束。

### 二、結構示意圖

X 光影像增強器各主要部分之結構示意圖如圖 1 至圖 4 所示。

### 三、儀器規格與特徵

第一代所採用螢光板的入射磷光體，材料為 ZnS-CdS:Ag，而第二代則採用 CsI 作為輸入螢光屏之材質。這些螢光屏必須與光陰極緊密結合才不會損失其解析度。圖 2 所示即為輸入螢光屏及光陰極的簡圖，由此圖中可發現螢光板與光陰極之間藉由一層非常薄的透明板分割，其目的在於預防光陰極與螢光板產生化學作用，但由於此薄度小於 1 mm，因此對於影像損失影響非常的小。

光陰極通常採用銻及銨合金作為材質，光子由螢光板打擊光陰極時，其所產生的光電子數與通過螢光屏的光亮度成正比，光陰極同時扮演著如 X 光管陰極角色並保持接地電位的功能。

靜電聚焦鏡面則是靠近增強器的管壁並充滿了許多的正電荷的設計，將光陰極所產生的電子聚集並導引至輸出屏，並使得影像產生反相及縮小。利

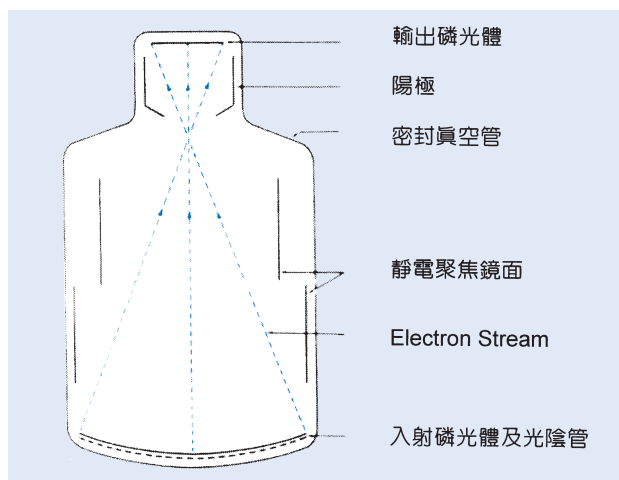


圖 1. X 光增強影像管結構圖。

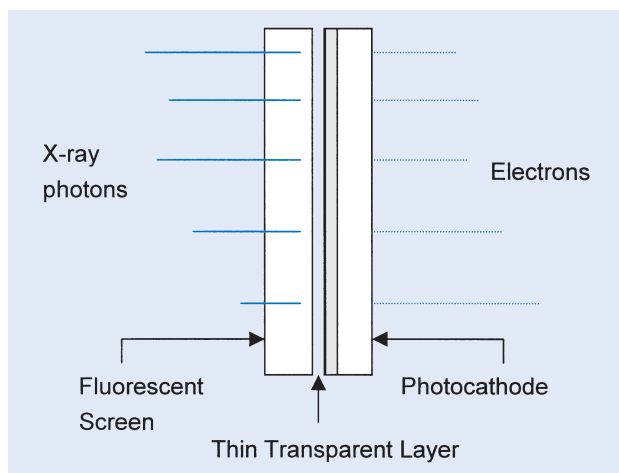


圖 2. 入射磷光體及光陰極。

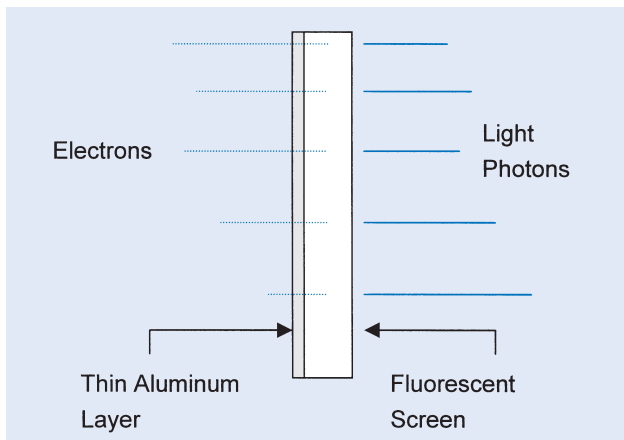


圖 3. 輸出磷光體之基本結構圖。

用影像縮小的功能使得所有的亮點得以集中，最後亮度可達到增強的功能。

加速陽極提供 25 kV 的電壓使得電子得以加速至輸出螢光屏，並可使其於輸出螢光屏上產生更多的光子數，約可提升 50 倍。而輸出螢光屏的材質設計與第一代的輸入螢光屏相同為 ZnS-CdS:Ag，但是其晶體及厚度則減少很多，因為輸出的影像如前所述，由聚焦而縮小，因此減少晶體及厚度才能維持其解析度。

輸出螢光板（圖 3）的表面置於一層非常薄的鋁片，預防光線逆行通過球管時使得光陰極產生活化。該鋁板同時提供接地的功能，可移除由影像管所產生的電子，假使不移除這些電子，電子將會積存並附著於輸出磷光體螢光屏端，並產生負電荷，而減低光亮度之效益。電子加速可使得光通量 (flux gain) 獲得增益約五十倍，而照射面的縮小，可提升的增益 (minification gain) 可達 81 至 256 倍，因此整體亮度可提升至約 4000 到 6000 倍。

最後其輸出屏可連接至光學系統，並利用一組

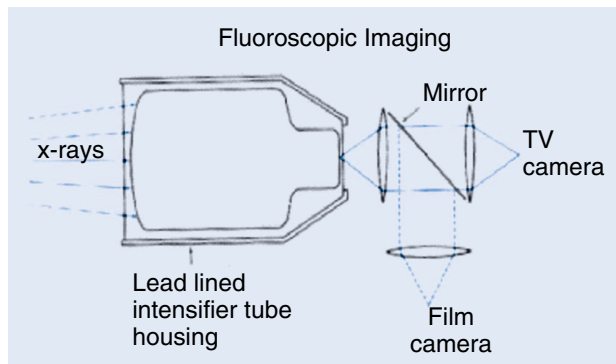


圖 4. 影像增強管與光學攝影機之結合圖。

成 45 度角的折射鏡，將影像直接送入觀察者的眼中，或藉由閉路電視系統供使用者觀察病患活動的情形（圖 4）。

#### 四、應用與用途

可直接透視病患呼吸時胸部擴張情形，橫隔膜移動情形及做腸胃道雙重對比檢查，偵測其黏膜蠕動情形，並可接電影攝影機，用在電影心臟攝影與動脈攝影檢查。

#### 參考文獻

1. T. S. Curry, J. E. Dowdey and R. C. Murry, *Introduction to the Physics of Diagnostic Radiology*, 3rd ed., Lea & Febiger, Philadelphia (1984).
2. H. E. Johns and J. R. Cunningham, *The Physics of Radiology*, 4th ed., Charles C. Thomas (1983).
3. S. C. Bushong, *Radiological Science for Technologists*, C. V. Mosby Co. (1975).

作者：李俊信先生為美國依利諾大學醫學（放射）工程博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 淺部 X 光遠隔治療機

## Superficial X-ray Teletherapy Machine

**關鍵字：**淺部治療、遠隔治療、X 光機

**Keywords：**superficial therapy, teletherapy, X-ray machine

### 一、基本原理

淺部 X 光遠隔治療機，顧名思義即是利用低能量之 X 光來進行治療。其主要結構與一般診斷用 X 光機之設計並無太大不同，唯其 X 光之能量分佈以 50–150 keV 為主，但近年來，中能量 (orthovoltage，能量分佈介於 150–500 keV) 之 X 光也概括之。

而其與診斷用 X 光機在原理與應用上也有相當大的不同，主要之不同點是在於其 X 光能量與輸出量均較一般診斷型 X 光機高出許多。同時為能有效降低不必要之散射輻射，必須有大小不一之射束限制器來限制射束之範圍。

由於其 X 光之能量極低，一般均需要利用過濾板 (filter) 來阻擋更低能量之 X 光，使其平均能量得以提高，此過程稱之為 beam harden process。而射束品質 (beam quality) 之表現均以半值層 (half value layer, HVL) 來代表，通常之範圍介於 0.8 mm Al 至 4 mm Cu 之間。

在淺部治療時，也因其能量低之特性，所以與皮膚表面之距離 (skin surface distance, SSD) 非常近。臨床常用之距離均在 15–50 cm 之間，而電流範圍則在 10–30 mA 之內。

### 二、結構示意圖

淺部 X 光遠隔治療機之外觀如圖 1，準直儀之結構示意圖則如圖 2 所示。

### 三、儀器規格與特徵

本治療機之規格與一般 X 光機十分相似，唯為能滿足治療之目的，其規格具有下列特點：

1. 內置之過濾板 (inherent filtration) 必須比診斷用 X 光機為厚，以大量減少低能 X 光，增加 X 光之穿透力，目前新一代之過濾板均以 5 mm 之 Be

為材質。

2. 陰極燈絲 (filament) 之電流量較診斷型 X 光機增加許多，目前均有 4–5 A 之電流量，藉以產生較多之 X 光輸出量。



圖 1. 淺部 X 光遠隔治療機以較低能量之 X 光配合 X 光限制器直接施於病人表面上，進行治療之情形。

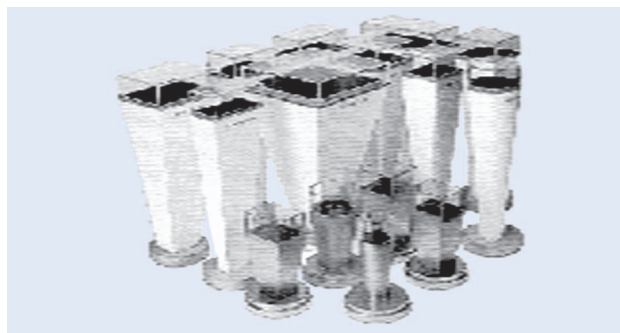


圖 2. 依臨床治療應用範圍與形狀之不同，而有大小不一之方形及圓形之限制器，該等準直儀之上方直接與 X 光管相連接，而下方之部分則靠近病人皮膚表面，如圖 1 所示。

3. 陽極靶角度 (anode angle) 依線聚原理 (line focus principle)，其角度均較診斷型 X 光機為大，至少在  $20-30^\circ$  之間，藉以增加 X 光量之產生。
4. 治療用之準直儀 (collimator) 與診斷型 X 光機完全不同，且依臨床治療應用範圍與形狀之不同，而有大小不一之方形及圓形之準直儀，如圖 2 所示。

#### 四、應用與用途

因其以淺部治療為主，故 SSD 之距離均不大於 50 cm，而產生皮膚表面之散射量十分顯著，使其累積輻射劑量較不易控制得當。目前主要之臨床

應用是以皮膚癌或皮膚相關疾病等放射線治療。

#### 參考文獻

1. F. M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, 2nd ed., Williams and Wilkins (1994).
2. H. E. Johns, J. R. Cunningham, *The Physics of Radiology*, 4th ed., Charles C. Thomas (1984).
3. C. K. Bomford et al., *Textbook of Radiotherapy, Radiation Physics, Therapy and Oncology*, 5th ed., Churchill Livingstone (1993).

