

調諧品質阻尼器幫助 FORTiS™ 光學尺實現領先同級的抗振性

在 1907 年，美國機械工程師 Frederick Winslow Taylor 將機械加工過程中的振動形容為「機械工程師面臨的所有問題中最費解、最棘手的問題。」從 Renishaw 本身以及通過與全球客戶群的密切合作，在近五十年來所積累的豐富機械加工經驗來看，我們認同他的觀點。儘管機械加工業在這一個多世紀以來持續著技術進步，且目前已經開發出現代化、高品質、高速的 CNC 工具機，但振動現象確實還會發生。可能引起振動的典型應用場合包括重型粗切削、間歇性切削、薄壁部件加工，以及特別堅硬和特殊材料的加工。選擇合適的刀具以及優化進給率和速度，是有助於減少和抑制振動的必要措施。為確保工具機運動控制系統實現理想性能，進而提高生產效率，如何平衡循環時間與加工的精度和品質是一個永恆課題。

Renishaw 工業量測應用部門總監，Paul Maxed

問題

工具機在運作過程中會產生明顯的振動，而強烈的振動會對安裝在工具機上的封閉式光學尺產生不利影響，進而導致量測不精確。軸向位置量測精度可直接影響製程在各個方面的品質，比如特徵加工精度和表面粗糙度等。優化位置量測精度，減少振動的影響，可顯著提高生產品質。工具機振動的主要原因有：

1. 在某些情況下，切削過程中會產生刀具震顫。例如，當銑削硬質材料時，由於切削力度過大會發生工件或刀具偏移。

2. 加工材料的不均勻性和切削刀具上出現積屑瘤。由於加工難度突然增加而產生衝擊力，進而引起振動。

3. 在銑削中常見的間歇性切削會產生衝擊力，進而引起振動。

4. 由於旋轉品質不平衡，傳動機構的阻尼變化（如軸承磨損）或工件裝夾不牢而引起的干擾。

5. 工具機磨損或維護不善，切削刀具不合適，以及主軸轉速和進給率不當。

解決方案

Renishaw 憑藉本身在工具機領域的豐富經驗，與眾多大型工具機製造商和終端使用者建立了成功的合作關係。FORTiS™ 封閉式光學尺旨在解決關於工具機振動的已知問題，以及工具機振動對位置量測精度的影響。FORTiS 光學尺的三個設計特點相輔相成，可提高光學尺抗機械振動的穩固性，進一步防止高振幅擾動進入位置控制環：

1. 如圖 2a 所示，傳統的封閉式光學尺採用彈簧輪式滑架，可在讀頭本體沿柵尺移動時為其提供支撐。在任意給定的驅動頻率下，支撐讀頭的工具機導軌的振動幅度和相位 (V_g) 與固定在工具機安裝面上的光學尺柵尺和殼體的振動幅度和相位 (V_m) 不同；如圖 1 所示，這種振幅和相位響應差異必須由輪式滑架中的撓性彈片和聯軸器吸收。如圖 2b 所示，FORTiS 光學尺採用非接觸式設計，將讀頭本體與柵尺殼體有效分離。

