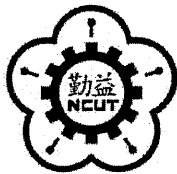


DT
448.6
1103
100
225282



國立勤益科技大學
電子工程系碩士班

碩士論文

工具機主軸溫升熱變位補償技術研究

Study on Spindle Thermal Compensation of Machine
Tool

研 究 生：張文鴻
指 導 教 授：張文鴻
國立勤益科技大學
圖書館藏章

中 華 民 國 一 百 年 七 月

國立勤益科技大學圖書館



225282

勤 益 科 技 大 學

博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在勤益科技大學
電子工程系_____組 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之
論文。

論文題目：工具機主軸溫升熱變位補償技術研究
指導教授：王圳木

■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 105 年 8 月 18 日公開

授權人：張文鴻

簽名：張文鴻

中華民國 105 年 8 月 18 日

國立勤益科技大學
研究所碩士班
論文口試委員會審定書

本校 電子工程系 碩士班 張文鴻 君

所提論文 工具機主軸溫升熱變位補償技術研究

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人：詹承堯

委員：陸文剛

王川木

詹承堯

指導教授：王川木

所長：電子系主任 林熊徵

中華民國一百年七月二十三日

摘要

製造技術隨著時代不斷的進步，CNC 工具機加工的精度與效率的要求越來越高，而 CNC 工具機最主要誤差來源是在切削期間，結構受熱所產生的熱變位，因此如何減少機器熱變形，一直是工具機 Maker 最急迫也最需要解決的問題。

減少熱誤差的方法很多，傳統的主軸熱變形模式使用有限元素法、回歸分析法及類神經方法來建立靜態熱誤差模式，就是假設主軸熱變形只與現時的主軸溫度相關，不受溫度的動態變化影響，目前的方法是針對機器運轉中所產生之熱變形做補償，因此本篇論文將以主軸熱變位作為研究，進而開發新一代之補償模組來整合主軸、結構與進給軸熱變位的補償機制，在探討立式綜合加工中心機實際加工過程中的熱變形，利用 NC 變數擷取熱變形資料。在主軸旋轉設定的測試時間後，利用 OMP60 工件量測所設定之標準塊規，來量測工具機主軸因熱變形所產生的數值變化，用以增進機台之加工精度，將能增加機台之附加價值，提升國際市場之競爭力。

關鍵字：CNC 工具機、主軸熱變位、OMP60、標準塊規

Abstract

Manufacturing skills are in constant progress, which make the demands of the precision and efficiency of CNC's machine tools higher and higher. The major inaccuracy occurs while the machines tools are cutting, which produce thermal displacement compensation due to the structure being heated. Thus, how to reduce thermal induced deformations has been the most urgent and needed problem to solve.

Over past years, many methods of reducing thermal induced inaccuracy have been used, such as traditional methods of main shaft's limited elements, regression analysis, and nerve. These methods mentioned above are to establish patterns of thermal induced inaccuracy in the static state, which is supposing that the main shaft's thermal induced deformations are only related to their current temperature and regardless of the impact on their temperature developments. However, the current mainstream approach is to focus on the compensations of the thermal induced deformations produced by the machinery operations.

In this thesis, we proposed a feasible approach on the main shaft's thermal induced deformations to precede the development of a new generation of compensation modules to conform the main shaft, its structure and the compensation mechanism of feed shaft, which confers the thermal induced deformations in actual process of a cube integrated processed center machine. Firstly, the mechanism collects NC variables to get the info of thermal induced deformations. After the set time of main shaft's spinning, the OMP60's standard slip gauge to measure the main shaft of the machine tools' value changes caused by the thermal induced deformations. It will promote the proceeded efficiency and increase the additional value, and furthermore the international marketing competition.

Keyword : CNC's machine tools 、 Spindle thermal displacement compensation 、 OMP60 、 Standard slip gauge

誌 謝

本論文承蒙指導教授 王圳木教授之悉心指導。感謝口試委員詹永寬教授及陳文淵教授對本論文所提供寶貴的意見，使本論文更臻完善。受業期間，在老師的關心與教導下，於待人處世的陶冶及治學精神、研究態度的啟迪，獲益良多。謹此表達心中最誠摯的敬意和感謝。

同時也感謝同窗好友學承、珀瑋、祥柏及竣鴻在學業和工作上之砥礪與生活上的照顧，也謝謝學長姐和學弟妹們於論文方面的幫助，在此一併感謝。

感謝嵩富機具廠有限公司，提供我進修的機會。

最後謝謝我敬愛的家人，體諒我為了學業減少了和家人相處的時間，使我能夠順利完成學業，感謝他們兩年來的支持與鼓勵。同時感謝所有曾經幫助過我的朋友們，謝謝你們。

張文鴻 謹致

于國立勤益科技大學電子工程系研究所

中華民國一百年八月十四日

目 錄

摘要	I
Abstract	II
誌 謝	III
目 錄	IV
圖 目 錄	VI
表 目 錄	VIII
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究背景與動機	3
1.3 工具機誤差	4
1.4 本論文之架構	9
第二章 系統說明	10
2.1 熱源的產生	10
2.2 常見溫升熱變位改善方法	14
2.3 傳統技術	16
2.4 主軸介紹	19
第三章 實驗設計	24
3.1 量測系統介紹	24
3.1.1 Renishaw OMP60 工件量測	25
3.1.2 OMP60 接收器 OMI-2	27
3.1.3 CNC 立式加工中心機	31
3.1.4 控制器 FANUC 0I-MD	34
3.1.5 塊規	36
3.2 熱變位量測方式	38
3.3 系統架構圖	42
第四章 實驗結果	43
4.1 實驗環境說明	43
4.2 實際應用方式	49
第五章 結論	51
參考文獻	52



圖 目 錄

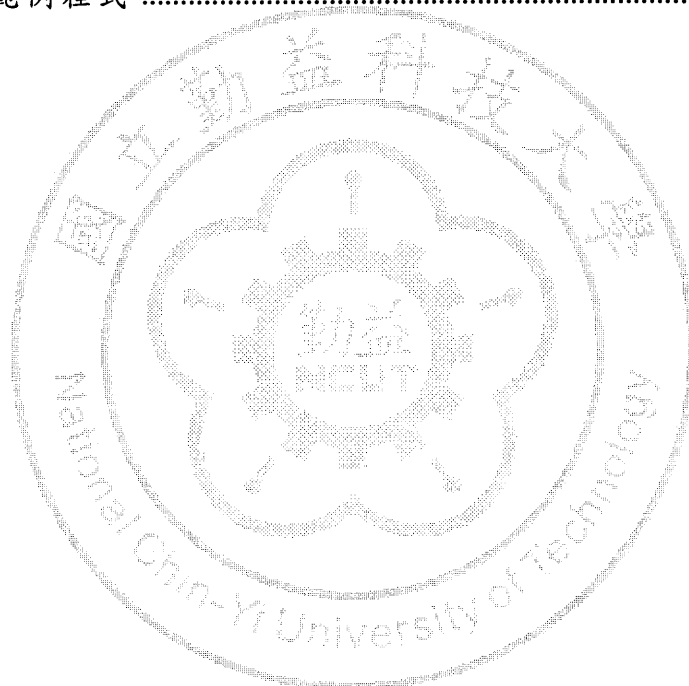
圖 1-1 空間中剛體運動之誤差示意圖	5
圖 1-2 運動方向之相關角度與直線度誤差示意圖	7
圖 2-1 熱源的種類	10
圖 2-2 立式加工中心機	16
圖 2-3 龍門型加工機	17
圖 2-4 非接觸位移計量測設備現況	17
圖 2-5 傳統技術系統架構圖	18
圖 2-6 齒輪式主軸	20
圖 2-7 皮帶式主軸	20
圖 2-8 直結式主軸	21
圖 2-9 內藏式主軸	23
圖 3-1 Renishaw OMP60	25
圖 3-2 OMI-2	27
圖 3-3 OMP60 與 OMI-2 訊號傳輸範圍及角度	27
圖 3-4 OMI-2 燈號	30
圖 3-5 CNC 立式加工中心機	31
圖 3-6 FANUC 0I-MD	34
圖 3-7 標準塊規	37
圖 3-8 刀具補償表	38
圖 3-9 中心規量測	39
圖 3-10 座標系設定	39
圖 3-11 量測方式	41
圖 3-12 實驗架構圖	42
圖 4-1 內藏式主軸數據-1	44
圖 4-2 內藏式主軸數據-2	44
圖 4-3 齒輪式主軸數據-1	45
圖 4-4 齒輪式主軸數據-2	46
圖 4-5 直結式主軸數據-1	47

圖 4-6 直結式主軸數據-2.....	48
圖 4-7 Z 軸補償位置圖	49
圖 4-8 系統實務流程圖	50



表 目 錄

表 1 物質的導熱特性	13
表 3- 1 OMP60 工件量測特性介紹	26
表 3- 2 OMI-2 開關設定說明表	28
表 3- 3 LV117 立式加工中心機規格	32
表 3- 4 量測範例程式	40



第一章 緒論

1.1 前言

近代工具機之研發方向是朝向高性能化發展，也就是高精度、高剛性化、高速化、重切削、複合化及整合系統、無人、智能對應模式。這其中尤以高精度(High Precision)最受注意，也是工具機業者技術水準的目標。目前精度的要求從微米 (Micro-meter, μm) 進入次微米 (Sub-micron)，更要往奈米 (Nanometer, nm) 級努力。

工具機要提高精度的關鍵技術在於熱變位誤差的控制。除了在進行切削所產生的熱效應會影響主軸與機體的膨脹而形成的熱誤差之外，其實進給軸熱變位也是另一項重大課題，如此會造成刀具與加工件應加工的位置發生誤差，造成加工尺寸或形狀的不準確。一般傳統的改善方法有使用絕熱材料、熱平衡設計、加裝冷卻系統之外，目前有熱變位補償模組，可用在進給軸的熱變位，但大都是在進給軸加裝光學尺來克服，雖然成效不錯，卻也大幅增加製造成本，而且研發所花費之時間較長，相對的喪失了快速與彈性之競爭力。因此國內外先

進之研究單位或部門都往溫升熱補償控制技術研究，也就是用軟體及控制模組化以進行誤差補償。此種方法可大幅縮短改善誤差的研發時間及製造成本，更可因應多樣化、專用機台精度的需求。因此本篇論文將以主軸熱變位作為研究，進而開發新一代之補償模組來整合主軸、結構與進給軸熱變位的補償機制，用以增進機台之加工精度，將能增加機台之附加價值，提升國際市場之競爭力。

本國之工具機業者在以往的中低價位市場已漸漸被韓國、印度取代，特別是中國大陸崛起後，更是唯有往研發高速度且高精度機種以提高工具機產值，方能提升市場之競爭力，開發新一代高精度工具機，在相對的在主軸高速運轉下產生的熱效應，對工具機精度影響深遠，因此對其所導致之主軸熱變位（Spindle Thermal Compensation）效應，需加以研究分析，以建立熱變位補償模型，利用控制器功能進行及時補償（Real-time Compensation）來提昇工具機加工精度水準之必要，熱變位為自然且無法避免之物理現象，尤其進入高速加工的時代更為重要，熱變位對於加工所造成的誤差更嚴重，因此熱補償技術的需求更顯重要。

