

# 工 具 機

## 第十四章

# 超精密加工機

機械工程系 工具機概論 教學參考輔助教材 僅限教室內使用

# 第十四章

## 超精密加工機

### 14-1 超精密加工的定義

何謂“超精密加工”？何種程度的加工精度可稱為超精密加工？近年來由於電子、電腦、核子、雷射等高科技工業產品對精度之要求日益提高，致使製造工程上所能達到的加工精度亦隨之提高。二次大戰前，以當時的加工機器而言，超精密加工指的是控制到微米  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}\text{m}$ ) 尺寸精度的加工，而目前則以達到  $\text{nm}$  ( $10^{-9}\text{m}$ ) 精度的加工，方稱之為超精密加工。由此可知，超精密加工的定義是有時代性的，也就是說，超精密加工的定義必須視當代的加工機械所能達到的最高精度而定。圖 14-1 更顯示出加工技術的進步與年代之關係。

儘管 DR. Norio Taniguchi 認為今日所謂之超精密加工依針對加工精度達  $0.01\ \mu\text{m}$ ，表面粗度達  $0.01\ \mu\text{m}$  之加工技術而言。然而，衡諸現有文獻與超精密加工機，只要尺寸精度與幾何精度達  $0.1\ \mu\text{m}$ ，表面粗度達  $0.01\ \mu\text{m}$  者，亦被歸屬於超精密加工之範疇。

超精密加工之切削方式可分為兩大類：一是以燒結的磨粒 (abrasive) 研磨的方式加工；另一種是以單晶鑽石刀具 (single crystal diamond) 作切削。前者的工件材料是以硬化後的合金鋼及脆性材料為主；而後者是以鋁合金及無氧銅等軟金屬為加工材料。(參考表 14-1)。屬於此類型加工之代表性產品有：各種金屬反射鏡、多面鏡、磁碟片、光碟片及雷射印表機滾筒等。由於這類產品之幾何

測量儀器  
(檢查設備)  
游標尺

機械比較測定儀測量計  
刻度指示量表

(電子或氣壓式測量計)  
光學比較測定儀

光學或磁力尺  
電子測微器  
電子比較測定儀 (非接觸式)

(D<sub>4</sub>U.V.Mask Aligned) 雷射量測儀器  
(光學透鏡、精光研磨機) 光纖維

Talysart Talysronds

高精密雷射量測儀器  
(Doppler)  
Talvsteps

掃描電子顯微鏡、電子顯  
微鏡、電子繞射設備、離子分析儀  
X-射線顯微分析儀  
Auger分析儀 Escar

工 具 機  
(加工設備)  
車床 銑床

精密車床、磨床  
研磨機、插磨機

(曲度產生機)  
精密機架鑽孔機  
工模磨床、超精光機

精密磨床、精密研磨機  
(光學透鏡磨床)  
精密鑽石車床

精密鑽石磨床  
超精密磨床  
超精密研磨機 (電子束  
磨光石板機)

超精密磨床、超精密  
研磨機和拋光機

原子、分子或離子束加工  
原子或分子  
(物質合成加工)

