

以雷射干涉儀做真直度量測及在移動工作台上的應用

作者：M.A.V. Chapman、R. Fergusson-Kelly、W. Lee

簡介

本白皮書詳細介紹了 Renishaw 雷射干涉儀真直度量測光學鏡組的工作原理，接著解釋了如何使用這些光學鏡組來量測移動工作台的真直度；特別著重說明當真直度干涉鏡是移動鏡組時與當反射鏡是移動鏡組時，這兩種設置之間的量測值差異。

真直度量測光學鏡組概述

圖 1 是量測移動工作台的 X 軸水平方向真直度的典型設置。所用的三個關鍵元件是：

- 雷射頭
(如圖所示安裝在三腳架上)
- 真直度干涉鏡
(如圖所示安裝在主軸上)
- 真直度反射鏡
(如圖所示安裝在移動工作台上)

當工作台沿箭頭方向 (X 軸) 移動時，雷射頭和光學鏡組可量測工作台的運動與一條完美直線之間的任何水平 (左右) 方向偏差。圖 2 是光學鏡組和穿過它們的雷射光束路徑的近距離視圖。

此外，還可以將真直度干涉鏡和反射鏡旋轉 90° (見圖 3) 並重複上述量測過程，便可量測工作台的運動與一條完美直線之間的垂直方向偏差，即垂直方向真直度。

為簡單起見，下文中的所有示意圖和描述均指在立式主軸 (Z) 機台上量測水平軸 (X) 的垂直方向真直度。不過，本文中闡述的這些原理同樣適用於座標系適當旋轉後的其他機台佈局。

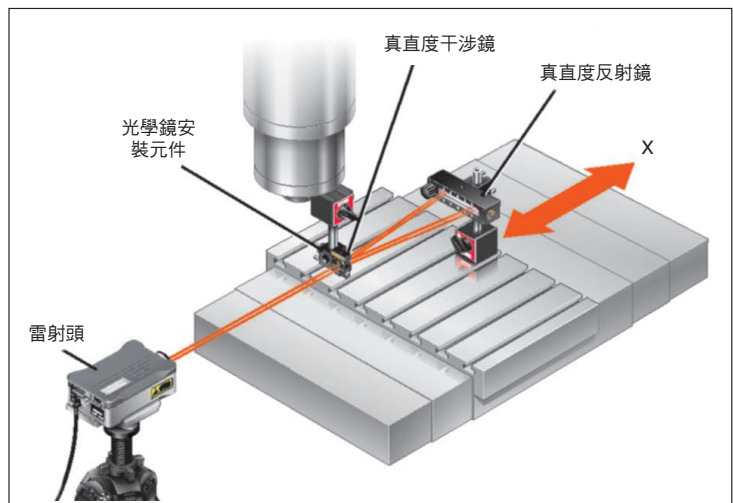


圖 1

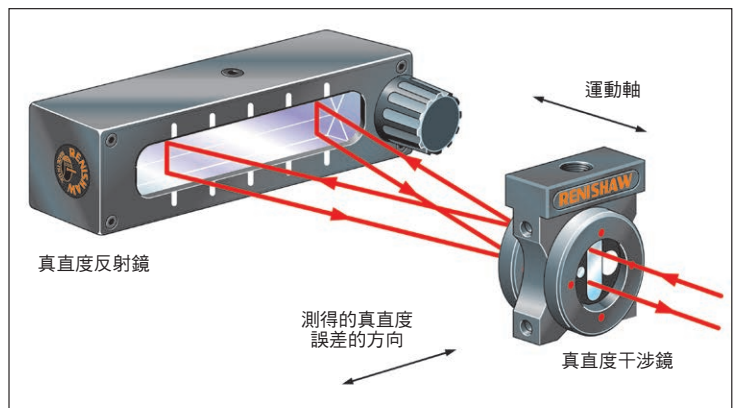


圖 2

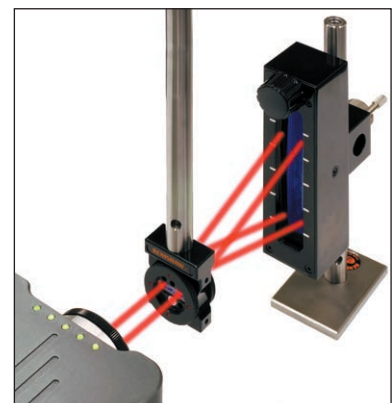


圖 3

為了解雷射系統如何量測真直度，最簡單的方法是，首先看一看當反射鏡是移動鏡組時，將會發生什麼，如圖 4 所示。從雷射頭射出的雷射光束到達真直度干涉鏡時，將被分成兩條光束，二者之間的發散角為 2θ 。（原理請詳見下文中的《真直度干涉鏡詳解》章節）。這兩條光束到達真直度反射鏡後，將被原路反射回來（原理請詳見下文中的《真直度反射鏡詳解》章節）。它們穿過真直度干涉鏡後將重新合為一條光束並返回到雷射頭，然後它們將在相互干涉後產生量測訊號。最後，雷射系統將通過檢測被干涉鏡分開的兩條光束之間的光程長度相對變化來量測真直度誤差。

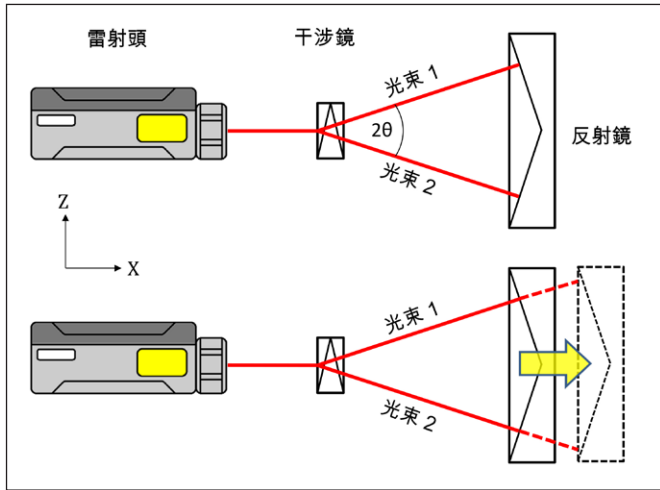


圖 4

如果真直度反射鏡在 X 軸方向上沿一條完美直線移離干涉鏡（如圖 4 中的黃色箭頭和虛線新位置所示），那麼光束 1 和光束 2 的光程會增加相同的長度，因此雷射系統的真直度量測值不會發生變化。

但是，如真直度反射鏡在 Z 軸方向上移動了距離 S（如圖 5 中的黃色箭頭和虛線位置所示），那麼光束被干涉鏡分開照射到反射鏡上再被反射回干涉鏡上之後，光束 1 的光程長度將增加 $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ ，而光束 2 將縮短 $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 。因此，光束 1 和光束 2 之間的光程長度相對變化為 $4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 。在真直度模式下，雷射系