1.2 研究背景與動機

現代化工業的不斷進步，機械零件的精度取決於機台的加工精度，使得製造業對機械產品所要求得愈來愈高，因此提升機械加工精度顯得特別的重要。機械的誤差主要有三大部份幾何誤差、切削力誤差和熱誤差，其中熱誤差為機台總誤差的40%~70%左右，由此可見熱誤差是影響機台精度很重要的因素，機械內部和外部熱源的所產生的熱干擾導致機台的熱變形，研究主軸熱變位是可以直接對加工的精度產生明顯的提升，在加工的過程中透過熱變位的補償，增加工件生產的良率，相對是減少成本支出，對於製造業來說是很重要的。

在服務的公司中，熱變位的研究，還沒有實際的用在機台上，希望透過這篇論文的研究，將主軸熱變位理論用在公司的機台上，提升機台的精度，以增加競爭力。

1.3 工具機誤差

一般工具機之誤差[1]，根據ISO 230-1資料，都可分為靜態誤差與動態誤差兩大類，靜態誤差即是由工具機的幾何誤差所造成，其誤差量的大小與位置有關，故被稱為「位置決定誤差」(Position Dependent Error)。而動態誤差包含了機電系統及控制器所造成之誤差，此類誤差與進給速度有關，故被稱為「速度決定誤差」(Feed-motion Dependent error)。若將工具機任一軸向運動視為一剛體運動，則此運動體在空間中具有六個自由度，其中包括沿 x 、 y 、 z 三軸的移動(Translation)，以及繞 x 、 y 、 z 三軸的轉動(Rotation)，如圖1-1所示。故對空間中的運動體而言，要描述其移動狀態，必須要知道其相對於座標原點的三軸平移量及對三座標軸的角度偏移量，亦即圖1中的 oo' 向量(包含三軸平移量)及 ox 、 oy 、 oz 原座標與 $o'x'$ 、 $o'y'$ 、 $o'z'$ 使用者座標。而幾何誤差便是由於在這六種型態之運動過程中的若干偏移量及 x 、 y 、 z 三座標軸本身的正交性所構成的整體性誤差，其中包含21項靜態誤差元素。

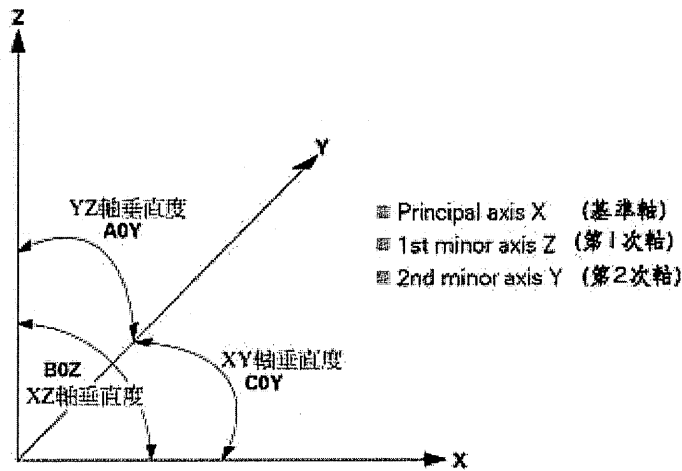


圖 1-1 空間中剛體運動之誤差示意圖

空間中剛體運動之誤差空間中所包含的21項幾何誤差元素，分別包括在以下四種不同的類型之中：

1. 定位誤差(Positioning Error)：

定位誤差乃指運動體在對某一軸平移時，其期望位移量與真實位移量之間的差值，無論x、y、z方向皆有此類誤差，故線性誤差共包含 $(x) (y) (z) x y z \delta \delta \delta$ 等三項幾何誤差。

2. 角度誤差(Angular Error)：

角度誤差乃指運動體上的原三座標軸(與O-XYZ之方位一致)與在經過旋轉後所到達的新三軸方位(與o'x'、o'y'、o'z'方位一致)之間的角度差，即x-x'、y-y'、z-z'等三個軸與軸之間的角度差。在此分別以 (x) $x\varepsilon$ 、 (x) $y\varepsilon$ 、 (x) $z\varepsilon$ 來表示X方向的角度差在X、Y、Z三軸上之投影量，亦即X分別與x、y、z三軸之夾之餘弦值，而y方向為 (y) $x\varepsilon$ 、 (y) $y\varepsilon$ 、 (y) $z\varepsilon$ ，Z方向為 (z) $x\varepsilon$ 、 (z) $y\varepsilon$ 、 (z) $z\varepsilon$ ，各具有相同型式的三個投影量，所以一共有九個投影量來描述運動體之方位改變，故角度誤差共包含九個投影量來代表九項幾何誤差。而每一軸方向之三個投影量又可以分別稱做俯仰誤差(Pitch Error)、平擺誤差(Yaw Error)以及旋轉物差(Roll Error)，故角度誤差包含了三個不同方向的俯仰誤差、平擺誤差以及旋轉物差如圖1-2所示。

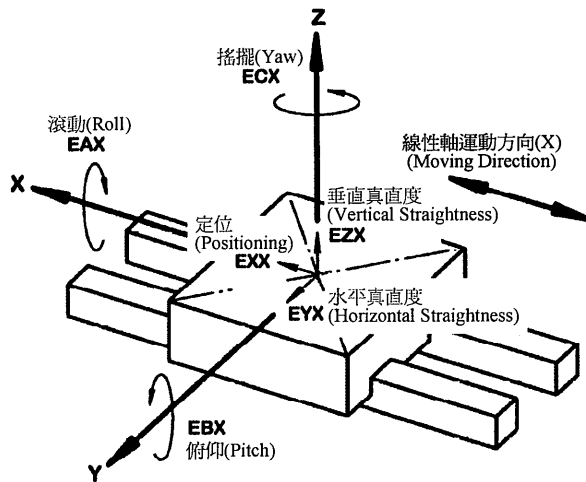


圖 1-2 運動方向之相關角度與直線度誤差示意圖

3. 直線度誤差 (Straightness Error) :

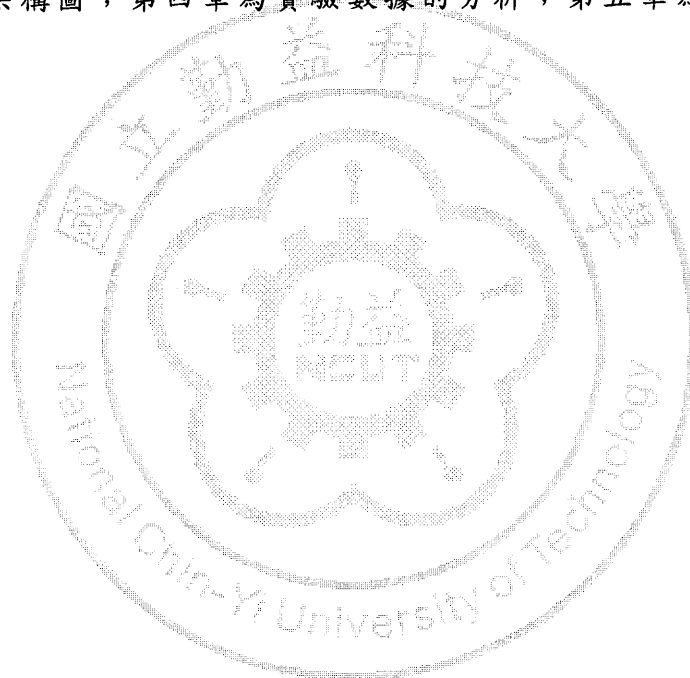
直線度誤差是指運動體在對某一軸平移時，對另外兩軸所產生的偏移量，例如吾輩希望運動體由 $x=0$ 的位置移動到 $x=10$ 的位置，理論上Y方向及Z方向的位移量應該等於零，但出現 $y=0.01$ 及 $z=0.02$ 的微小偏移量，此兩個偏移量即為x在y方向的直線度誤差 $(x) y \delta$ 以及x在z方向的直線度誤差 $(x) z \delta$ ，而y、z方向亦具有相同型式之誤差，故直線度誤差共包含 $(x) y \delta$ 、 $(x) z \delta$ 、 $(y) x \delta$ 、 $(y) z \delta$ 、 $(z) x \delta$ 、 $(z) y \delta$ 等六項幾何誤差元素。

4. 垂直度誤差(Squareness Error)：

直角度誤差是指因x、y、z三座標軸本身之正交性所造成的誤差，理論上三座標軸應該是兩兩互相垂直的，但可能因為某些因素而造成軸與軸之間無法完全垂直，而產生微小的角度偏差量。 $xy\ \alpha$ 即代表x軸及y軸之間的角度偏差量， $xy\ \alpha$ 及 $xz\ \alpha$ 則分別代表Y軸及z軸與x軸及y軸之間的角度偏差量，故直角度誤差共包含 $xy\ \alpha$ 、 $xy\ \alpha$ 、 $xz\ \alpha$ 等三項幾何誤差元素。在以上四種不同的類型的誤差中，共包含三項線性誤差、九項角度誤差、六項直線度誤差以及三項直角度誤差等，共21項的幾何誤差元素。經由這21項變數，我們便可以清楚地描述出CNC工具機或三次元量床等精密設備的各主軸在運動時所造成的幾何誤差量。

1.4 本論文之架構

本論文主要分為五個章節：第一章為緒論，研究背景與動機和工具機誤差；第二章介紹熱源的產生，常見溫升熱變位改善方法和主軸介紹及先前技術；第三章為實驗設計包含量測系統介紹，熱變位量測方式和系統架構圖；第四章為實驗數據的分析；第五章為結論。



第二章 系統說明

2.1 熱源的產生

影響加工產品精度的因素：1.機器因素 2.切削加工因素 3.環境變動

因素，而熱源的種類如圖 2-1 所示：

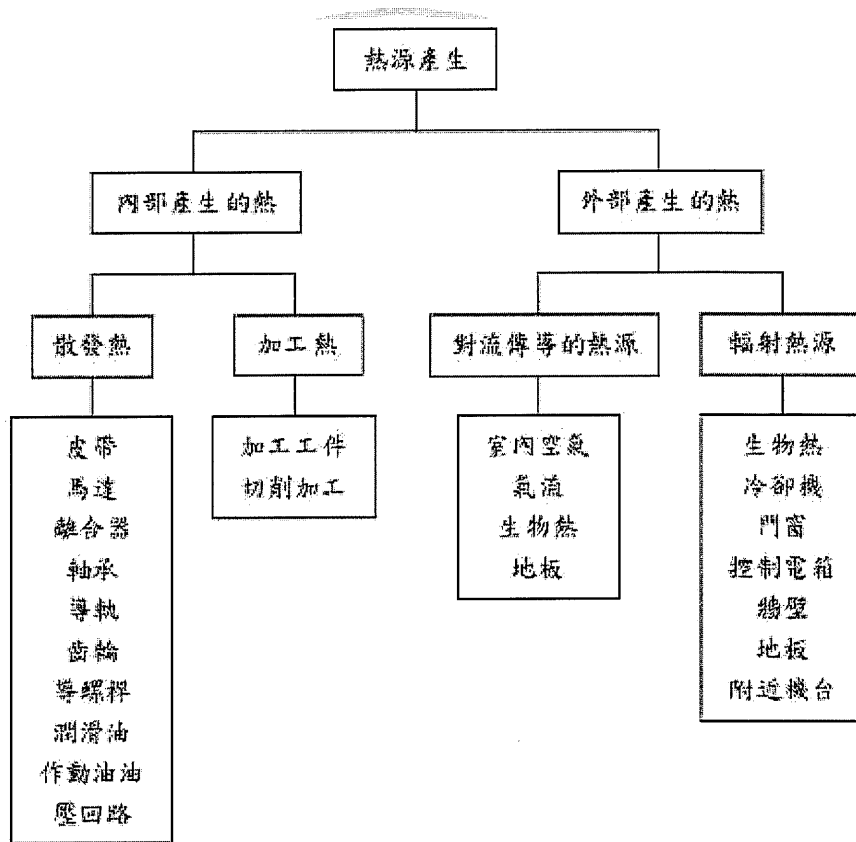


圖 2-1 熱源的種類

(圖片引用：PMC 加工中心機溫升熱變形補償技術，蘇春維，2009 年)

