

精密角度量測儀器 - 自準直儀的介紹

自準直儀 (autocollimator) 又稱自動視準儀，是精密的角度量測儀器，在工程上可用來進行角度、平行度、直線度、平面度與直角度的測量，在校正領域中是重要的角度感測儀器。角度雖是長度的導出單位，但對精密量測的需求卻日益重要。角度標準一般以角度塊規、方規或多邊規作為標準，但不論是量測或是校正，均須利用自準直儀。鑑於角度量測儀器的介紹並不多見，因此特撰本文，以供從事角度量測與校正工作之讀者參考。

何 傑

一、前言

自準直儀 (autocollimator) 又稱自動視準儀，是靈敏而極為精確之光學儀器，以測量光學反射平面極小之角度偏轉⁽¹⁾。一般可分為筒型、折疊光束型與電子等三種類型，依軸向又可分為雙軸與單軸式兩種，是角度校正的重要觀測儀器。傳統上用來校正直規、平台，近來因電子式自準直儀解析度增高，因此可用來校正角度標準件，如精密分度盤、多邊規、角度塊規等儀器。

在介紹自準直儀之前，先說明角度的單位。角度一般以圓心角表示，又稱弧度，圓周的弧度是 2π (radian)，也就是 360° (度, degree)，每度可分成 $60'$ (分, min)，每分為 $60''$ (秒, sec)，是大家所熟知的。軍方則將 360 度分成 6400 密位 (mil)，或

何傑先生為美國壬色列理工學院機械博士，現任中山科學院系統維護中心儀器校正組技正。

是 400 新度 (gon) 以便於處理運用。在實際上以長度度量導出時，亦可用比例方式表示，如 X 軸位移 1000 mm，Y 軸位移 $1 \mu\text{m}$ ，其角度變化即為 0.2 秒，又稱傾斜度為 1 ppm (百萬分之一)，利用此原理即可進行自準直儀之校正工作。

二、角度標準介紹

角度在二維空間的平面上，可以利用兩條直線的交叉來表示。在學校上數學課時，可以利用量角器求出，但是在工業上實際精密角度標準的建立，必須依附在三維空間的實體中，因此就以加工精密的兩平面夾角作為標準。平面因加工關係又稱鏡面，其夾角亦可利用組合角尺來量測，但解析度一般只能到分，無法分辨秒的差異，因此必須利用自準直儀方可分辨。

角度塊規、方規、多邊規均為角度量測的一種

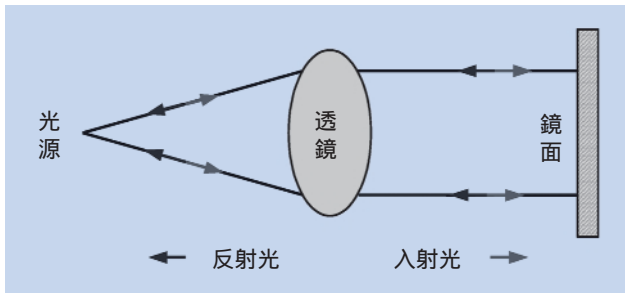


圖 1. 自準直儀工作原理 (鏡面與光線垂直)。

標準，其量測面均加工成高精度之鏡面，而以兩鏡面所夾之平面角作為校正與量測的標準。角度塊規一般可分為 11、15 與 17 塊一組，角度有 45°、30°、15°、5°、3°、1°、30′、20′、5′、3′、1′、30″、20″、5″、3″、1″ 與平行塊規，方規顧名思義則為四面均成九十度之正方形，多邊規一般常見為八面鏡與十二面鏡，其平面夾角分別為 45° 與 30°。

至於角度量測的儀器，一般有量角器、組合角尺、水平儀、傾斜儀、經緯儀、轉鏡儀與自準直儀等，種類繁多，以下僅針對自準直儀加以介紹。

三、自準直儀的介紹

自準直儀是一種光學校準儀器，由準直儀 (collimator) 發展而來，而準直儀目的在提供空間的一條基準線以供校準之用，外觀為加工精密之圓筒，兩端鏡面均有精細的十字刻劃 (又稱標靶)，一般以兩個靶至七個靶的準直儀為多。