---

作者：李俊信先生為美國依利諾大學醫學(放射)工程博士，現任國立陽明大學醫學放射技術學系副教授。

# 熱陰極離子化真空計

## Hot Cathode Ionization Gauge

**關鍵字：**熱陰極離子化真空計、三極離子化真空計、離子真空計

**Keywords：** hot cathode ionization gauge, triode ionization gauge, ion gauge

### 一、基本原理

熱離子化真空計亦稱之為三極離子化真空計 (triode ionization gauge)，其構造原理如圖 1 所示。燈絲通過電流加熱，由於熱電作用放射出的電子在電場中被加速後碰撞真空系統中的剩餘氣體分子而使之離子化，正離子被吸往陰極造成離子電流，經由外電阻產生電壓差，此電壓差可由一電壓計指示之，此電壓計已刻成相當的真空壓力，故可直接指示真空度。

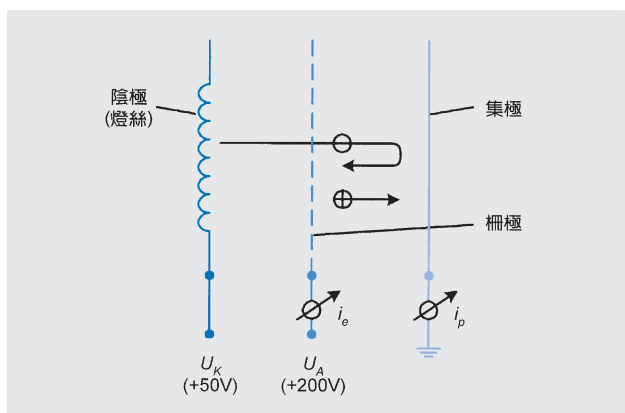


圖 1. 離子真空計的工作原理。

熱離子化真空計可依其結構之不同概分為以下四種：

- ① 傳統式真空計
- ② Bayard-Alpert (B-A) 真空計
- ③ Modified Bayard-Alpert 真空計
- ④ Schulz-Phelps (S-P) 真空計

分述如下。

#### 1. 傳統式離子真空計

傳統式離子真空計各電極之關係形式如圖 2 所示。探測單元包括陰極 (熱燈絲)、柵極與集極，其特徵是：陰極位於中間，外為柵極，再外為廣大收

集面的集極。各極所加電壓的大小為柵極最高而集極最小，陰極放射出來之電子受到電位較高之柵極加速，但在穿過柵極後，又馬上受到反向電場作用，因此電子在柵極附近做反覆運動，碰撞氣體分子而將之游離，帶正電之離子往集極移動形成離子電流。

傳統式離子真空計之結構在壓力為  $10^{-2}$  torr 或更大時，因為電極間產生不易控制之輝光放電或火花放電而受限制，必須經過特殊設計方能適用，而其量測之壓力下限約為  $10^{-8}$  torr，主要是受限於 X 光限制 (X-ray limit or X-ray effect) 及柵極逸氣，此二種因素造成之背景信號不隨壓力變化，即壓力與離子電流不再是正比關係。

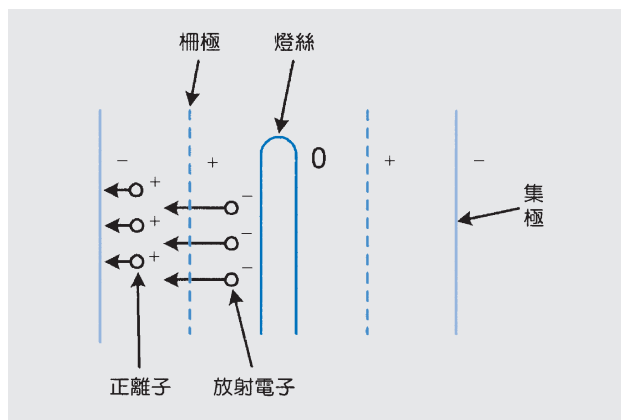


圖 2. 傳統式離子真空計電極結構。

#### 2. Bayard-Alpert 真空計

為了消除由於 X 光的光電效應所造成的暗電流 (dark current)，以使真空計可讀到正確的壓力，Bayard 與 Alpert 兩氏發明所謂反位 (inverted) 的電極安排，如圖 3 所示。燈絲改裝在柵極之外，離子收集極改成細絲放在原裝燈絲的位置，如此安排則由於電子撞擊所產生的 X 光能射到離子收集極上機會大減，故產生光電子所造成的剩餘電流也同時

大為減少。這種改進的真空計通常可測定真空度達到約  $5 \times 10^{-11}$  torr，為現今在高真空及超高真空均廣為應用，通常簡稱為 B-A 真空計。

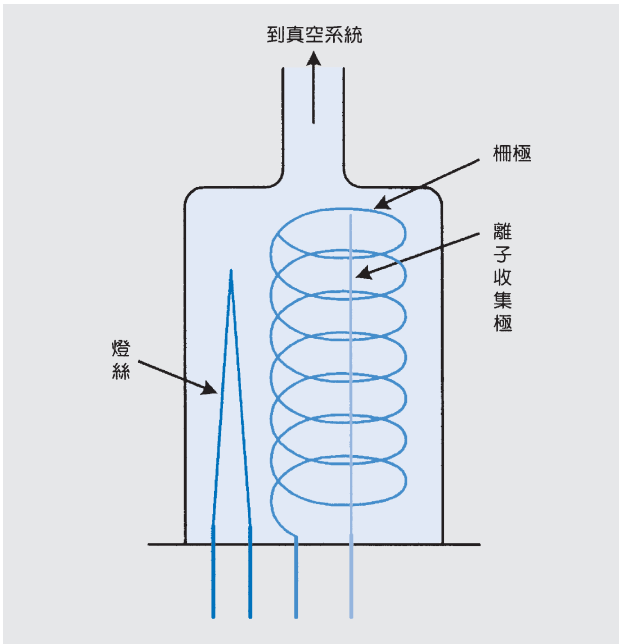


圖 3. B. A. 離子真空計。

### 3. Modified Bayard-Alpert 真空計

雖然 Bayard-Alpert 真空計解決了高真空或超高真空範圍壓力量測的問題，但超高真空的壓力量測對準確性的要求愈來愈高，因此即使是 B-A 真空計中很小的 X 光效應也必須克服，茲列舉四種介紹如下。

#### (1) 外收集極式離子真空計 (extractor ionization gauge)

此種真空計的結構如圖 4 所示。圖中並標示各電極之相對電壓高低，利用離子光學的安排以消除

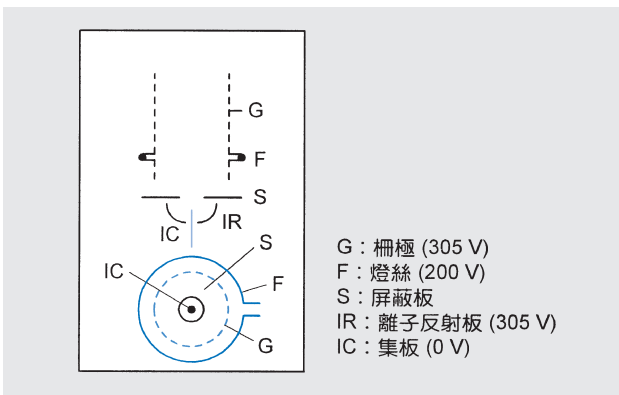


圖 4. 外收集極式離子真空計電極結構。

柵極逸氣與 X 光效應，由柵極內部而來的離子聚焦在既細又短的集極，其外圍是罩杯式的離子反射板，該板與柵極同電位，由柵極逸氣造成之離子，無法到達集極而減少了干擾。此真空計可量測至  $10^{-12}$  torr。

#### (2) 雷德赫式真空計 (Redhead ionization gauge)

此種真空計為雷德赫 (Redhead) 所創，亦稱為調變式 B-A 真空計，其結構如圖 5 所示。主要構造係將 B-A 真空計的柵極與離子收集極之間裝一調位極 (modulator)，此極上的電位可交替的調到兩預先選定的數值，當此調位極上的電位由一個數值調變到另一個數值時，收集極上的離子電流也隨之調變，但是因燈絲的電流未變，且柵極電壓未變，故所產生的 X 光也不變，因之由於 X 光所產生的光電子電流也不變。根據這個原理，若在較高的真空壓力時校正此真空計，因為此時由於 X 光所產生的暗電流較離子電流甚小可忽略不計，故可校正準確的讀數。以此校正結果用到高真空並用調位法消去 X 光所產生的暗電流，如此可測到  $10^{-12}$  torr 的真空度或更低。

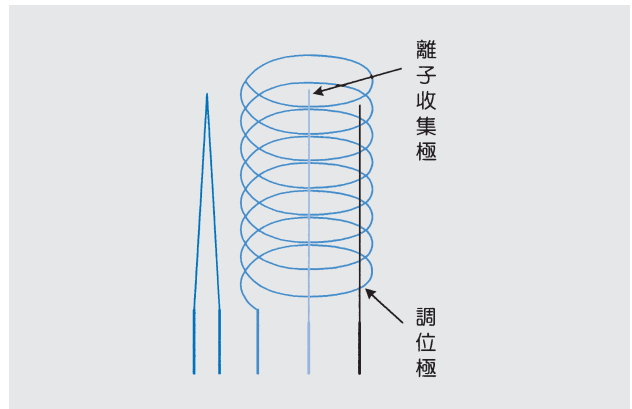


圖 5. 雷德赫真空計。

#### (3) 李 (Lee) 式真空計

此真空計主要改進為用一雙離子收集極以代替原有 B-A 真空計中的單一離子收集極，其結構如圖 6 所示。此兩個離子收集極之一置於零電位，另一個則置於更低的電位 (如  $-60$  V)，如此則兩極所收集的離子電流不同，但是由於 X 光在此兩極上所造成的光電子電流相同，故若將此兩極的電流送一個差異電流計 (differential electrometer) 中則可

