

## 應用倒類神經法於放電線切割機熱溫升量測

陳紹賢<sup>1</sup>、鄭玉生<sup>2</sup>

Shao-Hsien Chen<sup>1</sup> and Yu-Sheng Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立勤益科技大學機械工程系助理教授

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering,  
National Chin-Yi University of Technology

E-mail: e6036@ncut.edu.tw

<sup>2</sup>國立勤益科技大學機械工程系研究生

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering,  
National Chin-Yi University of Technology

E-mail: o100220828@yahoo.com.tw

### 摘要

影響放電線切割機加工精度的主要誤差來源是下伸臂熱溫升使結構熱變形所產生的熱誤差。因此本研究針對放電線切割機下伸臂熱誤差進行量測。使用放電線切割機進行實驗，配合量測設備在工具機建立一套熱溫升與熱位移量測系統，共有8個IC型溫度感測器與3個渦電流位移感測器，同時考慮下伸臂及立柱上多點之溫度變化，配合環境溫度等不同條件下進行實驗，量測溫度與位移之數據。以倒類神經預測放電線切割加工機放電期間下伸臂結構熱變形所產生的熱誤差建立之模型，未來藉由PC-base控制器做補償驗證，有助提升工具機之精度。

關鍵字詞：熱補償、熱溫升、倒類神經、放電線切割加工機

### Abstract

The main sources of error affecting the discharge wire cutting machining accuracy under the outriggers hot temperature rise so the thermal structure thermal deformation error. Therefore, this study measured the thermal error outriggers for discharge wire cutting. Discharge wire cutting experiments, with the measurement equipment in the machine tools to establish a thermal temperature rise and thermal displacement measurement system, a total of 8 IC temperature sensors and three eddy current displacement sensors, taking into account under under different conditions of the outriggers and the column (s) on multi-point temperature changes, with the ambient temperature experiment, the temperature of the measurement data and Displacement. Discharge wire cutting down neural prediction the outrigger structure thermal deformation processing machine discharge during thermal error arising from the establishment of the model, the future compensation validated by the controller of the PC-base to enhance the accuracy of machine tools.

**Keywords:** Thermal Compensation, Temperature Variation, artificial neural network ,WEDM

### 1. 前言

隨著放電線切割加工機應用的普遍性以及自動化加工製程，工具機機台精度的穩定性要求日益嚴苛。其中影響工具機加工精度的主要誤差來源是在放電期間下伸臂結構熱變形所產生的熱誤差以及在高溫或寒冷環境無空調下室溫的影響。因此如何降低由熱溫升變形所引起的加工誤差，來提高加工產品精度，已成為國內外工具機製造廠須面對的重要課題。在CNC工具機這方面，熱補償技術已趨漸成熟，但是在放電線切割加工機上並無太多的文獻紀載，所以在找尋最佳溫度黏貼位置以及補償方法是現今所需要研究探討的。

以放電線切割加工機來進行高精度加工，必須考慮影響加工產品精度的因素。這些因素可分為三個部分：工具機本身影響、切割加工影響、環境變數影響。在這些因素的交互作用影響下，使工具機誤差量大增，造成產品加工精度不佳。尤其以第一部分之靜態幾何誤差與動態熱誤差為重要影響因素。近年來針對研究工具機靜態幾何誤差及動態熱誤差之文獻如下列所示：Wang[1]利用溫度感測器與紅外線位移量測裝置於精密磨床進行主軸熱溫升變形量測與補償。由結果可得知，在主軸轉速位移量為 $34\mu\text{m}$ ，以溫度區間為每 $2^\circ\text{C}$ 進行補償，可減少約為 $\pm 4\mu\text{m}$ 。

Creighton[2]利用7個T-type熱電偶溫度感

測器與1個電容式位移計於微銑削高速主軸進行Z軸熱溫升便行量測與補償。由結果顯示，未補償前主軸伸長量達 $6\mu\text{m}$ ，透過補償後主軸伸長量抑制在大約 $1\mu\text{m}$ 。

