

白皮書

妥善安裝光學尺以達最佳熱性能

當機器的溫度改變時，許多機器零件的長度會因熱膨脹而改變。所有的光學尺和機器的其他元件一樣，都遵守相同的熱定律：光學尺的長度會隨著溫度變化而改變。產生的誤差也許在可以接受的範圍內，或者可以透過控制機器的作業環境來控制誤差，但即使是攝氏一度的溫度變化，都可能導致測量誤差超過十個百萬分點 (10 $\mu\text{m}/\text{m}$)。本白皮書會探討如何控制光學尺的熱膨脹程度。其中包括幾種選擇，可用來計算和補償因熱引起的應變。亦會說明當光學尺和基材的膨脹失配時，會如何影響光學尺系統的整體效能。

1 熱學安裝方式

您可以計算和補償光學尺因溫度引起的應變。這通常會利用溫度測量與熱膨脹係數 (CTE) 來計算出光學尺和基材的長度變化。接著便可利用此資訊來補償。光學尺的熱應變取決於安裝方式，說明如下。務必確定機器上相關零件與工件 (如相關) 的溫度經過精確測量，這是因為兩者的誤差都會影響熱補償的程度。

範例 1：假設有一部以鋁製成的機器，其線性軸長 1 m，作業溫度介於 15 至 25 °C。鋁具有相對較高的 CTE，大約是 23 ppm/°C。在此溫度範圍 (± 5 °C) 內，此 1 m 軸會以 $\pm 115 \mu\text{m}$ ($1 \times 23 \times 10^{-6} \times 5 = 115 \times 10^{-6} \text{ m}$) 伸縮。

大部分的線性光學尺是以不鏽鋼材質製成，其熱反應不同於鋁。如果該光學尺是在 20 °C 下安裝在此軸上，那麼忽略熱效應的話，可能會導致顯著的位置不確定性。我們可以看到範例中的 1 m 鋁軸在 5 °C 的溫度變化下，會有 115 μm 的位置誤差 (取決於光學尺的安裝方式)。

我們現在需要考慮是否要牢牢地將光學尺固定在基材上，或讓光學尺在基材上獨立浮動。

1.1 基材固定式

如果機器隨著溫度升高會伸長 115 μm ，則在所有溫度下，光學尺仍足以抵達機器上相同的實體位置 (舉例來說，假設工件固定在機器上的特定位置)。在這種情況下，光學尺應具有彈性，能夠隨著機器伸縮。

由於基材支配著光學尺，這種安裝方式稱為「基材固定式」，光學尺會隨著基材以相同速率伸縮。

1.1.1 選擇固定式光學尺

在許多應用中，使用固定式光學尺的效果較好。包括：

- 需要機器的座標系統而非絕對位置，例如要移動到位於機器床台上某固定位置的工件時。
- 當工件和機器基材的 CTE 幾乎一致，且兩者會保持在相同溫度時，則光學尺和工件的伸縮程度會幾乎一致。因此，在特定溫度下，若基材產生任何長度變化，光學尺也會產生相當的長度變化來自動補償。
- 當機器的軸較長，伴隨固定式光學尺而來的不確定性並不會隨著長度而增加，但若是浮動式光學尺，不確定性就會隨著長度大幅增加。

- 如果基材具有低導熱性和高熱質量 (例如一塊厚實的花崗岩)，短期的氣溫波動會導致基材有些微的溫度變化和伸縮，因此可以忽略這些短期的溫度變化。不過須注意的是，長期的溫度變化仍必須納入考量。長期溫度變化可能更難以適當地測量出來，因為重要的是平均基材溫度。因此，更直接的長度測量可能較為可行，例如定期比對已知標準。