但準直儀僅提供標靶以便望遠鏡、經緯儀之觀

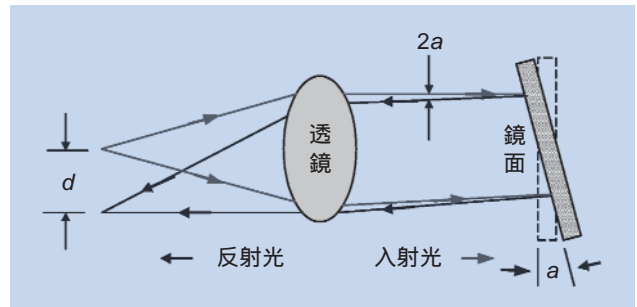


圖 2. 自準直儀工作原理 (鏡面與光線不垂直)。

測與校準，本身無目鏡可供觀測。而自準直儀與望遠鏡相似，可主動觀測目標，且與準直儀之不同點在於本身具有光源，透過分光器將十字靶自筒心向目標投射，經過鏡面反射後與目鏡十字絲將產生偏移現象，透過光學微分尺之旋轉，可以測出鏡面偏移之角度，又可分为單軸與雙軸量測兩種準直儀。近年來自準直儀已發展至不需人為觀察，自動顯示偏移角度之電子式自動準直儀。圖 1 為光源經過凸透鏡投射到垂直之鏡面時之情況。圖 2 為鏡面偏移時，反射之角度呈兩倍偏移，此即為工作原理。圖 3 則為加上光源與分光器之自準直儀內部之示意圖。

自準直儀一般可分為三種類型。筒型自準直儀：有一管狀外殼，安裝於可調整之三角座上，以目鏡觀測與分釐卡螺桿 (光學微分尺) 來測定鏡面之偏角。折疊光束型自準直儀：將光路以偏轉稜鏡與反射鏡加以偏移使成 Z 字形，以縮短儀具圓筒之長度。電子式自準直儀：操作原理與前二者相同，只是用一個位置感應光電二極體取代觀測者之肉眼，因此必須有附帶顯示器，又因須有

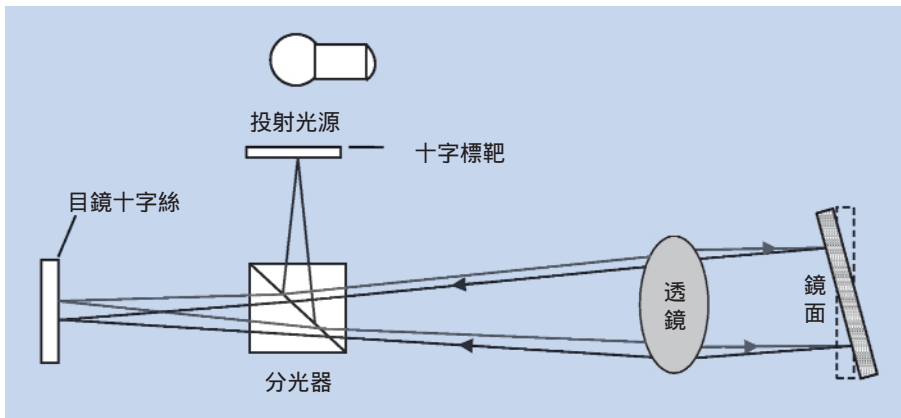


圖 3. 自準直儀工作原理 (分光器 90 度折射)。

鏡面方能顯示，因此附件又有鏡組與雷射光組件以便光路校準之用，至於平台之校正更須利用手提電腦與軟體程式處理自準直儀觀測之數據。

圖 4 為利用兩台自準直儀校正十二面鏡之佈置圖。圖 5 為電子式自準直儀校正精密分度盤之佈置圖。一般電子式自準直儀之解析度由 1" (秒)、0.5"、0.2"、0.1" 進步至 0.05"，甚至 0.01"，但是其觀測之範圍亦縮小至 2000，也就是 0.6° 左右，因此無法進行大角度之觀測。

