


第四章 實驗結果分析與討論

4.1 進給系統溫升熱變形測試數據分析

一般立式切削中心機業者使用的進給系統，仍以滾珠導螺桿為主要元件，本研究針對立式切削中心機的動態量測、將立式切削中心機置於恆溫環境、光學尺、軸座冷卻方式、滾珠導螺桿有、無預拉，分別量測比較與搭配，選擇最佳項目，作為提升進給系統精度的最佳參數。

4.1.1 滾珠導螺桿預拉溫升熱變形測試數據分析



首先本研究將對滾珠導螺桿進行無預拉，以及設定預拉 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ ，以方便比較無預拉（如圖 4.5）與有預拉（如圖 4.7、圖 4.9）的情形，滾珠導螺桿的溫升熱變形之差異。由於滾珠導螺桿預拉就是事前將滾珠導螺桿給一個拉應力，因此在溫升之前，就使滾珠導螺桿有一個拉伸量，已抵銷滾珠導螺桿因受熱的熱膨脹量，因此從實驗結果中可發現，當預拉增加時，則前後軸承溫升也會增加。是由於對滾珠導螺桿預拉，相對的是對後軸承作預壓行為，因此後軸承預壓增加，而造成軸承的溫升提高。但滾珠導螺桿的表面溫度下降，這是由於預拉量增加的同時，滾珠導螺桿因自重所造成的下垂量也變小，故

滾珠導螺桿與螺帽的摩擦扭矩也變小，所以滾珠導螺桿的表面溫度下降，而當滾珠導螺桿的預拉力被抵銷時，同時對後軸承的預壓力也被抵銷，所以後軸承的溫度也開始下降，滾珠導螺桿的溫升熱變形量也較小。所以預拉量變大，則滾珠導螺桿自由端的熱膨脹變小，但前、後軸承的溫升變大，所以預拉量不能太大，否則會將軸承燒毀。

一般考慮預拉力為 3°C 左右之溫升膨脹量；若預測溫升可能超過預拉力相當溫差二倍以上時，必須將支持軸承的支持構造改為“固定一半固定”式（亦即螺桿軸收縮方向為固定；伸長方向為自由）。熱變位量及預拉力計算參考如下：



1. 熱位移量計算如下：

$$\Delta L = \rho \cdot \theta \cdot L \quad (4-1)$$

ΔL ：熱變位量 (mm)

ρ ：熱膨脹係數 ($12 \times 10^{-6} \text{mm}/^{\circ}\text{C}$)

θ ：螺桿軸的平均溫升($^{\circ}\text{C}$)

L ：螺桿軸長 (mm)

2. 預拉力計算如下：

$$F = \Delta L \cdot K_s \quad (4-2)$$

F：預拉力(kgf)

Ks：滾珠螺桿剛性 (kgf/μm)

$$K_s = \pi d r^2 E / 4L$$

dr：滾珠螺桿根徑 (mm)

E：剛彈性係數 (2.1*10⁴kgf/mm²)

3. 現場組裝時常用扭力扳手鎖緊支持軸承螺帽，藉由下列公式可以

求得鎖緊時所需扭矩：

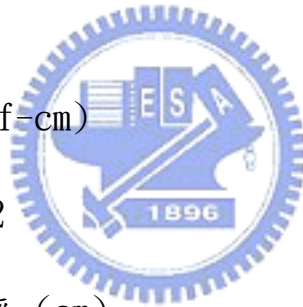
$$T = K * d * F \tag{4-3}$$

T：鎖緊扭矩(kgf-cm)

K：扭矩係數 0.2

d：螺紋公稱直徑 (cm)

F：鎖緊力(kgf)



4.1.2 溫度控制測試數據分析

首先必須確定工具機在暖機時的冷卻區與加熱區。使用及加裝冷卻（如圖 4.1）或加熱循環系統事先加溫使工具機在一穩定且整機均溫下，如一般將機台放置於恆溫空調環境下、對軸座軸承施以冷卻（如圖 4.11）的方法。

