

超精密加工技術

Ultra-Precision Machining Technology

許巍耀、郭慶祥、陳峰志

Wei-Yao Hsu, Ching-Hsiang Kuo, Fong-Zhi Chen

為配合國內光電產業之蓬勃發展，儀器科技研究中心在既有之傳統光學加工與精密光機元件、微光學元件以及非球面光學元件之加工與檢測技術能量上，於 94 年度引進五軸超精密鑽石車削輪磨機，以擴展完整的光學工程技術陣容，滿足多樣性之研發需求。本設備可進行單點鑽石車削與超精密輪磨，除了軸對稱之光學元件與模仁加工外，亦可進行自由曲面加工。而在超精密加工技術領域中最基本的就是加工設備，其次才是配合的加工技術。因此，本文針對超精密加工設備，以及單點鑽石車削與超精密輪磨技術分別介紹說明。

Instrument Technology Research Center (ITRC) has devoted to limited and diversified ultra-precision components fabrication for more than 30 years, and established various aspheric optics fabrication units, precision centering machines, and micro lens and diffractive optical element (DOE) machining devices in the past years. To match up the massive growth of the optical industrial in Taiwan, ITRC introduced a new 5-axis ultra-precision machine in 2005. This machine has both single point diamond turning (SPDT) and ultra-precision grinding capability, and could fabricate both rotational symmetric and 3D freeform components. This article is focused on the ultra-precision machine technology, and SPDT and ultra-precision grinding technologies.

一、前言

超精密加工技術是在追求形狀精度 (form accuracy)、表面粗糙度 (surface roughness) 與尺寸精度的技術。隨著加工機具的開發與電腦控制技術的進步，加工精度也不斷的提昇。谷口紀男 (Taniguchi) 在 1980 年代即整理出有關超精密加工精度進展與預測，如圖 1 所示⁽¹⁾。所謂「超精密加工技術」是利用當時最好機具與技藝所能達到的最佳精度的技術。因此，加工精度主要受限於機具精

度，而機器精度進步的原動力來自於人類消費產品的功能需求。為得到優良且可靠的產品功能，最重要的是提昇產品組件的精度。近二十多年來，超精密加工技術主要應用在開發高精度光學元件，如：雷射干涉系統、光碟機的讀取透鏡 (pick up lens)、望遠鏡、X 光用反射鏡、影印機與印表機用的 $f-\theta$ 鏡面、數位相機或手機相機的光學鏡頭、顯示器背光模組、燈源裝置…等；而機械應用元件則有精密軸承、影帶磁頭、電腦硬碟、光纖固定與連接裝置、高精度射出或模造用模具…等。光電產業是目

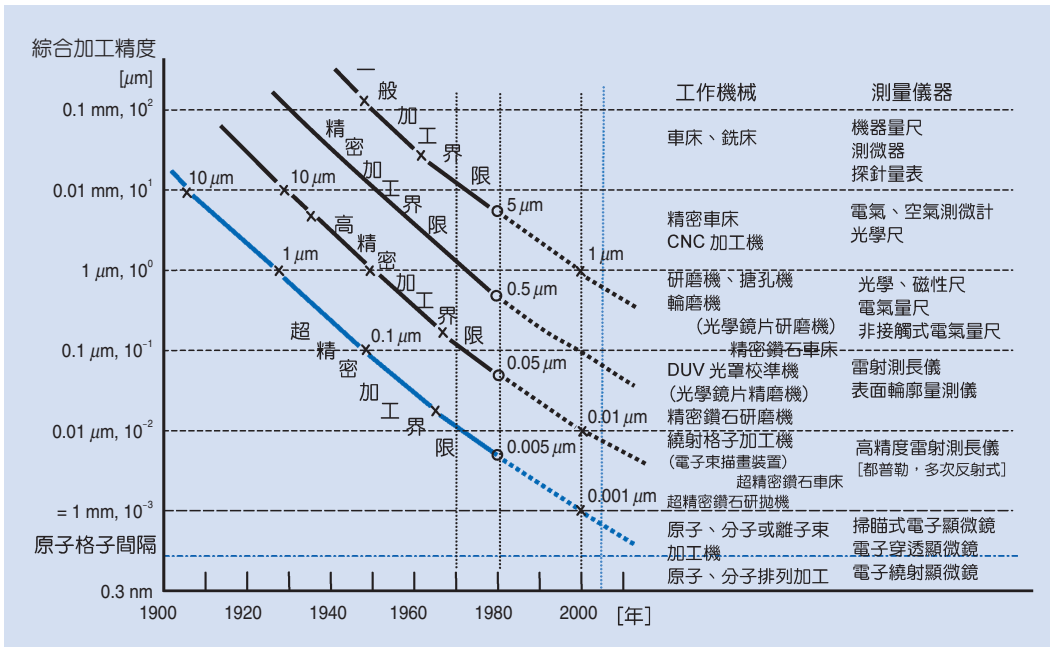


圖 1. 加工精度進展。

前台灣最為蓬勃發展的產業之一，以數位相機為例，為提昇成像品質與滿足輕薄短小的產業需求，高精度的非球面鏡已是不可或缺的重要光學元件。因為經過適當的光學設計，非球面鏡不只可以消除像差，並可減少光學系統的鏡片數量。目前利用超精密鑽石車削與輪磨技術，形狀精度與表面粗糙度分別可以達到 $0.1 \mu\text{m}$ 與 $0.005 \mu\text{m}$ (5 nm) 以內。