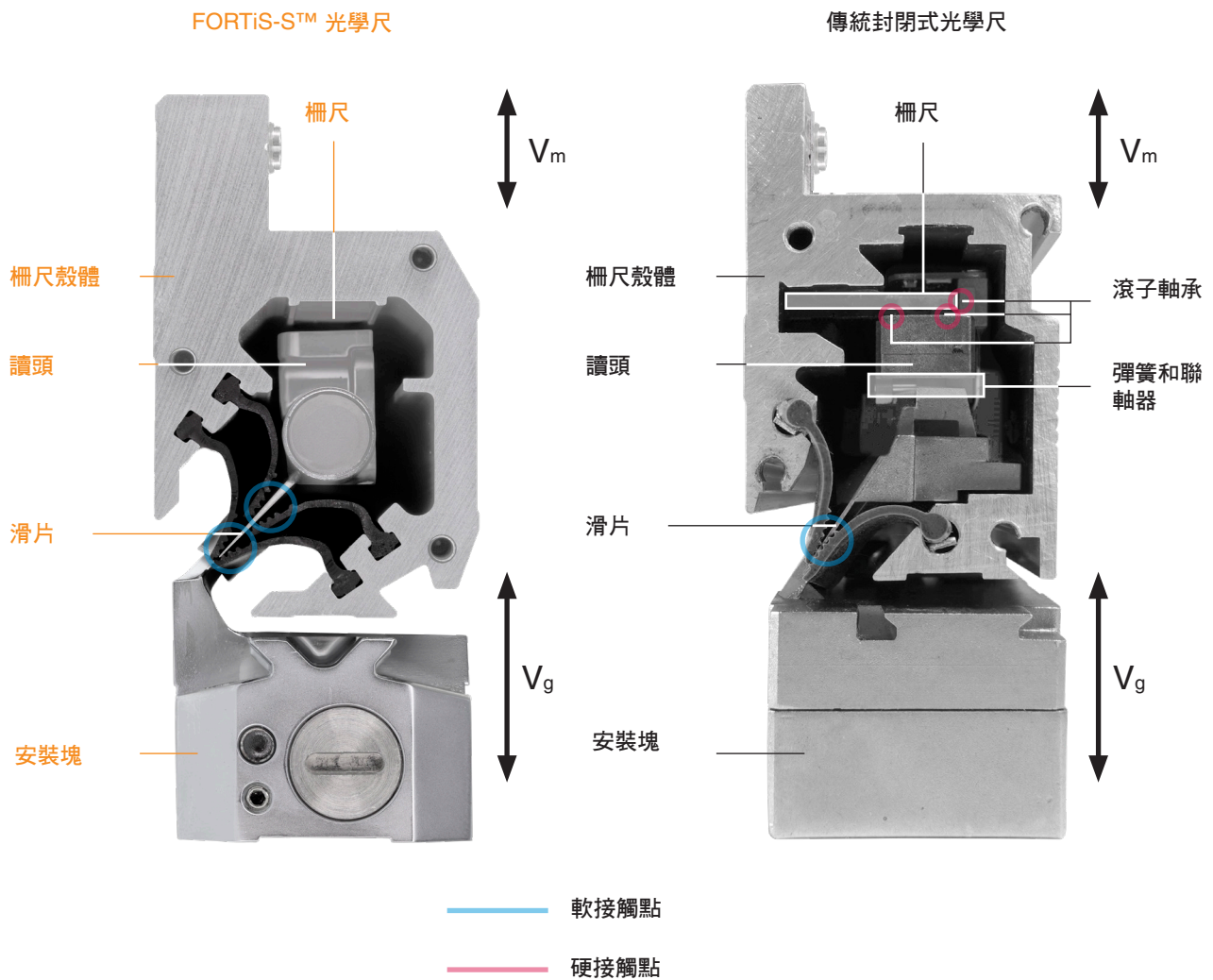


圖 1：FORTiS-S 光學尺和傳統封閉式光學尺的縱斷面

2. 傳統封閉式光學尺使用相對較重的玻璃柵尺，懸掛在柵尺殼體一側。為了避免因懸掛式柵尺的振動而在柵尺殼體內部產生非預期振盪，FORTiS 光學尺使用輕型鋼性尺，而且柵尺的全長均固定在其殼體內部。
3. FORTiS 光學尺的第三個阻尼設計特點是採用調諧品質阻尼技術。調諧品質阻尼器（TMD）是一種機械裝置，安裝在機械結構上的特定位置，可顯著抑制共振。FORTiS 光學尺使用兩個調諧品質阻尼器來抵消垂直軸和水平軸上的振動。

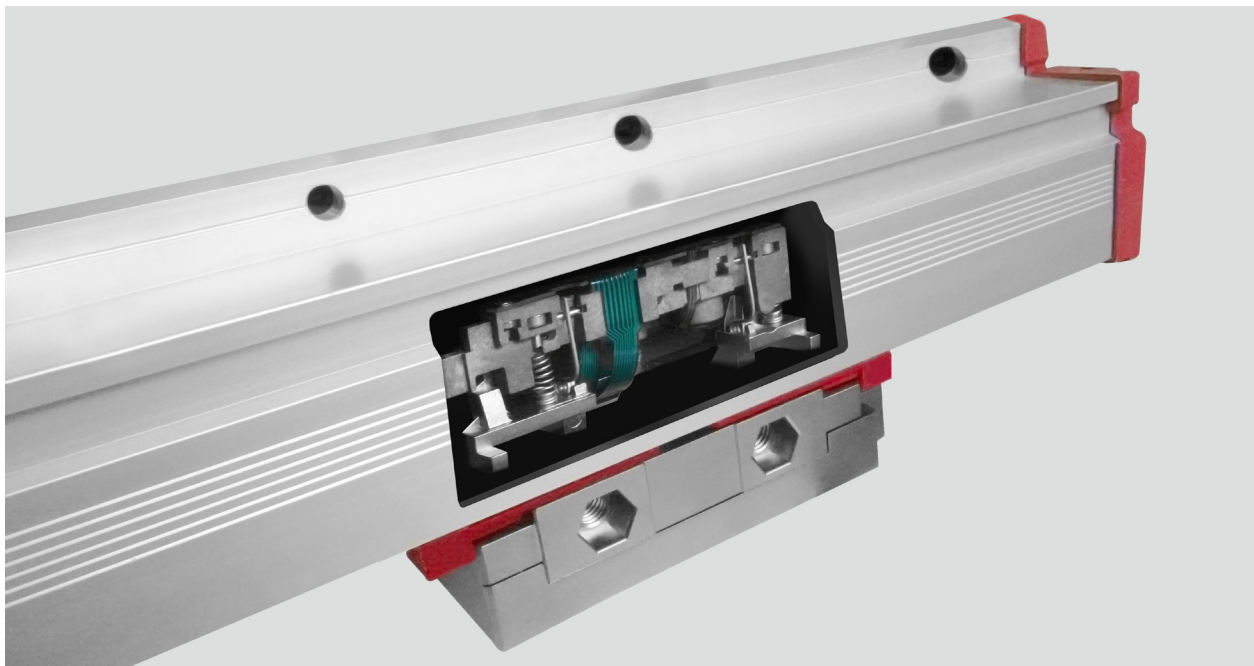


圖 2a：傳統封閉式光學尺的剖面圖，顯示了柵尺殼體內部的讀頭本體和用於支撐的輪式滑架。請注意，這種讀頭結構完全暴露於進入柵尺殼體內部的污染物。



圖 2b：FORTiS-S 封閉式光學尺的剖面圖，顯示了柵尺殼體內部的非接觸式密封型讀頭本體。

調諧品質阻尼技術簡介

調諧品質阻尼器廣泛應用於工程領域。在這些應用中，針對具有明確共振頻率的物體，必須減緩其機械振動。最著名的調諧品質阻尼器應用實例也許是建造超高層摩天大樓。例如，著名的台北 101 大樓使用大型調諧品質阻尼器，以減少大樓因強風或地震而產生的振動，如圖 3 所示。其他應用實例包括輸電線、飛機機翼、汽車曲軸、橋樑和 FORTiS 光學尺上安裝調諧品質阻尼器。

在 FORTiS 光學尺中，調諧品質阻尼器沿垂直（Z 軸）和水平（Y 軸）方向安裝在讀頭上。如圖 4 所示，FORTiS 光學尺中調諧品質阻尼器的基本設計是：安裝在阻尼器品質塊兩端柱栓上的兩個 O 形圈，阻尼器柱栓安裝在挖通的套筒內，以控制 O 形圈的壓縮。