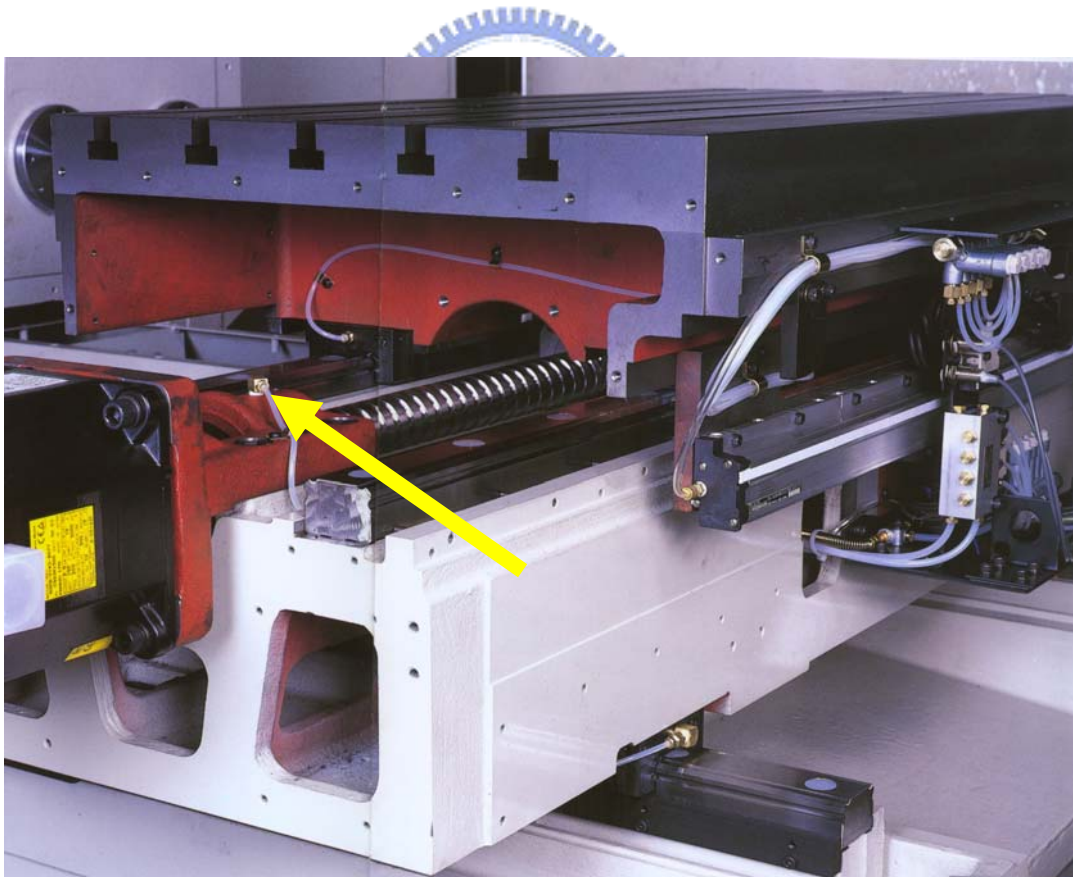


圖 4.1 軸座軸承施以冷卻

4.1.3 位置回饋測試數據分析

給系統採用不同的迴饋系統。由原先的半閉迴路系統改變為閉迴路系統方法，藉由低熱傳導係數（如圖 4.2）之材料，以避免熱過大影響工具機加工精度。

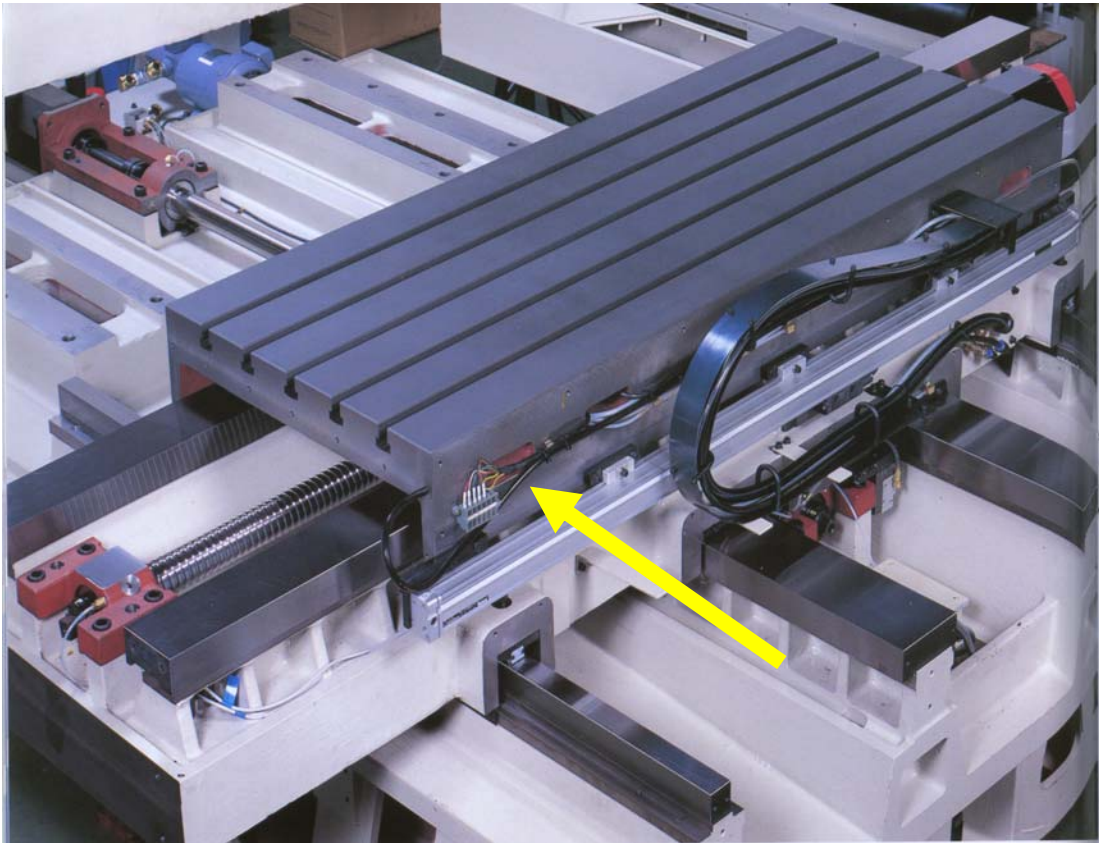


圖 4.2 光學尺裝置

4.2 進給系統溫升熱變形實驗數據

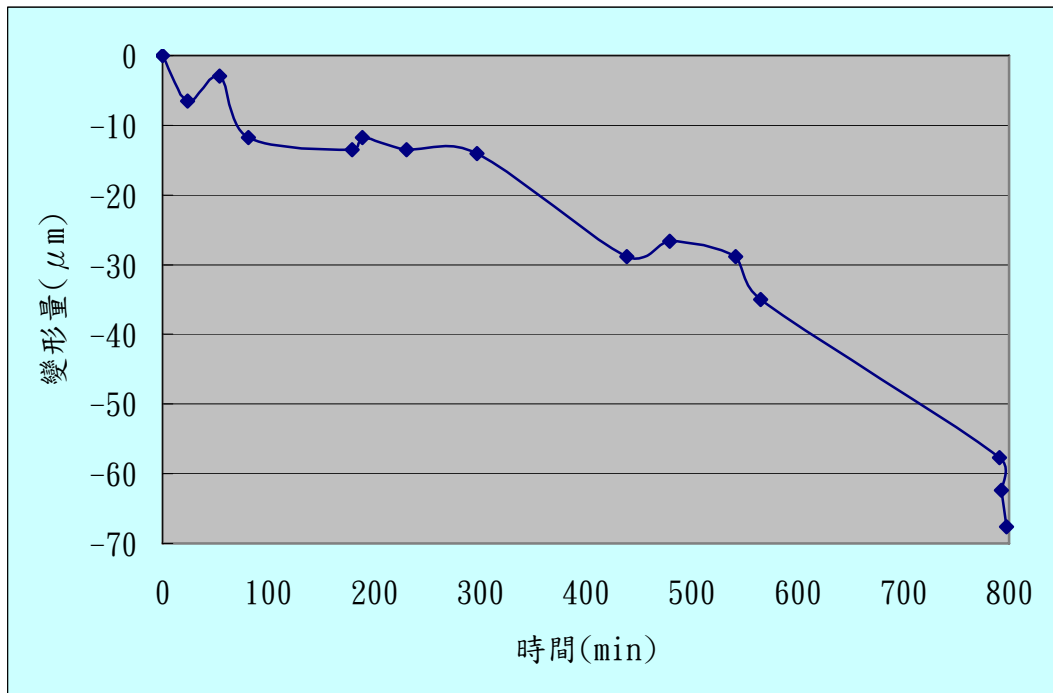


圖 4.3 使用加工程式測試進給軸變異量曲線圖

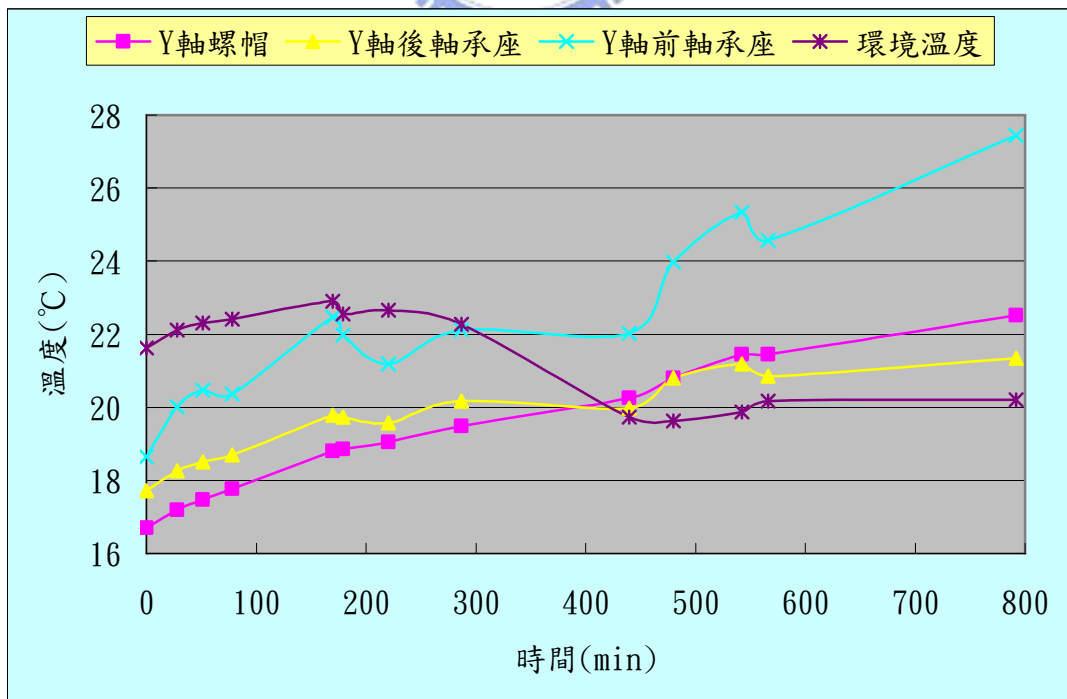


圖 4.4 使用加工程式測試溫度變異量曲線圖

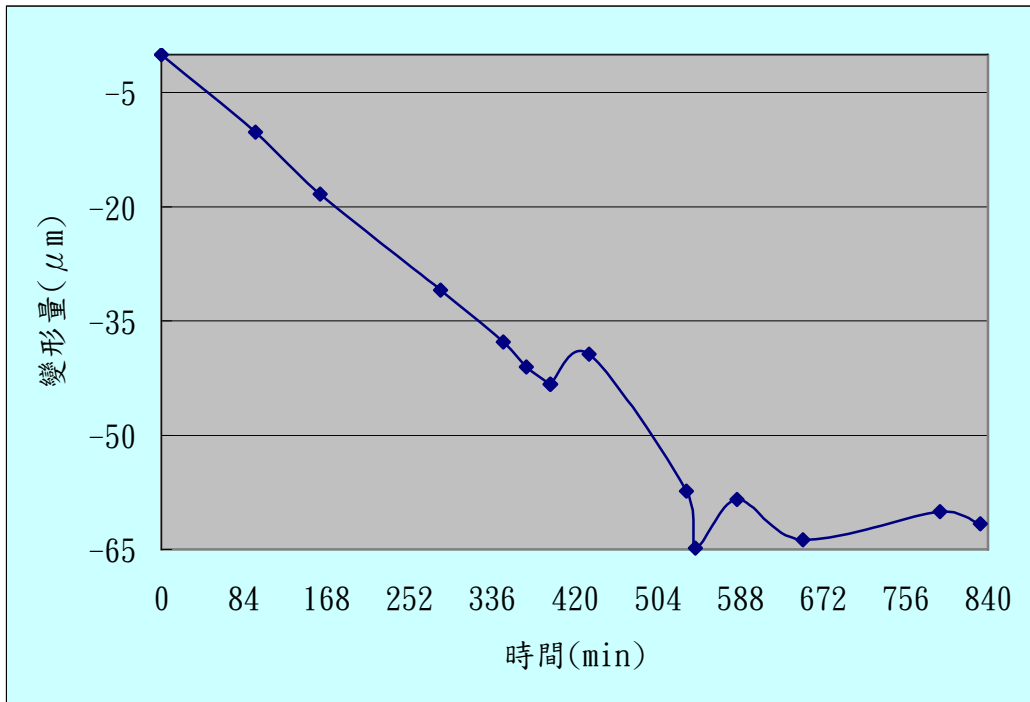


圖 4.5 滾珠導螺桿無預拉情形測試進給軸變異量曲線圖

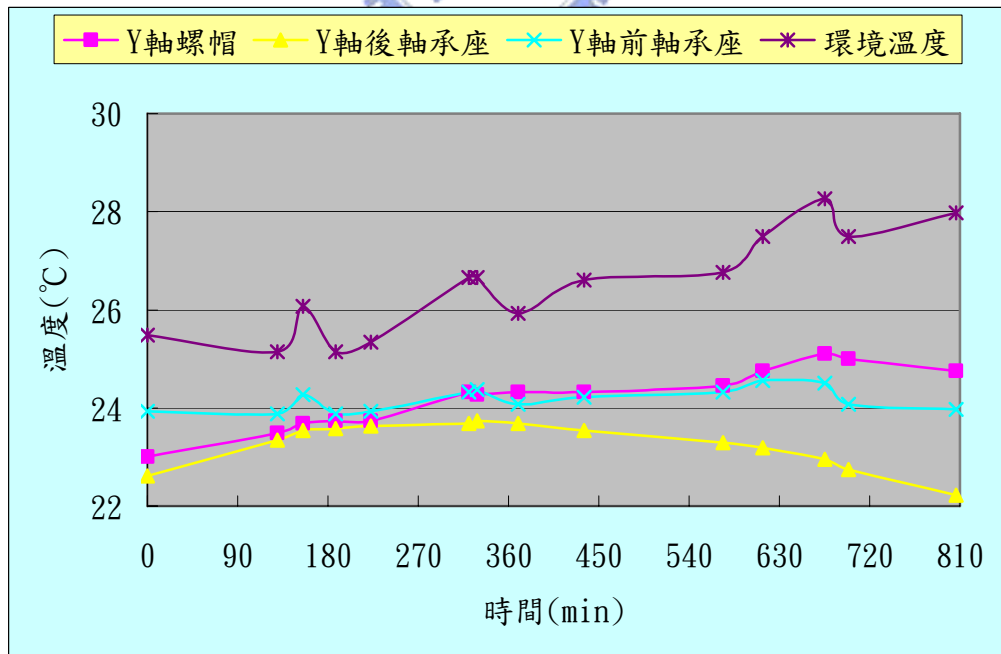


圖 4.6 滾珠導螺桿無預拉情形測試溫度變異量曲線圖

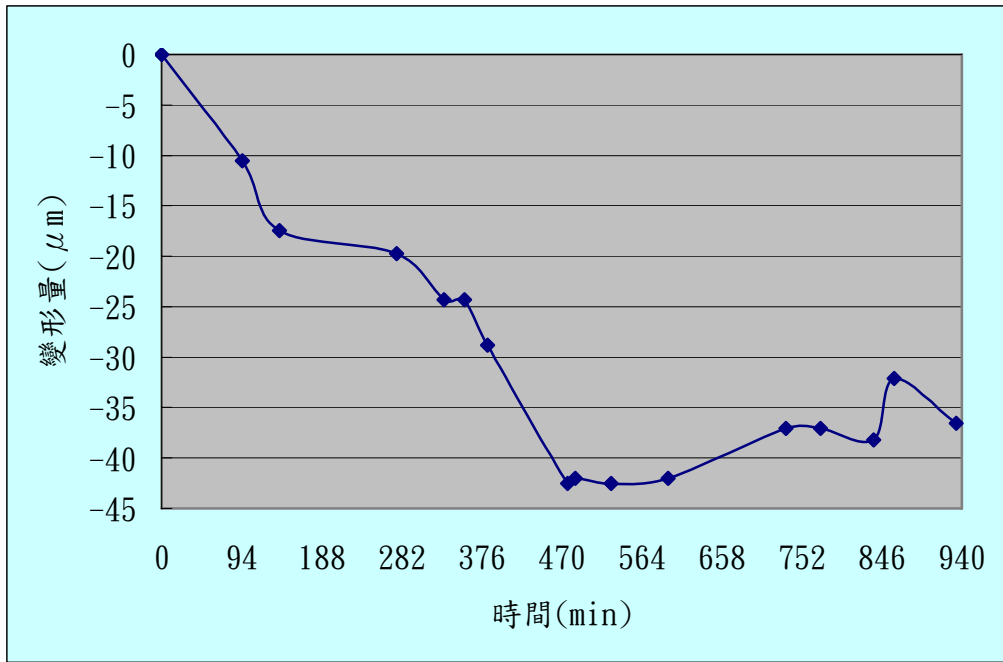


圖 4.7 滾珠導螺桿預拉(40 μm)情形測試進給軸變異量曲線圖

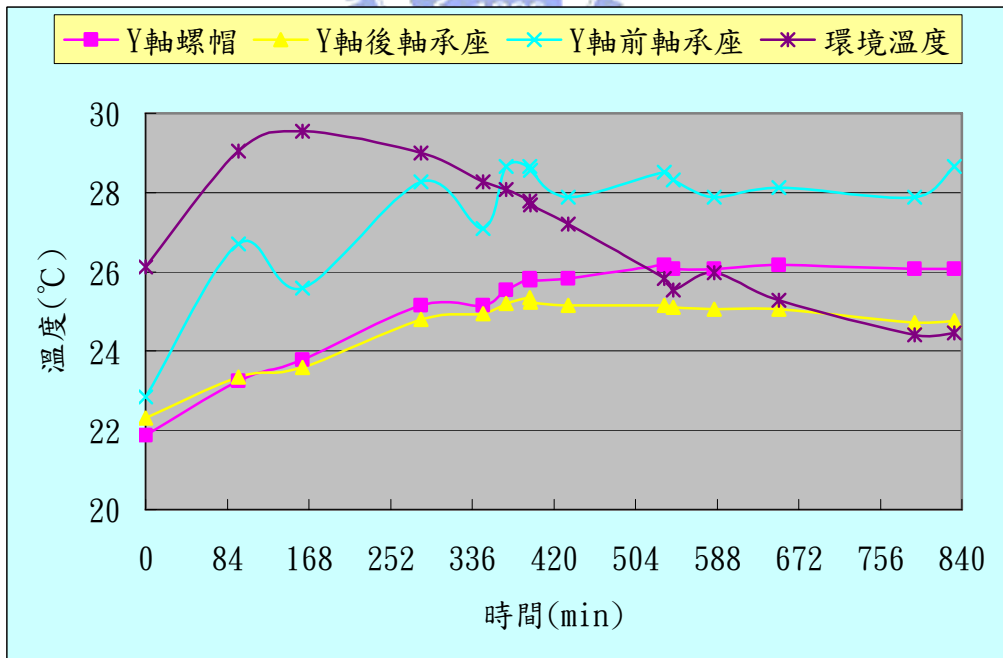


圖 4.8 滾珠導螺桿預拉(40 μm)情形測試溫度變異量曲線圖

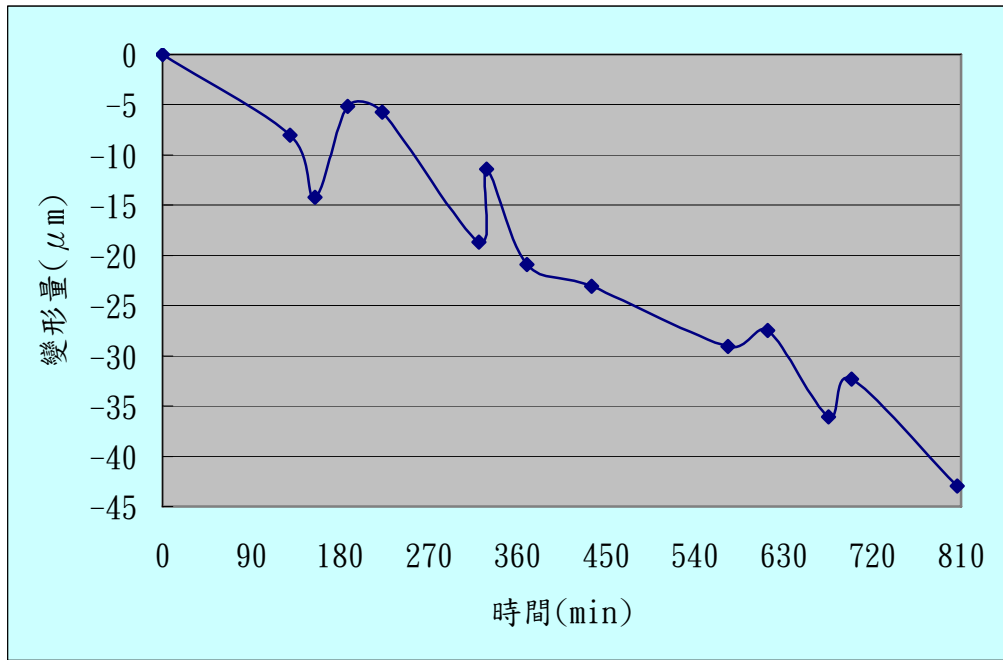


圖 4.9 滾珠導螺桿預拉(50 μm)情形測試進給軸變異量曲線圖

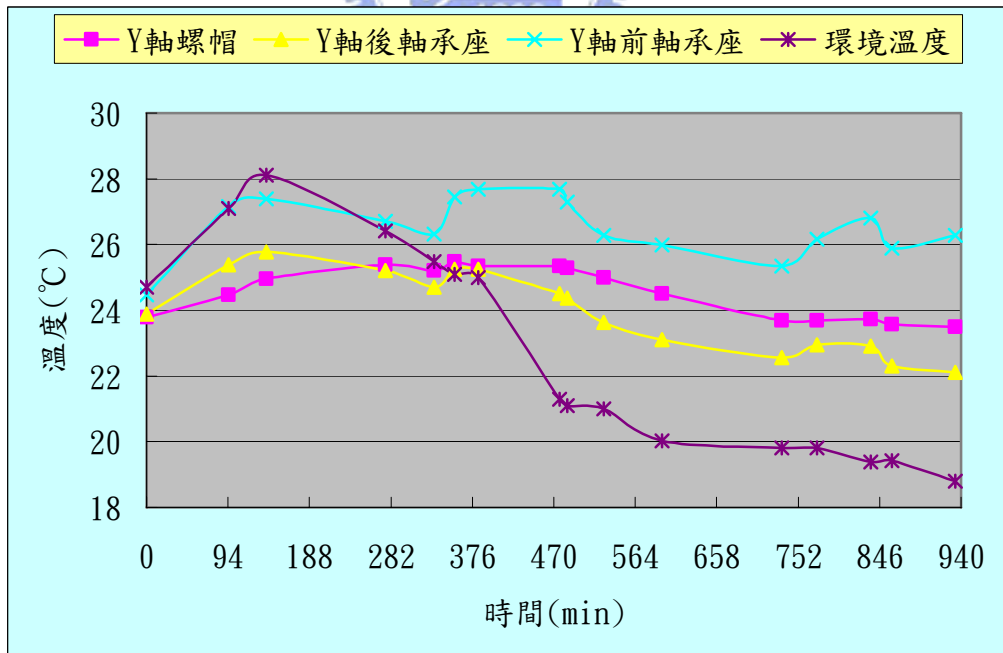


圖 4.10 滾珠導螺桿預拉(50 μm)情形測試溫度變異量曲線圖

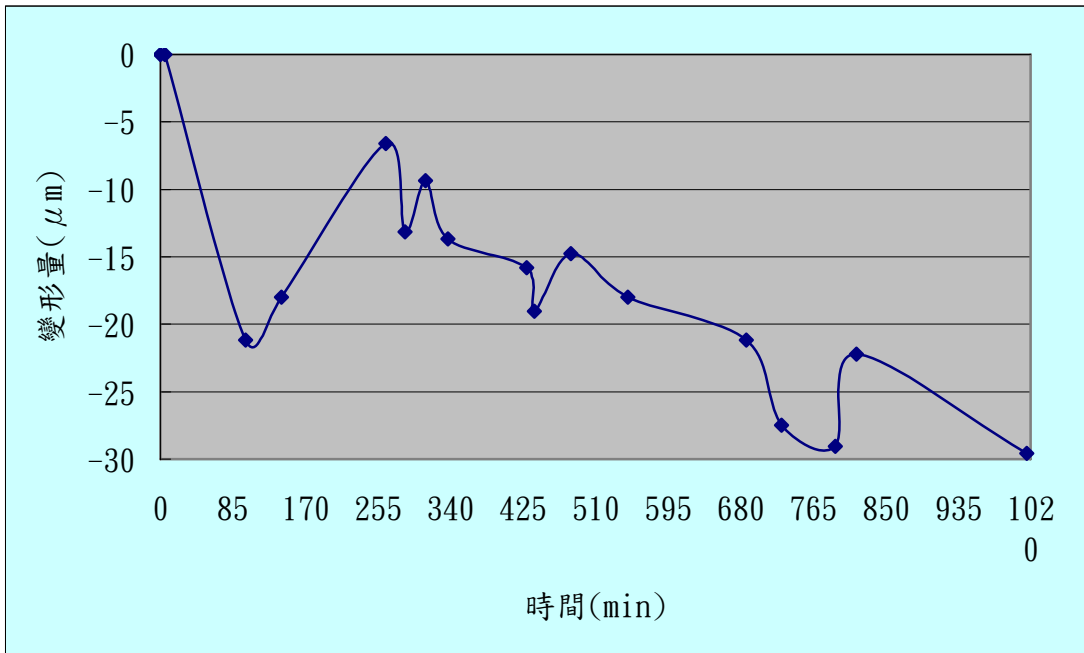


圖 4.11 軸座冷卻方式測試進給軸變異量曲線圖

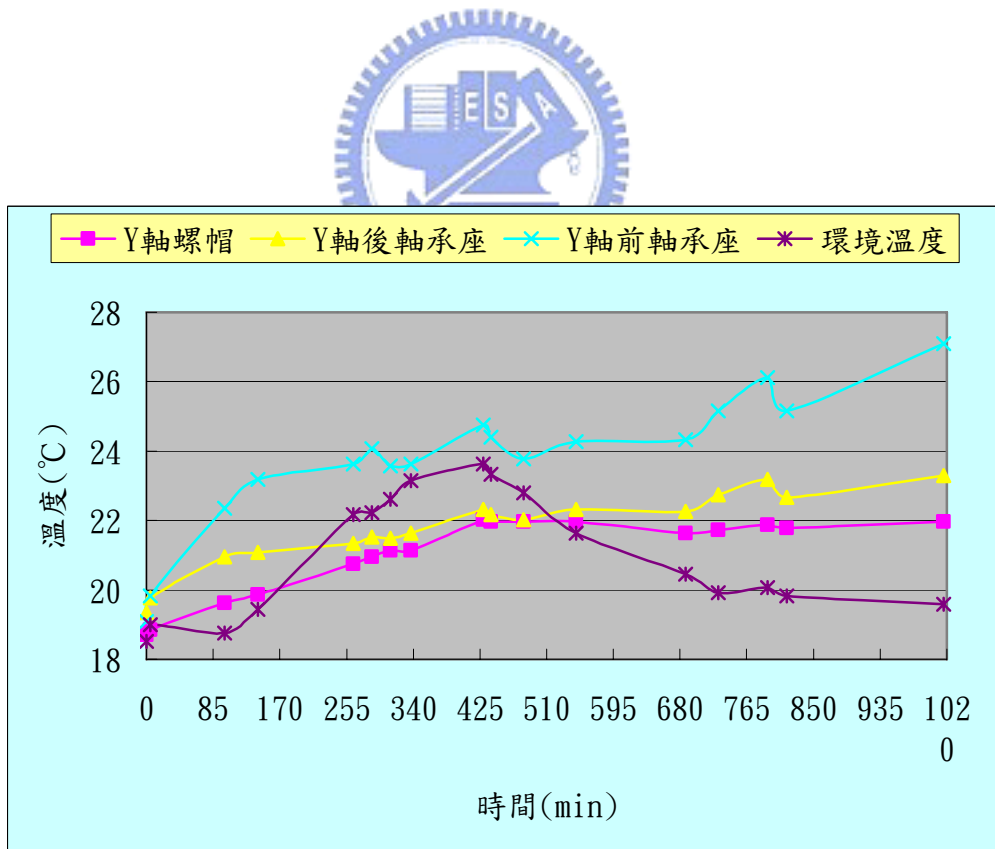


