

# 精密角度量測儀器－自動定位分度盤

## Precision Angular Measurement Instrument—Table Control Ultradex

何傑

Chieh Ho

自動定位分度盤又稱精密分度盤，與一般分度盤不同的是，不需手動，利用壓縮空氣作為動力，操作人員直接在控制台面板上以觸控或是使用電腦鍵盤來操控，因此比起傳統手動分度盤精度要高，既可作為精密角度量測儀器，更能作為精密角度加工的載具。最近某單位由於計畫需求，採購定位精度達 1/4 秒的自動定位分度盤，但驗收時對於廠商所標示的精度並無法驗證，經查詢業界各單位均無能力校正，最後特別向本組申請校正。因此撰寫本文介紹自動定位分度盤，以供從事角度量測與校正工作之讀者參考。

Table control Ultradex (precision index) is one of the most important instruments in angular measurement. When drilling a hole with an angle respect to the machining surface, the accuracy of the angle becomes very important. The table mentioned in this paper can be operated through a computer controlled system. This paper presents a convenient way of calibration Table control Ultradex. The classical way of calibrating this instrument using a standard polygon will introduce the uncertainty of itself and the instrument under test. To demonstrate the traceability uncertainty can be narrowed to 1/4 arc second, the theory of a new calibration method is introduced in this paper. Hopefully readers will have some ideas after reading it.

### 一、前言

自動定位分度盤 (table control Ultradex)，是結合傳統精密定位分度盤與工業用電腦等軟硬體而發展出的精確角度定位儀器。傳統分度盤分為底座與上盤，上盤內部有環形齒輪，以搖桿旋轉驅動螺桿使上盤旋轉至需要角度，但因齒輪有間隙，所以最佳定位精度只能達到兩弧秒，以長度來說明前進一

公尺位置的變化不超過 10 微米，也就是十萬分之一以內，而且間隙將與使用時間成正比，導致定位品質無法確保。所以有精密分度盤的產生，其內部如圖 1 所示，將上下兩圓盤之接觸面切割成 360 齒或 1440 齒的環形齒輪，旋轉時利用凸輪機構將上盤面頂起，到需要之角度再釋放凸輪機構，將上盤面放下，由於齒輪成圓環放射狀，有自動對正圓心與極佳的重複性，因此定位精度可達到 1/4 弧秒



圖 1. 精密分度盤內部構造圖。

內，但其定位角度成階梯狀無法連續。

精密的角度定位要如何校正呢？在國際上校正的佼佼者當然非美國國家標準暨科技研究院 (NIST) 莫屬，然而其角度實驗室所標榜的 Master Angle Calibration System，號稱可校正 379,080,000 個位置，解析度約達 1/300 弧秒，惟精確度僅保證至 0.25 弧秒。如此一來，此自動定位分度盤只能由該實驗室校正，其他實驗室即使使用追溯至 NIST 的角度標準件來校正，亦因追溯不確定度的增加將超過廠商之規格而無法校驗。因為每次校正時除了標準件的不確定度外，必將增加校正時的不確定度，導致組合不確定度大於追溯之不確定度。

## 二、校正方法

長度的校正最高標準就是雷射干涉儀，利用雷射的光學干涉方法找出位移的變化，角度校正亦不例外，只要找出 Y 軸相對於 X 軸的變化，自然可求出角度的變化。但雷射干涉方法有一先天條件：必須保持雷射光源不被遮斷。傳統手搖連續轉動之分度盤可以適用，但是高精度定位分度盤因為上盤必須升起與下降，將導致光源被切斷，除非設計特殊夾具，使雷射光源與上盤同步升降，否則無計可施。

在本文中討論：使用自動準直儀與八面鏡進行校正，在本刊第 128 期中介紹自動準直儀時已說明

角度標準有：角度塊規、方規及多邊規等，其量測面均加工成高精度之鏡面，所以兩鏡面所夾之平面角可作為校正與量測的標準。

自動準直儀解析度為 0.05 弧秒，八面鏡是常用多邊規的一種，由於角度標準如追溯至 NIST，將產生至少 0.25 弧秒之不確定度，而且耗費時間與金錢，因此假設八面鏡各角度均固定並無誤差，但為八個未知角度。

將八面鏡安放在自動定位分度盤之中心並加以固定，再以自動準直儀對準八面鏡之中心，命令分度盤每次旋轉 45 度，紀錄分度盤與八面鏡差值。如此旋轉三圈後再統計其平均值，以減少誤差。完成後再將八面鏡旋轉 45 度，同樣每次驅動分度盤 45 度，紀錄差值，直到完成三圈的旋轉。同樣道理將八面鏡每次旋轉 45 度，直到八面鏡旋轉一圈回到最初位置，即完成校正工作，總計八個角度位置，共計轉二十四圈。