得益於調諧品質阻尼器的巨大研發進步，在離安裝點最遠的讀頭（光學系統導軌）一端，FORTiS 光學尺的峰值加速度降低了 5.3 倍。



圖 3：台北 101 大樓內的調諧品質阻尼器系統

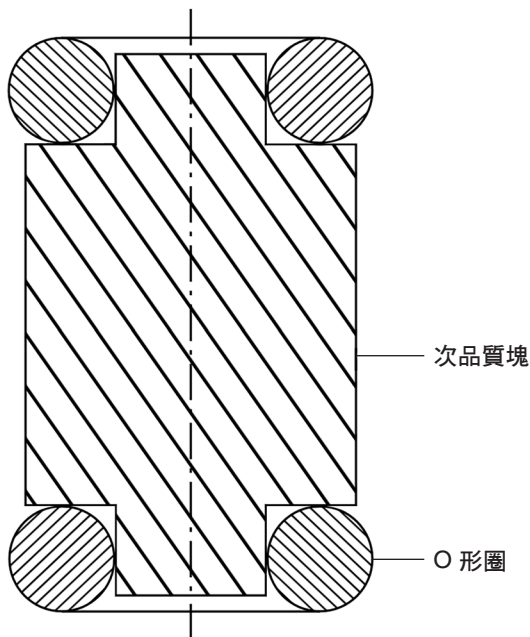


圖 4：專為 FORTiS 光學尺設計的調諧品質阻尼器（TMD）之垂直剖面，兩端均可見 O 形圈

調諧品質阻尼器的工作原理

本節介紹了用於一個自由度 (DoF) 系統的調諧品質阻尼器的基本原理。機械工程師和土木工程師經常會遇到這樣的問題，當系統因回應輸入激勵而產生高振幅振盪時，會發生共振。

如圖 5 所示，共振系統可以理解為一個受驅動的簡諧振盪器，例如剛性 (m) 彈簧上的品質塊 (k)。在這種情況下，應採用熟悉的簡諧運動方程式，其中 x 為靜態平衡下的線性位移。

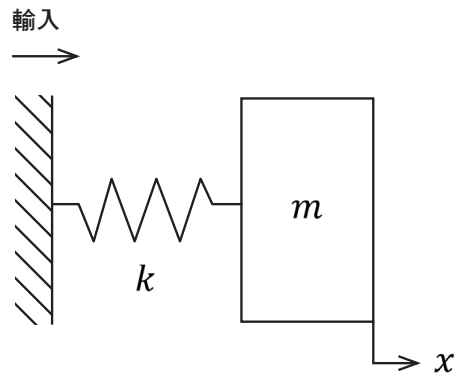


圖 5：具有 1 個自由度的品質塊 — 彈簧系統

方程式 1： $m\ddot{x} + kx = \text{input}$

方程式 1 表明，彈簧上的品質塊具有正弦回應的固有頻率，如方程式 2 所示：

方程式 2： $\text{frequency (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$

如圖 6 所示，如果某個系統輸入（力或位移）的頻率接近方程式 2 中的共振頻率，那麼將產生可能造成破壞性後果的巨大共振響應。

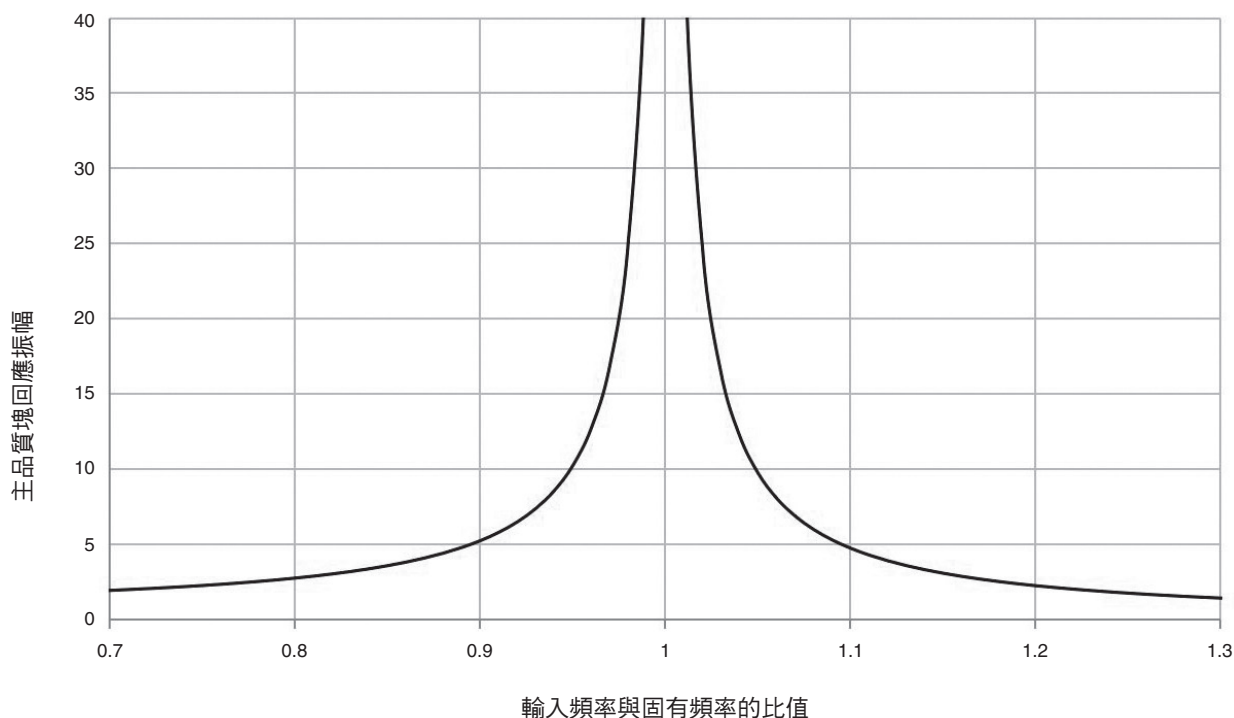


圖 6：彈簧上品質塊的共振回應

在許多情況下常用的一種策略是，增加機械阻尼裝置，並使系統的固有頻率偏離激勵頻率。

但是，這種方法有時並不可行。例如，鋼筋結構的摩天大樓會以其固有頻率晃動，而附近沒有任何東西可作為加固或阻尼的錨固點。在這種情況下，常用方法根本不可行，而可能的解決方法就是使用調諧品質阻尼器。

FORTiS 光學尺讀頭的重量由充當彈簧的滑片支撐，該滑片較薄，有利於增強密封嚴密性。除非在讀頭內部使用調諧品質阻尼器加以控制，否則外部的加工振動可能會引起不利的共振。