圖 4.12 軸座冷卻方式測試溫度變異量曲線圖

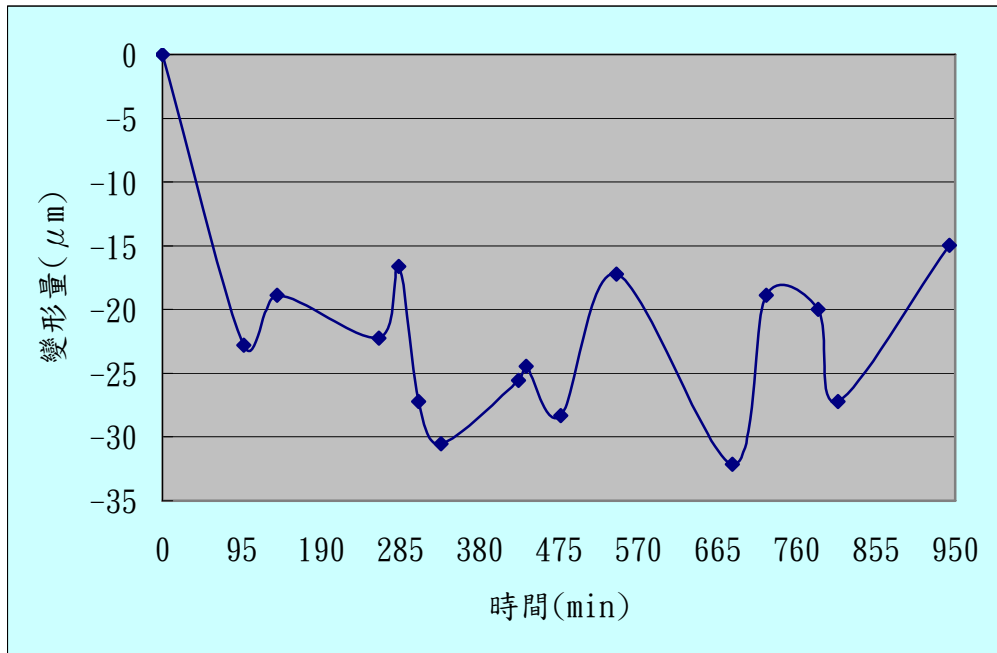


圖 4.13 光學尺測試進給軸變異量曲線圖

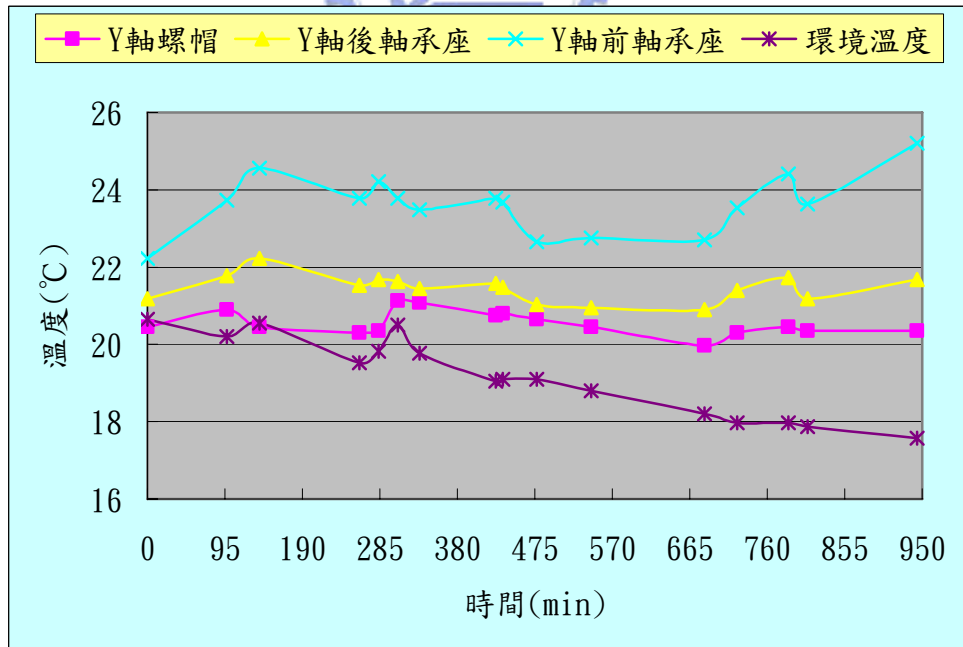


圖 4.14 光學尺測試溫度變異量曲線圖

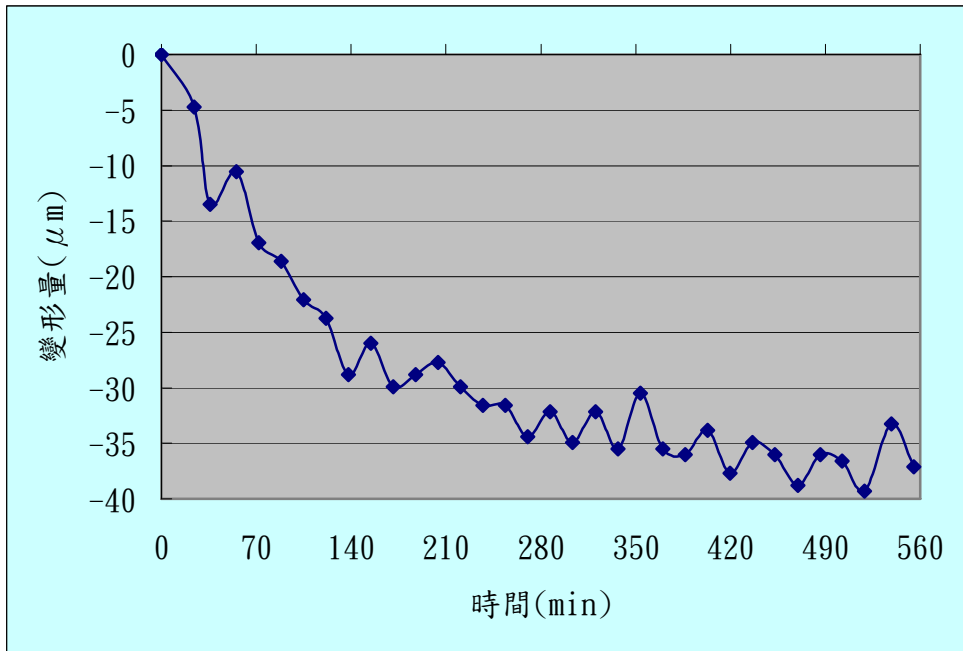


圖 4.15 機台置於恆溫室測試（往復運動）進給軸變異量曲線圖

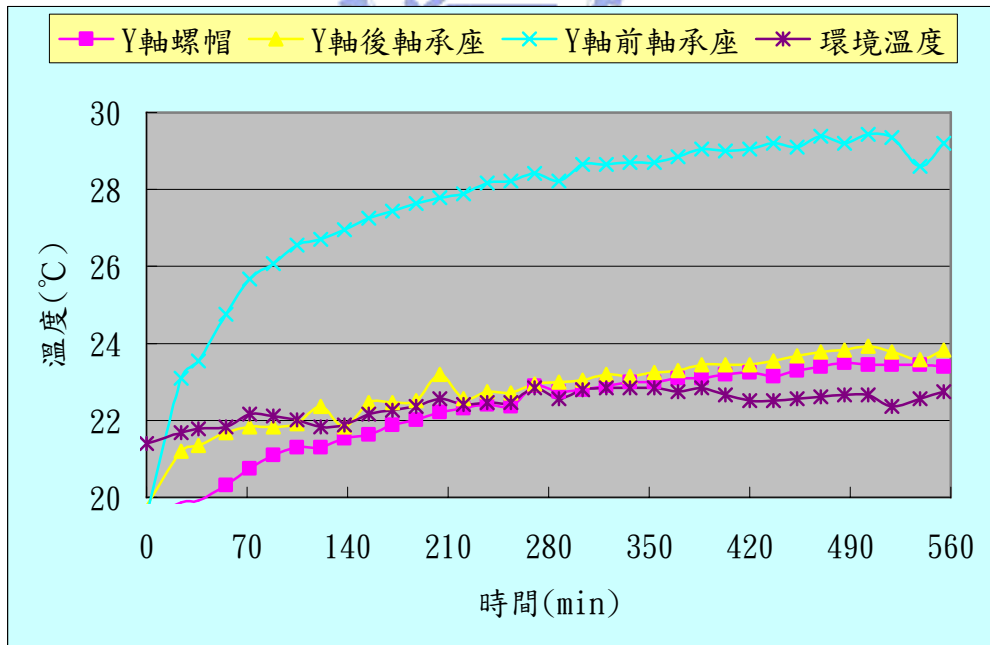


圖 4.16 機台置於恆溫室測試（往復運動）溫度變異量曲線圖

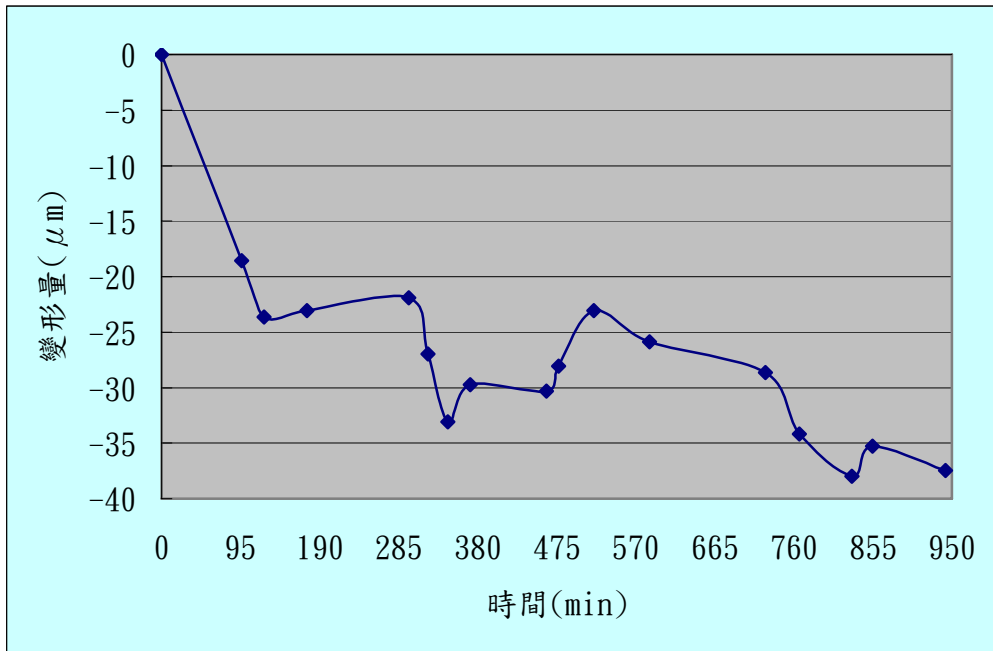


圖 4.17 機台置於恆溫室測試（使用加工程式）進給軸變異量曲線圖

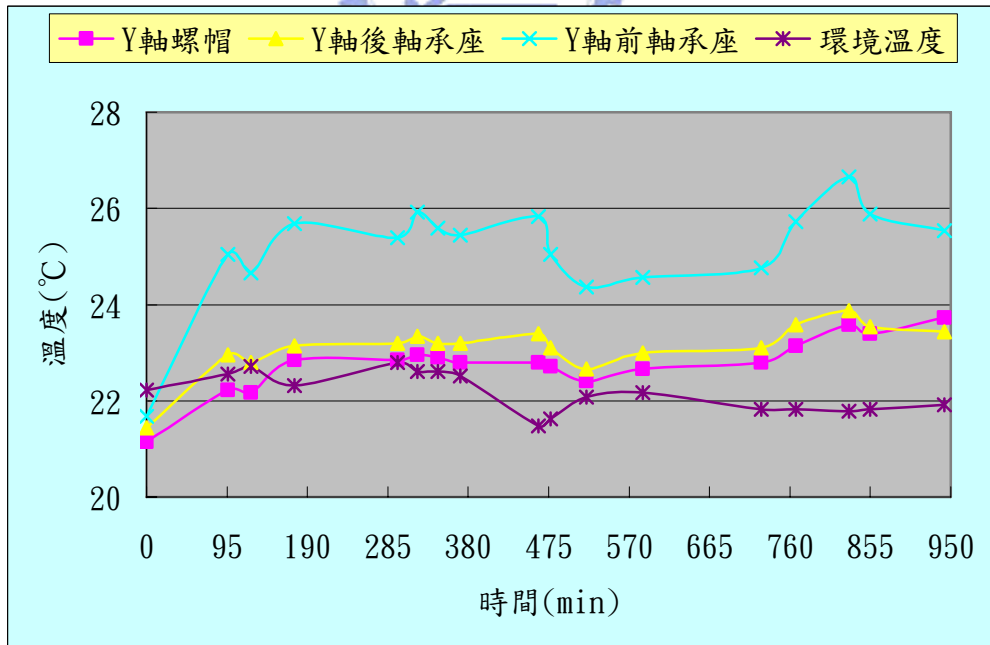


圖 4.18 機台置於恆溫室測試（使用加工程式）溫度變異量曲線圖

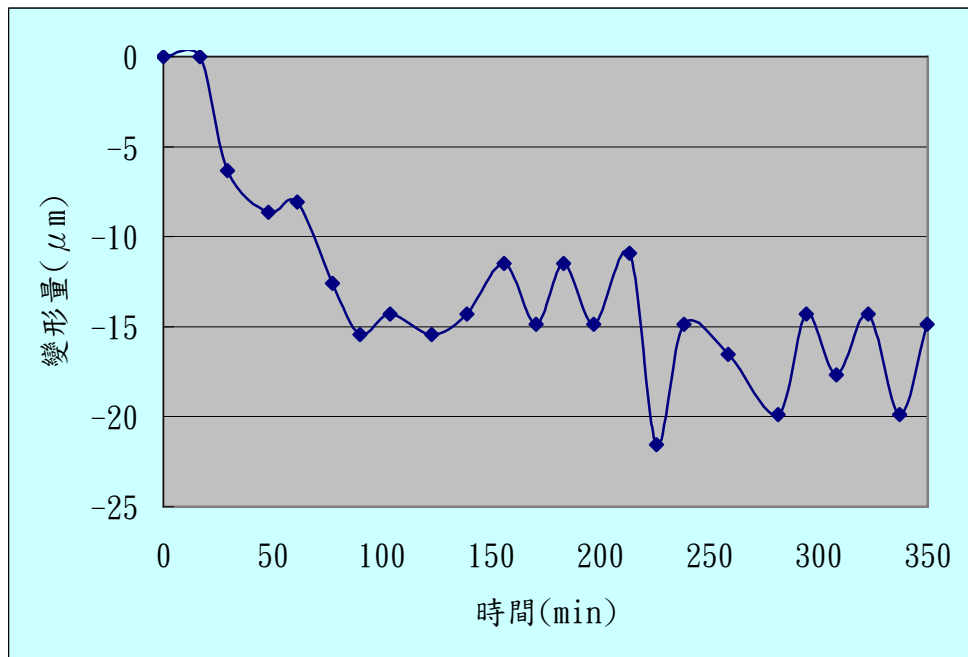


圖 4.19 軸座冷卻方式+光學尺測試進給軸變異量曲線圖

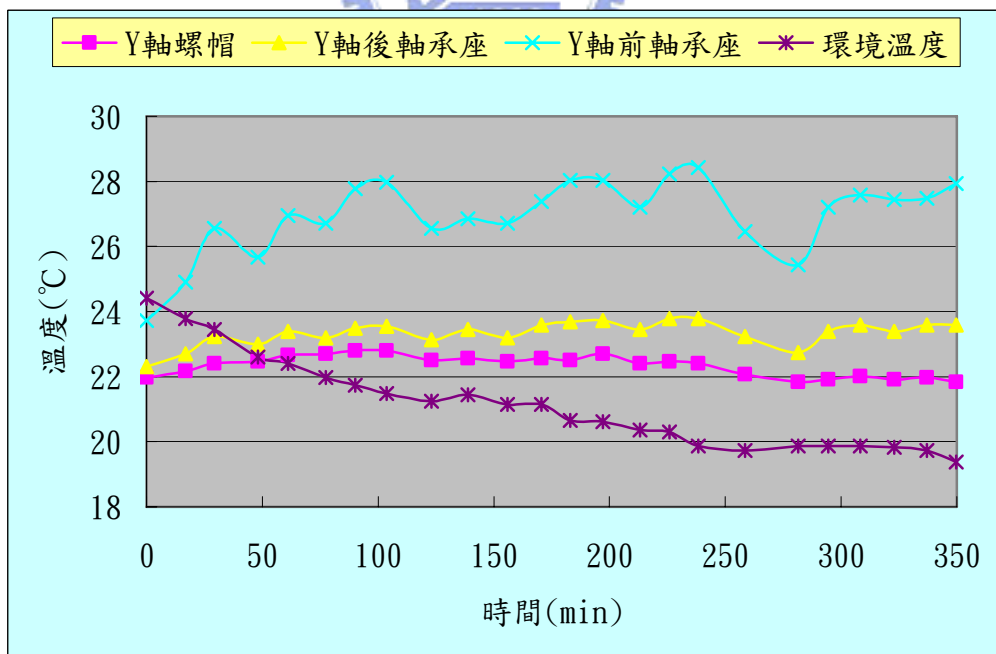


圖 4.20 軸座冷卻方式+光學尺測試溫度變異量曲線圖

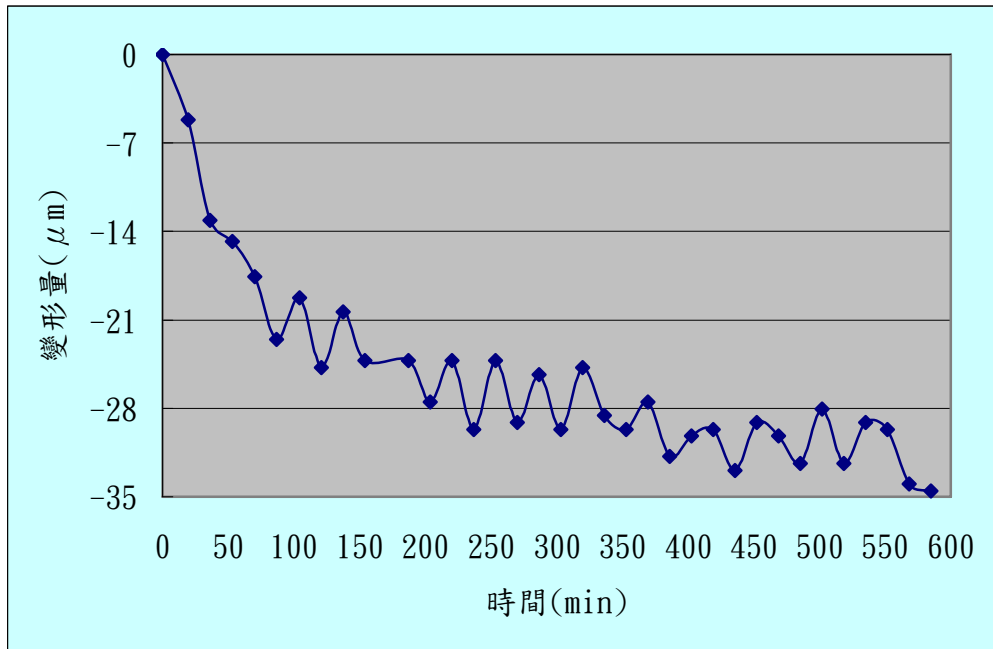


圖 4.21 軸座冷卻方式+恆溫測試進給軸變異量曲線圖

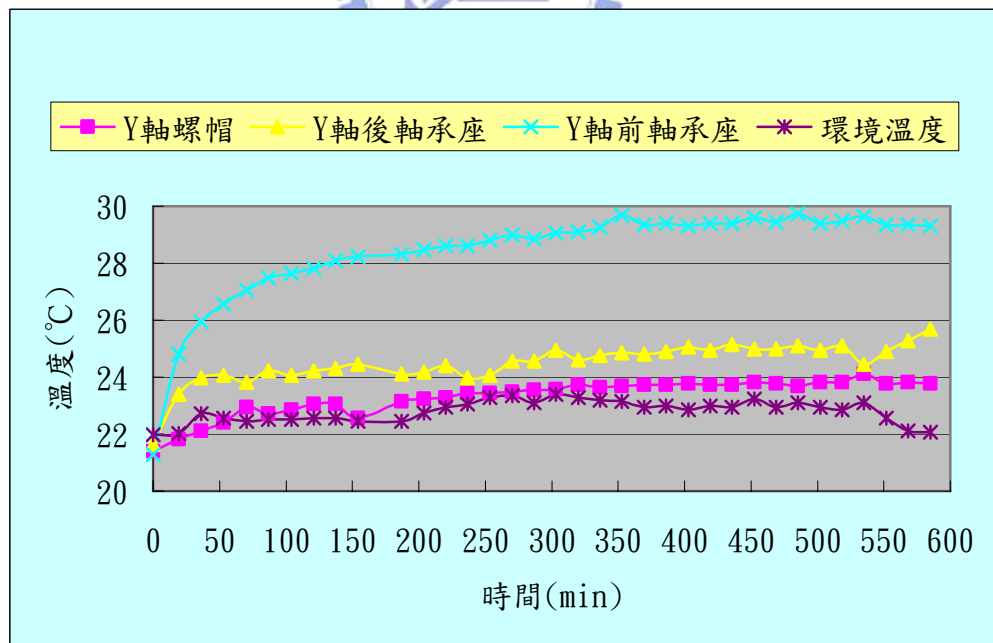


圖 4.22 軸座冷卻方式+恆溫測試溫度變異量曲線圖

4.3 立式切削中心機溫升熱變形測試數據分析

立式切削中心機在進行加工過程，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，而立式切削中心機的溫升和熱變形即是由各種熱源所引起。這些熱量一部份由切屑和冷卻液帶走（切削摩擦熱）；一部份發散至周圍環境；一部份傳至工件，造成工件溫升；一部份殘留於立式切削中心機，造成機身內部的溫度變化。此外，立式切削中心機的溫度變化還有其外部原因，這就是環境溫度的變化和日光的照射。