上述元件所使用的材料有塑膠、金屬、玻璃、陶瓷、石英等。以延性材料而言，若材料本身在加工過程不會與鑽石材料產生化學磨耗，則可使用鑽石車削加工來製作。因為鑽石具有高硬度、高熱傳導係數、低摩擦係數、低膨脹係數等特性，可以製成高刀刃銳利度的刀具，因此使用鑽石車刀可製作出形狀精度與表面精度俱佳的元件。鑽石可切削的材料有鋁、銅、金、銀、鉛、鍺、無電解鍍等非鐵系材料與各種塑膠⁽²⁾。硬脆材料則需以輪磨方式加工。本文針對超精密加工設備、單點鑽石車削技術與超精密輪磨技術分段說明。

二、超精密加工設備

加工機器主要由主軸系統 (spindle system)、進給系統 (feeding system) 與床台系統 (machine base)

構成；若要提昇機器加工精度，則需搭配高精度位置感測器 (displacement sensor)、高階 CNC (computer numerical control) 控制器。

主軸系統由軸承與驅動單元構成，主軸軸承又分為氣靜壓軸承與液靜壓軸承，驅動系統則可分為皮帶傳動式、齒輪傳動式與馬達直接驅動式。以工件主軸而言，工作轉速約在 $3,000 \text{ rpm}$ 以內，在高精度加工的應用場合，工件主軸大多採用液靜壓軸承並配合馬達直接驅動心軸，近年來為提昇機器加工彈性，已有部分工件主軸系統整合伺服馬達與角度編碼器 (rotary encoder)，使其具有 C 軸加工能力。採用液靜壓軸承，可使主軸具有較佳的剛性與運動精度。但在刀具主軸 (輪磨主軸、微銑削主軸) 加工應用方面，因需要高達 $10,000 \text{ rpm}$ 以上的工作轉速，所以大多採用氣靜壓軸承。

進給系統由拘束導軌與驅動系統構成。拘束導軌的主要功能是讓運動平台在固定的方向運動。超精密加工機之導軌必須具有低摩擦、動作平滑、運動精度佳、剛性高、振動小與低發熱量等特性。導軌的軸承種類可分為滑動軸承、滾動軸承、氣靜壓軸承與液靜壓軸承。一般而言，非接觸式的軸承具有低摩擦、運動平滑性與抑振特性，其中液靜壓軸承剛性較佳，因此超精密加工機的導軌大多採用液

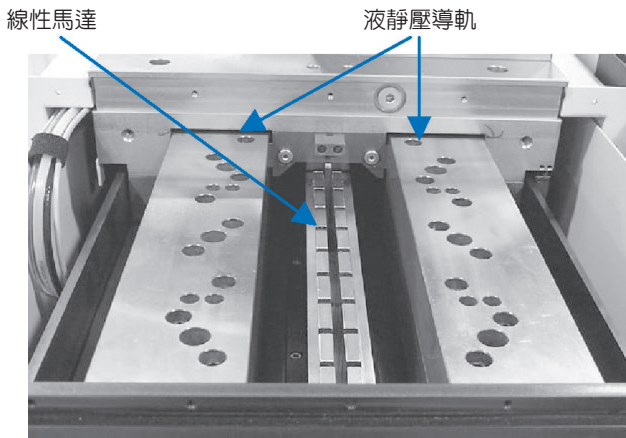


圖 2. 線性馬達與液靜壓導軌。

靜壓軸承。進給系統的驅動方式可分為：螺桿驅動、滾珠螺桿驅動、線性馬達驅動、油壓螺桿驅動與摩擦驅動等。螺桿驅動系統包括驅動馬達、聯軸器 (coupling)、螺桿／螺帽與支撐軸承等，因為這些元件都在驅動力迴路上，會使得驅動系統的剛性下降，在運動過程中軸向與扭轉變形皆會影響進給系統的運動精度與響應頻寬。近年來，隨著線性馬達 (linear motor) 技術逐漸成熟，多數的超精密加工機皆採用線性馬達，因為線性馬達具有高響應頻寬、低摩擦力、無傳動元件等特性。承上所述，目前超精密加工機的進給系統大多為封閉型結構液靜壓軸承與線性馬達的結合 (如圖 2)。

進給系統在運動方向的定位精度主要是由位置感測器決定。雷射光學尺是目前精度最高的一種位置感測器，其技術是利用光柵干涉的原理，使光學尺移動時，尺上的繞射光柵令反射的雷射光束在其讀取頭內產生相位變化⁽³⁾，半導體雷射光束經過偏光分光鏡 (polarizing beam splitter) 後分成兩道光束分別通過光學尺的繞射光柵，經過繞射的兩道雷射光束會彼此干涉，並因光學尺移動而產生明暗變化的干涉條紋，最後經由電子訊號的轉換與運算即可得到光學尺的位移量。雷射光學尺的優點是：(1) 不受其他方向的運動誤差以及雷射光源波長變化的影響，可提昇量測精度；(2) 雷射光束不需涵蓋量測行程，因此可降低環境溫度變化與空氣擾動影響，進而降低雷射光學尺的不確定性；(3) 光學尺採用低膨脹係數的 Zerodur 玻璃材料，並以因鋼