## 三、自動定位分度盤的介紹

自動定位分度盤之上下盤均切割成 720 齒，因此每 0.5 度可定位一次，整圈計 720 個定位點。上盤解鎖後由壓縮空氣驅動頂起後，利用馬達旋轉定位，以解碼方式偵測到位後，再釋放空氣，使上盤落下自動定位並鎖定。

控制方式有自動與手動或遙控，輸入方法有電腦鍵盤、觸控面板，角度定義有絕對角度與相對角度 (如每次增加 45 度)，旋轉速度亦可調整，本文最先使用每分鐘旋轉 10 度，為了降低離心力，後改用每分鐘旋轉 3 度。

圖 2 為控制面板上顯示之操控軟體畫面，操控方法極為容易，只要輸入角度，分度盤將自動地精確定位。

## 四、自動定位分度盤的校正

校正時先將自動定位分度盤安放在校正過的大理石平台上，再將八面鏡安裝在上盤的中心，自動準直儀亦放置在大理石平台上，觀察八面鏡每旋轉 45 度的角度變化。如果順利的話，應有八組數

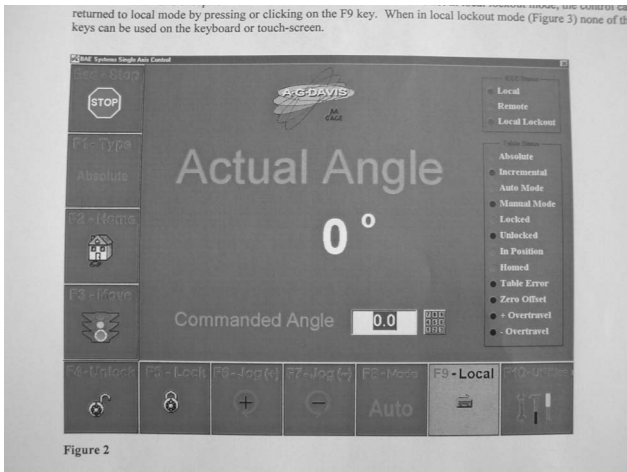


圖 2. 控制面板上顯示之操控軟體畫面。

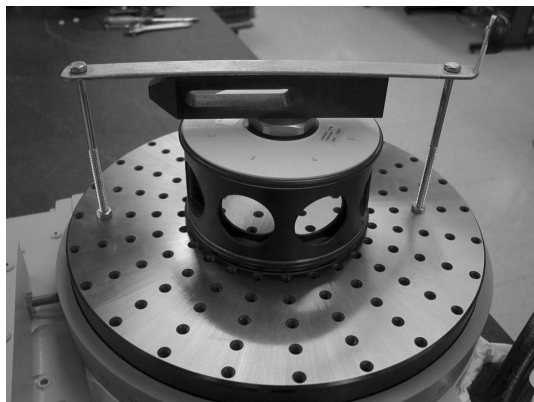


圖 3. 校正時將八面鏡固定在分度盤上。

據，每組旋轉三圈有 25 個數值，但是進行一半後，即發現誤差過大，顯示即使八面鏡、分度盤與自動準直儀雖然均在同一個大理石平台上，每次旋轉一圈後無法回到原來起點位置。雖然 Y 軸數據並無變化，顯示八面鏡底座、分度盤與大理石面仍保持平行，但八面鏡與分度盤應設法以夾具固定方可保證，分度盤旋轉後與八面鏡無相對旋轉之虞。

第二天校正時，使用兩隻長螺桿與鋁製壓條將八面鏡固定在分度盤上，如圖 3 所示，並且以大型 C 形夾將分度盤固定在大理石平台上，如圖 4 所示。同時為了縮短校正時間，並將旋轉角度增加為 90 度，如此數據將變成四組，且每組僅有 13 個數值。理論推導時更加方便，而且數據之變化由前一天的十弧秒變化，幾乎降低一個數量級 (order)，變化僅在一弧秒。

表 1. 各分度盤角度之定義。

角度	八面鏡	自動分度盤
0-90	T1	B1
90-180	T2	B2
180-270	T3	B3
270-360	T4	B4

## 五、理論推導及數據

自動定位分度盤校正之理論推導如下，首先定義各分度盤角度如表 1。

此校正步驟可分四個階段：

- (1) 當自動分度盤歸零時，將自準直儀對準八面鏡之第一面，其量測值為： $I_1$ ，此時順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第三面，其量測值為： $I_1 + B_1 - T_1$ ，再順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第五面，其量測值為： $I_1 + B_1 + B_2 - T_1 - T_2$ ，再順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第七面，其量測值為： $I_1 + B_1 + B_2 + B_3 - T_1 - T_2 - T_3$ ，再順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第一面，其量測值為： $I_1 + B_1 + B_2 + B_3 + B_4 - T_1 - T_2 - T_3 - T_4$ ，此時，八面鏡與分度盤各轉 360 度回到原來狀態，此為第一階段結束。