立式切削中心機機身的溫度並非為定值，其有著複雜的週期性變化。例如當我們於進行加工時，其溫度會上升；但是，如果停機測量，或裝卸工件時，溫度則又下降。又加工一批工件時，溫度上升；加工完重新調整立式切削中心機，溫度又下降；繼續加工時，溫度又上升；停機時，溫度再次下降。又以環境溫度而言，既有日夜週期性的溫度變化；也有以一年為週期的四季變化。在一般的情況下，溫度是時間和空間的函數，因此，吾人可以下式來表示：

$$T=f(x, y, z, \tau) \quad (4-4)$$

這種隨時間變化的溫度場稱為不穩定溫度場。如果立式切削中心機上各點的溫度都不隨時間而變化，此溫度場則稱為穩定溫度場，其又可以下式表示之：

$$T=f(x, y, z) \quad (4-5)$$

然而，如果將立式切削中心機機體結構視為一個溫度場，一般均為一不穩定的溫度場。

此外，熱源的熱量本身並不直接產生變形，其需經過熱傳導、對流、和輻射等傳熱方式，使立式切削中心機各組裝部位產生溫升，形成溫度差後，才會出現熱變形現象。

此由熱效應而造成機件的膨脹或變形會降低立式切削中心機的幾何精度和定位精度；又因油膜的承載能力降低；惡化加工條件；且由於工件溫度與量具的溫度不同，也因而降低了量測精度。

今以量產的觀念看熱誤差：加工一批料件時，必定是在溫升之前即做好一切機器校正工作，然而，工件隨加工過程產生的熱，溫度逐漸上升，料件加工後的精度因而有所變化，甚至超出所要求的公差範圍。

在傳統加工觀念裡，一切憑經驗、憑感覺。單以經驗的傳承來延續工業的發展，此於科技文明的時代並非是最好的方法。所以，為了瞭解立式切削中心機於受熱後，因溫度變化所導致的熱變形量，進行溫升熱變形測試，且進行理論探討，藉此降低熱誤差對加工精度所造成的傷害。

4.3.1 立式切削中心機溫升熱變形測試方法

立式切削中心機主軸溫升熱變形量測系統架構如圖 4.23 所示

(1) 非接觸式位移感測器的架設

將非接觸式位移感測器固定於治具，再將治具固定於立式切削中心機之工作台，並將測試棒夾於主軸上，分別量測主軸與工作台間因熱而產生的相對位移。



圖 4.23 立式切削中心機主軸溫升熱變形量測系統架構圖

4.3.2 立式切削中心機溫升熱變形測試條件：

A. 測試條件1

環境條件：室溫環境下。

主軸轉速：3600min⁻¹。

量測時間：240分鐘。

主軸Cooler設定：差溫式0°C。

B. 測試條件2

環境條件：室溫環境下。

主軸轉速：5400 min⁻¹。

量測時間：240分鐘。

主軸Cooler設定：差溫式0°C。

4.3.3 立式切削中心機熱變形誤差模型之建立

立式切削中心機主軸溫升熱變形誤差模型架構如圖 4.24 所示

使用多變數迴歸分析

當投入 K 個自變數，其一般化之多變數迴歸模式如下：

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \cdots + A_kX_k + \varepsilon \quad (4-6)$$

以矩陣方式表示如下：

$$\{Y\} = \{X\} \times \{A\} + \{\varepsilon\} \quad (4-7)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad [X] = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & \dots & \dots & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & \dots & \dots & X_{2k} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 1 & X_{n1} & \dots & \dots & X_{nk} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ A_K \end{bmatrix}, \quad [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