加工精度

$0.1 \text{ mm } 10^2$   
 $\mu\text{m } 0.1 \text{ mm}$

$0.01 \text{ mm } 10^1$

$1 \mu\text{m } 10^0$

$0.1 \mu\text{m } 10^{-1}$

$0.01 \mu\text{m } 10^{-2}$

$0.01 \mu\text{m } 10^{-3}$

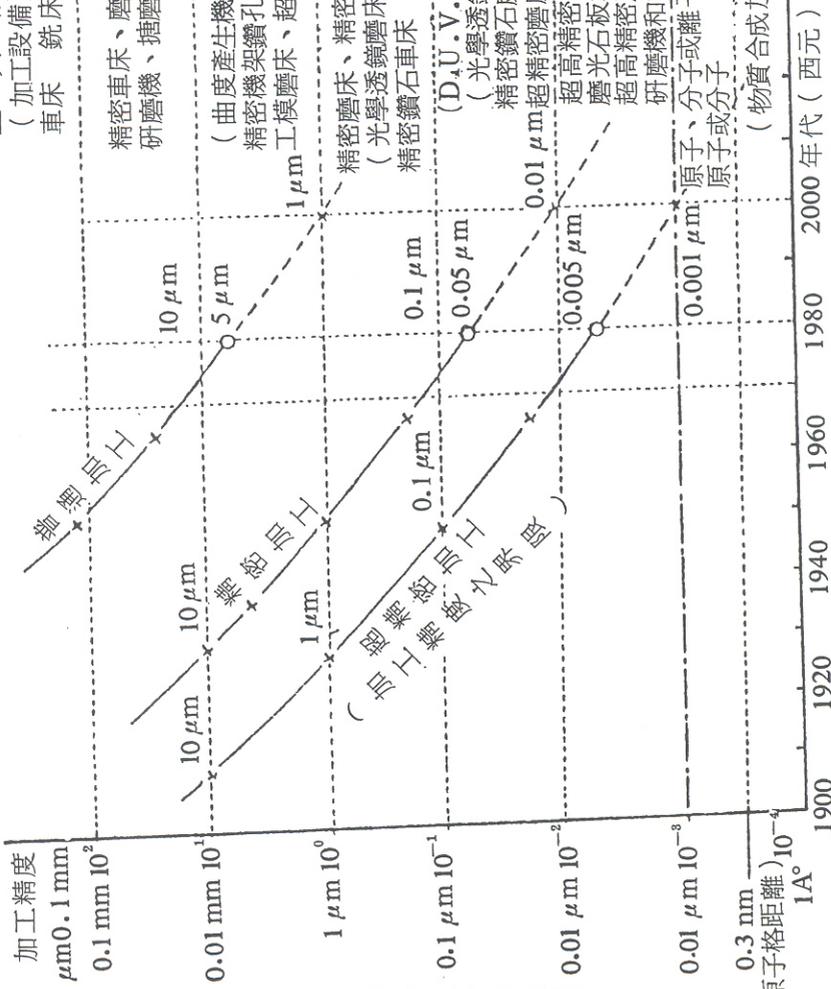
$0.3 \text{ nm}$   
(原子格距離)  $10^{-4}$

氏頓壓力  $\tau$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

拋型加工

鑲造加工

超型拋光  
(加工精密度)



2000年代 (西元)

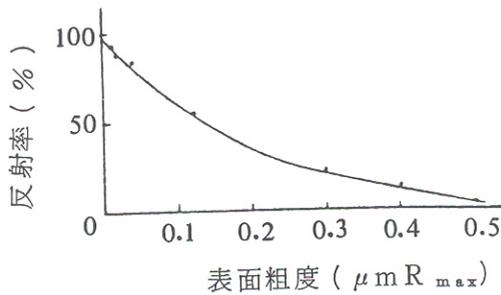
圖 14-1 加工精度與年代之關係

表 14-1 超精密切削方式與應用

超精密加工機		用途、名稱	工件材質
單結晶鑽石之切削	刀具固定之切削	雷射印表機用滾筒	銅、鋁
		磁碟片	鋁
		雷射反光鏡片	銅
	刀具旋轉之切削	雷射印表機用多面鏡	鋁
		球面鏡	銅
磨粒之研磨、輪磨	固定磨粒 超精密磨床	Valve Spool	SUS44C(硬化)
		Nozzle Needle	SKH2(硬化)
		釋壓閥	SCM22(滲碳硬化)
	游離磨粒之研磨 拋光	光學玻璃	玻璃
		VTR 錄音機頭	Ferrite

精度達  $0.1 \mu\text{m}$ ，表面粗度達  $0.01 \mu\text{R}_{\text{max}}$ ，使加工表面產生鏡面效果。因此超精密加工又可稱為鏡面加工。鏡面的性能是以反射率與幾何精度來評估的。而反射率的高低則與鏡面之表面粗度有關，表面粗度愈好，則反射率愈高，欲得到 90% 以上之反射率，鏡面之表面粗度必須在  $0.02 \mu\text{m R}_{\text{max}}$  以下。圖 14-2 所示為表面粗度與反射率之關係。

此外，由於此類產品使用量非常大，因此使鑽石切削刀具成為超精密加工之主流。本章亦將以此為主體作一介紹。



(摘自：超精密切削によるシラ — 加工技術，機械と工具，1984)

圖 14-2 表面粗度與反射率關係圖

## 14-2 超精密加工發展史

超精密加工的發展以美國為最早，技術也最先進。在各個研究機構中以 Union Carbide 公司的 Y-12 廠及加州大學 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 最為有名。並號稱全世界超精密切削加工的兩大中心。而工具機廠則以美國的 Moore Special Tool Co. 與 Pneumo Precision Inc. 兩家最有名。另外英國的 Bryant-Simmons，荷蘭的 Phillips Research 及日本的豐田精機 (TOYOTA) 等亦相繼致力於這方面的發展。