四、自準直儀的校正

自準直儀既然是極精密的角度量測儀具，因此在量測前必須加以校正，方能保證其量測的品質。其校正方法為利用水平儀校正器 (亦稱小角度產生器) 所產生之小角度來測量待校自準直儀之角度，

其佈置如圖 6 所示，圖中為雙軸式自準直儀進行角度校正工作情形。將反射鏡置於水平儀校正器上，以自準直儀觀測標準角度，電子式自準直儀因不需觀測，亦可將反射鏡與自準直儀位置互換進行校正。校正時先將校正器調整至水平，再將自準直儀之觀測視線調整至與鏡面垂直進行歸零動作，接著按照其全尺度進行五至十點之校正。其原理為利用手輪調整傾斜台之高低，以測微器 (解析度 0.01 μm 之量表) 量測此一高度，除以校正器之跨距 (1 公尺)，可利用三角函數計算出傾斜角度，再以此一角度為基準，校正待校自準直儀之器示值。

校正之前，除了待校件之清潔與外觀檢查外，必須檢查自準直儀底座之平坦度及穩固性，若底座不夠穩固，將影響校正結果，且必須注意，自準直儀之觀測軸向需與水平儀校正器之轉動軸向垂直。

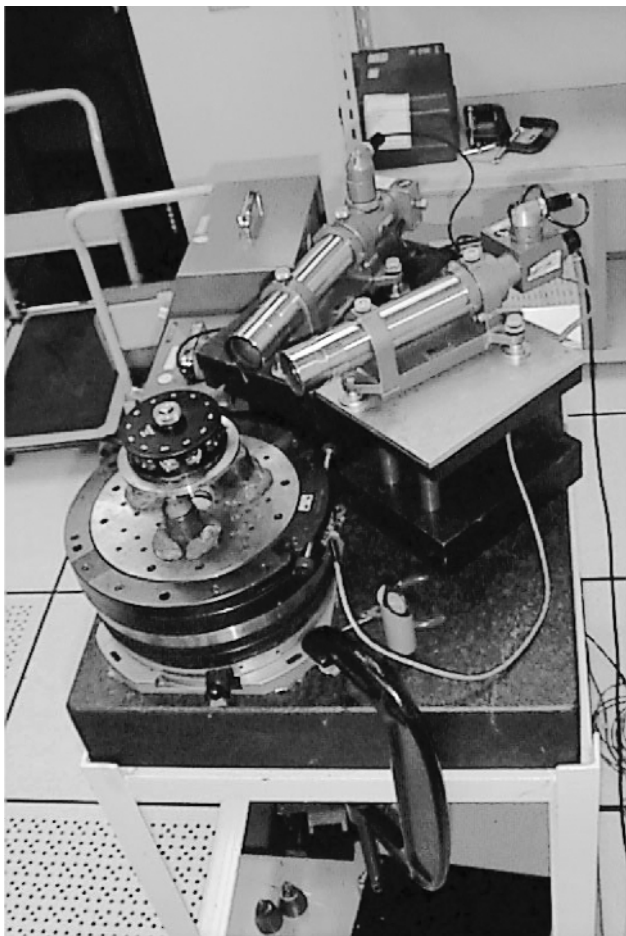


圖 4. 利用兩台自準直儀校正十二面鏡。



圖 5. 電子式自準直儀校正精密分度盤。

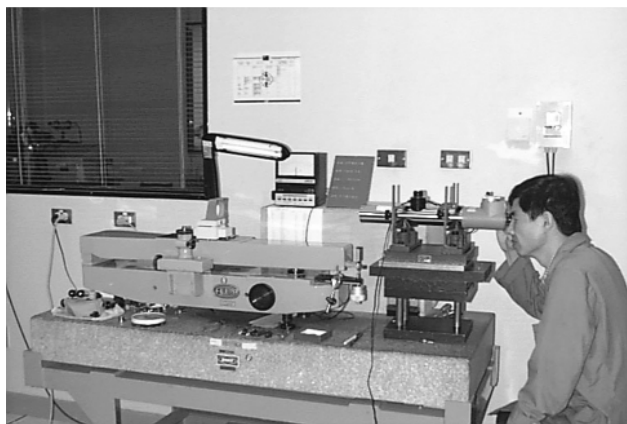


圖 6. 雙軸式自準直儀校正佈置圖。

又雙軸式自準直儀在依上述方法校正後，必須將 X 軸旋轉 90°，進行 Y 軸向之校正工作。

五、不確定度分析

由於國際上推行 ISO 9000 系列的品質認證工作，以保證通過認證單位的工作品質，中華民國實驗室認證體系 (CNLA) 為了保證實驗室的校正與測量品質，也要求針對校正系統提出不確定度分析，因此將其步驟分別敘述如下。首先需建立量測方程式，決定量測量之主要參數為何。接著將方程式針對各參數偏微分，求出其靈敏度係數，顯示參數變化對量測量的影響，再將各參數在實驗室中最大的變化量代入公式，為消除負數的影響，因此取各參數影響量的平方和再開平方根即得，詳述如下。

1. 量測方程式之建立

量測不確定度評估之第一步驟應決定待測量，並建立量測之數學模式，亦即慣稱之量測方程式⁽²⁾。依前述之自準直儀校正方法，其產生之標準角度為：

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{L}{R}\right) + F \quad (1)$$

$$\text{而 } L = L_s[1 + \alpha_L(t_L - 20)] \quad (2)$$