(Invar) 為安裝基座 (如圖 3)，可降低溫度變化影響，提昇雷射光學尺的量測精度。目前已有廠商推出解析度高達 0.07 nm 的雷射光學尺⁽³⁾，這對目前超精密加工機而言已相當足夠。

超精密加工機的床台最為常見的材料為天然花崗岩 (natural granite) 與人造環氧樹脂花崗岩 (epoxy granite)。其中因為天然花崗岩具有較低的熱膨脹係數且熱不均勻所產生的應力也較小，在長時間使用時，仍能保持穩定性與導軌的直線性 (straightness)。為了隔絕來自地板的震動，腳座部分可使用防震膠墊，另可在腳座與花崗岩床台間裝設氣壓式隔震組。

CNC 控制器也是超精密加工機不可缺少的部分，工具機使用的 CNC 控制器伺服迴路 (servo loop) 是結合速度迴路與位置迴路，而速度迴路與位置迴路的伺服參數決定了伺服控制系統動態響應速度或伺服頻寬 (bandwidth)。當然，機器的伺服頻寬越高則機器就可以具有較少輪廓誤差 (contouring error)，但為確保機器運動的穩定性，各軸的伺服頻寬受限於機器各軸機械結構的第一共振頻率 (first resonance frequency)。因此，就伺服控制穩定的觀點來說，機器的結構須具備高剛性與高阻尼 (high damping) 特性。為解決伺服延遲所造成的運動輪廓誤差，現代的 CNC 控制器具有前饋控制 (feedforward control) 功能，而針對已知的機器數控碼亦有預視功能 (look ahead) 與加減速規劃

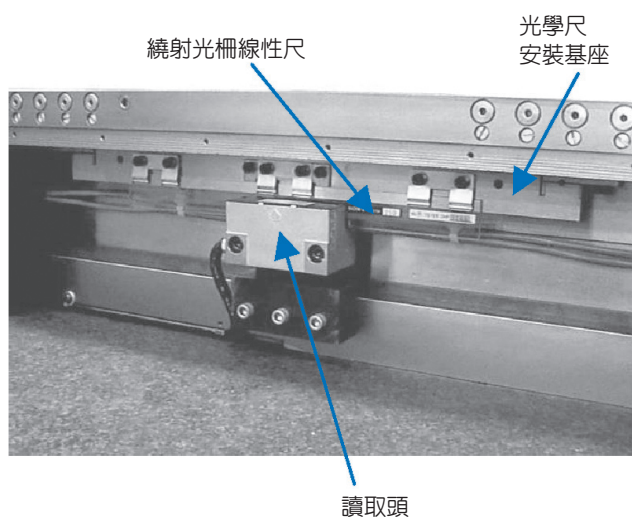


圖 3. 雷射線性光學尺。

(ACC/DEC planning) 功能，部分控制器廠商針對曲線運動控制亦推出 NURBS 插補功能的高階 CNC 控制器。加減速規劃功能，可使機器在已知的運動路徑上作適當的速度規劃，以減少機器在運動速度突然改變所造成的振動，進而提昇加工表面精度。

三、單點鑽石車削技術

所謂單點鑽石切削是指在精車削時，用極小的鑽石車刀刀尖與工件表面接觸進行切削。鑽石具有高硬度、低摩擦係數、低熱膨脹係數等特點，製成高尖銳度的車刀進行切削時，高硬度特性可維持其切削性，而低摩擦係數與熱膨脹係數使切削過程具有較低的發熱量與較小的熱膨脹。另外，單點切削是極小量的切削，切削力相對也非常小，故不易產生切削振動，且工件在切削過程的變形量也可以獲得良好的掌握。因此單點鑽石車削具有相當良好的加工精度，目前單點鑽石車削的表面粗糙度 (R_a) 可達 5 nm 以內，而形狀精度 (peak to valley, PV) 可達 0.1 μm 。

當然，並不是所有的材料都能進行鑽石車削，所謂可鑽石車削材料，係指在車削過程中不會與鑽石刀具產生化學反應的材料。換言之，會造成鑽石刀具化學磨耗的材料就不算是可鑽石車削材料。目前最常使用的鑽石車削的材料有：鋁 (Al)、銅 (Cu)、金 (Au)、銀 (Ag)、鉛 (Pb)、鍺 (Ge) 等非鐵系材料以及各種塑膠材料。常用的金屬材料，如：鐵 (Fe)、鎳 (Ni)、鈦 (Ti)、鉻 (Cr) 等，因為容易與鑽石碳原子產生化學反應，所以不適合鑽石車削。常見的鑽石刀具化學磨耗是碳原子自鑽石中脫離，擴散至工件材料中與其他碳原子結合而石墨化；或與工件材料結合產生碳化物；或氧化成為一氧化碳或二氧化碳。鎳材雖然不適合於鑽石車削，但無電解鎳 (electroless nickel) 因為含有 10% 以上的磷 (P)，使其不易與鑽石碳原子作用，可以利用鑽石車削來加工。目前有許多光學射出模仁就是以碳化鎢 (tungsten carbide, WC) 或 STAVAX 等超硬合金為基材鍍上無電解鎳，再以鑽石車削無電解鎳表面而得到所需的鏡面。除了化學磨耗外，常見的光學元件材料如玻璃、石英或陶瓷等脆性材料，會造成材