Union Carbide 公司在 1960 年代和 Dupont 公司合作研製全世界第一部超精密車床，該車床配用氣靜壓主軸，加工之真圓度可達  $0.05 \mu\text{m}$ ，表面粗度為  $0.127 \mu\text{m}$ 。同年 LLNL 結合其在量測方面技術的專長，配合空氣靜壓主軸等技術，完成了一部非球面創成車床，稱為 DTM-1。而後此兩研究機構又分別推出 Dupont No.2 及 No.3 (R-Q 車床)，以及 DTM-2 等超精密車床。其中 DTM-2 具有分離式測量基座，在  $42 \times 44$  吋的工作區間內，直度誤差小於  $0.025 \mu\text{m}$ ，位置誤差小於  $0.013 \mu\text{m}$ ，並使用摩擦輪帶動的滑軌，解析度達  $0.005 \mu\text{m}$ ，為目前世界上最大、最精密的超精密車床。另外

Moore 公司推出 M-18-AG (Asphere Generator) 超精密非球面創成鑽石切削機，附有 CNC 控制器及雷射測量儀 (HP 5501)。其主軸採用 Professional Instrument 的空氣靜壓軸承，徑向精度為  $0.08 \mu\text{m}$ ，軸向精度為  $0.05 \mu\text{m}$ ，定位精度為  $1 \mu\text{m}$ 。Pneumo 公司推出的 MSG-325 (Micro-Surface Generating) 亦為非球面創成的 Z 軸控制，具有高解析度  $0.025 \mu\text{m}$ ，平面度  $0.1 \mu\text{m}$ 。

日本的 TOYOTA 公司於 1974 年亦分別推出 AHP  $30 \times 39$  及 AHP  $50 \times 38$  之超精密車床。前者的表面粗度達  $0.02 \mu\text{mRz}$ ，後者的真圓度為  $0.3 \mu\text{m}$ ，直度為  $0.12 \mu\text{m}/100\text{mm}$ 。此外尚有日立精機、東芝精機等生產此項產品。

由於超精密車床是鏡面加工的主要工具，亦是各種鏡面加工中，最為廉價的，且在未來市場中對於超精密車床的需求量相當大。因此各國都極力開發此項產品，在可預見未來，將使超精密加工機的研究更為商品化，逐漸工業界普遍接受與應用。

### 14-3 超精密加工之關鍵技術

超精密加工必須有多方面條件的配合，才能達到極高精度的境界。直接影響加工誤差之主要因素除了人員技術外，尚包括機器精度、刀具與材料品質等，其他如外界振動、環境溫度變化、夾持、量測技術等亦皆有其相當之影響。這些因素可能產生加工誤差之程序如圖 14-3 所示。茲以機器精度、環境因素、刀具與材料為主討論如下：

#### (一) 機器精度

工具機的精度是超精密加工的先決條件，因此工具機必須注意下列可能產生誤差之根源：

- 主軸旋轉精度
- 導軌幾何精度 (直度及平面度)

