

## 機台垂直度校正

作者：M.A.V. Chapman

### 簡介

本白皮書根據 2012 版 ISO230-1 標準《工具機測試規範 — 機台在空載或準靜態條件下運作時的幾何精度》，介紹了評估機台線性運動軸間相互垂直度的各種方法。根據機台各軸存在的垂直度、真直度和角度（俯仰或扭擺）誤差，以及在機台加工區域內的測試位置，在文中透過電腦模擬對採用每種方法得出的垂直度結果進行了比較和對比。本文最後還提供了一份評價對比表，以及關於如何在空間誤差補償過程中評估和應用機台垂直度誤差的建議。

### 兩條線性運動軸之間的垂直度 — 定義

ISO230-1 標準第 3.6.7 節將兩條線性運動軸之間的垂直度誤差定義為：「一個線性運動元件上功能點的運動軌跡形成的參考線相對於其對應的線性運動名義軸的傾斜度，與另一個線性運動元件上功能點的運動軌跡形成的參考線相對於其對應的線性運動名義軸的傾斜度之差。」ISO230-1 中指明，對每條軸上的功能點的運動軌跡，採用下列任一方法進行直線擬合，便可得出參考線：

- 1) 平均最小區域參考線，或
- 2) 最小平方擬合法的參考線，或
- 3) 端點適配擬合法的參考線

圖 1 展示了這些不同的擬合方法。紅色軌跡線表示，隨著軸運動而產生的真直度偏差變化（即軌跡）。藍色虛線表示，分別採用最小區域法、最小平方法和端點法進行擬合得到的輔助線。在端點擬合法圖中標註了輔助線的傾斜度（斜率）。請注意，參考線的傾斜度可能因擬合方法而異。因為計算方便，所以最廣泛使用的擬合方法是端點法和最小平方方法。在計算垂直度誤差時，建議對兩條參考線採用相同的擬合方法。本文中的所有參考線均採用最小平方方法進行擬合計算。

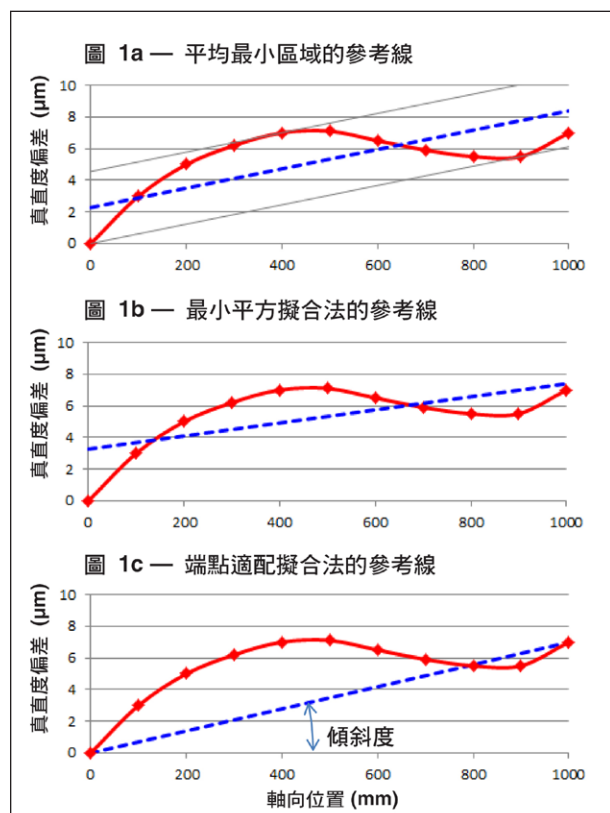


圖 1

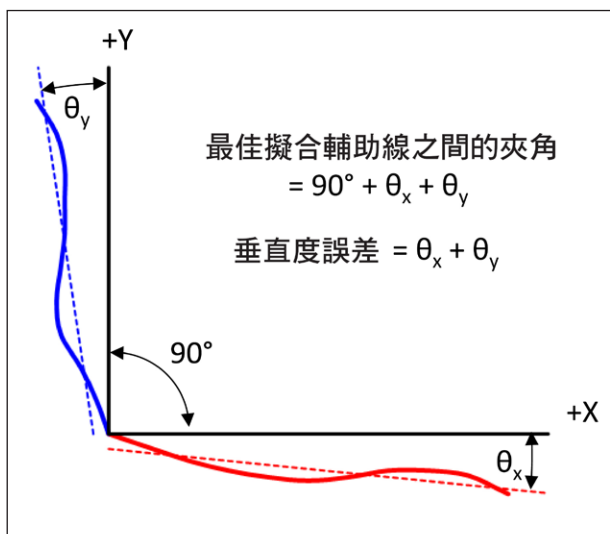


圖 2

圖 2 展示了兩條線性運動軸之間垂直度誤差的計算方法。兩條黑色實線分別代表機台的 X 軸和 Y 軸。紅色實線和藍色實線分別代表，X 軸和 Y 軸在整個軸行程中的真直度偏差變化（即它們的軌跡）。請注意，為使表述清楚，圖中誇大了這些偏差。紅色虛線和藍色虛線分別代表兩條軌跡的最小平方法擬合參考線。圖中的  $\theta_x$  和  $\theta_y$  分別是兩條參考線的傾斜度（斜率）。在本例中，將  $\theta_x$  和  $\theta_y$  相加，即可得出垂直度誤差。請注意，還可以使用其他符號慣例。Renishaw 的循圓測試儀和雷射系統搭配的垂直度分析軟體設定：如果兩條運動軸的正向夾角  $> 90^\circ$ ，則垂直度結果為正值。本文中統一採用此一符號慣例。

備註：

1. ISO230-1 標準推薦採用另一種符號慣例：將一條機台軸定義為「基準軸」，另一條機台軸定義為「參考軸」，基於右手法則，將垂直度誤差的方向定義為參考軸相對於基準軸之間的旋轉度。在上面的圖 2 中，如果以 X 軸為基準軸，那麼 Y 軸相對於 X 軸的垂直度誤差為 +ve。但是，如果以 Y 軸為基準軸，那麼 X 軸相對於 Y 軸的垂直度誤差就是 -ve。為避免混淆，ISO230-1 中還建議註明兩軸的夾角大於還是小於  $90^\circ$ ！顯然，在比較垂直度測試結果時，一定要了解所使用的符號慣例。
2. 雖然 ISO 定義了參考線相對於其對應的機台軸（X、Y 或 Z 軸）的傾斜度，但在量測垂直度誤差時，傾斜度通常是通過參考線相對於由基準標準件或雷射光束所定義的正交線之間的偏差來量測的。最終結果是相同的；不過，標準件、分度器或光學稜鏡可能會存在垂直度誤差，因此在計算時需要納入這些誤差。如果誤差未知，則可能需要反轉參考基準，通過重複量測取垂直度結果的平均值。
3. 如果是基於機台軸的整個工作長度測試垂直度，那麼該結果具有所謂的「全域性」。如果只針對機台軸的某一部分進行測試，那麼得到的是「局部」垂直度結果。

## 兩條線性運動軸之間的垂直度 — 測試方法

ISO230-1:2012 標準目前介紹了五種機台垂直度評估方法，分別是：

- 1) 角尺和千分錶（第 10.3.2.2 節）
- 2) 直尺、千分錶和分度轉台（第 10.3.2.3 節）
- 3) 光學角尺和雷射干涉儀真直度量測鏡組（第 10.3.2.4 節）
- 4) 圓弧測試（第 10.3.2.6 節和 ISO230-4 標準）
- 5) 對角線位移測試（第 10.3.2.6 節和 ISO230-6 標準）

下文詳細介紹了每種方法。

### 第 1 種方法 — 使用角尺和千分錶進行雙軸真直度測試

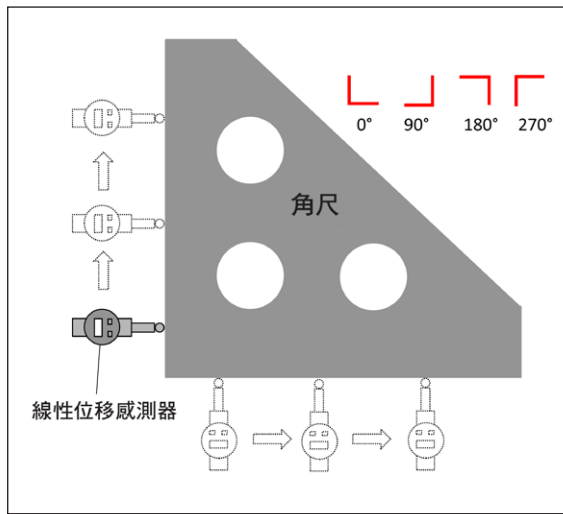


圖 3

這種方法需要先將角尺與相關的機台軸做名義上的校準，然後使用線性位移感測器（如數顯表或千分錶），依次量測每條軸的真直度偏差。這種設置如圖 3 所示，本文中將其稱為 L 形配置。分別採集兩條軸的真直度數據之後，（採用最小平方法、端點法或最小區域法進行擬合）先計算每組資料的傾斜度（斜率），然後再比較兩個傾斜度，即可得出垂直度誤差。請注意務必沿用正確的符號慣例，具體取決於角尺和千分錶的方向，以及各軸的正向方向。

如果還有可以配合使用的直尺，那麼可以採用另一種 T 形佈局，如圖 4 所示。這種佈局的優點是可以反轉（即圖 4 的左右鏡像），通過這種反轉技術可消除角尺的誤差。另一個優點是，這種佈局適用於其中一條軸靠近機台工作區域中心的情況。

請注意，當量測兩條水平軸之間的垂直度時，通過相應地旋轉設備，即可在四個不同的方向（ $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  或  $270^\circ$ ）上採用 L 形和 T 形配置。然而，如果其中一條軸是垂直軸，則只能在兩個方向（ $0^\circ$  和  $90^\circ$ ）上採用 L 形配置，或者在一個方向（ $180^\circ$ ）上採用倒置的 T 形配置。下文的模擬中會詳細介紹這裡提到的不同方向。

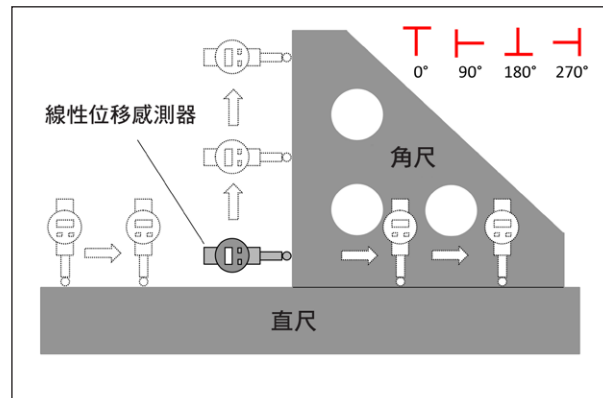


圖 4

### 第 2 種方法 — 使用直尺、千分錶和分度轉台進行雙軸真直度測試

這種方法需要在角度分度器上安裝直尺。量測第一條軸的真直度偏差之後，利用分度器將直尺旋轉  $90^\circ$ ，以便量測第二條軸的真直度。這種設置如圖 5 所示，本文中將其稱為十字形配置。

垂直度的計算方法與第 1 種方法相同。

這種方法的優點在於，它適用於兩條軸都靠近工作區域中心的情況。但是，它依賴於精密分度器，而且精度必須高於所需量測的垂直度的精度。

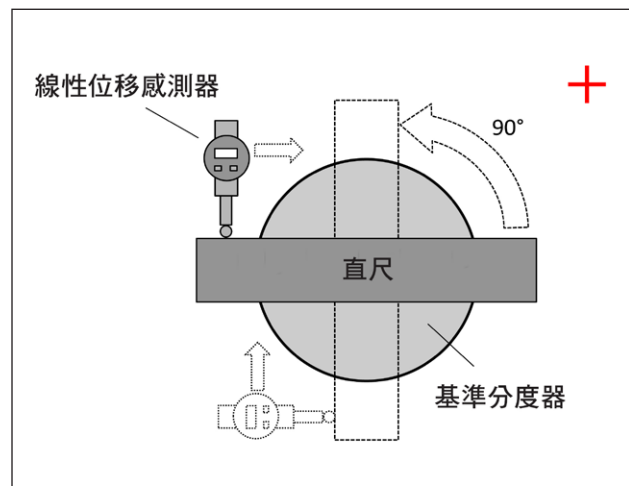


圖 5

### 第 3 種方法 — 使用光學角尺和雷射干涉儀真直度量測鏡組進行雙軸真直度測試

這種方法採用雷射干涉儀系統（例如 Renishaw XL-80 雷射干涉儀），搭配真直度量測光學鏡組和光學角尺。這些設備可以設置為 L 形或 T 形配置（取決於機台配置）。L 形配置如圖 6 所示，常用於測試兩條水平軸之間的垂直度。這種設置的工作原理如下：真直度反射鏡在空間中投射出一個光學直尺邊，再利用光學角尺將其轉向 90°。然後，利用真直度干涉鏡量測（顯示）與光學角尺的兩個直尺邊之間的真直度偏差。圖 6 中的真直度反射鏡和光學角尺與圖 3 中的角尺之間具有直觀的相似性。它們都有一樣的 L 形輔助線。圖 6 中利用真直度干涉鏡與光學角尺的直尺邊量測兩軸之間的真直度偏差，圖 3 中利用線性位移感測器與角尺的直尺邊量測兩軸