將 X 光的影響消去。此種真空計可測得真空度達  $10^{-12}$  torr 或更低。

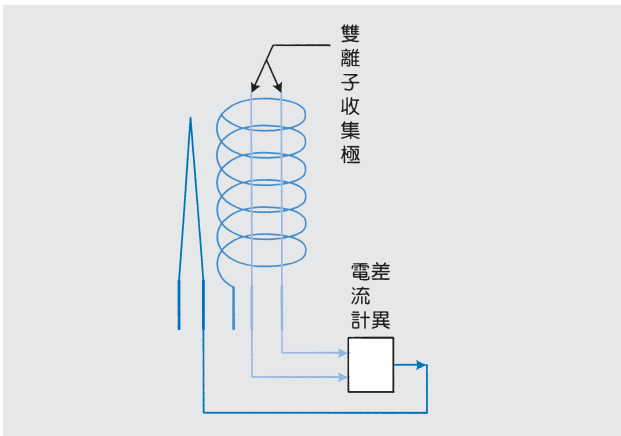


圖 6. Lee 式真空計。

#### (4) 偏折式離子真空計

該真空計的構造如圖 7 所示。其燈絲與柵極結構和 B-A 真空計相同，但離子由接地之底板孔口吸取後，在經靜電場偏折  $90^\circ$  而到達集極。集極前面之負電壓抑制板可防止離子撞擊集極後二次電子的逸出造成干擾。此安排可讓集極避開柵極處產生的 X 光。量測壓力可小至  $10^{-13}$  torr。

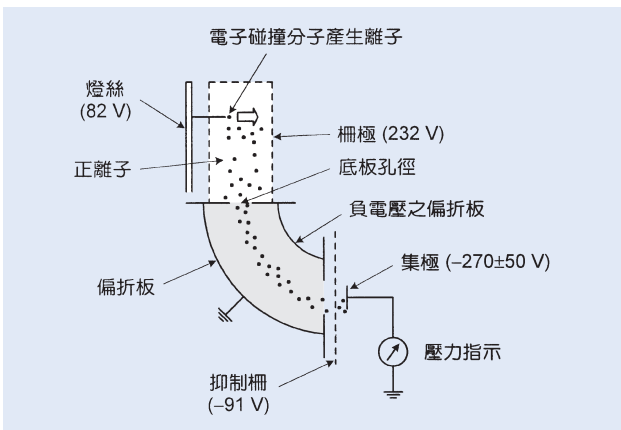


圖 7. 偏折式離子真空計。

#### 4. Schulz-Phelps 真空計

一般 B-A 真空計量測上限為  $1 \times 10^{-3}$  torr，因為有如下限制：

- ① 空間電荷 (space charge) 之影響。
- ② 氣體分子的平均自由徑 (mean free path) 太短。
- ③ 熱陰極燈絲在低真空壽命太短。

為了克服以上各因素，Schulz 與 Phelps 做了如下之改良而使得離子真空計能在  $0.5 - 10^{-6}$  torr 範圍使用 (S-P gauge)。

- ① 縮短集極、柵極以及熱陰極之距離。
- ② 採用較小的發射電子流 (electron emission current) 約  $10 \mu\text{A}$  (B-A 真空計採用大於  $0.1 \text{ mA}$  的電子流)。
- ③ 採用  $\text{ThO}_2$  鍍層的燈絲。

Schulz-Phelps 真空計之結構如圖 8 所示。

#### 二、結構示意圖

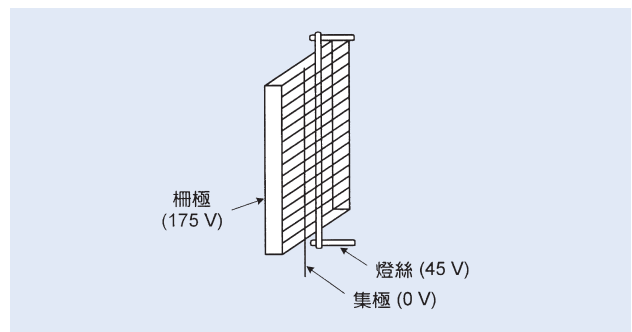


圖 8. S.P. 式離子真空計。

各種熱離子真空計之結構示意圖如圖 2 至 圖 8 所示。

#### 三、儀器規格與特徵

如前面所列舉的幾種離子真空計，其主要的差異在於幾何結構上。圖 9 為各種真空計其量測範圍之關係及影響量測上下限因素。

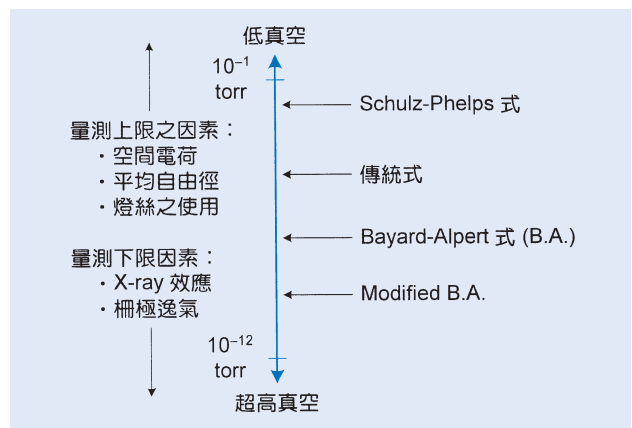


圖 9. 離子真空計量測上下限因素示意。

#### 四、應用與用途

真空計是真空系統的眼睛，而熱離子真空計可量測的範圍在高真空及超高真空，約  $10^{-3} - 10^{-12}$  torr，故舉凡各種真空系統需達到此工作環境，均需仰賴離子真空計的監測。目前國內在各研究單位，如各大學、中研院、工研院、精儀中心、同步輻射中心，及半導體廠等從事真空實驗與應用的地方，熱離子真空計均廣為使用。

#### 參考文獻

1. J. F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology*, New York: John Wiley & Sons, 62 (1980).
2. 蘇青森, 真空技術, 四版, 東華書局, 118 (1990).
3. 呂登復, 實用真空技術, 修正版, 國興, 233 (1989).

---

作者：郭冠助先生現服務於行政院同步輻射研究中心。

# 冷陰極離子化真空計

## Cold Cathode Ionization Gauge (Penning Gauge)

關鍵字：冷陰極、真空計、磁控管、彭寧放電

Keywords：cold cathode, vacuum gauge, magnetron, Penning discharge

### 一、基本原理

最早的冷陰極離子化真空計簡稱冷陰極真空計是由 F. M. Penning (彭寧) 於 1937 年發明。這種真空計利用陰極受宇宙射線或場激發釋出之電子在高壓電場與外加磁場之作用下產生彭寧放電 (Penning discharge)，使在真空計中的氣體分子被運動中的電子游離成正離子，並受電場加速而撞擊陰極產生正電流，測量此正電流可求得真空計中的氣壓。由於此種陰極釋出電子的方式與利用熱燈絲發射電子之熱陰極真空計不同，故稱為冷陰極真空計。根據冷陰極真空計發展歷史之沿革，本文就彭寧真空計、反磁控管真空計與磁控管真空計等三種類型分別描述之。<sup>(1)</sup>

#### 1. 彭寧真空計 (Penning gauge)

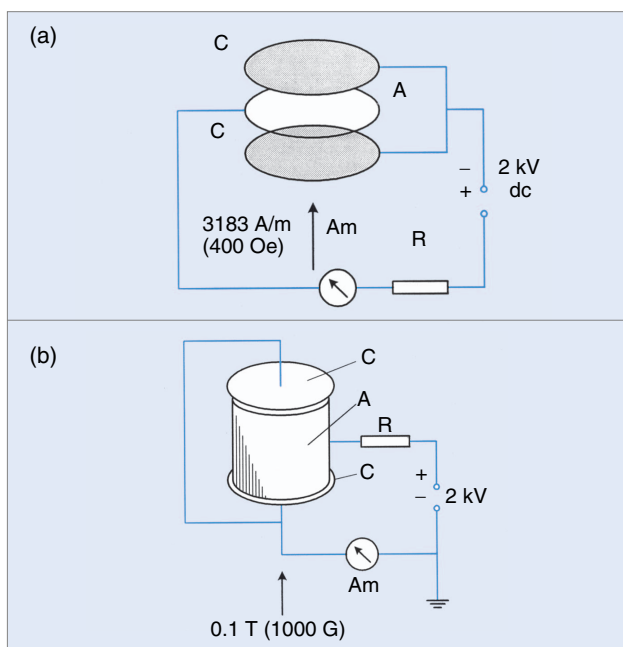


圖 1. 彭寧真空計電極與電磁場配置原理結構示意圖。(a) Penning 真空計 (1937)；(b) Penning 與 Nienhuis 真空計 (1949)。

彭寧發明之真空計<sup>(2)</sup> 結構設計概念如圖 1(a) 所示。在中心之環形陽極與兩端之陰極板間供應 2 kV 之電位差，使產生軸向電場。由於宇宙射線或兩極電場發射 (field emission) 效應之激發作用使陰極表面釋出電子被電場加速向陽極飛行，而外加的軸向磁場使電子在垂直於磁場的方向被加速而形成螺旋曲線式繞行，且因兩端陰極之排斥使電子在兩端陰極之間往復繞行運動，這種電磁場的作用延長電子在撞擊陽極之前的繞行軌跡並增加電子與氣體分子之間碰撞的機率，使較多氣體分子被游離成正離子並產生游離電子，而正離子因高壓電場之加速撞擊陰極並產生二次電子再度釋出，由以上連續發生不斷之衍生電子與游離作用形成放電，稱為彭寧放電，測量陰極之放電電流可求得真空計中的氣壓。其關係式為：

$$I = SP^n \quad (1)$$

式中  $I$  為放電電流， $P$  為待測氣壓， $S$  為真空計靈敏度，指數  $n$  值在 1.1—1.4 之間。此種彭寧真空計可測量之真空氣壓範圍約為  $10^{-1}$ — $10^{-3}$  Pa ( $10^{-3}$ — $10^{-5}$  torr)。