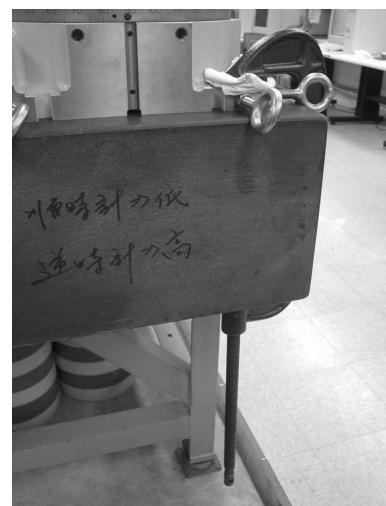


圖 4. 以大型 C 形夾將分度盤固定在大理石平台上。

如將上述五組數據分別相減，可得到  $B1 - T1$ 、 $B2 - T2$ 、 $B3 - T3$ 、 $B4 - T4$ ，四組數據，填入下方表中左邊算起第二欄。

(2) 繼而將分度盤順時針旋轉 90 度，拆開固定八面鏡之螺桿，使第一面對準自準直儀後，再鎖緊固定螺桿，此時量測值為： $I2$ ，此時順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第三面，其量測值為： $I2 + B2 - T1$ ，再順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第五面，其量測值為： $I2 + B2 + B3 - T1 - T2$ ，再順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第七面，其量測值為： $I2 + B2 + B3 + B4 - T1 - T2 - T3$ ，再順時針轉分度盤 90 度後，自準直儀對準八面鏡之第一面，其量測值為： $I2 + B2 + B3 + B4 + B1 - T1 - T2 - T3 - T4$ ，此時，八面鏡與分度盤各轉 360 度回到原來狀態，此為第二階段結束。

如將上述五組數據分別相減，可得到  $B2 - T1$ 、 $B3 - T2$ 、 $B4 - T3$  及  $B1 - T4$ ，將四組數據填入下方表中左邊算起第三欄。

(3) 將分度盤順時針旋轉 90 度，拆開固定八面鏡之螺桿，仍使第一面對準自準直儀後，再鎖緊固定螺桿，此時量測值為： $I3$ ，以下步驟與 (1) 與 (2) 步驟完全相同，同理可推出： $B3 - T1$ 、 $B4 - T2$ 、 $B1 - T3$  及  $B2 - T4$  等四組數據，填入下方表中左邊算起第四欄之數據。

(4) 將分度盤順時針旋轉 90 度，拆開固定八面鏡之螺桿，仍使第一面對準自準直儀後，再鎖緊固定螺桿，此時量測值為： $I4$ 。

以下步驟與 (1) 與 (2) 步驟完全相同，同理可推出， $B4 - T1$ 、 $B1 - T2$ 、 $B2 - T3$ 、 $B3 - T4$  四組數據，填入下方表中左邊算起第五欄之數據。

如此，當上方八面鏡旋轉一圈 (四次 90 度) 後，下方分度盤分四次旋轉各一圈之後，可得十六組數據如表 2。

由表 2 中之數值與圓周之閉合原理 (無論是八

表 2. 當上方八面鏡旋轉一圈 (四次 90 度) 後，下方分度盤分四次旋轉各一圈之後，可得十六組數據。

分度盤角度	0	90	180	270
2-1	$B1 - T1$	$B2 - T1$	$B3 - T1$	$B4 - T1$
3-2	$B2 - T2$	$B3 - T2$	$B4 - T2$	$B1 - T2$
4-3	$B3 - T3$	$B4 - T3$	$B1 - T3$	$B2 - T3$
5-4	$B4 - T4$	$B1 - T4$	$B2 - T4$	$B3 - T4$

表 3. 實驗數據每組旋轉三圈，求出三次平均值後，按照公式代入。

分度盤角度	0	90	180	270
2-1	-0.27	-0.47	-0.51	-0.65
3-2	-0.15	0.04	-0.04	0.51
4-3	0.67	0.52	1.00	0.73
5-4	-0.25	-0.08	-0.46	-0.59

