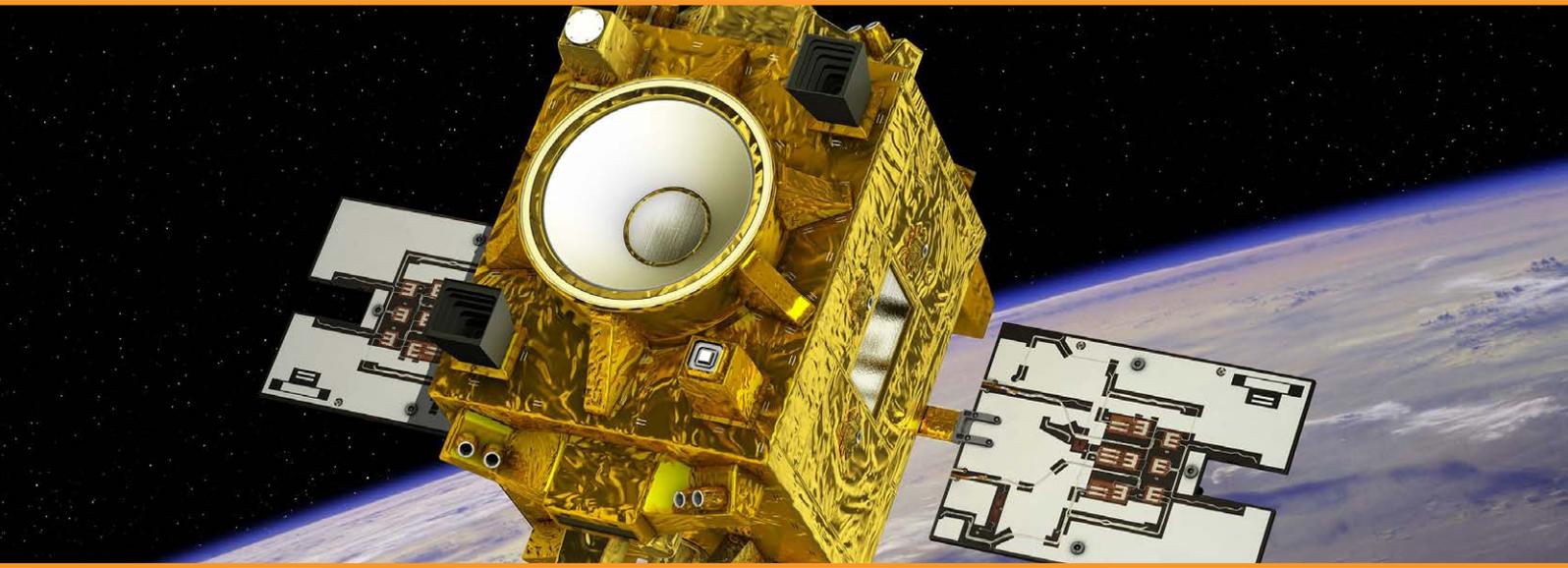


# 以工具機測頭協助太空研究



## 客戶：

德國國家計量研究院 (PTB)

## 產業：

科學、研究及分析

## 挑戰：

為世界太空任務 MICROSCOPE 製造圓柱形試驗質量塊，達到 2 $\mu$ m 至 3 $\mu$ m 的準確度。

## 解決方案：

使用 Renishaw OMP400 高精準測頭，在製程中提供重現性及準確的量測控制。

由於地球上最微小粒子的理論出現最新進展，部分物理學家目前正對慣性與重力質量的等效原理提出質疑。為了檢驗這些概念，布倫瑞克 (Braunschweig) 德國國家計量研究院 (PTB) 的生產專業人員開發出圓柱形試驗質量塊，可讓所有幾何特性達到 2 $\mu$ m 至 3 $\mu$ m 的準確度。能夠實現這項工程成果，要歸功於 Benzinger 高精準車床結合 Renishaw OMP400 測頭的量測解決方案。