而主要的熱源為，一、內部熱源：a.主軸軸承的熱源 b.進給軸導螺桿產生的熱源 c.切削過程產生的熱源 d.馬達的熱。二、環境變動溫度。熱脹冷縮為大多數金屬材料對溫度之特性，而以鋼或鑄鐵為結構材料的切削工具機對溫度的反應也不例外。進行切削加工時，各項內外熱源（馬達、主軸、刀具與工件的摩擦…等）會使工具機結構產生溫度上的變化，造成結構熱脹冷縮的效應，如果此熱脹冷縮的現象使得刀具與工件的相對位置產生了變化，則會引起加工件尺寸或形狀上的偏差。除此，由於各項內外熱源常會隨時間而變化，因此工件尺寸或形狀的偏差量也往往難以掌握，這正是表示溫度效應會影響工具機精度的穩定性。

工具機熱變形發生原因主要是來自機台上的溫度不均一分佈 [2]，當物體由溫度差產生溫度流時，熱會藉由傳導(Conduction)、對流(Convection)、輻射(Radiation)等三種傳遞方式，將熱由高溫物理傳遞到低溫物體，最後達到均溫的熱平衡狀態。

1. 熱傳導：熱經由固體或靜止流體由高溫傳至低溫，溫度差愈大，熱傳導也愈快速。影響熱傳導的因素有(1)物質本身特性，即熱傳導係數 k ，如表 2 顯示不同物質的導熱率；(2)傳導物體間接觸之截面積；(3)傳導之距離；(4)傳導物體兩端之溫度差。

$$q = -ka \frac{dT}{dX}$$

q ：熱傳導

k ：熱傳導係數， a ：傳導物體間接觸之截面積，

dX ：傳導之距離， dT ：傳導物體兩端之溫度差

2. 熱對流：液體或氣體受熱後溫度升高，體積膨脹使密度變小而上升，其他溫度較低的液體或氣體則因密度相對較大而下沉，形成因溫度差所導致的自然熱對流。此外如透過外力驅動，使液體或氣體產生流動，而達到熱傳導的效果，稱為強迫對流，一般工具機的冷卻系統大多採用幫浦或風扇等強迫對流的方式。

$$q = hA\Delta T$$

q ：熱對流

h ：熱對流係數， A ：截面積， ΔT ：溫度差

3. 熱輻射：熱輻射是電磁波的一種，屬於紅外線，不需要靠任何介質傳遞。當電磁波被物體吸收後，物體便因此獲得熱能。對工具機而言，影響最大熱輻射源來自於陽光的日曬輻射。

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

σ ：Stefan - Boltzmann 常數，

A：截面積；T1 和 T2 分別是兩熱輻射體之溫度

表 1 物質的導熱特性

熱傳導係數 k w/m ² ·k (20°C)			
材料	熱傳導係數 k	材料	熱傳導係數 k
純銅	401	鑄鐵	49.6
純鋁	237	不銹鋼	16.3
金	315	陶瓷	1.14
純鐵	81.1	混凝土	0.9~1.3
中碳鋼	54	空氣	0.02

2.2 常見溫升熱變位改善方法

常見溫升熱變位改善方法[3]，對於熱變形改善方法大致有下列幾個方向：

1. 抑制：

以雨淋的方式將油不斷的噴至主軸機體上，強制帶走主軸上的熱以降低熱變位的產生。此方式主要是以冷卻回路加上熱交換器來達到降低熱變形的目的，此種傳統的冷卻方式對於解決熱變形有一定之功效但須搭配機械設計人員在機構設計上才能有所發揮抑制的效果。

2. 均溫控制：

將主軸結構儘量設計成對稱形式，使熱量產生時不會發生不規則變形，不過結構的對稱性只是一種理想目標，由於設計上種種的因素，此目標很難達到。因此藉助均溫管快速的將高溫熱能排至低溫區，以達到主軸均溫化的目的是必要的。

3. 補償：

量測某參數，如溫升、位移、精度，然後再應用事先建立好的關係式以轉換成主軸之可能變形量，最後再以此變位量作為伺服軸下達指令時的補償量，以維持主軸加工位置之精確性是此方法的精神。對於三維空間系統而言，此方法並非相當精確，必須再藉助恆溫控制。但是對於一維或二維空間系統而言，此方法相當有效而且執行容易。

4. 恆溫：

此方法是將主軸之溫度控制在某一個範圍，使得主軸的變位量永遠保持在某一固定值，因此伺服軸的補償是固定不變的。

不論那一種熱變形改善方法都有其優缺點及能力範圍，最好是在設計階段就將溫升熱變形納入考量。而熱對稱設計並非僅是幾何尺寸對稱，更要考慮結構受熱傳導或熱對流情況下還能保持均溫，因此，藉由有限元素法進行熱分析是熱對稱設計階段的可用手法，而溫升補償則是最後一道處理方法。

2.3 傳統技術

現有的立式加工機機型大致有分為圖2-2 立式加工中心機和圖2-3 龍門型加工機兩種型式，而以加工來說愈大型的機型，其主軸熱變位會愈嚴重，但隨著高速主軸的普及，超過15000RPM的主軸所產生的熱能，也不可輕忽，目前一般使用，如圖2-4所示的非接觸式位移量測方式，目前所需要的器材有電容式非接觸式位移計×5、量測用精密圓棒×1、鋼製的電容式非接觸式位移計固定座×1、資料擷取系統×1、溫度擷取系統×1、溫度感測器×10、手提式電腦×1、筆記型電腦×1，使用非接觸式位移量測方式量測所要購入的量測工具，多樣而且價格不低，相當昂貴。

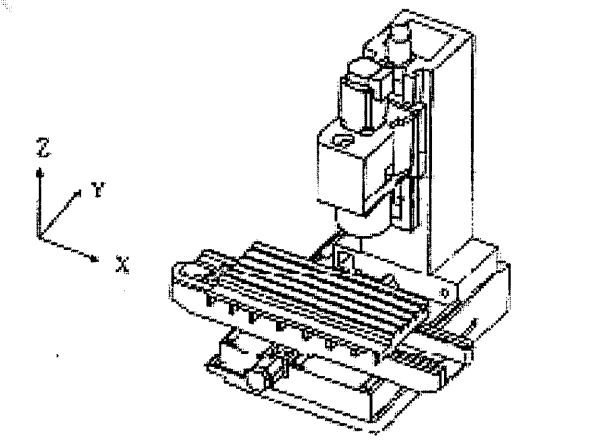


圖 2-2 立式加工中心機

(圖片引用：PMC 加工中心機溫升熱變形補償技術，蘇春維，2009 年)

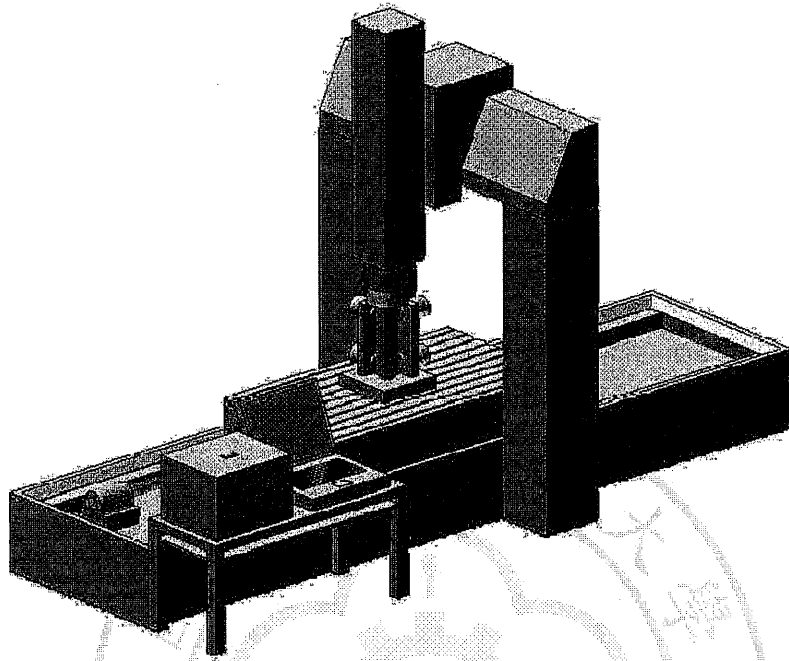


圖 2-3 龍門型加工機

(圖片引用：PMC 加工中心機溫升熱變形補償技術，蘇春維，2009 年)

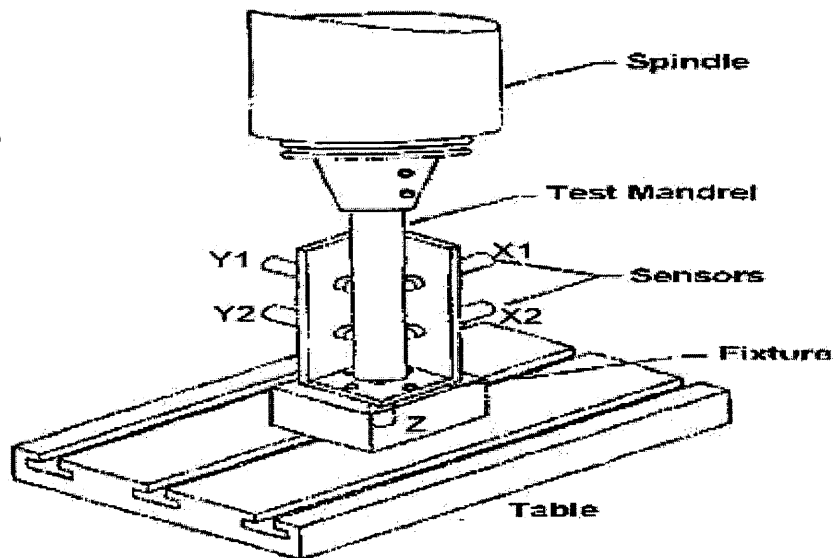


圖 2-4 非接觸位移計量測設備現況

(圖片引用：PMC 加工中心機溫升熱變形補償技術，蘇春維，2009 年)