實際設計調諧品質阻尼器時需要精心研發；但是，它的基本概念源自於無阻尼品質塊 — 彈簧系統，及其在固有頻率下的共振問題。

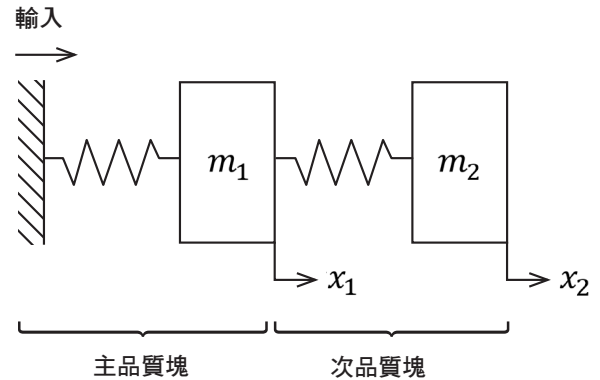


圖 7：具有 2 個自由度的品質塊 — 彈簧系統

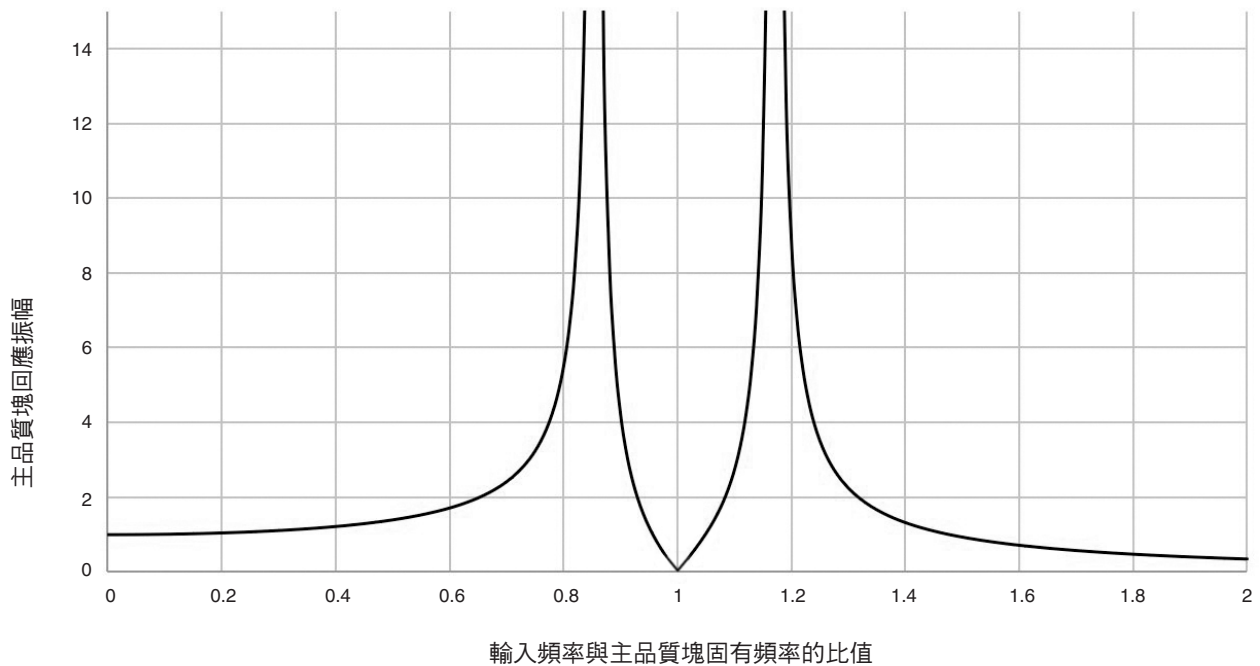


圖 8：具有 2 個自由度的無阻尼品質塊 — 彈簧系統的共振回應

假設相對較小的次品質塊 (m_2) 通過彈簧與主 (原始) 品質塊 (m_1) 耦合，使次品質塊具有相同的固有頻率。如圖 7 所示，整個系統現在可視為具有「兩個自由度」，導致原始共振峰一分為二。在第一個 (較低) 固有頻率下，兩個品質塊同向且同相運動；而在第二個固有頻率下，它們沿相反方向運動。

此外，當以原始固有頻率驅動時，主品質塊的振幅為零，而次品質塊產生有限振幅的振盪。這時，主品質塊的共振被抑制，但會產生兩個新的、不同頻率的無限共振，如圖 8 所示。

如果不加以控制，這些共振可能會導致破壞性後果。調諧品質阻尼器的主要優點在於，通過支撐次品質塊的彈簧上安裝的阻尼器，即可對這些共振進行局部控制，如圖 9 所示。

總而言之，調諧品質阻尼器具有三個可調整的基本設計參數：次品質塊與主品質塊的比值 (m_2/m_1)、次品質塊與主品質塊的固有頻率比值（調諧頻率），以及阻尼器的阻尼係數。

次品質塊具有實際限制，當次品質塊僅為主品質塊的 10% 時，可能會產生較好的結果。結果顯示，理想調諧頻率低於主品質塊共振頻率，具體低多少僅取決於品質比。最後，選擇次阻尼係數以盡可能降低兩個峰值回應，同時控制在其他所有頻率下的振幅回應。