對工程師而言，要生產出準確度 2 $\mu$ m 至 3 $\mu$ m 的元件在目前是相當有可能的。不過 PTB 表面計量工作小組的專案主管及經理 Daniel Hagedorn 博士認為技術上仍有所限制：「我們現在擁有的工具機可輕易在一或兩個方向達成 2 $\mu$ m 至 3 $\mu$ m 的定位準確度。不過試驗質量塊需要在所有三個維度達到如此高的精準度，而且不僅是個別位置，還要涵蓋平面、圓柱表面及角度。」

PTB 接受委託，為 MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) 生產 10 個圓柱形試驗質量塊；MICROSCOPE 是由法國政府太空機構 CNES 運作的 300kg 迷你衛星。

MICROSCOPE 將與包含歐洲太空總署在內的其他合作夥伴，試驗等效原理的普遍性。每個圓柱形質量塊約 80mm 長，其中大型圓柱體的外徑為 70mm，小型的則只有 35mm。

圓柱體以鉑銻 (PtRh10) 及鈦鋁鈦合金 (TiAl4V6) 製造，以同心方式置於差分加速計之中進行試驗。這種配置可確保兩個圓柱體的轉動慣量位於相同軸。PtRh10 圓柱體作為參考，另一個採用不同材料製造的圓柱體，則接受加速度量測，驗證在量測準確度 10-15 $\mu$ m 的情況下，重力及慣性質量的等效原理是否仍然有效。

根據我們的規劃，可以讓所有特性達到  $\pm 1\mu$ m 的準確度。高精準加工扮演關鍵角色，影響科學家是否需要重新思考過去認同的物理定律。Renishaw OMP400 測頭的準確度及可靠度，是我們成功的關鍵因素。

德國國家計量研究院 (德國)



成功的專案團隊 (由左至右)：布倫瑞克 PTB 科學儀器設計部門的 Stephan Metschke、Daniel Hagedorn 博士及 Heinz-Peter Heyne，以及 Renishaw 的區域銷售經理 Shahram Essam

## 從頭到尾都以不中斷的單一製程製造

製造符合所需準確度的試驗質量塊，是非常大的挑戰。工程師在開始製造之前，需要針對手邊作業將加工刀具最佳化。其中鉑鎢合金工件若使用傳統刀具加工，特別容易發生個別晶粒破裂的情形，造成表面無法用於預定用途。以特殊方式磨蝕的鑽石刀具，可在加工高度粗糙表面時提供可靠的解決方案，達到  $0.2\mu\text{m}$  以下的準確度。

不過科學儀器設計團隊的 Heinz-Peter Heyne 與 Stephan Metschke 很快發現，只有在整個生產製程以單一步驟完成，不必移除及重新定位工件的情況下，才可能達成所需精準度。因此中空圓柱體於 Benzinger 的高精準 TNI Preciline 車床進行加工。個別尺寸於生產步驟之間在機上量測，不必移除及重新定位工件。儘管使用高精準夾持裝置，以及團隊謹慎仔細的作業，在多次嘗試後，仍然明顯出現高達  $0.01\text{mm}$  的偏差。

為了完成整個製程，使其達到所需準確度，PTB 專業人員需要將高精準量測直接整合至加工製程中。其中的關鍵目標，是消除加工與量測期間共同起始點造成的不確定性及不正確性。為了達成此項目標，Hagedorn 博士測試不同製造商的多項工業量測解決方案。

他著重於比較及評估車床工作區域量測結果的準確度與重現性。他表示：「我們最後做出結論，認為只有像 Renishaw OMP400 高精準測頭這樣的解決方案，才能達到標準。」

## OMP400 測頭在驗證後達到 $1\mu\text{m}$ 的準確度

OMP400 測頭使用以應變電感技術為基礎的量測系統。測頭能夠回應最輕的接觸力量，不受回座力影響，並盡可能減少量測

應用常見的遲滯現象，因此可輕鬆達到  $5\mu\text{m}$  以下的準確度。特殊量測程序可避免測頭與表面接觸過快造成的不準確情形。若軟體偵測到測頭震動造成干擾，就會停止接觸，或避免記錄量測值。Heinz-Peter Heyne 瞭解只有以適當速度接近量測位置，才能獲得可靠的量測結果。他將此項技術與其他措施結合，能夠可靠維持測頭重現性在  $1\mu\text{m}$  以內。

