

雷射干涉儀線性讀數的環境補償

作者：M.A.V.Chapman

簡介

雷射干涉儀常常被假定為可自動獲得最高精度的量測結果。「這是雷射，所以量測結果一定很精確！」但實際情況頗為複雜。當使用雷射在空氣中量測線性位移時，環境補償系統的性能尤為重要。雷射頭和干涉量測光學鏡組可提供非常高的線性解析度和精度，但系統的量測精度卻主要由環境補償器（氣象站）決定。本白皮書探討了環境補償在線性干涉量測中的重要性，同時還介紹了空氣折射補償和材料膨脹補償。本文詳細介紹了 Renishaw 的 XC-80 環境補償器，它可根據空氣折射率和材料溫度的變化，自動補償 Renishaw XL-80 雷射干涉儀的線性位移讀數。此外，根據具體應用，針對環境感測器的放置及材料膨脹係數的選擇提供了建議。

線性干涉量測 — 基本原理

圖 1 所示為單頻（零差）雷射干涉儀系統，其中線性光學鏡組在「基準」位置彼此緊靠。

分光鏡將雷射頭的輸出光束分成兩條光束。上面的角錐反射鏡固定在分光鏡上，用於產生雷射干涉儀的固定長度參考光束。另一個角錐反射鏡相對於干涉鏡可分開移動，用於產生雷射干涉儀的量測光束。經每個角錐反射鏡反射的光束在分光鏡上重新合為一條光束，並返回到

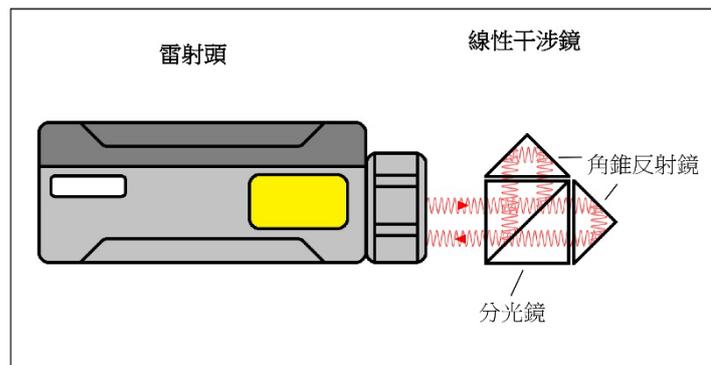


圖 1

雷射頭，然後在雷射頭的條紋檢測器內部相互干涉。當兩條返回光束中的波「同相」時（如圖 1 所示），它們會相長干涉，在探測器中產生一條「明」條紋。

在圖 2 中，產生量測光束的角錐反射鏡移動到與分光鏡之間的距離為 L 的位置，同時產生參考光束的角錐反射鏡仍然固定在分光鏡上。當兩條返回光束中的波為 180° 「反相」時（如圖 2 所示），它們會相消干涉，在探測器中產生一條「暗」條紋。條紋探測器檢測到的是明條紋還是暗條紋（或介於兩者之間的任何亮度級），取決於雷射干涉儀兩條光束之間的相對光程長度。如果參考光束角錐反射鏡是固定的，那麼量測光束角錐反射鏡與分光鏡之間的移動距離每增加半個波長 ($\lambda/2$)*，條紋探測器就會檢測到一次「明—暗—明」的完整條紋轉變。

* 注：每移動距離 $\lambda/2$ ，總光程會增加 λ ，這是因為雷射光束會先照射到角錐反射鏡上，再被反射回來。

簡單來說*，雷射系統通過計算在探測器內部檢測到的完整條紋轉變次數來量測距離。如果當光學鏡組彼此緊靠時，將計數器歸零（重置基準），那麼距離表示為 $L = \lambda \times N/2$ ，其中 N 是自歸零後計數得出的「明—暗—明」條紋轉變次數。如果將系統歸零時光學鏡組彼此緊靠，那麼 N 也等於：當光學鏡組移動時，雷射干涉儀的量測光束的射出光程和返回光程部分所增加的雷射波數。

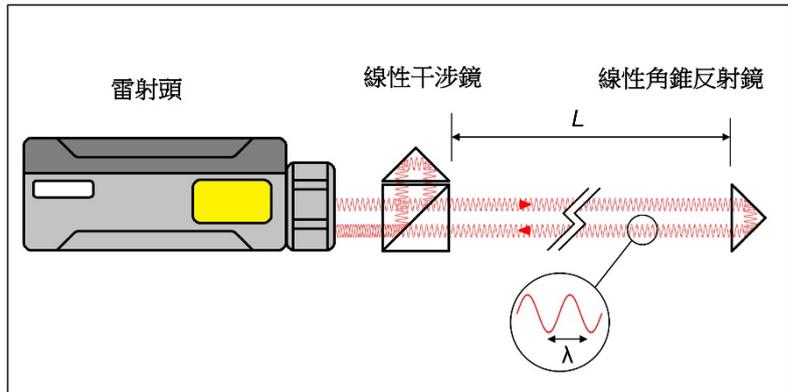


圖 2

* 注：實際上，零差雷射干涉儀的條紋探測器還能夠將條紋分成更小的增量，並確定移動方向。使用多個條紋光電探測器即可實現這一點，對每個探測器進行調諧，使其檢測不同干涉條紋相位的亮度。

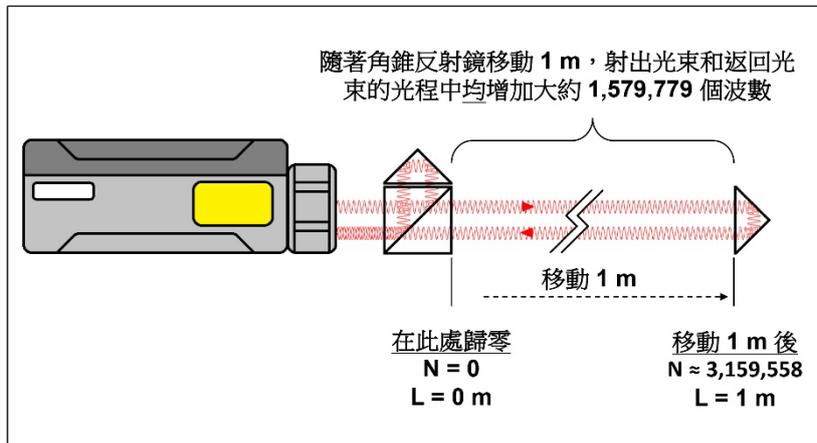


圖 3

以圖 3 所示為例，如果在歸零後角錐反射鏡移動了 1 m，且雷射波長為 $0.633 \mu\text{m}$ ，那麼計數器的條紋計數約為 3,159,558，相當於當反射鏡移動 1 m 時，分光鏡與量測光束角錐反射鏡之間間隔所增加的雷射波數。

如果出於某種原因，量測光束中的雷射波數發生改變，那麼條紋計數器的計數也會相應增加或減少。顯然，當量測光束角錐反射鏡移動時，

就會發生這種情況，導致 N 和位置讀數 L 發生相應改變，以正確指示任何額外的移動。

但是，量測光束中增加的波數還取決於雷射在空氣中的波長。如果雷射波長發生改變，那麼量測光束中增加的波數也會改變。如果雷射系統繼續使用原始波長，通過公式 $L = \lambda \times N/2$ 計算距離，那麼就會導致計算錯誤，得出不精確的距離讀數。但是，為什麼雷射波長會改變呢？

雖然人們常說「光速是恒定的」，但實際上，光速會因傳播介質而異。介質的折射率越高，光在介質中傳播的速度越慢。舉個例子，光在玻璃（折射率為 1.4）中的傳播速度比在真空（折射率為 1）中的傳播速度慢大約 30%。隨著光速改變，雷射的波長也會發生相應改變。雖然空氣的折射率變化幅度小很多，但已經足以嚴重影響線性雷射量測值的精度，除非應用波長補償。