傳統技術之系統架構圖

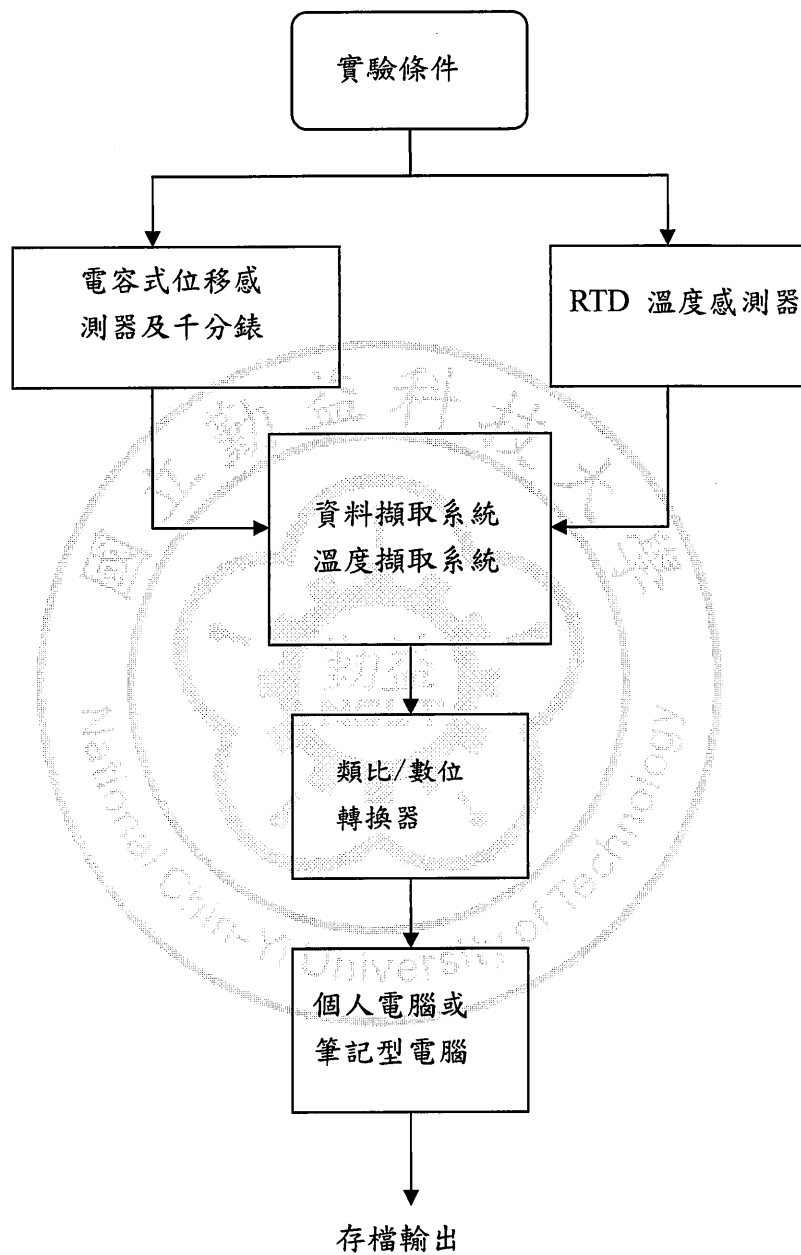


圖 2-5 傳統技術系統架構圖

(圖片引用：工業技術研究院 工具機熱誤差抑制與補償，歐峰銘，2008 年)

2.4 主軸介紹

主軸是切削工具機中最重要部份，用來定心並帶動刀具或工件轉動，以完成表面的切削運動，它也承受切削負載與進給負載、驅動扭矩和刀具或工件的重量，保持與工具機和其它有關組件間的精確位置，而且在受力及熱變位的情況下，帶著刀具或工件均勻且精確的迴轉，迴轉的精度又決定了工件的加工精度，因此主軸的性能對工具機的加工效能與精度，有極重要的影響，現有的工具機主軸就主軸馬達驅動主軸運轉方式，可分為齒輪式主軸、皮帶式主軸、直結式主軸與內藏式主軸[4]，分述如下：

一、齒輪式主軸：

齒輪式主軸最大之優點就是可以傳遞高扭力，擁有較高的重切削能力，在進行粗銑加工時，可以快速的完成切削的工作，但也由於是齒輪設計，有精度方面的缺點，同時也限制了主軸轉速，無法提升成為了最大的困難。

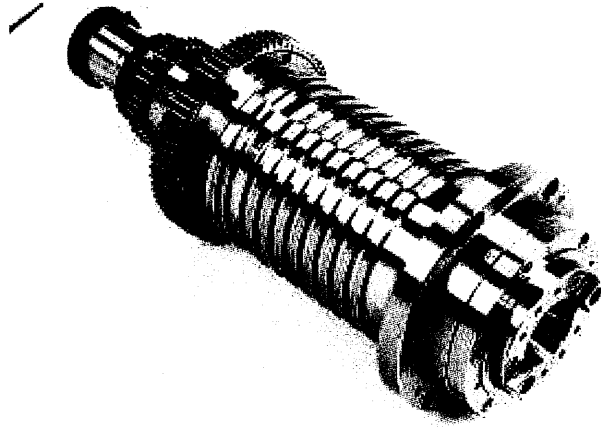


圖 2-6 齒輪式主軸

二、皮帶式主軸以皮帶帶動主軸馬達之動力到主軸，其優點為振動比齒輪式主軸小，組裝比較容易，其缺點為高速時噪音較大且皮帶張力不易調整控制等。

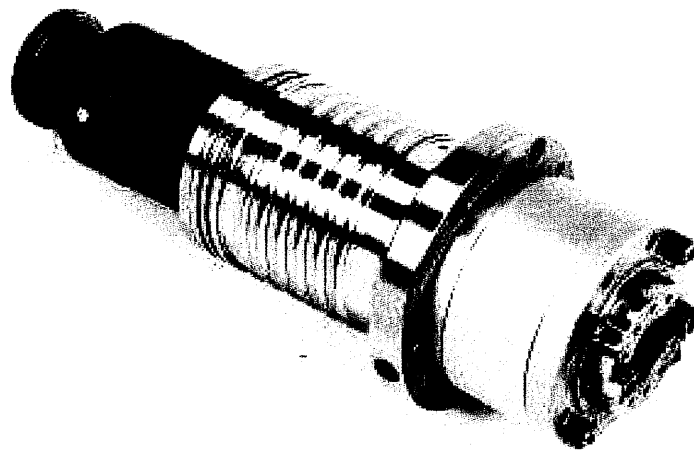


圖 2-7 皮帶式主軸

三、直結式主軸相似三軸馬達與滾珠螺桿的接合方式，主軸馬達放置於主軸上方，主軸與主軸馬達以高剛性撓性聯軸器相互連接，主軸馬達端之轉動經由聯軸器傳動到主軸，此即是直結式主軸。直結式主軸屬於剛性連結，對於馬達輸出之功率較能夠完全表達於主軸特性，機械效率較高，於主軸運轉時，聯軸器則扮演著不可缺少的角色，聯軸器安裝校正時的好或壞，會影響到主軸運轉精度，若聯軸器安裝校正不良，會對主軸產生以下的影響：主軸溫度快速提高、主軸振動變大、主軸偏擺變大、造成加工精度不良、甚至於導致主軸燒毀等情形。

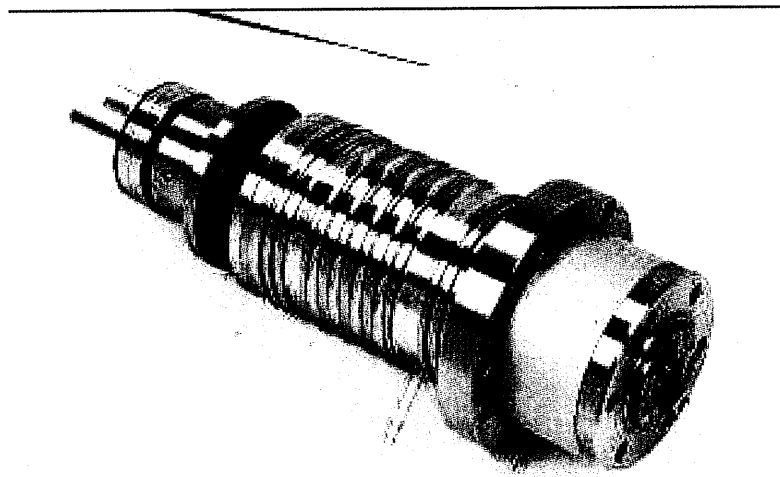


圖 2-8 直結式主軸

四、內藏式主軸即是將主軸與主軸馬達合而為一，將馬達線圈轉子安裝於主軸心軸上，馬達定子安裝於主軸套筒之中，運轉原理和一般主軸馬達相同，具有結構精簡化、重量輕量化、慣性小、等優點，而且轉速高、功率大，低振動與動態迴轉精度良好等特性，是高速主軸單元中的一種理想結構。但是因主軸內部必須置放主軸馬達轉子，造成主軸軸承安裝的跨距加大，剛性減弱的情形發生，因此內藏式主軸較不用於重切削加工，也因主軸馬達安裝於主軸內部，造成主軸馬達散熱不容易，容易直接影響主軸軸承精度，除此之外，內藏式主軸追求的是高轉速與高精度，所以在製造上的成本與精度要求上也較普通性主軸高。

目前國際上高性能、高速、高精度工具機普遍採用內藏式主軸。在多工車銑複合加工機、多軸向聯動多面體加工機、並聯機床和柔性加工單元中，所使用的內藏式主軸更具有主軸不可替代的優越性。

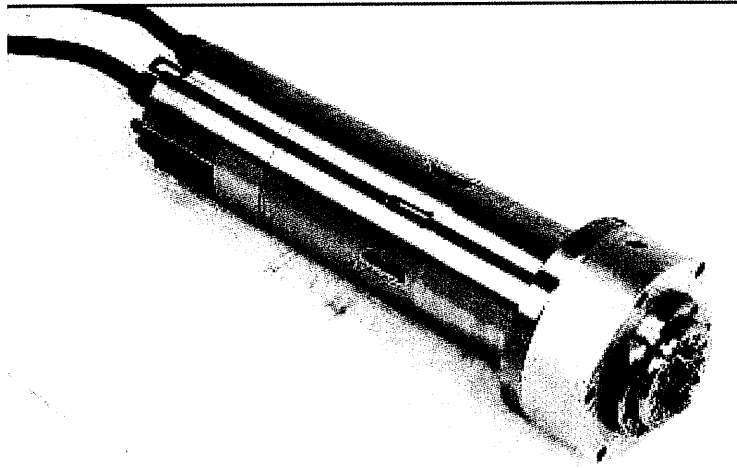


圖 2-9 內藏式主軸

第三章 實驗設計

3.1 量測系統介紹

量測時需用到的儀器和機械有：

1. Renishaw OMP60 工件量測(圖 3-1) 和其特性介紹(表 2)。
2. OMP60 接收器 OMI-2(圖 3-2)，OMI-2 訊號傳輸範圍及角度(圖 3-3)，
OMI-2 開關設定(圖 3-4)。
3. CNC 立式加工中心機(圖 3-5)
4. 控制器 FANUC 0I-MD(圖 3-6)
5. 標準塊規(圖 3-7)200mm x 寬 10mm x 高 35mm 做為量測的基準。

3.1.1 Renishaw OMP60 工件量測

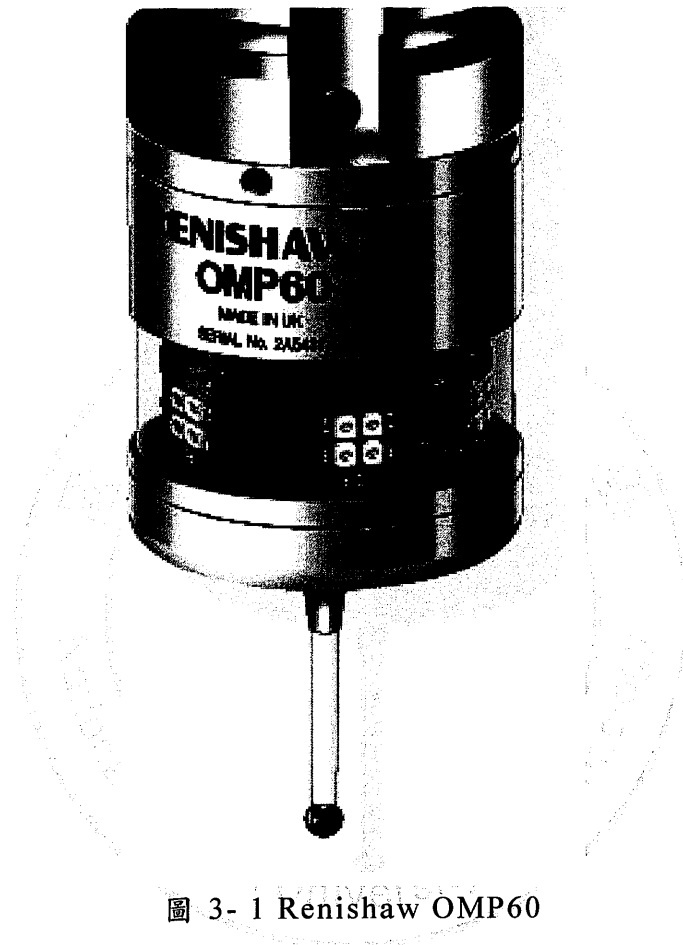


圖 3- 1 Renishaw OMP60

(圖片引用：Renishaw OMP60 工件量測系統中文技術資料)