隨後 Penning 與 Nienhuis 於 1949 年提出新設計<sup>(3)</sup>，將陽極由環形改成圓柱形之結構，如圖 1(b) 所示，使在較低氣壓下之彭寧放電更為穩定，可測氣壓範圍約為  $6 \times 10^{-1}$ — $6 \times 10^{-5}$  Pa ( $5 \times 10^{-3}$ — $5 \times 10^{-7}$  torr)。這種設計結構已呈現磁控管 (magnetron) 真空計之雛型了。

#### 2. 反磁控管真空計 (inverted magnetron gauge)

反磁控管真空計為 Hobson 與 Redhead 於 1958 年所提出<sup>(4)</sup>，其結構設計如圖 2(a) 所示。此真空計之中心軸為陽極；陰極則為外環圓柱形結構。磁場之方向為中心軸向，強度約 0.2 tesla；陰陽兩極間供應約 6 kV 之高電位差，電場方向為徑向。圖中

表 1. 各式冷陰極真空計之規格比較。

	彭甯真空計	反磁控管真空計	磁控管真空計
陰陽極電位差	2 kV	6 kV	4.5 kV—6 kV
磁場強度	0.1 tesla	0.2 tesla	0.1 tesla
氣壓測量範圍 (Pa)	$10^{-1}$ — $10^{-5}$	$10^{-1}$ — $10^{-10}$	$10^{-2}$ — $5 \times 10^{-8}$
靈敏度 (等效 $N_2$ )	0.047 A/Pa	0.0075 A/Pa	0.075 A/Pa
優點	結構簡單	無場發射電流限制	線性範圍較廣
缺點	場發射電流大	電位差較高	較高抽氣作用

之輔助陰極在圓柱體兩端靠近陽極開孔處結構，其目的為縮短陰陽極之間的距離，產生場發射電流，使彭甯放電可在更低的氣壓下啟始；同時因輔助陰極將場發射電流自原陰極所測得之放電電流中隔離出來，使氣壓測量範圍下限可延伸至  $10^{-11}$  Pa。

### 3. 磁控管真空計 (magnetron gauge)

Redhead 於 1959 年提出磁控管真空計<sup>(5)</sup>，其形狀與反磁控管真空計類似但陰陽極結構則不同，概念設計如圖 2(b) 所示。中心軸及兩面端板為陰極；外環圓柱形結構為陽極，中間穿鑿多孔以提高測量氣導率；介於陰陽極之間的環狀隔板為輔助陰極，功能與反磁控管真空計類似；磁場之方向為中心軸向，強度約 0.1 tesla。這種真空計在方程式 (1) 中指數  $n$  值 = 1 之線性範圍較廣，約在  $10^{-2}$ — $10^{-8}$  Pa 之間。

## 二、結構示意圖<sup>(1)</sup>

彭甯真空計及磁控管式真空計之電極與電磁場配置原理結構分別如圖 1 及圖 2 所示。

## 三、儀器規格與特徵

各式冷陰極真空計之規格比較如表 1 所列。冷陰極真空計之優點包括：

- ① 結構簡單，且陰極對於經常性曝露大氣之影響較熱陰極真空計不靈敏。
- ② 因 X 射線產生之電子電流不會造成測量氣壓之影響。
- ③ 無熱陰極真空計般熱釋氣背景氣壓之干擾。
- ④ 測量之靈敏度隨電子運行軌跡之增長而提高。
- ⑤ 由於較低之電子引發釋氣特性使氣壓測量之誤差因而減低。

冷陰極真空計之缺點包括：

- ① 放電電流與氣壓之間關係為非線性函數。
- ② 在較低氣壓之真空條件下不易啟始放電。
- ③ 在測真空時對於待測氣體具有抽氣作用，即使在測量惰性氣體時亦然。
- ④ 場發射作用導致陰極測量彭甯放電電流之下限氣壓因場發射電流而受到限制。磁控管式真空計已針對此點予以改善。

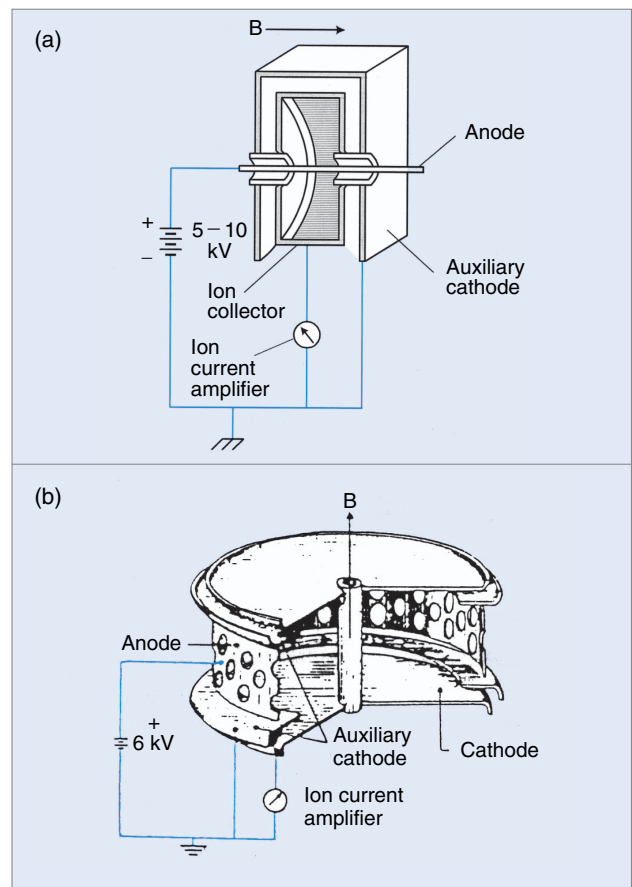


圖 2. 磁控管式真空計電極與電磁場配置原理結構示意圖。(a) 反磁控管真空計 (Hobson 與 Redhead, 1958)；(b) 磁控管真空計 (Redhead, 1959)。

#### 四、應用與用途

目前常用之冷陰極真空計以反磁控管式真空計為主，常用於  $10^{-1} - 10^{-10}$  Pa 氣壓範圍之真空度量。因其結構簡單，且以其快速放電之特徵，故具備了操作簡易且在一般高真空範圍之度量既快速又準確。常用於驅動真空系統快速閥門關閉之真空計。

#### 參考文獻

1. A. Berman, *Total Pressure Measurements in Vacuum*

*Technology*, U.S.A.: Academic Press, Inc. (1985).

2. F. M. Penning, *Physica*, **4**, 71 (1937).

3. F. M. Penning and K. Nienhuis, *Philips Tech. Rev.*, **11**, 116 (1949).

4. J. P. Hobson and P. A. Redhead, *Can. J. Phys.*, **36**, 271 (1958).

5. P. A. Redhead, *Can. J. Phys.*, **37**, 1260 (1959).

---

作者：熊高鈺先生現服務於行政院同步輻射研究中心。

# 氣體分壓分析儀

## Partial Pressure Analyzer

**關鍵字：**殘留氣體分析儀、四極式、磁場式

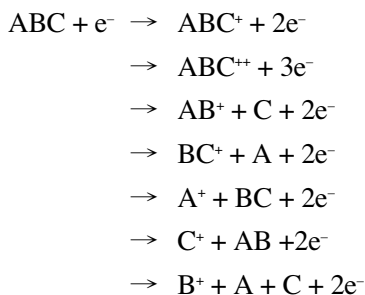
**Keywords：**residual gas analyzer, quadrupole, magnetic sector

### 一、基本原理

氣體分壓分析儀是一種輕巧有效的氣體分析工具，一般在高真空及超高真空系統中普遍利用它來進行真空中殘留氣體的分壓分析，因此又稱為殘留氣體分析儀 (residual gas analyzer, RGA)。殘留氣體分析儀的工作原理為真空腔中的氣體原子或分子被分析儀中的游離器離子化後，再經由質量分析器將其分離，最後經由偵測器量測出強度，所以又稱之為質譜儀 (mass spectrometer)。以下列三個步驟來說明其工作原理。

#### 1. 離子化過程 (ionization process)

商用分析儀中最常被用來產生離子源的是電子撞擊游離法，係利用金屬燈絲通過電流加熱，由於熱電作用放射出的電子在電場中被加速後碰撞氣體分子而將之離子化，所產生的離子由加速電壓加速並進入離子分離器。此外離子源尚有排斥板可控制被加速離子之數目，以及聚焦板可調整離子束方向。其他方法還包括場游離 (field ionization) 及化學游離 (chemical ionization) 等。在游離過程中，除了產生單一電荷及多重電荷的分子離子外，當氣體分子越複雜，所產生的離子種類數目也越多。例如氣體分子 ABC：