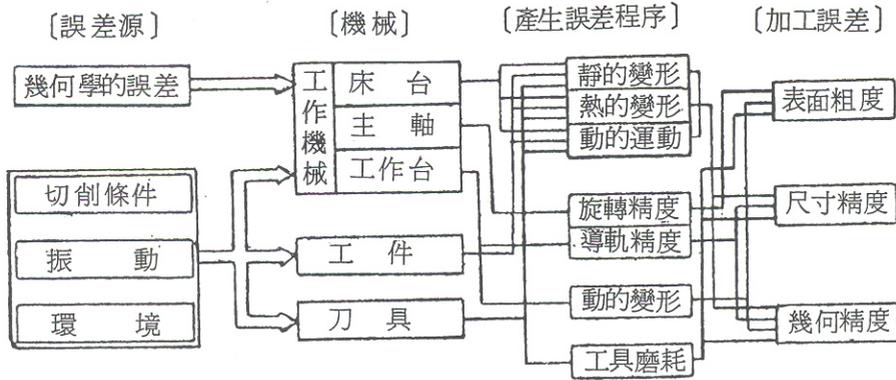


圖 14-3 產生加工誤差之程序

- 定位精度
- 熱變形
- 機器剛性

上述誤差源中，鏡面加工之表面粗度主軸旋轉精度之影響最大。目前主軸軸承之發展朝向液壓靜壓軸承，此類軸承之旋轉精度較優且剛性高又不受轉速大小的影響。由於軸承間允許較大的間隙，製造較為容易。液壓式靜壓軸承中，使用空氣為潤滑介質者稱為氣壓軸承，由於空氣之黏阻低，產生之摩擦損失亦低，且在高速旋轉情況下，熱變形小，有助於保持機械加工中之精度。但空氣靜壓軸承允許的軸承間隙很小，製造上較為困難。且在剛性，吸收振動能力上均較液壓靜壓軸承差。目前 Moore 公司推出之超精密車床上之氣壓軸承主軸，在溫控條件  $\pm 0.06^\circ\text{C}$  下，旋轉精度可達  $0.025\ \mu\text{m}$ 。

超精密加工之幾何精度與尺寸精度受熱變形，工作台導軌直度，導軌對主軸之方度、平行度以及工作台之定位精度等影響最大。所以在超精密車床上大都採用液壓靜壓導軌系統，它沒有金屬與金屬間之接觸，可以長期保持良好的精度，且具有不產生點摩擦，摩擦係數小的

優點。此外，軸承、工作台、進給系統、刀座、床台之切削抵抗與其剛性亦會影響工件幾何精度與尺寸精度。因此機器結構應力求單純化，以減少可能的誤差來源。床身須有足夠的剛性，確保滑座在導軌上移動時，不致產生影響精度的變形。

#### (二) 環境因素

環境因素如溫度、濕度、灰塵、振動等等皆可影響加工機的精度，進而影響工件之品質，因此應加以特別的控制。

##### (1) 溫度

外界溫度對加工精度的影響，在一般切削加工中，較不明顯且經常被忽視，但在超精密加工的領域中，其影響則甚為顯著。一個由鑄鐵或鋼製造的機械，每升高攝氏一度，每米可伸長  $10\ \mu\text{m}$  左右，而超精密車床中，位置精度在  $1\ \mu\text{m}$  以下，故溫度的控制對超精密車床甚為重要。

欲克服機械本體因溫升而產生熱變形的問題，可由兩方面着手解決。其一是使用低膨脹係數的材料做床身。其二是使用冷却裝置嚴格控制溫差。從外界環境控制溫差也有兩種方式，分別是：

- ① 氣浴：是將機械置於封閉的房間內，以恆溫的空氣在室內循環，消除溫度分布不均的死角。
- ② 油淋：是將機械置於一個罩子內，以輕機油或冷却液淋在機器上，以對流及傳導方式帶走熱量，淋過的液體收集後，經過熱交換器及過濾裝置後，再循環使用。

一般而言，油淋的溫控效果較氣浴式為佳，可達  $\pm 0.006^\circ\text{C}$ 。

##### (2) 振動

振動的產生亦會降低表面粗度之品級，機器床台應使用阻尼係數高，熱膨脹係數低，經年穩定性高的材料，進給系統要具穩定性，馬達與液壓泵等振動源宜分開配置，並使用氣墊防振座支持機器，以防

振動傳入主軸及床台。氣墊防振支持點以 3 點支持方式為宜，此外尚可在附近裝設感側器自動調整並確保機器床台之水平。

### (3) 灰塵與其他

灰塵能影響加工表面的光度，除了要使用過濾空氣，保持室內的清潔外，還要使用真空泵，以吸收切屑。另外，加工完畢後，工作應注意夾持及包裝等問題，以防加工表面受到破壞及污染。

其他如壓力、濕度等亦應維持一定範圍內，大氣壓力之變化通常在  $\pm 1$  psig 以內。

### (四) 刀具

刀具為能否達成超精密加工之另一重要因素。在超精密加工過程中，使用同一刀刃切削是獲得良好表面光度的必要條件之一，同時切刃必須保持銳利，不宜有過量磨耗或崩角，以確保超精密之加工效果。然而在超精密加工過程中，却也無法避免切削極微細切屑。特別是當切屑大小小於  $1 \mu\text{m}$  時，切削剪應力急速上升，切刃所受之剪應力極大。此種現象可由圖 14-4 得知，以 SAE1112 鋼為例。在超精密切削時，微細進刀深度達  $0.3 \sim 2 \mu\text{m}$ ，此時刀刃前端將承受極大剪應阻力，其值達  $10^3 \sim 10^4 \text{ kg/mm}^2$ ，為傳統車削力的  $30 \sim 40$  倍。故超精密加工用之刀具必須滿足下列條件：