表 3- 1 OMP60 工件量測特性介紹

360 度紅外線傳輸:	OMP60 最大工作範圍可達 6 米。
防護等級:	OMP60 與 OMI-2 之防護等級都達到 IPX8 連續性浸水防護等級標準
抗干擾:	OMP60 測頭具有更高的抵抗光線干擾及抗震動能力。
邏輯設定:	測頭使用探針觸發式邏輯設定，無需進入測頭內部，且提供多種開啟以及關閉方式
尺寸:	長度(76mm)、直徑(63mm)
單向重現性:	$\pm 1\mu\text{m}$ (2σ)
觸發力量(XY 平面):	最大 $\rightarrow 1.4\text{N}$ 最小 $\rightarrow 0.75\text{N}$
觸發力量(Z 平面):	5.2N
觸發方向:	$\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $+Z$
電池型號:	2 個 AA 鹼性或鋰亞硫氣(LTC)電池
探針行程量:	XY 平面 $\rightarrow \pm 18^\circ$ +Z 方向 $\rightarrow 11\text{mm}$

(圖片引用：Renishaw OMP60 工件量測系統中文技術資料)

3.1.2 OMP60 接收器 OMI-2

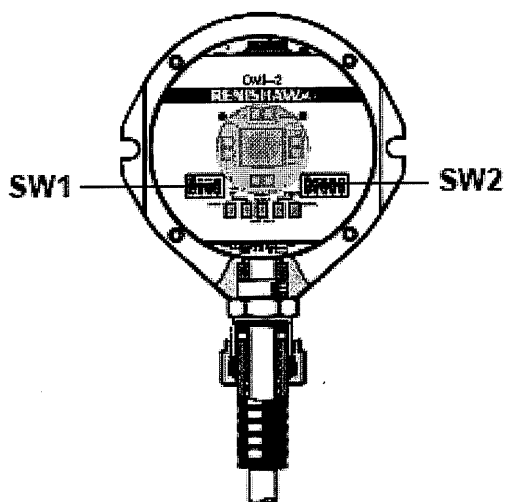


圖 3- 2 OMI-2

(圖片引用：Renishaw OMP60 工件量測系統中文技術資料)

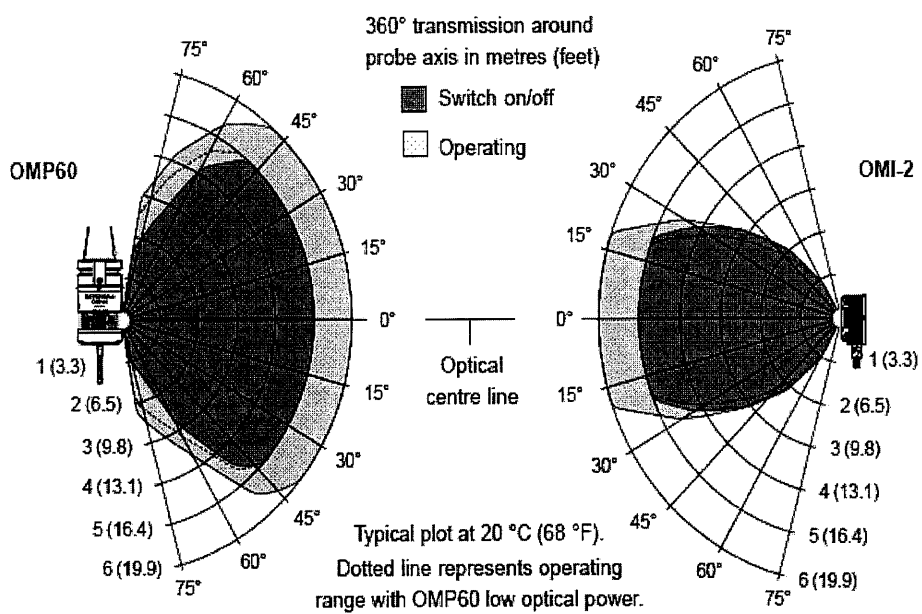
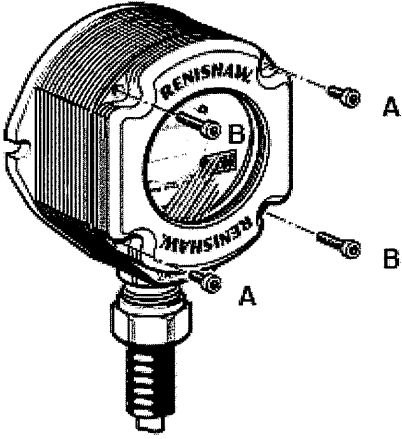
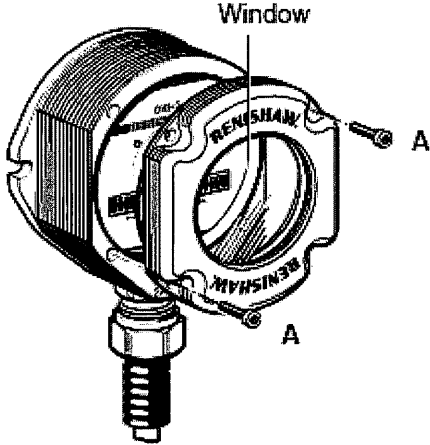
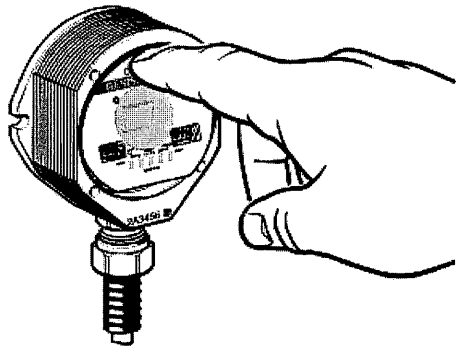


圖 3- 3 OMP60 與 OMI-2 訊號傳輸範圍及角度

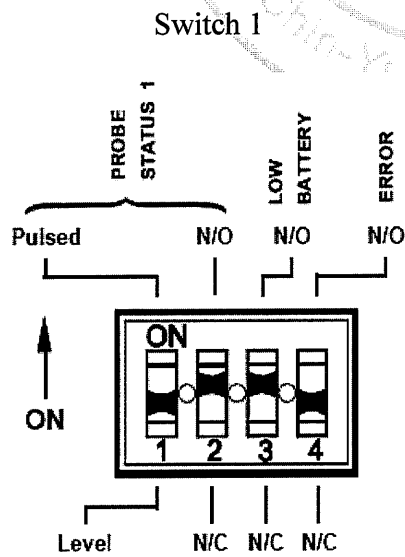
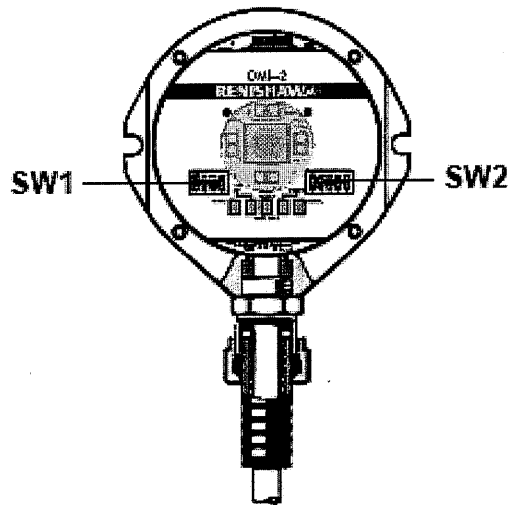
(圖片引用：Renishaw OMP60 工件量測系統中文技術資料)

表 3-2 OMI-2 開關設定說明表

 <p>A technical drawing of the OMI-2 switch. The switch is cylindrical with a lens on the front. Two screws are shown being removed from the top and bottom of the lens housing. The top screw is labeled 'A' and the bottom screw is labeled 'B'. The brand name 'RENSHAM' is visible on the lens housing.</p>	<p>步驟一：取出 A、B 螺栓。</p>
 <p>A technical drawing of the OMI-2 switch with the lens cover removed. The lens cover is shown being lifted away from the switch. The lens cover is labeled 'A'. The opening in the switch housing is labeled 'Window'. The brand name 'RENSHAM' is visible on the lens cover. The text 'OIL' is also visible on the lens cover.</p>	<p>步驟二：取下鏡面蓋。 (取出時請勿旋轉以免損壞油封環)</p>