Du[3]利用多變數線性回歸分析法於CNC車削中心機進行熱溫升變形補償。設計四個在合理範圍內溫度係數，計算實際熱誤差數據和預測誤差值之間的平方差，最後根據溫度係數的組合與平方差之間的關係找到最佳係數，進行補償。補償後熱誤差變形由 $35\mu\text{m}$ 降至 $12\mu\text{m}$ 。

Lee[4]以14個溫度感測器與1個電容位移感測器於臥式CNC銑床量測熱誤差。以多變數回歸分析方法建立熱誤差模型，於主軸座Z方向之熱變形誤差可將誤差由 $100\mu\text{m}$ 降至約 $20\mu\text{m}$ 左右。

Lo[5]利用四軸雙主軸立式車床使用94個溫度感測器並建立所有可能之溫度點混合組合量測熱溫升變化。以多變數線性回歸方法，將最佳溫度點組合，作為回歸分析之自變數建立熱誤差模型，經模擬分析將熱變形誤差經補償後之最大誤差由 $20\mu\text{m}$ 降至 $2\mu\text{m}$ 。Fan[6]利用8個溫度感測器與5個位移感測器於立式加工機量測熱誤差，以線性迴歸分析法建立熱誤差預測模型，透過工具機參考原點漂移方式直接補償預測熱誤差值。由結果顯示，主軸熱變形經補償後由 $60\mu\text{m}$ 降低至 $10\mu\text{m}$ 。

吳[7]利用11個K-type黏貼式熱電偶溫度感測器與3個電容式位移計於龍門加工中心機進行Z軸與Y軸熱溫升變形量測。以多變數線性回歸分析建立熱誤差補償模型，補償後主軸熱誤差可控制在 $12\mu\text{m}$ 以下。

范[8]使用IC型溫度感測器及刀具設定觸發探頭(MP4)立式綜合加工機量取加工熱誤差。以線性迴歸分析建立誤差模型，並以熱誤差模型為預測核心，發展出具有即時補償功能之補償器。由切削模具鋼(SKD61)實驗顯示，可將熱位移量由 $60\mu\text{m}$ 降低至 $10\mu\text{m}$ 以內。

西部seibu[9]通過NC修正機械熱變位的溫度

調整24監視放電線切割機的立柱和下臂的溫度對保持絲線的上端和下端的溫度變化而引起的變位量進行運轉和修正，可將垂直誤差由 $6.5\mu\text{m}$ 降至 $2.5\mu\text{m}$ 。

蔡[10]應用8點IC溫度感測器與3個渦電流位移感測器於立式綜合加工機進行主軸量測，以迴歸分析法建立補償模型，補償後Z方向熱誤差變形由 $18.39\mu\text{m}$ 降低至 $5.67\mu\text{m}$ 。

## 2. 放電線切割工具機熱溫升變形之探討

### 2.1 熱溫升變形之原因

放電線切割機工具機的誤差主要分為靜態的幾何誤差與動態的熱變形誤差。靜態幾何誤差包括各軸向進給的定位誤差和各軸間之垂直誤差等。動態熱變形誤差大小隨加工條件及機器使用時間而有所不同，一般而言，動態熱變形誤差比靜態幾何誤差要大很多，影響因素也相當多，故具有不穩定的重複性，因此對工具機的加工精度有很大的負面影響。放電線切割工具機常見的熱變形誤差為熱伸長變形。造成工具機熱誤差的來源可分為內部熱源與外部熱源，內部熱源為放電線切割工具機在運轉時，機械元件產生摩擦所造成，例如絲線、導螺桿、下伸臂、電機發熱及放電切割熱等。外部熱源主要為工具機所處環境溫度的變化以及陽光的輻射熱等[7]。