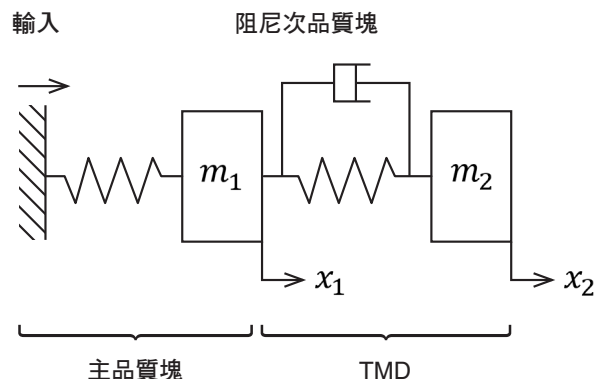


圖 9：具有 2 個自由度的調諧品質阻尼器系統

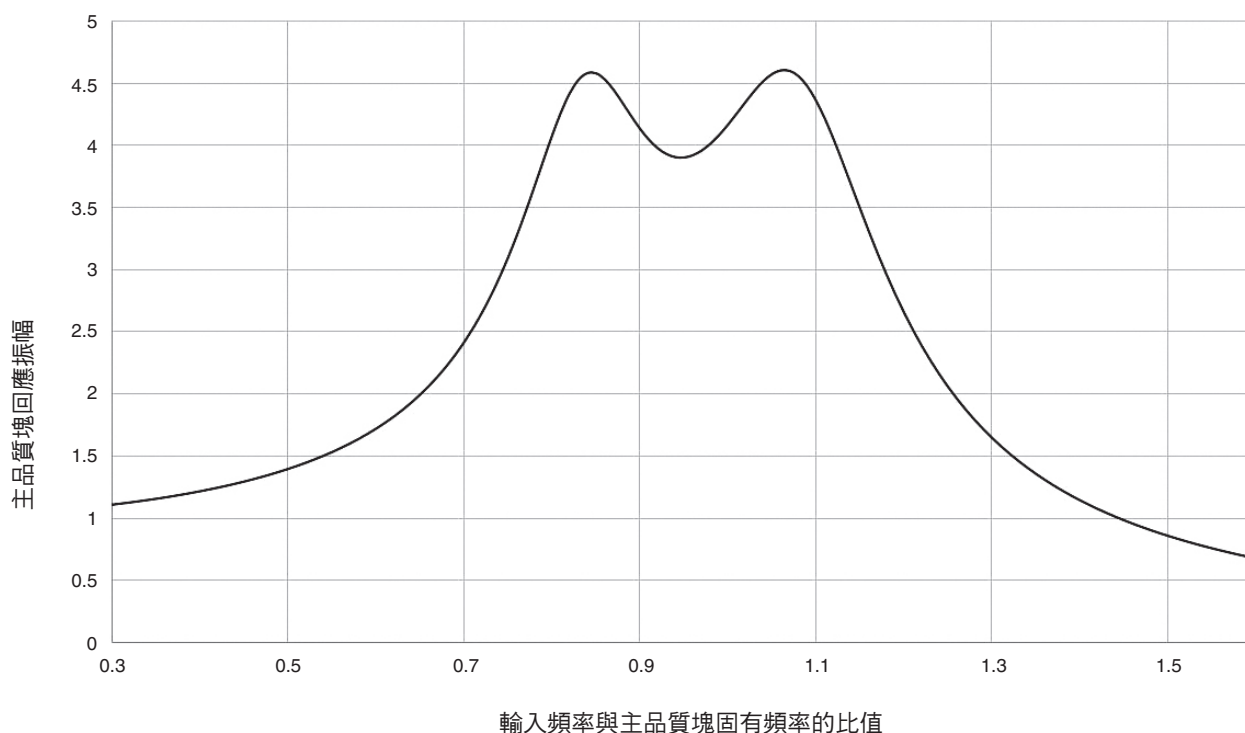


圖 10：假設品質比為 10%，將次品質塊的理想調諧頻率調整為原始共振頻率的 91%，並精心選擇阻尼器，那麼結果如圖所示。與圖 6 和圖 8 所示的無限回應相反，這時的主品質塊回應始終低於靜態條件下的 4.6 倍。

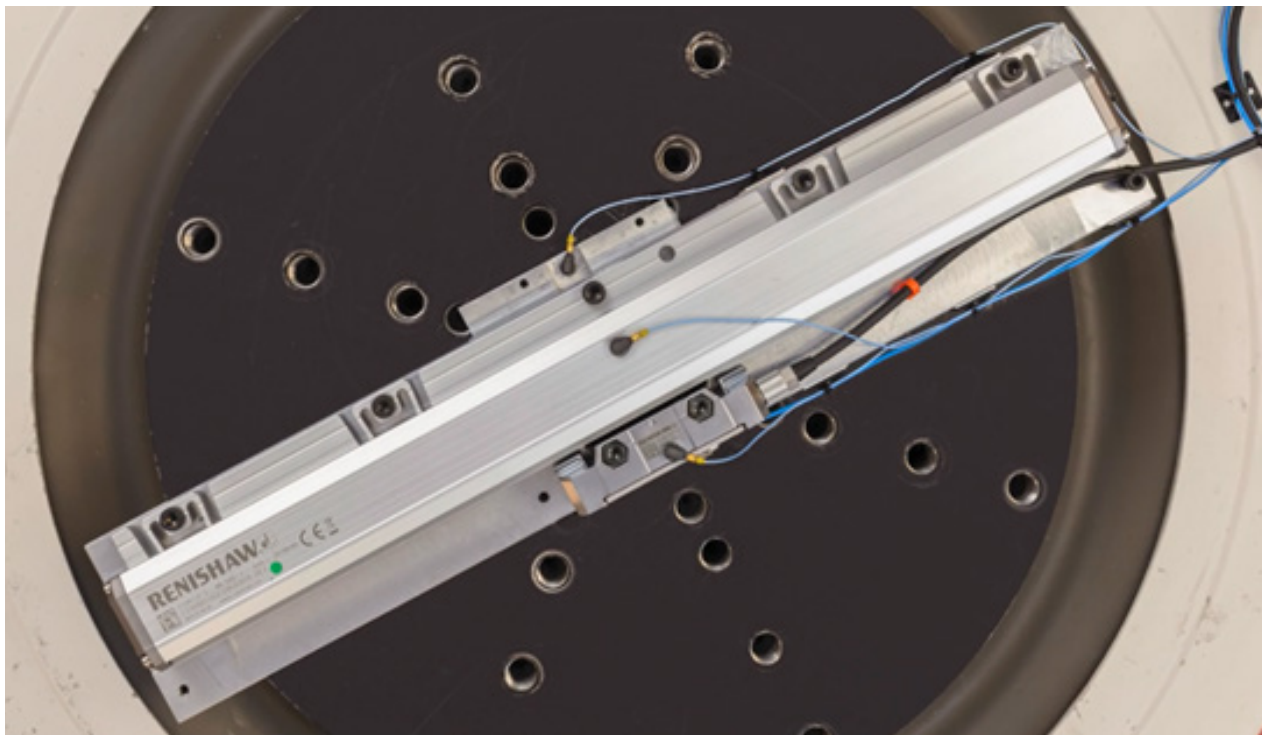
我們在設計調諧品質阻尼器時面臨的第一大挑戰就是，預測各種候選 O 形圈材料在動態條件下的特性。我需要使用這些資料進行類比測試，以選擇合適的橡膠硬度來分散頻率響應，使系統不易受到各部件尺寸變化的影響。