最小平方方法



$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_kX_k + \varepsilon \quad (4-10)$$

採用最小平方方法導出迴歸式中參數 A_0 、 A_1 、 $A_2 \dots A_k$ 之估計量

a_0 、 a_1 、 $a_2 \dots a_k$ ，其對應迴歸線之估計式可表為

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_kX_k + \varepsilon \quad (4-11)$$

對於一般多變數迴歸模式，選擇最小平方方法，其估計迴歸線

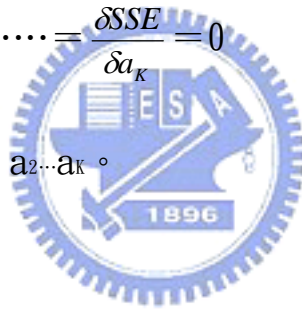
$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + a_kX_k + \varepsilon \quad (4-12)$$

能使所有樣本點預測之誤差平方和 $\sum (Y_i - y_i)^2$ 最小。誤差平方和表示如下：

$$\sum (Y_i - y_i)^2 = (Y_i - a_0 - a_1X_1 - a_2X_2 - \cdots - a_kX_k)^2$$

$$\frac{\delta SSE}{\delta a_0} = \frac{\delta SSE}{\delta a_1} = \cdots = \frac{\delta SSE}{\delta a_k} = 0 \quad (4-13)$$

可解得 a_0 、 a_1 、 a_2 ... a_k 。



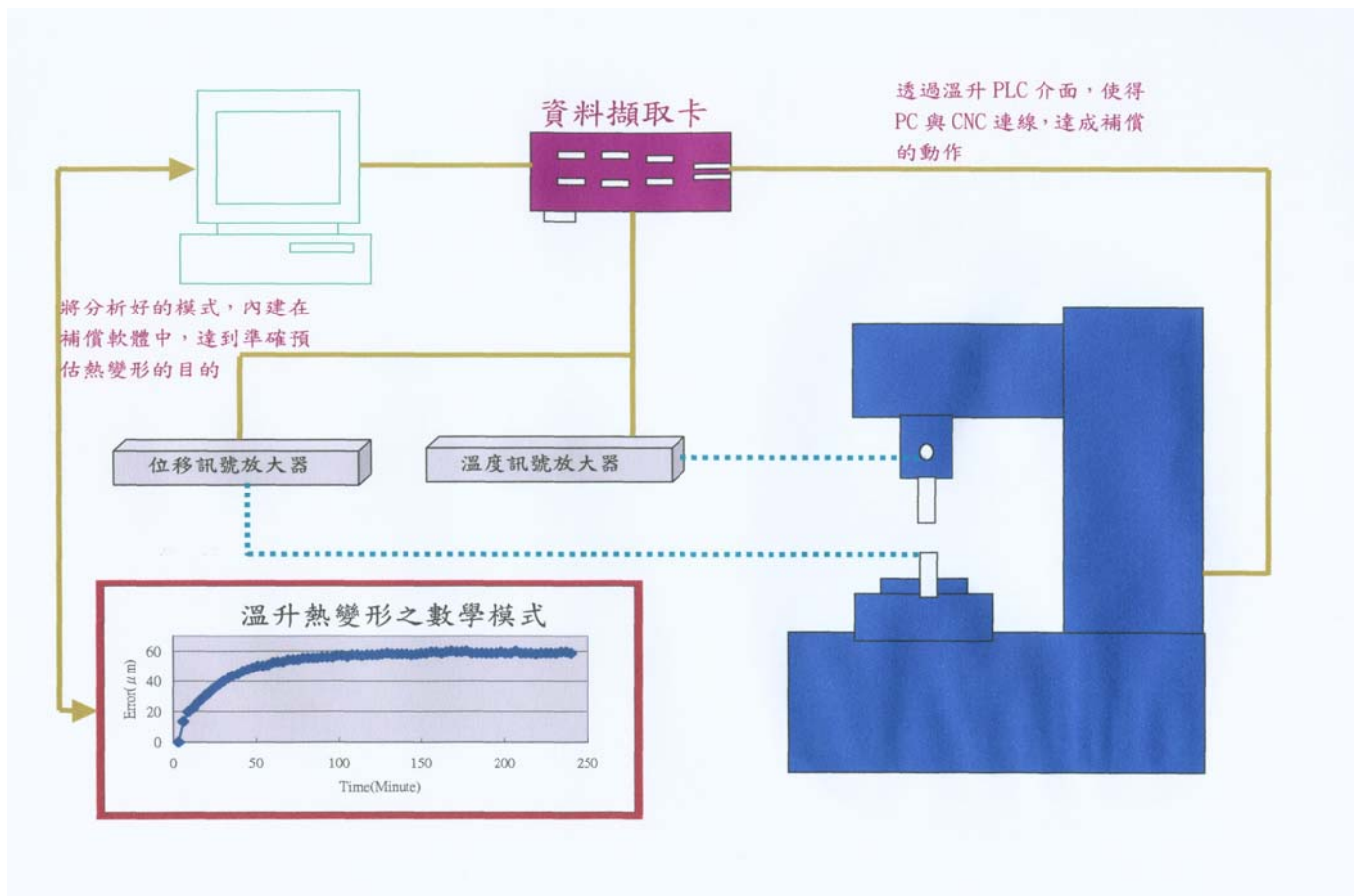


圖 4.24 立式切削中心機主軸溫升熱變形補償系統架構圖

4.4 立式切削中心機溫升熱變形實驗數據

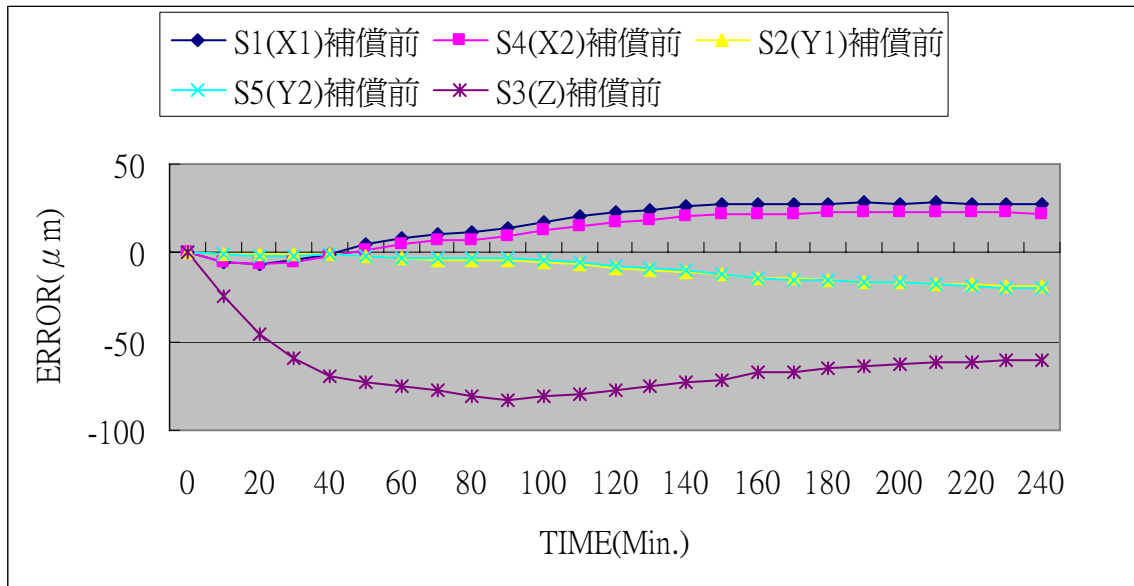


圖 4.25 測試條件 1 之時間與熱變形關係圖 (補償前)

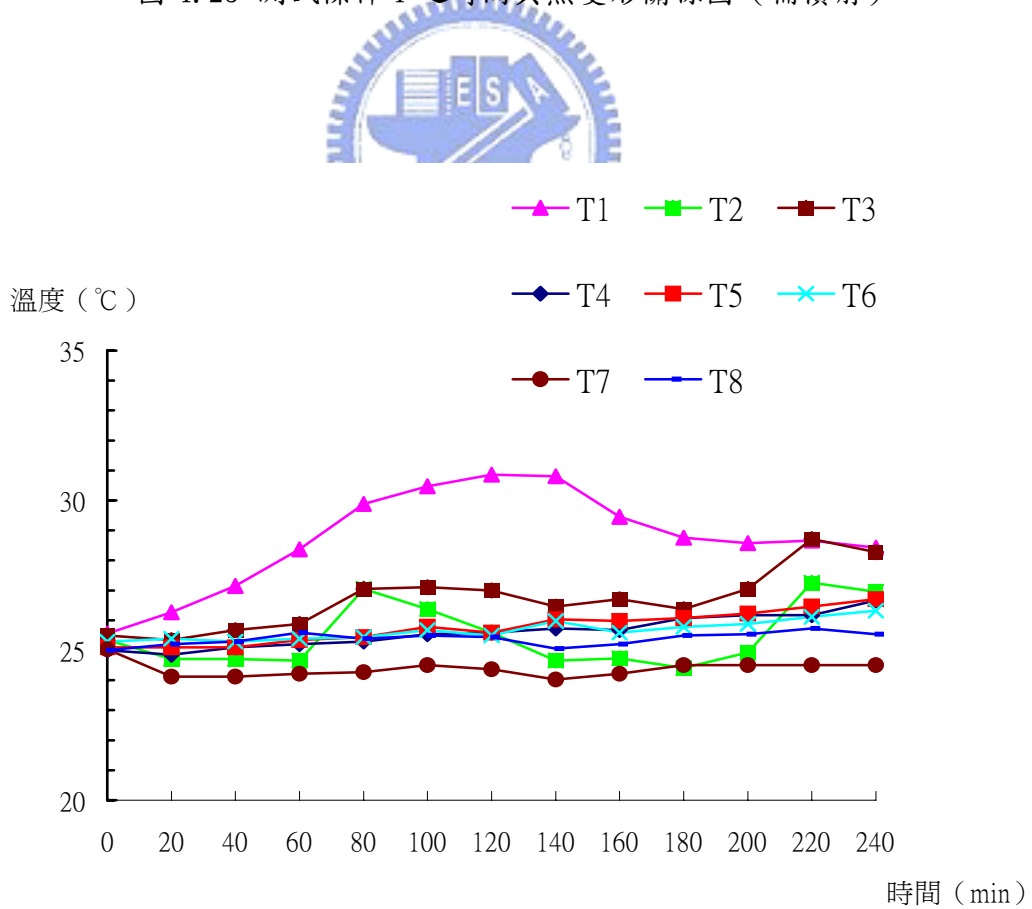


圖 4.26 測試條件 1 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償前)