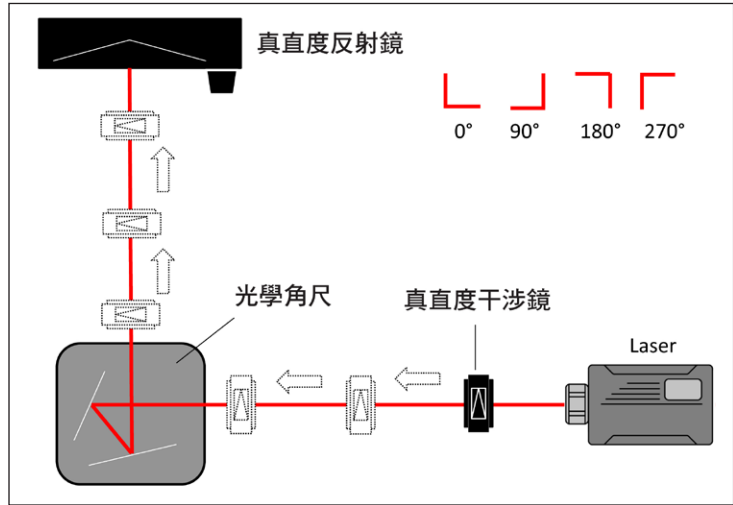


圖 6

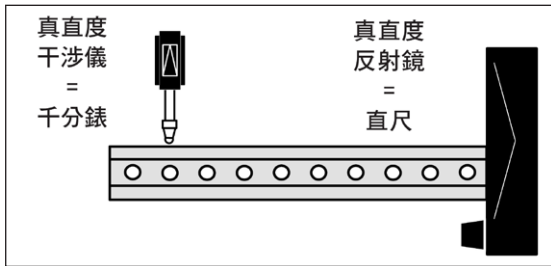


圖 7

之間的真直度偏差，這兩種方法是相同的。圖 7 展示了直尺搭配千分錶和真直度反射鏡搭配干涉鏡之間具有直觀的相似性，Renishaw 的白皮書《TE325 — 雷射干涉法真直度量測及其在移動工作台上的應用》對此做出了詳細說明。同樣地，當量測兩條水平軸之間的垂直度時，根據機台空間的限制，通過相應地旋轉設備，即可在四個方向（0°、90°、180° 或 270°）上採用 L 形配置。下文中模擬了在所有四個方向上採用 L 形配置。

此外還可以增設轉向鏡和大角錐反射鏡來重新佈置所有元件，按 T 形配置進行測試，如圖 8a 和圖 8b 所示。如果其中一條被測軸是垂直軸，則往往採用這種配置。水平軸用雷射頭、真直度干涉鏡和反射鏡進行測試，如圖 8a 所示。垂直軸則用轉向鏡、

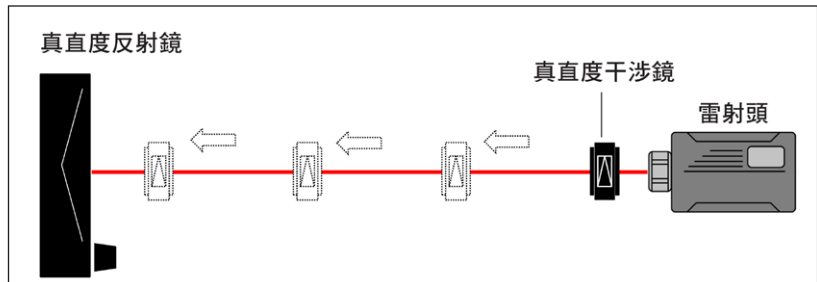


圖 8a

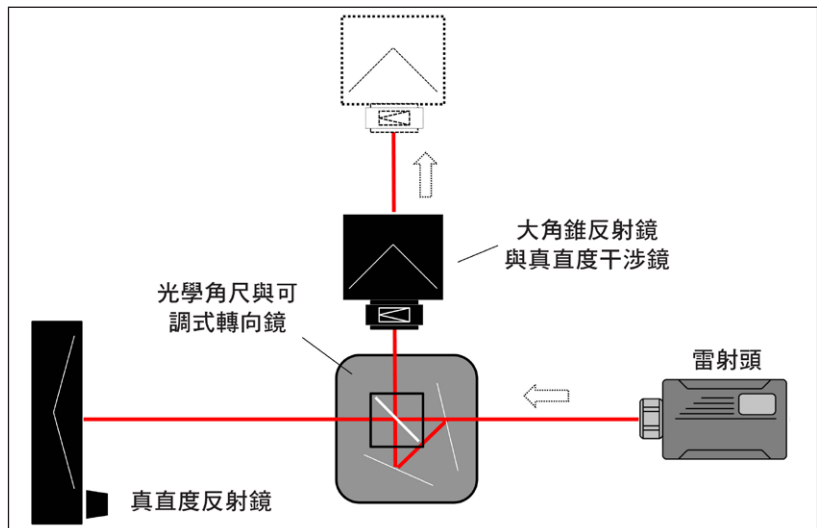


圖 8b

光學角尺和附加的大角錐反射鏡進行測試，如圖 8b 所示。請注意務必確保，在量測兩條軸之間，真直度反射鏡的校準不應發生改變，因為反射鏡是完成兩次測試的參考基準。同樣地，圖 8a 和圖 8b 所示的採用雷射干涉鏡獲得的量測結果，與圖 4 所示的採用角尺獲得的量測結果之間具有直觀的相似性。

垂直度結果的計算方法與第 1 種和第 2 種方法完全相同；但是，由於存在製造公差，通常需要對光學角尺的細微角度誤差（通常稱為「稜鏡誤差」）進行修正。使用者輸入「稜鏡誤差」值之後，分析軟體會自動應用該修正。

雷射量測的優點在於，它可以輕鬆地在大型機台上進行全域性垂直度量測；而直尺和角尺可能並不適用於這種應用場景，因為這樣的量測過程過於繁瑣或費用高昂，而且它們本身的重量還可能會導致機台結構發生機械變形。

#### 第 4 種方法 — 圓弧測試

對於能夠在 CNC 系統的控制下進行精確圓弧插補的機台，可以使用伸縮式循圓測試儀（例如 Renishaw QC20 循圓測試儀）執行動態圓弧測試來確定機台的垂直度，如圖 9 所示。ISO230-4 中介紹了這種測試方法。對機台進行程式設計，使其以低進給率沿 360° 圓形軌跡（如紅色虛線所示）運動，先順時針

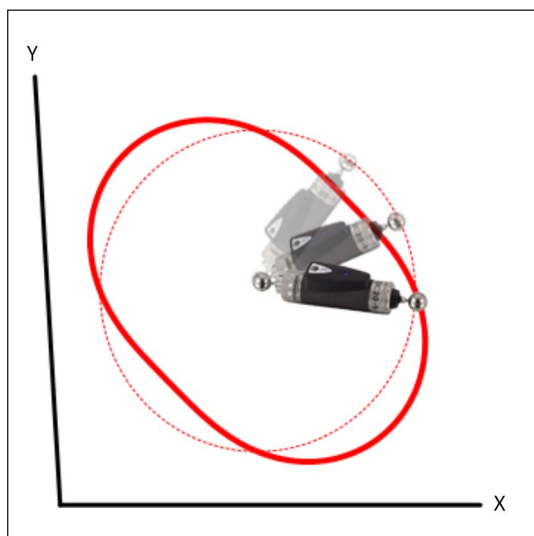


圖 9

運動，然後再逆時針運動。伸縮式循圓測試儀的一端連接至圓心處的工具機工作台中心座，另一端連接至機台主軸上安裝的中心座。當機台繞圓運動時，循圓測試儀內的感測器會量測半徑的變化，並生成一條誤差軌跡（如紅色實線所示，圖中有所誇大）。如果存在垂直度誤差，則循圓測試儀通過順時針和逆時針運動生成的平均誤差軌跡會呈橢圓形，如圖所示。通過對比 45° 對角線（即橢圓的主軸和次軸）的長度，便可估算出垂直度誤差。Renishaw 的循圓測試儀圖形診斷軟體能夠執行大量計算，將垂直度誤差與機台可能存在的任何其他誤差（如反向間隙、伺服、比例不匹配、週期和真直度誤差）區分開來，進而確保垂直度結果不受這些誤差的影響。Renishaw 軟體還可通過部分弧線測試（低至 220°）估算垂直度。

循圓測試儀測試的優點是快速、簡便。循圓測試儀測試的速度快意味著垂直度結果基本不受環境變化（如熱變化）的影響，而其他測試方法卻難免受到環境變化的影響。此外，還可以使用延長桿來改變測試半徑，半徑範圍達到 50 mm 至 1000 mm，因此可測試各種尺寸的機台。循圓測試儀可沿機台各軸在多個位置進行測試，並對所有結果取平均值，因此可評估各軸軸長明顯不等的機台垂直度（本文末尾將詳細介紹這項技術）。

如果像三次元量床 (CMM) 等機台不能進行圓弧插補，則可以使用 Renishaw 的 CMM 空間精度檢測規 (MCG) 執行測試，如圖 10 所示。此外，在小型機台上，還可以使用 Renishaw 測頭和環規進行測試。

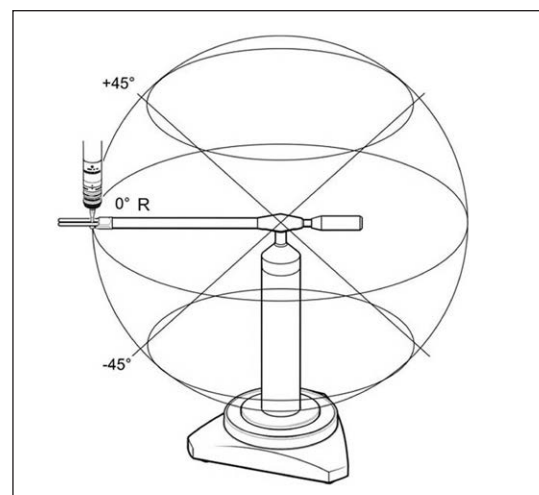


圖 10



### 第 5 種方法 — 對角線位移測試

最後一種評估機台垂直度的方法需要採用雷射干涉儀系統（例如 Renishaw XL-80 雷射干涉儀）搭配線性光學鏡組，以量測兩條對角線的長度，如圖 11 所示。ISO230-6 中介紹了這種測試方法。通常，先對雷射頭進行校準，以便量測第一條對角線的長度。然後，重新校準雷射頭，再量測第二條對角線。最重要的一點是，在測試過程中，每條軸的移動部分對於兩條對角線都是相同的，並且消除任何反向間隙的影響；最好在兩個方向上量測每條對角線的長度，然後取平均值。

同樣重要的一點是，兩條對角線必須一個接一個立即量測，以盡可能降低發生熱變化的可能性。在小型機台上，還必須確保將雷射頭與對角線精確校準，以盡可能減少餘弦誤差。

我們來看一下如何在 XY 平面中進行測試，如圖 11 所示。假設 X 是編程設定的 X 軸行程長度，Y 是編程設定的 Y 軸行程長度，則垂直度（單位為弧度）表示為：

$$\text{垂直度} = D_0 (D_1 - D_2) / (2XY)$$

其中， $D_0$  是對角線名義長度， $D_1$  和  $D_2$  是對角線實際長度。

如果  $X = Y$ ，則該方程式可簡化為：

$$\text{垂直度} = (D_1 - D_2) / D_0$$

這種測試方法的優點是快速簡便，非常適用於大型機台和長寬比不相等的機台。如果其中一條軸是垂直軸，那麼設置就會稍微複雜一點，可能需要增設轉向鏡和旋轉接頭。由於垂直度結果只基於兩個雷射距離讀數進行計算，如果機台的重複性較差，則可能需要重複測試，以獲得良好的平均值。或者，可以在每條對角線上的多個位置採集資料。將測得的位移量與程式設計設定的位移量進行比較。然後，將每條對角線的線性誤差資料通過最小平方方法擬合出一條直線，再比較兩個斜率，最終確定垂直度誤差。根據 ISO230-1 和 ISO230-6 的建議，本文中基於兩條對角線的總長差異來確定垂直度誤差。

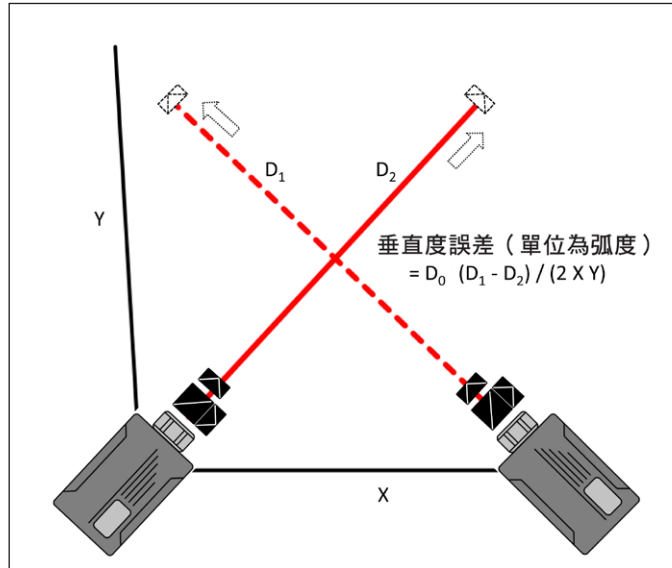


圖 11

## 機台誤差模擬

為評估不同的垂直度測試方法的效能，我們模擬了五台具有不同的垂直度、真直度和扭擺誤差組合的機台，如圖 12 所示。假設所有五台機台的 X 軸和 Y 軸長度均為 800 mm，這種模擬方式只考慮 XY 平面的變形（不過所得到的結果一般也適用於其他兩軸組合）。圖 12 中的藍線表示每台機台的 XY 平面變形情況，我們將其放大了 2,000 倍，然後疊加在無變形的方格網（每格邊長 100 mm）上。