表 4. 八面鏡與定位分度盤之結果，並與 NIST 比較。

角度	八面鏡	分度盤	分度盤 NIST
0-90	$T1 = 0.47$	$B1 = 0.21$	$B1 = -0.08$
90-180	$T2 = -0.09$	$B2 = 0.00$	$B2 = -0.02$
180-270	$T3 = -0.73$	$B3 = -0.03$	$B3 = 0.06$
270-360	$T4 = 0.34$	$B4 = -0.18$	$B4 = 0.07$

面鏡或分度盤四個角度和為 360 度也就是 0 度)，讀者不難解出八面鏡之角度  $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$  及  $T4$  (上表中第二列右邊四組數據和為  $-4T1$ ，第三列和為  $-4T2$ ，其餘可類推)，再代回表格中可求出自動定位分度盤之角度  $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 。

實驗數據每組旋轉三圈，求出三次平均值後，按照公式代入如表 3 (角度單位為秒)。

最後解出八面鏡與自動定位分度盤之結果並與 NIST 比較如表 4：

## 六、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量測品質，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。

由於自準直儀與自動定位分度盤均有不確定度，因此旋轉一圈後，數據並不一定回到原來結果，可用分攤方式將最後數據調整至原來數據。為分析之方便計，此處亦排除環境影響，因待校件在校正前，已先置於實驗室恆溫環境下八小時以上，溫度在  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，溼度  $50 \pm 10\% \text{ H.R.}$ ，且分度盤之同心度與鏡面垂直度已調整至最小範圍，所以最主要之不確定度均來自自準直儀，因此完全取決於自準直儀之不確定度與解析度。以  $T1$  為例，其數據為四組數據之和平均，而每組數據得自兩組數據之差，計算公式為：

$$T1 = (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4 + \Delta R_5 - \Delta R_6 + \Delta R_7 - \Delta R_8) / 4$$

$\Delta R_i$  為每次觀測之不確定度，因此  $T1$  與  $B1$  之不確定度均為：

1. 假設具有完全相關性，其不確定度可直接相加：

$$UB1 = \frac{8}{4} U\Delta R = 2 U\Delta R$$

2. 假設不相關，其不確定度可以均方根值計算：

$$UB1^2 = (\sqrt{2})^2 U\Delta R^2$$

$$UB1 = 1.414 U\Delta R$$

$U\Delta R$  即為準直儀的不確定度，本實驗室為 CNLA 認可之編號 174 長度實驗室，自準直儀核定之不確定度為 0.08 弧秒，乘上  $K = 2$  為 0.16 弧秒，因此可求得分度盤之不確定度為 0.23 弧秒，與 NIST 之校正等級相比，並無遜色之處。

## 七、結論

本文主旨在介紹執行精密角度量測儀器：自動定位分度盤工作原理與其校正方法。由於國外廠商不認為我國有校正此分度盤之能力，因此觸發筆者挑戰此項任務的動力，考量角度校正之不確定度要求越來越小，加上本實驗室已通過十項角度認證 (氣泡式與電子式水平儀、直角規、組合角尺、角度塊規、多邊規、分度盤、精密分度盤、自準直儀)，因此基於技術與經驗，推導出以未經校正之八面鏡校正自動定位分度盤的方法，並將不確定度縮小至世界標準。

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：(1) 標準件提供之角度必須穩定，本文為準直儀與八面鏡，解析度為 0.05 弧秒。(2) 待校件之解析度與重複性要高，分度盤最小定位為 0.5 度，精度為 0.25 弧秒。(3) 校正人員需熟悉校正程序與儀器操作。(4) 實驗室環境需控制溫度、濕度、噪音、振動、光線及氣流等環境均影響準直儀之讀數。(5) 夾具使用必須適當，固定八面鏡與分度盤，但不可影響到結構與其功能。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. Foundations of Mechanical Accuracy by Wayne R. Moor (1970).
2. 何傑, 分度盤法分度盤校正程序書, 編號 CP-AN-0023, 中山科學研究院系維中心儀器校正組 (1999).
3. 何傑, 精密分度盤校正程序書, 編號 CP-AN-0001, 中山科學研究院品保中心儀器校正組 (1997).
4. 何傑, 圓周閉合法分度盤校正程序書, 編號 CP-AN-0002, 中山科學研究院品保中心儀器校正組 (1998).
5. 何傑, 分度盤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 (1999).
6. A. G. DAVIS, *Gage and Engineering Table Control User's Manual*, Model:r-15688-1 720 Tooth Ultralex.

- 何傑先生為美國壬色列理工學院機械博士，現任中山科學院技正。
- Chieh Ho received his Ph.D. in mechanical engineering at Rensselaer Polytechnic Institute, USA. He is currently an associate scientist in the Chung Shan Institute of Science & Technology