空氣的折射率

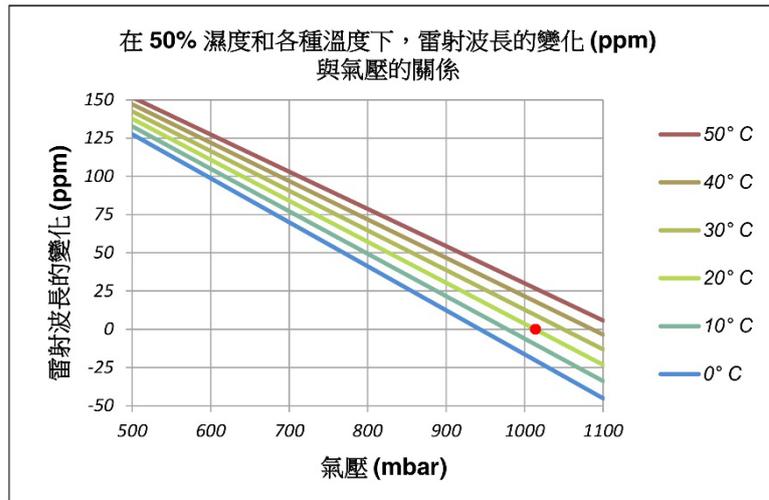
鑒於折射在光學設計和量測中的重要性，人們對空氣的折射率進行了廣泛研究（見參考文獻 1-5）。圖 4、圖 5 和圖 6 顯示了氣壓、氣溫和相對濕度的變化如何改變 0.633 μm 波長的紅色氦氖 (HeNe) 雷射的雷射波長。圖中所示變化的單位為百萬分之一 (ppm)。

真空的折射率剛好為 1。氦氖雷射頭檢測到的標準* 空氣的折射率約為 1.0002714。因此，雷射在標準空氣中的波長比其在真空中的波長短約 271 ppm。*標準空氣的定義是氣壓為 1013.25 mbar、氣溫為 20°C、相對濕度為 50% 的空氣。

這些圖表顯示了雷射波長相對於標準空氣中的雷射波長的變化 (ppm)。

(在每個圖表中，紅點表示標準空氣條件。) 比如，如圖 4 所示，在氣壓* 為 800 mbar、氣溫為 10°C、相對濕度為 50% 的條件下，氦氖雷射的波長相對於其在標準空氣中的波長增加了約 50 ppm。

*請注意，氣壓因當地天氣條件和海拔高度而異。比如，海平面的典型氣壓為 1,013 mbar，而在 1,000 m 海拔處，典型氣壓為 900 mbar。



如圖 4 所示，雷射波長取決於氣壓，圖 4

靈敏度範圍為 -0.24 ppm/mbar 至 -0.29 ppm/mbar，具體取決於氣溫。隨著氣壓上升，雷射波長逐漸縮短。在接近標準空氣氣壓的條件下，靈敏度約為 -0.27 ppm/mbar。

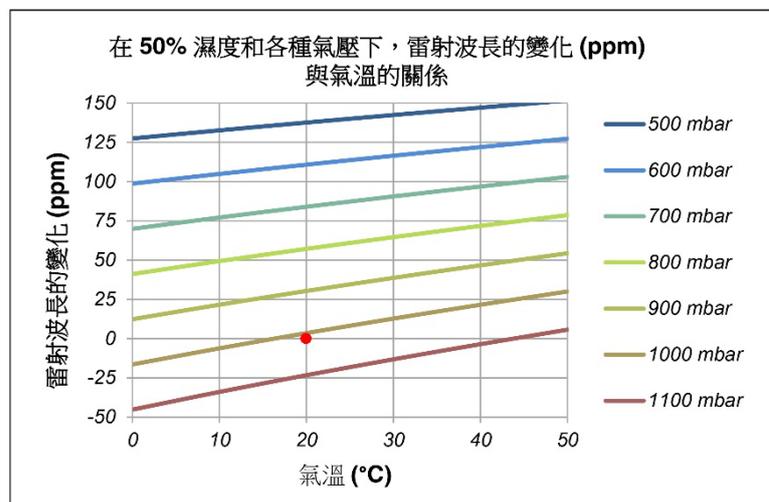


圖 5

如圖 5 所示，雷射波長還取決於氣溫，靈敏度範圍為 +0.5 ppm/°C 至 +1.0 ppm/°C，具體取決於氣壓。隨著氣溫上升，雷射波長逐漸增加。在接近標準空氣氣溫的條件下，靈敏度約為 +0.96 ppm/°C。

如圖 6 所示，雷射波長還取決於相對濕度，空氣濕度每增加 10%，靈敏度範圍為 +0.02 至 +0.4 ppm，而且與氣溫密切相關。在低溫條件下，對濕度變化的靈敏度可以忽略不計；但當溫度較高時，由於暖空氣會吸收更多水蒸氣，因此對濕度變化的靈敏度會越來越高。空氣中的水分越多，雷射波長就越長。在接近標準空氣的相對濕度的條件下，靈敏度約為 +0.1 ppm/10% RH。

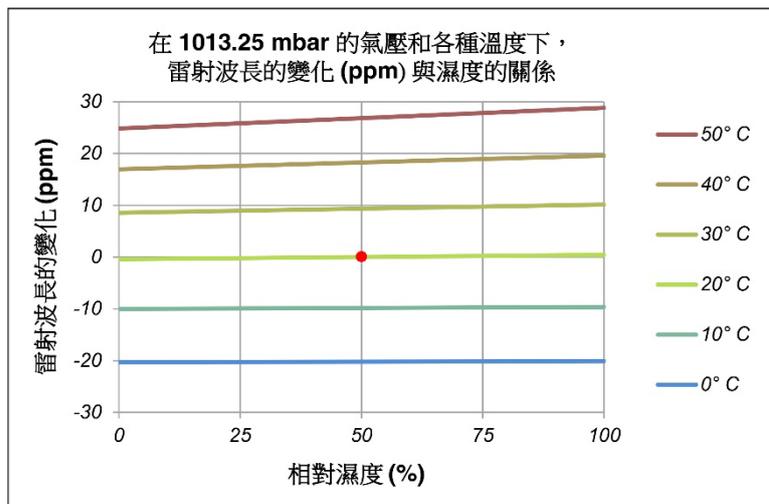


圖 6

利用這些圖表和靈敏度數據，可以很容易地粗略估算* 因當地大氣條件變化而可能引起的雷射量測誤差。

*請參閱附錄 2，了解更為精確的計算方法。

我們看一看下面這個例子。

假設雷射波長 λ （用於通過公式 $L = \lambda \times N/2$ 計算線性位移）是在標準條件下定義的，並且保持不變（即不應用補償）。現在，假設在當地氣壓為 900 mbar、氣溫為 25°C、濕度為 60% 的條件下進行線性量測。我們可以使用上述靈敏度數據的倒數* 來估算未補償的雷射讀數的誤差。*上述靈敏度數據定義了雷射波長如何隨氣溫、氣壓和濕度的變化而改變。但是，如果雷射波長增加，則針對既定移動距離計算得出的條紋數量 (N) 會減少，因此未補償的雷射讀數也會隨之降低。

氣壓引起的誤差	$-113.25 \text{ mbar} \times (+0.27 \text{ ppm/mbar})$	-30.6 ppm
氣溫引起的誤差	$+5^\circ\text{C} \times (-0.96 \text{ ppm/}^\circ\text{C})$	-4.8 ppm
空氣濕度引起的誤差	$+10\% \times (-0.1 \text{ ppm}/10\% \text{ RH})$	-0.1 ppm
總誤差		-35.5 ppm

人們通常很自然地認為，雷射干涉儀的線性量測值的精度約為 $1 \mu\text{m/m}$ 或 1 ppm。（「這是雷射，所以量測結果一定很精確！」）上面的例子清楚地表明，為了達到這樣的預期精度，精確補償空氣折射效應是多麼重要。

空氣折射補償

如圖 4、圖 5 和圖 6 所示，氣溫、氣壓、相對濕度與折射率之間的關係相當複雜。業界對其中的關係進行了深入研究。如果已知氣溫、氣壓和濕度，那麼可以利用幾個既定公式來精確估算空氣的折射率。其中最知名的是 1966 年發表的 Edlén 公式（見參考文獻 2）。Birch 和 Downs 於 1993 年和 1994 年修正了這個公式（見參考文獻 3 和 4）。Ciddor 於 1996 年發表了另一個公式（見參考文獻 1）。大多數雷射系統採用「Edlén 修正公式」或「Ciddor 公式」來計算空氣的折射率。在正常環境條件下，這兩個公式的估算精度很接近。在美國國家標準與技術研究所 (NIST) 的 Metrology Toolbox 網站（見參考文獻 5）上，可以找到有關這些公式和「折射率計算器」的詳細論述。

完整的公式非常複雜，本文不再贅述。不過，NIST 的 Metrology Toolbox 提供了一個精度略低但更加簡單的公式，它堪稱「可攜式計算器」，適用於 0.633 μm 氦氖雷射。

$$n_{\text{air}} = 1 + ((7.86\text{e-}5 \times P)/(273 + T)) - 1.5\text{e-}11 \times H \times (T^2 + 160)$$