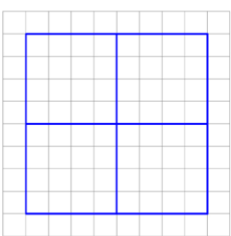
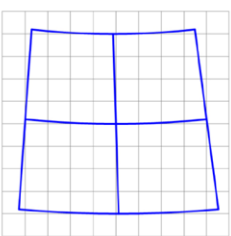
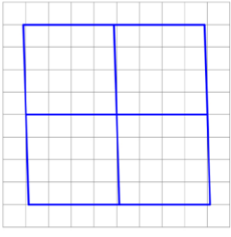
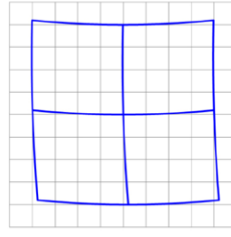
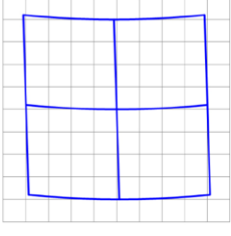
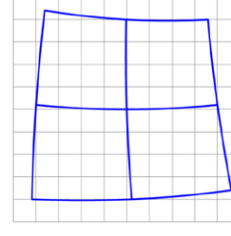
五台具有不同誤差組合的機台模擬	
 <p>無誤差</p>	 <p>機台 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 15 <math>\mu\text{m}/\text{m}</math> 的 XY 垂直度誤差</li> <li>✓ 10 <math>\mu\text{m}</math> 的 X 軸真直度誤差</li> <li>✓ 相關的 X 軸扭擺誤差</li> <li>✗ 5 <math>\mu\text{m}</math> 的 Y 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 Y 軸扭擺誤差</li> </ul>
 <p>機台 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 15 <math>\mu\text{m}/\text{m}</math> 的 XY 垂直度誤差</li> <li>✗ 10 <math>\mu\text{m}</math> 的 X 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 X 軸扭擺誤差</li> <li>✗ 5 <math>\mu\text{m}</math> 的 Y 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 Y 軸扭擺誤差</li> </ul>	 <p>機台 4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 15 <math>\mu\text{m}/\text{m}</math> 的 XY 垂直度誤差</li> <li>✓ 10 <math>\mu\text{m}</math> 的 X 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 X 軸扭擺誤差</li> <li>✓ 5 <math>\mu\text{m}</math> 的 Y 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 Y 軸扭擺誤差</li> </ul>
 <p>機台 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 15 <math>\mu\text{m}/\text{m}</math> 的 XY 垂直度誤差</li> <li>✓ 10 <math>\mu\text{m}</math> 的 X 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 X 軸扭擺誤差</li> <li>✗ 5 <math>\mu\text{m}</math> 的 Y 軸真直度誤差</li> <li>✗ 相關的 Y 軸扭擺誤差</li> </ul>	 <p>機台 5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 15 <math>\mu\text{m}/\text{m}</math> 的 XY 垂直度誤差</li> <li>✓ 10 <math>\mu\text{m}</math> 的 X 軸真直度誤差</li> <li>✓ 相關的 X 軸扭擺誤差</li> <li>✓ 5 <math>\mu\text{m}</math> 的 Y 軸真直度誤差</li> <li>✓ 相關的 Y 軸扭擺誤差</li> </ul>

圖 12

所有五台機台的基本全域性垂直度誤差均為 +15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。在此基礎上疊加 X 軸和 Y 軸的各種真直度誤差和扭擺變形誤差組合。請注意，如果包含扭擺變形誤差，那麼該誤差量通常與該軸的真直度誤差相關（假設機台是剛體機械結構，詳情請參閱附錄 I）。另請注意，真直度誤差並不是一定會引起機台 XY 平面的角度變形，這取決於機台的運動機械構造（機械結構鏈）。這也是為什麼模擬中包括各種真直度誤差組合，分別包含或不包含相關的因扭擺引起的變形。如果由存在真直度誤差的軸支撐著工件夾具，那麼，該軸所產生的扭擺可能會使工作空間變形，如機台 3 和 5 所示。然而，如果存在真直度誤差的軸僅支撐著刀具，那麼即使存在扭擺誤差，也不會造成機台 XY 平面產生角度變形。我們特意挑選了這些誤差組合，以突出顯示在全域性垂直度誤差的基礎上疊加各種角度誤差和真直度誤差時（這些誤差會造成局部垂直度變化），各種測試方法產生的不同反應。我們重點關注機台 3 和 5，因為雖然它們包含不同程度的因扭擺引起的變形，但它們的局部和全域性垂直度變形是一致的，都是 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

## 模擬模式

由於直尺搭配千分錶與真直度反射鏡搭配干涉鏡之間具有直觀的相似性，因此，這兩種方法採用 L 和 T 形配置得到的模擬結果是相同的。於是，我們用五種不同的模擬模式即可涵蓋上文介紹的所有測試方法和設備組合。這五種模擬模式 (a-e) 及其各自適用的測試方法/設備如下：

- a. 使用伸縮式循圓測試儀進行圓弧測試
- b. 使用雷射干涉儀和線性光學鏡組進行雷射對角線測試
- c. 使用下列工具，按十字形配置進行雙軸真直度測試：
  - 直尺、千分錶和 90° 分度器
- d. 使用下列工具，按 T 形配置進行雙軸真直度測試：
  - 直尺、角尺和千分錶，或者
  - 雷射干涉儀真直度量測鏡組、光學角尺、大角錐反射鏡和轉向鏡。
- e. 使用下列工具，按 L 形配置進行雙軸真直度測試：
  - 角尺和千分錶，或者
  - 雷射干涉儀真直度量測鏡組和光學角尺

圖 13 展示了這五種不同的模擬模式。與上文相同，藍線表示模擬機台的 XY 平面變形情況，疊加在無變形的方格網（每格邊長 100 mm）上。紅線表示在測試過程中機台的運動。機台運動的變形情況也放大了 2,000 倍。（請注意，代表循圓測試儀軌跡的紅線會自動縮放和居中，以匹配在循圓測試儀測試分析過程中常用的軌跡縮放比例。）

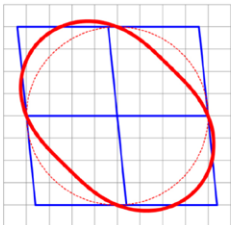
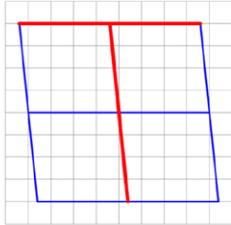
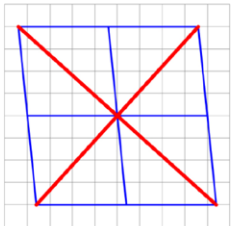
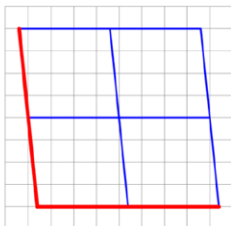
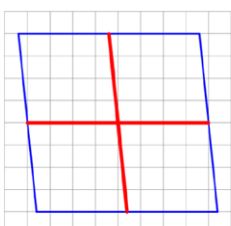
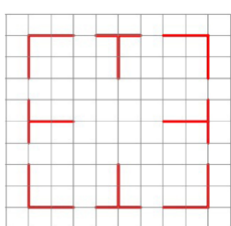
五種不同的模擬模式 (a – e)	
 <p>a) 循圓測試儀測試 測試半徑和位置可以變化。 循圓測試儀誤差曲線圖將自動縮放和置中。</p>	 <p>d) 雙軸真直度測試 (T) 使用角尺和千分錶、或者雷射頭、光學角尺、大角錐反射鏡和真直度量測光學鏡組、按 T 形配置進行測試。方向、長度和位置可以調整變化。</p>
 <p>b) 雷射對角線測試 使用雷射頭和線性光學鏡組進行測試。對角線長度和位置可以調整變化。</p>	 <p>e) 雙軸真直度測試 (L) 使用角尺和千分錶、或者雷射頭、光學角尺和真直度量測光學鏡組、按 L 形配置進行測試。方向、長度和位置可以調整變化。</p>
 <p>c) 雙軸真直度測試 (+) 使用直尺、千分錶和 90° 分度器進行測試。基準長度和測試位置可以調整變化。</p>	 <p>註釋 L 形和 T 形配置均可設置在四個方向上、如左圖所示。</p>

圖 13

請注意，對於模擬模式 d 和 e，可以在四個不同的方向（0°、90°、180°、270°）上設置測試設備；還可以調整模擬參數，在機台的 800 mm x 800 mm 的 XY 平面內改變測試設備的尺寸和位置。比如，在模擬全域性垂直度測試時，可以將循圓測試儀半徑設為 400 mm，並在 XY 平面的中心進行測試。對於局部垂直度測試，可以縮小循圓測試儀半徑，並改變測試位置。



## 全域性垂直度模擬結果 — 機台 1

圖 14 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 1 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

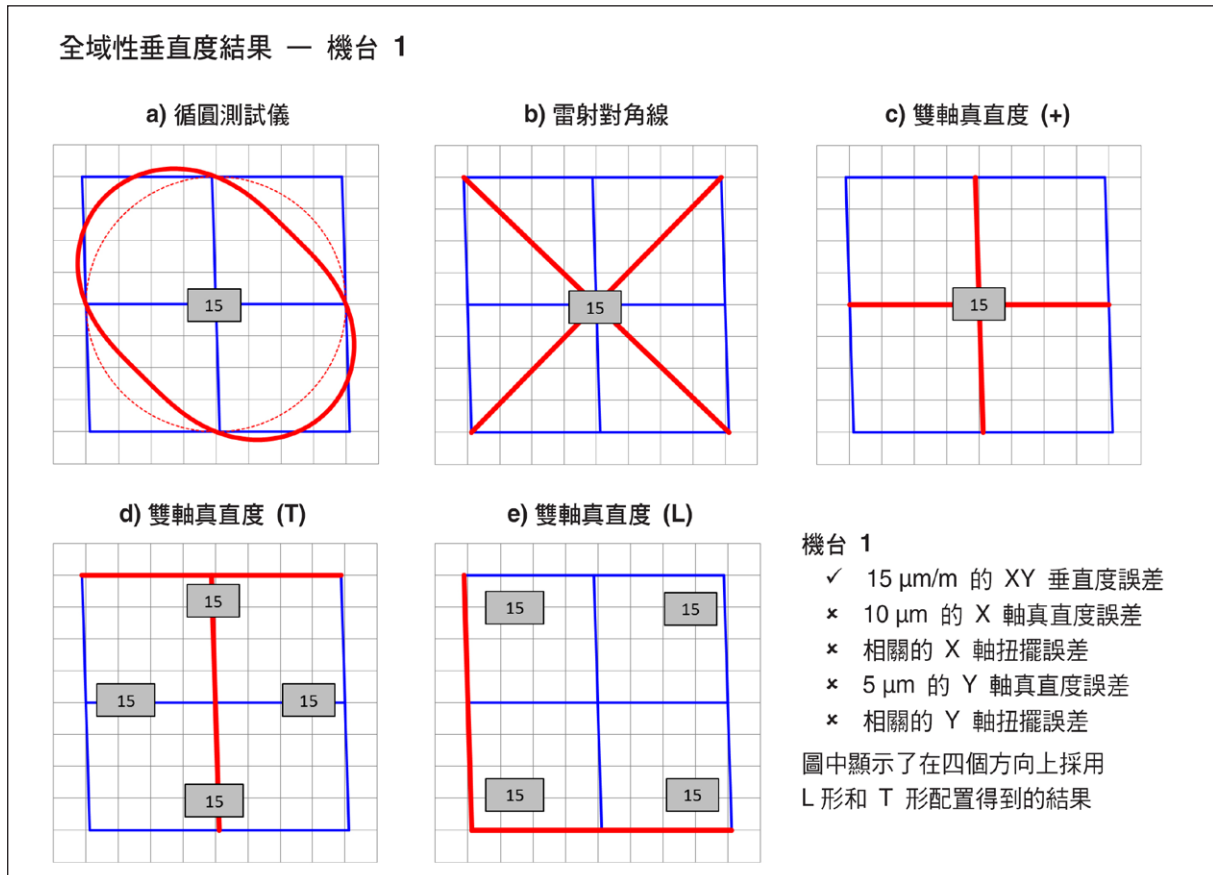


圖 14

小矩形框中的數位表示採用每種模擬模式計算得出的垂直度結果，單位為  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。T 形和 L 形配置均有四個結果，即在每個方向上都有一個結果。我們把每個結果放在每種設備方向的軸運動軌跡交叉點附近；為使清楚表述，圖中僅顯示一條紅色的 T 形或 L 形機台運動軌跡。比如，在圖 14 d) 中，最上方的結果與紅線所示的 T 形設備方向相關。右邊的结果與將紅線順時針旋轉  $90^\circ$  後的 T 形佈局相關。

機台 1 的測試結果表明，無論採用哪一種測試方法和設備方向，所有全域性垂直度結果均為  $15 \mu\text{m}/\text{m}$ 。這與預期完全一致，因為所模擬的機台只有  $15 \mu\text{m}/\text{m}$  的全域性垂直度誤差，沒有其他誤差。

## 全域性垂直度模擬結果 — 機台 2

圖 15 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 2 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