以上各種離子的相對強度可視為各氣體分子的主要表徵。一般稱之為碎片 (cracking pattern)。

#### 2. 離子分離器 (ion separation)

市面上最常被用來分離不同離子質量的方法有磁場式偏折與 RF 四極棒；使用磁場式偏折來分離不同離子質量係利用帶電粒子在均勻磁場中，受磁力作用偏折時，其偏折曲率半徑  $r$  與磁場強度  $B$  (高斯)，荷質比 ( $m/ze$ )，離子運動速度 (以加速電壓  $V_a$  (伏特) 表示) 的關係可表示為

$$r = \frac{1}{B} \left( \frac{2mV_a}{ze} \right)^{\frac{1}{2}}$$

如圖 1 所示， $60^\circ$  的磁極是最廣被使用的。其入口及出口狹縫的位置決定了偏折曲率半徑  $r$ 。當分析

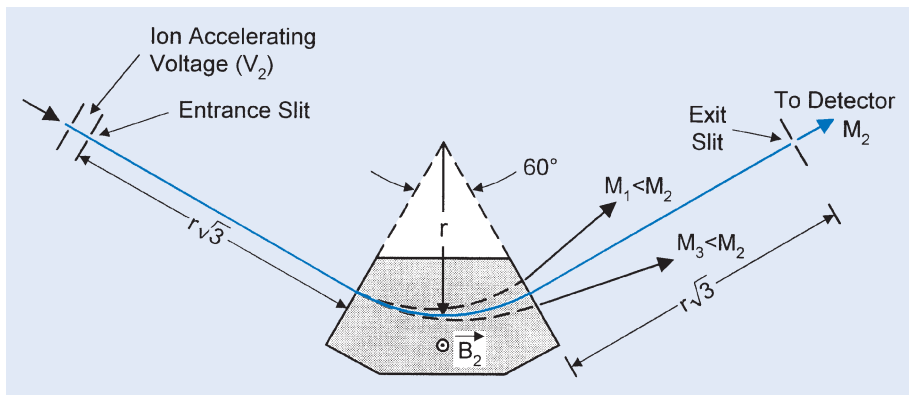


圖 1. 磁極式離子分離器 ( $60^\circ$ )。

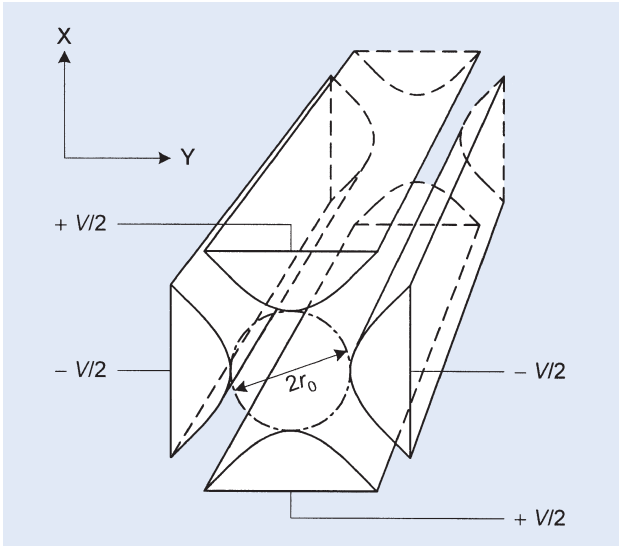


圖 2. 四極棒示意圖。

儀結構固定，偏折曲率半徑  $r$  為常數，調變加速電壓與磁場強度可使某一荷質比 ( $m/ze$ ) 的離子到達離子偵測器。例如圖 1 中  $V_a = V_2$ ,  $B = B_2$ ，則單一電荷的  $M_2$  會在出口狹縫處聚焦，但  $M_1 (<M_2)$  和  $M_3 (>M_2)$  則分別以大角度、小角度而被偏折。

RF 四極棒係利用帶電粒子在無線電波震盪電場中之穩定性變化，過濾不同  $m/ze$  比之離子，以達到分析不同質量氣體分子的作用。其結構如圖 2 所示，是由四根平行、雙曲面形狀的電極棒組成 (由於加工困難，一般商用四極棒大多以圓形棒代替，並使圓形棒之半徑  $r$  為四根圓極棒至電場中心軸距離  $r_0$  的 1.1487 倍)。相對的四極棒彼此連接具等電壓，但加在兩組電極棒的電壓剛好相反，構成一個標準的四極電場。除了外加直流電壓外，另外還有一射頻交流電壓 (RF AC voltage)，即電壓  $\phi(t)$  可表示為

$$\phi(t) = U + V \cos(2\pi ft)$$

上式中  $U$ 、 $V$  分別為直流及交流電壓振幅， $f$  為交流電壓頻率。而離子在四極電場中的運動軌跡可表示為

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{e}{mr_0^2} [U \pm V \cos(2\pi ft)] x = 0$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{e}{mr_0^2} [U \pm V \cos(2\pi ft)] y = 0$$

當離子沿著  $z$  軸方向射入四極電場後，除了某一特定範圍的離子外 ( $M = V/(7.219 f^2 r_0^2)$ )，其餘離子軌跡的振幅愈來愈大 (不穩定性)，會碰到電極棒中和，無法穿越四極棒全程。

### 3. 離子偵測器 (detection)

分析儀一般具備兩種偵測器，一為法拉第杯 (Faraday cup)，一為電子倍增器 (electron multiplier)。法拉第杯可用在較高的真空壓力  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  torr，而電子倍增器則用於  $10^{-6}$ – $10^{-10}$  torr 範圍。一般常見的電子倍增器也有兩類，一為分離式電極倍增器 (discrete dynode multiplier)，一為連續式隧道電子倍增管 (channeltron)，前者多以銅鈹合金作為電極，可輸出大於  $10 \mu A$  的電流，其體積頗大，且不宜長時間曝於大氣中，電子倍增管則是高阻值的特殊玻璃做成，其體積小，較沒有曝大氣而劣化的顧慮。

## 二、結構示意圖

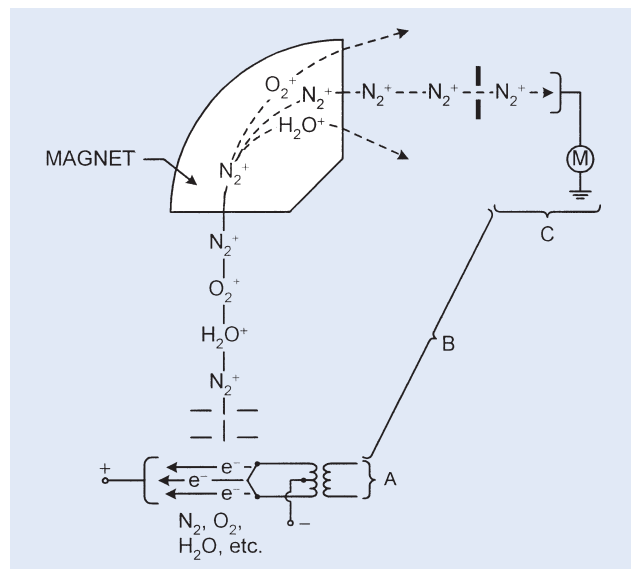


圖 3. 氣體分壓分析的三個步驟：(a) 游離器—熱燈絲；(b) 離子分離器—磁極式；(c) 偵測器—法拉第杯。

氣體分壓分析儀的主要基本結構如圖 3 所示，其中包含了離子的產生、分離與偵測。首先是游離器中的加速熱電子與真空腔中的氣體原子或分子碰撞後產生正離子，再經由質量分析器過濾不同荷質

比的離子將其分離，最後經由偵測器量測出其個別離子強度。

### 三、儀器規格與特徵

氣體分壓分析儀的商業化產品可分為磁場式與四極式兩大類，主要的規格差異在於離子分離器。價位較高的磁場式分析儀具有解析度高、高質量範圍的優點；其缺點是操作與維護較困難。價格較低的四極式分析儀則以體積小壓力容忍性大和操作容易等優點見長，其缺點為質量範圍較小（通常低於2000 amu），低解析度和高質量離子的穿透率較磁場式為差。

### 四、應用與用途

目前氣體分壓分析儀最廣泛的用途乃在於殘留氣體分析，例如在許多需要真空環境的實驗中，監測反應氣體的組成變化與真空系統的測漏。除此之外磁場式分析儀的高解析度與高質量範圍特色，也

可用來偵測如蛋白質和寡糖類之類的生化大分子。在表面科學研究中也常利用此類分析儀進行許多的表面特性研究，例如熱離附質譜術（thermal desorption spectrometry, TDS）係利用分析儀檢測逃脫受熱試品表面的氣體分子，據此研究吸附在試品表面氣體分子的吸附態、覆蓋率或是表面脫附反應機構。其他的表面離附現象，例如電子或光子引發脫附亦可利用此分析儀分析離附的氣體分子或離子。

### 參考文獻

1. J. F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology*, Wiley-Interscience press (1980).
2. R. E. Warch and R. J. Hughes, *Quadrupole Storage Mass Spectrometry*, Wiley, New York (1989).
3. White, F. Andrew, Wood, *Mass Spectrometry: Application in Science and Engineering* (1986).

---

作者：許瑤貞小姐為國立清華大學化學博士，現服務於行政院同步輻射研究中心。



# 度量衡單位及其所用之倍數、分數之名稱、定義及代號

## 一、基本單位

中華民國七十四年三月七日  
經濟部經(七四)技〇八九七四號公告

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
基 本 單 位	1.1	公尺	m	長度單位。 一公尺等於光在真空中於 $\frac{1}{299792458}$ 秒時間內所行經之距離。	1. 公尺 (metre) 2. 一九八三年 (民國七十一年) 第 17 屆國際權度大會決議採用。
	1.2	公斤	kg	重(質)量單位。 一公斤等於國際公認公斤原器之質量。	1. 公斤 (kilogram) 2. 一八八九年國際權度大會規定。
	1.3	秒	s	時間單位。 一秒等於銫 133 原子於基態之兩超精細能階間躍遷時所放出輻射之 9 192 631 770 週期之倍之時間。	1. 秒 (second) 2. 一九五六年國際權度大會決議採用。
	1.4	克耳文	K	溫度單位。 一克耳文等於水在三相點之熱力學溫度之 $\frac{1}{273.16}$ 實用上得以攝度為單位。其代號為 °C。一攝度溫度差等於一克耳文溫差。溫度於 273.15 克耳文時為攝度零度。	1. 克耳文 (kelvin) 2. 熱力學溫度以 T 表之，攝氏溫度以 t 表之，溫度 273.15 K 以 T <sub>0</sub> 表之，則三者之關係為 t = T - T <sub>0</sub> 。 見導出單位編號 4.18
	1.5	安培	A	電流單位。 一安培等於二條截面為圓形無限長且極細之導線，相距一公尺平行放置於真空中，通以同值恒定電流時，使每公尺長之導線間產生千萬分之二牛頓作用力之電流。	1. 安培 (ampere) 2. 一九四八年國際權度大會決議。
	1.6	燭光	cd	光強度單位。 一燭光等於頻率 $540 \times 10^{12}$ (540 000 000 000 000 或 540 太) 赫之光源發出之單色輻射，在一定方向每立徑之放射強度為 $\frac{1}{683}$ 瓦特之發光強度。	1. 燭光 (candela) 2. 一九七九年國際權度大會決議。

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
基本單位	1.7	莫耳	mol	物質量單位。 一莫耳為物質系統中所含之基本顆粒數等於碳十二之質量為千分之十二公斤時所含原子顆粒數之物質量。	1. 莫耳 (mole) 2. 一九七一年國際權度大會決議。 3. 基本粒數必須詳加記載，因其可能為原子、分子、離子、電子、其他粒子或為此等粒子之組合群。