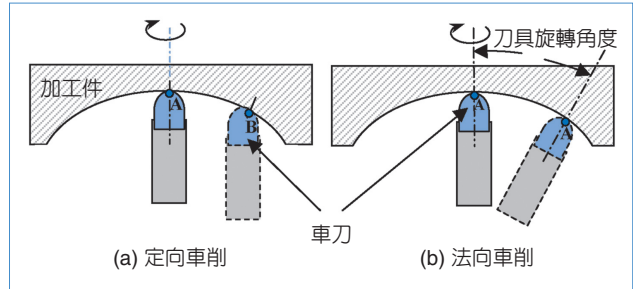


圖4. 定向車削與法向車削。

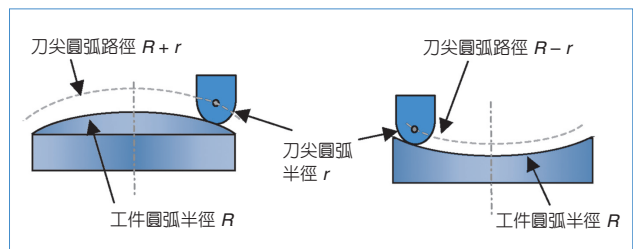
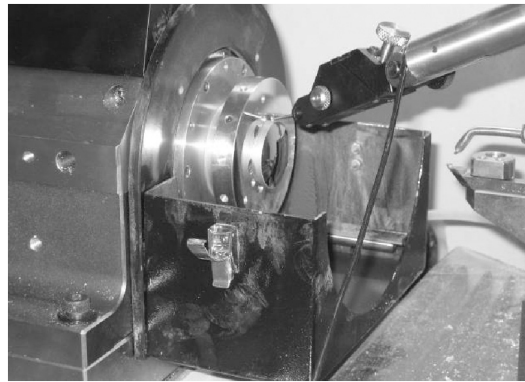


圖5. 刀尖圓弧半徑與車削表面半徑關係。

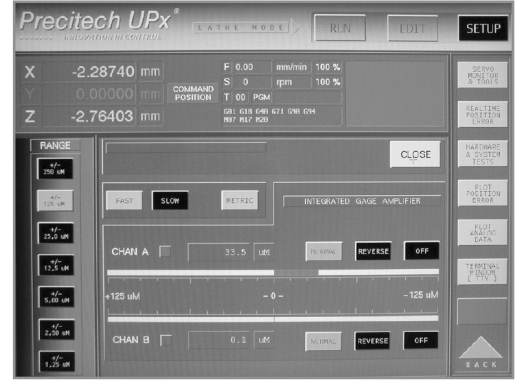
料崩裂現象，所以也不適合鑽石車削，此類脆性材料通常採用輪磨 (grinding) 加工。

單點鑽石車削可分為定向車削與法向車削 (如圖 4)。所謂定向車削是指刀具方向在車削過程中固定不變；而法向車削則是刀具方向與車削表面的法線方向在車削過程中保持一致。定向車削因為車削過程中刀具不需配合加工位置改變方向，因此只需要以 X、Z 二軸運動即可，但因為車削位置改變，工件表面的斜率會不同，刀具刀尖上的切削點亦需隨切削表面的斜率變化，但加工過程中，加工參考點是固定的，刀尖切削點位置改變則必須配合刀尖半徑補償 (tool tip radius compensation) 功能才能車削出正確的表面輪廓。若刀具刀尖半徑為 r ，以定向車削方式加工半徑 R 的凸球面，刀尖半徑補償後，加工路徑是半徑 $R + r$ 的圓弧；相反的，若是車削凹球面則加工路徑是半徑 $R - r$ 的圓弧 (如圖 5)。因此，二軸車削時刀尖半徑 (r) 是重要的刀具參數。法向車削時刀具刀尖上的切削點是固定的，因此不需要作刀尖半徑補償，但刀具相對於工件的運動除 X、Z 軸外，還需搭配 B 旋轉軸，使刀具方向與切削工件表面的法向方向保持一致，且須將刀具切削點架設與 B 旋轉軸一致，以避免因 B

圖 6. 以電子探針量表量測與調整工件偏心率。



(a)



(b)

旋轉軸角度改變時，相對於加工件的切削點位置產生變化。以現行的加工機技術而言，三軸同動伺服定位已不是問題，但三軸同動的法向車削是以固定的刀尖點加工，因此需考量加工點的磨耗問題。若採用二軸定向車削，則刀尖圓弧度的要求就十分重要；亦即刀尖上各點相對於圓弧中心點的距離必須相同，才能利用刀尖圓弧半徑補償功能加工出正確的工件表面輪廓。