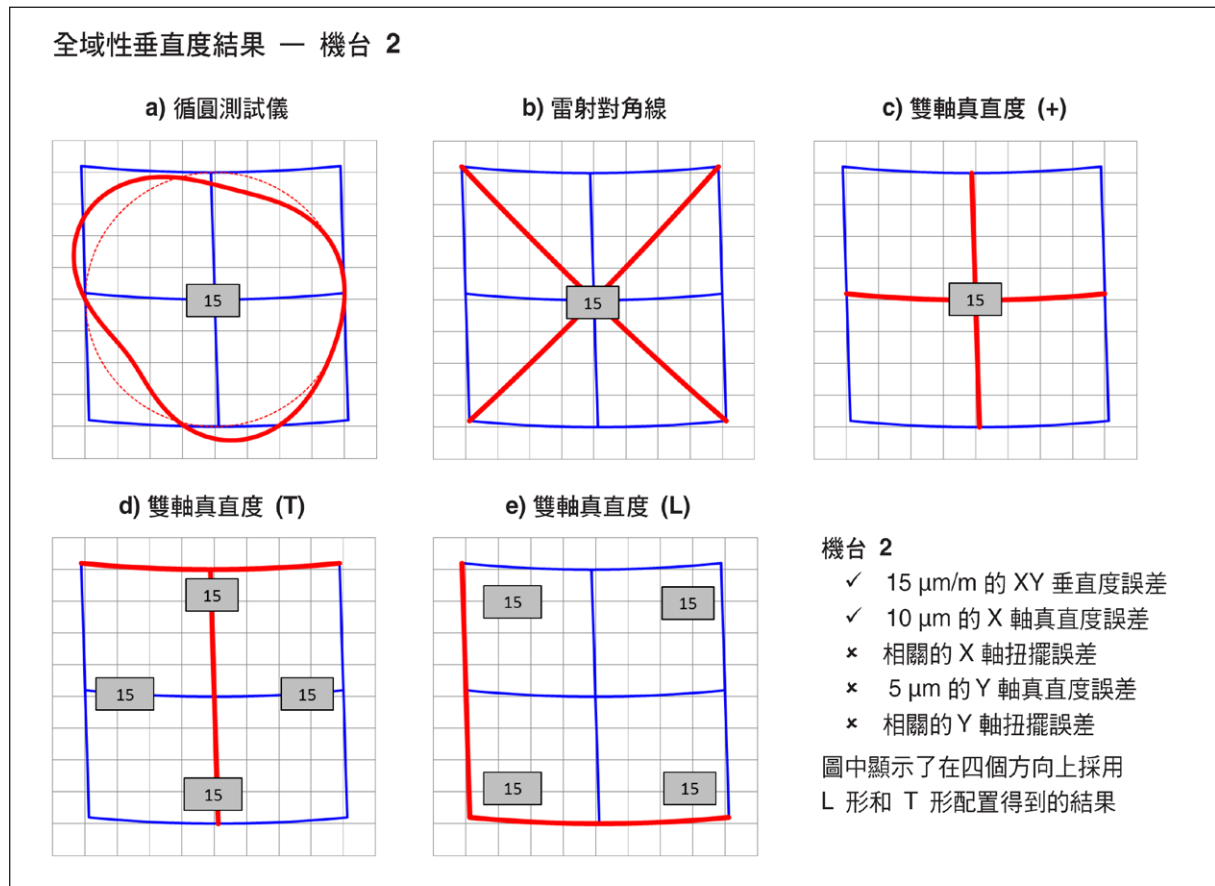


圖 15

機台 2 的測試結果表明，無論採用哪一種測試方法和設備方向，所有全域性垂直度結果也均為 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。這表明加入 X 軸真直度誤差並不會影響任何一種全域性垂直度測試方法的性能。

### 全域性垂直度模擬結果 — 機台 3

圖 16 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 3 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

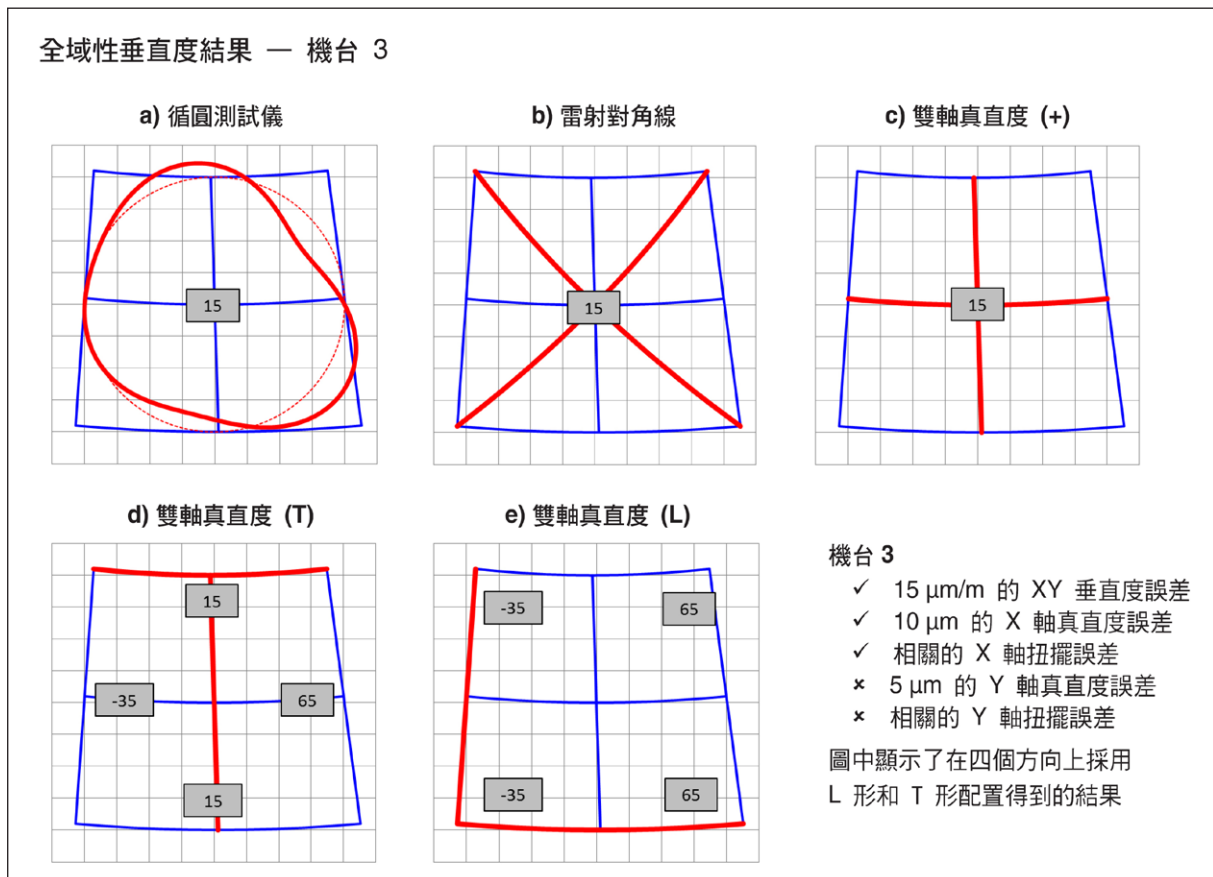


圖 16

機台 3 的測試結果表明，利用循圓測試儀、雷射對角線測試法和十字形雙軸真垂直度測試法得出的全域性垂直度也均為 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。然而，利用 T 形和 L 形測試法得出的結果卻有所不同。這表明，這兩種測試方法容易受 X 軸扭擺的影響。這些結果並不是「錯誤」結果，它們只是凸顯了當 Y 軸從 X 軸的左端移至右端時，X 軸和 Y 軸之間的夾角從 -35  $\mu\text{m}/\text{m}$  到 +65  $\mu\text{m}/\text{m}$  的變化。雖然 T 形和 L 形垂直度測試涵蓋兩條軸的整個行程範圍（並因此歸類為「全域性」垂直度測試），但實際上，它們只表明在特定位置測得的兩軸之間的垂直度。十字形配置也是如此。不過，在本例中，由於模擬變形的對稱性，採用十字形垂直度測試法得出的結果與採用循圓測試儀和雷射對角線測試法得出的結果相符。請注意，針對 T 形或 L 形垂直度測試法，如果取對角或對邊上的結果的平均值，則該平均值也與採用其他測試法得出的結果相符。

註：ISO230-1 標準建議，最好沿著穿過機台工作區域中心的直線來評估機台垂直度。上面的結果直觀地說明了其中的原因。L 形測試中涉及的兩條線通常位於機台工作區域的邊緣，因此它反映的是機台邊緣而非中心的垂直度。

## 全域性垂直度模擬結果 — 機台 4

圖 17 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 4 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

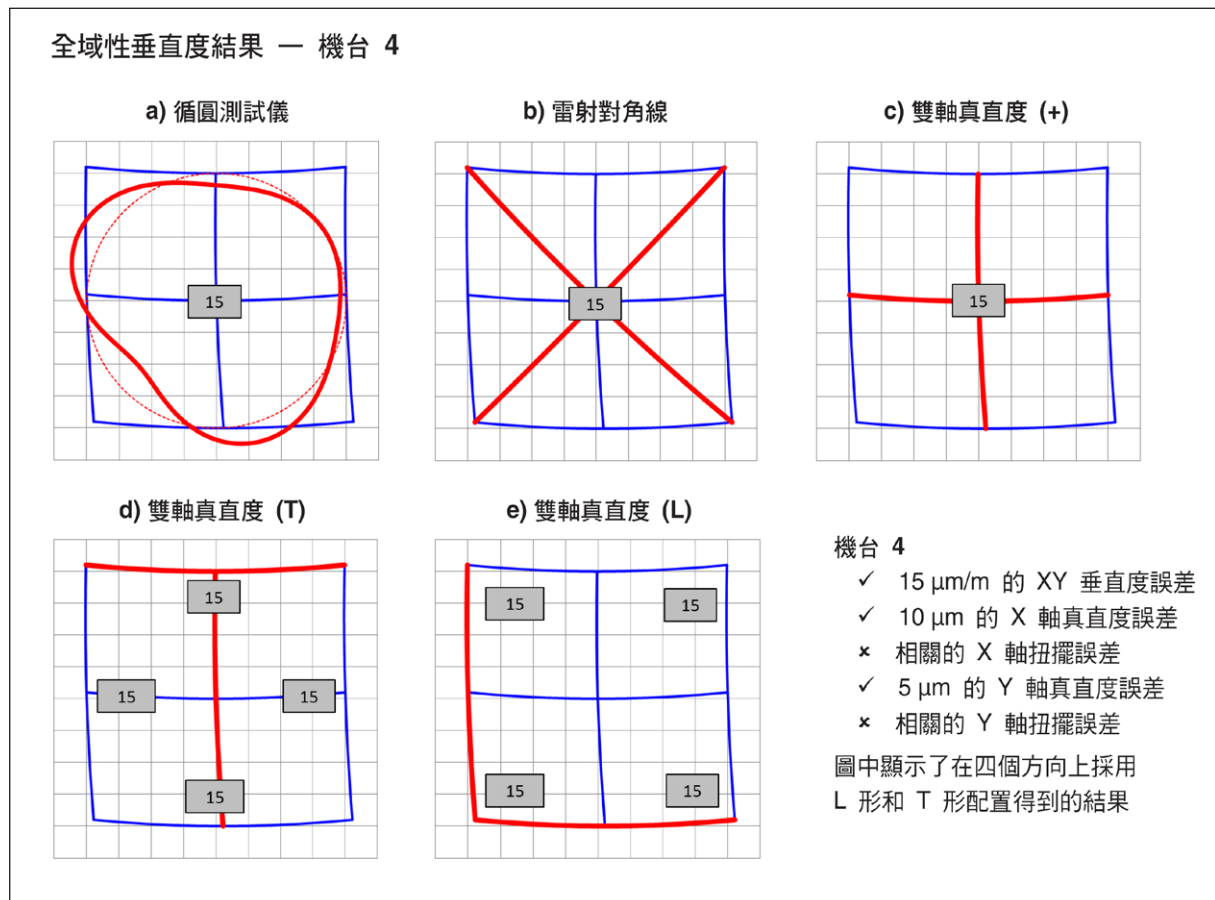


圖 17

機台 4 的測試結果表明，無論採用哪一種測試方法和設備方向，所有全域性垂直度結果也均為 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。在機台 4 上，扭擺誤差變形已經消除，即使 X 軸和 Y 軸都存在真直度誤差，所有測試法依然得出相同的結果。

## 全域性垂直度模擬結果 — 機台 5

圖 18 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 5 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