步驟三：取出面板

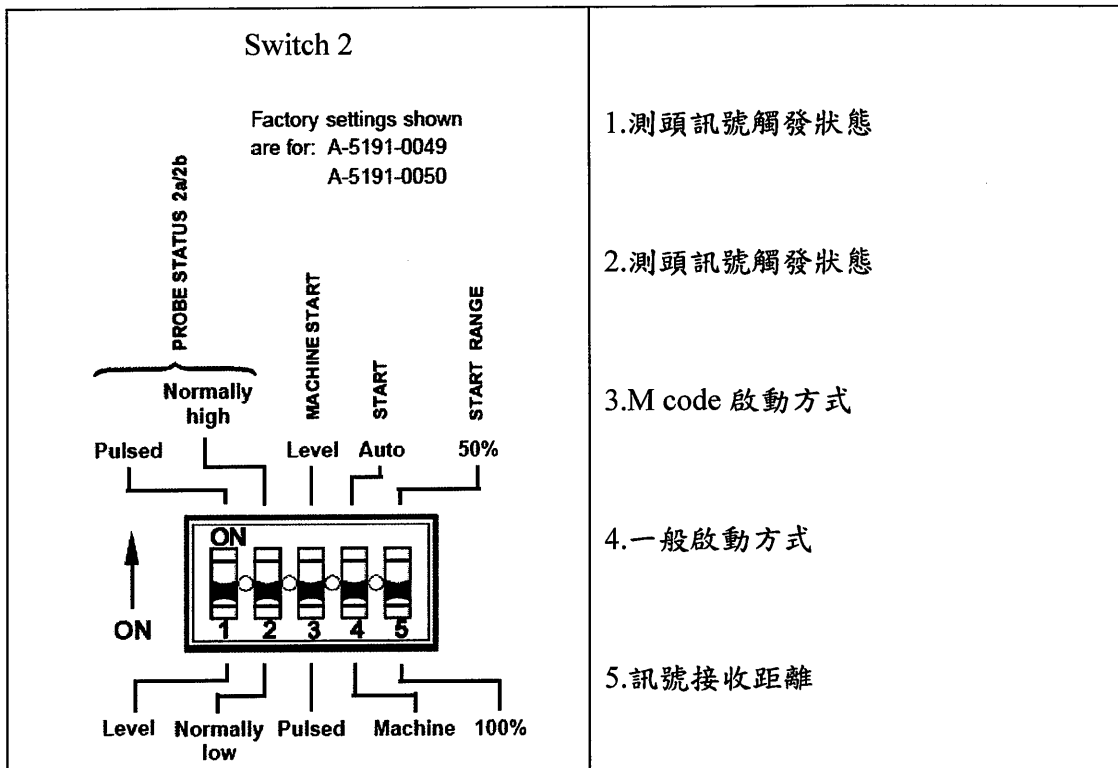


1. 訊號觸發狀態

2. 訊號觸發狀態

3. 低電壓異警顯示開關

4. 異警訊號顯示開關



1. 測頭訊號觸發狀態
2. 測頭訊號觸發狀態
3. M code 啟動方式
4. 一般啟動方式
5. 訊號接收距離

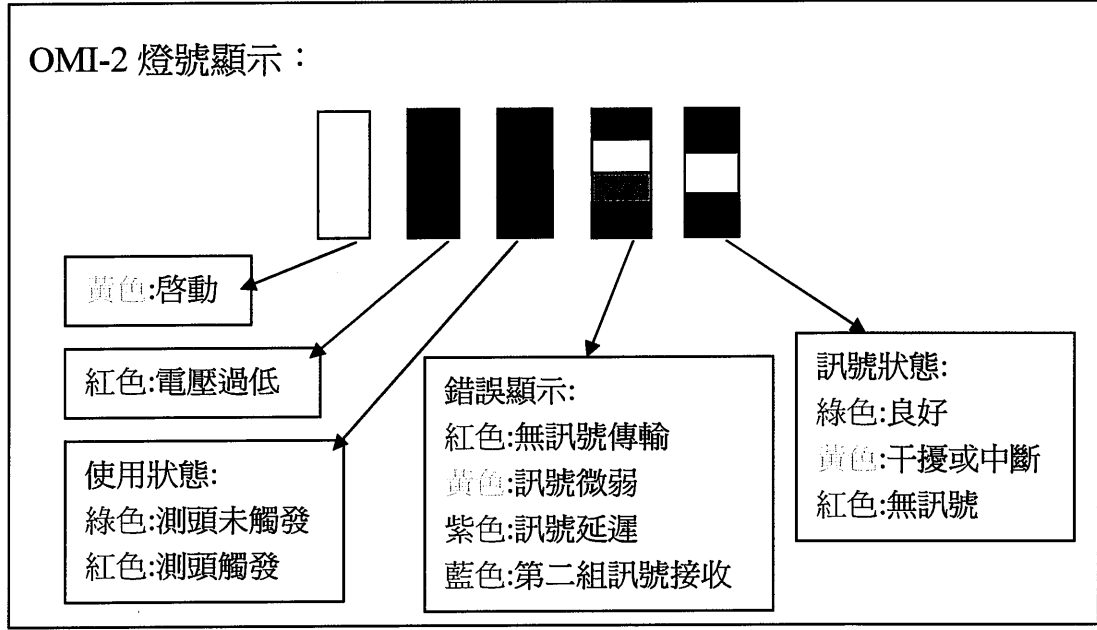


圖 3- 4 OMI-2 燈號

(圖片引用：Renishaw OMP60 工件量測系統中文技術資料)

3.1.3 CNC 立式加工中心機

本實驗採用一 CNC 立式加工中心機(LV117, Pinnacle)測試，其設備如圖 3-5 所示，規格如表 3-3 所示。

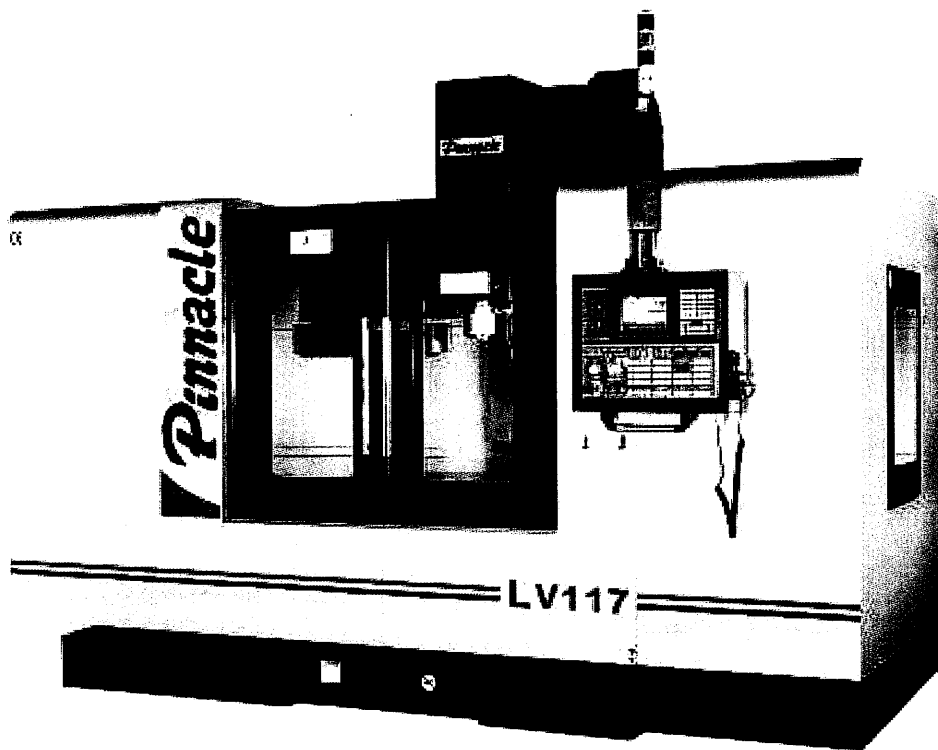


圖 3-5 CNC 立式加工中心機

(圖片引用：嵩富機具廠有限公司 <http://www.pinnacle-mc.com>)

表 3- 3 LV117 立式加工中心機規格

型號 Model / 規格 Specification	LV117
工作台尺寸(mm)	1300x700
行程範圍(X x Y x Z mm)	1140x710x610
主軸型式	BT40
主軸內徑(mm)	Ø70
主軸中心到立柱(mm)	760
主軸轉速(rpm) 皮帶式	40~8000
快速進給率(X/Y/Z 軸，米/分)	30/30/24
切削速率(X/Y/Z 軸，mm/分)	10000
伺服馬達(FANUC)	β22/2000
刀庫型式	圓盤式
凸軸型式	刀臂式
刀具數量(支)	24
刀具最大直徑(mm)	Ø90
電壓	220V

機器重量(Kgs)	9000
佔地面積(長 x 寬 mm)	3250x3080

(內容引用：嵩富機具廠有限公司 <http://www.pinnacle-mc.com>)

機器特性：

1. 主要機器結構體完全採用高級米漢納鑄鐵(GB300)製成，經回火處理以消除應力，硬度超過 190HB。
2. X 軸及 Z 軸配置六個滑塊以確保主軸加工時之穩定。
3. Y 軸(底座)採用四滑道設計，配置 35mm 滾柱型線柱滑軌，穩定性優異。
4. X、Y、Z 軸採用 C3 級 40mm 滾珠螺桿傳動。
5. X、Z 軸滑道配置 45mm 滾柱型線性滑軌，穩定性優異。

3.1.4 控制器 FANUC 0I-MD

1.FANUC 成立於 1986 年 12 月，為了回報台灣工具機業界各位的深情厚意與期待，於 1999 年完成了一個具有最新產品展示之技術中心，以新技術中心之開啟，期望能更進一步加強與改善日本 FANUC 產品的販賣、技術支援與服務。台灣發那科自動化股份有限公司除了販賣 CNC 數值控制器系統、伺服馬達系統與雷射發振器系統外，並提供該商品的售後維修服務。

2.具有豐富機能可對應標準型工具機，高可靠度高成本效益 CNC

FANUC Series 0i/0i Mate-MODEL D

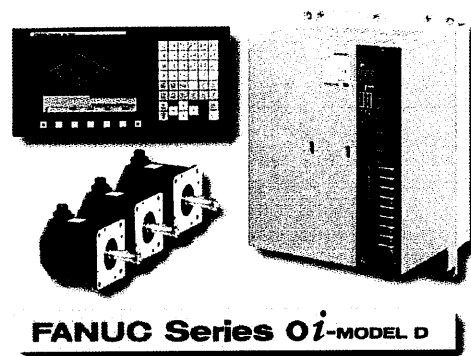


圖 3- 6 FANUC 0I-MD

(圖片引用：台灣發那科自動化股份有限公司

<http://www.fanuctaiwan.com.tw/index00.asp>)

超小型、超薄型 CNC

利用大規模集成系統 LSI 與最先進的裝配技術實現了 CNC 印刷電路板的小型化，並使之與顯示器一體化。從而實現了厚度僅 70mm(無擴充插槽)的超薄型 CNC。

強大的內藏 PMC

機械的順序控制及周邊機器用高速且大容量的內藏 PMC。

FANUC 串列式伺服匯流排 FSSB

CNC 控制部及複數的伺服驅動器間以光纖連接的高速串列式匯流排。

可做高速資料傳送的 FANUC I/O LINK

FANUC I/O LINK 是各種的 I/O 以 PMC 做串列式連接的 I/O 網路、可對應各式的 I/O。

高信賴性硬體

與零件製造廠一起開發經得起嚴酷的 FA 環境及具有高可靠度的零件、只採用經過評價測試合格的零件。

3.1.5 塊規

塊規的歷史

1890 年，瑞典兵工廠的一位機工領班 H. Ellstrom，首先製造出兩面相互平行的鋼質塊規，用於量測尺寸。但由於這些塊規數量極少，無法滿足各種工件尺寸的量測需求，於是在 1898 年與 Ellstrom 同部門的 Carl Edvard Johansson，製造出一系列大小不同尺寸的塊規，以滿足不同尺寸的量測需要。這個發明在 1901 年以「精密量測塊規組」獲得專利。

但是當時塊規是以手工方式製作，成本頗高，而未被廣泛使用。後來美國國家標準局的 William E. Hoke 將塊規改用機械加工方式生產，使得塊規能夠大量製造，因此才廣受工業界的重視與應用。

塊規介紹

塊規是一種用於精密量測的標準工具，可以用做長度量測的標準件。塊規大部分以合金鋼、工具鋼等耐磨之材質製成，外形通常是長方體，其六面中有一對相對的兩面是實際使用的量測面，以極高的加工精度製成，使用時必須先進行清潔，並不得以手碰觸。另四面為側