- 刀刃必須能研磨成非常銳利。
- 具有不產生進刀紋之刀刃外形。
- 刀刃之結晶排列方向必須能承受強烈之切削阻力。
- 具有切削抵抗小之刀刃外形。

基於上述需求，所能找到之最理想單刃刀具材料，顯然地只有天然單晶鑽石或經過燒結的多晶鑽石刀具所具備之優點如下：

- (1) 極高硬度及耐磨耗性，且刀刃極銳利。
- (2) 熱傳導性良好。

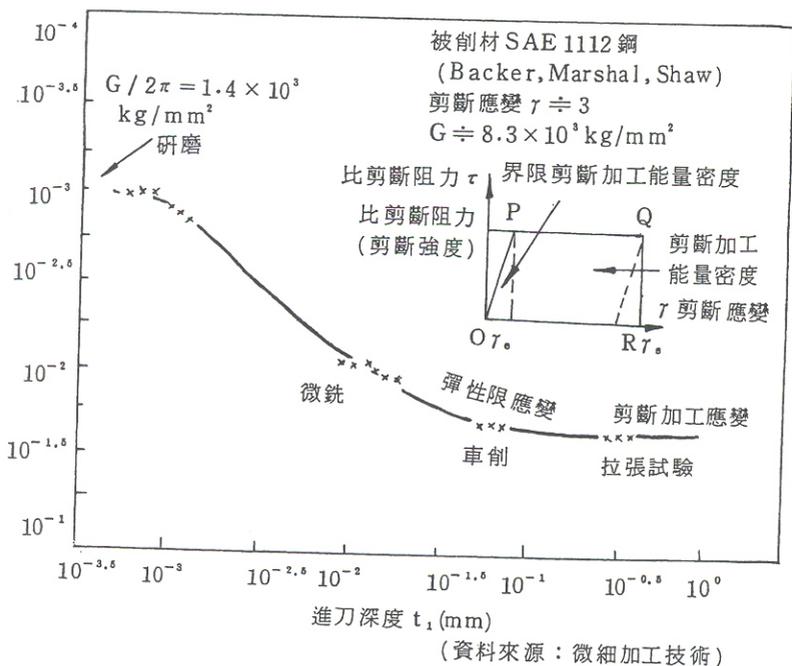


圖 14-4 進刀深度與比剪斷阻力

- (3) 摩擦係數小，減少產生的熱量及切削力。
- (4) 對工件之親和性低，不易產生積屑  $BUE$  (Build-up-edge)。

鑽石刀具的外形，一般可分為圓弧刀與平頭刀兩種。如圖 14-5 所示。由於加工件表面形狀即為刀刃輪廓的複製，因此，不同的刀刃外形，刀鼻端圓弧角度及進給速率等皆會影響工件表面粗度。理論上，只要慎選加工條件，兩種刀具皆可加工出同等之表面粗度，其  $R_{max}$  之計算可由圖 14-6 中以三角幾何關係推導出來。

由圖 14-6 中之計算式可知，表面粗度  $R_{max}$  之值隨着刀尖半徑 (刀鼻端半徑)  $R$  之增大或刀端角  $\delta$  之減少而減低。