$$R = R_s[1 + \alpha_R(t_R - 20)] \quad (3)$$

其中

- θ ：標準角度 (由小角度產生器產生)
- L ：傾斜台之傾斜高度 (範圍 ± 4.95 mm，以量表觀測，是溫度與膨脹係數的函數)
- R ：傾斜台之跨距 (長度 1 m，是溫度與膨脹係數的函數)
- α ：膨脹係數 (11.5 ± 1) $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，下標表示材質不同)
- t ：環境溫度 (以 20 $^\circ\text{C}$ 為基準，下標為 s)
- F ：未考慮到之誤差，如解析度、平坦度、環境壓力濕度與觀測軸向偏差等。

2. 不確定度方程式

依據 ISO GUM⁽³⁾ 對組合標準不確定度之定義如公式 (4) 所示：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (4)$$

其意義為 y 函數之不確定度為其所有參數 x 之不確定的總和，平方則是為了消除負數之影響， $u(x_i)$ 為 x_i 項之標準不確定度； $\left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]$ 為其靈敏度係數。

將式 (1)、(2)、(3) 代入式 (4)，可得角度函數 θ (公式中以 E 代表) 之組合標準不確定度如下：

$$\begin{aligned} u_c^2(E) = & \left[\frac{\partial E}{\partial L_s} \right]^2 u^2(L_s) + \left[\frac{\partial E}{\partial R_s} \right]^2 u^2(R_s) \\ & + \left[\frac{\partial E}{\partial \alpha_L} \right]^2 u^2(\alpha_L) + \left[\frac{\partial E}{\partial t_L} \right]^2 u^2(t_L) \\ & + \left[\frac{\partial E}{\partial \alpha_R} \right]^2 u^2(\alpha_R) + \left[\frac{\partial E}{\partial t_R} \right]^2 u^2(t_R) \\ & + \left[\frac{\partial E}{\partial F} \right]^2 u^2(F) \end{aligned} \quad (5)$$