## 二、補助單位

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
補助單位	2.1	徑	rad	平面角單位。 一徑等於自圓周上截取一段與圓半徑等長之圓弧所張圓心角之角量。實用上以度為單位。一度等於自圓周上截取三六徑分之一圓弧所張圓心角之角量。	1. 徑 (radian) 2. 一度以「1°」表示。
	2.2	立徑	sr	立體角單位。 一立徑等於自圓球面上切取之面積與球半徑平方相等之球面所張球心角之立體角量。	立徑 (steradian)

## 三、導出單位 (以基本單位或補助單位表示者)

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
導出單位	3.1	平方公尺	m <sup>2</sup>	面積單位。 一平方公尺，為每邊長一公尺之正方形面積。	面積 (area)
	3.2	立方公尺	m <sup>3</sup>	體積單位。 一立方公尺，為每邊長一公尺之正方體體積。	體積 (volume)
	3.3	公尺每秒	m/s	速度單位。 一公尺每秒，為等速運動之物體於每秒之時間作一公尺位移之速度。	1. 速度 (velocity) 2. 名稱亦可寫作公尺／秒。

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
導出單位 (以基本單位或補助單位表示者)	3.4	公尺 每 秒 秒	m/s <sup>2</sup>	加速度單位。 一公尺每秒秒，為等加速運動之物體於每秒之時間內增加一 m/s 速度之加速度。	1. 加速度 (acceleration) 2. 名稱亦可寫作公尺/(秒·秒) 或公尺/秒 <sup>2</sup> 。
	3.5	公斤 每立方公尺	kg/m <sup>3</sup>	密度單位。 一公斤每立方公尺，為均勻物質每立方公尺之體積中有一公斤質量之密度。	1. 密度 (density) 2. 名稱亦可寫作公斤/立方公尺。
	3.6	莫耳 每立方公尺	mol/m <sup>3</sup>	乙物質濃度單位。 一莫耳每立方公尺，為每立方公尺均勻物質中有一莫耳之物質之濃度。	1. 乙物質濃度 (concentration of substance B) 2. 名稱亦可寫作莫耳/立方公尺。
	3.7	立方公尺 每 公 斤	m <sup>3</sup> /kg	比容單位。 一立方公尺每公斤，為每公斤質量之均勻物質有一立方公尺體積之比容。	1. 比容 (specific volume) 2. 名稱亦可寫作立方公尺/公斤。
	3.8	燭 光 每平方公尺	cd/m <sup>2</sup>	亮度單位。 一燭光平方公尺，為在均勻照射下每平方公尺之面積有一燭光強度之亮度。	1. 亮度 (luminance) 2. 名稱亦可寫作燭光/平方公尺。
	3.9	徑 每 秒	rad/s	角速度單位。 一徑每秒，為等角速運動之物體於每秒之時間作一徑角位移之角速度。	1. 角速度 (angular velocity) 2. 名稱亦可寫作徑/秒。
	3.10	徑 每 秒 秒	rad/s <sup>2</sup>	角加速度單位。 一徑每秒秒，為等角加速度運動之物體於每秒之時間內增加一 rad/s 角速度之角加速度。	1. 角加速度 (angular acceleration) 2. 名稱亦可寫作徑/(秒·秒) 或徑/秒 <sup>2</sup> 。
	3.11	立方公尺 每 秒	m <sup>3</sup> /s	流量單位。 一立方公尺每秒，為流體每秒流過一參考面之體積為一立方公尺之流量。	1. 流量 (volume flow rate) 2. 名稱亦可寫作立方公尺/秒。
	3.12	公斤 每 秒	kg/s	質量流量單位。 一公斤每秒，為流體每秒流過一參考面之質量為一公斤之流量。	1. 質量流量 (mass flow rate) 2. 名稱亦可寫作公斤/秒。

#### 四、導出單位 (以特定名稱表示者)

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
導出單位 (以特定名稱表示者)	4.1	赫	Hz	頻率單位。 一赫，為每秒振動一週之頻率。	1. 頻率 (frequency) 2. 赫 (hertz)
	4.2	牛頓	N	力單位。 一牛頓，為一公斤質量之物體產生一 $\text{m/s}^2$ 之加速度時所承受之力。 $(\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2})$	1. 力 (force) 2. 牛頓 (newton)
	4.3	帕斯卡	Pa	壓力單位。 一帕斯卡，為每平方公尺之面積當均勻承受一牛頓之垂直力時之壓力。 $(\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2})$ 應力亦用此同一單位。	1. 壓力 (pressure) 2. 應力 (stress) 3. 帕斯卡 (pascal)
	4.4	焦耳	J	功、能、熱量單位。 一焦耳，為一牛頓之力作用於物體上，使作用點沿力之方向增加一公尺位移時其力與移位之乘積。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2})$	1. 功 (work) 2. 能 (energy) 3. 熱量 (quantity of heat) 4. 焦耳 (joule)
	4.5	瓦特	W	功率單位。 一瓦特，為每秒作功一焦耳之功率。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3})$ 輻射通量亦用此同一單位。	1. 功率 (power) 2. 輻射通量 (radiant flux) 3. 瓦特 (watt)
	4.6	庫侖	C	電量單位 一庫侖，為每秒以安培之恒定電流所傳送之電量。 $(\text{A} \cdot \text{s})$	1. 電量 (quantity of electricity) 2. 庫侖 (coulomb)
	4.7	伏特	V	電位、電位差 (俗稱電壓) 單位。 一伏特，為一安培電流通過某導線所消耗之功率為一瓦特時，該導線兩端間之電位差。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1})$ 電動勢亦用此同一單位。	1. 電位 (electric potential) 2. 電位差 (electric potential difference) 3. 電動勢 (electromotive force)
	4.8	歐姆	$\Omega$	電阻單位。 一歐姆，為一安培之恒定電流通過某段導線，其電位差為一伏特時，該段導線所具之電阻。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2})$	1. 電阻 (electric resistance) 2. 歐姆 (ohm)
	4.9	法拉	F	電容單位。 一法拉，為當平行板電容器之充電量為一庫侖，其兩極間之電位差為一伏特時，該電容器之電容。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2)$ 。	1. 電容 (capacitance) 2. 法拉 (farad)

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
導出單位 (以特定名稱表示者)	4.10	韋伯	Wb	磁通量單位。 一韋伯，為一匝線圈之磁通量在一秒內均勻遞減至零而產生一伏特之電動勢。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1})$	1. 磁通量 (magnetic flux) 2. 韋伯 (weber)
	4.11	特士拉	T	磁通量密度單位。 一特士拉，為一韋伯平方公尺。 $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1})$	1. 通量密度 (magnetic flux density) 2. 特士拉 (tesla)
	4.12	亨利	H	電感單位。 一亨利，為封閉電路上之電流以每秒一安培之變率變化所生之電動勢為一伏特時該電路之電感。 $(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2})$	1. 電感 (inductance) 2. 亨利 (henry)
	4.13	流明	lm	光通量(光束)單位。 一流明，為由一燭光均勻光強度之點光源所放射於一立徑之立體角範圍內之光通量。 $(\text{cd} \cdot \text{sr})$	1. 光通量 (luminous flux) 2. 流明 (lumen)
	4.14	勒克司	lx	照度單位。 一勒克司，為一流明之光通量垂直照射於一平方公尺平面之照度。 $(\text{m}^{-2} \cdot \text{cd} \cdot \text{sr})$	1. 照度 (illuminance) 2. 勒克司 (lux)
	4.15	貝克勒	Bq	放射度單位。 一貝克勒，為放射性核種每秒蛻變一次時之放射度。 $(\text{s}^{-1})$	1. 放射度 [activity (of a radionuclide)] 2. 貝克勒 (becquerel)
	4.16	格列	Gy	吸收劑量單位。 一格列，為放射線射入物質時每公斤物質吸收一焦耳之能量。 $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	1. 吸收劑量 (absorbed dose) 2. 格列 (gray)
	4.17	西門	S	電導單位。 一西門，為導體兩端之電位差為一伏特產生一安培電流時該導體之電導。 $(\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{g}^3 \cdot \text{A}^2)$	1. 電導 (conductance) 2. 西門 (siemens)
	4.18	攝度	°C	攝氏溫度單位。 溫差，一攝度等於一克耳文，表示攝氏溫度時，攝度為代替克耳文之特別名稱。溫度除熱力學溫度(符號為 T)以克耳文表示外，亦得使用攝度(符號為 t)表示之，攝度與熱力學溫度之關係為： $t = T - T_0$ 式中 $T_0 = 273.15 \text{ K}$	1. 攝氏溫度 (Celsius temperature) 2. 攝度 (degree celsius) 3. 見基本單位，編號 1.4 說明。

## 五、導出單位 (以基本單位、補助單位及特定名稱之導出單位表示者)

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
導出單位 (以基本單位、 補助單位及特定名稱之 導出單位表示者)	5.1	牛頓公尺	$N \cdot m$	力矩單位。 $(m^2 \cdot kg \cdot s^{-2})$	1. 力矩 (moment of force) 2. 名稱亦可寫作牛頓－公尺。
	5.2	焦耳每公斤	$J/kg$	比能單位。 $(m^2 \cdot s^{-2})$	1. 比能 (specific energy) 2. 名稱亦可寫作焦耳／公斤
	5.3	瓦特 每平方公尺	$W/m^2$	熱通量密度、輻射照度、 功率密度單位。 $(kg \cdot s^{-3})$	1. 熱通量密度 (heat flux density) 2. 輻射照度 (irradiance) 3. 功率密度 (power density) 4. 名稱亦可寫作瓦特／平方 公尺。
	5.4	焦耳 每克耳文	$J/K$	熱容量、熵單位。 $(m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1})$	1. 熱容量 (heat capacity) 2. 熵 (entropy)。 3. 名稱亦可寫作焦耳／克耳 文。
	5.5	焦耳每公斤 克耳文	$J/$ $(kg \cdot K)$	比熱容量、比熵單位。 $(m^2 \cdot g^{-2} \cdot K^{-1})$	1. 比熱容量 (specific heat capacity) 2. 比熵 (specific entropy) 3. 名稱亦可寫作焦耳／(公斤 －克耳文)。
	5.6	瓦特每公尺 克耳文	$W/$ $(m \cdot K)$	導熱係數單位。 $(m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1})$	1. 導熱係數 (thermal conductivity) 2. 名稱亦可寫作瓦特／(公尺 －克耳文)。
	5.7	焦耳 每莫耳	$J/mol$	莫焦能單位。 $(m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1})$	1. 莫耳能 (molar energy) 2. 名稱亦可寫作焦耳／莫耳
	5.8	焦耳每莫耳 克耳文	$J/$ $(mol \cdot K)$	莫耳熱容量單位。 $(m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1})$	1. 莫耳熱容量 (molar heat capacity) 2. 名稱亦可寫作焦耳／(莫耳 －克耳文)。