此外，由於鑽石刀具性硬脆，亦能抵抗衝擊力及振動，因此刀柄之懸長應儘可能地短，起始之切削深度要小，以減少振動之發生。

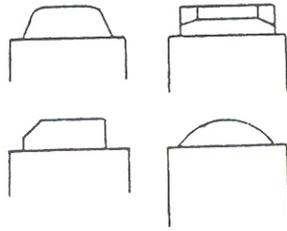


圖 14-5 超精密加工用之鑽石刀具外形

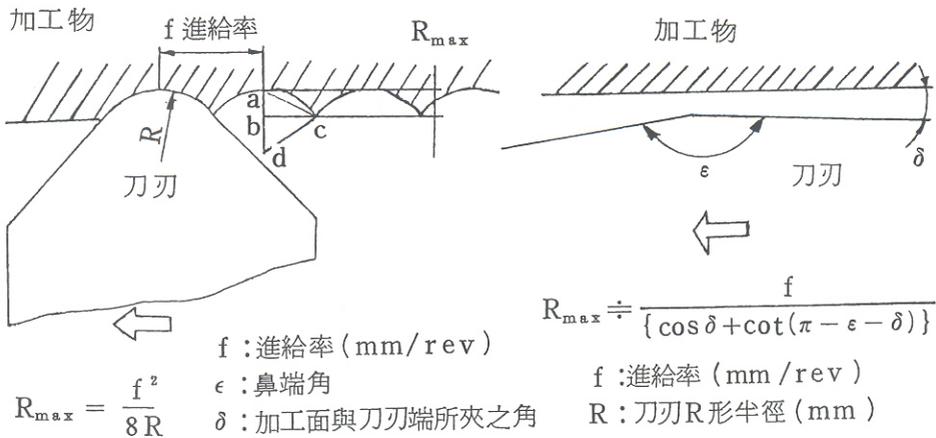


圖 14-6 鑽石刀刃形狀加工表面之理論值

(四) 工件材料

在超精密加工中之工件材料之選擇必須考慮到材料之被切削性，包括可達成之表面粗度與對刀刃之磨耗、損傷及親和性之影響。目前最普遍使用之材料包括銅、銅合金、鋁、及鋁合金等，其中又以銅系之被切削性較佳，加工表面粗度亦較好。對不可使用鑽石切削之材料，可以先粗加工到非常接近要求尺寸，而後再鍍上一層可以用鑽石切削的材料，再作切削。

欲達成超精密加工之境界，除了上述重要關鍵技術之配合外，另一個重要因素就是人，人的影響力包括技能及專注的精神力。唯有人長久不斷的追求熟練優良的技術以及對工作投入專注及追求完美的精神，才能使超精密加工之技術更加進步，永無止境。

#### 14-4 超精密車床的結構

所謂超精密車床，係指加工精度可達到  $0.1 \mu\text{m}$ ，表面粗度  $0.01 \mu\text{m}$  ( $R_{\text{max}}$ ) 級，並使用天然單晶鑽石作為刀具，作單鋒切削的精密車床。超精密車床的結構和一般車床有極大的不同，本節就其主要結構介紹如下：

##### (一) 本體構造

本體結構大體上使用的材料仍以鑄鐵及花崗岩為多。花崗岩對點的安定性比鑄鐵優良，其熱傳導率、熱膨脹係數均較鑄鐵小，有助於減少熱變形；其阻尼效果約為鑄鐵的3倍，成本較鑄鐵低廉，但加工困難為其缺點。依照統計，目前大型超精密車床大多採用花崗岩，而小型機則採用鑄鐵為多。此外，為了減少由外部傳來的振動，通常在底座都使用空氣墊或抗震墊。圖14-7所示是英國 Cranfield Institute 所發展出來的超精密車床，採用三點支撐的防振台。

##### (二) 導軌系統

目前超精密車床常用的導軌大致上以油靜壓、空氣靜壓、及滾子式線性軸承居多。而其中又以油靜壓或空氣靜壓式導軌為主。其原因在於靜壓式導軌之摩擦係數趨近於零，可避膠着滑移現象的產生，且有高阻尼性、低熱膨脹係數、高剛性及高精度之特性。通常輕負荷高轉速時採用空氣靜壓式導軌，而負荷高且低、中速迴轉者則採用油靜壓式導軌。