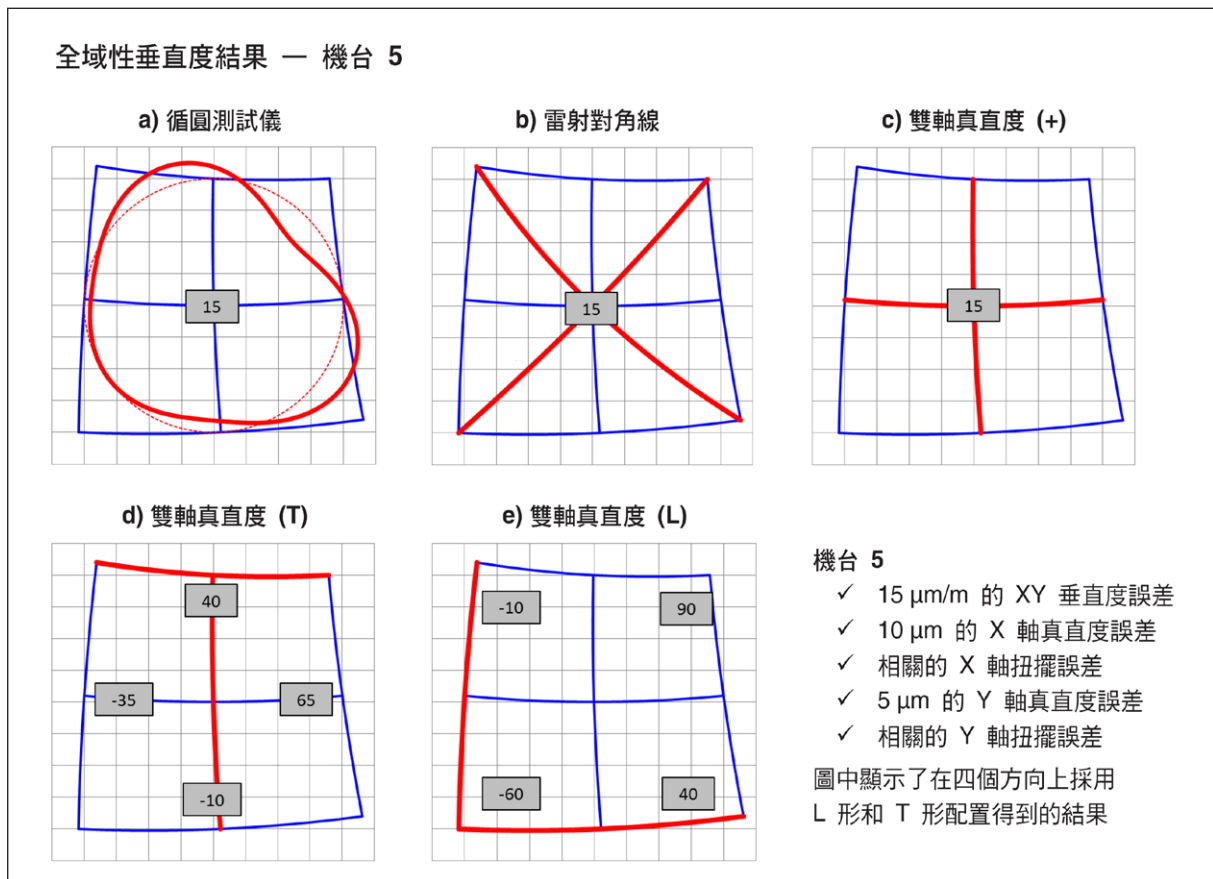


圖 18

機台 5 的測試結果表明，利用循圓測試儀、雷射對角線測試法和十字形雙軸真直度測試法得出的全域性垂直度依然均為 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。然而，由於 T 和 L 形測試法容易受 X 軸和 Y 軸扭擺的影響，因此利用這兩種測試法得出的結果同樣有所不同。同樣地，這些結果並不是「錯誤」結果，它們只是反映了當 Y 軸從 X 軸的一端移至另一端或 X 軸從 Y 軸的一端移至另一端時，X 軸和 Y 軸之間的夾角變化。請注意，針對 T 形或 L 形垂直度測試法，如果取對角或對邊上的結果的平均值，則該平均值也與採用其他測試法得出的結果相符。

## 全域性垂直度結果 — 綜述

如果機台的 XY 平面並沒有因扭擺誤差變化而變形，那麼，所有測試方法在所有方向上的全域性垂直度結果都是相同的 (15  $\mu\text{m}/\text{m}$ )。

然而，如果機台的 XY 平面存在對稱變化的扭擺誤差，那麼：

- 循圓測試儀、雷射對角線測試和十字形雙軸真直度測試依然會得出相同的全域性垂直度結果 (15  $\mu\text{m}/\text{m}$ )。
- T 形和 L 形雙軸真直度測試會得出不同的結果，具體取決於設備方向。



## 局部垂直度模擬結果 — 機台 1

在機台的 XY 平面中的五個位置，我們使用每種測試方法模擬了局部垂直度測試。圖 19 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 1 進行局部垂直度測試模擬而得到的結果。我們僅在機台各軸上取 200 mm 的長度評估了局部垂直度，位置如圖中所示。

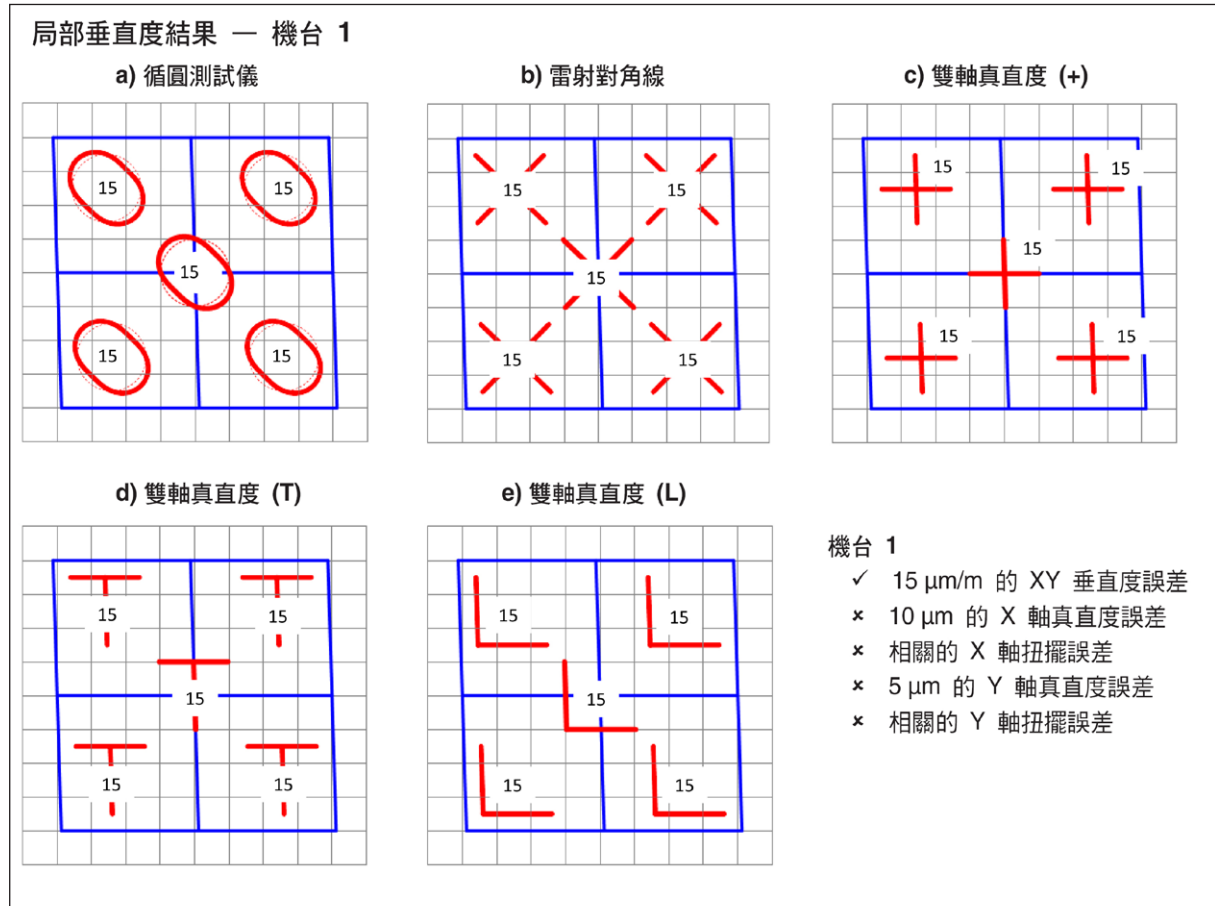


圖 19

機台 1 的模擬測試結果表明，無論採用哪一種測試位置和方法，局部垂直度結果均為 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。這與預期完全一致，因為所模擬的機台只有 15  $\mu\text{m}/\text{m}$  的全域性垂直度誤差，沒有其他誤差。

## 局部垂直度模擬結果 — 機台 2

圖 20 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 2 進行局部垂直度測試模擬而得到的結果。

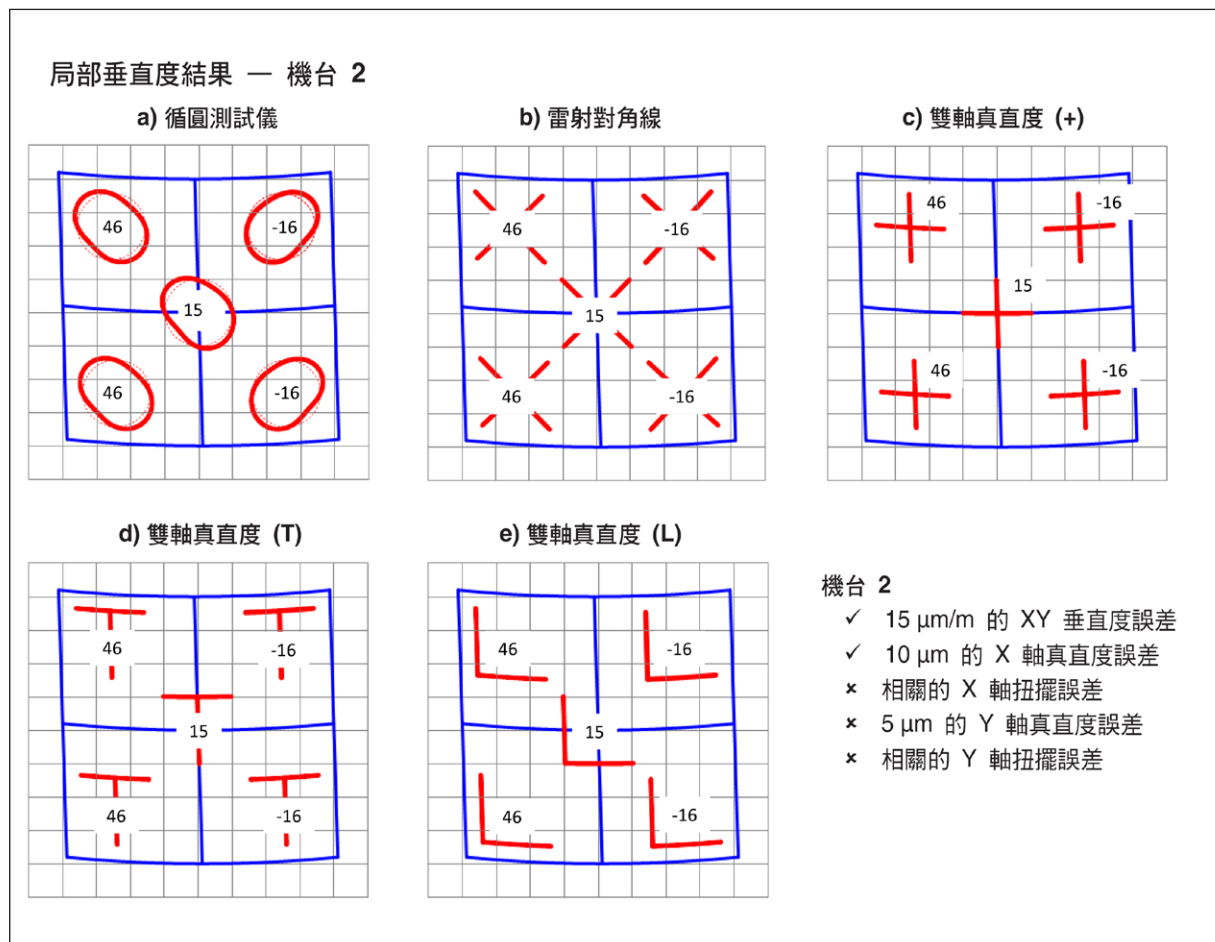


圖 20

機台 2 的模擬測試結果表明，局部垂直度結果因測試位置而異，但所有測試方法得出的結果相同。這表明，X 軸真直度誤差會導致局部垂直度發生變化。顯然，在此類機台上必須謹慎選擇測試位置。所有測試方法得出的結果都相同，因為機台 2 上不存在因扭擺引起的角度變形。

### 局部垂直度模擬結果 — 機台 3

圖 21 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 3 進行局部垂直度測試模擬而得到的結果。

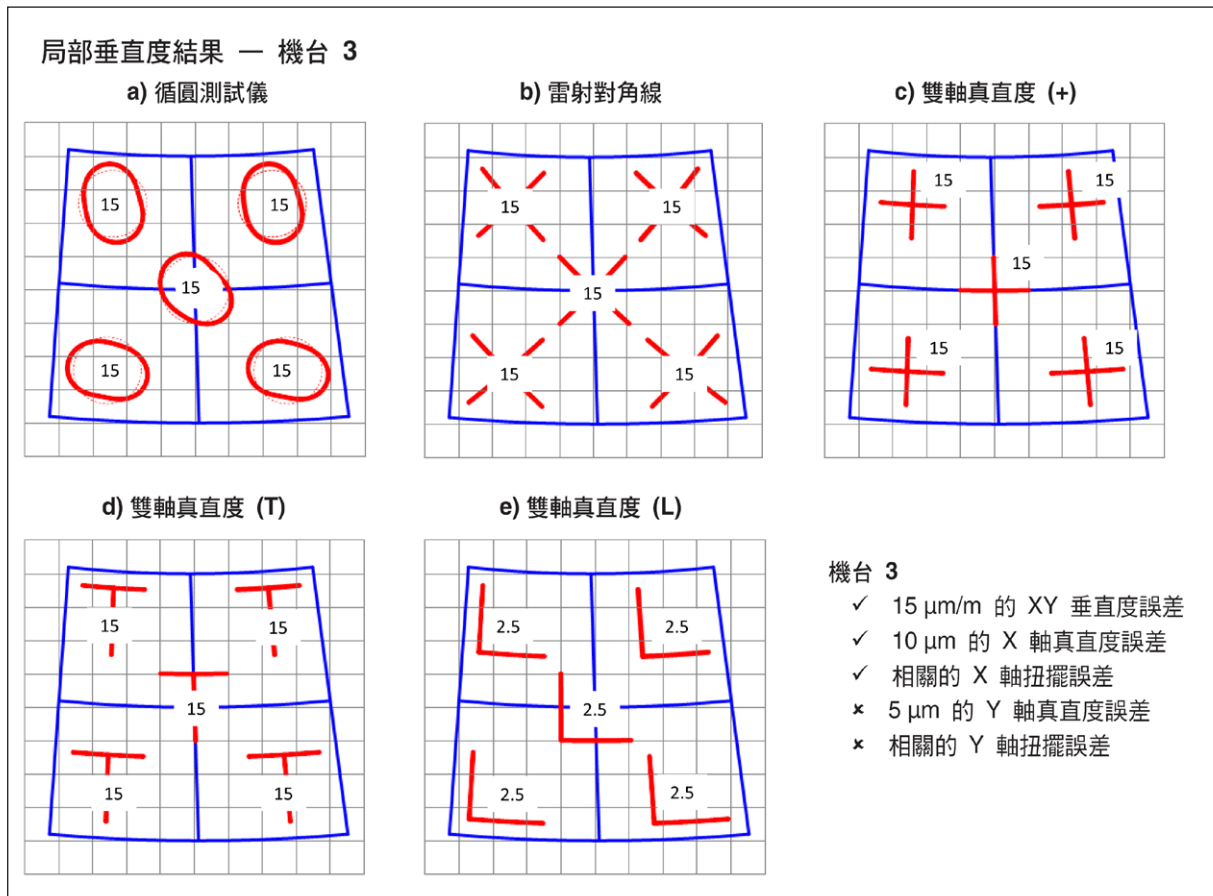


圖 21

機台 3 的模擬測試結果表明，局部垂直度結果因測試方法而異，但不受測試位置的影響。利用循圓測試儀、雷射對角線測試法、十字形和 T 形雙軸真直度測試法得出的結果相同，但 L 形雙軸測試法得出了不同的結果。無論在哪個測試位置，垂直度結果都一致。這表明，如果機台的某條軸存在真直度誤差，並引起相應的扭擺變形（假設機台是剛體），但是局部和全域性垂直度卻不受影響，即使機台發生明顯「彎曲」。

## 局部垂直度模擬結果 — 機台 4

圖 22 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 4 進行局部垂直度測試模擬而得到的結果。

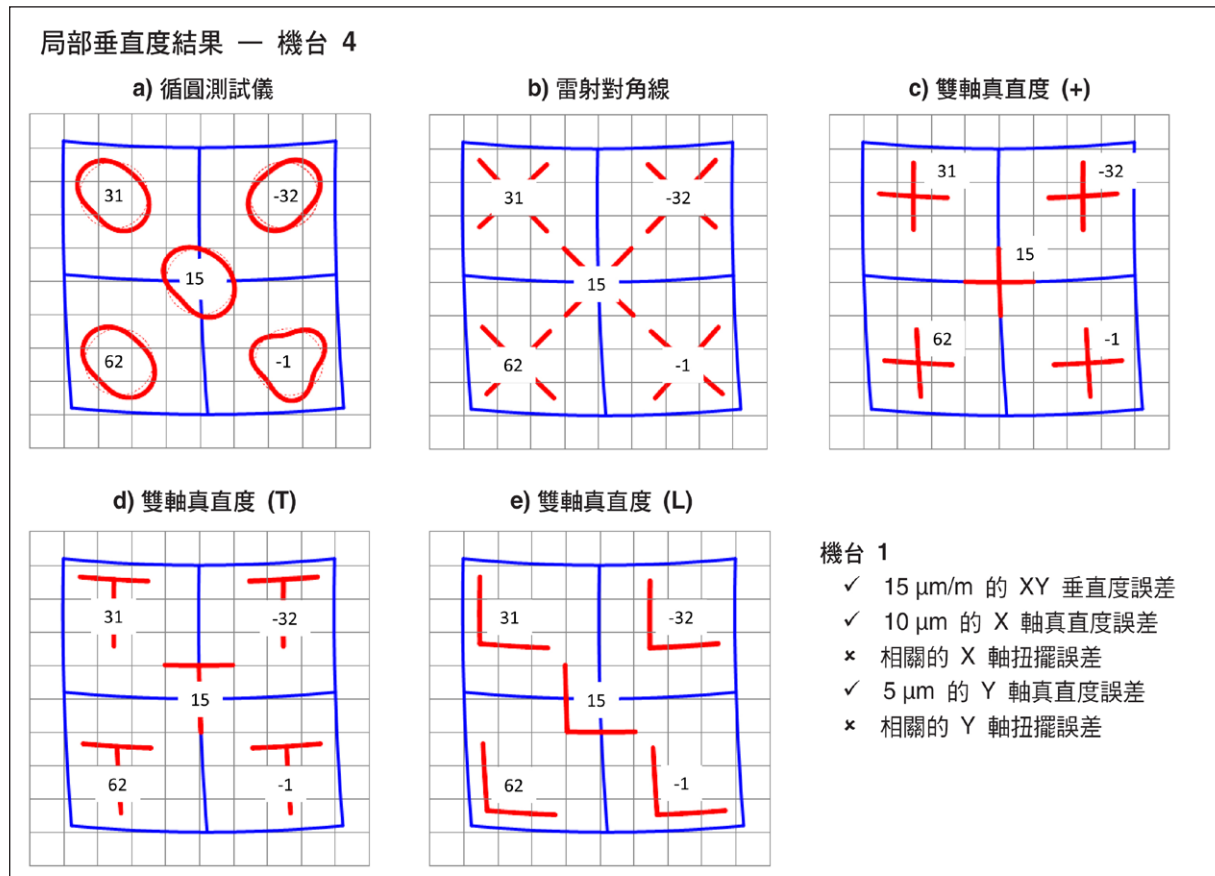


圖 22

機台 4 的模擬測試結果表明，局部垂直度結果因測試位置而異，但所有測試方法得出的結果相同。這說明了，X 軸和 Y 軸真直度誤差會導致局部垂直度發生變化。顯然，在此類機台上必須謹慎選擇測試位置。所有測試方法得出的結果都相同，因為機台 4 上不存在因扭擺引起的角度變形。

## 局部垂直度模擬結果 — 機台 5

圖 23 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 5 進行局部垂直度測試模擬而得到的結果。

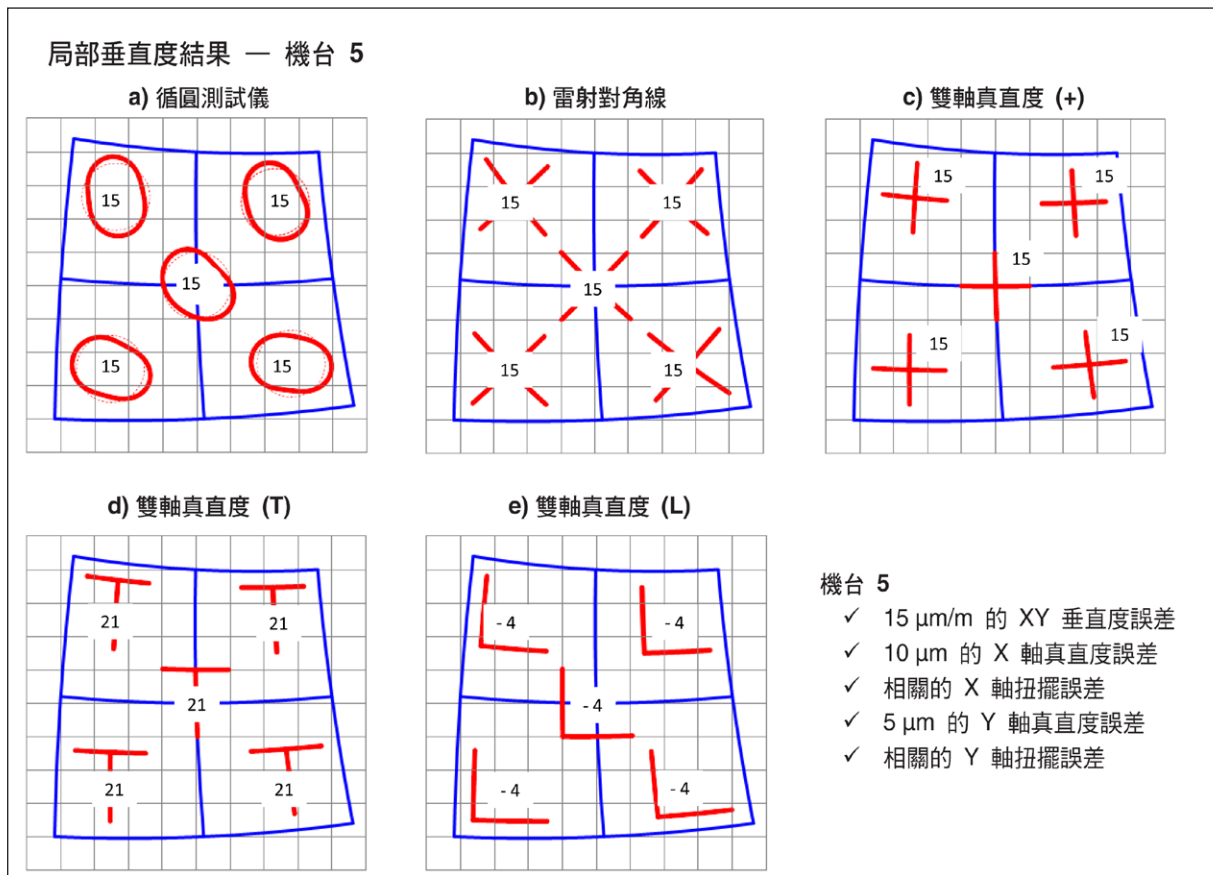


圖 23

機台 5 的模擬測試結果表明，局部垂直度結果因測試方法而異，但不受測試位置的影響。利用循圓測試儀、雷射對角線測試法和十字形雙軸真直度測試法得出的結果相同，但 L 形和 T 形雙軸測試法得出了不同的結果。同樣地，無論在哪個測試位置，垂直度結果都一致。這表明，如果機台的兩條軸存在真直度誤差，並都引起相應的扭擺變形（假設機台是簡單的剛體），但是局部和全域性垂直度卻不受影響，即使機台發生明顯「彎曲」。

## 局部垂直度結果 — 綜述

如果機台的一條或多條軸存在真直度誤差，但不存在因扭擺引起的角度變形，那麼，局部垂直度結果將因測試位置而異，但所有測試方法得出的垂直度結果都相同。

如果機台存在真直度誤差，並引起相應的角度（俯仰或扭擺）變形誤差，但是這並不會引起局部垂直度變化；因此，局部垂直度測試結果不受測試位置影響。然而，T 形和 L 形測試法得出的局部垂直度結果不同於利用循圓測試儀、雷射對角線測試法和十字形雙軸測試法得出的結果。其他模擬（本文中未顯示）表明，T 形和 L 形測試法得出的局部垂直度結果也因設備方向而異；這與在相同條件下得出的全域性垂直度結果也因設備方向而異一樣。



## 在長寬比不相等的機台上測試全域性垂直度誤差

在上文模擬的機台上，X 軸和 Y 軸都是等長的。然而，實際機台通常都是 X 軸比 Y 軸長，而 Z 軸最短。如果機台各軸的軸長明顯不等，那麼在測試全域性垂直度時，就需要採用可通過配置適應軸長差異的測試設備。雙軸真直度測試法和雷射對角線測試法通過輕鬆調整即可適應軸長差異。然而，循圓測試儀測試通常依賴 360° 圓弧測試，因此特別適用於各軸軸長非常接近的機台。Renishaw 先進的循圓測試儀診斷軟體在一定程度上解決了這個問題，該軟體可以分析 220° 圓弧，因而可對長寬比接近 1½ : 1 的機台進行全域性垂直度測試。

對於長寬比較大的機台，可以沿長軸向在多個位置進行循圓測試儀測試，然後對得出的垂直度結果取平均值。為了比較這種方法與其他測試方法的性能，我們模擬了另一台機台（機台 6），其 X 軸長 750 mm，Y 軸長 250 mm。這台機台的全域性垂直度誤差為 15 μm/m，X 軸真直度誤差為 10 μm，Y 軸真直度誤差為 5 μm。圖 24 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 6 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

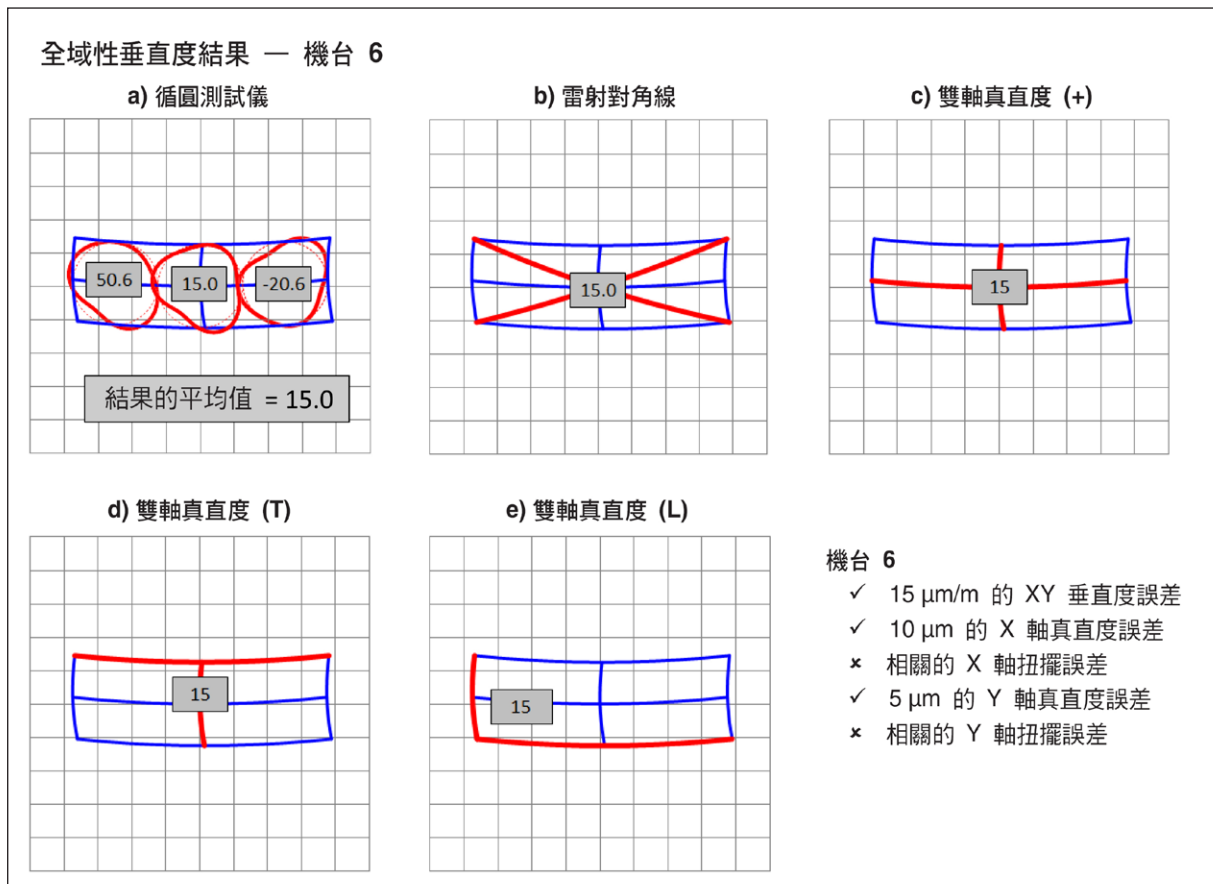


圖 24

請注意，三次循圓測試儀測試得出的垂直度結果的平均值為 15 μm/m，與其他各種測試方法得出的全域性垂直度結果相符。

機台 1 至 6 上模擬的真直度誤差都是簡單的曲線。然而，機台的細長軸往往表現出更複雜的真直度誤差走向。為了研究不同測試方法在這種條件下的性能，我們模擬了另外一台機台。機台 7 和機台 6 的區別只在於，機台 7 的 X 軸真直度誤差走向更複雜，這一點或許可以通過由艾裡支撐點的軸看出來。圖 25 顯示的是，採用每種模擬模式對機台 7 進行全域性垂直度測試模擬而得到的結果。

同樣地，三次循圓測試儀測試得出的垂直度結果的平均值與其他各種測試方法得出的全域性垂直度結果相符。請注意，如果加入相關的 X 軸和 Y 軸扭擺變形誤差，那麼通過 T 形和 L 形雙軸真直度測試法得

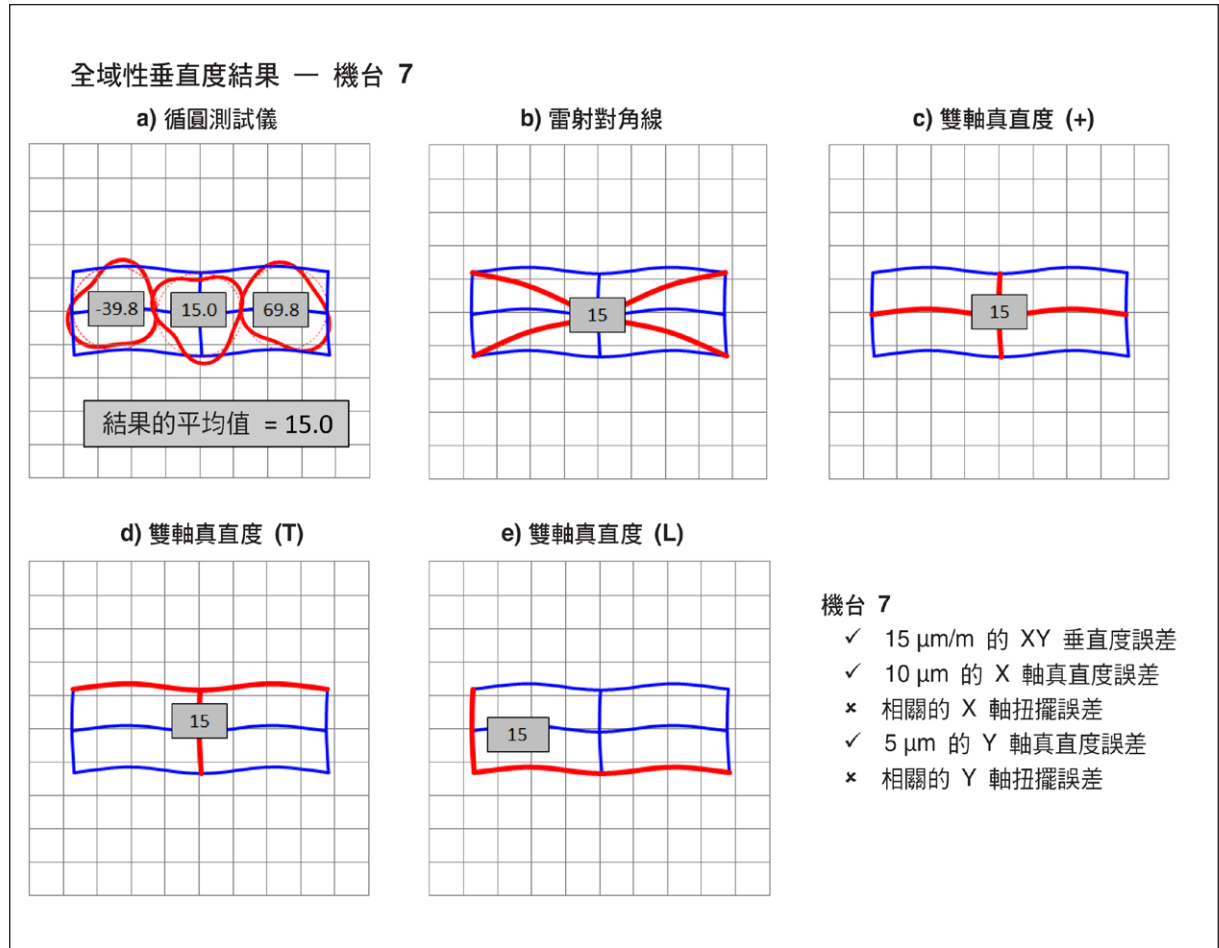


圖 25

出的全域性垂直度就會明顯不同，分別為 95  $\mu\text{m}/\text{m}$  和 39  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。然而，通過循圓測試儀測試得出的垂直度結果的平均值以及通過十字形雙軸真直度測試法和雷射對角線測試法得出的全域性垂直度結果仍然一致，即 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

為方便起見，上圖中模擬了三次半徑為 125 mm 的循圓測試儀測試，剛好容納在機台 750 mm x 250 mm 的工作區域內。然而，在大多數機台上，多個相鄰的循圓測試儀測試圓並不能剛好容納在機台的工作區域內。在這種情況下，可以使用等距分佈的重疊圓。為了研究這種方法的性能，我們在機台 6 和機台 7 上模擬了四次循圓測試儀重疊圓測試，如圖 26 所示。

## 循圓測試儀的重疊圓模擬測試

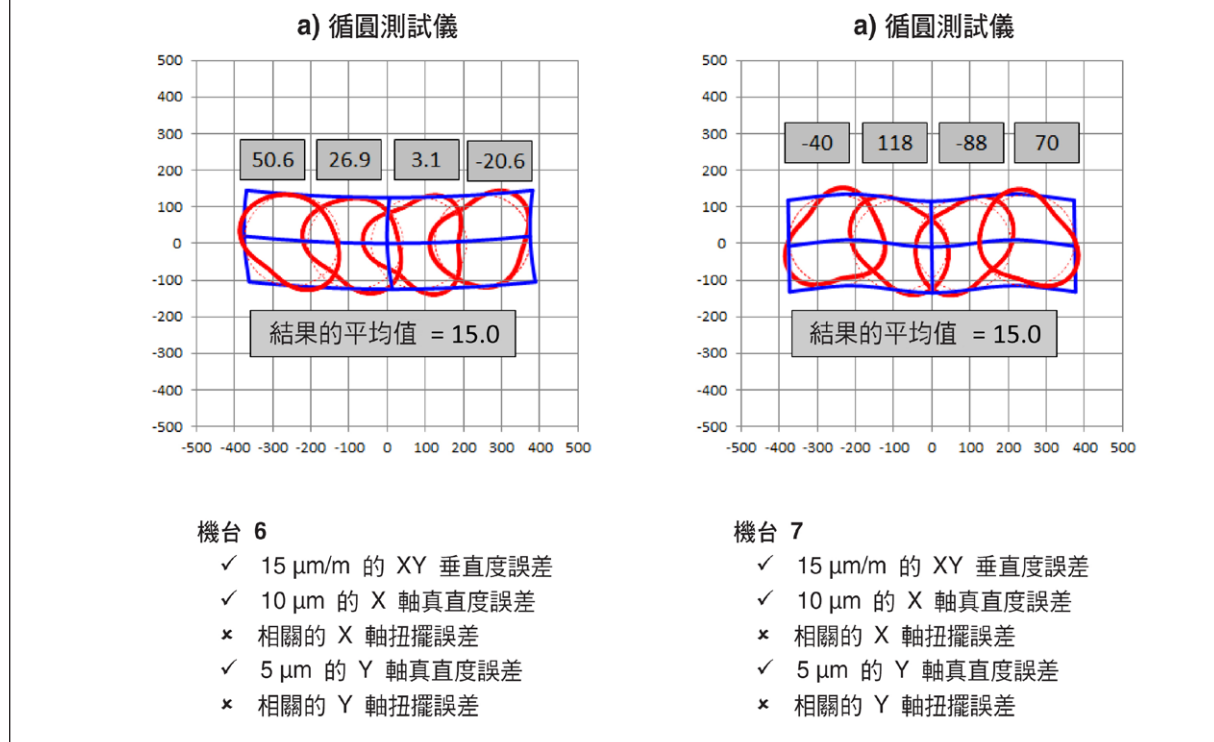


圖 26

這些模擬測試結果表明，四次循圓測試儀重疊圓測試得出的垂直度結果的平均值與三次循圓測試儀相鄰圓測試得出的垂直度結果的平均值一致，都是 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。雖然這兩個平均值並非在所有條件下都完全一致，但實際結果表明，這種方法允許一定程度的重疊。如果有兩個以上的測試圓重疊，那麼建議在設置測試時將重疊量設為相等。

上述結果表明，針對各軸軸長不等的機台，使用多次循圓測試儀測試得出的結果的平均值，可以有效估算法機台的全域性垂直度。

## 總體結論

本文研究了 ISO230-1 對兩條線性運動軸之間垂直度的定義，以及用於量測垂直度的各種測試方法。通過模擬各種測試方法，比較了它們在機台軸存在各種真直度和扭擺誤差組合的條件下的性能。

這些模擬表明了以下幾點：

- 通過 ISO230-1 標準所述各種垂直度測試方法得出的結果，因所用的測試方法、在機台工作區域內的測試位置及測試設備的方向而有所不同。
- 利用循圓測試儀、雷射對角線測試法和十字形雙軸真直度測試法在所有條件下得出的結果均相同。然而，如果機台的工作區域記憶體在因俯仰或扭擺引起的角度變形，那麼採用 L 形和 T 形雙軸真直度測試會得出不同的結果，而且這些結果還會因設備方向而異。
- 請注意，這些結果並不是「錯誤」結果，它們只是採用了不同的參照。因此，在比較不同系統的垂直度結果時務必謹慎。如果測試位置或測試方法不同，則結果也可能不同。此外，還需要考慮符號慣例和輔助線擬合方法之間的差異。

- 如果對機台工作區域的對角或對邊重複進行 L 形或 T 形雙軸真直度測試，然後對得出的全域性垂直度結果取平均值，那麼該平均值會更接近於利用循圓測試儀、雷射對角線測試法或十字形雙軸真直度測試法得出的結果。
- 對於軸長不等的機台，使用多次循圓測試儀測試得出的垂直度結果的平均值，可以估算全域性垂直度。
- 由於俯仰和扭擺誤差會導致垂直度測試結果因測試方法、測試位置和設備方向而異，因此在執行空間誤差補償時需要謹慎對待垂直度誤差。附錄 II 中詳細介紹了這一點。

作為補充，圖 27 是針對 ISO230-1 標準中介紹的各種全域性垂直度測試方法列出的「方法評價表」。此表依據的是上述各項模擬的結果，同時結合了每種方法的主要特點和侷限性。

測試方法評價表	角尺和千分錶按 L 形配置	直尺、角尺和千分錶按 T 形配置	直尺和 90° 分度器按十字形配置	雷射干涉儀真直度量測鏡組和光學角尺按 L 形配置	雷射干涉儀真直度量測鏡組和光學角尺按 T 形配置	使用循圓測試儀、環規或 MCG 執行圓弧測試	雷射對角線測試
使用簡便	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
適用於大型機台	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
適用於長寬比不相等的機器	☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
不受扭擺誤差影響	☆	☆☆	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
不受環境變化影響	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆☆	☆☆

圖 27

## 附錄 I — 真直度誤差及相關扭擺誤差的模擬

真直度誤差及相關扭擺誤差的模擬所用的方程式如下。假設機台的 X 軸長度為 L，它存在一個簡單的彎曲或曲線，因而導致真直度誤差為 S，如圖 28 所示，其中藍線表示變形（為使表述清楚，圖中誇大了變形）。

這種簡單的真直度誤差可以用二次方程  $\delta y = Kx^2$  來模擬，其中  $y$  是 X 軸於位置  $x$  在 Y 軸方向上的真直度偏差， $K$  是常數。代入  $\delta y = S$  和  $x = L/2$ ，重新整理後得出  $K = 4S/L^2$ 。因此，X 軸於某個位置在 Y 軸方向上的 X 軸真直度誤差的方程式為：

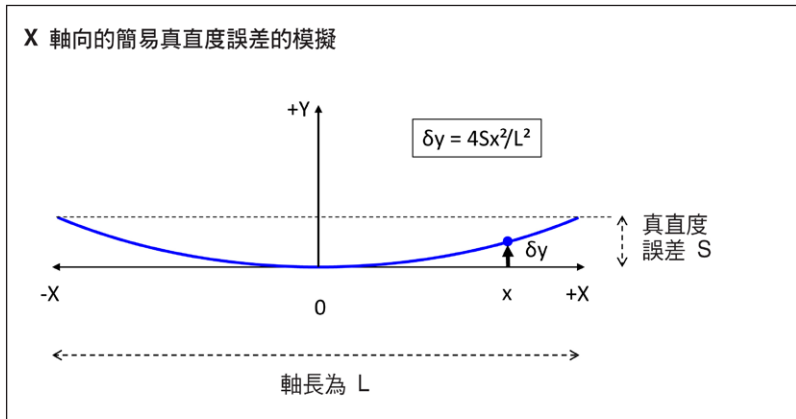


圖 28

$$\delta y = 4Sx^2/L^2 \dots\dots\dots \text{方程式 1}$$

現在設想一下，如果在機台彎曲的 X 軸上方安裝一條筆直的 Y 軸，將會發生什麼，如圖 29（紅線）所示。在沒有其他約束條件的情況下，當 X 軸運動時，Y 軸的角度會隨 X 軸的局部扭擺角度而變化。用方程式 1 對  $x$  求導，便可得出這個「相關扭擺角度」 $\theta$ ，即  $\theta = 8Sx/L^2$ 。相關扭擺誤差會導致在 X 軸方向上出現小幅度位移  $\delta x$ ，該位移量會隨在 Y 軸上的位置而變化。如果  $\theta$  表示弧度，我們忽略二階項，則該位移量可近似表示為  $\delta x = -y\theta$ 。

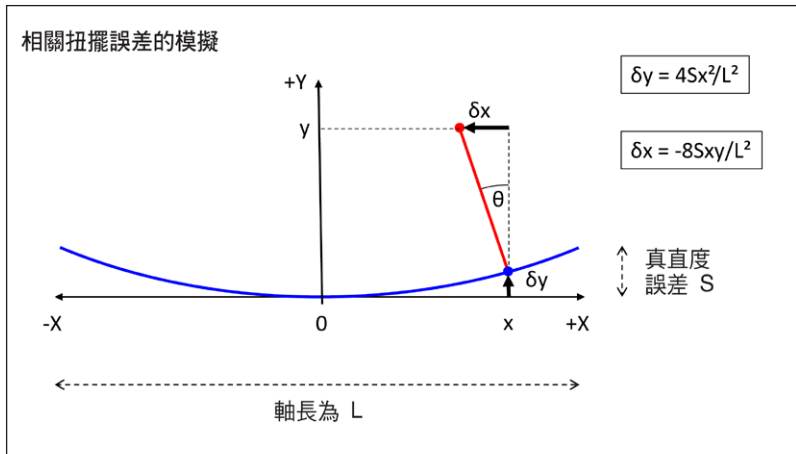


圖 29

請注意，如果機台還存在全域性垂直度誤差  $\theta_0$ ，那麼先把這個誤差和  $\theta$  相加，再計算  $\delta x$ ，得出  $\delta x = -y(\theta_0 + \theta)$ 。代入  $\theta$  之後，得出：

$$\delta x = -y(\theta_0 + 8Sx/L^2) \dots\dots\dots \text{方程式 2}$$

通過方程式 1 和方程式 2 可計算出在任意一般  $x, y$  位置的機台位置細微誤差  $\delta x$  和  $\delta y$ 。如果命令機台移至位置  $[x, y]$ ，那麼機台實際到達的位置是  $[(x + \delta x), (y + \delta y)]$ 。代入  $\delta x$  和  $\delta y$  之後，得出：

$$\text{實際位置} = [(x - y(\theta_0 + 8Sx/L^2)), (y + 4Sx^2/L^2)] \dots\dots\dots \text{方程式 3}$$

如果機台存在垂直度誤差  $XY$ ，X 軸存在真直度誤差，而且因該真直度誤差引起相關扭擺變形，則可使用方程式 3 在任意  $x, y$  位置的定位誤差。由於真直度誤差並不是一定會導致相關的扭擺誤差變形（取決於機台構造和機械結構鏈），因此  $8Sx/L^2$  可能為 0。在這種條件下，方程式 3 變為：

$$\text{實際位置} = [(x - y\theta_0), (y + 4Sx^2/L^2)] \dots\dots\dots \text{方程式 4}$$



我們可以用類似的方式推導出關於 Y 軸的方程式，以此模擬 Y 軸真直度誤差及任何相關扭擺誤差的影響。（請注意，在本例中，無需再次考慮垂直度誤差。）結合這些方程式，我們可以計算出本文中模擬的所有機台的定位誤差。

在模擬每種垂直度測試方法時，將生成適用的命令位置序列（根據測試方法而定），計算出在每個位置的定位誤差，然後應用適用的演算法來計算垂直度。

## 附錄 II — 機台垂直度誤差的空間補償

在執行垂直度誤差補償或調整時，應當考慮以下幾點。

由於真直度、俯仰和扭擺誤差會根據測試方法、測試位置和設備方向的不同而導致垂直度測試結果出現變化，因此建議先對真直度、俯仰和扭擺誤差進行量測和補償。在盡可能減小這些誤差之後，垂直度（以及附帶的線性）誤差的量測將基本不受測試位置和測試方法的影響，從而可提高垂直度結果的可靠性和易用性。

對測得的垂直度誤差進行補償時應務必謹慎，以確保所應用的補償可以保持或優化與機台上其他輔助線/特徵之間的校準狀態。需要考慮的校準狀態舉例如下。

- 補償的軸向運動與主軸的旋轉軸中心線之間的平行度或垂直度
- 補償的線性軸運動與工作台面之間的平行度或垂直度
- 補償的軸向運動與第四軸和第五軸上的參考點之間的校準

這些潛在的影響因素可以透過一個簡單的例子清楚地展示出來。假設一台車床，我們採用本文中介紹的一種測試方法測得，X 軸和 Z 軸之間的垂直度誤差為  $40 \mu\text{m}/\text{m}$ ，如圖 30a 所示。圖中顯示，Z 軸已正確校準，與主軸的旋轉軸中心線平行，但 X 軸存在校準偏差。如果只單獨量測 XZ 垂直度，則用戶無法判斷 X 軸和/或 Z 軸是否與主軸已正確校準，因此存在可能會錯誤應用垂直度誤差補償的風險。用戶可以選擇對 X 軸或 Z 軸（或任意兩軸組合）應用交叉軸補償，以修正垂直度誤差。

圖 30b 顯示的是，在 X 軸運動過程中，在 Z 軸上正確地應用細微（ $40 \mu\text{m}/\text{m}$ ） $\delta z$  修正的效果。請注意，此時刀具的補償 X 軸運動與 Z 軸成  $90^\circ$  度（因此，X 軸和 Z 軸此時看起來互相「垂直」），而且 Z 軸與主軸的旋轉軸中心線保持平行。

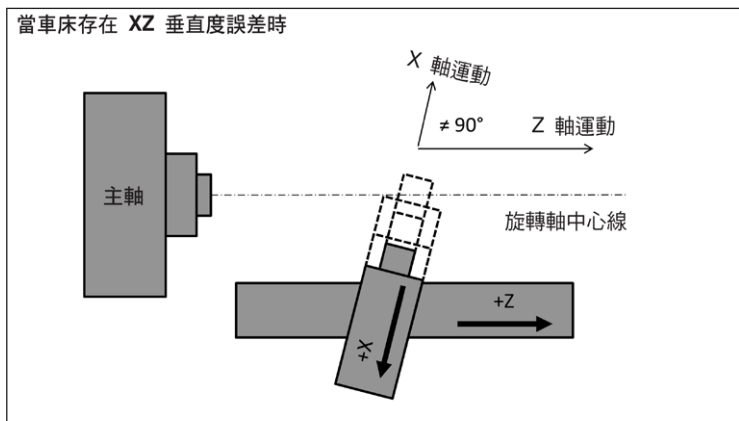


圖 30a

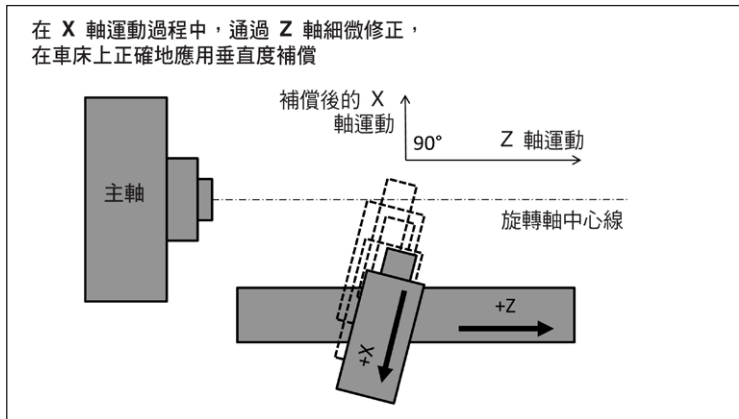


圖 30b

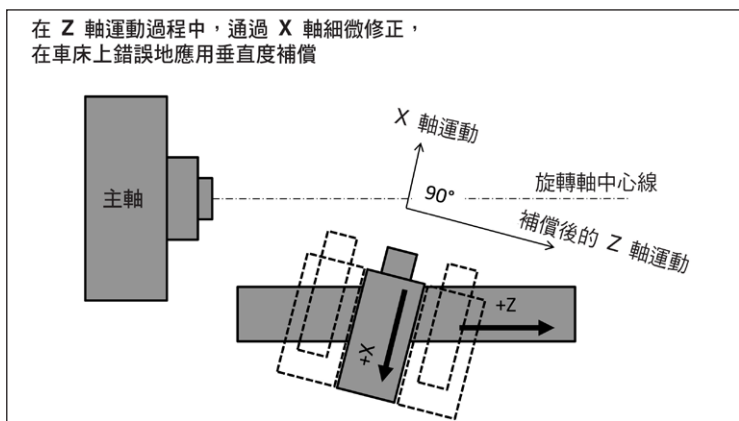


圖 30c

圖 30c 顯示的是，在 Z 軸運動過程中，在 X 軸上錯誤地應用細微 ( $40\mu\text{m}/\text{m}$ )  $\delta x$  修正的效果。請注意，儘管刀具的補償 Z 軸運動與 X 軸成 90 度（X 軸和 Z 軸仍然看起來互相「垂直」），但補償的 Z 軸運動與主軸的旋轉軸中心線不平行。

在圖 30b 和圖 30c 中，通過補償可確保補償的 X 軸和 Z 軸運動相互垂直；但在圖 30c 中，通過補償卻導致補償的 Z 軸運動與主軸的旋轉軸中心線之間出現校準偏差。這個例子清楚地說明了，在通過軟體補償機台垂直度之前，為什麼一定要考慮機台的其他校準狀態。在補償較大的 XZ 或 YZ 垂直度誤差時，這一點尤為重要。在這種情況下，建議先通過機械調整來消除 X 軸、Y 軸、Z 軸、主軸的旋轉軸中心線和機台工作台之間的大部分垂直度和平行度校準偏差。然後，再通過空間誤差補償進行最終調整。


#### 參考文件

1. ISO230-1:2012 《工具機測試規範 — 機台在空載或準靜態條件下運作時的幾何精度》
2. Renishaw 白皮書《TE325 — 雷射干涉法真直度量測及其在移動工作台上的應用》
3. ISO230-4:2005 《工具機測試規範 — 第 4 部分：CNC 機台的圓弧測試》
4. ISO230-6:2002 《工具機測試規範 — 第 6 部分：立體對角線和平面對角線位置精度的測定（對角線位移測試）》

[www.renishaw.com.tw/contact](http://www.renishaw.com.tw/contact)



#renishaw

 +886 4 2460 3799

 [taiwan@renishaw.com](mailto:taiwan@renishaw.com)

© 2023 Renishaw plc 保留所有權利。未經 Renishaw 事先書面同意，不得複製或再製本文件之一部分或全部，或以任何方式轉移至任何其他媒體或語言。  
RENISHAW® 及測頭標誌為 Renishaw plc 註冊商標。Renishaw 產品名稱、命名及「apply innovation」標記為 Renishaw plc 或其子公司商標。其他品牌、產品或公司名稱為各自所有者的商標。  
儘管本公司於發布本文件時已盡相當之努力驗證其正確性，於法律允許範圍內，本公司概不接納以任何方式產生之擔保、條件、聲明及賠償責任。  
RENISHAW 保留對本文件及設備、和/或本文所述軟體及規格進行變更之權利，恕不另行通知。  
Renishaw plc 於英格蘭及威爾斯註冊登記。公司編號：1106260。註冊辦公室：New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。

文件編號：H-5650-2995-01-A

發布日期：01.2023