單位 種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註
	編號	名稱			
導出單位 (以基本單位、 補助單位及特定名稱之 導出單位表示者)	5.9	伏特每公尺	V/m	電場強度單位。 ( $m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$ )	1. 電場強度 (electric field strength) 2. 名稱亦可寫作伏特／公尺。
	5.10	庫倫 每立方公尺	C/m <sup>3</sup>	電量密度單位。 ( $m^{-3} \cdot s \cdot A$ )	1. 電量密度 (electric charge density) 2. 名稱亦可寫作庫倫／立方公尺。
	5.11	庫倫 每平方公尺	C/m <sup>2</sup>	電通量密度、電極化密度、 電量面密度單位。 ( $m^{-2} \cdot s \cdot A$ )	1. 電通量密度 (electric flux density) 2. 電極化密度 (electric polarization density) 3. 電量面密度 (electric surface density) 4. 名稱亦可寫作庫倫／平方公尺。
	5.12	法拉每公尺	F/m	介電係數單位。 ( $m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$ )	1. 介電係數 (permittivity) 2. 名稱亦可寫作法拉／公尺
	5.13	亨利每公尺	H/m	磁導率單位。 ( $m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$ )	1. 磁導率 (permeability) 2. 名稱亦可寫作亨利／公尺
	5.14	瓦特每立徑	W/sr	輻射強度單位。 ( $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$ )	1. 輻射強度 (radiant intensity) 2. 名稱亦可寫作瓦特／立徑
	5.15	瓦特每平方 公尺立徑	W/ (m <sup>2</sup> · sr)	輻射亮度單位。 ( $kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$ )	1. 輻射亮度 (radiance) 2. 名稱亦可寫作瓦特／(平方公尺－立徑)
	5.16	庫倫每公斤	C/kg	照射 (X 及 $\gamma$ 射線) 單位。 ( $kg^{-1} \cdot s \cdot A$ )	1. 照射 [exposure (X& $\gamma$ rays)] 2. 名稱亦可寫作庫倫／公斤
	5.17	帕斯卡秒	Pa · s	黏度單位。 ( $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$ )	1. 黏度 (dynamic viscosity) 2. 名稱亦可寫作帕斯卡－秒
5.18	平方公尺 每 秒	m <sup>2</sup> /s	動黏度單位。 ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	1. 動黏度 (kinematic viscosity) 2. 名稱亦可寫作平方公尺／秒。	

## 六、併用單位

單位種類	單位名稱		代號	定義或說明	備註	
	編號	名稱				
併用單位	公尺之併用單位	6.1	公分	cm	等於一公尺之百分之一。	
		6.2	公里	km	等於一千公尺。	
	公斤之併用單位	6.3	公克	g	等於一公斤之千分之一。	簡稱克
		6.4	公噸	t	等於一千公斤。	
	立方公尺之併用單位	6.5	公升	l	等於一立方公尺之千分之一。	
		6.6	公秉	kl	等於一千公升或一立公尺。	
	平方公尺之併用單位	6.7	公畝	a	等於一百平方公尺。	
		6.8	公頃	ha	等於一萬平方公尺。	
	秒之併用單位	6.9	分	min	等於六十秒。	
		6.10	時	h	等於三千六百秒。	
		6.11	日	d	等於八萬六千四百秒。	
	角之併用單位	6.12	度	°	等於圓周上截取三六〇分之一圓弧所張圓心角之角量。 [( $\pi/180$ ) rad]	
		6.13	分	'	等於一度之六十分之一。	
		6.14	秒	''	等於一度之三千六百分之一。	
	長度之併用單位	6.15	浬		等於一、八五二公尺。	浬 (nautical mile)
		6.16	埃	Å	等於百億分之一 (0.000 000 000 1) 公尺。	埃 (ångström)
		6.17	節	kn	等於每時一浬之速度。	節 (knot)
	線密度之併用單位	6.18	德士	tex	等於每公尺百萬分之一 (0.000 001) 公斤。	德士 (tex)
		6.19	巴	bar	等於十萬 (100 000) 帕斯卡之壓力。	巴 (bar)