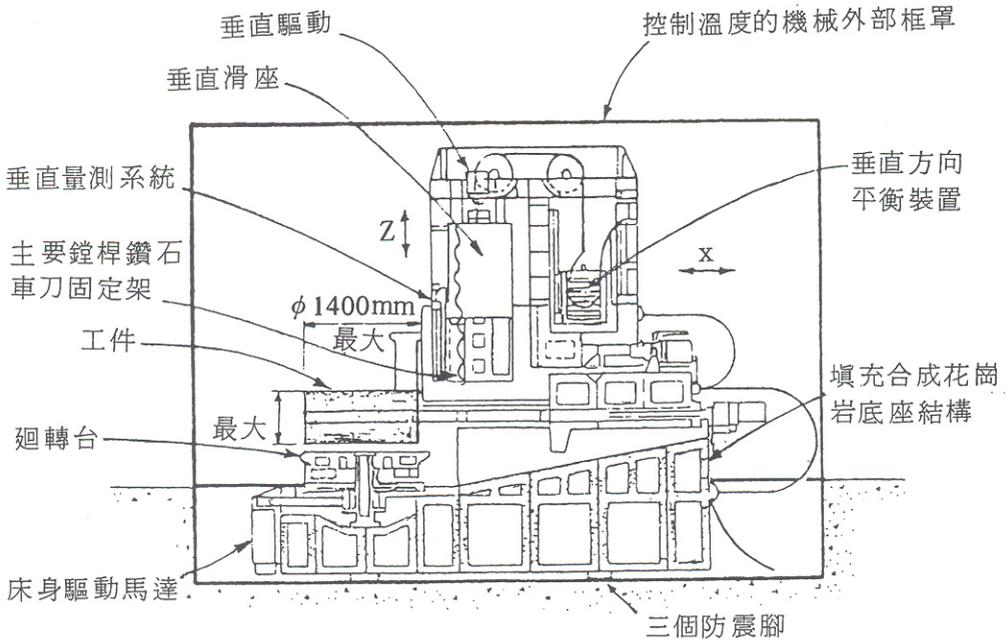


圖 14-7 英國 CRANFIELD INSTITUTE 所發展的超精密車床

(三) 主軸及尾座心軸

超精密車床主軸的要求是：高迴轉精度、高剛性、高阻尼、低熱膨脹、低摩擦等。

使用一般高精度的滾動軸承的主軸，其迴轉精度局限於  $1 \mu\text{m}$  以下。但主軸及尾座心軸的迴轉精度要求在  $0.1 \mu\text{m}$  以下，因此非用靜壓式軸承不可。雖然靜壓式主軸略遜於滾動軸承的主軸，但超精密車床的切削力極微（尤其在精車時，僅有  $1 \text{ kg}$  左右），因此若採用壓力為  $6 \text{ kg/cm}^2$  的氣壓式主軸，其剛性便可輕易的達到  $9 \text{ kg/cm}^2$ ，比較之下，可算是極高了。表 14-2 所列即為各主要研究機構及製造廠商所使用主軸構造之比較表。

此外，主軸與主軸馬達間的傳動，採用非接觸式磁性聯軸器或氣靜壓式浮動聯軸器，可隔絕主軸馬達的震源。

表 14-2 超精密車床主軸構造比較表

製造廠商	製造年代	機種名	主軸構造	主軸回轉精度		製造方法	加工物,加工精度	備註
				半徑方向	軸方向			
duPont	1960 前半	Hemisphere Turning Machine (duPont No.1)	多孔質節流形氣 壓軸承,軸承間 隙2.5~4.0 $\mu\text{m}$				半球體(101.6 mm)鋁合金、 面粗度0.025 $\mu\text{m}$ Ra尺寸粗 度 $\pm 0.6\mu\text{m}$	空氣的乾燥 及濾清設備 需考慮
L L N L	1970 前半	DTM-1	氣壓軸承	0.025 $\mu\text{m}$	0.025 $\mu\text{m}$		銀(Ag)製放物 面鏡(徑152mm )面粗度0.025 $\sim 0.05\mu\text{m}$ R <sub>m,ax</sub>	負荷容量 180kg
Union Carbide	1970 前半	超精密車床	氣壓軸承,軸承 間隙7.6 $\mu\text{m}$	<0.04 $\mu\text{m}$	<0.02 $\mu\text{m}$	軸承部用鑽石 刀具加工後, 真圓度0.15 $\mu\text{m}$ ,並經研 磨(lapping) 加工		1,000rpm 運轉下,溫 昇0.8°C 負荷扭矩 600N-m
東芝機械	1980		自成節流氣壓軸 承,軸承間隙 10~15 $\mu\text{m}$	<0.05 $\mu\text{m}$		球面軸承用研 磨加工(lapp- ing)軸中心 -直方向之真 圓度0.2~0.3 $\mu\text{m}$		

#### (四) 驅動系統

驅動系統通常有下列幾種：

##### (1) DC 伺服馬達與滾珠導螺桿

使用 DC 伺服馬達經聯軸器驅動滾珠導螺桿，帶動螺帽，再以靜壓式導軌，間接帶動床鞍作軸向運動，以隔絕進給馬達之振動源。由於滾珠導螺桿有背隙振動問題，因此使用時應盡量要求精度及剛性，或者是使用靜壓式螺桿及撓性（浮動）聯軸器。

##### (2) 油壓泵及油壓缸

此種傳動方式通常用於單軸控制的平面或圓筒面加工用超精密車床。

##### (3) 線性馬達

將馬達的定子固定於床身而將運轉部固定於導軌上構成直線驅動伺服馬達，可免去傳統式驅動所需傳動件，而可直接作線性驅動。如 Union Carbide 公司應用於其超精密車床上。