面，表面精度可以較量測面低，除了做為手持處外，也會刻上該塊規之基本資料如長度等做為辨識。

塊規通常以數十到上百個不同尺寸為一組，可用扭合方式相互結合而成各種不同尺寸，以因應不同的待測尺寸。

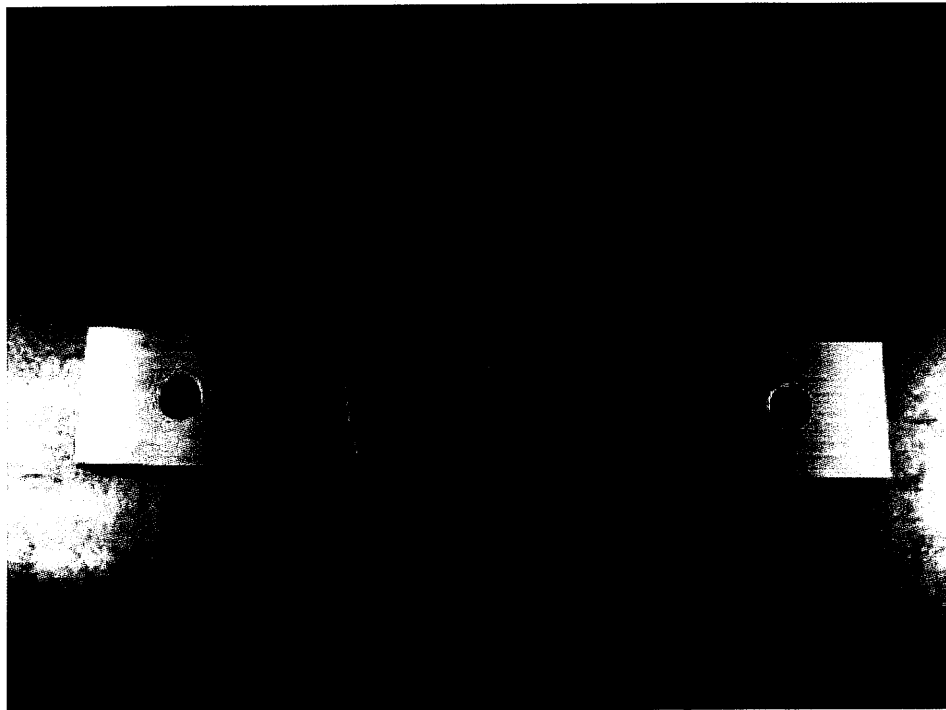


圖 3-7 標準塊規

3.2 熱變位量測方式

1. 在正進行準備工作的量測機台其中的裝置”主軸”上安裝 OMP60 工件量測系統，將 OMP60 刀具長度輸入到刀具補償表(圖 3-8)中。

番号	形状 (H)	摩耗 (H)	形状 (D)	摩耗 (D)
001	0.000	0.000	0.000	0.000
002	0.000	0.000	0.000	0.000
003	0.000	0.000	0.000	0.000
004	0.000	0.000	0.000	0.000
005	0.000	0.000	0.000	0.000
006	0.000	0.000	0.000	0.000
007	0.000	0.000	0.000	0.000
008	0.000	0.000	0.000	0.000
相對座標 X		322.098	Y	-499.881
Z		-502.278		
S 0 L 0%				
MEM	***	***	***	09:08:37
補正	設定	座標系	(操作)	

圖 3-8 刀具補償表

2. 將標準的量具”塊規”，使其平放置於工作台面，並且以千分錶量測其平面度，再以中心規(圖 3-9)分別量測塊規的左、右、後、前，設定為 G54 工作座標系原點(圖 3-10)，做為量測程式執行時所運算的基準點。

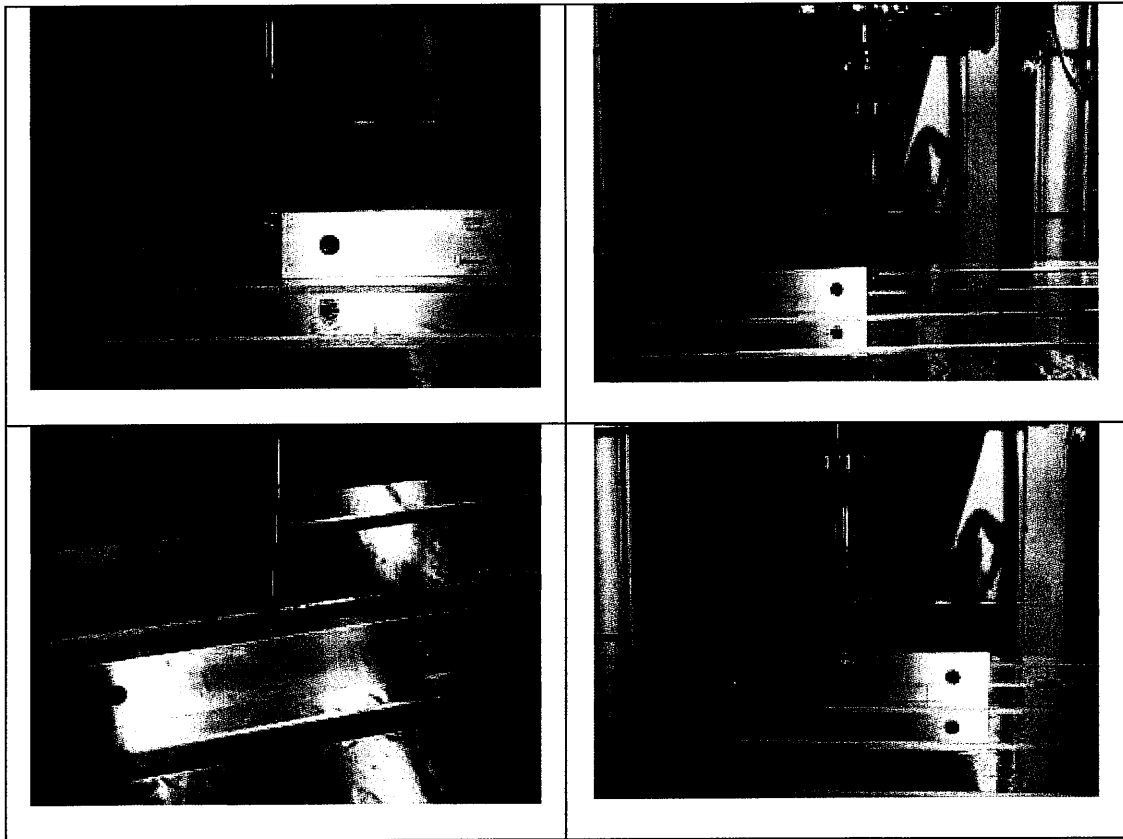


圖 3-9 中心規量測

(G54)					
番号		値	番号		値
00	X	0.000	02	X	325.000
EXT	Y	0.000	G55	Y	-280.000
	Z	0.000		Z	0.000
01	X	0.000	03	X	325.000
G54	Y	0.000	G56	Y	-280.000
	Z	0.000		Z	0.000

MEM				****	***	***	S	0L	0%
				09:09:13					
補正	設定	座標系			(操作)	+			

圖 3-10 座標系設定

3.讓正在運轉中機台的”主軸”旋轉 6000 Rpm 後，每運轉 25 分鐘，再停止主軸後，更換刀具為 OMP60 進行 Z 軸的誤差量測，量測完後，會自動將所量測到的數值記錄到預先設定之變數中，範例程式如表 3-4 所示：

表 3-4 量測範例程式

程式碼	說明(功能)
G17 G40 G49 G80 G90 G54 G91 G28 Z0 T01 M06 S6000 M03 G90 G00 X0. Y0. G43 Z20. H01 G4 X1500. M5 G91 G28 Z0	暫停 25 分鐘 主軸停止
T02 M6 G43 Z20. H02 G65 P9014 Z5. F2000. G65 P9017 Z0. T3. G65 P9014 Z100. F2000.	換成 OMP60 位移保護移動到 Z 軸校正 面上方 5mm 處 Z 軸長度校正 Z0=基準面為 Z0 T3=校正長度值補正 到 3 號補正號數

4.量測時間設定總時程為 10 小時，每 25 分鐘進行換刀，再量測，將所量測到的 25 個數據統計後，做為熱變位的誤差補償依據，量測方式照片如圖 3-11 所示。

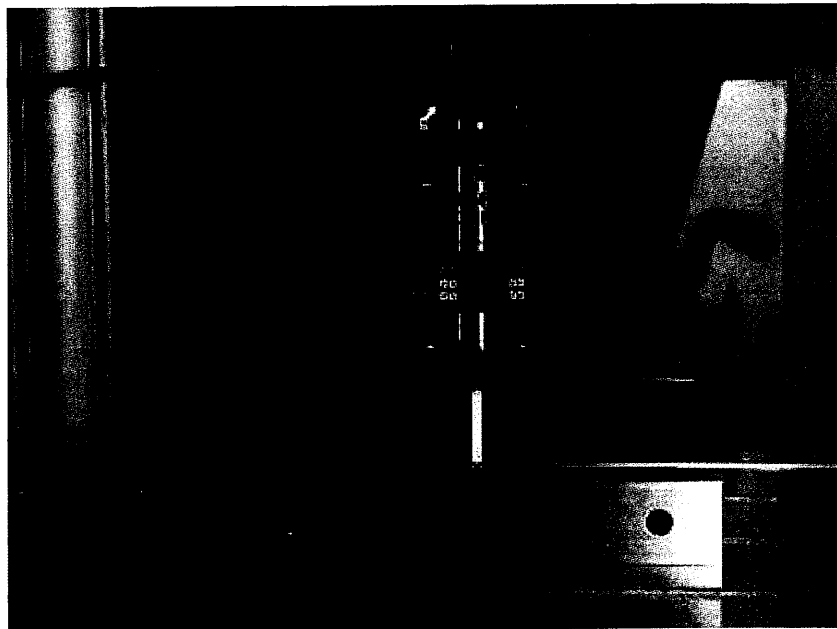


圖 3-11 量測方式

3.3 系統架構圖

依流程，先將主軸啟動以 6000 rpm 運轉 25 分鐘，把刀具更換成 OMP60，以進行量測，先前預先設定好的塊規基準點，再將量測的數值儲存到控制器 NC 的變數中。

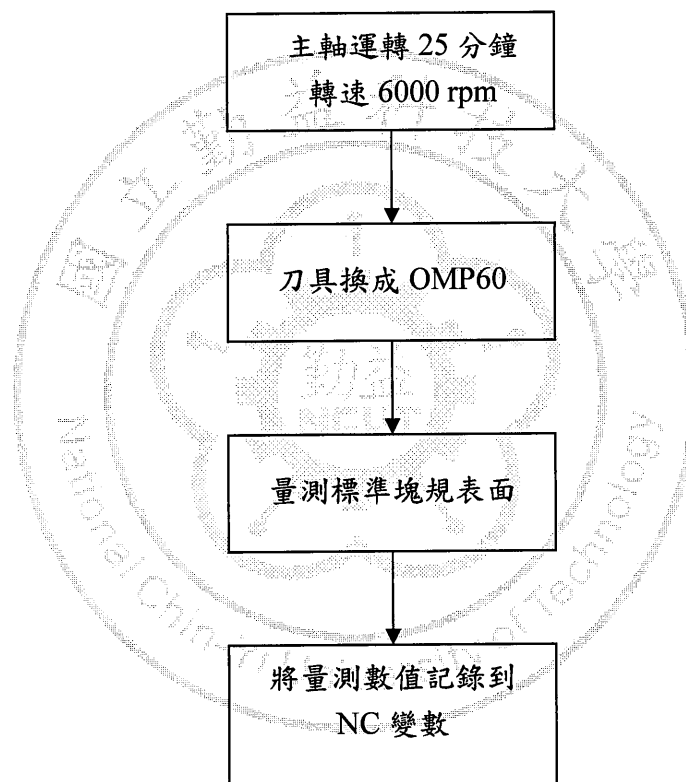


圖 3-12 實驗架構圖

第四章 實驗結果

4.1 實驗環境說明

此篇論文研究以內藏主軸為主，搭配齒輪式主軸和直接式主軸作為輔助，研究三種不同類型主軸熱伸長的差異。

內藏式主軸：

每 25 分鐘量測一次，得到從番號 500 到 524 的數據(圖 4-1 和圖 4-2)，量測的最大 Z 軸伸長量為 0.11，表示主軸在運轉時有熱伸長的問題，加工時間約 200 分鐘後伸長量趨於穩定，內藏式主軸的內部有兩個主要熱源，一是主軸馬達，另一個是主軸軸承，與其他一般的主軸架構不同，內藏式主軸最突出的問題之一是位於主軸內部馬達的發熱，由於主軸軸承位於馬達前後位置附近，馬達的發熱會直接影響軸承的運轉精度與使用壽命，因此，如果馬達的散熱問題解決不好，甚至於還會影響機台加工時的可靠度，運用在實際加工時，需考慮加工時間，作為參考，以減少誤差的產生。