其中， n_{air} = 空氣折射率， T = 氣溫 ($^{\circ}\text{C}$)， H = 相對濕度 %， P = 氣壓 (mbar)。在更大的氣溫、氣壓和濕度範圍內，超過在上述接近標準空氣的條件下的靈敏度所允許的範圍，可以通過這個公式估算潛在的量測誤差。附錄 2 中詳細介紹了這個公式。

圖 7 展示了如何利用 Edlén 修正公式或 Ciddor 公式，根據大氣條件變化來補償雷射讀數。紅色儲存格與當前雷射波長的計算相關。藍色儲存格與雷射位置讀數的計算相關。

首先，使用感測器確定當地的氣壓、氣溫和相對濕度。然後，系統將利用這些資料，通過 Edlén 公式或 Ciddor 公式來計算空氣的折射率 n_{air} 。系統將使用 n_{air} 和雷射的真空波長 λ_{vac} 來計算「應用環境補償後」的雷射波長 λ_{air} 。隨後，系統將使用「應用環境補償後的」雷射波長 λ_{air} ，而不是默認的雷射波長 λ ，來乘以條紋計數。因此，舉例來說，隨著雷射

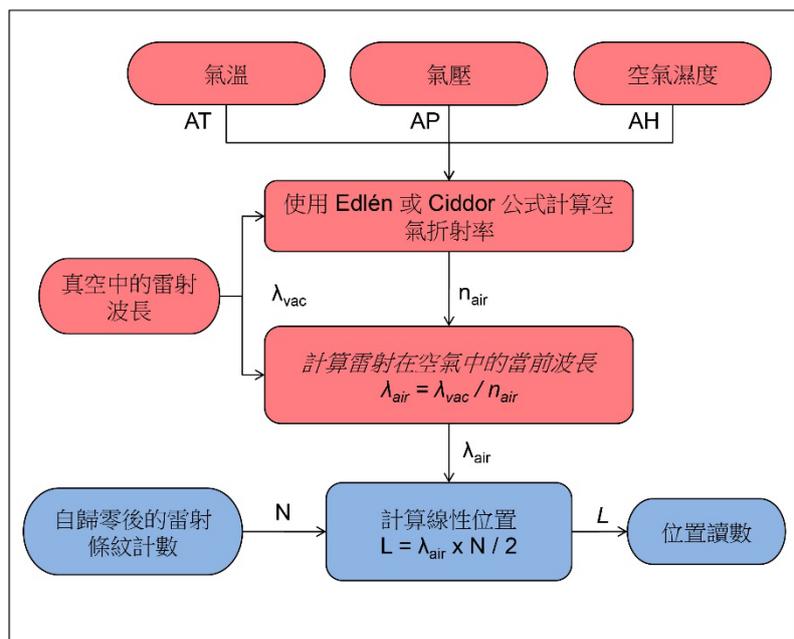


圖 7

波長增加，（針對既定線性位移 L 的）條紋計數 N 將降低，但是根據感測器讀數計算得出的 λ_{air} 值將相應增加，因而通過 $L = \lambda_{\text{air}} \times N/2$ 得出的「應用環境補償後的」位置在名義上仍保持恒定和精確。

利用 XC-80 進行自動環境補償

如圖 8 所示，Renishaw 的 XL-80 雷射干涉儀系統可採用 XC-80 環境補償器和感測器，根據當地大氣條件變化的影響自動補償線性讀數。XC-80 中包含電子處理裝置，以及氣壓和相對濕度感測器。通過電纜連線外部空氣和材料* 溫度感測器。圖 9 展示了各個元件是如何連接的。
*請注意，下文中將介紹如何使用材料溫度感測器進行熱膨脹補償。



圖 8

每個外部材料和空氣溫度感測器都包含一個溫度感應類比元件和一個數文書處理單元。每個感測器均已在出廠前完成單獨校正，並且包含一個誤差補償表，以確保在整個量測範圍內保持精度。溫度感應元件獲得的類比讀數經過數位化和誤差修正（使用誤差補償表），然後再通過感測器網路以數位方式發送至 XC-80。數位傳輸方式對電雜訊及電纜阻抗有較好的遮罩作用，因此可以確保資料完整性，必要時還可以延長感測器導線。



圖 9

XC-80 包含一個經過誤差補償的氣壓感測器，一個相對濕度感測器，以及其他電子數文書處理元件。氣壓量測是要求最為嚴苛的量測之一，因為這要求在廣泛的工作氣壓 (650-1150 mbar) 和氣溫 (0-40°C) 範圍內達到要求的精度 (± 1 mbar)。Renishaw 採用高品質氣壓感測器，以確保長期穩定性和可靠性。每個氣壓感測器均已在出廠前在氣壓和氣溫上升和下降的條件下完成了單獨校正（市面上的大多數氣壓感測器易受氣溫影響，並且表現出滯後）。Renishaw 利用這些校正結果生成了 3D 誤差補償表，並將其存儲在 XC-80 內部，以確保在整個工作氣壓和氣溫範圍內保持精度。

圖 10 所示為，經過誤差補償後，XC-80 氣壓感測器對應氣溫和氣壓的誤差圖示例。在本例中，誤差範圍為 0 至 ± 0.32 mbar。請注意，此精度圖不包含校正裝置的量測不確定度。

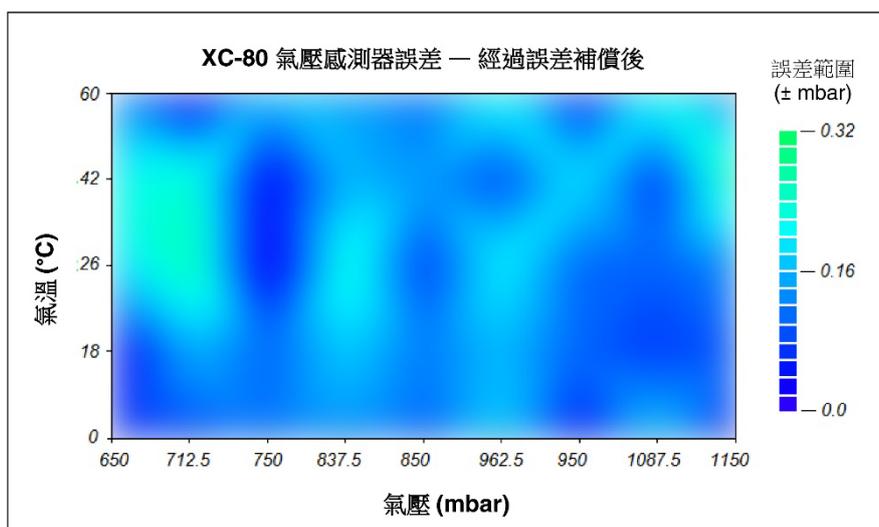


圖 10

圖 11 中的表格顯示了 XC-80 的各個感測器的校正後精度。圖中的所有數位均具有 $K = 2$ 的擴展不確定度（95% 可信度）。

XC-80 的量測精度和範圍		
量測	C	範圍
氣溫	± 0.2 °C	0 – 40 °C
氣壓	± 1 mbar	650 – 1150 mbar
空氣濕度	$\pm 6\%$ RH	0 - 95%，非冷凝
材料溫度	± 0.1 °C	0 – 55 °C

圖 11

XC-80 通過 USB 以數位方式將環境感測器讀數傳輸至電腦，更新速率為每 7 秒鐘一個感測器讀數，每 42 秒鐘進行一次完整的環境資料更新（來自多達 6 個當前生效的感測器）。

電腦還會通過 USB 收到來自於 XL-80 雷射干涉儀的雷射狀態和條紋計數 N ，最大更新速率為 50 KHz。Renishaw 的 LaserXL 軟體利用 XC-80 提供的空氣感測器讀數，通過 Ciddor 公式計算當地的空氣折射率，計算出 XL-80 在空氣中的當前雷射波長 λ_{air} 。然後再利用公式 $L = \lambda_{\text{air}} \times N/2$ 計算出距離 L ，並根據當地空氣折射率的變化，自動補償雷射讀數。

我們通過一個簡單的例子看一看利用 XC-80 進行空氣折射補償的有效性。假設在海拔 100 m 處進行雷射量測，當地氣溫為 25°C、相對濕度為 70%、海平面氣壓為 970 mbar，而且沒有特別極端或異常的情況。