#### (五) 精度控制之量測系統

二軸控制車削曲面的 CNC 超精密車床通常使用雷射干涉儀作位置及速度控制，以避免因機械零件的加工精度或變形所造成之誤差；解析度可達  $0.02 \mu\text{m}$ 。

目前所使用的雷射量測系統大都用穩定性高的 AC 雙頻氦氖雷射干涉儀，基本解析度為四分之一波長，即  $0.633 \mu\text{m}/4$ ，約  $0.16 \mu\text{m}$ ，另可利用電子技術進一步解析到百分之一，即  $0.0016 \mu\text{m}$ 。如此高的精度必須注意環境的影響。換句話說，環境中溫度、壓力、濕度的變動會影響雷射光之波長，進而影響其解析度。由實驗可知溫度變動  $1^\circ\text{C}$  或氣壓變動  $2.5 \text{ mmHg}$  將使波長變化 / PPM (Part Per million)。因此對這些變動因素應事先偵測並輸入控制器中以作補償。另外，亦應使用防護罩保護雷射系統，避免其受到切屑或切削液

之干擾。

(內) 恆溫控制及其他

要達到  $0.1 \mu\text{m}$  之加工精度必須嚴格控制溫度變動在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以下。依據 Pneumo 公司的標準，單軸機之環境溫度變動控制在  $1^\circ\text{C}$ ，CNC 雙軸機主  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。是以超精密車床應置於恆溫控制室中，採用油淋或氣浴方式消除車削中產生的熱量。以減少機件或工件熱變形，並可避免刀具刃口產生積屑 (BUE) 之現象。另外亦應採用真空吸屑裝置，迅速帶走切削，以避免其刮傷工件表面。圖 14-8 所示即是 LLNL 超精密車床上採用油淋方式的恆溫控制室。

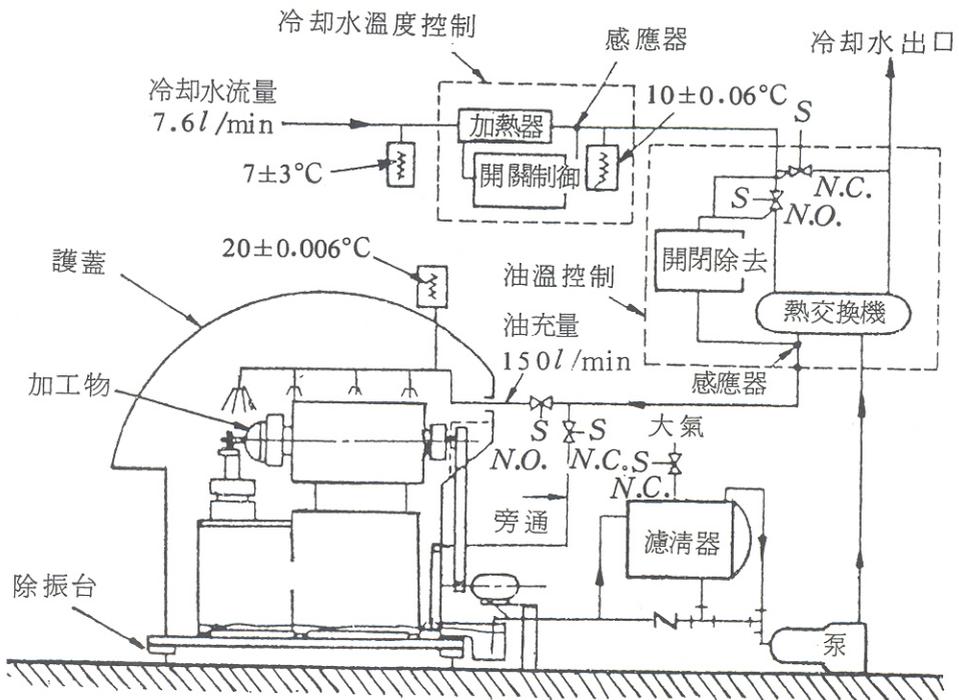


圖 14-8 LLNL 恆溫控制式

## 習 題

1. 簡述超精密加工的定義。
2. 工具機之機械精度如何影響其加工精度？試分項說明之。
3. 如何克服溫度對加工精度之影響？試說明之。
4. 簡述超精密車床的結構。