### 2.2 熱溫升變形之改善方法

熱溫升變形改善方法種類很多，表 1 列出工具機熱源分類列出發熱部位、溫升熱變形的原因與改善方法[7]。

表 1. 放電線切割機發熱原因與改善方法

熱源分類	發熱部位	發熱原因	改善方法
內部熱源	滾珠螺桿	螺帽與鋼珠、鋼珠與螺桿之摩擦熱	1. 利用暖機的方法。 2. 利用滾珠螺桿預拉力，以降低螺桿熱伸長變形。 3. 使用中空冷卻導螺桿。
	滾珠螺桿軸承	滾珠螺桿兩端支撐軸承之摩擦熱所引起	4. 利用全閉迴路控制系統。 5. 軟體補償法。
	滑軌	滑軌與滑塊之摩擦熱	使用線性滑軌，減少接觸面積，可使溫升降低。
	電器箱與電控箱	因內含有電源控制器等	將電器箱與電控箱盡量與工具機結構保持適當距離，並加裝空調冷卻系統。
	絲線與下伸臂	放電與回收絲線摩擦熱所引起	冷卻水降溫
外部熱源	環境溫度改變	工廠內其他熱源	儘量使工廠內的溫度保持恆溫。
		工廠內外的空氣對流	
		陽光照入工廠造成溫度上升	
	其他機器過於接近造成熱的產生	避免工具機相隔太近。	
輻射熱	陽光直接照射在機台上	避免陽光直接照射機台。	

### 2.3 熱傳遞之方式

熱能為溫度的一種關係式，某個物質通常較高的溫度其所含能量越高。熱傳導是因為溫度的差異，導致熱能於單一物體內或數個物體間，相互交換，當兩個物件的溫度不同時，熱能的傳遞

都是從溫度高的傳導至溫度低的地方，換句話說，熱都是由熱的傳到冷的位置。工具機熱變形發生原因主要是來自機床上的溫度不均一分佈，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，如圖1所示。以下分別為熱傳導、熱對流與熱輻射之說明：

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物質本身特性、傳導物體間接觸之截面積、傳導之距離與傳導物體兩端之溫度差。熱傳導方程式為：

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

其中  $k$  為熱傳導係數， $A$  為截面積， $\partial x$  為距離， $\partial T$  為溫度差。

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，一般冷卻系統大多採用幫浦或風扇等強迫對流的方式。熱對流方程式為：

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

其中  $h$  是熱對流係數， $A$  是截面積， $\Delta T$  是溫度差。

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。熱輻射方程式為：

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

其中  $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \cdot w/(m^2 \cdot k^4)$ ，稱為 Stefan-Boltzmann 常數； $A$  是截面積； $T_1$  和  $T_2$  分別是兩熱輻射體之溫度。

由於以上三種熱的傳遞方式都無法在無限小的時間內使物體達到均溫，故雖然熱傳遞屬於暫態效應，最終會因熱平衡而取消，不過由溫度差所導致的溫度流將持續一段時間，在此作用時間內仍會因溫度差而使物體產生熱變形現象。

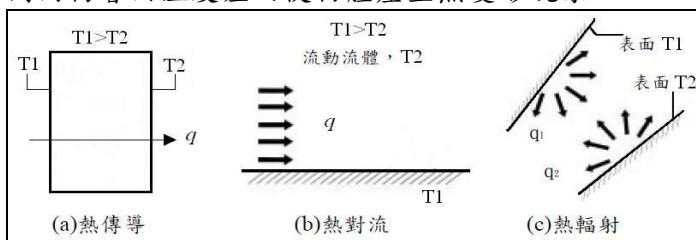


圖1. 熱傳遞之方式

## 2.4 線切割機導電性

關於導電性，雖對放電的結果影響不大，但在傳送電極裝置上卻有相當大的影響。所謂的液中放電，乃事液體中因產生氣體而引起的一種現象。一入電場時，最初會由電場放出來的電子與液體分子發生衝突，並把該分子加熱而因此產生氣體出來。水在外加放電電壓之後到引起放電之間的時間  $\tau_w$ ，一般是較煤油為大。此時在電廠內所產生的熱量應為[17]：

$$H = M_p C(T_L - T) + M_p L$$

其中  $H$  為發生熱量、 $M_p$  為液體的質量、 $C$  為液體的比熱、 $T_L$  為液體的沸點、 $T$  為液體的溫度、 $L$  為液體的潛熱。