海拔 100 m 處的氣壓比海平面氣壓低約 12 mbar，因此假定當地氣壓為 958 mbar。通過 NIST 的簡單公式計算得出，在上述條件（958 mbar、25°C、70% RH）下，空氣的折射率約為 1.0002519。而標準空氣（定義 XL-80 雷射干涉儀的默認雷射波長的空氣條件）的折射率約為 1.0002714。

這兩個折射率（及相關的雷射波長）之間的差異接近 20 ppm。因此，在上述條件下，如果不進行環境補償，則線性位置讀數可能會包含大約 20 ppm 或 20 $\mu\text{m/m}$ 的量測誤差。

但是，如果使用 XC-80 的空氣感測器讀數正確進行折射率補償，則系統的線性量測誤差將降至 0.5 ppm (0.5 $\mu\text{m/m}$) 以下。精度提高到原來的大約 40 倍！圖 12 以圖表的方式展示了未補償精度與補償後精度之間的差異。值得注意的是，未補償結果的主要誤差源是氣壓（受海拔和天氣的共同影響）。第二個主要誤差源是氣溫。最微小的誤差源是雷射穩頻精度。這清楚地說明了環境補償的重要性。請注意，如圖 12 所示實現精度提高的假設是，感測器的位置合適，並且有充足的時間對環境中的任何變化作出回應。自動環境補償並非萬能的靈丹妙藥，無法在所有環境下實現精確量測。為獲得最佳結果，環境必須保持合理穩定，並且感測器的位置應靠近量測光束，遠離局部熱源等。

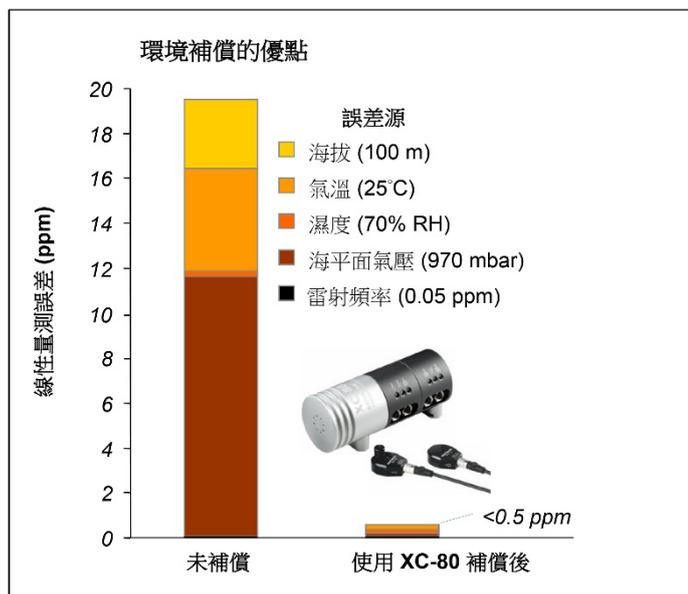


圖 12

圖 13 中的表格顯示，氣壓和折射率隨海拔升高而降低，可供參考。表格中還顯示了，隨著海拔升高，雷射波長相對於海平面處波長的變化 (ppm)。由於天氣而引起的每天/季節性氣壓變化通常為 100-150 mbar。這將導致雷射波長發生約 25-40 ppm 的額外變化。

材料膨脹補償

大多數工程材料、部件和機器都會隨溫度變化而膨脹或收縮。因此，高精密工程部件、工具機和三次元量床 (CMM) 的尺寸通常在特定基準溫度下定義。校正業採用的國際基準溫度是 20°C。

但是，當檢查尺寸時（例如使用雷射干涉儀系統），環境溫度往往並非 20°C。為了避免這個問題，有一種方法是在將溫度控制在 20°C 的房間內進行檢測。但是，在很多情況下，這種做法並不切實際，必須「現場」量測尺寸。為了解決這個問題，Renishaw 的 XL-80 雷射干涉儀系統提供了一種功能，利用手動輸入的材料膨脹係數和多達三個材料溫度感測器檢測的溫度，對線性讀數進行補償。這個過程稱為材料膨脹補償。這個過程的目標是，估算在 20°C 的國際基準溫度下進行量測時可能獲得的線性雷射讀數。

海拔 (m)	氣壓 (mbar)	折射率 n	變化 (ppm)
0	1013.25	1.0002714	0
500	954.6	1.0002557	-16
1000	898.7	1.0002407	-31
1500	845.6	1.0002264	-45
2000	795.0	1.0002128	-59
2500	746.8	1.0001999	-71
3000	701.1	1.0001877	-84
3500	657.6	1.0001760	-95
4000	616.4	1.0001649	-106
4500	577.3	1.0001544	-117
5000	540.2	1.0001445	-127

圖 13

假設使用雷射干涉儀驗證 0.5 m 長線性光學尺的精度。該光學尺由玻璃製成，線性膨脹係數為 6 ppm/°C（如圖 14 所示）。該線性光學尺的精度規格為，在 20°C 的溫度下，全長的精度在 ±1 μm 範圍內。然而，安裝光學尺的工具機無法移動，而且光學尺的當前溫度是 22°C。那麼，該線性光學尺（如果無約束）的全長將膨脹 $0.5 \text{ m} \times 6 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \times 2^\circ\text{C} = 6 \text{ } \mu\text{m}$ 。如果使用雷射干涉儀系統檢測該光學尺的精度，不應用材料膨脹補償，結果將顯示光學尺的精度（如圖 15 中的紅線所示）不符合規格。

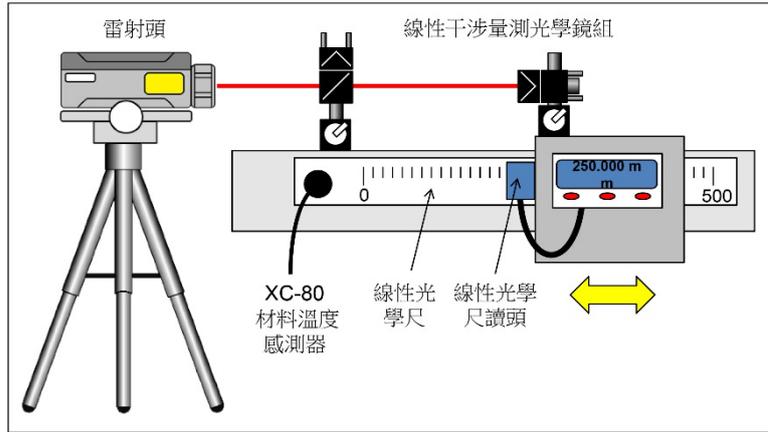


圖 14

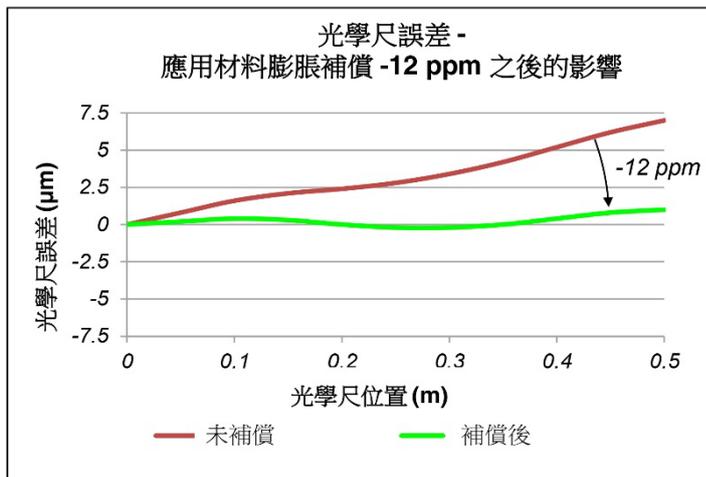


圖 15

然而，如果利用具有材料溫度感測器的 Renishaw XC-80 環境補償器來量測該光學尺的溫度，並在軟體中輸入線性膨脹係數 6 ppm/°C，則系統將自動應用材料膨脹補償。如果測得的材料溫度為 22°C，系統將對雷射讀數應用 $-6 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \times 2^\circ\text{C} = -12 \text{ ppm}$ 的修正。舉個例子，如果未補償的雷射讀數為 500.007 mm，在應用 $-6 \text{ } \mu\text{m}$ 的修正之後，即得出補償後雷射讀數為 500.001 mm。如果修正正確，那麼材料膨脹補償會增加正好相反的修正，以抵消光學尺的熱膨脹，從而更精確地估算在 20°C 下量測光學尺時可能得出的雷射量測值。修正後的資料如圖 15 中的綠線所示，此時的資料表明光學尺符合規格。