# 中文關鍵字索引

X 光機 X-ray machine 106, 112, 113

## 三劃

三極離子化真空計 triode ionization gauge 114

三電極 tripolar 63

## 四劃

分厘卡(測微器) micrometer 12-14, 19, 29, 32, 33

化學劑量計 chemical dosimeter 98-100

反射原理 principle of reflection 1

天平 balance 46-49

文氏橋 Wien bridge 63

水平 level 2, 8-10, 12, 22-24, 61-64, 66-69

水平儀 level meter 61-64, 66, 68, 69

## 五劃

加馬計數器 gamma counter 85, 86

加馬照相儀 gamma camera 104, 105, 109

加速陽極 accelerating anode 110, 111

四極式 quadrupole 121-123

平台 surface plate 4, 7, 12, 22, 39-41, 46, 62, 65, 68

平行度 parallelism 3, 19, 20, 26-28, 35, 38, 64

平坦度(平面度, 真平度) flatness 3, 4, 26-29, 35, 39-41, 63, 64, 66

平面度(平坦度, 真平度) flatness 3, 4, 26-29, 35, 39-41, 63, 64, 66

平面霍爾效應 planar Hall effect 70, 72

正電子放射電腦斷層掃描儀 positron emission tomography (PET) 101, 103

目鏡十字線 eyepiece reticle 17

## 六劃

光高溫計 pyrometer 59, 60

光陰管 photocathode 85, 110

光電倍增管 photomultiplier tube 85, 95, 104, 105

全測站 total station 8, 10

有效原子序 effective atomic number 94, 95

有效導磁係數 effective permeability 73, 74

自動尋邊器 flip-up edge sensor arm 15, 16

自熱效應 self-heating effect 52, 53

## 七劃

位移 displacement 1-3, 5-7, 12, 22, 32, 34-36, 42-45, 59, 60, 61, 126

位移量測 displacement measurement 3, 5, 7, 22

位移感測器 displacement meter 42-45

冷陰極 cold cathode 118-120

床式橋架型 bridge bed type 22, 23

投影機 projector 15, 16

貝他計數器 beta counter 87

## 八劃

放大倍率 magnification 9, 15-19, 34

放射性核種 radionuclide 89, 90, 101, 104, 108, 129

放射治療 radiation therapy 106, 107

法碼 weight 46-51

治療計畫 treatment planning 106, 107

陀螺指北儀 gyrocompass 8, 10

阿貝原則 Abbe's principle 12, 24

## 九劃

度盤規(量表) dial gauge 29, 34, 35, 38

柱式橋架型 gantry type 22, 23

活化劑 activator 94, 95

玻璃溫度計 glass thermometer 54, 55

約瑟夫遜接合結 Josephson junction 81, 82, 84

## 十劃

核磁共振儀 nuclear magnetic resonance (NMR) 78, 80

核醫藥物 radiopharmaceuticals 108, 109

浸沒線 immersion line 54

真平度 (平面度, 平坦度) flatness 3, 4, 26-29, 35, 39-41, 63, 64, 66

真直度 straightness 19, 20, 63, 64

真空計 vacuum gauge 114-120

迴旋加速器 (電子加速器) cyclotron 101-103

閃爍分析 scintillation analysis 85, 87, 92, 93

閃爍晶體 scintillation crystal 104, 105

高性能液相層析儀 high performance liquid chromatography (HPLC) 92, 93

高度規 height gauge 35-38, 41, 65-67

高度標準規 height master 36

高斯計 Gaussmeter 70-72, 77, 79, 80

## 十一劃

液體閃爍計數器 liquid scintillation counter 87, 88

淺部治療 superficial therapy 112, 113

移動橋架型 moving bridge type 22, 23

組合角尺 combination square 66, 67

袖珍劑量筆 pocket dosimeter 96, 97

通量子 fluxon 81, 82

通量閘磁力計 fluxgate magnetometer 73-75

閉環橋架型 ring bridge type 22, 25

## 十二劃

最大內切圓 maximum inscribed circle (MIC) 19, 21

最小外接圓 minimum circumscribed circle (MCC) 19, 21

最小平方圓 least squares circle (LSC) 19, 21

最小環帶圓 minimum zone circle (MZC) 19, 21

單光子發射電腦斷層掃描儀 single photon emission computed tomography (SPECT) 108, 109

彭寧放電 Penning discharge 118, 119

殘留氣體分析儀 residual gas analyzer (RGA) 121

游標 vernier 9, 10, 29-32, 37, 65

游標卡尺 vernier calipers 29, 30, 31, 36, 65

游離腔 ionization chamber 89, 90, 96, 97

游離腔偵測器 ionization chamber detector 89

測微器 (分厘卡) micrometer 12-14, 19, 29, 32, 33

發射率 emissivity 59, 60

超導量子干涉儀 superconducting quantum interference device (SQUID) 81-84

量表 (度盤規) dial gauge 29, 34, 35, 38

黑體 blackbody 59

## 十三劃

傾斜儀 inclinometer 68, 69

塊規 gauge block 13, 26-29, 36, 37

準直儀 collimator 104-106, 108, 109, 112

萬能活動量角器 universal bevel protractor 65

萬能測長儀 universal measuring machine 12-14

經緯儀 theodolite (transit) 8-11

運動誤差 motion error 5

雷射干涉儀 laser interferometer 1-4

雷射都卜勒 laser Doppler 5-7

電子加速器 (迴旋加速器) cyclotron 101-103

電子自旋共振儀 electron spin resonance (ESR) 78, 80

電子陷阱 electron trap 94

電子經緯儀座標量測系統 electronic coordinate determinate system (ECDS) 8, 10

電阻溫度係數 temperature coefficient of resistance 52, 53, 71

電阻溫度計 resistance thermometer 52, 53

電動勢 electromotive force 44, 56, 57, 76, 84, 127, 128

電腦斷層攝影 computer tomographic scan 106, 107

## 十四劃

慣用質量 conventional mass 49, 50

磁阻計 magnetoresister 78-80

磁控管 magnetron 118, 119

磁通計 fluxmeter 71, 76, 77

磁場式 magnetic sector 121-123

磁滯曲線 hysteresis curves 76, 77

遠隔治療 teletherapy 112

## 十五劃

影像重建 image reconstruction 108, 109

數位經緯儀 digital theodolite 8-10

標稱尺寸 nominal length 26-29

熱陰極離子化真空計 hot cathode ionization gauge 114, 116, 117

熱發光劑量計 thermoluminescent dosimeter (TLD) 94, 95

熱電效應 thermoelectric effect 56

熱電偶 thermocouple 56-58

線性變量差動轉換器 linear variable differential transformer (LVDT) 42, 44

質量 mass 46-50, 120-123

輝光曲線 glow curve 94

輪廓 profile 15, 16, 19-22, 25, 107

## 十六劃

劑量計測 dose measurement 87, 89, 91

劑量校正器 dose calibrator 89-91

積分器 integrator 76, 77

膨脹係數 expansion coefficient 26, 28, 54, 55

輻射偵測器 radio detector 85, 87, 90, 92

輻射劑量計 radiation dosimeter 98

霍爾元件 Hall device 70-72, 78

靜電聚焦鏡面 electrostatic focusing lens 110

## 十七劃

磷光體 phosphor 110, 111

鍍金石英絲陽極 gold-leaf quartz-fiber electrode 96, 97

## 十八劃

擺錘 pendulum 63

離子真空計 ion gauge 114-117

## 二十一劃

攝影模擬 image simulation 106, 107

驅動線圈 driving coil 73, 74



# 英文關鍵字索引

## A

Abbe's principle 阿貝原則 12, 24  
accelerating anode 加速陽極 110, 111  
activator 活化劑 94, 95

## B

balance 天平 46-49  
beta counter 貝他計數器 87  
blackbody 黑體 59  
bridge bed type 床式橋架型 22, 23

## C

chemical dosimeter 化學劑量計 98-100  
cold cathode 冷陰極 118-120  
collimator 準直儀 104-106, 108, 109, 112  
combination square 組合角尺 66, 67  
computer tomographic scan 電腦斷層攝影 106, 107  
conventional mass 慣用質量 49, 50  
cyclotron 電子加速器(迴旋加速器) 101-103

## D

dial gauge 度盤規(量表) 29, 34, 35, 38  
digital theodolite 數位經緯儀 8-10  
displacement measurement 位移量測 3, 5, 7, 22  
displacement meter 位移感測器 42-45  
displacement 位移 1-3, 5-7, 12, 22, 32, 34-36, 42-45, 59, 60, 61, 126  
dose calibrator 劑量校正器 89-91  
dose measurement 劑量計測 87, 89, 91  
driving coil 驅動線圈 73, 74

## E

effective atomic number 有效原子序 94, 95

effective permeability 有效導磁係數 73, 74  
electromotive force 電動勢 44, 56, 57, 76, 84, 127, 128  
electron spin resonance (ESR) 電子自旋共振儀 78, 80  
electron trap 電子陷阱 94  
electronic coordinate determinate system (ECDS) 電子經緯儀座標量測系統 8, 10  
electrostatic focusing lens 靜電聚焦鏡面 110  
emissivity 發射率 59, 60  
expansion coefficient 膨脹係數 26, 28, 54, 55  
eyepiece reticle 目鏡十字線 17

## F

flatness 平面度(平坦度, 真平度) 3, 4, 26-29, 35, 39-41, 63, 64, 66  
flip-up edge sensor arm 自動尋邊器 15, 16  
fluxgate magnetometer 通量閘磁力計 73-75  
fluxmeter 磁通計 71, 76, 77  
fluxon 通量子 81, 82

## G

gamma camera 加馬照相儀 104, 105, 109  
gamma counter 加馬計數器 85, 86  
gantry type 柱式橋架型 22, 23  
gauge block 塊規 13, 26-29, 36, 37  
Gaussmeter 高斯計 70-72, 77, 79, 80  
glass thermometer 玻璃溫度計 54, 55  
glow curve 輝光曲線 94  
gold-leaf quartz-fiber electrode 鍍金石英絲陽極 96, 97  
gyrocompass 陀螺指北儀 8, 10

## H

Hall device 霍爾元件 70-72, 78  
height gauge 高度規 35-38, 41, 65-67

height master 高度標準規 36  
high performance liquid chromatography (HPLC) 高性能液相層析儀 92, 93  
hot cathode ionization gauge 熱陰極離子化真空計 114, 116, 117  
hysteresis curves 磁滯曲線 76, 77

## I

image reconstruction 影像重建 108, 109  
image simulation 攝影模擬 106, 107  
immersion line 浸沒線 54  
inclinometer 傾斜儀 68, 69  
integrator 積分器 76, 77  
ion gauge 離子真空計 114-117  
ionization chamber detector 游離腔偵測器 89  
ionization chamber 游離腔 89, 90, 96, 97

## J

Josephson junction 約瑟夫遜接合結 81, 82, 84

## L

laser Doppler 雷射都卜勒 5-7  
laser interferometer 雷射干涉儀 1-4  
least squares circle (LSC) 最小平方圓 19, 21  
level meter 水平儀 61-64, 66, 68, 69  
level 水平 2, 8-10, 12, 22-24, 61-64, 66-69  
linear variable differential transformer (LVDT) 線性變量差動轉換器 42, 44  
liquid scintillation counter 液體閃爍計數器 87, 88

## M

magnetic sector 磁場式 121-123  
magnetoresister 磁阻計 78-80  
magnetron 磁控管 118, 119  
magnification 放大倍率 9, 15-19, 34  
mass 質量 46-50, 120-123  
maximum inscribed circle (MIC) 最大內切圓 19, 21  
micrometer 分厘卡(測微器) 12-14, 19, 29, 32, 33  
minimum circumscribed circle (MCC) 最小外接圓 19, 21

minimum zone circle (MZC) 最小環帶圓 19, 21  
motion error 運動誤差 5  
moving bridge type 移動橋架型 22, 23

## N

nominal length 標稱尺寸 26-29  
nuclear magnetic resonance (NMR) 核磁共振儀 78, 80

## P

parallelism 平行度 3, 19, 20, 26-28, 35, 38, 64  
pendulum 擺錘 63  
Penning discharge 彭甯放電 118, 119  
phosphor 磷光體 110, 111  
photocathode 光陰管 85, 110  
photomultiplier tube 光電倍增管 85, 95, 104, 105  
planar Hall effect 平面霍爾效應 70, 72  
pocket dosimeter 袖珍劑量筆 96, 97  
positron emission tomography (PET) 正電子放射電腦斷層掃描儀 101, 103  
principle of reflection 反射原理 1  
profile 輪廓 15, 16, 19-22, 25, 107  
projector 投影機 15, 16  
pyrometer 光高溫計 59, 60

## Q

quadrupole 四極式 121-123

## R

radiation dosimeter 輻射劑量計 98  
radiation therapy 放射治療 106, 107  
radio detector 輻射偵測器 85, 87, 90, 92  
radionuclide 放射性核種 89, 90, 101, 104, 108, 129  
radiopharmaceuticals 核醫藥物 108, 109  
residual gas analyzer (RGA) 殘留氣體分析儀 121  
resistance thermometer 電阻溫度計 52, 53  
ring bridge type 閉環橋架型 22, 25

## S

scintillation analysis 閃爍分析 85, 87, 92, 93

scintillation crystal 閃爍晶體 104, 105  
self-heating effect 自熱效應 52, 53  
single photon emission computed tomography (SPECT) 單光子發射電腦斷層掃描儀 108, 109  
straightness 真直度 19, 20, 63, 64  
superconducting quantum interference device (SQUID) 超導量子干涉儀 81-84  
superficial therapy 淺部治療 112, 113  
surface plate 平台 4, 7, 12, 22, 39-41, 46, 62, 65, 68

## T

teletherapy 遠隔治療 112  
temperature coefficient of resistance 電阻溫度係數 52, 53, 71  
theodolite (transit) 經緯儀 8-11  
thermocouple 熱電偶 56-58  
thermoelectric effect 熱電效應 56  
thermolumnescent dosimeter (TLD) 熱發光劑量計 94, 95  
total station 全測站 8, 10

treatment planning 治療計畫 106, 107  
triode ionization gauge 三極離子化真空計 114  
tripolar 三電極 63

## U

universal bevel protractor 萬能活動量角器 65  
universal measuring machine 萬能測長儀 12-14

## V

vacuum gauge 真空計 114-120  
vernier calipers 游標卡尺 29, 30, 31, 36, 65  
vernier 游標 9, 10, 29-32, 37, 65

## W

weight 法碼 46-51  
Wien bridge 文氏橋 63

## X

X-ray machine X光機 106, 112, 113

---

## 儀器總覽－基本物理量量測儀器

---

發行人／黃文雄

發行所／行政院國家科學委員會精密儀器發展中心

新竹市科學工業園區研發六路 20 號

電話：(03) 5779911 轉 303, 304

傳真：(03) 5773947

編輯／伍秀菁・汪若文・林美吟

美術編輯／吳振勇

初版／中華民國八十七年十月

初版二刷／中華民國九十二年二月

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第 2661 號

定價／單冊新台幣 300 元・全套新台幣 2200 元

郵撥戶號／0017343-1 國科會精密儀器發展中心

打字／志丞商業設計社 (03) 5617562

印刷／泰銘照相製版社有限公司 (06) 2910838

---

ISBN 957-02-2526-2 (套)

ISBN 957-02-2528-9

國家圖書館出版品預行編目資料

儀器總覽 = Introduction to instrumentation  
/ 伍秀菁, 汪若文, 林美吟編輯. -- 初版. --  
新竹市 : 國科會精儀中心, 民87  
冊 ; 公分  
含索引  
ISBN 957-02-2526-2 (一套 : 平裝)

1. 精密機械工業 - 儀器 - 手冊, 便覽

471.026

87012756