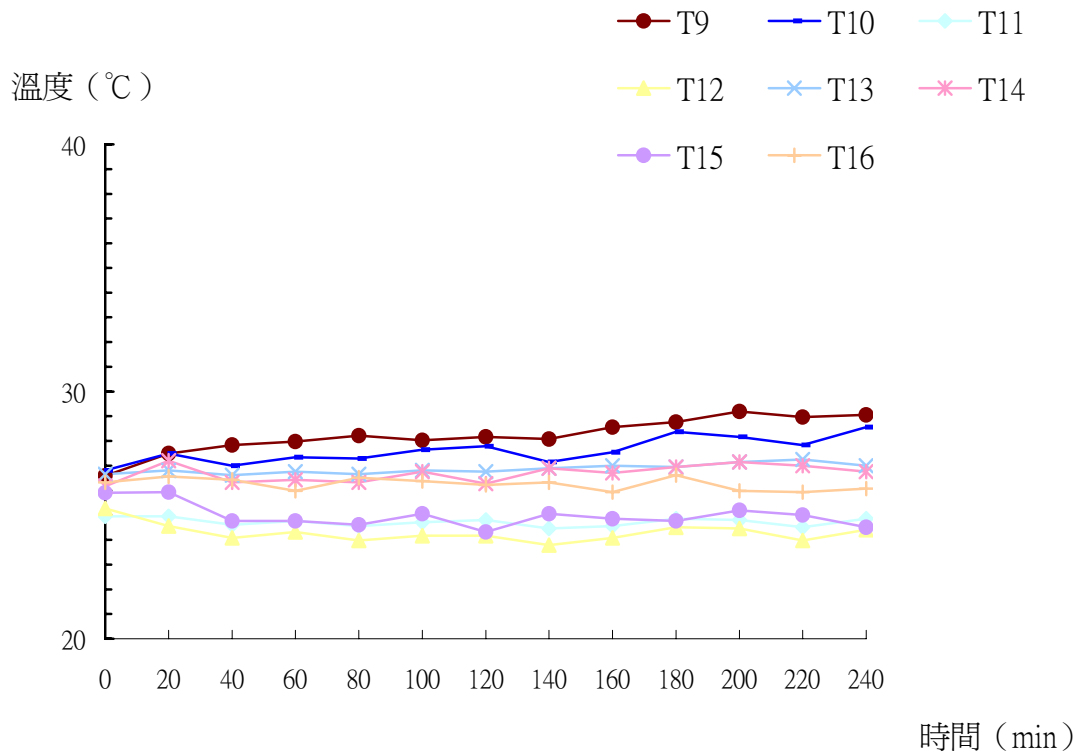


圖 4.27 測試條件 1 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖 (補償前)

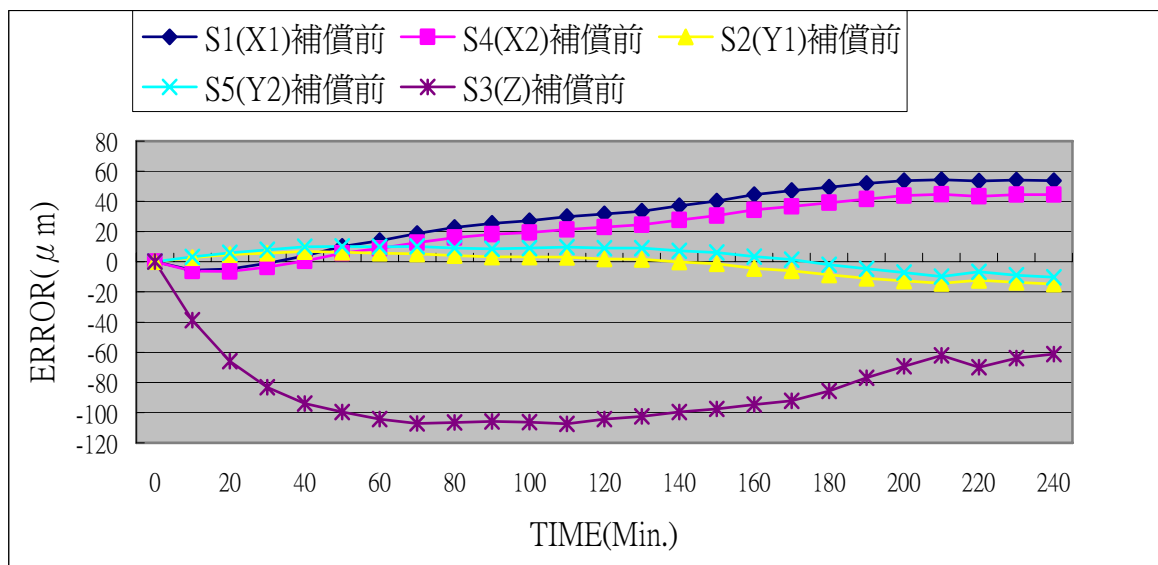


圖 4.28 測試條件 2 之時間與熱變形關係圖 (補償前)

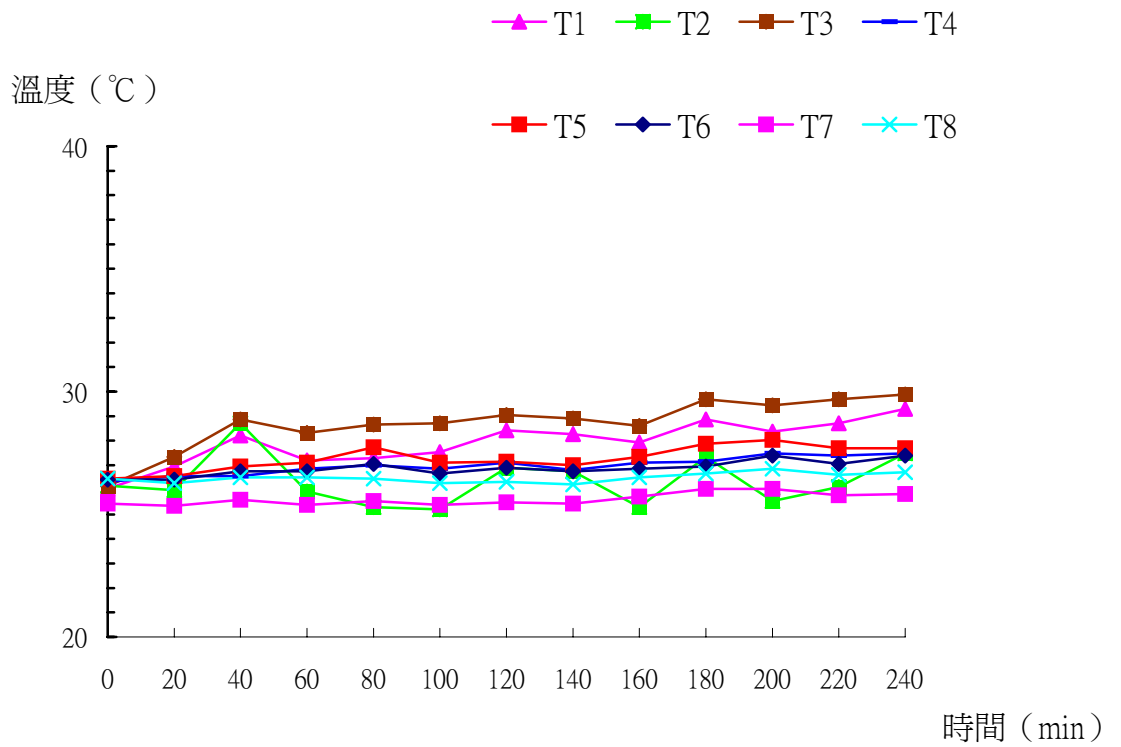


圖 4.29 測試條件 2 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償前)

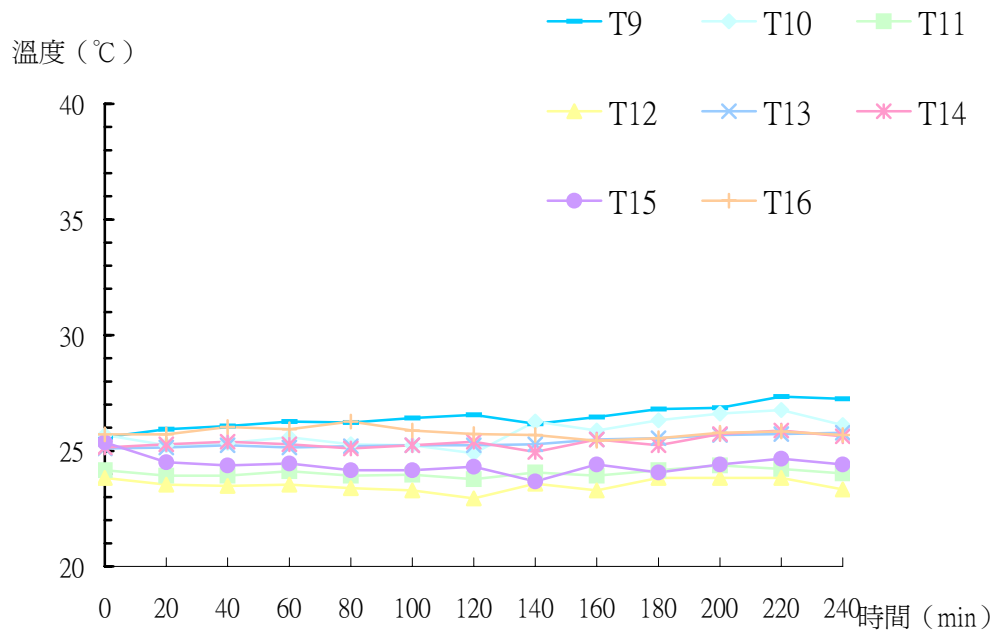


圖 4.30 測試條件 2 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖 (補償前)

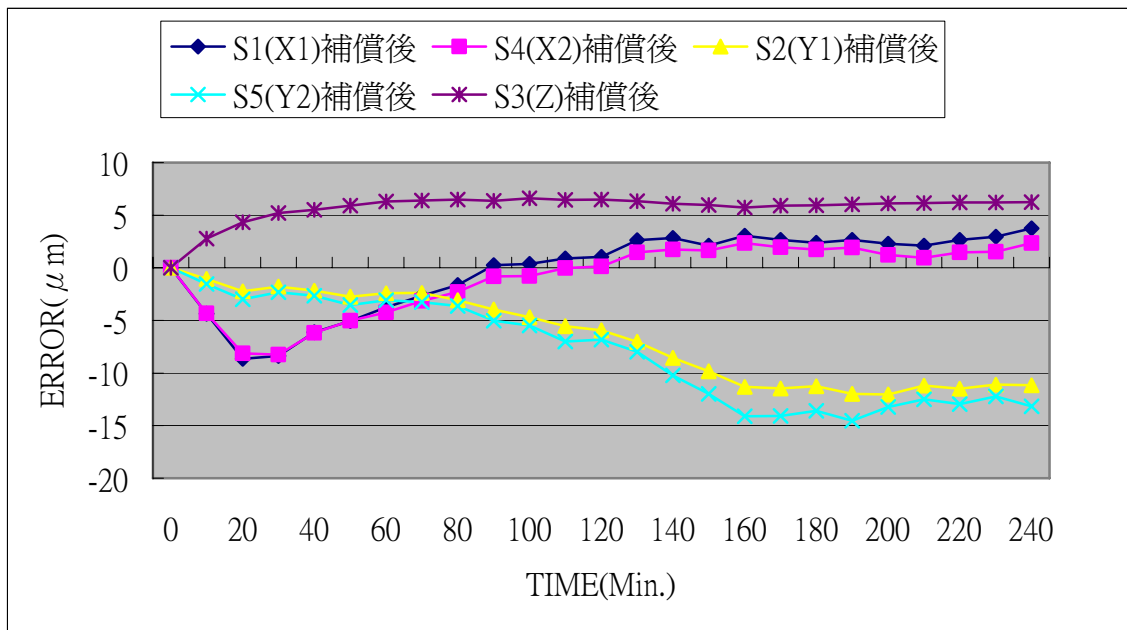


圖 4.31 測試條件 1 之時間與熱變形關係圖 (補償後驗證)