1.2 浮動式光學尺

若光學尺的安裝方式可以讓其獨立於基材而自由大幅伸縮，即稱為「浮動式」光學尺。因此，浮動式光學尺的伸縮取決於光學尺自身的 CTE 和溫度。在範例 1 中，機器以具有高熱膨脹係數 (約 23 ppm/°C) 的鋁材製作。鋼質光學尺會具有較低的膨脹係數 (約 10.1 ppm/°C)，相對於鋁質基材每 5 °C 伸縮 115 μm ，鋼的伸縮率減少至每 5 °C 伸縮 50.5 μm 。使用低膨脹率的光學尺，並透過熱補償機制，可以進一步提升效能。

浮動式光學尺的伸縮是由光學尺的溫度控制。浮動式光學尺通常較為薄 (小於 1.5 mm)，而具有相對較高的導熱性。因此，我們可以假設光學尺的溫度是均勻的 (隨深度變化)。這讓測量相關溫度 (並進而得到精確的熱補償程度) 更為容易。由於浮動式光學尺幾乎與基材無關，取得精確的基材伸縮率並非必要。

使用 CTE 低的光學尺可以改善浮動式光學尺的熱補償。由於補償校正通常較小，不精準的溫度測量導致的任何補償誤差也會比較小。這在溫度測量具有不確定性，或整台機器可能有局部溫度變動時，會特別有幫助。

對整個可能的安裝系統來說，基材的伸縮至少會部分影響光學尺淨伸縮：光學尺不會正好如 CTE 單獨預測般伸縮。光學尺偏離完美浮動式光學尺所預測位置的現象稱為干擾，安裝浮動式光學尺時最好將這種情形降至最低。應注意的是，這種干擾會限制可達到的最低有效 CTE，即使光學尺使用 CTE 非常低的材料。Renishaw 提供兩套安裝浮動式光學尺的基本方式，旨在將不同條件下對光學尺的干擾降至最低。這些方式包括使用自黏式背膠，以及使用固定夾 (若為光學尺) 和 FASTRACK™ (若為不鏽鋼帶光學尺) 來以物理方式限制光學尺發生離軸運動 (稱為機械安裝式)。下一節會深入探討干擾導致光學尺偏離完美浮動反應的情形。

2 浮動式光學尺的干擾

2.1 光學尺干擾

Renishaw 已針對以下兩種安裝方式導致的干擾情形發展出數學模型，並以實驗驗證：膠帶安裝和機械安裝。模型本身過於複雜，並不適合在本文詳加說明，且部分結果是非線性的：例如，光學尺的末端會出現最多的位置誤差，但這種誤差無法僅在光學尺上透過線性插補來修正。

下列方程式可預測光學尺末端最嚴重的干擾情形。

2.1.1 重要術語

干擾是指出現在光學尺末端的位置誤差，主要由安裝方式造成，部分是由光學尺和基材的伸縮所致。這是理論上完美浮動式光學尺和真實光學尺之間的長度差異。干擾通常是以 μm 為單位測量，在本文中以 u 來表示。

相對擴張是指由於溫度變化，光學尺和基材產生之熱膨脹間的相對變化，如圖 1 所示。在本文中以 ρ 表示，單位為 ppm。其定義如下：

$$\text{相對擴張} = \rho = \Delta T(\text{CTE}_{\text{基材}} - \text{CTE}_{\text{光學尺}})$$

其中：

ΔT 是指偏離某設定溫度的溫度變化，通常是安裝溫度 (20 °C)

$\text{CTE}_{\text{基材}}$ 是指基材的熱膨脹係數 (ppm/°C)

$\text{CTE}_{\text{光學尺}}$ 是指光學尺的熱膨脹係數 (ppm/°C)

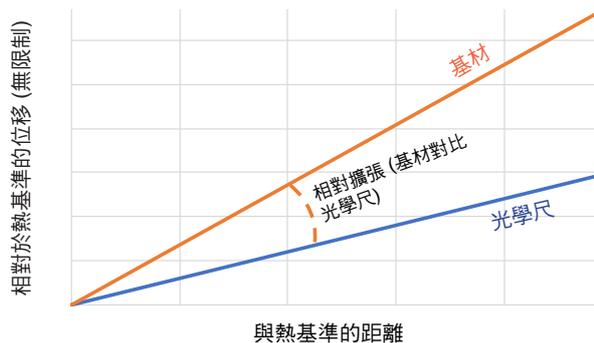


圖 1。光學尺和基材之間的相對擴張

自由長度是指光學尺在基材上的固定點（即熱基準，請參閱第 3.1 節）和光學尺最遠的自由末端之間的距離。通常熱基準會在光學尺的中點，而自由長度會是光學尺總長度的一半。在本文中，自由長度是以 z 表示，單位為 m 。