測頭以無線光學方式傳輸記錄的量測資料，送往車床工作區域的接收器。CNC 控制系統透過介面接收此項資訊，用於控制及調整持續進行的量測程序。此外，PTB 團隊已開發特殊的軟體解決方案，可將量測值傳輸至伺服器，以便進行評估與記錄。

PTB 專業人員應用複雜的驗證程序，檢查 OMP400 測頭及高精準車床解決方案的結果。在加工幾個輪廓之後，他們在機台本身及三次元量床上量測結果。此外也使用在加工機上的測頭及外部三次元量床上，量測校正後的參考工件。團隊比較所有的量測結果，取得補償資料。在工作區域使用 OMP400 執行量測及加工輪廓時，將利用此資料更新高精準車床的 CNC 控制系統。

比較多個工件量測結果與三次元量床的量測結果後，證實若以這種方式校正測頭，並於加工程序期間在車床量測程序應用補償資料 (現場、製程中量測)，就可能達到  $1\mu\text{m}$  以內的量測準確度。

若要量測圓度及直徑，測頭可記錄 30 個以上圓形量測點的資料。圓柱度以類似模式量測，以圓柱體全長的五個環狀量測結果為依據。在圓柱體正面量測六個球狀凹陷特別困難。圓柱體置於差分加速計之中時，這些凹陷設計作為軸承點。球狀凹陷的最大直徑僅  $1.2\text{mm}$ ，Heinz-Peter Heyne 開發出特殊的矽陶瓷測頭測針量測這些壓痕點，可量測僅  $0.3\text{mm}$  的大小。

## 以反覆設計搭配多個加工步驟達成 $\pm 1\mu\text{m}$ 的準確度

Heinz-Peter Heyne 製造多個工件進行試驗及比較後，使用反覆程序以 Pt-Rh 及 TiAl4V6 製造最終的試驗質量塊。他以多項步驟在高精準車床加工工件外徑，使其超過尺寸約 0.01mm，然後在使用 OMP400 進行及記錄量測結果後，將元件加工至最終尺寸。Hagedorn 博士自豪的表示這項方法第一次就成功。他最後表示：「如同我們的規劃，可以讓所有特性達到  $\pm 1\mu\text{m}$  的準確度。

Renishaw OMP400 測頭的準確度及可靠度，是成功的關鍵因素。由於光是所需的鉑銨原料量，就要花費數萬歐元，我們對這樣的結果非常滿意。」

## 等效原理

早在 1636 年，自然科學家伽利略 (Galileo Galilei) 宣稱慣性及重力質量一定相等。目前我們視為真理的所有物理學概念，幾乎都以這項理論作為基礎，包括愛因斯坦的相對論在內。