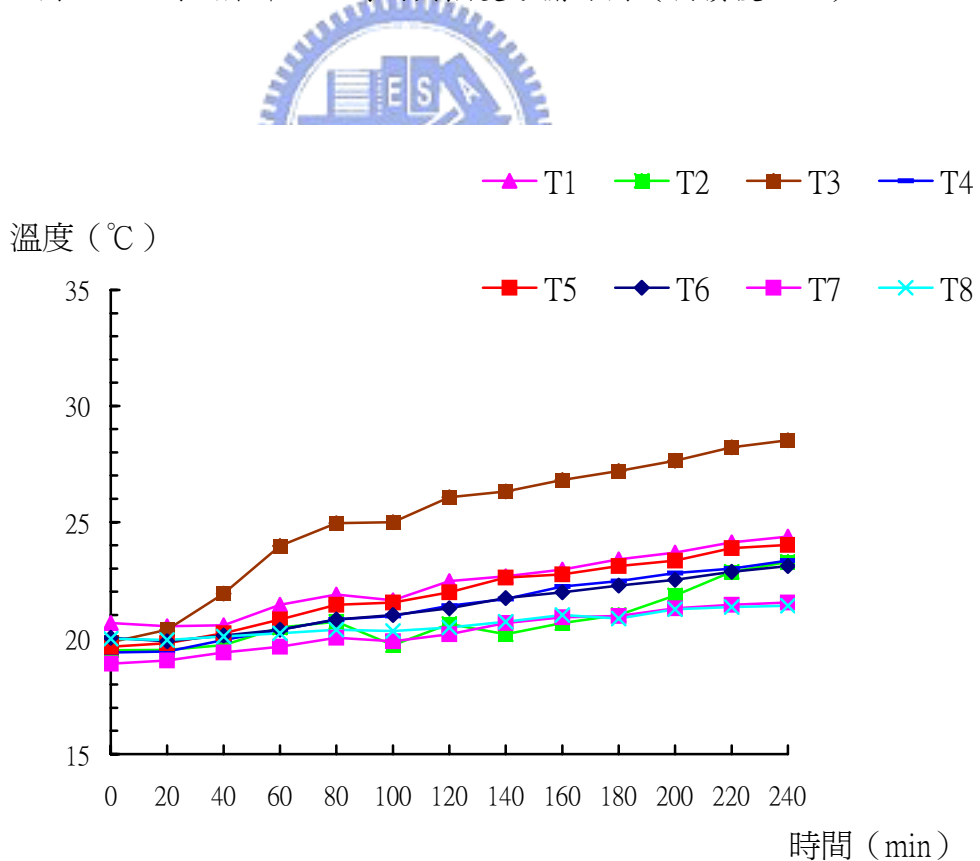


圖 4.32 測試條件 1 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償後驗證)

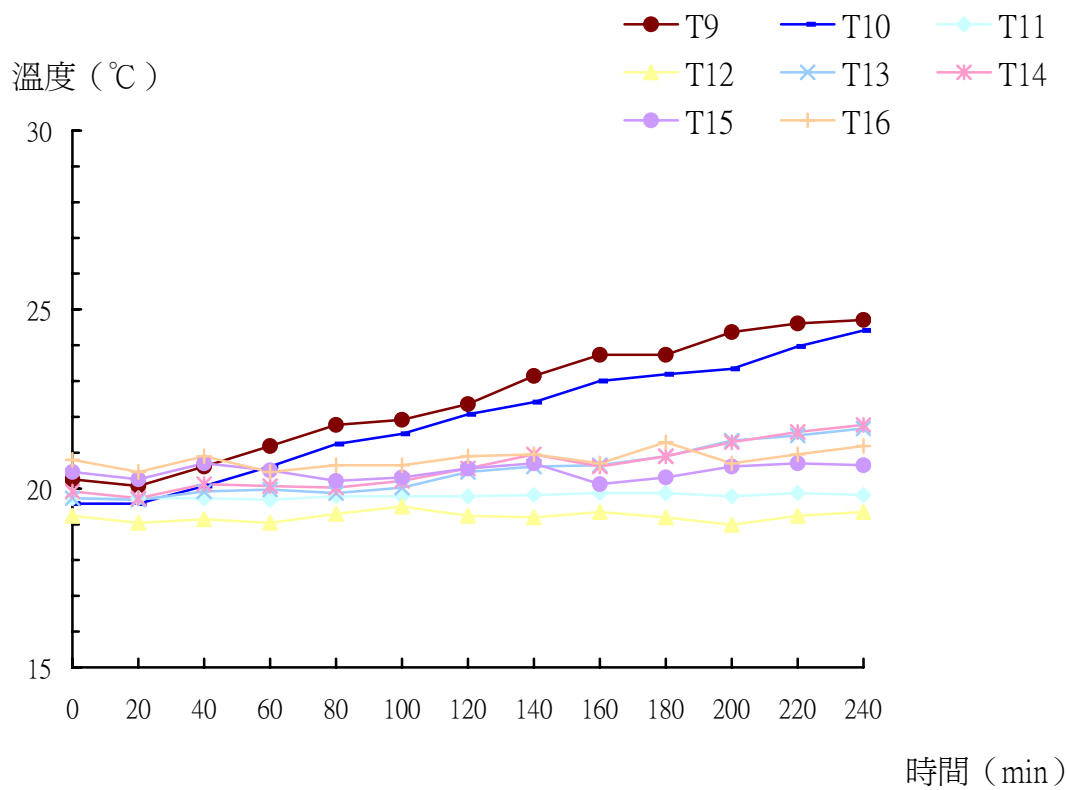


圖 4.33 測試條件 1 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖 (補償後驗證)

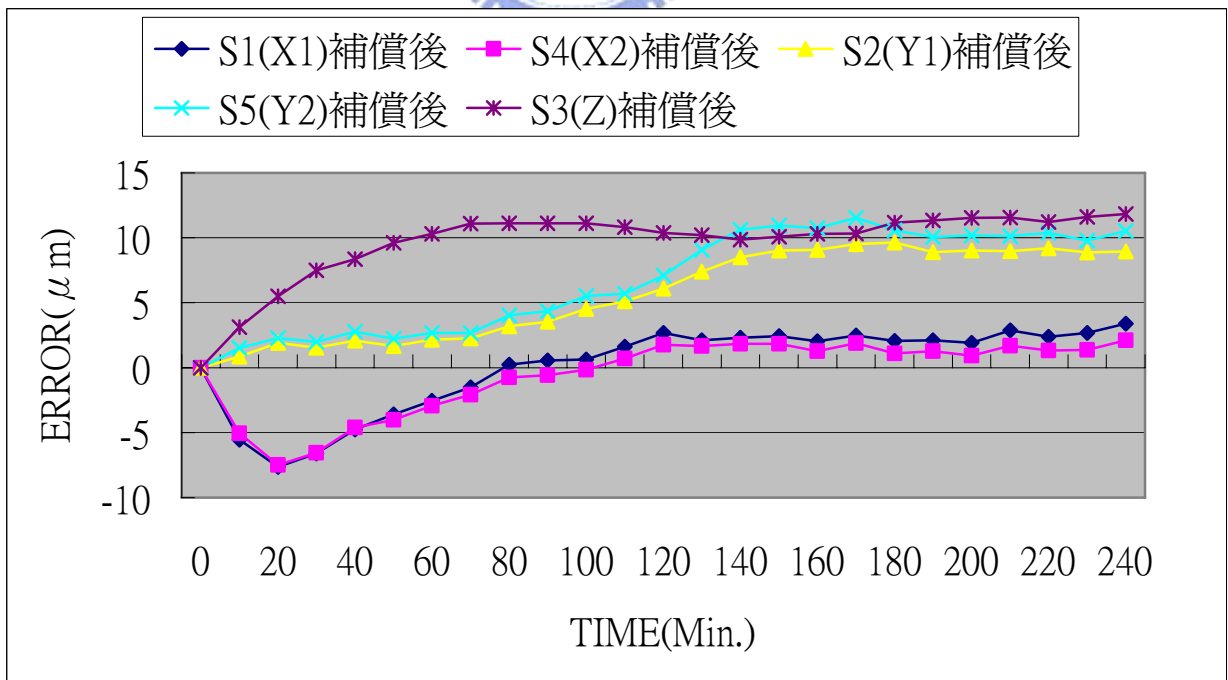


圖 4.34 測試條件 2 之時間與熱變形關係圖 (補償後驗證)

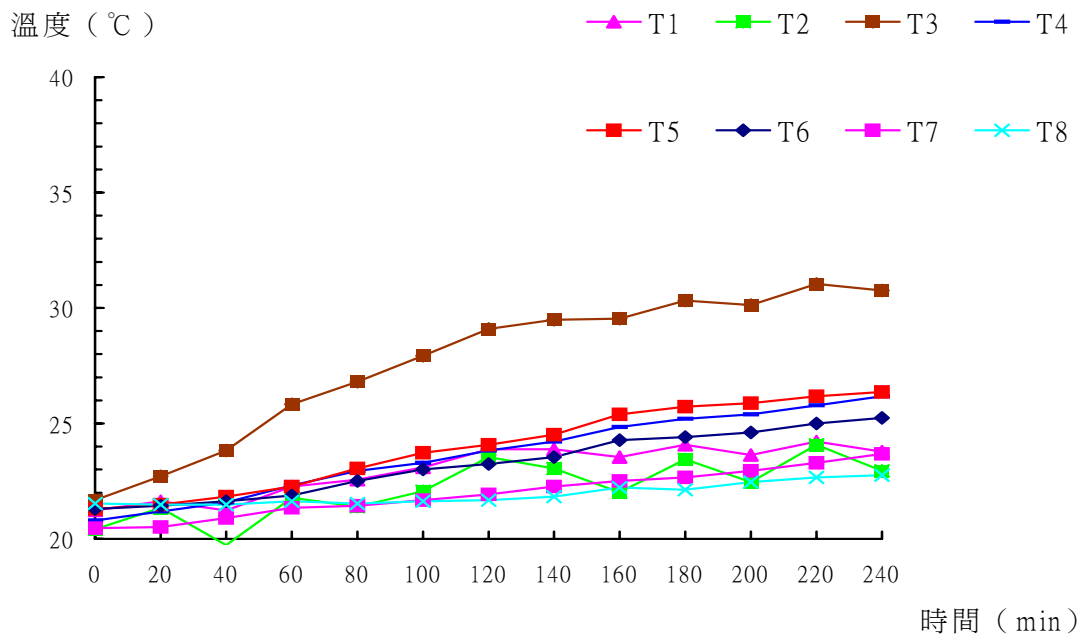


圖 4.35 測試條件 2 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償後驗證)

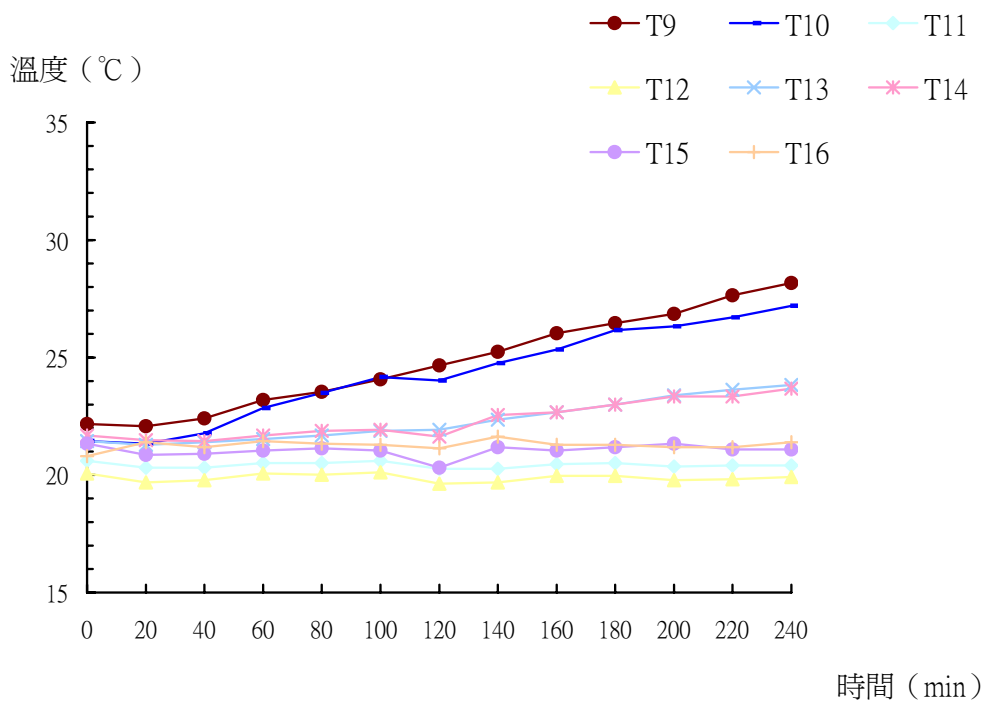


圖 4.36 測試條件 2 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖 (補償後驗證)