

第三章 考慮機台變形之立式切削中心機溫升熱

變形測試與分析

3.1 前言

熱脹冷縮為大多數金屬材料對溫度之特性，以鋼或鑄鐵為結構材料的立式切削中心機對溫度的反應也不例外，而立式切削中心機在進行加工過程中，無論馬達、液壓系統和機械摩擦都是在進行能量的轉換，不論轉換途徑為何，大多變成了熱，立式切削中心機的溫升和熱變形即是由各種熱源所引起，而本測試乃在探討主軸在連續運轉下，本身產生的熱源對於精度的影響。



3.2 立式切削中心機簡介

本研究將探討的對象為一立式切削中心機（如圖 3.1 所示），結構如表 3.1 所示。其功能主軸最高轉速為 $6,000\text{min}^{-1}$ ，X、Y、Z 軸的進給行程為 1600mm、800mm 與 800mm，X、Y 軸的快速進給速率為 $15,000\text{mm}/\text{min}$ ，Z 軸的快速進給速率為 $12,000\text{mm}/\text{min}$ ，X、Y、Z 軸的切削進給速率為 $8,000\text{mm}/\text{min}$ 。本研究就針對 CNC 立式切削中心機熱變形作一個量測與分析。以提供線上量測系統與熱分析，以獲得熱

變形誤差模型。

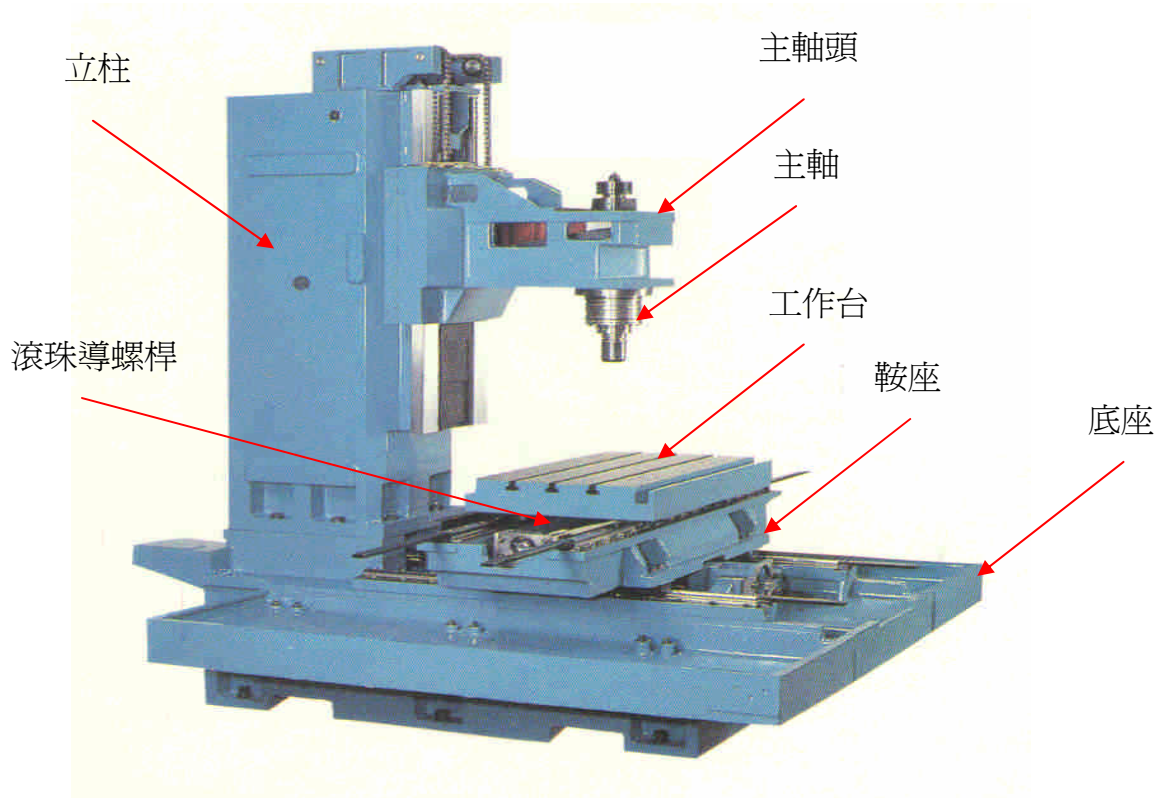


圖 3.1 立式切削中心機

名稱	定義
工作台	用於承載工件，在鞍座上作X軸方向位移
鞍座	又稱十字滑座，在底座上作Y軸方向位移
底座	支撐全機之基座，Y軸滑軌與滾珠螺桿安裝於底座上
立柱	固定於底座上，Z軸滑軌與滾珠螺桿安裝於立柱上
主軸頭	主軸固定其上，在立柱上作Z軸方向位移
X軸滾珠導螺桿	固定於鞍座，驅動工作作X軸方向位移
Y軸滾珠導螺桿	固定於底座，驅動鞍座作Y軸方向位移
Z軸滾珠導螺桿	固定於立柱，驅動主軸頭作Z軸方向位移