膨脹失配是指光學尺的熱膨脹和基材的熱膨脹在熱基準和最遠自由末端之間的差異；以 $z\rho$ 計算。

2.1.2 方程式

參數

下列方程式會使用以下參數。

E = 光學尺的彈性模數 (Pa)

A = 光學尺的截面積 (m^2)

L = 光學尺的總長度 (m)

z = 光學尺的自由長度 (m)

也就是說，若為具有中央基準點的光學尺， $z = L/2$

u = 干擾 (μm)

ρ = 相對擴張 (ppm)

q = 機械對安裝造成的每單位長度摩擦曳力 (Nm^{-1})

k = 膠帶對安裝造成的每單位長度剪力勁度 (Nm^{-2})

機械安裝式光學尺：

若為機械安裝式光學尺 (使用固定夾和 FASTRACK) 光學尺干擾 (u) 可使用下列方程式估計：

$$u = \frac{qz^2}{2EA}$$

只要相對擴張高於下列方程式得出的閾值，上述關係即成立：

$$\rho \geq \frac{qz}{EA}$$

在大部分情況下皆可滿足此條件。從這個方程式可得到一個重要結論，即干擾通常獨立於相對擴張。

也可以看到干擾和自由長度的平方成正比。

膠帶安裝式光學尺：

若為膠帶安裝式光學尺，光學尺的干擾大約是：

$$u = \frac{\rho kz^3}{3EA}$$

這個方程式與機械安裝式的方程式有兩點顯著的不同之處：干擾與相對擴張和自由長度的立方 (而非平方) 成正比。

邊界條件：

當下列條件成立時，這兩種安裝方式會產生理論上完全相同的干擾：

$$z\rho = \frac{3q}{2k}$$

當有應用的膨脹失配值 (自由長度乘以相對擴張) 小於此臨界值，膠帶安裝方式相較於機械安裝方式，會產生較小的干擾值。若膨脹失配值高於此臨界值，則結果恰好相反。

交叉點僅由 q 和 k 來決定，一旦知道這兩個值，便可計算所有光學尺配置的交叉膨脹失配值。

這個膨脹失配交叉點可用來判斷膠帶安裝式光學尺或機械安裝式光學尺是否會在特定條件下產生較低的干擾。RTL 系列膠帶光學尺的交叉膨脹失配值為 $20 \mu\text{m}$ ，若是 REL/RSL 光學尺，則為 $500 \mu\text{m}$ 。

干擾/相對擴張圖

以下各圖提供圖形摘要，顯示安裝方式對光學尺末端位移的影響。這些圖可以用來預測所選安裝方式可能會如何影響系統量測。圖中繪出膠帶安裝方式和機械安裝方式在各種光學尺長度下干擾對上相對擴張的曲線。

產生最小干擾 (較佳效能) 的安裝方式以實線標示。

圖 2 中的圖形可用來找出在特定的相對擴張下，哪一種安裝系統會產生最小干擾。

例如，若將 1 m 長的 RTL 光學尺 ($\text{CTE} \approx 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 安裝在具有中央基準的鋁質基材 ($\text{CTE} \approx 23 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 上，然後升溫 5°C ，則產生的相對擴張為 $(23 - 10.1) \times 5 \approx 65 \text{ ppm}$ 。