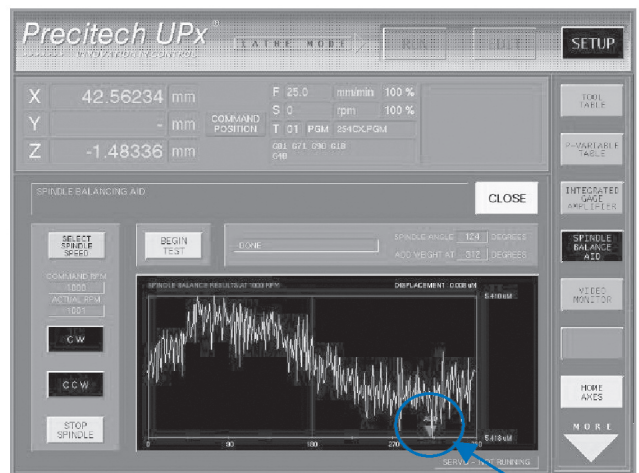
在車削加工進行前，要先完成以下幾項工作：

(1) 工件與主軸同心架設；(2) 主軸動平衡校正；(3) 刀尖架設與設定。現行的超精密加工機，配合周邊的儀器設備，已將以上功能整合至 CNC 控制器。首先介紹工件同心與主軸架設。使用真空吸盤，以低真空度將工件吸附，使工件半固定於工件主軸上但仍可調整位置，再將電子探針量表的探針接觸工件上方圓柱面，並將控制器切換至工件偏心校正模式 (見圖 6)，之後先將量表讀值歸零，以手旋轉工件主軸一圈後，讀取總偏心率 (total indicated runout, TIR)，再以手旋轉工件主軸使電子量表讀值在最大的位置，使用橡膠槌輕輕調整工件位置，使量表讀值下降 TIR 的一半。重複上述動作，調整工件偏心率低於 $0.5 \mu\text{m}$ 後，將真空吸盤調整為高真空度，即可完成工件架設。

接下來是校正工件主軸安裝工件後的動平衡。現行的超精密加工機利用 X 軸的位置感測器擷取主軸不平衡運轉下造成的 X 方向偏擺量，再配合工件主軸的角度感測器 (rotary encoder)，即可得到主軸因工件架設所產生的不平衡量大小與角度。因此動平衡量的檢測已十分簡化，只需將控制器切換

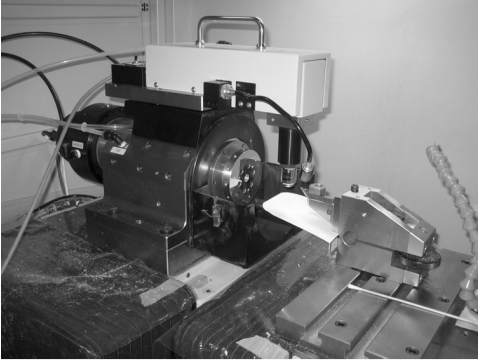
至動平衡校正模式，再使工件主軸以工作轉速旋轉，啟動動平衡量測，控制器就會自動標示不平衡量的角度位置 (見圖 7)，再以手旋轉工件主軸，使標示位置與參考軸一致，在真空吸盤圓柱面正上方加入對應的質量塊，並調整質量塊至適當的深度後，重複上述動作，直到不平衡量在 25 nm 以內，即可完成工件主軸動平衡校正工作。以上工作最困難之處在於決定質量塊的大小與鎖入深度，必須有相當的經驗，才能在極短的時間內完成。

最後的工作是刀尖圓弧半徑與中心點設定。目前超精密加工機的控制器結合顯微鏡取像模組，可以擷取刀尖圓弧輪廓影像 (如圖 8)，並利用控制器刀具圓弧輪廓設定功能，即可計算與設定刀尖圓弧半徑與中心點。顯微鏡取像模組是利用三個精密陶

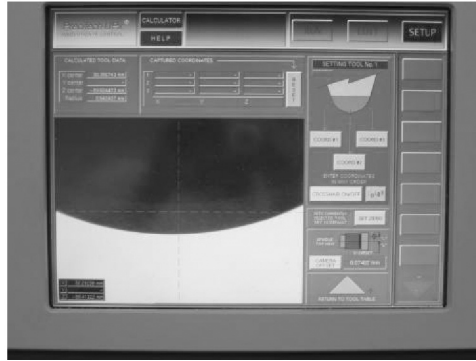


不平衡量大小與角度位置

圖 7. 工件主軸動平衡校正。



(a)



(b)

圖 8. 鑽石車刀中心設定。

瓷球分別與 V 形溝槽承靠，以確保與工件主軸旋轉軸心位置一致。首先，刀尖高度是以顯微鏡取像模組的焦點位置決定；也就是說，調整車刀座使刀尖圓弧輪廓影像最清晰處，就可以使刀尖與工件主軸旋轉軸心等高。此時，在控制器刀具圓弧輪廓設定視窗中，選取刀尖圓弧邊緣三點，控制器即可運算刀尖圓弧半徑與圓心位置，並將半徑值與相對的 XZ 位置值設定在控制器內，即可完成刀尖設定工作。