第二大挑戰是，定義所選材料的特性，以便進行有限元素分析。最後，我們需要優化和調整系統，並通過測試資料進行驗證。最終的設計在讀頭的共振頻率範圍內可產生最佳模態振型；調諧品質阻尼器的剩餘諧波回應，在不同振動水準下對整個系統也可產生有利影響。

FORTiS 資深機械設計工程師，Krys Jurczyk

振動測試：正弦振動測試

我們對 FORTiS 光學尺進行了測試，以量測絕對位置讀數相對於起始值的偏差。當暴露於頻率範圍為 50 Hz 至 2000 Hz 的正弦掃頻振動中時，分別在 1 g、3 g、5 g、10 g、15 g、20 g 和 25 g 的振動幅值下進行測試。在本白皮書中未介紹的其他測試中，在 30 g 至 75 g 的振動幅值範圍內也分別進行了測試。此外，在強烈的隨機振動下也進行了額外測試。



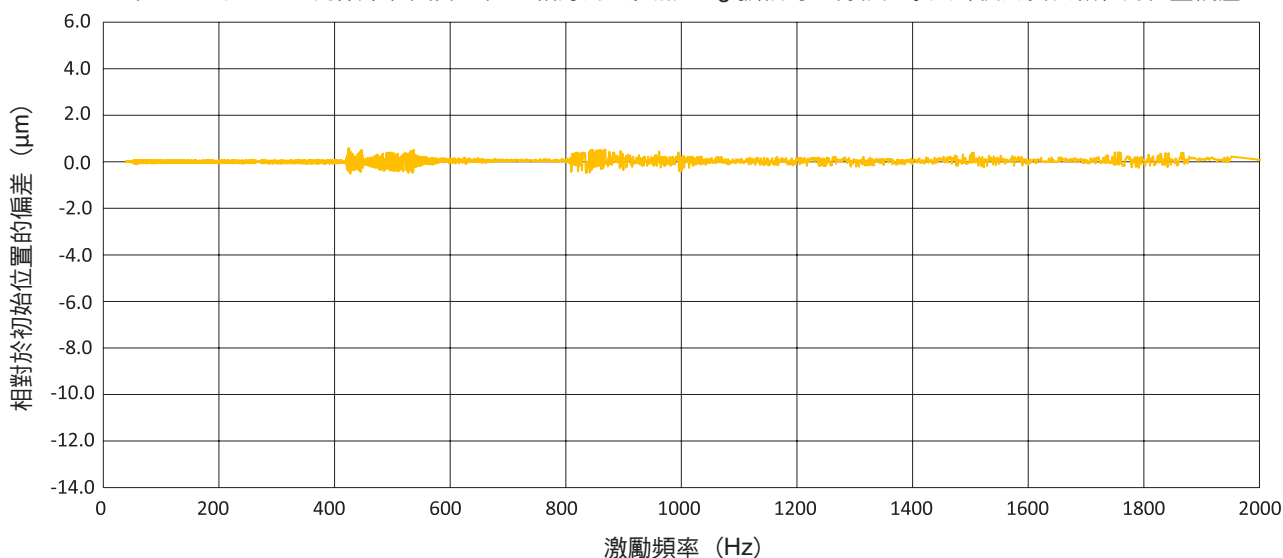
對直接安裝在基體上的 FORTiS-S 光學尺和 FORTiS-N™ 光學尺，以及固定在安裝板上的 FORTiS-N 光學尺進行了上述測試。FORTiS-N 光學尺採用與 FORTiS-S 光學尺相同的技術，但截面尺寸細窄，適合空間狹小應用。

為了進行比較，我們對具有同等尺寸、形狀和功能的競品傳統封閉式光學尺也進行了測試。

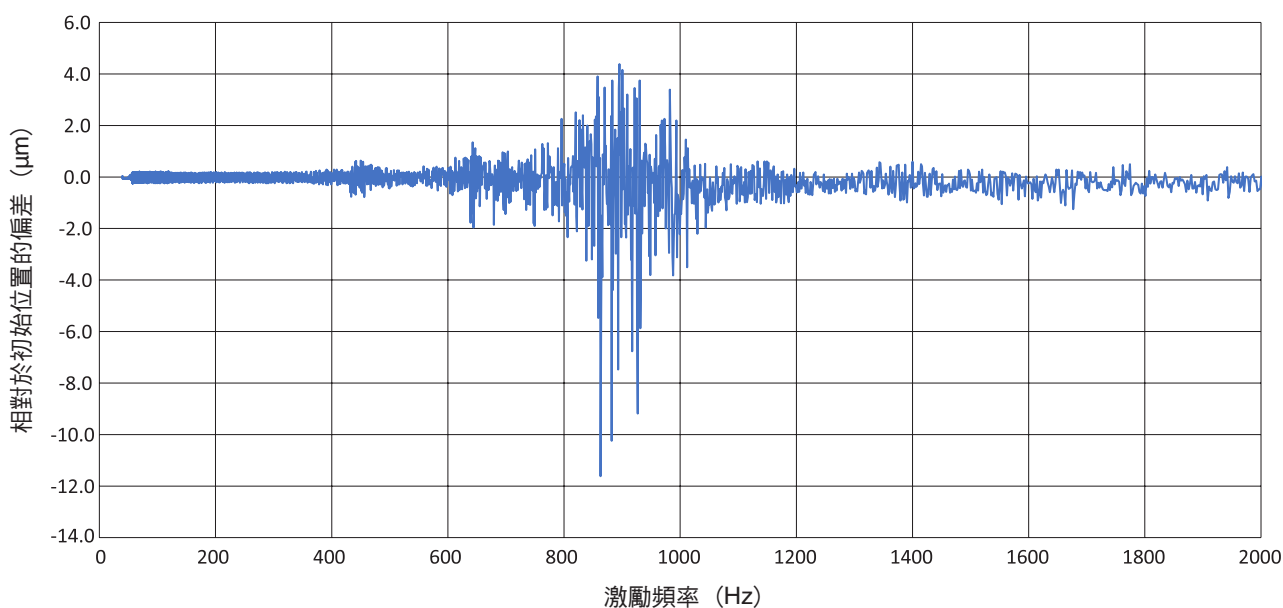
FORTiS-N 光學尺與競品（使用安裝板）

下方圖表顯示了 FORTiS-N 光學尺與競品傳統封閉式光學尺的位置偏差。在這兩項測試中，光學尺均安裝在安裝板上。正弦振動測試曲線的振動幅值為，在 Z 軸方向上（朝著柵尺）施加 15 g。

在 50 - 2,000 Hz 的頻率範圍內，在 Z 軸方向上施加 15 g 振幅時，傳統光學尺（使用安裝板）的位置偏差

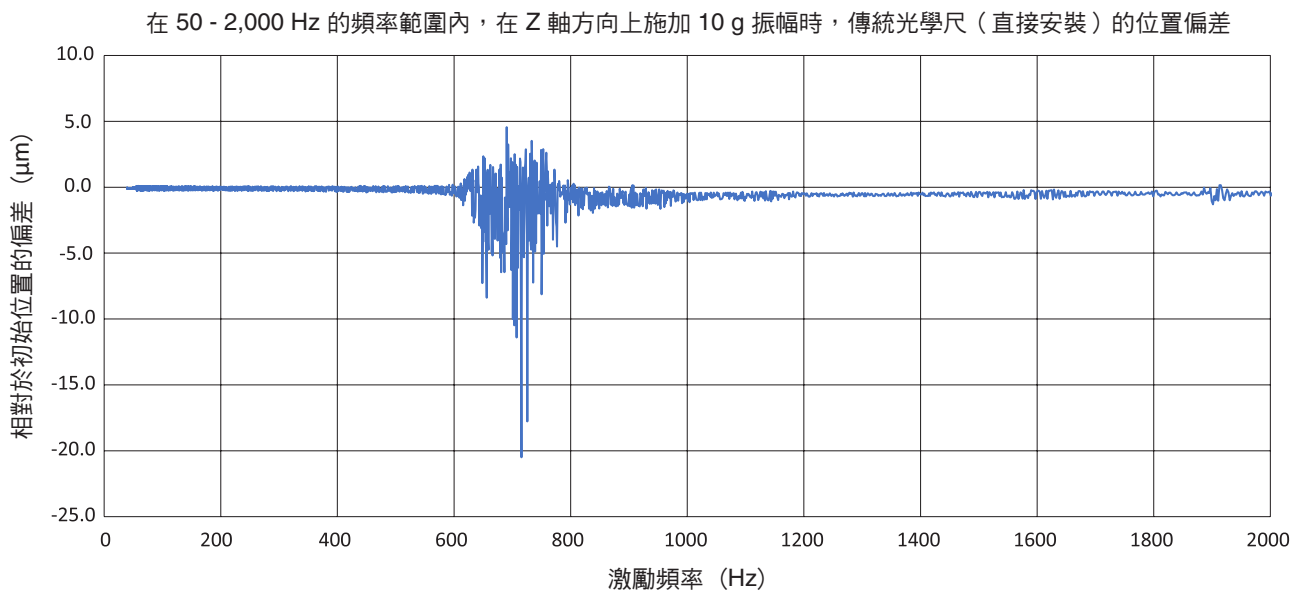
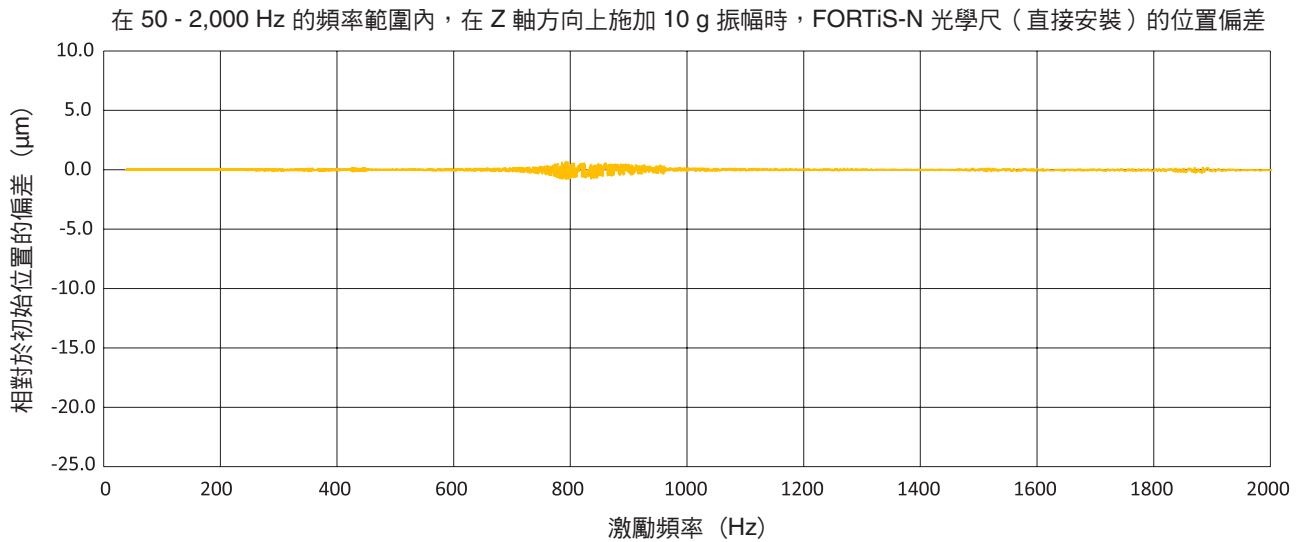