番号	値	番号	値	
00500	0.0000	00508	0.0980	
00501	0.0750	00509	0.0980	
00502	0.0800	00510	0.1050	
00503	0.0850	00511	0.1100	
00504	0.0890	00512	0.1000	
00505	0.0940	00513	0.0995	
00506	0.0960	00514	0.0975	
00507	0.0970	00515	0.0965	
相對座標	X	0.000	Y	0.000
	Z	0.000		
S 0L 0%				
MDI **** * * *		13:17:18		
(NO. SRH		C 入力	輸入	

圖 4-1 內藏式主軸數據-1

番号	値	番号	値	
00516	0.0950	00524	0.0694	
00517	0.0932	00525	0.0000	
00518	0.0913	00526	0.0000	
00519	0.0868	00527	0.0000	
00520	0.0841	00528	0.0000	
00521	0.0797	00529	0.0000	
00522	0.0765	00530	0.0000	
00523	0.0726	00531	0.0000	
相對座標	X	0.000	Y	0.000
	Z	0.000		
S 0L 0%				
MDI **** * * *		13:17:48		
(NO. SRH		C 入力	輸入	

圖 4-2 內藏式主軸數據-2

齒輪式主軸：

每 25 分鐘量測一次，得到從番號 532 到 556 的數據(圖 4-3 和圖 4-4)，相對於內藏式主軸只有正伸長量，在量測齒輪主軸時，發現了負伸長量，顯示齒輪式主軸的特性，若用於精加工等需要精度的切削時，會有明顯不穩定的情形發生，所以不齒輪式主軸並不適合用於高精度的切削加工。

番号	值	番号	值	
00532	0.0000	00540	0.0306	
00533	0.0263	00541	0.0257	
00534	0.0332	00542	0.0225	
00535	0.0384	00543	0.0175	
00536	0.0412	00544	0.0148	
00537	0.0370	00545	0.0090	
00538	0.0361	00546	0.0060	
00539	0.0350	00547	-0.0038	
相對座標	X	0.000	Y	0.000
	Z	0.000		
S 0 L 0%				
EDIT **** ** *		13:49:08		
[NO. SRH]	[C 入力]	[輸入]	[F]	

圖 4-3 齒輪式主軸數據-1

番号	値	番号	値
00548	-0.0069	00556	-0.0258
00549	-0.0130	00557	0.0000
00550	-0.0118	00558	0.0000
00551	-0.0134	00559	0.0000
00552	-0.0185	00560	0.0000
00553	-0.0172	00561	0.0000
00554	-0.0210	00562	0.0000
00555	-0.0223	00563	0.0000
相对座標 X 0.000 Y 0.000 Z 0.000			
S 0 L 0%			
EDIT **** * * * * *		13:49:34	
(NO. SRH		C 入力	輸入

圖 4-4 齒輪式主軸數據-2

直結式主軸：

每 25 分鐘量測一次，得到從番號 564 到 588 的數據(圖 4-5 和圖 4-6)，直結式主軸的是剛性連結，可將主軸馬達的功率完整傳輸到主軸，所以聯軸器的校正結果，將會明顯的影響到主軸的溫升變化，以量測結果看來，主軸的熱伸長誤差量相較於內藏式主軸大，最大的伸長量為 0.15。

番号	值	番号	值
00564	0.0017	00572	0.1289
00565	0.0400	00573	0.1433
00566	0.0534	00574	0.1500
00567	0.0780	00575	0.1417
00568	0.0956	00576	0.1384
00569	0.1232	00577	0.1335
00570	0.1100	00578	0.1199
00571	0.1182	00579	0.1012
相對座標 X 199.500 Y -207.372			
Z 0.013			
S 0 L 0%			
REF	****	***	***
			19:15:16
MACRO	MENU	OPR	(操作)

圖 4-5 直結式主軸數據-1

番号	値	番号	値
00580	0.0803	00588	-0.0030
00581	0.0639	00589	0.0000
00582	0.0484	00590	0.0000
00583	0.0357	00591	0.0000
00584	0.0233	00592	0.0000
00585	0.0195	00593	0.0000
00586	0.0103	00594	0.0000
00587	0.0045	00595	0.0000
相对座標 X 199.500 Y -207.372 Z 0.013			
S 0 L 0%			
REF	****	***	***
			19:15:40
MACRO	MENU	OPR	(操作) +

圖 4-6 直結式主軸數據-2

4.2 實際應用方式

說明：

1.在進行加工前，先用 OMP60 量測一基準點當成量測的依據，此基準點的位置，應該位於工作台上，且加工時不會干涉的位置最佳。

2.在開始加工後，先加工粗加工等不需精度的工法，讓主軸的熱變位自然的伸長。

3.完成精加工工法之外的加工後，再加工精加工前，再以 OMP60 量測之前量測的基準點，會得到一數值，以此數值減掉步驟 1 量測所得的數值，即可得到誤差值，再將此誤差值，輸入到座標系統的 EXT Z 軸(圖 4-7)位置，即完成主軸熱變位的補正，可提高加工的精度，減少誤差過多的情況。

(G54)					
番号		值	番号		值
00	X	0.000	02	X	325.000
EXT	Y	0.000	G55	Y	-280.000
	Z	0.000		Z	0.000
01	X	0.000	03	X	325.000
G54	Y	0.000	G56	Y	-280.000
	Z	0.000		Z	0.000

MEM		****	***	***	09:09:13	S	0L	0%
補正	設定	座標系		(操作)	+			

圖 4-7 Z 軸補償位置圖

在進行加工前先以 OMP60 量測一個基準點，開始加工，以粗加工為主，讓主軸自然的伸長，在加工精加工前，再以 OMP60 量測一開始設定的基準點，計算出兩者的差距，再執行精加工，可有效提升加工精度。

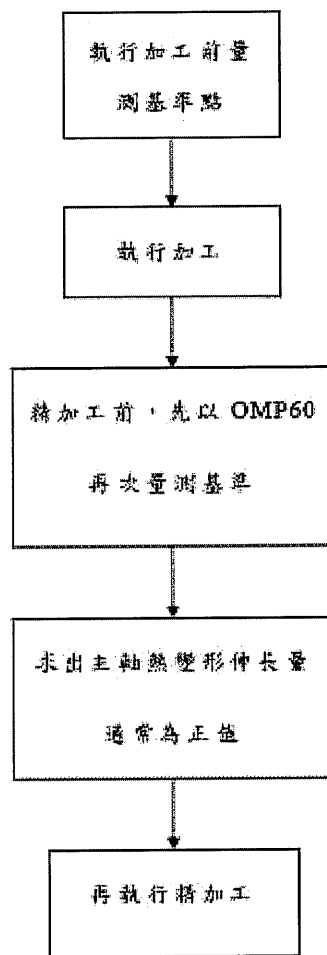


圖 4-8 系統實務流程圖

第五章 結論

本研究只考慮主軸結構本身的變形，但加工中工件本身也會產生溫昇與熱膨脹量，會影響加工精度，如何將工件的熱變形加入熱變位預測模型中仍有待研究，在實際切削中刀具的磨耗與變形均影響加工工件精度，若能根據刀具之磨耗程度對控制器補償，並與熱變位補償系統整合，則能更精確的加工工件。

工具機本身的誤差除了加工熱變形之外，幾何誤差也是工具母機重要的誤差，因此幾何誤差的量測與即時補償技術的開發是未來研究的重要目標。

- 1.熱誤差是精密工作機械永遠必須面對的議題。
- 2.積極的熱抑制與消極的熱補償，皆是企圖解決熱誤差問題的方法；但並非獨立作業，應互相調和。
- 3.設計階段：同步考量熱源佈局、結構幾何、抑制策略。
- 4.補償階段：感測及動態模型技術是關鍵。

參考文獻

- [1] 高銘哲，2006年，精密刀具磨床之主軸熱變位暨刀具定位之探討，國立雲林科技大學，碩士論文。
- [2] 財團法人精密機械研究發展中心，技術通報(第 182 期)，溫升熱變形補償在高精度車床之應用，熱源的種類與工具機熱變形。
- [3] 財團法人精密機械研究發展中心，技術通報(第 182 期)，溫升熱變形補償在高精度車床之應用，溫升熱變位改善方法。
- [4] 財團法人精密機械研究發展中心，技術通報(第 184 期)，內藏式主軸概論，主軸架構基本介紹。
- [5] 工具機主軸技術探討與未來展望 機械月刊 2004 年 3 月號。
- [6] 資料挖掘技術於 CNC 工具機熱變形補償之應用 機械月刊 2007 年 9 月號。
- [7] Renishaw OMP60 工件量測系統中文技術資料。
- [8] 蘇春維，2009 年，加工中心機溫升熱變形補償技術 財團法人精密機械研究發展中心。
- [9] 1.溫升熱變形 2.主軸迴轉精度 財團法人精密機械研究發展中心 2008 年。

- [10] 歐峰銘，2008年，工具機熱誤差抑制與補償 工業技術研究院。
- [11] 陳俊榮，2000年，高速主軸之熱變形分析及量測，碩士論文。
- [12] 李世崇，2003年，應用類神經網路於立式綜合加工機主軸熱變位之預測研究，碩士論文。
- [13] 賴永祥，March 8 2008，工具機主軸技術研討會，主軸原理與量測技術。
- [14] 范光照，工具機熱誤差補償技術 機械月刊第 25 卷第三期。
- [15] 台灣發那科自動化股份有限公司
<http://www.fanuctaiwan.com.tw/index00.asp>
- [16] 嵩富機具廠有限公司
<http://www.pinnacle-mc.com>
- [17] 維基百科 塊規
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A1%8A%E8%A6%8F>
- [18] 國際標準化組織 ISO 230-1:1996, Test code for machine tools Part1. Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions.

[19] I. A.,Demirzic, 1982, A finite Volume Method for Computation of Fluid Flow in Complex Geometries, PHD thesis, University of London.

[20] PHOENICS, 2001, Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series, Concentration · Heat and Monentum Limited (CHAM), London, United Kingdom.

[21] UNIC, 1995, UNIC General Pyrpose CFD Design Tool , Engineering Sciences , Inc. , Alabama , U.S.A.

[22] FIDAP 7.0 , 2001, Fluid Dynamics Analysis Package, Fluid Dynamic International (FDI),IL, U.S.A.

[23] Y. Takeuti and Y. Tanigawa, Jul. 1978 , “ A New Numerical Method for Transient Thermal Stress Problem ”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 14,pp.987-1000.

作者簡歷

姓名：張文鴻

籍貫：台灣省台中市

出生日期：中華民國 68 年 07 月 16 日

學歷：

台中縣立豐東國民中學

私立新民高級工業職業學校 資訊科

國立勤益技術學院 電子工程科計算機工程組

工作經歷：

最近工作：中區職業訓局 學員 民國97年06月~民國98年02月

前一工作：學園誠電腦 工程師 民國91年10月~民國93年10月

現職：嵩富機具廠有限公司 工程師