對車削工作而言，加工精度主要決定於機器精度、刀具幾何參數、切削參數以及刀具架設精度等。其中刀具幾何精度對加工精度最直接的影響就是刀尖圓弧半徑以及刀尖的圓弧波紋度 (waviness)。刀尖圓弧半徑設定對定向車削之刀尖半徑補償功能而言，最直接的影響就是加工件尺寸精度，如圖 9 所示，若刀具圓弧半徑設定值 r 與實際半徑值 r' ，則車削的工件就會產生圓弧半徑誤差。而在切削參數方面，主要是會影響車削工件的表面粗糙度，其中最直接的是進給速率所造成的切削殘留高度 h 。如圖 10 所示， f (mm/rev) 是工件主軸每轉一圈刀具

相對於工件的進給量，其殘留高度 h 約為 $f^2/(8r)$ 。因此車削加工在設定進給速率時必須同時考量刀具圓弧半徑與加工件表面粗糙度。在刀具架設方面，若刀具圓弧中心在水平位置以及刀面垂直高度與工件主軸中心不一致，則會在工件中心點處造成肚臍眼。另外必須特別注意的是，在凹面車削時，刀具水平方向若超過主軸中心設定，極容易造成鑽石刀具刀腹磨損甚至崩裂，因此在刀具圓弧中心設定時應以不超過主軸中心為原則。

四、超精密輪磨技術

如上節所述，雖然單點鑽石車削可以獲得極佳的形狀與表面精度，但並非所有材料皆適合以鑽石車削，例如玻璃、石英等脆性材料或是鐵系材料，即須以輪磨方式加工。與車削加工類似，在輪磨軸對稱式元件時，加工件也是裝設於工件主軸，但車刀則置換為鑽石磨輪。在輪磨過程中，工件與磨輪同時獨立迴轉，所以輪磨加工不會出現車削加工的