表 3.1 立式切削中心機結構名稱定義

3.3 立式切削中心機溫升熱變形量測

3.3.1 立式切削中心機溫升熱變形實驗方法

(1)參考採用較多使用的CNC綜合加工機性能評價方法，即美國國家標準ANSI/ASME(The American Society Mechanical Engineers)及國際標準ISO(International Organization Standardization)標準，使符合商業買賣活動中之標準驗收方法，具有較適合廠商需求之實用性。

本研究測試主軸熱穩定性之方法參考之標準為 ANSI/ASNE B5.54-1992，“Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Center,”中之第5.7.3節“Spindle Thermal Stability Tests，其與 ISO 230 Part 3，“Test conditions for Metal Cutting Machining Tools，Evaluations of thermal Effects”，及早先之 ISO 10791-10 Draft-1990 "Test Code for Machining Centers . Part 10 . Evaluation of the thermal distortions “之相關部分完全相容。

- (2)將機械放置於具有恆溫環境、沒有恆溫環境之下，進行進給軸因環境溫度而產生位置漂移測試。
- (3)以輔助配件方式軸座的冷卻裝置及光學尺加裝的方式來觀察看

看是否具有降低位置漂移的效果。

(4)主軸旋轉溫升熱變形量測:將主軸設定在主軸最高轉速的 75% 下運轉，其運轉時間都為 6~24 小時，記錄溫度上升量與主軸與 X、Y、Z 軸向的位移量。

(5)進給運動溫升熱位移量測:將進給速率設定由模具加工廠商提供加工模具程式進行模擬加工測試。其運轉時間都為 8~24 小時，記錄溫度上升量與 Y 軸向的位移量。

(6)主軸加進給溫升熱位移實驗:將主軸與進給同時運轉，記錄下溫度上升量與 X、Y、Z 軸向的變位量。



3.3.2 熱變形量測系統及測試儀器介紹

溫度與軸向變位則利用 API(Automated Precision, Inc.)溫升熱變形量測系統來進行，因此以下介紹 API 儀器架設說明：非接觸位移計量測設備:使用非接觸位移計，利用治具將其固定在工作臺上，並將測試棒夾於主軸上，分別量測主軸與工作臺間的相對位移（如圖 3.2 及圖 3.3 所示）。

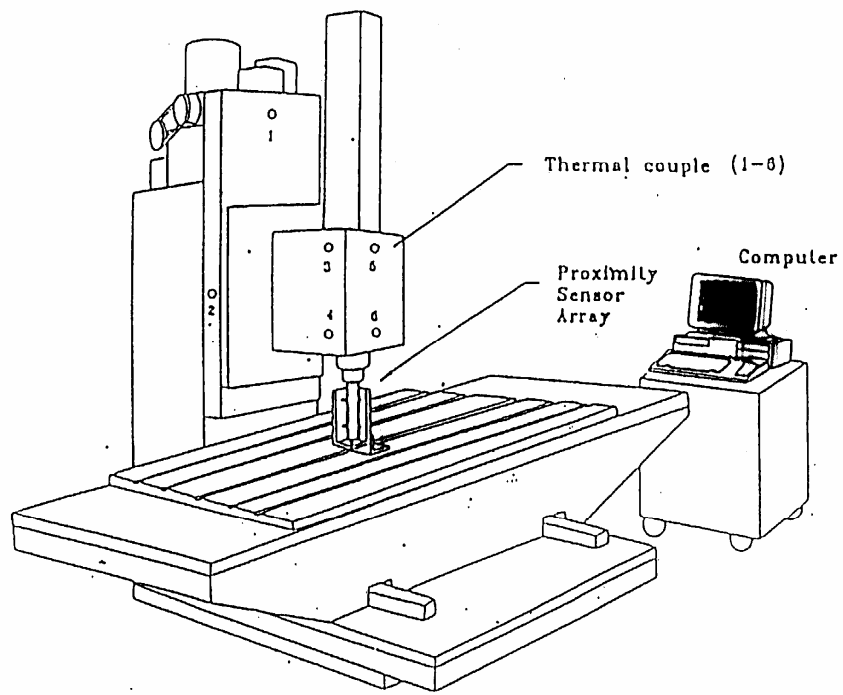


圖3.2 非接觸式位移計量測熱變形設備簡圖



圖3.3 非接觸式位移計量測熱變形詳細構造圖

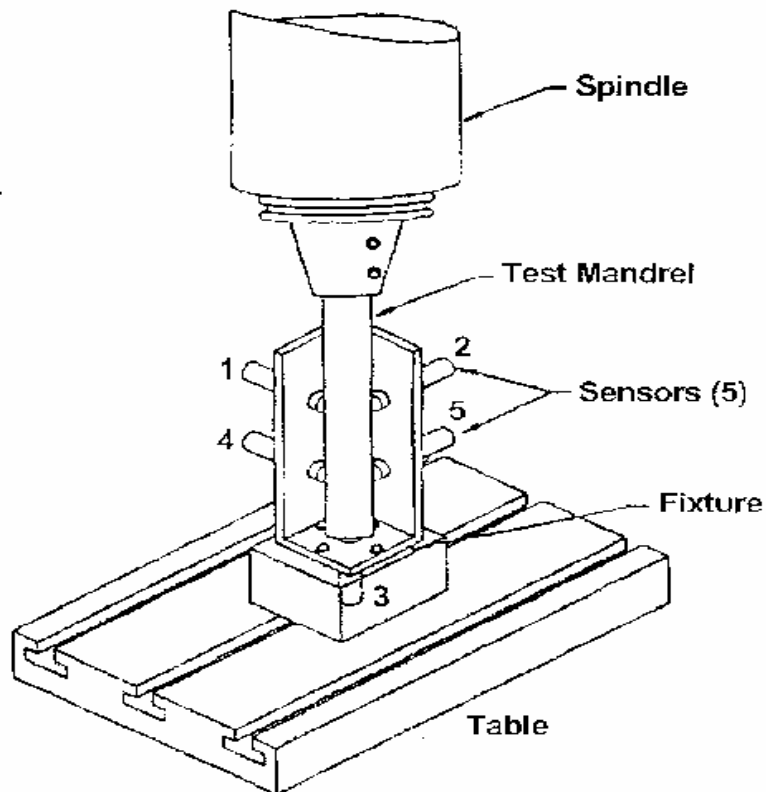


圖3.4 非接觸式位移計量測熱變形位置代號圖

圖3.4中，S1、S4兩個非接觸式位移計量測X軸方向的熱位移，S2、S5兩個非接觸式位移計量測Y軸方向的熱位移，S3非接觸式位移計量測Z方向的熱位移。在X、Y兩軸方向上分別用了兩個非接觸式位移計，主要是量測機械X、Y兩軸方向的傾斜量。

3.3.3 溫度感測器量測設備及位置佈置圖

此實驗量測共使用了16個熱電偶(thermocouple)溫度感測器，將這些熱電偶(thermocouple)溫度感測器吸附於結構表面上其位置

如表3.2所示，量測主軸頭與主要結構件的溫升，各熱電偶溫度感測器貼附於立式切削中心機上的位置（如圖3.5所示）。

16：環境溫度

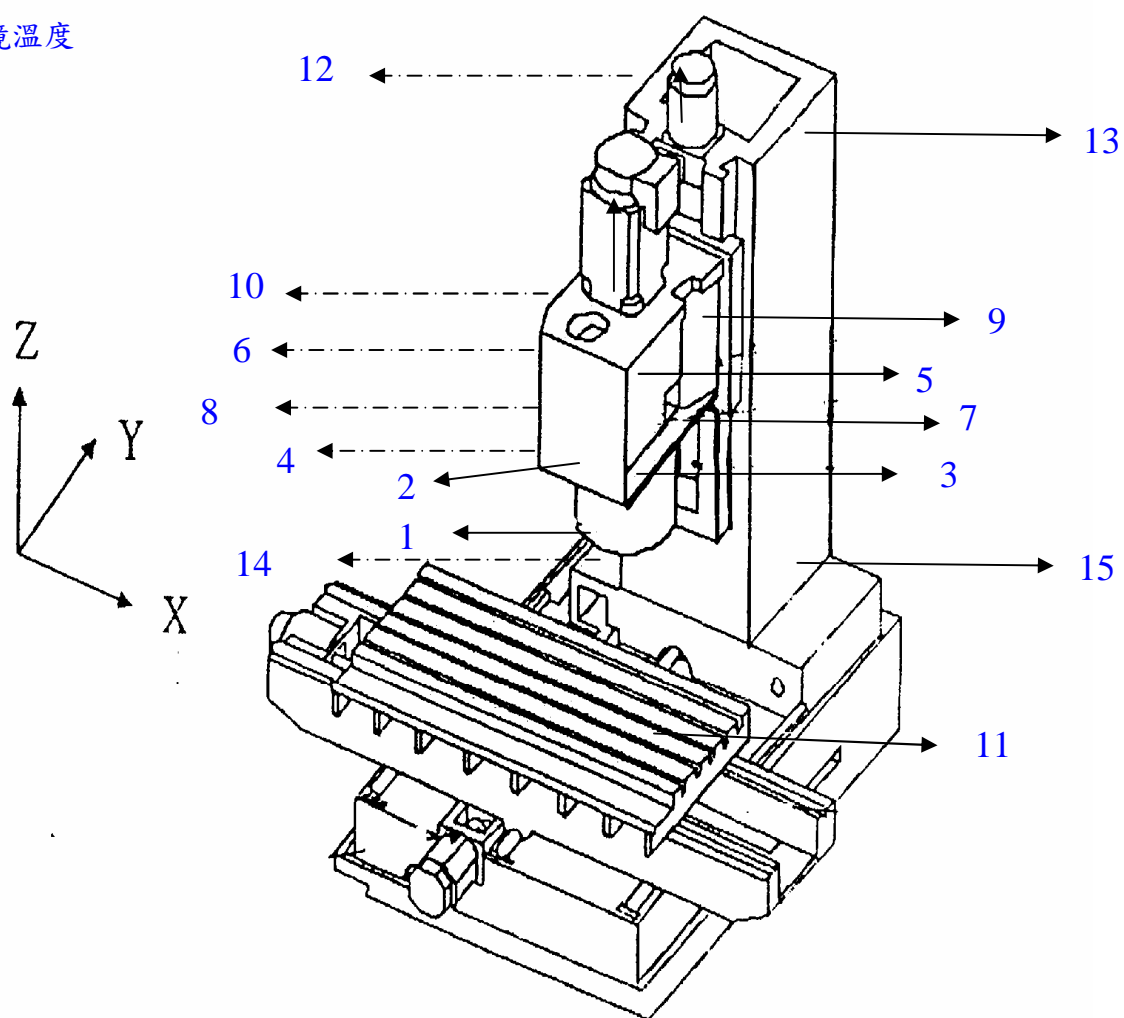


圖3.5 溫度感測器位置圖

感測器號碼	吸 附 位 置
T1	主軸套下緣前方
T2	主軸頭部下面前方
T3	主軸頭部右邊側前方下緣
T4	主軸頭部左邊側前方下緣
T5	主軸頭部右邊側前方上緣
T6	主軸頭部左邊側前方上緣
T7	主軸頭部右邊側後方下緣
T8	主軸頭部左邊側後方下緣
T9	主軸頭部右邊側後方上緣
T10	主軸頭部左邊側後方上緣
T11	工作台面
T12	立柱上端左側
T13	立柱上端右側
T14	立柱下方左側
T15	立柱下方右側
T16	環境溫度

表3.2 溫度感測器貼附位置列表

3.4 立式切削中心機溫升熱變形數學模型建立

我們以多變數線性迴歸來建立主軸溫升與熱誤差之間的關係式，其中以 Y 軸來表示主軸溫升位移，X 軸表示量測溫度點之溫度變化，用此關係式來建立溫升模型，進行加工補償。然而，並非所有溫度量測點之溫升變化對整體熱誤差皆有所貢獻，因此，如何將較明顯的溫度點找出，來表達主軸溫升所導致的熱誤差，則需進一步進行相關性測試。

3.4.1 理論基礎－齊次轉換模型(Homogeneous Transform Matrix, HTM)

於工具機誤差方面，此外我們亦可利用 HTM 齊次轉換矩陣來表示因為轉軸及立式切削中心機床台不完美(Non-perfect)所導致的誤差。



根據 ANSI B89.3.4M 對誤差的規定，完美的轉軸(Perfect Spindle)之定義為：一個轉軸之旋轉軸對其基準的軸沒有相對運動；而完美工件(Perfect Workpiece)即意指一個工件對其旋轉軸具有完美的旋轉表面。有一個完美的轉軸方能有完美的工件，但這樣一個完美的轉軸實際上是不存在的，對一個轉軸而言會有以下幾種誤差：垂直 Z 軸的徑向運動(Radial Motion)、因為工件夾持不準的偏轉運動(Runout)，平行 Z 軸的軸向平移(Axial Motion)，對 Z 軸有

一角度誤差的偏擺誤差(Tilt Motion)等種種誤差。

為了描述運動物體的誤差及運動特性，該物體的座標系統必須相對於一參考座標系統，今透過這兩個座標系統的轉換，可計算出該物體的運動特性，而此轉換關係我們可以用一個 4x4 之齊次轉換矩陣來表示。

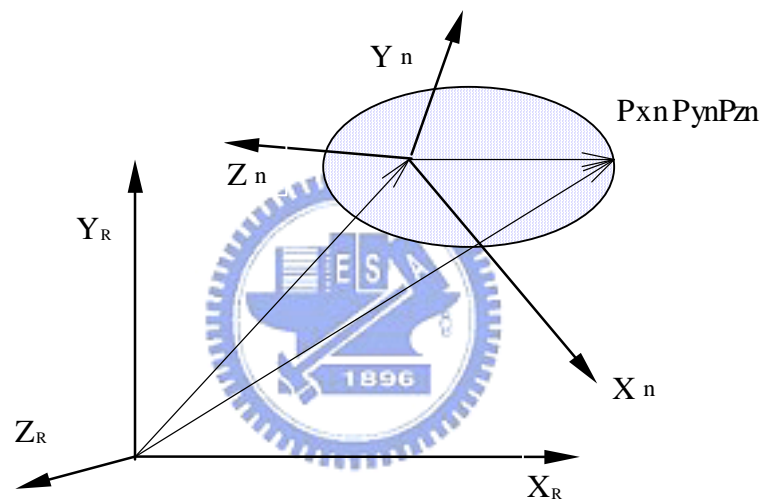


圖 3.6 剛體座標系統 (X_n Y_n Z_n) 與參考座標系統 (X_R Y_R Z_R)

P 點相對於剛體座標系統與相對於參考座標系統之轉換如下：

$$\begin{bmatrix} P_{XR} \\ P_{YR} \\ P_{ZR} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^R T_n \begin{bmatrix} P_{Xn} \\ P_{Yn} \\ P_{Zn} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$${}^R T_n = \begin{bmatrix} O_{ix} & O_{iy} & O_{iz} & X \\ O_{jx} & O_{jy} & O_{jz} & Y \\ O_{kx} & O_{ky} & O_{kz} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

${}^R T_n$ 即為剛體座標系統與參考座標系統轉換之 HTM。

對 X 軸、Y 軸、Z 軸平移或旋轉 HTM 分別如下：

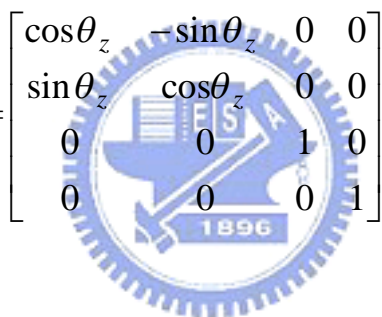
$$\text{對 X 軸平移 } x \quad T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$\text{對 Y 軸平移 } y \quad T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$\text{對 Z 軸平移 } z \quad T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$$\text{對 X 軸旋轉 } q_x \quad T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$\text{對 Y 軸旋轉 } q_y \quad T_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$\text{對 Z 軸旋轉 } q_z \quad T_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$


HTM 之乘積即表示連續的座標轉換：

$${}^0T_N = \prod_{m=1}^N T_m = T_1 T_2 T_3 \dots T_N \quad (3-9)$$

對立式切削中心機主軸而言，總共有六個自由度的誤差，如圖

3.7 中 θ_z 為 Z 軸旋轉角度、 δ_x 為 X 軸平移誤差、 δ_y 為 Y 軸平移誤差、

δ_z 為 Z 軸平移誤差、 ϵ_x 為 X 軸旋轉誤差、 ϵ_y 為 Y 軸旋轉誤差。

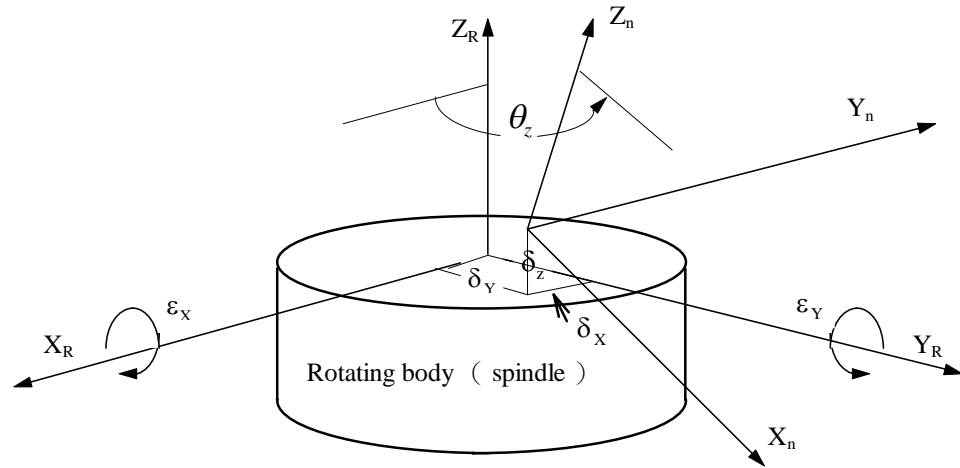


圖 3.7 立式切削中心機主軸的旋轉誤差

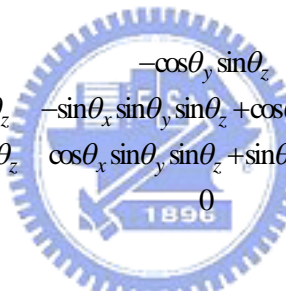
因此就立式切削中心機主軸而言，主軸誤差如下：

$${}^0T_N = \prod_{m=1}^N T_m = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad (3-10)$$

$${}^{XYZ}T_{X_1 Y_1 Z_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_y \cos\theta_z & -\cos\theta_y \sin\theta_z & \sin\theta_y & x \\ \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_z & -\sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_x \cos\theta_z & -\sin\theta_x \cos\theta_y & y \\ -\cos\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \sin\theta_x \cos\theta_z & \cos\theta_x \cos\theta_y & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$


上式中若 ε 很小，則 $\cos\varepsilon \approx 1$ ； $\sin\varepsilon \approx \varepsilon$ ，此時上式：可化簡為

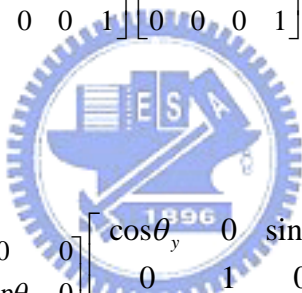
$${}^R T_{N,err} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y & \delta_x \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & -\varepsilon_x & \delta_y \\ \varepsilon_y \cos\theta_z + \varepsilon_x \sin\theta_z & \varepsilon_y \sin\theta_z + \varepsilon_x \cos\theta_z & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

對於立式切削中心機主軸而言，因為其旋轉特性， θ_z 為時間的

函數，在這裡我們以 $\theta_z(t)$ 表示，但 $\theta_z(t)$ 變化非常快，其所導致的誤差量無法即時補償，所以我們針對立式切削中心機主軸的誤差可以用(3-13)式表示之。

$${}^0T_N = \prod_{m=1}^N T_m = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 \quad (3-13)$$

$${}^{XYZ}T_{x_1y_1z_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_y & \delta_x \\ 0 & 1 & -\varepsilon_x & \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

就立式切削中心機主軸而言，其誤差值可以(3-15)表示。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{error} = {}^{XYZ}T_{X_1Y_1Z_1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

另外，就立式切削中心機伺服軸而言，其具有 X 軸與 Y 軸兩伺服軸，Y 軸架在 X 軸上，其誤差示意圖如圖 3.8 所示。

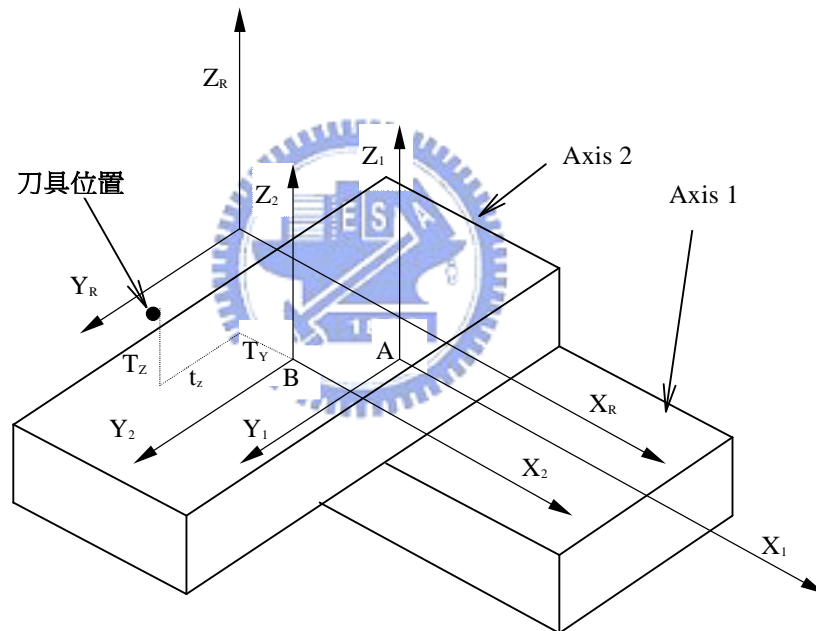


圖 3.8 雙軸之座標系統示意圖

圖 3.8 表示互相垂直之兩軸間之關係，假設 A 點(Axis 1 之座標原點)相對於參考座標系統之位置為 \$(a_1、b_1、c_1)\$；B 點(Axis 2 之座標原點)相對於參考座標系統之空間位置為 \$(a_2、b_2、c_2)\$，則根據座標

轉換建立參考座標系統與剛體座標系統之 HTM 模型可得：

$${}^R T_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z1} & \varepsilon_{y1} & a_1 + \delta_{x1} \\ \varepsilon_{z1} & 1 & -\varepsilon_{x1} & b_1 + \delta_{y1} \\ -\varepsilon_{y1} & \varepsilon_{x1} & 1 & c_1 + \delta_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z2} & \varepsilon_{y2} & a_2 + \delta_{x2} \\ \varepsilon_{z2} & 1 & -\varepsilon_{x2} & b_2 + \delta_{y2} \\ -\varepsilon_{y2} & \varepsilon_{x2} & 1 & c_2 + \delta_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

刀具之真實位置與理想位置表示如下：

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{actual}} = {}^R T_1 {}^1 T_2 \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$


$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{ideal}} = \begin{bmatrix} a_1 + a_2 + t_x \\ b_1 + b_2 + t_y \\ c_1 + c_2 + t_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

故刀具位置誤差之轉置矩陣可由(3-18)與(3-19)相減求得：

$$\begin{bmatrix} \delta_{x_t} \\ \delta_{y_t} \\ \delta_{z_t} \end{bmatrix}_{actual} = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix}_{actual} - \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix}_{ideal} \quad (3-20)$$

而對立式切削中心機而言，實際加工誤差，為刀具與工件誤差的和，可以下式(3-21)來表示：

$$\begin{bmatrix} X_\delta \\ Y_\delta \\ Z_\delta \\ 1 \end{bmatrix}_{REAL} = \begin{bmatrix} \delta_{x_t} \\ \delta_{y_t} \\ \delta_{z_t} \\ 1 \end{bmatrix}_{actual} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{error} \quad (3-21)$$

最後，考慮 (3-20) 式中，如果忽略了第二項，即 ideal 項。

整理 (3-16)、(3-17)、(3-18) 三式，可得：

$$\begin{bmatrix} \delta_{X_t} \\ \delta_{y_t} \\ \delta_{z_t} \end{bmatrix}_{actual} = \begin{bmatrix} -t_y(\varepsilon_{z1} + \varepsilon_{z2}) + t_z(\varepsilon_{y1} + \varepsilon_{y2}) - b_2\varepsilon_{z1} + c_2\varepsilon_{y1} + \delta_{x1} + \delta_{x2} \\ t_x(\varepsilon_{z1} + \varepsilon_{z2}) - t_z(\varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2}) + a_2\varepsilon_{z2} - c_2\varepsilon_{x1} + \delta_{y1} + \delta_{y2} \\ -t_x(\varepsilon_{y1} + \varepsilon_{y2}) + t_y(\varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2}) - a_2\varepsilon_{y1} + b_2\varepsilon_{x1} + \delta_{z1} + \delta_{z2} \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