從圖 2a 中的圖形可以看到，相較於使用膠帶安裝方式 (~0.28 μm)，使用 FASTRACK 安裝方式 (~0.18 μm) 可以將干擾降至最低。

圖中右上角黑線以上的區域表示可能因光學尺和基材之間過大的膨脹失配而導致膠帶安裝失敗。

請注意，這些圖是根據光學尺整體長度 (L) 繪製，假設光學尺採用中央固定點或沒有任何固定點，即 $z = L/2$ 。在其他所有情況下，若自由長度 z (固定點至自由末端) 已知，只要在圖中使用 $L = 2z$ 即可。

判斷機械安裝方式的摩擦力效果就沒有那麼明確：這些圖提供了審慎的設計指引，但不應用來得出具體的誤差補償。

2.2 遲滯

機械安裝式光學尺的干擾可能會受其熱歷程影響。為幫助理解，試想 CTE 為零的機械安裝式光學尺連接到 CTE 不為零的基材上。接著使系統升溫。一開始，由於熱應力不足以超越這種安裝方式的摩擦力，故基材大致能固定光學尺。初期的加熱會讓光學尺以基材的 CTE 伸縮 (圖 3 中的第 1 階段)。

到最後，產生的應力夠大，足以讓光學尺在基材上滑動，此時，光學尺就會以自身的 CTE (以此例而言，CTE 為零) 伸縮 (第 2 階段)。

當溫度隨後降低時，會發生相反的現象，需先經過降溫，光學尺才能超越安裝摩擦力，並在基材上滑動 (第 3 和第 4 階段)。因此，我們可以發現，光學尺的位置取決於系統歷程：這種現象稱為安裝遲滯。安裝遲滯會導致光學尺的伸縮出現不確定性。影響程度相當於機械安裝式光學尺的最大干擾。一般來說，由於缺少機械摩擦力，膠帶安裝式光學尺不會發生安裝遲滯的現象。

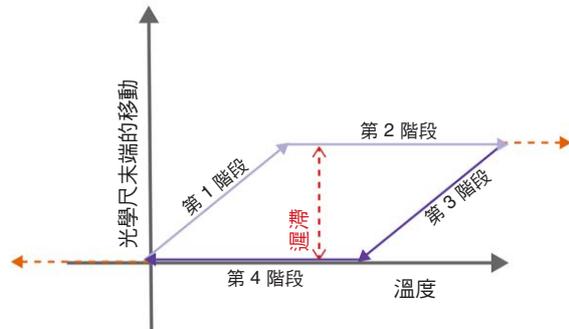


圖 3。光學尺末端隨溫度變化移動。假設光學尺採機械安裝方式、CTE 為零，且基材的 CTE 大於零。

3 其他光學尺安裝考量

3.1 基準

使用浮動式光學尺時，建議您使用熱基準。熱基準是光學尺牢牢固定在基材上的一個點，可確保光學尺和基材之間不會產生相對移動。

我們通常會建議將熱基準置於光學尺中點，因為這樣可以將自由長度以及光學尺的總干擾降至最低。

我們之前在第 2.1.2 節提過，機械安裝式光學尺的末端干擾與自由長度的平方成正比，若為膠帶安裝式光學尺，則與自由長度的立方成正比。

安裝 Renishaw 光學尺時可以不使用基準點。不過，出於幾個原因，還是建議您使用基準點。不使用基準點的話，就無法得知光學尺相對於基材並未移動的那個點。主張對稱的論點會建議這個點要位於光學尺的中點，但如果存在熱梯度，或者整條光學尺的安裝或基材特性有所變化，也不能使用中點。此外，如果軸會受加速影響，熱基準有助於防止光學尺移動。

RTL 系列膠帶式光學尺的相對擴張/干擾圖

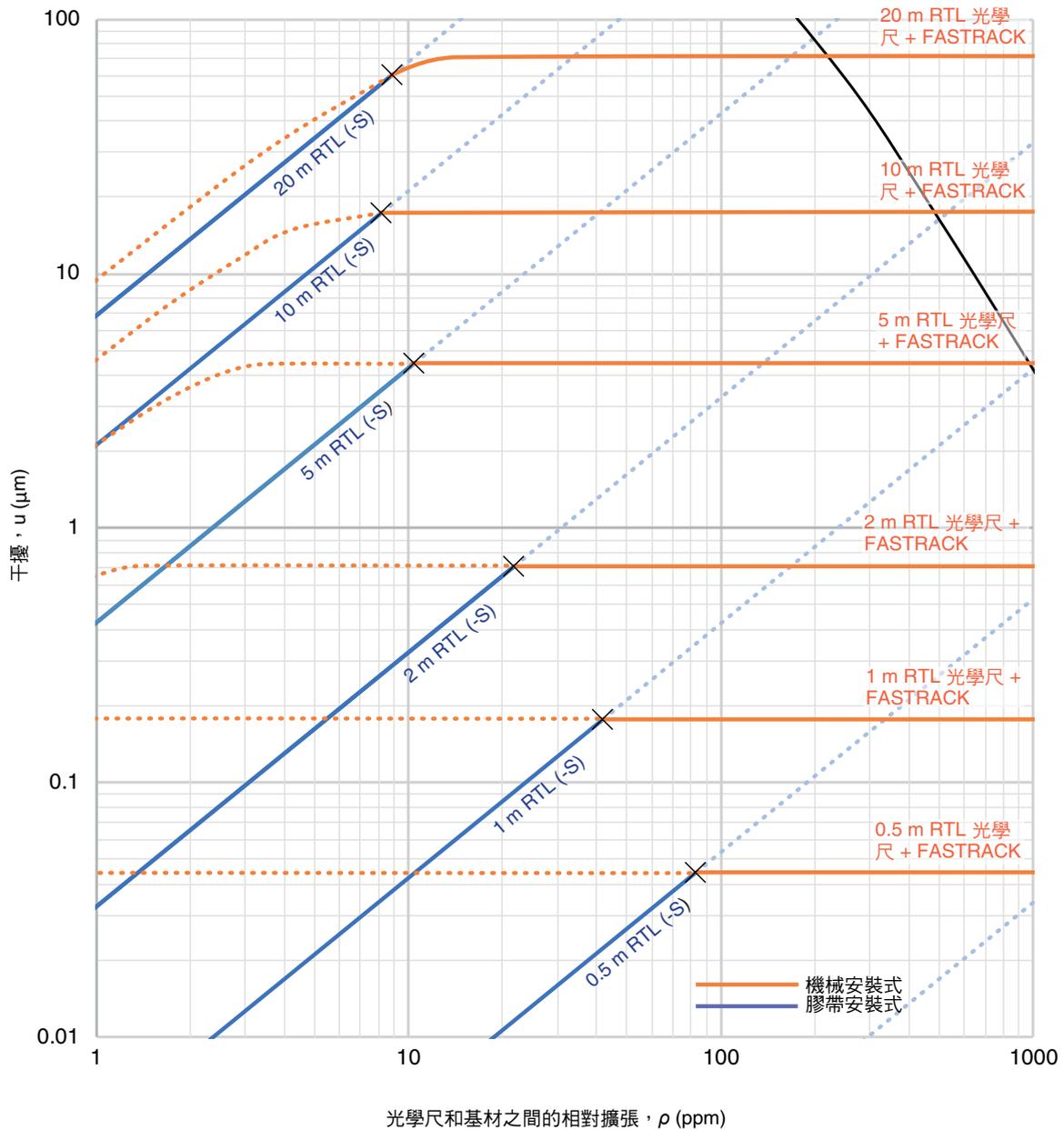


圖 2a。在不同 RTL 系列光學尺的長度與安裝方式下，由已知的相對擴張造成的干擾。
請注意，這些圖皆假設使用中央固定點，或未使用任何固定點。

REL 和 RSL 系列光學尺的相對擴張/干擾圖

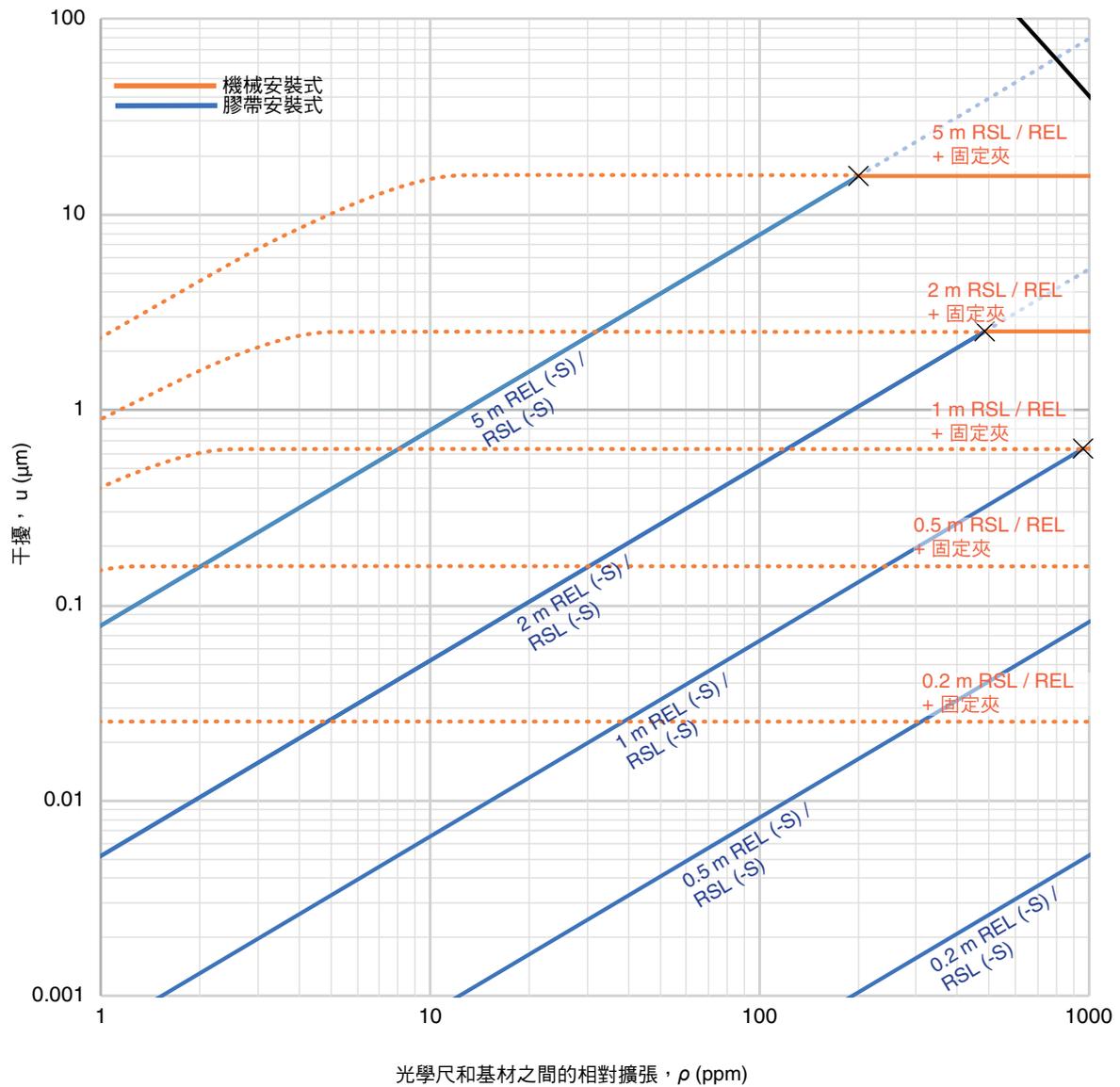


圖 2b。在不同 RSL/REL 系列光學尺的長度與安裝方式下，由已知的相對擴張造成的干擾。
請注意，這些圖皆假設使用中央固定點，或未使用任何固定點。

3.1.1 確認安裝效能：

FASTRACK 與固定夾安裝

使用機械安裝式光學尺時，安裝品質可能會影響摩擦曳力，進而可能造成干擾。安裝時務必小心謹慎，安裝前請確保基材乾淨、安裝設備保持平直、會留下殘漬的液體並未濺到安裝設備上，且盡量不要使用會脫絮的布反覆擦拭表面。