統的軟體將系統測出的光程長度相對變化轉換為真直度讀數，然後除以 $4 \cdot \sin(\theta)$ ，最後得出垂直方向真直度讀數 S。θ 的值是根據所使用的真直度量測光學鏡組（長距離或短距離）預先定義的。

現在再看一下，如果反射鏡扭轉（傾斜）一個小角度 α 將會發生什麼，如圖 6 所示。

（請注意，為使表述清楚，本例中誇大了角度。）這時，光束 1 和光束 2 的光程長度再次發生相對變化。如果 α 較小（例如可能是因移動線性軸的俯仰誤差引起的），則可以看到光束 1 的光程長度縮短約 $2 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha)$ ，其中 L 是光學鏡組之間的間隔；同時，光束 2 的光程長度增加了 $2 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，光束 1 和光束 2 之間的總光程長度相對變化為 $4 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha)$ 。然後，雷射系統的軟體將該總光程長度相對變化除以 $4 \cdot \sin(\theta)$ ，最後得出真直度誤差讀數 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，如果真直度反射鏡的角度改變，那麼真直度讀數也會改變。

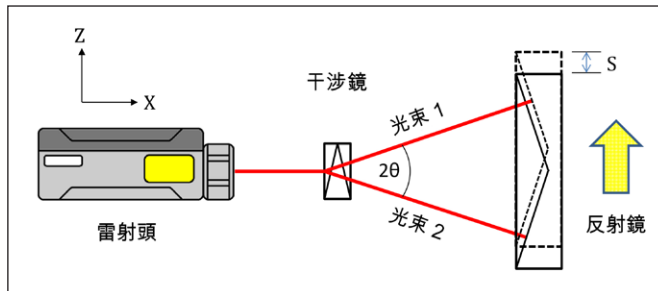


圖 5

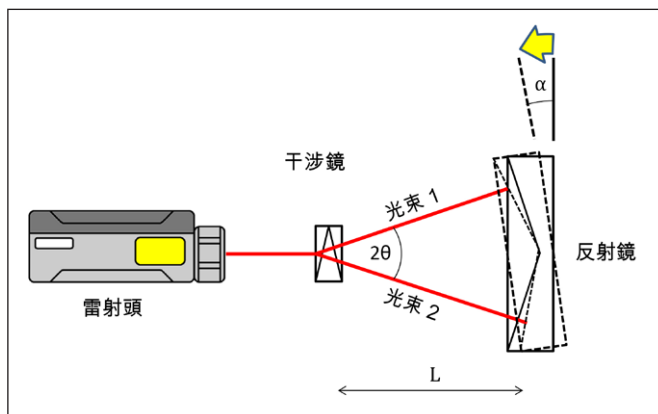


圖 6

由於發現了反射鏡的角度變化似乎會「影響」真直度讀數，因此人們通常認為真直度反射鏡必須始終處於靜止狀態。然而，事實並非如此，因為有時我們可以反過來利用這種影響。

我們可以將這些光學鏡組與千分錶和精密直尺進類比（見圖 7）。真直度反射鏡和直尺的使用原理類似，如果反射鏡或直尺沿 Z 軸方向移動，則雷射干涉測量結果或千分錶會直接記錄移動距離。

如果反射鏡圍繞一個點傾斜了小角度 α ，且該點與干涉鏡之間的距離為 L ，則真直度讀數會改變 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。同樣地，如果直尺圍繞一個點傾斜了角度 α ，且該點與千分錶測頭之間的距離為 L ，則真直度讀數也會改變 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，我們可以把真直度干涉鏡想像成相當於千分錶，而真直度反射鏡相當於精密直尺。真直度反射鏡可在空間中沿其中心線有效生成一條虛擬直尺。然後真直度干涉鏡會「顯示」工作台的運動與該虛擬直尺之間的偏差。在決定哪個真直度量測光學鏡應該移動而哪個應該靜止不動時，這個類比非常有用（如圖 8 所示），我們稍後再詳細討論。

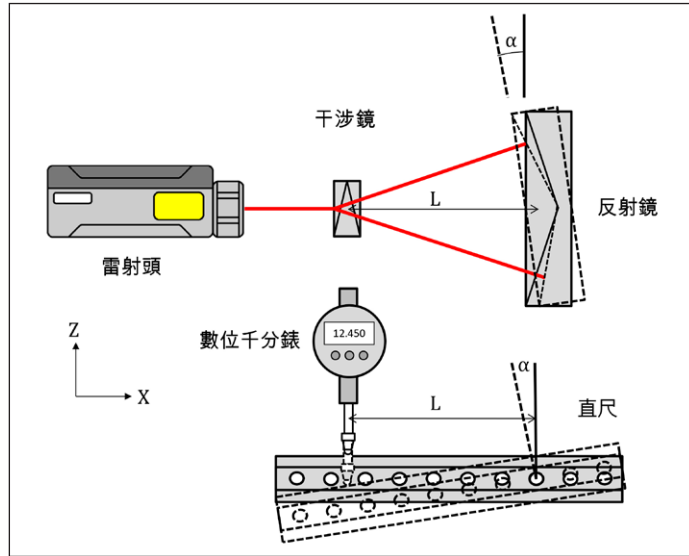


圖 7

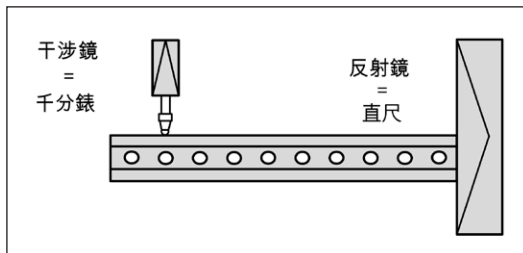


圖 8

真直度反射鏡詳解

圖 4 到圖 7 以示意圖的方式展示了一種簡單的真直度反射鏡，由兩個彼此成一定角度的平面鏡組成。而圖 1 到圖 3 所示的是 Renishaw 的反射鏡，設計較為複雜。它由一塊實心玻璃製成，具有兩個折射面和兩個反射面，如圖 9 所示。（請注意，為使表述清楚，圖中修改了頂角。實際上，短距離真直度反射鏡的頂角接近 177° 。）

圖 10 展示了反射鏡周圍及其內部的光束路徑。當雷射光束射入玻璃時，由於折射率提高，光束經過折射後會靠近法線，然後被兩個互成 90° 的反射面逆向反射出去。最終，當雷射光束離開玻璃時，由於折射率降低，光束經過折射後會偏離法線。