圖 16 顯示了如何應用材料膨脹補償。紅色儲存格是當前雷射波長（參見上文的圖 7）的計算結果。黃色儲存格與材料膨脹補償的計算相關。藍色儲存格與雷射位置讀數的計算相關。請注意，系統此時使用「環境係數」EF（如圖 16 中的藍色儲存格所示），而不是 λ_{air} （如圖 7 中的藍色儲存格所示），來乘以條紋計數的一半 $N/2$ 。此環境係數與雷射波長 λ_{air} 非常相似，只不過它包含一個細微的調整，以補償材料膨脹。因此，將 $N/2$ 乘以 EF，可以同時補償空氣折射和材料膨脹效應。

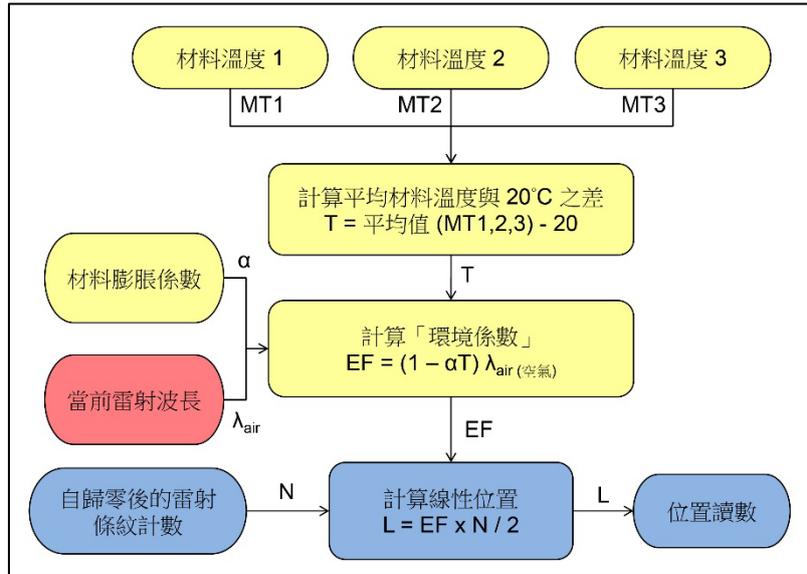


圖 16

因此，同時對線性雷射讀數應用空氣折射補償和材料膨脹補償的拓展公式可以寫作：

$$L = (1 - \alpha T) \times \lambda_{air} \times N / 2 \dots\dots\dots \text{公式 1}$$

其中，L 為雷射讀數，N 是自系統歸零後計數得出的雷射條紋數， α 是用戶輸入的材料膨脹係數，T 是材料平均溫度與 20°C 之差， λ_{air} 是利用 Edlén 或 Ciddor 公式根據氣溫、氣壓和濕度計算得出的當前空氣折射率。

材料膨脹係數

材料膨脹補償會對量測精度產生顯著影響。大多數鋼鐵的線性膨脹係數接近 10 ppm/°C，加工產線的溫度通常都超過 25°C（工具機本身溫度通常更高）。如果在這樣的條件下進行線性量測，那麼因材料膨脹而造成的誤差很可能會超過 50 ppm (50 μ m/m)。本節就材料膨脹係數的選擇給出了建議，並著重介紹了工具機定位精度的量測。

在線性雷射量測過程中，一定要選擇正確的膨脹係數，特別是當材料溫度與 20°C 相差較大時。例如，如果精確的膨脹係數是 5 ppm/°C，但在軟體中輸入了 6 ppm/°C，那麼材料溫度與 20°C 每相差 1°C，就會額外產生 1 ppm 的量測誤差。當校正工具機或 XY 平台的定位精度時，往往需要軸向回饋系統的膨脹係數，並且最好採用製造商提供的資料。如果沒有上述資料，圖 17 列出了製造工具機、XY 平台及其位置回饋系統所用的各種材料的典型膨脹係數表。

材料	應用	膨脹係數 (ppm/°C)
鐵／鋼	機械結構元件、支架和小齒輪驅動器、滾珠螺桿	11.7
鋁合金	輕質 CMM 機械結構	22
玻璃	玻璃尺線性編碼器	6-11
花崗岩	機械結構與桌面	8
混凝土	機械基座	12
鎳鐵合金	低膨脹係數編碼器／結構	>2
微晶玻璃 (Zerodur)	「零」膨脹光學尺/結構	>0.2

圖 17

備註：

- 1) 在確定膨脹係數時，一定要注意由兩種膨脹係數不同的材料固定在一起的位置。例如，對於齒輪齒條回饋系統，合適的膨脹係數可能更接近於固定齒條的鑄鐵軌道。使用地板軌道型的大型龍門機台時，軌道的膨脹係數可能會因混凝土地基的約束作用而縮減。
- 2) 材料膨脹係數因材料成分和熱處理方式的不同而異。因此獲得高度精確的數值通常很困難。校正時的環境溫度與 20°C 相差越大，此係數的精度就越重要。如果沒有精確的係數，則可以在接近 20°C 的溫度下進行校正，以減少量測誤差。
- 3) 如果一台工具機一直加工與回饋系統的膨脹係數相差很大的工件材料（例如鋁合金、碳合成材料、陶瓷、平板玻璃基板、矽晶片等），那麼使用工件的膨脹係數可能比使用工具機回饋系統的膨脹係數更合適。儘管未提供代表 20°C 機台效能的校正，但可增進工件在 20°C 進行量測時的精度。下一小節的目標 4 詳細介紹了這一點。

感測器位置

本節針對環境感測器的放置位置給出了建議。

空氣溫度感測器 — 將空氣溫度感測器放在靠近雷射量測光束的地方，最好在光束的中間位置避開電機、電源等產生的暖氣流，避免陽光直射。

氣壓和濕度感測器 — 這些感測器都位於 XC-80 內部，XC-80 應該水平放置，並且與雷射量測光束的高度差不超過 3 m。

材料溫度感測器 — 在雷射校正過程中，材料溫度感測器應該放置在工具機的什麼位置，這一直是個爭議頗多的話題。首先要確定材料膨脹補償的主要目標。這通常是標準 ASME B89.1.8-2011 之附錄 C（見參考文獻 6）所述的四個目標之一，如下表所示：



圖 18

目標 1	依國家或國際機台驗收標準執行校正。
目標 2	估算當工具機在 20°C 的環境溫度下運作時可獲得的線性定位精度
目標 3	估算當工具機回饋系統在 20°C 時可能達到的線性精度
目標 4	估算當工具機製造的工件回到 20°C 時的工件檢測精度

這些目標之間通常存在明顯的差異，尤其是，如果在工具機運作期間，位置回饋系統（例如滾珠螺桿）變熱；或者，如果工件與位置回饋系統的膨脹係數相差明顯，例如在配用玻璃線性光學尺的工具機上加工鋁擠工件。下文根據所選目標，針對材料溫度感測器的位置和材料膨脹係數的選擇給出了建議。

目標 1 — 按照國家或國際標準校正機器的精度。請按照標準中規定的步驟進行校正，這應包含放置材料感測器的位置、要使用的膨脹係數，以及要執行的機台暖機週期。如果標準中還規定了熱變化測試，也應執行測試。

目標 2 — 估算當工具機在 20°C 的環境溫度下運作時可實現的精度。這通常是在工具機製造、簽核、調試或重新校正過程中的目標。在很多情況下，此目標與目標 1 相同。為了實現這一目標，材料溫度感測器應放置在工具機工作台上或不靠近熱源（例如電機、齒輪箱等）的其他大結構工具機部件上。材料膨脹係數應設定為與回饋系統相同。注意：材料感測器應總是放置在滾珠螺桿或回饋系統上，此屬常見誤解。雖然針對目標 3 來說確實如此，但對於目標 2 來說通常並非如此，如下例所示。

假定對工具機進行校正時，產線的溫度是 25°C，但由於工具機運作產生的熱量，滾珠螺桿的溫度高 5°C，即 30°C。如果材料溫度感測器放置在滾珠螺桿上（或附近），則需要對雷射讀數進行補償，以估算當滾珠螺桿在 20°C 下運作時可能得到的雷射讀數。但是，如果工具機在 20°C 的環境溫度下運作，則滾珠螺桿的溫度不是 20°C。由於螺桿和電機運作而產生的熱量仍然存在，因此滾珠螺桿的溫度仍將比環境溫度高大約 5°C（即 25°C）。因此，將材料溫度感測器放置在滾珠螺桿上會導致過度補償。比較理想的方法是，將感測器放在工具機的大結構部件上，以獲得與過去幾個小時內工具機周圍平均環境溫度相關的溫度讀數。