## 3. 實驗規劃與設備

### 3.1 實驗規劃

由於本研究目的是利用加熱棒加熱模擬加工狀況去量測機床上的溫度變化與位移變化，影響下伸臂熱誤差主要來源為絲線摩擦與放電切割摩擦，故本實驗溫度感測器黏貼位置選擇下伸臂前端與下伸臂右端，並且將加熱棒放置切割位置正下方。將溫度感測器以強力磁鐵以及黏土吸附於發熱位置，位移感測器以非接觸式位移計固定架放置於上機頭。表 2 與圖 2 為感測器黏貼位置名稱及機床上之固定位置。圖 3 為本實驗之實驗流程圖。

表2. 感測器黏貼位置名稱

T0	下伸臂前端
T1	下伸臂後端
T2	下伸臂上端
T3	下伸臂右前端
T4	下伸臂右後端
T5	V 軸
T6	立柱
T7	室溫
D1	X 軸方向
D2	Y 軸方向
D3	Z 軸方向

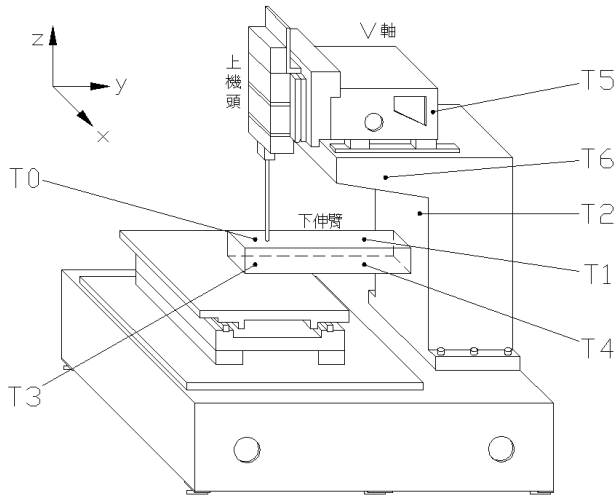


圖2. 下伸臂溫度感測器位置圖

### 3.2 實驗設備

本實驗所使用的機台為高精度龍門型線馬驅動線切割機，搭配PC-base 控制器如圖4所示：

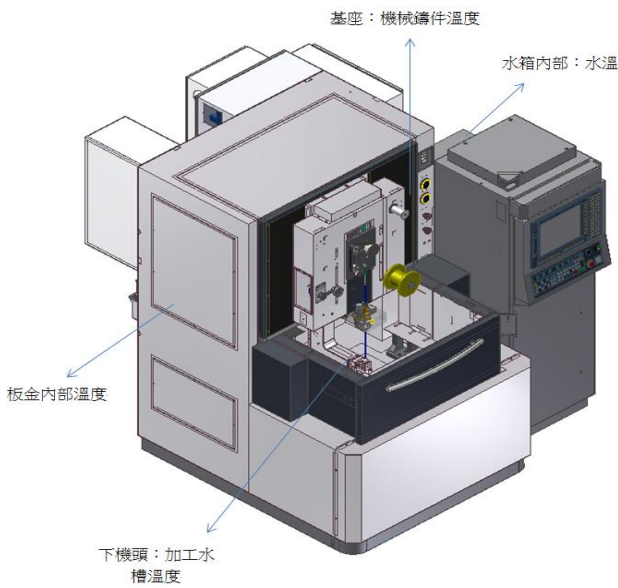


圖4. 龍門型線馬驅動線切割機

本實驗所使用感測器為 IC 型溫度感測器與：渦電流位移計，IC 型溫度感測器解析度為 $0.03^{\circ}\text{C}$ ，綜合精度為 $0\sim 125^{\circ}\text{C} \pm 0.25\%$ (兩點校正後)；渦電流位移計解析度為 $0.1\mu\text{m}$ 。