其中，各參數之靈敏度係數分述如下：

$$\frac{\partial E}{\partial L_s} = \frac{1}{R_s \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R}\right)^2}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial R_s} = \frac{-L_s}{R_s^2 \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R}\right)^2}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t_L} = \frac{L_s \alpha_L}{R_s \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R}\right)^2} (1 + \alpha_R t_R)}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha_R} = \frac{-L_s t_R}{R_s \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R}\right)^2} (1 + \alpha_L t_L)^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t_R} = \frac{-L_s \alpha_R}{R_s \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R}\right)^2}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial F} = 1$$

3. 不確定度分項分析⁽⁴⁾

將各參數之數值與最大變化量代入以上公

表 1. 不確定度分項之綜整列表。

不確定度來源	估計量	機率分佈	標準不確定度	靈敏係數	不確定度分量	自由度
高度			0.15 μm	0.001	0.03''	12.5
1. 重複性誤差	0.08 μm	矩形	0.08/2 $\sqrt{3}$ μm			
2. 磁滯性誤差	0.08 μm	矩形	0.08/2 $\sqrt{3}$ μm			
3. 校正追溯	0.5 μm	矩形	0.5/2 $\sqrt{3}$ μm			
跨距	30 mm	矩形	0.5/2 $\sqrt{3}$ μm	-5×10^{-6}	0.009''	12.5
高度熱膨脹係數差異	$\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	矩形	$1 \times 10^{-6} / \sqrt{3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	5×10^{-3}	0.001''	12.5
高度熱膨脹係數差異	$\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	矩形	$1 \times 10^{-6} / \sqrt{3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-5×10^{-3}	0.001''	12.5
高度溫度	$\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	矩形	$1 / \sqrt{3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	5.75×10^{-5}	0.005''	12.5
跨距溫度	$\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	矩形	$1 / \sqrt{3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-5.75×10^{-5}	0.005''	12.5
其他	0.1''	矩形	0.1/2 $\sqrt{3}$ ''	2	0.03''	50
(自準直儀之解析度)	0.2''	矩形	0.2/2 $\sqrt{3}$ ''	2	0.06''	50
	0.5''	矩形	0.5/2 $\sqrt{3}$ ''	2	0.15''	50

式，即可求出公式 (4) 之組合標準不確定度，分項分析如下，可參考表 1 之綜整。

- 決定參數 L 之變化量：傾斜高度之量測單元為電子量表，量測範圍 2 mm。其變化分為三項：重複性誤差最大為 0.08 μm ；遲滯性誤差亦為 0.08 μm (依據原廠型錄資料)；校正追溯結果，量測不確定度為 1 μm ，信賴水準 95%， k 值為 2，因此估計量為 0.5 μm 。機率分布假設均為矩形，相對不確定性為 20%，依據公式可計算其自由度為

$$v = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 = 12.5$$

- 決定參數 R 之變化量：跨距之不確定度，校正追溯結果以 0.030 mm 為量測不確定度，假設此不確定度估算之相對不確定性為 20%，則其自由度為 12.5。
- 決定參數 α 之變化量：依據自準直儀校正系統之鋼質材質，其熱膨脹係數為 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，故採用 $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 為其量測不確定度，假設此不確定度估算之相對不確定性為 20%，則其自由度為 12.5。
- 決定參數 t 之變化量：依據實驗室環境規格 $20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，故採用 $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 為其量測不確定度，假設

此不確定度估算之相對不確定性為 20%，則其自由度為 12.5。

- 決定參數 F 之變化量：由於校正自準直儀時，須根據待校件之解析度來讀取數據，一般有 0.1''、0.2'' 與 0.5'' 三種，假設此部分之誤差為矩形分布，其不確定度應將解析度除以 $2\sqrt{3}$ ，並假設此不確定度估算之相對不確定性為 10%，則其自由度為 50。
- 解析度之靈敏度係數為 2，因為自準直儀校正時，一般在歸零時與量測時，都需讀取顯示器讀值，所以解析度造之誤差應發生兩次。