上式 (3-22) 誤差矩陣中，主要由： δ_{x1} 、 δ_{y1} 、 δ_{z1} 、 ε_{x1} 、 ε_{y1} 、

ε_{z1} 、 δ_{x2} 、 δ_{y2} 、 δ_{z2} 、 ε_{x2} 、 ε_{y2} 、 ε_{z2} 等誤差合成，然因為軸 1 (Axis 1) 和軸 2 (Axis 2) 皆為旋轉軸，實際上會有角位移誤差。

最後，我們可以將自由度為 2 的『二軸卡氏座標床軌移動系統的誤差矩陣』作整理，再以下表 3.3 來說明。

由表 3.3，我們可清楚的看出熱誤差矩陣 (3-22) 中，每個影響參數之間的關係。此對於分析立式切削中心機熱誤差系統有很大的幫助。



	δ_{xt}	δ_{yt}	δ_{zt}
Axis 1 errors			
ε_{x1}	0	$-t_z - c_2$	$t_y + b_2$
ε_{y1}	$t_z + c_2$	0	$-t_x - a_2$
ε_{z1}	$-t_y - b_2$	$t_x + a_2$	0
Axis 2 errors			
ε_{x2}	0	$-t_z$	t_y
ε_{y2}	t_z	0	$-t_x$
ε_{z2}	$-t_y$	t_x	0

表 3.3 二軸卡氏座標床軌移動系統的誤差矩陣表

3.4.2 相關係數(correlation coefficient)分析

由測試結果中各溫度點於主軸各轉速下的溫升模式分析可得知，並非所有溫度量測點之溫升變化對整體熱誤差皆有所貢獻。因此，如何將較明顯的溫度點找出，以這些溫度點為基底 (Base)，來

表達立式切削中心機主軸溫升所導致的熱誤差並改善之，此將是以下所要探討的。表 3.2 所示為立式切削中心機部分迴歸分析之溫度點變數位置。

在迴歸分析中，「相關係數」(correlation coefficient)的意義在於表現迴歸後預測值曲線之座落位置與實際值分佈趨勢之跟隨程度，「相關係數」(correlation coefficient)值越大，則表示兩者的關係越一致。又「最小平方差」的意義則在於表現迴歸預測值曲線與實際值間之差距，「最小平方差」越小，預測值曲線與實際值點間之距離越靠近。所以，由「相關係數」(correlation coefficient)、「最小平方差」兩者即可看出迴歸值與實際量測值間物理性質的相關性或接近程度。因此，「相關係數」與「最小平方差」二者為迴歸分析熱誤差預測模型之基底(Base)選擇所考量的標準。然而，於此執行「相關係數」分析目的只為瞭解溫升與其所導致的原點漂移之間的關係，藉著此關係的強烈程度即可清楚得知哪些溫度點的組合或單一溫度點對於主軸熱變形影響最為強烈，並藉此作為系統改善之依據。

在分析之方法上先以單一溫度點測得之溫度值與熱變位作迴歸分析，以便觀察出各溫度點與熱變位之間的相關特性。表 3.4 所示為立式切削中心機部分的熱位移迴歸變數相關特性比較。由表 3.4

中皆可清楚看出，以單一溫度點之溫度值做迴歸所得到的相關係數皆比多溫度點做迴歸所得到的相關係數低。由此可知，熱位移並非單一溫度點所造成的；亦即單一溫度點不足以表示溫升、熱位移模型。今再以多個溫度點組合與熱誤差作排列組合式的迴歸分析其可發現：相關係數與最小平方差兩者數據呈現最具相關性的溫度點組合立軸 X 方向為：T2、T7、T10、T16 的組合方式；Y 方向為：T2、T7、T9、T10、T16 的組合方式；Z 方向為：T2、T7、T10、T16 的組合方式。若以單一溫度點變數觀之，環境溫度 T16 與熱變形的關係最為密切；主軸套下緣前方溫度點 T1 次之。又若以單溫度點變數觀之，以環境溫度點 T16 與熱變形的關係最為密切；主軸前軸承 T2、T3 次之。由此得知，主軸軸承溫升與環境溫度變化乃影響主軸溫升後原點漂移之重要變數，此亦即改善該問題的一個方針。

表 3.4 立式切削中心機部分 X、Y、Z 方向熱變位迴歸變數相關特性比較

迴歸用變數 項目	X		Y		Z	
	相關係數	最小平方差	相關係數	最小平方差	相關係數	最小平方差
T1	0.5833	0.12433	0.5932	0.11911	0.5532	0.11822
T2	0.6566	0.00878	0.6312	0.00923	0.6373	0.00571
T3	0.5845	0.10452	0.5567	0.14222	0.5643	0.11321
T4	0.5561	0.10213	0.5913	0.11321	0.5622	0.10455
T5	0.6191	0.00957	0.5989	0.01002	0.5776	0.08543
T6	0.5210	0.08383	0.5601	0.09322	0.5032	0.09942
T7	0.7121	0.00631	0.7069	0.00684	0.6940	0.00664
T8	0.4359	0.18455	0.5012	0.16110	0.3922	0.24911
T9	0.6032	0.04369	0.5875	0.04221	0.6045	0.06132
T10	0.6322	0.00977	0.6131	0.00989	0.6224	0.00802
T11	0.3411	0.35621	0.3301	0.21761	0.3945	0.20334
T12	0.4323	0.11256	0.4123	0.15342	0.4533	0.15765