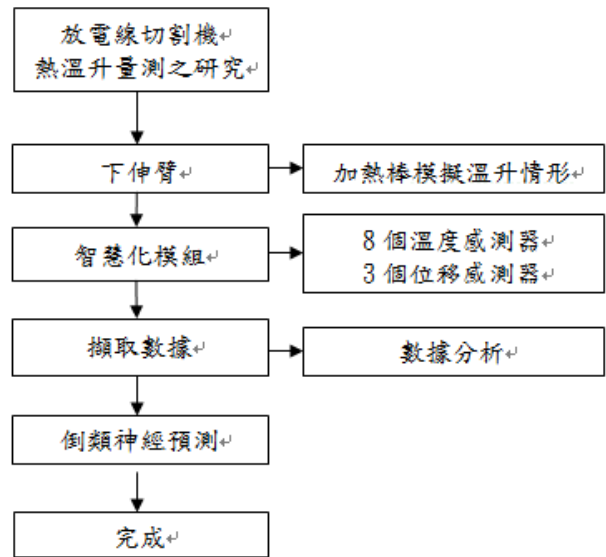


圖3. 實驗流程圖

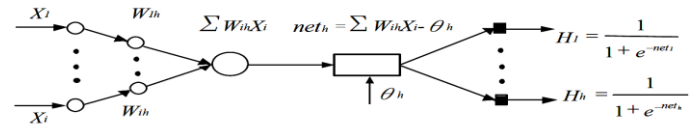
## 4. 結果與討論

### 4.1 熱溫升預測方法

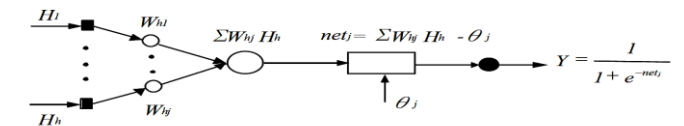
本研究主要探討對象為：龍門行線馬驅動線切割機，針對下伸臂溫升熱變形建立一套完整的量測與預測，最後去探討經由預測後誤差的變化量。

### 4.2 倒類神經預測

倒傳遞網路(BPN)的主體，主要分為兩部份：(一)藉由輸入學習範例之相關資料來學習的模式，求得其加權值 (Weight Value)、偏權值 (Threshold Value) 的學習過程。(二)讀入經學習過程所得的加權值、偏權值，使模式具有預測能力的回想過程。[16]如圖五所示：



輸入層至隱藏層之數學模型



隱藏層至輸出層之數學模型

圖5. 倒類神經之數學模型

### 4.3 溫度量測結果

在這套量測系統中，主要以立柱溫度(T6)作為基準，並同時量測室溫之溫度變化作為參考，並且以溫度上升約五度為基準，另外配合位移計同時量測每一溫度點所產生之位移數據，此位移數據需經由公式轉換得到確切位移量，如下列所示：

$$\text{每隔距離之轉換} = \frac{\text{讀值}_1(\text{unit}) - \text{讀值}_2(\text{unit})}{\text{手輪倍率}(100 \mu\text{m})}$$

其中，讀值 1：退 20 格再進 20 格之讀值；  
讀值 2：進 1 格之讀值(手輪倍率為 100)。

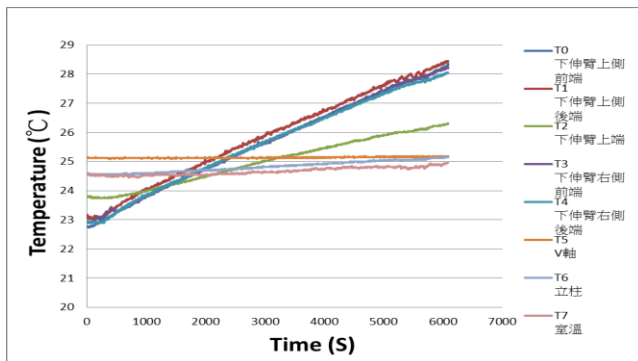


圖6. 測量溫度曲線圖

如圖 6 所示，量測時間大約在 100 分鐘後溫升量到達約 5 度，圖中可發現溫度最高為下伸臂前端(T0)，過來是下伸臂右前端(T3)，這代表影響下伸臂熱溫升的主要關鍵點為下伸臂前端與右前端，因此將下伸臂前端與基礎溫度進行比較如圖 7 所示