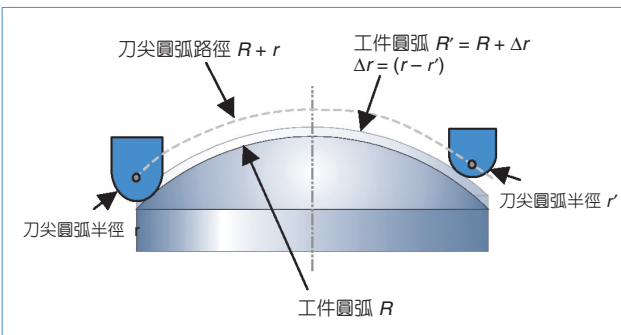


圖 9. 刀尖圓弧半徑誤差與車削表面半徑誤差。

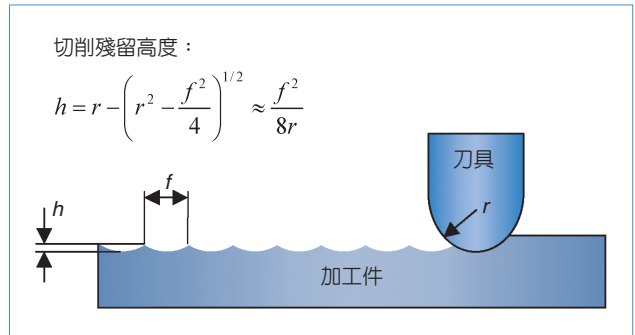


圖 10. 加工進給之餘留高度。

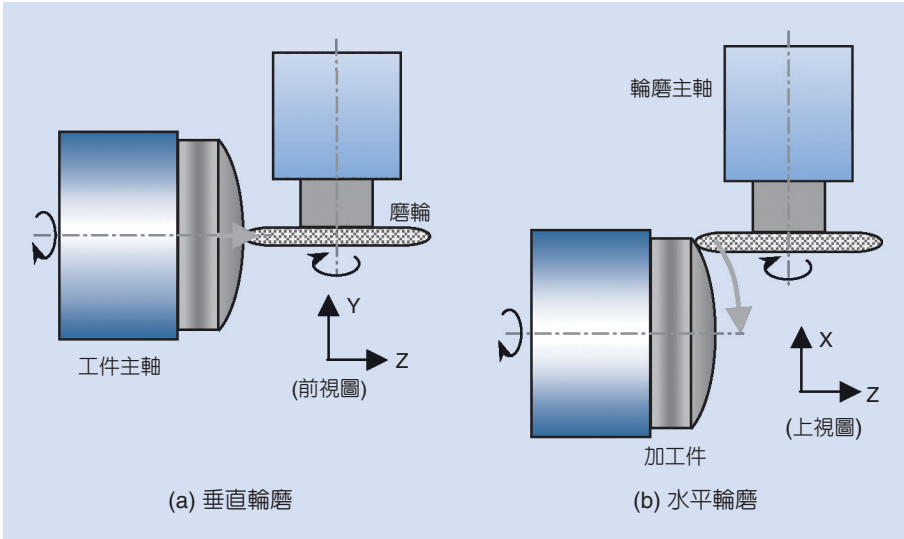


圖 11. 垂直輪磨與水平輪磨。

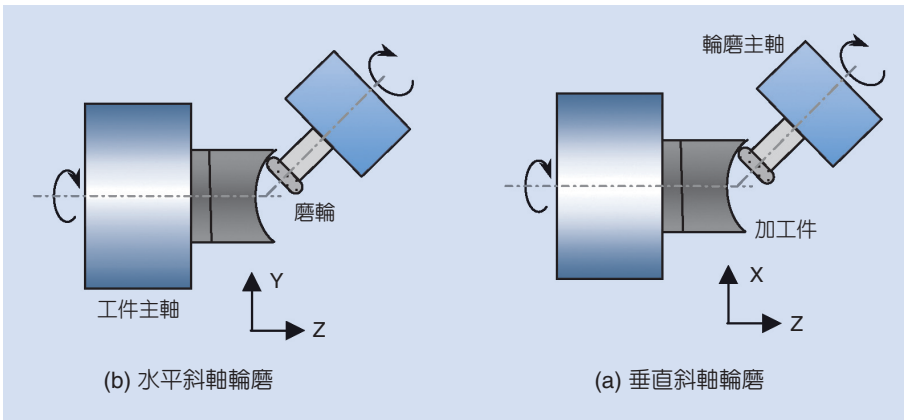


圖 12. 斜軸輪磨。

工件中心靜點問題。一般而言，在輪磨軸對稱元件時，大多以 XZ 兩個水平軸的配合運動加工出特定的形狀，因此根據機器架構可將輪磨加工分為垂直輪磨與水平輪磨。如圖 11 所示，垂直輪磨之加工方式是磨輪之切線速度與工件切削表面之切線速度垂直相交，因此又稱為交錯輪磨 (cross grinding)；而水平輪磨之加工方式則是磨輪之切線速度與工件切削表面之切線速度在切削表面上平行，因此又稱為平行輪磨 (parallel grinding)。交錯輪磨會在工件表面上產生螺旋形紋路；而平行輪磨則會在工件表面上產生同心圓紋路。其中，平行輪磨加工較常採用，因為將磨輪之切線速度與工件表面之切線速度設定為反向，可在較低的主軸轉速就達到工作速度，降低主軸因高轉速所產生的動平衡與發熱問題，而得到較佳表面粗糙度。

上述兩種輪磨加工，工件主軸與輪磨主軸之旋轉軸屬垂直相交。但在加工小口徑大曲率之凹面時，刀具與工件容易產生干涉。因此，在加工這類元件時，可採用斜軸輪磨方式。斜軸輪磨亦可分為垂直斜軸輪磨與水平斜軸輪磨 (如圖 12)。採用斜軸輪磨時，磨輪外徑較小，要達到工作速度，必須提高輪磨主軸的轉速，因此需採用空氣軸承之高速小型主軸。採用小型主軸則軸承外徑也較小，可降低因高轉速所造成的軸心動平衡問題，而軸承相對切線速度較低，則可降低軸承發熱。一般來說，採用空氣軸承之小型高速主軸，因為剛性較低，容易引發輪磨振動。因此在採用斜軸輪磨時，工作轉速的選擇必須避開主軸軸承之共振頻率，如此方能輪磨出較佳的表面粗糙度。

對於自由曲面之輪磨加工，則可將工件安裝於

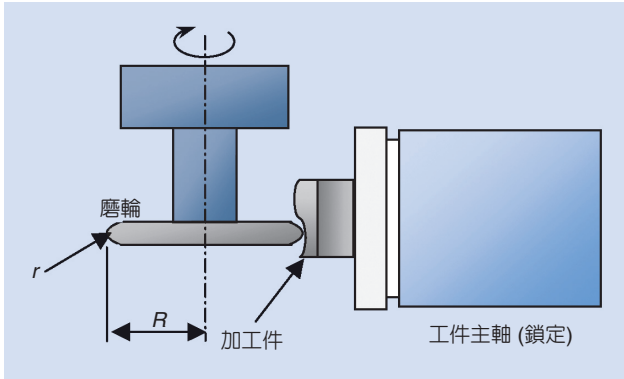


圖 13. 自由曲面輪磨。

鎖定的工件主軸上或直接安裝於工作台上。此外機器至少需要具備 XYZ 三軸，或搭配旋轉軸。在自由曲面之輪磨加工方面，磨輪進給可分為平行進給 (parallel feed) 與垂直進給 (cross feed)。平行進給是進給方向與磨輪切線方向平行，而垂直進給則是進給方向與磨輪切線方向垂直。其中，平行進給又可分為順向輪磨 (down grinding) 與逆向輪磨 (up grinding)，如圖 14 所示。順向輪磨之磨輪切線方向與進給方向相同，而逆向輪磨則是磨輪切線方向與進給方向相反。輪磨進給方式並不是決定表面精度的絕對因素，應先考量輪磨主軸之配置與工件之架設，使切削系統有最佳的剛性。另外在規劃刀具路徑時，應以最少非切削路徑規劃為主，以降低加工時間，進而減少溫度變化對加工精度的影響。