在 50 - 2,000 Hz 的頻率範圍內，在 Z 軸方向上施加 15 g 振幅時，FORTiS-N 光學尺（使用安裝板）的位置偏差

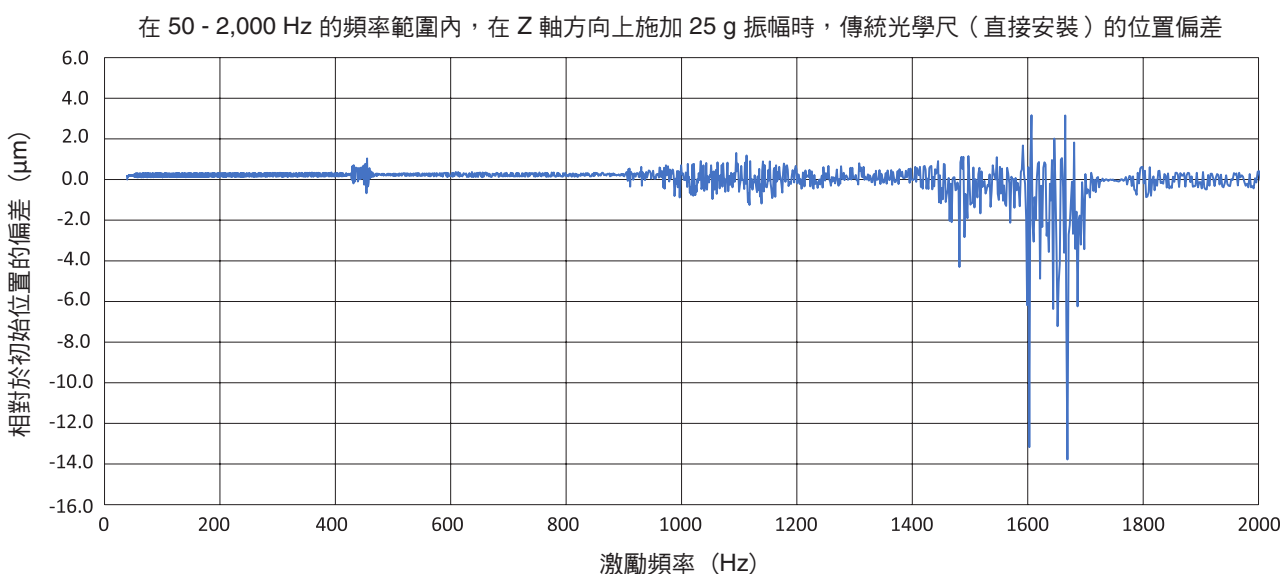
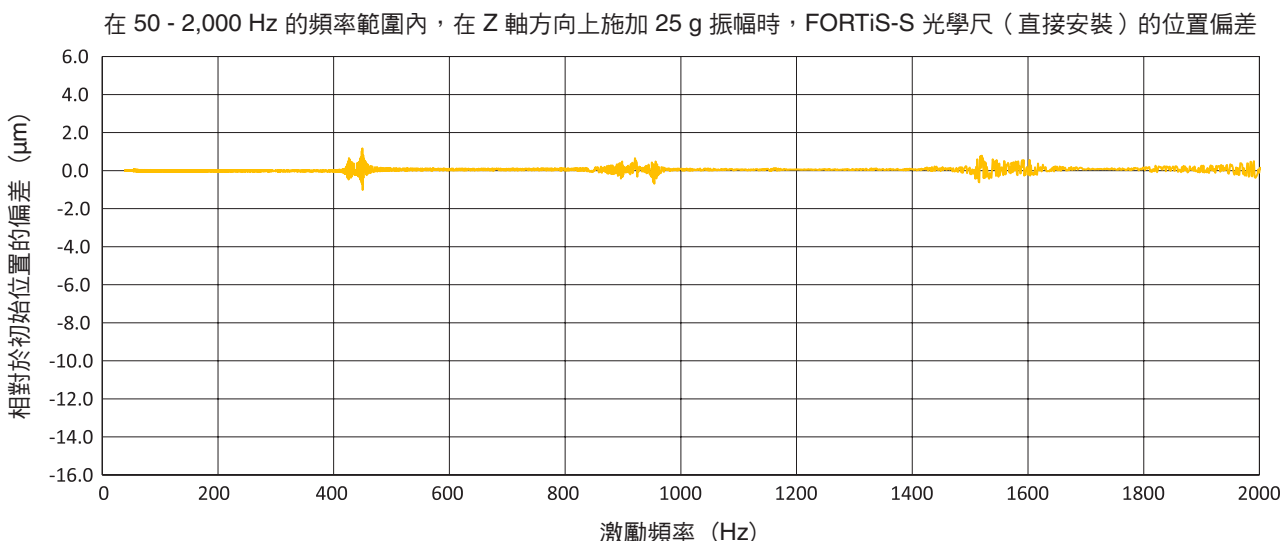


FORTiS-N 光學尺與競品（直接安裝）

第二組圖表顯示了 FORTiS-N 光學尺與競品傳統光學尺的位置偏差，但這兩款光學尺均直接安裝在基體（測試夾具）上。在這項測試中，在 Z 軸方向上施加 10 g 的振動幅值。



第三組圖表顯示了 FORTiS-S 光學尺與競品傳統光學尺的位置偏差。這些標準尺寸的光學尺均直接安裝在基體（測試夾具）上。在這項測試中，在 Z 軸方向上施加 25 g 的振動幅值。



結論

本白皮書中的測試結果證明，在 50 Hz 至 2000 Hz 的全頻譜範圍內，以各種振幅進行測試時，FORTiS 光學尺都具有良好的位置穩定性和可靠的運作性能。同時還證明，FORTiS 光學尺在高振動環境中具有較長的使用壽命。

經過與無調諧品質阻尼技術的傳統封閉式光學尺比較，結果表明 FORTiS 光學尺具有優異的抗振性。因此，FORTiS 光學尺具有優異的位置穩定性，在工具機應用中有助於改進製程控制。

www.renishaw.com.tw/fortis

#renishaw

+886 4 2460 3799

taiwan@renishaw.com

© 2023 Renishaw plc 保留所有權利。RENISHAW® 和測頭圖案是 Renishaw plc 的註冊商標。Renishaw 產品名、型號和「apply innovation」標識為 Renishaw plc 或其子公司的商標。其他品牌名、產品名或公司名為其各自所有者的商標。Renishaw plc 在英格蘭和威爾士註冊。公司編號：1106260。

註冊辦公地：New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。

在出版本文時，我們為核實本文的準確性作出了巨大努力，但在法律允許的範圍內，無論因何產生的所有擔保、條件、聲明和責任均被排除在外。

文件編號：PD-6517-9061-01-A