表 4. 下伸臂熱溫升結果比較

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
開始	22.8	23.1	23.8	22.9	22.9	25.1	24.6
結束	28.4	28.5	26.3	28.2	28.0	25.2	25.1
溫升	5.6	5.4	2.5	5.3	5.1	0.1	0.5

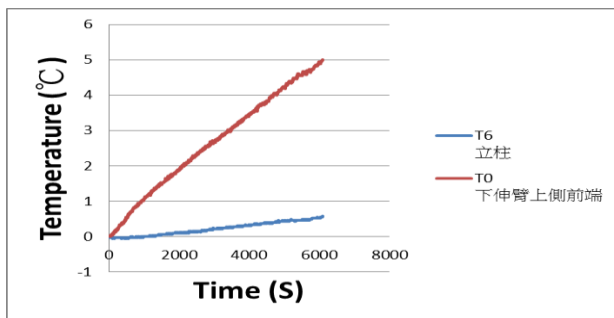


圖 7. 關鍵點之溫升曲線圖

由圖 6 之結果整理出各溫度點的溫升量如表 4 所示。由表 4 可看出當加熱棒開始加熱到停止下伸臂前端溫度由 22.8°C 升高到 28.4°C，溫升大約提升為 5.6°C 此溫度為下伸臂變形之主要參數。其中 V 軸溫度(T5)變化不大，由上可證實工具機變形以下伸臂變形為主，其餘溫度點，離加熱區較遠故溫升量較少。由圖 6 之數據經由 Excel 整理分析可以得到圖 8 溫升曲線圖。

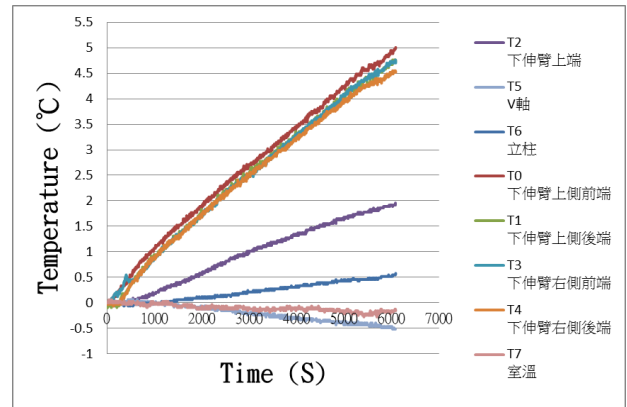


圖 8. 各點溫升曲線圖

### 4.4 位移量測結果

將擷取到的數據經由 Excel 整理分析後得到如圖 9 所示，可以得知最大變形量在 Y 軸方向主要是一個熱伸長的現象產生，X 軸與 Z 軸變化較不明顯，最後利用倒類神經預測比較。

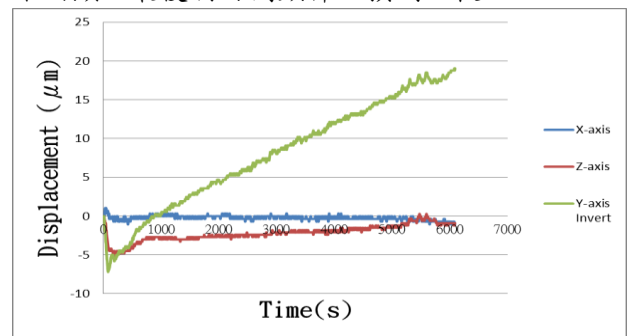


圖 9. 位移變化圖

由圖 9 之結果可以看出來 X 軸位移量 1.05 μm，Y 軸位移量為 19.06 μm，Z 軸位移量 0.89 μm。在前面的位移變化為水剛進去加工區加熱棒還沒開始加熱所產生的影響。由此可見影響下伸臂變形最大者為 Y 軸的一個熱伸長其餘軸向並不會影響到下伸臂。

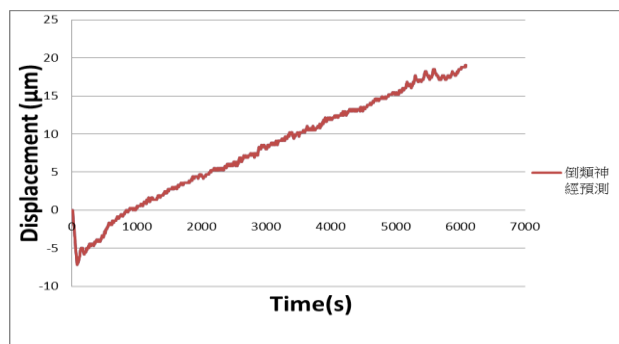


圖 10. 倒類神經預測位移變化量

由圖 10 之結果可以看的出來由倒類神經預測出來的位移量與圖 9 Y 軸實際的變化量相接近。

## 5. 結論

本研究主要探討對象為：龍門行線馬驅動線切割機，針對下伸臂溫升熱變形建立一套完整的量測與預測，透過倒類神經分析預測。

1. 溫度感測器與位移計之安裝位置及安裝方式必須謹慎選擇，應避免影響熱誤差之熱源干擾，使溫度變化可以即時且正確地反映在機台上，確保補償模型的適用性及準確性。
2. 經由利用加熱棒模擬溫升的情況來看，可以發現熱變形在加熱位置正上方溫度點最高，越遠則溫度較低故可得知關鍵溫度點為T0。
3. 經由實驗結果可以得知Y軸位移量為最大  $19.06 \mu\text{m}$ ，另外兩軸則沒有太多的位移變化。
4. 後續會將倒類神經預測後的模型藉由 PC-base 控制器去做一個補償驗證。

## 6. 參考文獻

1. Y-C Wang, "Investigation on the spindle Thermal displacement and its compensation of precision Cutter grinders", Measurement 1183-1187, 2011。
2. E. Creighton, "Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 386-393, 2009。
3. Z.C. Du, "Modeling approach of regression orthogonal experiment design for the thermal error compensation of a CNC turning center", Journal of Materials Processing Technology, 619-623, 2002。
4. J-H Lee, "Fault Diagnosis and recovery for a CNC machine tool thermal error compensation

system", Journal of Manufacturing Systems, 428-434, 2001。

5. C-H Lo, "Optimal temperature variable selection by grouping approach for thermal error modeling and compensation", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1386-1396, 1999。
6. Kuang-Chao Fan, "An Intelligent Thermal Error Compensation System for CNC Machining Centers", Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol.28, No.1, 91-97, 2007。
7. 吳政憲, 龍門加工中心機溫升熱變形量測與分析, 機械月刊, 第 29 卷, 第 3 期, 文 48-58, 2003。
8. 范光照, 工具機熱誤差補償技術, 機械月刊, 第 25 卷, 第 3 期, 490-502, 1999。
9. 應杏娟, 數控機床主軸系統熱特性有限元分析, 上海工具技術月刊, 第 44 卷, 第 1 期, 38-40, 2010。
10. 曾柏昌, 高精度進給系統之熱抑制效能分析, 機械工業雜誌, 第 324 期, 3 月, 54-62, 2010。
11. 陳順宇, 迴歸分析, 第三版, 華泰書局, 2000。
12. 蘇立凱, CNC 控制器與切削最適化參數調整之研究, 國立勤益科技大學, 碩士論文, 台中, 2011。
13. 謝宗哲, 高精度工具機熱誤差補償技術, 國立中興大學, 碩士論文, 台中, 1998。
14. 西部seibu, 通過NC修正機械熱變位的溫度調整24
15. 蔡一郎, 應用回歸分析法於CNC工具機熱溫升量測與補償 GETA104-3C007-F。
16. 黃再得, 銑削模具鋼之刀具磨耗及表面粗糙測模式之探討, 屏東科技大學, 碩士論文, 屏東, 2003。
17. 黃錦鐘, 線切式放電加工(NC-EDM), 全華科技圖書。