使用 FASTRACK 或固定夾安裝式光學尺時，務必檢查軸的滑動力，再於光學尺上設置基準點。將滑動力與安裝設備的理論值 (RTL： $\leq 0.3 \text{ Nm}^{-1}$ ；光學尺： $\leq 25 \text{ Nm}^{-1}$) 相比，可以得知是否會達到計算出的干擾。有時，因為並未檢查滑動力，導致出現安裝誤差卻並未偵測出來，這可能會大幅增加光學尺的干擾情形。依據光學尺安裝指南的建議，減少用來固定光學尺的固定夾數量，可以降低固定夾光學尺的摩擦力與最大干擾。

3.1.2 膠帶安裝式光學尺：最大膨脹失配值

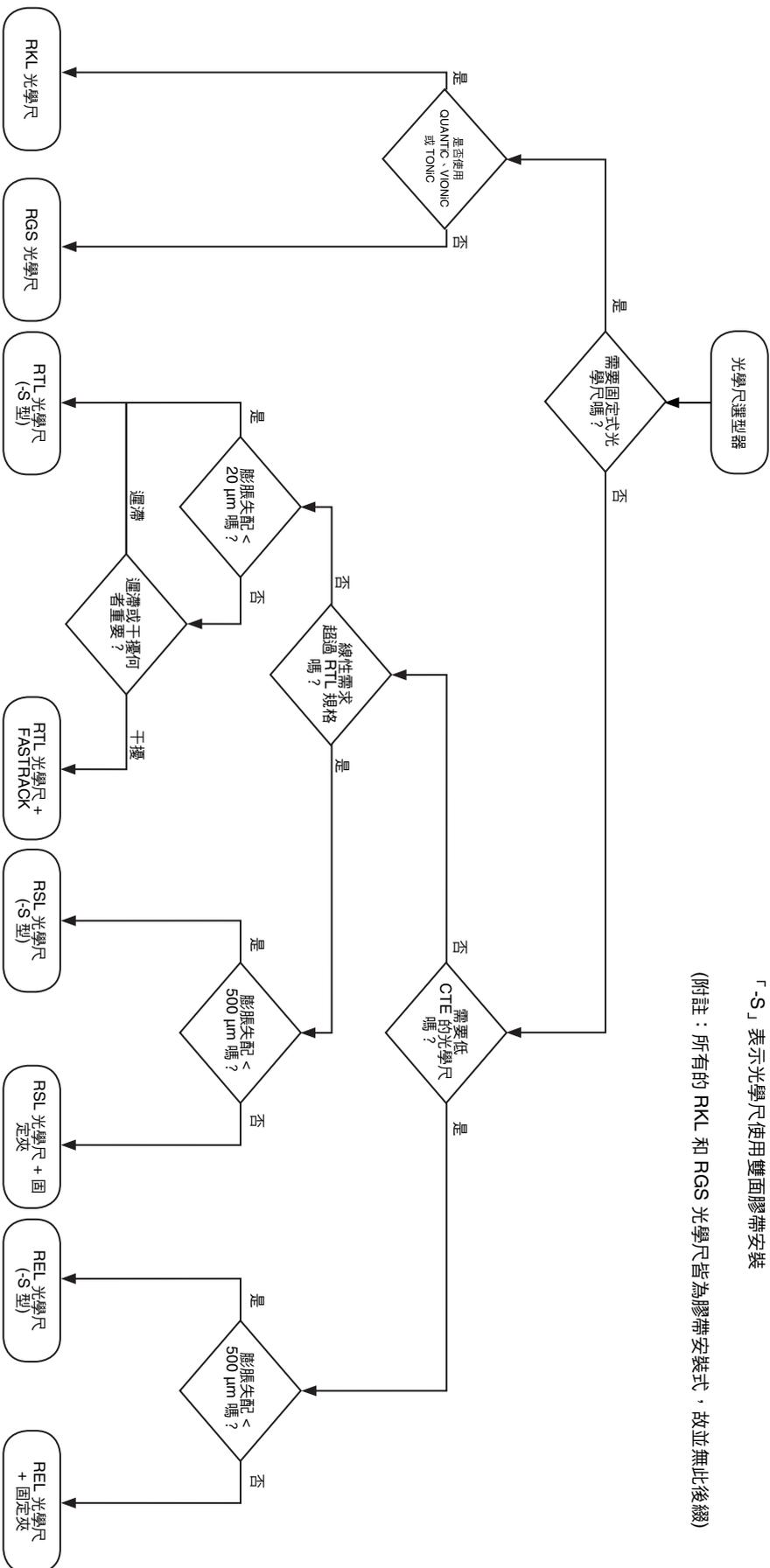
膠帶安裝式光學尺的最大膨脹失配值不應超過 1 mm，即使是在輸送期間亦同，如圖 2a 和 2b 中右上角的黑線區域所示。一旦超過這個值，便無法保證膠帶安裝的機械效能。

3.1.3 基材固定式光學尺：RKL 與 RGS

使用基材固定式 RKL 或 RGS 光學尺時，務必裝上環氧樹脂末端固定夾以形成兩個點，讓光學尺牢牢固定在基材上。由於單獨使用膠帶並不夠堅固，使得光學尺無法固定，這種作法可以確保光學尺能順利安裝。

4 光學尺選擇指引

下列流程可用來協助您判斷在特定應用下最合適的光學尺和安裝選項。



- 光學尺類型：
- RTL 為浮動式鋼帶光學尺
 - RKL 為固定式鋼帶光學尺
 - REL 為浮動式低膨脹鋼光學尺
 - RSL 為浮動式鋼光學尺
 - RGS 為固定式鋼帶光學尺
 - 「-S」表示光學尺使用雙面膠帶安裝

(附註：所有的 RKL 和 RGS 光學尺皆為膠帶安裝式，故並無此後綴)

如需瞭解是否需要固定式或低 CTE 光學尺，請參閱第 2.2 和 2.3 節。
有時候使用膠帶安裝方式而非機械安裝方式(即使干擾較少)，會較為有利。這是因為膠帶安裝方式不會產生運滯現象，對部分應用來說特別重要。

5 術語表

專有名詞	定義
膠帶安裝式	沿著光學尺全長，使用雙面膠帶將其固定到位的方式。
CTE	熱膨脹係數 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE)，物體大小隨著溫度改變的程度。通常以每攝氏溫度百萬分點 (ppm/°C) 標示。
擴張	元件的長度改變量除以原本長度所得之值。
相對擴張	基材和固定於基材上的光學尺之間的擴張差異。
干擾	安裝方式造成光學尺端點產生位置誤差。為理想的完美浮動式光學尺和光學尺末端實際位置之間的長度差異。
膨脹失配	光學尺的熱膨脹和基材的熱膨脹在熱基準和最遠自由末端之間的差異。
浮動式	在此系統中，光學尺的熱膨脹由光學尺本身的特性決定，幾乎與基材無關。
自由長度	浮動式光學尺的熱基準和光學尺距離基準點最遠的一端之間的距離。如未使用熱基準，應假設熱基準位於軸的中點。
安裝遲滯	指定特定溫度下，由較高或較低的溫度逼近該溫度時，光學尺淨伸縮的差異。
固定式	在此系統中，光學尺的熱膨脹由基材的伸縮決定。
機械安裝式	透過機械導引將光學尺固定到位的方式。共有用於膠帶式光學尺 FASTRACK，以及用於光學尺的固定夾和夾具。
熱基準	浮動式光學尺牢牢固定至基材上的點。光學尺和基材之間不會有任何相對移動，因此所有光學尺相對於基材的伸縮都會以這個點為中心。