迴歸用變數	主軸方向	X		Y		Z	
	項目	相關係數	最小平方方差	相關係數	最小平方方差	相關係數	最小平方方差
T13		0.4010	0.15983	0.4232	0.14765	0.4079	0.17433
T14		0.3822	0.57241	0.4011	0.58933	0.4322	0.51231
T15		0.3021	0.88345	0.2212	0.46721	0.3323	0.46873
T16		0.7289	0.00902	0.7311	0.00944	0.7287	0.00989
T3, T4		0.5902	0.01134	0.5753	0.02181	0.5891	0.01893
T3, T5		0.5590	0.01213	0.5822	0.01182	0.5322	0.03233
T3, T6		0.5123	0.01189	0.5065	0.01354	0.5246	0.04322
T3, T7		0.5022	0.01592	0.4932	0.01322	0.4865	0.01945
T3, T8		0.5045	0.01893	0.4892	0.01544	0.4798	0.02763
T3, T4, T5		0.5122	0.02341	0.5024	0.02932	0.5057	0.03022
T3, T4, T5, T6		0.5189	0.02018	0.4783	0.04122	0.5299	0.04834
T3, T4, T6		0.5255	0.11202	0.5308	0.2122	0.5883	0.08464
T3, T4, T5, T7		0.7123	0.01055	0.7433	0.01489	0.7344	0.01823
T3, T4, T5, T8		0.6211	0.00992	0.5934	0.05885	0.5854	0.06450
T3~T8		0.6853	0.01002	0.6702	0.01183	0.6842	0.01533
T1, T2, T3, T8		0.5632	0.02355	0.5742	0.02211	0.5932	0.02016

迴歸用變數	主軸方向	X		Y		Z	
	項目	相關係數	最小平方差	相關係數	最小平方差	相關係數	最小平方差
	T1, T2, T3, T4	0.6133	0.01872	0.6011	0.02120	0.6032	0.01988
	T1, T2, T3, T4, T5	0.6011	0.37656	0.5982	0.3201	0.6190	0.30108
	T1, T2, T3, T4, T5, T6	0.6088	0.05787	0.6123	0.05212	0.6188	0.04832
	T1, T2, T3, T5	0.5942	0.06322	0.5885	0.04388	0.5933	0.04489
	T9, T10	0.6481	0.02110	0.6044	0.03487	0.5866	0.04467
	T9, T10, T11	0.6301	0.03112	0.5904	0.04642	0.5793	0.06546
	T8, T10, T12	0.6233	0.03882	0.6884	0.02893	0.6155	0.03265
	T8, T10, T11, T12	0.6289	0.03644	0.5934	0.02934	0.6044	0.03010
	T9, T10, T11, T12, T13	0.5821	0.04233	0.5965	0.04055	0.6021	0.05221
	T10, T11, T12, T13	0.5903	0.03389	0.6213	0.02904	0.5788	0.05241
	T11, T12, T13, T14	0.5833	0.02477	0.5565	0.03433	0.5673	0.02854
	T12, T13, T14, T15, T16	0.6589	0.00946	0.6022	0.01597	0.5903	0.03023
	T1, T10, T11, T13	0.5322	0.08583	0.5531	0.07542	0.5022	0.07456
	T8, T9, T10, T11, T16	0.7165	0.00853	0.7494	0.00945	0.7542	0.00838
	T5, T7, T8, T9, T10, T11	0.7158	0.00886	0.7234	0.00848	0.7299	0.00944
	T3, T4, T5, T6, T7, T8	0.6852	0.01145	0.6754	0.02107	0.6711	0.02065

主軸方向 項目 迴歸用變數	X		Y		Z	
	相關係數	最小平方差	相關係數	最小平方差	相關係數	最小平方差
T2, T7, T10, T16	0.8325	0.00505	0.8204	0.00616	0.8391	0.00602
T2, T7, T9, T10, T16	0.8208	0.00743	0.8451	0.00599	0.8032	0.00711
T2, T7, T8, T9, T10, T16	0.7966	0.00794	0.8023	0.00877	0.8011	0.00732
T3, T7, T9, T10, T16	0.7954	0.00902	0.7801	0.00944	0.7811	0.00974
T7, T8, T13, T14, T15	0.6868	0.02331	0.6945	0.02031	0.6822	0.02563
T6, T7, T8, T9, T10, T16	0.8011	0.00938	0.8144	0.00843	0.7933	0.00911
T4, T5, T6, T7, T8, T10	0.7533	0.03563	0.7322	0.42410	0.7311	0.21331
T1~T16	0.8185	0.02768	0.8284	0.07389	0.8149	0.05837