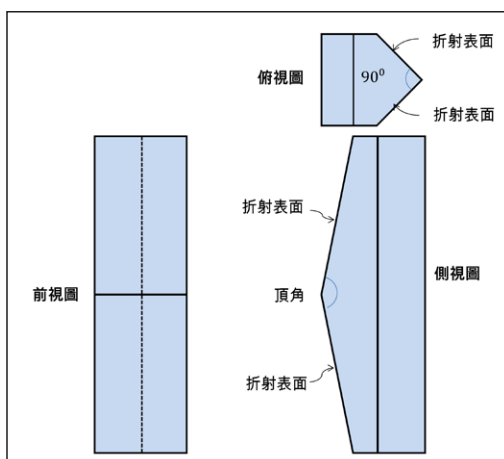


圖 9

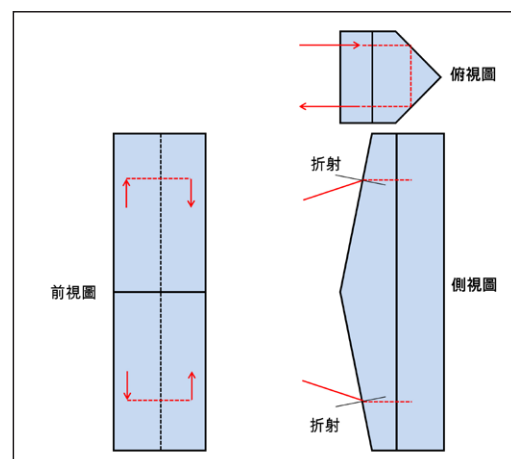


圖 10

這種設計雖然比較複雜，但比簡單的雙平面鏡設計具有更多優點：

- 逆反射設計可確保射出光束和返回光束不會重疊，因此在光束校準過程中可以輕鬆追蹤光束路徑。
- 逆反射還意味著，反射鏡無需繞其長軸進行精確的滾擺校準，因為逆反射可確保將光束反射回干涉鏡上。這樣使得光束校準更加容易。
- 使用實心玻璃可以確保尺寸穩定性和機械強度。

詳細的光學模型表明，如果實心反射鏡圍繞一個點傾斜了小角度 α ，且該點與干涉鏡之間的距離為 L （如圖 7 所示），則真直度讀數仍會如前所述改變 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，我們依然可以想像這種較為複雜的實心玻璃真直度干涉鏡在空間中沿其中心線有效生成一條虛擬直尺，如前文所述。

真直度干涉鏡詳解

真直度干涉鏡（又稱沃拉斯頓稜鏡）由三個楔形雙折射晶體組成，如圖 11 所示。與折射率恆定的各向同性材料不同，雙折射材料的折射率隨晶軸方向及入射光束的偏振而變化。光透過這種材料時，將以平行和垂直於晶體的光軸這兩個線性偏振方向進行傳輸。其中一個偏振方向的折射率稍高，光傳播得較慢；而另一個偏振方向的折射率較低，光傳播得較快。晶體的兩個外楔形的光軸呈垂直方向，內楔形的光軸則呈水平方向（如圖 11 中的雙頭箭頭所示）。

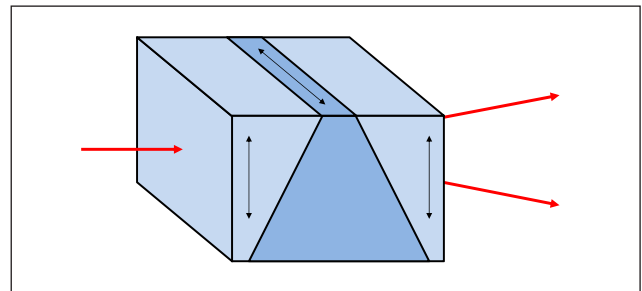


圖 11

圖 12 顯示了沃拉斯頓稜鏡內的光束路徑。請注意，為使表述清楚，圖中將圓偏振入射光束分成了兩條獨立光束（通常情況下它們是重疊的），光束發散角也有所誇大。

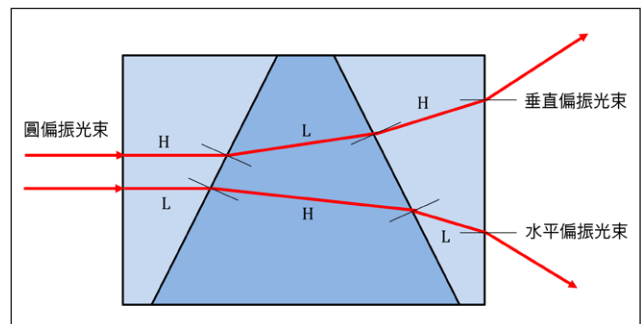


圖 12

一旦圓偏振雷射光束照射到雙折射材料的第一個楔形上，它就會被分成兩條線性偏振光束，其中一條光束垂直偏振（即與第一個楔形的晶軸平行偏振），而另一條光束水平偏振（即與第一個楔形的晶軸垂直偏振）。由於這種材料的雙折射特性，垂直偏振光束的折射率 (H) 略高於水平偏振光束的折射率 (L)，如圖所示。兩條光束沿相同方向穿過第一個楔形。

當垂直偏振光束（上方）到達第一個和第二個楔形之間的交界面時，由於折射率降低，光束經過折射後會偏離法線。然而，當水平偏振光束（下方）到達該交界面時，由於折射率提高，光束經過折射後會靠近法線。因此，光束從這個點開始發散。

當垂直偏振光束到達第二個和第三個楔形之間的交界面時，由於折射率提高，經過這次折射後，光束會靠近法線。同時，當水平偏振光束到達該交界面時，由於折射率降低，經過這次折射後，光束會偏離法線。由於第二個和第三個楔形之間的交界面與第一個和第二個楔形之間的交界面的傾斜方向相反，因此兩條光束的發散角增大。

最終，當這兩條光束穿過第三個楔形回到空氣中時，由於折射率降低，它們都會進一步偏離法線，因而發散角進一步增大。真直度量測光學鏡組按照嚴格的公差製造，因此沃拉斯頓稜鏡折射出的兩條光束之間的發散角 (2θ) 能夠與真直度反射鏡的有效角相匹配，偏差控制在幾角秒內。

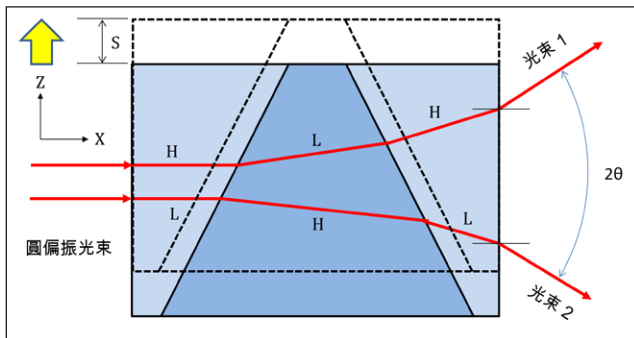


圖 13

正是因為沃拉斯頓稜鏡內部的不同折射會使光束發散，所以它可用於量測真直度。我們來看一看，如果沃拉斯頓稜鏡沿 Z 軸方向移動了距離 S 到達新位置，如圖 13 中的虛線所示，將會發生什麼。顯然，上方（垂直偏振）光束會穿過較多具有較低折射率 (L) 的材料，而下方（水平偏振）光束會穿過較多具有較高折射率 (H) 的材料，因此光程長度會相應地發生改變。由於穿過沃拉斯頓稜鏡的光程長度差異也是產生光束發散角 2θ 的原因之一，因此我們可以很明顯地看出，當沃拉斯頓稜鏡側向移動距離 S 之後，（形成干涉量測光束 1 的）上方光束的光程長度會縮短 $2.S.\sin(\theta)$ ，而（形成干涉量測光束 2 的）

下方光束的光程長度會增加 $2.S.\sin(\theta)$ 。因此，光束 1 和光束 2 之間的總光程長度相對變化為 $-4.S.\sin(\theta)$ 。雷射系統的軟體將光程長度相對變化轉換為真直度讀數，然後除以 $4.\sin(\theta)$ ，最終得出真直度誤差讀數 $-S$ 。請注意，這與當真直度反射鏡側向移動距離 S 時（見圖 5）得出的結果完全相同，只是符號相反。

現在我們看一下，如果沃拉斯頓稜鏡圍繞其幾何中心傾斜了小角度 α ，將會發生什麼（為使表述清楚，圖 14 中的角度有所誇大）。通過對雷射系統的光束路徑進行詳細的光學模型，結果表明：光束 1 和光束 2 之間的光程長度差異（以及由此得出的真直度讀數）不會因沃拉斯頓稜鏡的小角度移動而明顯改變。將真直度干涉鏡比作千分錶時，這個結論同樣適用，也不會受到小幅度變化的影響。

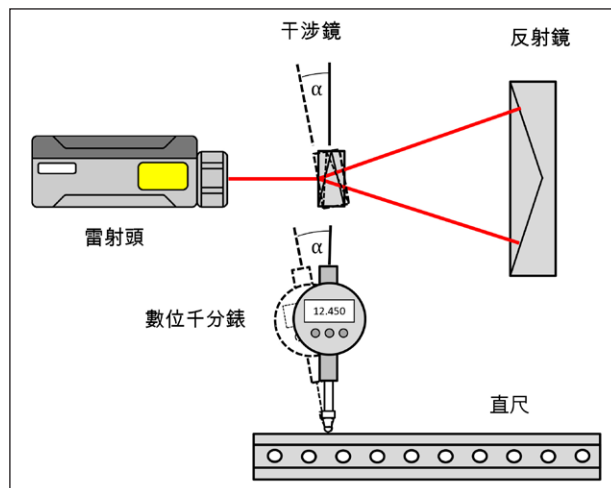


圖 14

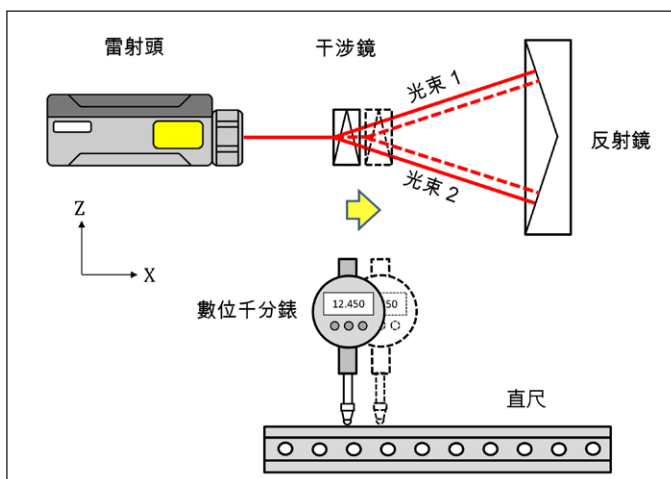


圖 15

圖 15 展示了，如果在 X 軸方向上沿一條完美直線移動沃拉斯頓稜鏡（如黃色箭頭和虛線新位置所示），將會發生什麼。光束 1 和光束 2 的光程會增加相同的長度，因此雷射系統的真直度量測值不會發生變化。將千分錶沿一條校準過的直尺移動時，這個結論同樣適用。

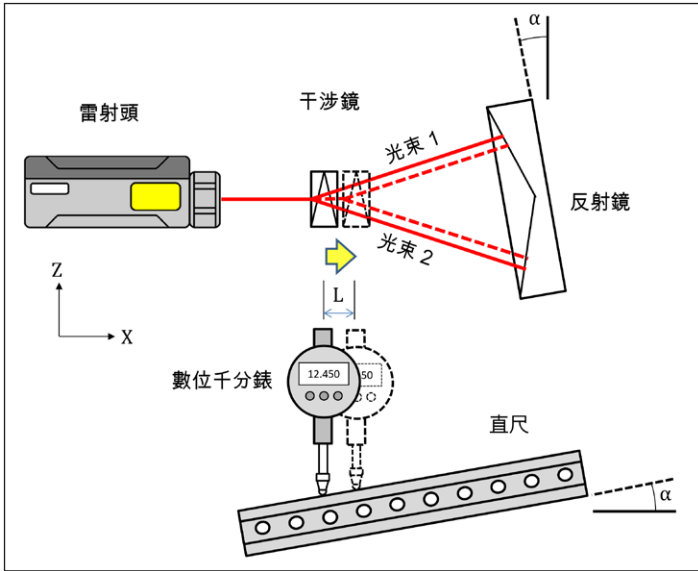


圖 16

最後我們看一下，如果再次在 X 軸方向上沿一條完美直線移動沃拉斯頓稜鏡，將會發生什麼；但是這次我們將真直度反射鏡略傾斜一個小角度 α ，如圖 16 所示（有所誇大）。如果移動了距離 L ，則雷射系統的真直度讀數將改變 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。請注意，如果直尺也傾斜了同樣的角度，則千分錶的讀數也會發生完全相同的改變。在真直度量測過程中，如果反射鏡或直尺與運動軸之間存在校準偏差，那麼量測值會出現「斜率誤差」。軟體通常會對資料進行端點擬合或最小二乘法擬合，以消除這項誤差。然而，最好盡可能減小斜率誤差（通過調整直尺或反射鏡），以降低由於量測時在 X 軸方向上的定位偏差，而對真直度量測結果產生的影響；對於雷射頭來說，可確保在整個軸方向上保持高訊號水平。

雷射校準的影響

前文中，我們的分析側重於真直度干涉鏡和反射鏡的操作，並將它們與千分錶和直尺進行比喻。然而，雷射系統執行量測還需要用到第三個元件，即雷射頭。我們通過詳細的分析確定了雷射頭位置的相對重要性，以及校準偏差對真直度量測值的影響。

首先看一個簡單的情況，將雷射頭沿 Z- 軸方向移動距離 S ，如圖 17 所示。這時雷射光束照射到干涉鏡上的位置向下移動了距離 S ，與干涉鏡向上移動距離 S 的情況完全相同（見圖 13）。如前所述，這樣的移動會導致光束 1 和光束 2 在干涉鏡附近發生 $-4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 的光程長度相對變化。但是，雷射光束照射到反射鏡上的位置也向下移動了距離 S ，與反射鏡向上移動距離 S 的情況完全相同（見圖 5）。這樣的移動會導致兩條光束在反射鏡附近發生 $+4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 的光程長度相對變化。這兩個變化長度相等，一正一負，剛好抵消。因此，如果雷射頭只是平移，那麼雷射系統的真直度讀數並不會改變。

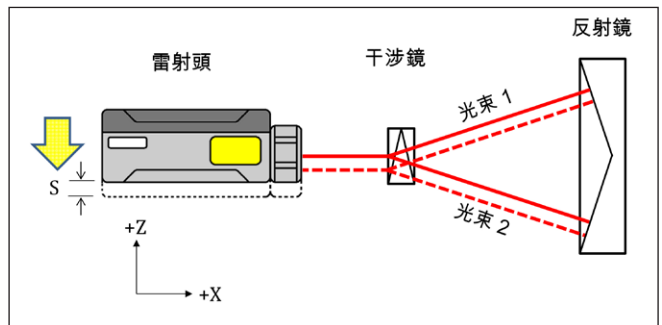


圖 17

如果雷射頭傾斜小角度 α （圖 18 中所示有所誇大），將會發生什麼，這一點並不好理解；因此，我們進行了詳細的光學類比，以進一步研究這種情況。結果表明，光束 1 和光束 2 之間的光程長度差異（以及由此得出的真直度讀數）不會因雷射頭的小角度俯仰移動而明顯改變。

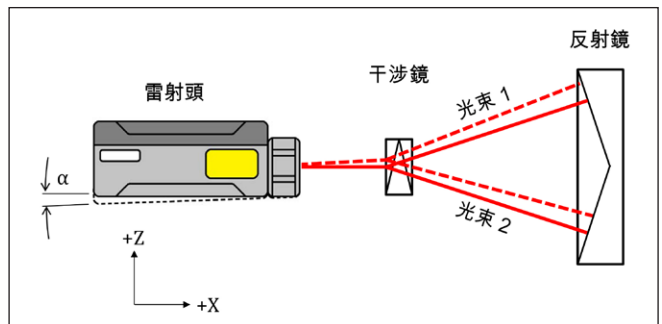


圖 18

然而，各種校準誤差組合的類比分析表明，如果沃拉斯頓稜鏡沒有在滾擺方向（繞 X 軸）上相對於真直度反射鏡精確校準，那麼雷射頭容易產生扭擺（繞 Z 軸旋轉）誤差（見圖 19）。

模擬分析表明，如果沃拉斯頓稜鏡與反射鏡之間的滾擺校準誤差為 θ 弧度，則雷射頭會產生 α 弧度的扭擺誤差，再結合光學鏡組之間的間隔為 L 米，那麼真直度讀數（以米為單位）將改變 $L \cdot \alpha \cdot \theta$ 。這個公式同樣適用於短距離和長距離真直度量測光學鏡組。

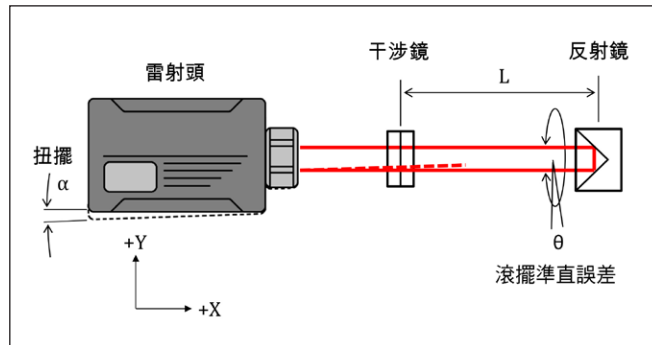


圖 19

轉換量測單位後則是，如果沃拉斯頓稜鏡與反射鏡之間的滾擺校準誤差為 θ 度，則雷射頭會產生 θ 角秒的扭擺誤差，再結合光學鏡組之間的間隔為 L 米，那麼真直度讀數（以微米為單位）將改變約 $L \cdot \theta / 11.818$ 。

例如：

如果沃拉斯頓稜鏡與反射鏡之間的滾擺校準誤差為 1° ，且光學鏡組之間的間隔為 1 米，那麼雷射頭與光學鏡組之間將產生 10 角秒的校準誤差，最終的真直度讀數將改變 0.846 微米。

因此，建議在量測開始前，務必確保沃拉斯頓稜鏡和真直度反射鏡在滾擺方向上精確校準。這樣一來，雷射頭與光學鏡組之間的小幅校準誤差將不會對真直度讀數產生明顯影響。由此可以認為，利用雷射干涉儀得出的真直度讀數僅取決於真直度反射鏡（直尺）和真直度干涉鏡（千分錶）之間的相對位置。請注意，這與利用非雷射干涉儀量測真直度的工作原理截然不同；對於非雷射干涉儀而言，保持雷射源的指向穩定性至關重要。

移動工作台的真直度量測

下面，本白皮書將探討在立式主軸機台上利用兩種不同的設置（A 和 B）量測 X 軸的垂直方向真直度的差異，即使用雷射干涉儀系統或者千分錶和直尺。為了著重說明這種差異，我們先看一下這樣一種情況：由於移動工作台的重心轉移，導致其在 X 軸方向上產生俯仰誤差。本例中假設工作台鑄件如同一個剛體，如果發生任何彎曲，則均來自於底層支撐導軌和軸承。為使表述清楚，下面的示意圖中誇大了俯仰誤差。

設置 A — 真直度干涉鏡（或千分錶）安裝在固定式主軸上，而反射鏡（或直尺）安裝在移動工作台上（見圖 20 和 21）。

設置 B — 真直度反射鏡（或直尺）安裝在固定式主軸上，而干涉鏡（或千分錶）安裝在移動工作台上（見圖 22 和 23）。

設置 A（干涉鏡或千分錶固定）

下面的圖 20 中顯示的設置包括：安裝在三腳架上的雷射頭、安裝在主軸上的真直度干涉鏡、安裝在移動工作台上的真直度反射鏡。圖中顯示了利用該設置得出的真直度結果，表明工作台的運動呈一條直線。這是由於當 X 軸移動時，反射鏡生成的虛擬直尺與真直度干涉鏡始終在同一個位置相交，因為反射鏡的角度變化會被反射鏡與干涉鏡之間逐漸增大的距離所補償。

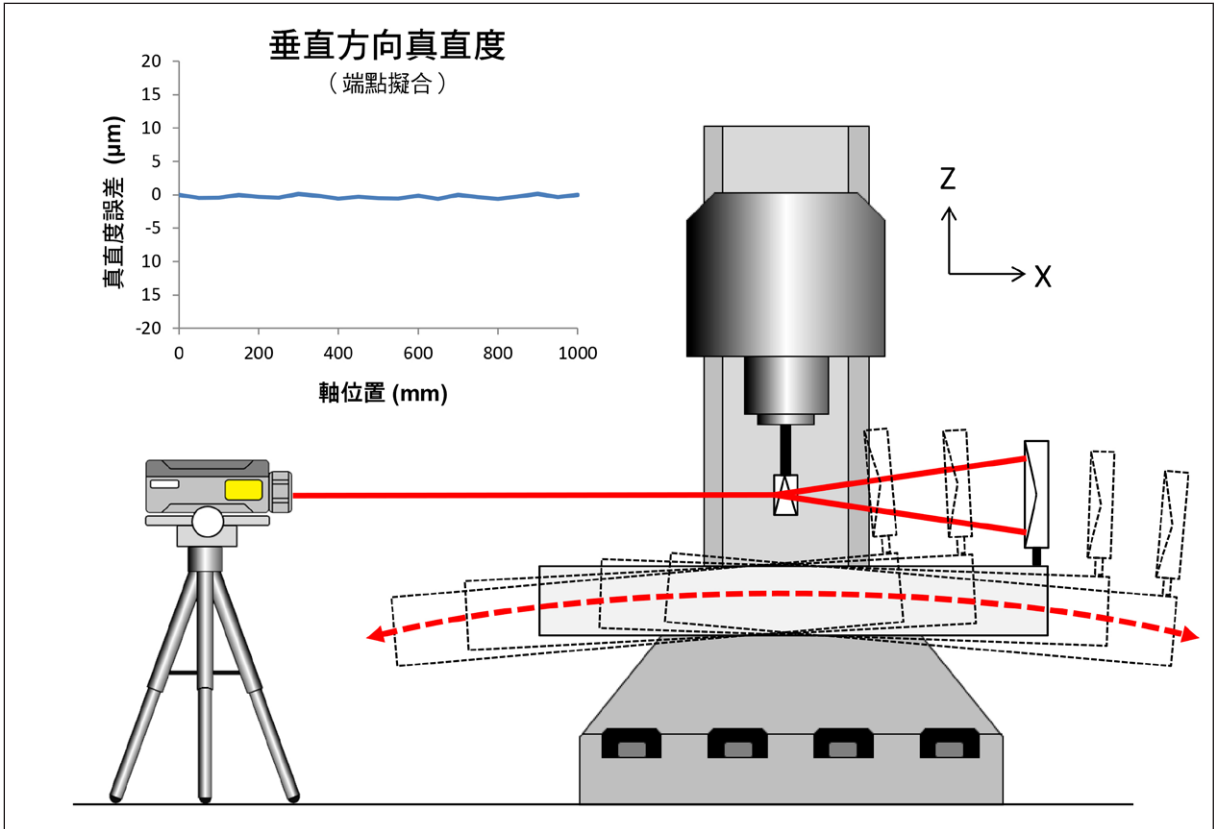


圖 20

這個結果乍看好像並不精確，因為工作台顯然沿一條曲線移動，而真直度結果圖中顯示的卻是一條直線。我們稍後再詳細討論。

現在我們看一下，如果把雷射系統換成在移動工作台上安裝直尺，並在主軸上安裝數字千分錶，將會發生什麼，如下方圖 21 所示。

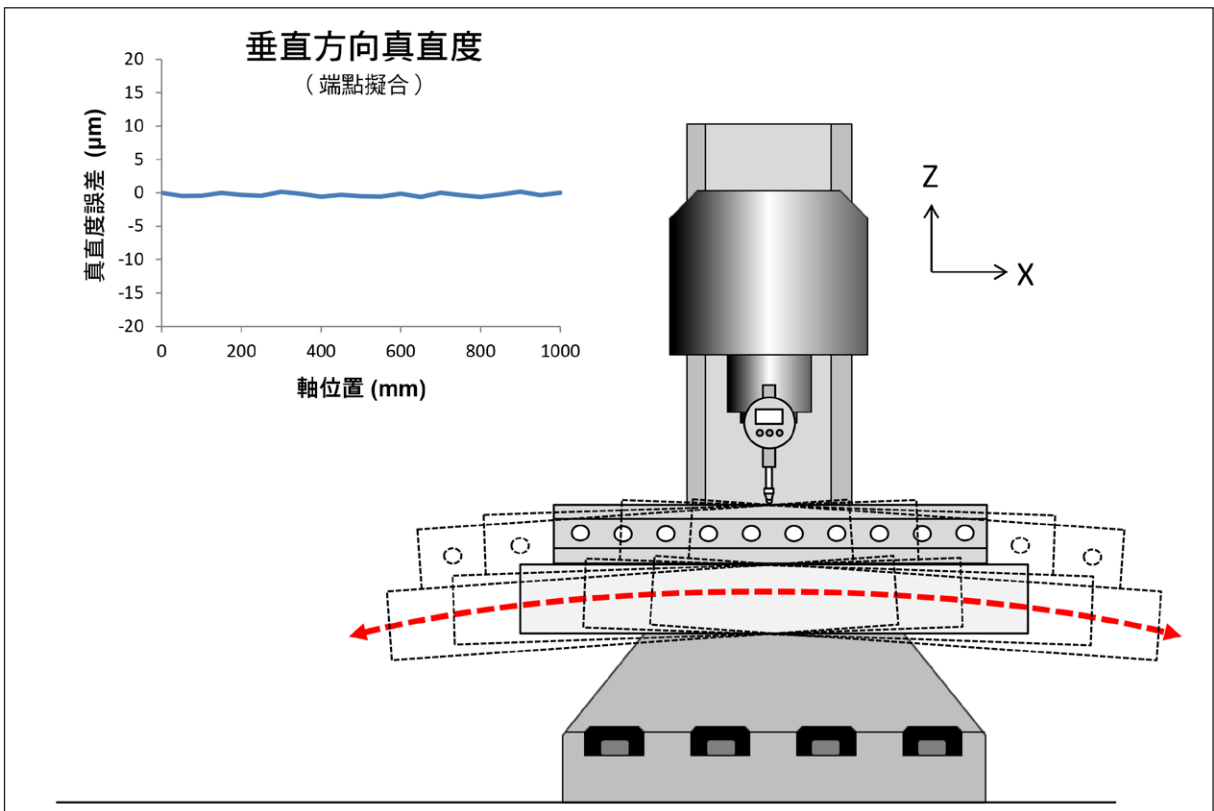


圖 21

利用該設置得出的結果圖再次表明，工作台的運動呈一條直線。這是因為當工作台在主軸下方移動時，主軸與安裝在工作台上的直尺之間的垂直距離保持不變。

使用雷射系統並將反射鏡安裝在移動工作台上時獲得的真直度結果，與使用千分錶並將直尺安裝在移動工作台上時獲得的結果一致。

我們現在看一下，如果將這兩個元件調換位置，將干涉鏡（或千分錶）安裝在移動工作台上，將會發生什麼，如設置 B 所示。

設置 B（干涉鏡或千分錶移動）

圖 22 中顯示的設置包括：安裝在三腳架上的雷射頭、安裝在主軸上的反射鏡、安裝在移動工作台上的干涉鏡。利用該設置得出的真直度結果圖表明，工作台的運動呈一條曲線。顯然，這與將反射鏡用做移動鏡組時獲得的結果大不相同。

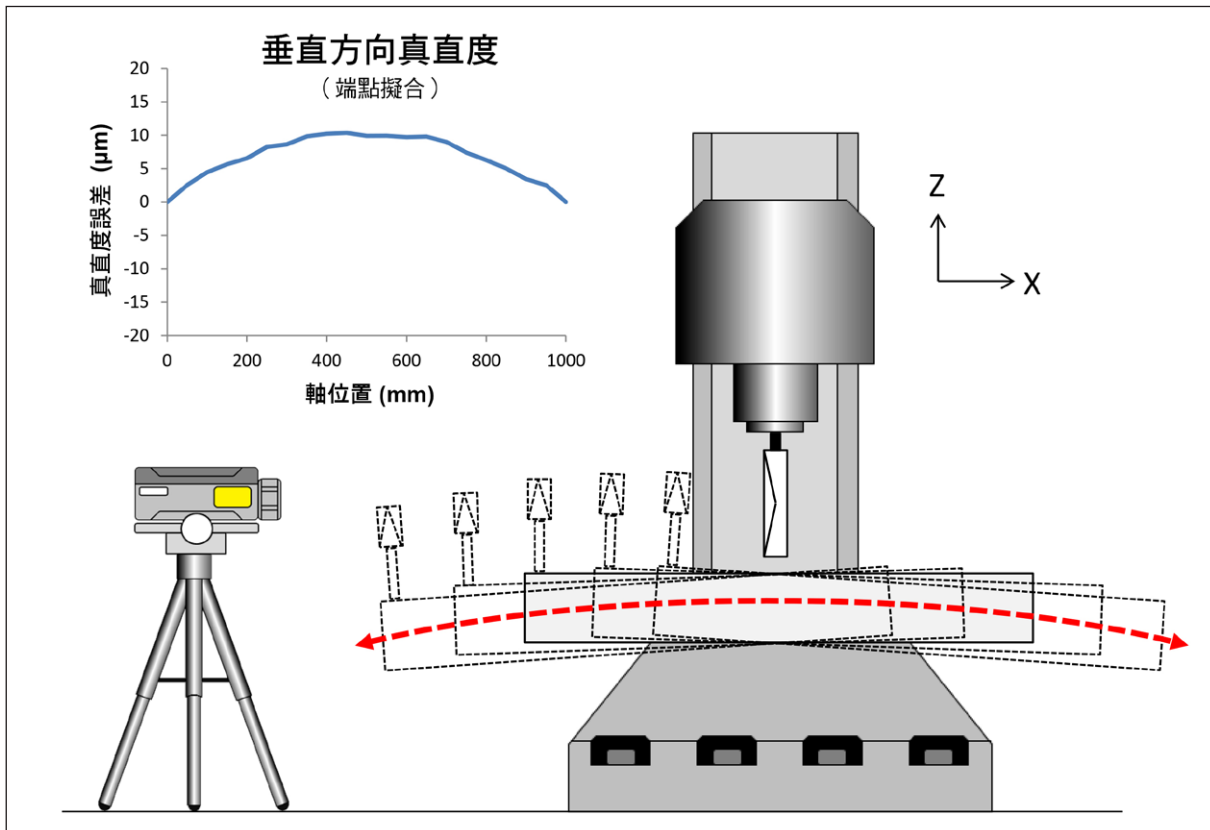


圖 22

最後我們看一下，如果把雷射系統換成在主軸上安裝直尺，並在移動工作台上安裝數字千分錶，將會發生什麼，如下方圖 23 所示。

利用該設置得出的結果圖再次表明，工作台的運動呈一條曲線。

使用雷射系統並將干涉鏡安裝在移動工作台上時獲得的真直度結果，與使用安裝在移動工作台上的千分錶並將直尺安裝在主軸上時獲得的結果一致。

顯然，當真直度干涉鏡（或千分錶）移動時獲得的結果，與當反射鏡（或直尺）移動時獲得的結果大不相同。但是，哪個結果才「正確」呢？

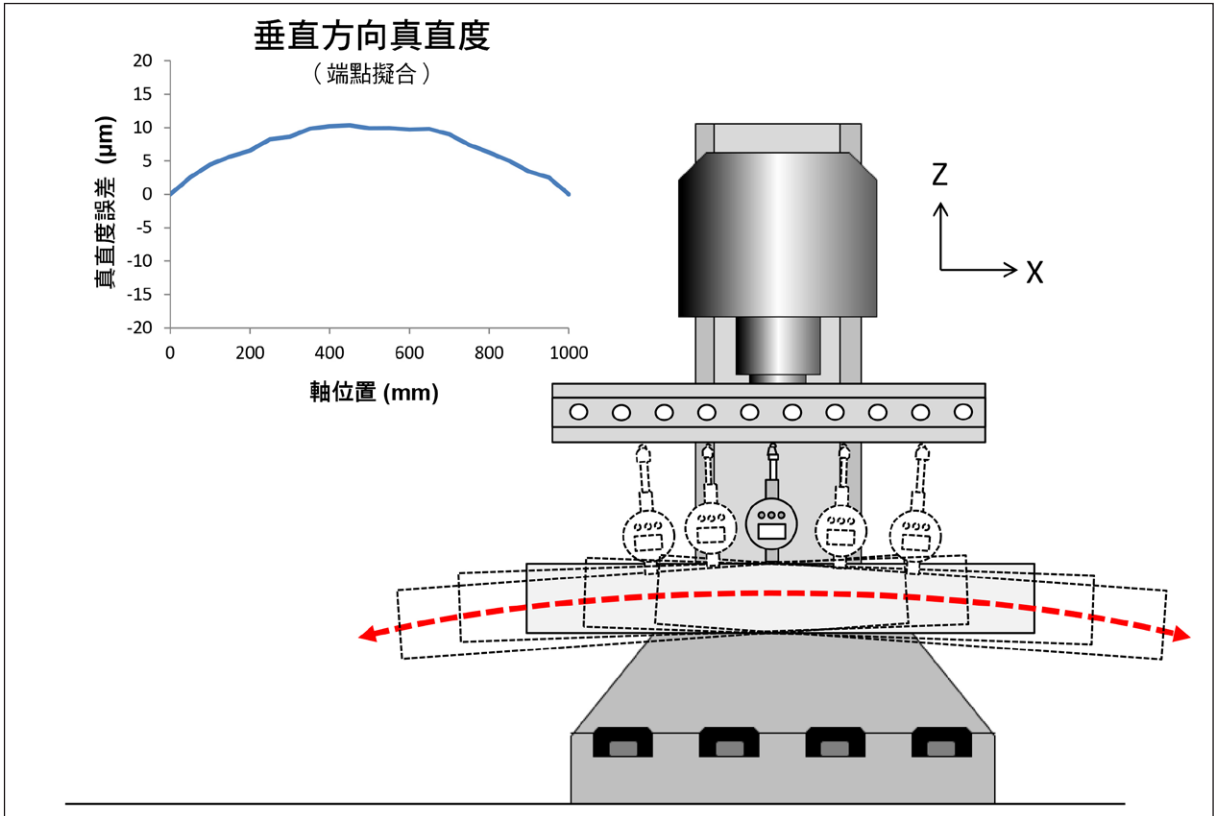


圖 23

干涉鏡移動還是反射鏡移動 — 哪種「正確」？

為了找到答案，我們來看一下這種情況：機台沿 X 軸在工件上銑削一排尺寸和深度均相同的 5 個孔，如圖 24 中的截面所示。然後，將工件放在三次元量床 (CMM) 上，檢查孔的精度。CMM 會量測出，所有孔的深度相同，並且底部中心都在一條直線上。它還會量測出，每個孔的角度均不相同。

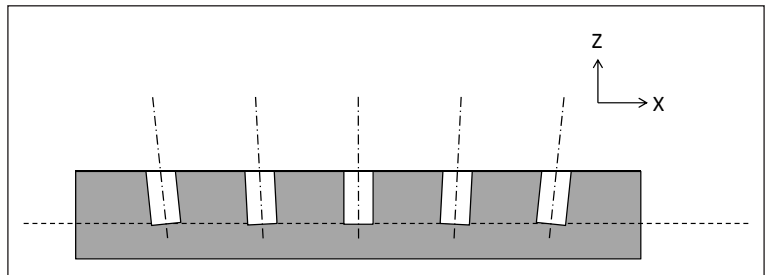


圖 24

從工件的角度看，X 軸似乎呈一條直線，只存在俯仰誤差。這與使用雷射系統並將反射鏡安裝在移動工作台上時獲得的真直度結果一致，與使用千分錶並將直尺安裝在移動工作台上時獲得的結果也一致。

根據這個結果，並且將雷射系統比喻為千分錶和直尺，我們可以深入理解究竟應該將真直度干涉鏡還是反射鏡安裝在移動工作台上。

根據這個結果，並且將雷射系統比喻為千分錶和直尺，我們可以深入理解究竟應該將真直度干涉鏡還是反射鏡安裝在移動工作台上。

設置 A (干涉鏡或千分錶固定) — 當檢查工件夾具與主軸之間的相對移動精度時，通常應使用這種設置。通過這種設置可量測出主軸相對於工件座標系的位置誤差，進而幫助我們預先瞭解工件的加工精度。在檢查移動工作台時，ASME B5.54 國際標準推薦使用這種設置。

設置 B (反射鏡或直尺固定) — 當檢查機台上單個點的運動誤差時，通常應使用這種設置。例如，追蹤移動工作台上某個點相對於機台座標系的運動軌跡。這樣可以反映機台的裝配品質，但不一定能反映機台的加工精度。

結論

本白皮書詳細闡釋了雷射干涉儀真直度量測的工作原理；示範了如何將真直度干涉鏡（沃拉斯頓稜鏡）比作千分錶，將真直度反射鏡比作精密直尺；還證明了利用雷射干涉儀量測真直度時，為何雷射頭的位置並不那麼重要。隨後還透過這個類比闡釋了，利用不同的設置在移動工作台上執行量測會產生的重要差異。經證明，為了正確評估切削刀具相對於工件的運動真直度，應按照設置 A 所示和 ASME B5.54 標準中的建議，在刀架上安裝真直度干涉鏡（或千分錶），並將真直度反射鏡（或直尺）安裝在工件夾具（移動工作台）上。而設置 B（干涉鏡移動）更適合評估機台的裝配品質，以及用於故障診斷。