4. 組合標準不確定度

組合標準不確定度可將靈敏度係數和各項標準不確定度代入式 (4) 中計算而得：

$$\begin{aligned} u_c^2(E) &= 0.03''^2 + 0.009''^2 + 0.001''^2 + 0.001''^2 \\ &\quad + 0.005''^2 + 0.005''^2 + F^2 \\ &= 0.001033 + F^2 \end{aligned}$$

- $u_c(E) = 0.068''$ ($F = 0.06''$)
- $u_c(E) = 0.124''$ ($F = 0.12''$)
- $u_c(E) = 0.302''$ ($F = 0.30''$)

5. 有效自由度之計算

綜合以上所述，將各不確定度分項之自由度代

入 Welch-Satterthwaite 公式計算得知有效自由度，其中

1. $v_{\text{eff}} = 66.12$ ($F = 0.06''$)
2. $v_{\text{eff}} = 56.54$ ($F = 0.12''$)
3. $v_{\text{eff}} = 51.1$ ($F = 0.30''$)

6. 擴充不確定度

通常量測不確定度係以擴充不確定度 (expanded uncertainty, U) 方式表示，其定義如公式 (6) 所示：

$$U = k \times u_c(E) \quad (6)$$

本例自由度分別為 67、57 與 52 時，採 95% 之信賴水準，可推算 k 值均大約為 2.01：

$$u_c(E) = 2.01 \times 0.068'' = 0.137'' = 0.14''$$

$$u_c(E) = 2.01 \times 0.124'' = 0.25''$$

$$u_c(E) = 2.01 \times 0.302'' = 0.61''$$

六、結論

本文主旨在介紹執行角度校正之主要工具—自準直儀的工作原理與其校正方法。至於不確定度分析是中華民國實驗室認證體系為了保障認證實驗室的校正與量測品質，在評審時需準備的必要品質文件，必須先通過文件審查，方有實地評審的機會，因此一併介紹以供讀者參考。

筒型與折疊光束型自準直儀因觀測時使用肉眼並以分釐頭調整讀數，因此操作人員必須熟練儀器操作，如物鏡、目鏡焦距之調整與光源明亮調整，均取決於個人視力條件，因此技術與經驗是自準直

儀校正工作之先決條件。

電子式自準直儀雖能自動顯示反射鏡之角度，但其觀測軸向應與角度產生平面平行，因此校正前須先執行光學校準工作。雙軸式自準直儀一般有卡榫定位，調整方式為以全範圍觀測角度變化，而垂直軸向之讀數變化最小為原則。

經過上述分析後，可知此校正之不確定度最主要之來源在自準直儀之解析度，其次才是標準件 (小角度產生器)。但解析度高時，標準件之不確定度亦將漸行重要，且解析度高者因其量測範圍較小，重複性易受環境影響，所以校正難度較高。

不確定度分析與評估不僅是校正實驗室通過認證的充分與必要條件，校正實驗室身為量測實驗室的不確定度源頭，必須提供角度校正之不確定度評估。但如分析之不確定度過大，量測實驗室儀器不僅追溯產生困難，量測數據亦將因不確定超過量測規格，變成毫無意義。

根據實際校正經驗與不確定度分析之結果可知，縮小不確定度的方法為：標準件提供之角度必須穩定，待校件之解析度與重複性要高，

校正人員須熟悉校正程序與儀器操作，實驗室環境須控制溫度、溼度、噪音、振動、光線、氣流等環境。最後加上技術與經驗的累積，方可達到最小的不確定度。

參考文獻

1. 精密量具及機件檢驗，精密量具及機件檢驗編輯委會，中華民國 89 年 2 月 10 日。
2. 量測不確定度實務研討會 (基礎篇)，中華民國計量工程學會，中華民國 87 年 3 月 4 日。
3. ISO GUIDE (a guide to the assessment of uncertainty in measurement, 亦稱 ISO GUM), 1993 第一版, 1995 第二版。
4. 何傑, 自準直儀校正系統不確定度評估 (UN-AN-0003), 中山科學研究院系維中心儀器校正組, 中華民國 88 年 4 月 18 日。