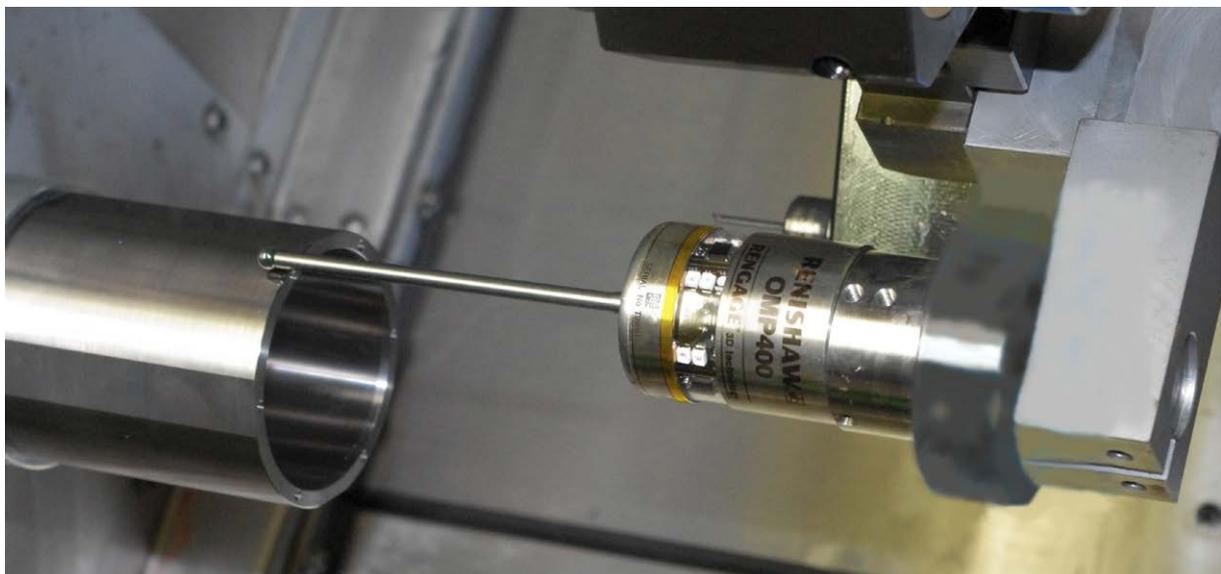
這項理論表示質量一定會以相同方式回應，不論在質量作用的是重力或加速力。簡單來說：在真空 (消除空氣阻抗效應) 環境下，一塊鉛和一根羽毛從開始加速到掉落地面的時間相同。

不過根據地球最小粒子的最新研究顯示，如果在低於  $10\text{-}12\mu\text{m}$  的高準確度情況下量測，等效原理就可能不再適用。歐盟的 MICROSCOPE 世界太空任務的目標就是釐清以上問題。在遠離「塵世」干擾影響的環境下，將兩個以不同密度材料製造，且具備已知精確尺寸的質量，投入零重力、高真空的太空環境中。高精準加速計將量測質量反應。布倫瑞克的 PTB 為此實驗製造圓柱形質量塊。

由於製造期間在尺寸、均勻度、圓柱度、平行度及所有圓柱體鄰接表面的傾斜度方面，都達到  $1\mu\text{m}$  至  $2\mu\text{m}$  的高精準度，因此質量塊尺寸的準確度高達  $10\text{-}15\mu\text{m}$ 。這樣太空實驗室的物理學家，就能以如此卓越的準確度，量測不同圓柱體對加速力的反應。如果他們發現反應出現不一樣的情形，這項實驗可能掀起固態物理學的思想革命。



MICROSCOPE 世界太空任務的量測圓柱體達到  $1\mu\text{m}$  的準確度。



OMP400 測頭使用特殊量測程序，量測試驗質量塊內外表面的真圓度及圓柱度。

如需更多資訊，請前往 [www.renishaw.com.tw/ptb](http://www.renishaw.com.tw/ptb)

---

**Renishaw Taiwan Inc**  
40852台中市南屯區  
精科七路2號2樓

**T** +886 4 2460 3799  
**F** +886 4 2460 3798  
**E** taiwan@renishaw.com  
[www.renishaw.com.tw](http://www.renishaw.com.tw)

有關全球聯繫之相關資訊，請上網站 [www.renishaw.com.tw/contact](http://www.renishaw.com.tw/contact)。

RENISHAW 竭力確保在發佈日期時，此份文件內容之準確性及可靠性，但對文件內容之準確性及可靠性將不做任何擔保。RENISHAW 概不會就此文件內容之任何不正確或遺漏所引致之任何損失或損害承擔任何法律責任。

© 2017 Renishaw plc。保留所有權利。

Renishaw 保留更改產品規格之權利，恕不另行通知。

**RENISHAW** 及 **RENISHAW** 公司徽標中的測頭符號是 Renishaw 公司在英國及其他國家或地區的註冊商標。**apply innovation**，及其他 Renishaw 產品和技術的名稱與命名是 Renishaw plc 及旗下子公司的商標。

本文中使用的所有其他品牌名稱和產品名稱為各自所有者的商品名稱、服務標誌、商標或註冊商標。



H - 5650 - 4062 - 01

文件訂貨號: H-5650-4062-01-A  
版本: 12.2017