無論選擇哪種量測設置，下列技巧都有助於優化量測精度。

雷射干涉儀真直度量測技巧

當使用真直度干涉鏡時，為了提高量測精度，我們建議：

- 如果軸長允許，始終使用短距離真直度量測光學鏡組。短距離光學鏡組比長距離光學鏡組的精度更高，並且不易受到環境的影響。
- 盡可能降低空氣擾動雜訊的影響。當暖氣流或冷氣流穿過雷射光束時，它們會短暫改變光程長度，進而干擾真直度讀數。通過在雷射系統的軟體中啟用「長期平均」功能，以及改變局部環境，可以減少這種雜訊。
 - 撤除或遮擋局部熱源，避免陽光照射
 - 還可以打開風扇大力攪動空氣，這樣有助於使空氣均勻化，同時提高雜訊頻率，從而通過「長期平均」功能可以更有效地消除雜訊。如圖 25 中的示例所示，使用風扇吹動空氣穿過光束，可減少空氣擾動雜訊。
- 調整真直度反射鏡，避免斜率誤差過大；對於手動機台，這一點尤其重要。
- 確保反射鏡安裝牢固，並且達到熱穩定。請記住，反射鏡會在空間中生成一條虛擬直尺，延伸數米。避免因熱膨脹效應或振動造成反射鏡的角度不穩定。最好用一塊布蓋住反射鏡的外殼，使其免受環境中熱變化的影響。
- 確保真直度干涉鏡與反射鏡在滾擺方向上精確校準。這樣可以確保雷射頭相對於光學鏡組的小幅角度校準變化不會影響真直度量測值。請特別注意，當距離較短時，如果對雷射頭安裝元件或機台本身（如機台裝有防震裝置或地基不牢）的角度穩定性存在顧慮，那麼僅確保返回的光束精確重疊可能並不能滿足要求。如果一直存在顧慮，則應考慮將雷射頭牢牢地固定在機台上。

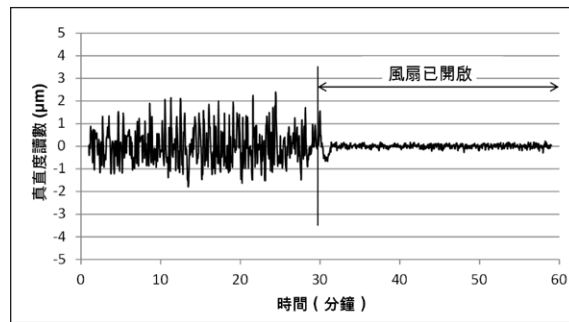



圖 25

www.renishaw.com.tw/contact



#renishaw

 +886 (4) 2460 3799

 taiwan@renishaw.com

© 2013–2022 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、稱謂及其「apply innovation」標記為Renishaw plc 或其子公司註冊商標。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, Gloucestershire, GL12 8JR, UK。

文件編號：H-5650-2997-01-A

修訂版本：09.2022