目標 3 — 估算當工具機回饋系統在 20°C 時可能實現的精度。這對於診斷工具機位置回饋系統的故障尤其有用。或許機台無法針對目的 1 或 2 進行校正，而回饋系統在 20°C 的精度現在也需要確認。為了實現此目標，應校準雷射光束，使其儘量靠近回饋系統所在軸線（以儘量降低阿貝偏置誤差）。如果存在阿貝偏置誤差，那麼還應檢查軸的俯仰和/或扭擺誤差。材料溫度量測頭應放置在（或非常接近）回饋系統且膨脹係數應設為回饋系統的。

目標 4 — 估算當工具機製造的工件回到 20°C 時的工件檢測精度。這個過程對於優化在非溫控產線生產的工件的尺寸精度尤其有用；在這些應用場合，工具機位置回饋系統的膨脹係數與工件的膨脹係數相差非常大。材料熱膨脹係數應設定為與工件相同。材料溫度感測器應放置在溫度與工件預期溫度近似的位置上。（這個位置通常是在工具機工台上，但還需要考慮其他因素，例如所使用的冷卻系統類型和金屬切削速度。）還應注意的是，必須在典型條件下進行此類校正，而且只有在各個工件的溫度和膨脹係數相對穩定的情況下才真正有效。

其他注意事項 — 必須保證材料溫度感測器與被測材料之間具有良好的熱接觸。材料表面最好平整、裸露。

若氣溫與機台溫度明顯不同，這可能表示材料表面與核心溫度之間存在大幅溫差。在這種情況下，應仔細安排材料溫度感測器的位置，使其能夠量測到中心溫度。

在工具機運作過程中，工具機的溫度通常會升高。建議您在開始校正前執行移動的預熱步驟，以確保校正中包括這種影響。

死程誤差

為了通過公式 1（見第 10 頁）有效補償在不穩定環境中獲得的線性量測結果， N （條紋計數）名義上必須反映雷射干涉儀的量測光束上光學鏡組之間間隔。舉個例子，如果間隔加倍，則 N 名義上也應加倍；當 $N = 0$ 時，光學鏡組應彼此緊靠。如果當光學鏡組彼此緊靠時將雷射干涉儀歸零（即，將 N 設為 0），就可以輕鬆做到這一點。

如果將雷射干涉儀系統歸零時，線性光學鏡組不是彼此緊靠，而且環境隨後發生變化，那麼基準位置的雷射讀數會出現小幅偏移。這個偏移通常由兩個部分組成，即空氣死程誤差和材料死程誤差。

空氣死程誤差

以圖 19 所示為例。假設將雷射干涉儀系統歸零，光學尺讀數為 0.000 mm，但量測光束上的光學鏡組之間存在「死程」間隔 D 。在此位置，如果 $N = 0$ ，則雷射位置讀數也是 0.000 mm。現在，假設空氣的折射率改變了 +1 ppm。這會導致雷射波長縮短 1 ppm，並且光學鏡組之間間隔 D 中的波數將隨之增加 1 ppm。條紋計數 N 將相應增加，並且雷射位置讀數將從零偏移 $1 \text{ ppm} \times D$ 。這就是「空氣死程誤差」。即使環境補償器正確計算

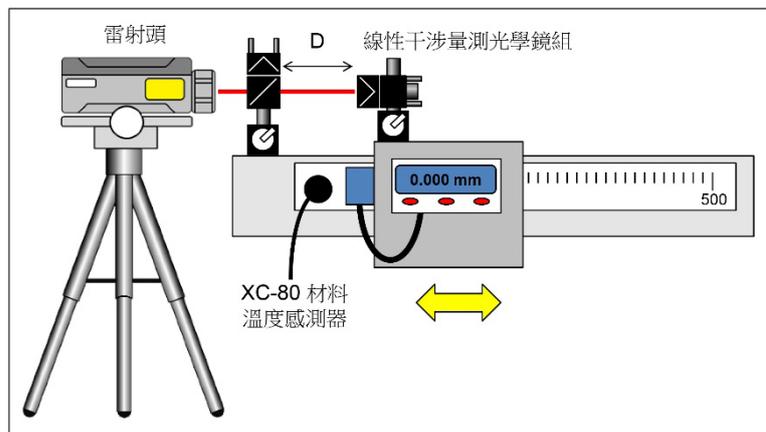


圖 19

了新的雷射波長，由於 N 幾乎為零（而不是 $2D/\lambda_{\text{air}}$ ），因此應用空氣折射補償幾乎沒有任何效果。實際上，系統並不能「看到」量測光束中的額外空氣，因此不會補償這部分光束中的雷射波長變化。

空氣死程誤差的一般公式如下：

$$E_{\text{ADP}} = D \times (\lambda_{\text{air}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

其中， E_{ADP} 是空氣死程誤差， D 是當歸零時光學鏡組之間間隔（即死程）， λ_{air} 是當前雷射波長， λ_0 是當系統歸零時的雷射波長。如下所示，利用此公式，並假設當前空氣相對於標準空氣的變化，就可以估算每米空氣死程的死程誤差。

自歸零後，氣壓變化誤差為 $0.27 \mu\text{m}/\text{mbar}$ 。

自歸零後，氣溫變化誤差為 $0.96 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

自歸零後，相對濕度變化誤差為 $0.1 \mu\text{m}/10\%$ 。

這表明，空氣死程誤差通常非常小；如果將系統歸零時量測光束上光學鏡組之間間隔 D 小於 10 mm，則空氣死程誤差可以忽略不計。

請注意，有些雷射系統配有軟體，當使用者手動輸入空氣死程之後，軟體會進行額外修正。Renishaw 的 LaserXL 軟體不提供這種功能，這是因為兩個原因：

- 1) 使用者可能會弄錯符號規約。根據移動的正向方向和光學鏡組的佈局，使用者可能需要為死程輸入正值或負值。如果輸入的符號不正確，那麼誤差將加倍，而不是消除。
- 2) 比較好的量測方式就是，將光學鏡組彼此緊靠，直接固定在關注點上，從而儘量減小無關的空氣和材料的「死」程。如下一節所示，事實上，材料死程誤差通常更為重要。因此，不提供軟體修正功能可以鼓勵使用者採用更好的量測方式。

材料死程誤差

同樣以圖 19 所示為例。再次將雷射干涉儀系統歸零，光學尺讀數為 0.000 mm，但量測光束上的光學鏡組之間存在「死程」間隔 D 。在此位置，如果 $N = 0$ ，則雷射位置讀數也是 0.000 mm。現在，假設工具機溫度上升了 1°C ，且材料膨脹係數約為 $10 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 。這時發生的膨脹會導致量測光束上的光學鏡組進一步分離約 $10 \text{ ppm} \times D$ ，而且光學鏡組之間間隔 D 中的波數將隨之增加 10 ppm 。條紋計數 N 將相應增加，並且雷射位置讀數將從零偏移 $10 \text{ ppm} \times D$ 。請注意，此「材料死程誤差」是因氣溫變化 1°C 而產生的空氣死程誤差的 10 倍。即使環境補償器正確計算了新的環境係數 EF ，由於 N 幾乎為零（而不是 $2D / EF$ ），因此應用材料膨脹補償幾乎沒有任何效果。實際上，系統並不能「看到」量測光束中的額外材料，因此不會補償其熱膨脹或收縮。

材料死程誤差的一般公式是： $E_{MDP} = D \times \alpha \times T$

其中， E_{MDP} 是材料死程誤差， D 是當歸零時光學鏡組之間間隔（即死程）， α 是死程中材料的線性膨脹係數， T 是自系統歸零後的材料溫度變化。例如，如果材料膨脹係數為 $10 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ，那麼死程誤差為： $10 \mu\text{m}/\text{每米材料死程}/\text{自系統歸零後材料溫度每變化 } 1^{\circ}\text{C}$ 。

這清楚地說明了，材料死程誤差可能比空氣死程誤差更為重要。由於「死程」中的材料可能與被測物體不同，而且它們的溫度各自獨立變化，因此無法進行簡單的軟體修正。最好的方法是採取合適的量測方式，即：

- 將光學鏡組彼此緊靠，直接固定在關注點上，從而儘量減小材料死程。
- 保持溫度穩定和/或快速完成量測，儘量減少量測過程中的材料溫度變化。
- 如下面兩節所述，使用預設讀數或者使用分光鏡作為移動光學鏡組，以儘量減小將系統歸零時光學鏡組之間間隔。

通過預設雷射讀數來消除死程

我們看一看圖 19 所示設置的一種變體。如圖 20 所示，在這種設置中，線性光學尺的參考原點在最遠端。但是，由於空間限制，無法重新調整雷射干涉儀和光學鏡組的位置。為了處理這種情況（工具機或光學尺的零位不在雷射干涉儀的光學鏡組彼此緊靠的位置上），

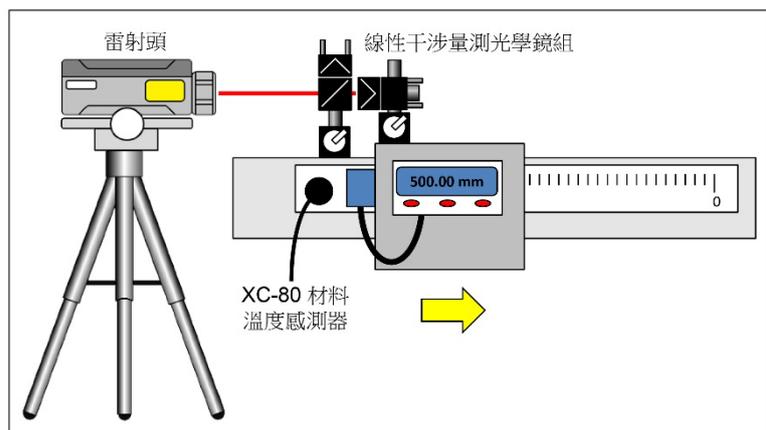


圖 20

Renishaw 的 LaserXL 軟體中使用的材料和空氣補償公式中包含一個額外的「預設」項。

$$L = (1 - \alpha T) \times \lambda_{\text{air}} \times N / 2) \dots\dots\dots\text{公式 2}$$

其中，P 是用戶輸入的「預設」值，用於將線性雷射讀數偏置一個指定的量。請注意，未對預設值進行補償，它只是一個固定的偏置量，用於在補償後的雷射位置讀數顯示之前添加到其中。

在圖 20 所示的示例中，將雷射干涉儀歸零和應用預設值的正確方法如下：

1. 將滑架移至光學尺的 500 mm 位置。
2. 調整光學鏡組安裝座，使其彼此緊靠（如圖 20 所示）。
3. 檢查雷射讀數的符號規約是否與光學尺的符號規約一致。
4. 將雷射干涉儀系統歸零。這樣即可滿足在雷射干涉儀歸零時光學鏡組彼此緊靠的要求。
注意：此時，雷射讀數為 0.000 mm，光學尺讀數為 500 mm。
5. 將滑架移至光學尺的參考原點。注：此時，光學尺讀數為 0.000 mm，雷射讀數約為 -500 mm（例如，我們假設它為 -500.0011 mm）。
6. 在雷射干涉儀軟體中輸入一個預設值，使雷射讀數和光學尺讀數一致。（在此例中，用戶應在雷射干涉儀軟體中輸入預設值 +500.0011。然後，雷射讀數將跳至 0.0000 mm，與光學尺讀數一致。）
7. 現在開始校正。此時，環境中的任何其他變化都將被正確補償，從而避免由於將雷射干涉儀歸零時光學鏡組相距 500 mm 而出現空氣和材料死程誤差。

通過互換光學鏡組的位置來消除死程

將系統歸零時使光學鏡組彼此緊靠的另一種方法是，當軸的參考原點位於雷射干涉儀的最遠端時，將移動光學鏡組和固定光學鏡組的位置互換，如圖 21 所示。在此設置中，分光鏡（而不是角錐反射鏡）固定在移動滑架上，而角錐反射鏡固定在工作臺的最遠端。如圖 21 所示，滑架位於基準位置，且光學鏡組彼此緊靠，從而消除了空氣死程。（不過，在此圖示中，光學鏡組固定點與光學尺讀頭和光學尺原點之間的

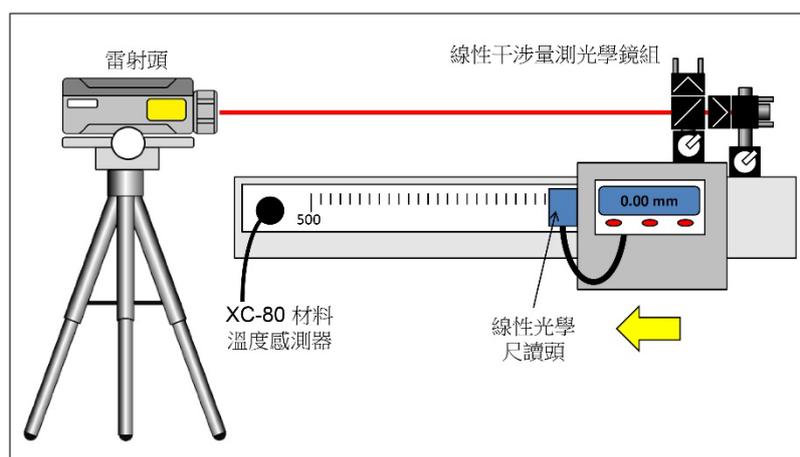


圖 21

偏置略有增加；如果溫度發生變化，並且工具機工作台和移動滑架發生不同程度的膨脹，就會導致出現材料死程誤差。）請注意，對於較長的軸（10 m 以上），這種佈局可能更難校準，因為由於光學製造公差，分光鏡的輸出光束可能與輸入光束不完全平行。

結論

本白皮書闡釋了空氣折射補償和材料膨脹補償對於確保雷射干涉儀的線性量測精度的重要性。本文詳細介紹了與氣溫、氣壓、濕度和材料膨脹的未補償變化相關的潛在誤差；說明了 Renishaw XC-80 環境補償器的原理，並就如何充分利用該系統提供了建議。如需延伸閱讀，請參閱下文的參考文獻和附錄。附錄 1 和 2 簡要說明了環境補償的其他方法。附錄 3 解釋了為什麼雷射干涉法角度和真直度量測通常不需要環境補償。

附錄 1 — 環境補償的其他方法

本白皮書介紹了如何使用 Renishaw XC-80 環境補償器自動補償空氣折射和材料膨脹。本附錄簡要介紹了其他方法。

手動補償 — 如果有適合的環境資料，Renishaw LaserXL 軟體（請參見圖 22）允許手動（通過鍵盤）輸入氣溫、氣壓、濕度、材料溫度和膨脹係數。每當使用者輸入一項新的環境資料，對雷射讀數應用的補償都會更新。這種方法的缺點是無法頻繁更新補償，因此只適用於穩定的環境。

Renishaw XC-80 系統的優點在於，每 7 秒鐘獲取一個新的感測器讀數以自動更新補償。

XC-80 系統還在一個緊湊型封裝中提供了所有需要的感測器，並且具有適當的高精度水準。

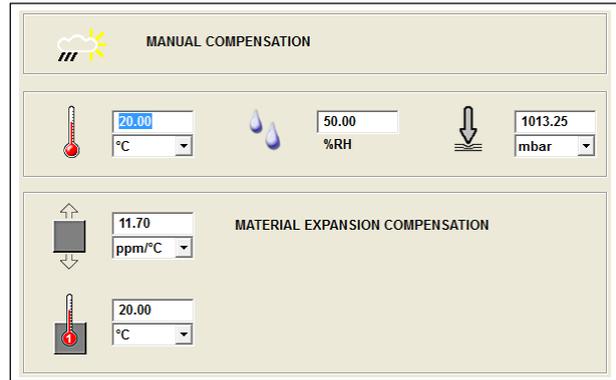


圖 22

空氣折射計 — 空氣折射計是一種高度專業化的儀器，可直接量測空氣折射率的變化。空氣折射計通常包含一個非常穩定且長度固定的標準諧振腔，標準諧振腔通常由零膨脹玻璃製成，兩端都裝有鏡子。利用平面鏡線性雷射干涉儀可直接量測標準諧振腔內的雷射波數變化。標準諧振腔內的氣溫、氣壓和濕度與周圍環境相同。空氣折射計有兩種基本類型。跟蹤式折射計只量測折射率變化，而絕對式折射計可以量測絕對折射率和各種變化。折射計可以非常迅速地高精度測定折射率的變化，但折射計既昂貴又笨重，並且需要另一條雷射光束用於折射計。通常只在標準實驗室，以及半導體晶圓加工機械上的雷射位置回饋系統中使用。它們的回應速度比傳統的氣溫、氣壓和濕度感測器快很多。不過，這可能會增加補償後雷射讀數中的雜訊，因為折射計附近的空氣折射率局部變化會立即應用於線性量測的整個長度。傳統感測器的回應速度較慢，不會對突然的局部變化做出回應，因此能夠在補償過程中起到平滑作用。

Renishaw 的雷射系統不支援來自於折射計的環境輸入。

平衡式光學設計 — 如果將系統歸零時光學鏡組無法彼此緊靠，則可以考慮採用平衡式光學佈局。如果雷射干涉儀的參考光束和量測光束的長度相似，並且暴露在一樣的空氣中，那麼空氣折射率的變化將對兩條光束產生一樣的影響。圖 23 顯示了一種可能的

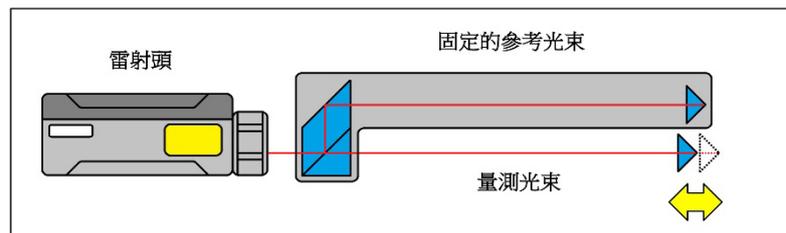


圖 23

佈局。上圖中的系統沒有使用常規的線性分光鏡，而是使用角度干涉鏡進行分光，產生兩條相互平行的參考光束和量測光束。長參考光束由因殷鋼（以確保熱穩定性）或工具機的其他部分提供支撐，用於產生一條與量測光束光程相似的局部參考光束。

在受控環境中量測 — 如果在高度受控的環境中進行量測，則可能不需要環境補償。這種情況可能包括：

- 在真空中量測。
- 在氣溫、氣壓和濕度受控的空氣中量測。

附錄 2 — 使用 NIST 空氣折射公式

上文中提到，NIST 的 Metrology Toolbox 提供了一個精度略低但更加簡單的公式，它堪稱「可攜式計算器」，可替代 Edlén 和 Ciddor 公式，而且適用於 0.633 μm 氦氖雷射：

$$n_{\text{air}} = 1 + ((7.86\text{e-}5 \times P)/(273 + T)) - 1.5\text{e-}11 \times H \times (T^2 + 160)$$

其中， n_{air} = 空氣折射率， T = 氣溫 ($^{\circ}\text{C}$)， H = 相對濕度%， P = 氣壓 (mbar)。儘管這個公式不如 Edlén 修正公式或 Ciddor 公式精確，但 NIST 指出，在 0-35 $^{\circ}\text{C}$ 、500-1200 mbar、0-100% RH、 CO_2 含量為 450 ppm \pm 150 ppm 的範圍內，精度應該在 ± 0.15 ppm 以內。

因此，這個公式對於估算在各種氣溫、氣壓和濕度條件下的環境補償誤差非常有用。此外，也可以用於對未補償的雷射讀數應用空氣折射補償，如下所述：

如果不應用空氣折射補償，Renishaw 雷射系統的軟體將假設在「標準空氣」條件下進行線性雷射量測，即：氣壓為 1013.25 mbar，氣溫為 20 $^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度為 50%。

將這些條件代入 NIST 公式，即可獲得「標準空氣」的折射率。

$$n_{\text{standardair}} = 1 + ((7.86\text{e-}5 \times 1013.25)/(273 + 20)) - 1.5\text{e-}11 \times 50 \times (20^2 + 160) = 1.00027139$$

不過，如果實際上是在另一種氣壓、氣溫和濕度條件下進行雷射量測，則當前的空氣折射率表示為：

$$n_{\text{air}} = 1 + ((7.86\text{e-}5 \times P)/(273 + T)) - 1.5\text{e-}11 \times H \times (T^2 + 160)$$

然後可以利用下面的公式乘以兩個折射率之間的比率，對未補償的線性雷射讀數 (L) 進行補償。

$$L_{\text{compensated}} = L_{\text{uncompensated}} \times n_{\text{standardair}} / n_{\text{air}} = L_{\text{uncompensated}} \times 1.00027139 / n_{\text{air}}$$

請注意：上面的公式不會修正空氣死程誤差；在不穩定的環境中，如果在歸零時光學鏡組不是彼此緊靠，就會出現這種誤差。

附錄 3 — 雷射干涉法角度和真直度量測的環境補償

真直度量測 — 圖 24 所示為真直度量測光學鏡組的示意圖。如圖所示，雷射干涉儀的光束 1 和光束 2 的長度幾乎相同。因此，空氣折射率的任何變化對兩條光束的影響幾乎相同。當量測較大的真直度誤差時，可能會出現細微失衡，這在一定程度上容易受空氣折射率變化的影響。不過，折射

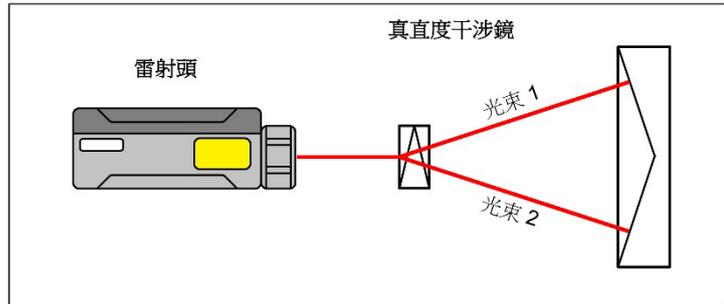


圖 25

率的最大預期變化約為 155 ppm (請參見圖 4、圖 5 和圖 6)，相當於 0.015%。與 Renishaw 真直度量測光學鏡組規定的量測精度 0.5% (短距離光學鏡組) 或 2.5% (長距離光學鏡組) 相比，這種影響微不足道，相當於當量測 1 mm 的真直度誤差時，誤差只有 0.15 μm 。

角度量測 — 圖 25 所示為角度量測光學鏡組的示意圖。如圖所示，當反射鏡與光束垂直時，雷射干涉儀的光束 1 和光束 2 的光程長度相當。當量測軸的俯仰或扭擺角度時，通常會出現這種情況。當量測較大的角度 (最大為 10°) 時，可能會出現細微失衡，這在一定程度上容易受空氣折射率變化的影響。不過，折射率的最大預期變化約為

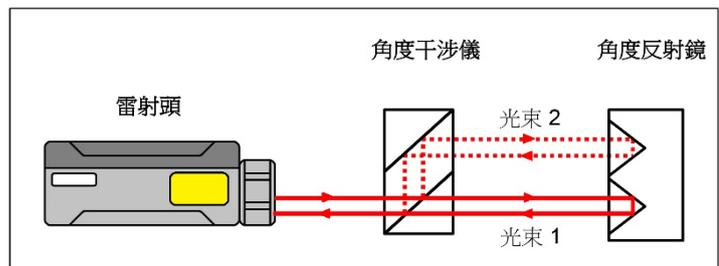


圖 24

150 ppm (0.015%)。與 Renishaw 角度量測光學鏡組規定的量測精度 0.6% (標準精度角度量測光學鏡組) 或 0.2% (高精度角度量測光學鏡組) 相比，這種影響微不足道。最後，當使用角度量測光學鏡組結合 Renishaw XR20-W 無線旋轉軸校正儀量測旋轉軸時，光學校正迴圈會自動包含當前的空氣折射率。關於這一點，詳情請參閱《Renishaw 白皮書 TE327 — 旋轉軸的干涉量測校正》(參考文獻 7)。

參考文獻

1. Phillip E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," Appl. Optics 35, 1566-1573 (1996). Optics 35, 1566-1573 (1996).
2. B. Edlén, "The refractive index of air," Metrologia 2, 71-80 (1966).
3. K.P. Birch and M.J. Downs, "An updated Edlén equation for the refractive index of air," Metrologia 30, 155-162 (1993).
4. K.P. Birch and M.J. Downs, "Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air," Metrologia 31, 315-316 (1994).
5. NIST Metrology Toolbox <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>
6. ASME B89.1.8-2011 《位移量測雷射干涉儀的性能評估：非強制性附錄 C — 使用雷射干涉儀系統進行精確的量測 — 最佳程式和實踐》，第 41-48 頁 (1998)
7. Renishaw 白皮書《TE327 — 旋轉軸的干涉量測校正》

www.renishaw.com.tw/contact



#renishaw

 +886 4 2460 3799

 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-5650-3564-03-A

發布日期：04.2023