六、結論

本文主要介紹單點鑽石車削與超精密輪磨兩項

最常使用的超精密加工技術，但為滿足多樣性的產品開發，近年來超精密加工機亦常搭配其他加工方式，如刮削 (grooving)、飛刀銑削 (raster milling)、快速刀具進給伺服 (fast tool servo, FTS) 加工等。刮削加工普遍應用於背光模組之 V 形溝槽元件製作，一般而言這些溝槽都是直線形式。若將工件架設於 C 旋轉軸上，則可改變鑽石刀具相對於工件之進給方向，配合 XY 軸之運動即可製作曲線形 V 形溝槽加工。若再配合 Z 軸運動，即可製作非等深度之 V 形溝槽。飛刀銑削是將鑽石刀具安裝於輪磨主軸上，以刀面沿主軸旋轉之切線方向安裝，其切削機制類似於銑削加工。若以 XYZ 三軸同動則可應用於自由曲面之加工應用，如離軸非球面鏡、 $f-\theta$ 鏡面或超環面 (toroidal surface)。FTS 系統是利用壓電致動器使鑽石刀具可以微量快速進給。其原理是以獨立的控制器擷取機器 X 軸與 C 軸的位置訊號，並經由座標轉換計算 FTS 系統對應的進刀量，配合車削進給則可加工非軸對稱元件。FTS 系統的控制器係獨立於機器控制器外，因此工件形狀是車削進給與 FTS 系統進給的疊加。在加工非軸對稱外形時，其非軸對稱之加工深受到 FTS 系統進給量的限制。FTS 系統可加工應用於照明系統之微陣列光學模仁製作。儀科中心所引進的 Freeform705XG，已將上述各項超精密加工功能整合，期能在超精密加工技術領域為產業界與學術研究機構提供更多元服務。

在光學設計完成而要進行元件加工前，刀具路徑規劃與產生是相當關鍵的工作。現行的刀具路徑產生軟體如 DIFFSYS、DTPG 等，都可以針對球面、非球面與繞射元件產生加工路徑。一般機器

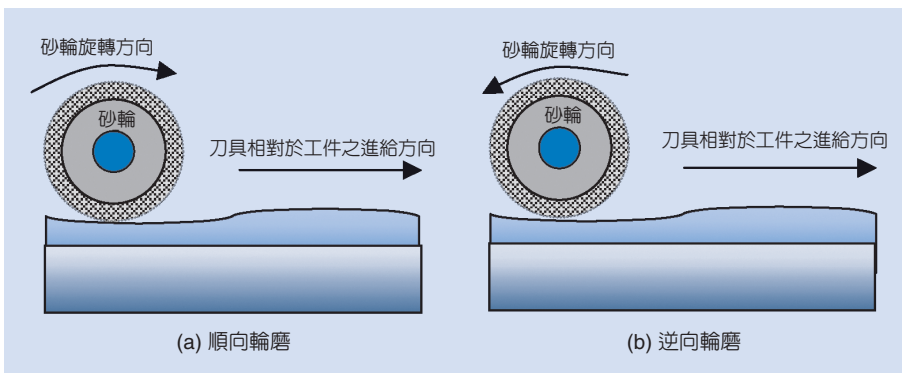


圖 14. 順向輪磨與逆向輪磨。

CNC 控制最常採用的插補方式為直線插補與圓弧插補，其程式控制碼 (NC code) 為 G01、G02 或 G03。其中最容易且方便的方式是直線插補。因為直線插補只要在加工範圍內給定等間距的 X 位置，根據光學設計參數就可以得到對應的 Z 位置。但因為直線插補的誤差決定於插補間距以及曲線的斜率與曲率半徑，而非球面曲線上的各點曲率半徑與斜率不盡相同，因此為得到要求的插補精度，必須縮短插補間距。如此，則會產生大量的加工程式碼增加記憶體的負擔，也會使加工過程中實際進給速率不穩定⁽⁴⁾，進而影響加工表面品質。採用不等間距直線插補或是圓弧插補可解決上述問題，但針對 3D 自由曲面則需更高階的曲線插補方式。

現行的超精密加工機已可加工出奈米等級的表面精度，但在超精密 3D 自由曲面加工應用方面，刀具路徑規劃與表面輪廓量測技術仍有極大的努力空間。此外，在刀具技術與工件材料技術方面亦需投入更多的心力，方可達成成像光學等級的自由曲面元件加工。

參考文獻

1. N. Taniguchi, *CIRP Annals*, **32** (2), 573(1983).
2. E. Paul, C. J. Evans, A. Mangamelli, M. L. McGlaflin, and R. S. Polvanit, *Precision Engineering*, **18** (1), 4-19 (1996).
3. SONY General Catalog - Precision Measuring Equipment,

Sony Manufacturing Systems Corporation, 2004.8 FX-655-H-AP Catalog No. 655.

4. 陳念祖, 許巍耀, 陳峰志, 張正星, 超精密鑽石車削非球面刀具路徑插補之研究, 中國機械工程學會第 22 屆全國學術研討會 (2005).

-
- 許巍耀先生為國立中正大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - 郭慶祥先生為大葉大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 陳峰志先生為國立成功大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼儀器工程組組長。
 - Wei-Yao Hsu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chung Cheng University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Ching-Hsiang Kuo received his M.S. in mechanical engineering from Da-Yeh University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher and the director of Instrumentation Engineering Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.