

不同夾持工件重量對 CNC 車床主軸溫升之影響

The Influence of Different clamp the workpiece loading weight of the CNC lathe spindle temperature

陳紹賢¹、華柏堯²、劉哲瑋²

Shao-Hsien Chen¹, BO- YAOHUA²,and Jhe-Wei Liou²

¹ 國立勤益科技大學機械工程系助理教授

¹Department of Mechanical Engineering, National Chin-Yi University of Technology

E-mail : e6036@ncut.edu.tw

² 國立勤益科技大學機械工程系學士生

² Department of Mechanical Engineering, National Chin-Yi University of Technology

E-mail : huadasha@gmail.com

E-mail : john613034@yahoo.com.tw

摘要

工具機實驗誤差因素中，以熱所產生之誤差影響最為嚴重。所以本實驗針對 CNC 車床主軸溫度變化進行量測。使用 CNC 車床加工機進行實驗，利用量測設備測量出此車床加工機在不同轉速不同載重下之熱溫升變化，IC 型溫度感測器共 8 個分別貼於主軸內部不同位置、底座及室溫，將量測溫度之數據以 Excel 檔加以整理，而得到不同轉速不同載重之溫度分佈圖，探討車床主軸。對不同轉速，不同量測位置對溫升之影響，以利將來進行熱溫升之補償研究。

關鍵字：熱溫升量測、車床、熱溫差、主軸

Abstract

The thermal error of machine tool error factors with the most serious. In this study, we focused on machine tool spindle thermal error measurement. Using CNC lathe machine to experiment with the measurement equipment to measurement the temperature variation of different spindle speeds, total of 8 IC-type temperature sensors are affixed to the different positions of spindle head, the base and the room temperature, measurement the temperature and displacement data organize this data and put in excel, and acquire to the temperature distribution of different speed, discussion on the effect of the lathe spindle temperature variation for the different measurement position and different spindle speed.

Keyword: Temperature Variation Measurement, Lathe, Thermal Error, Spindle

1. 前言

工具機(Machine tools)俗稱為工作母機，是各種基礎加工與精密加工不可或缺的機器設備，所以又稱之為機械之母。由於，熱脹冷縮為大多數金屬材料對溫度特性，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。因此，改善機台加工精度及選擇良好的加工製程都是達成高品質產品的關鍵。

2.CNC 工具機熱溫升變形之原理[7]

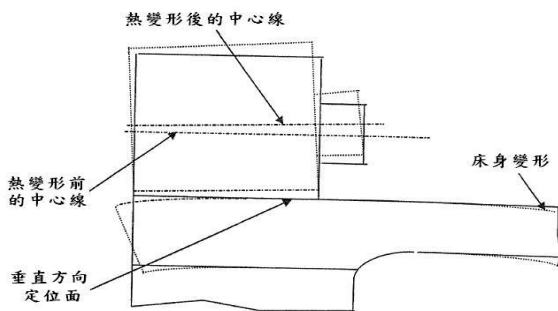


圖 1. 車床熱變形示意圖

由圖可知，車床溫升後，主軸中心線在空間的位置產生了明顯的位移變化，歸納其原因主要可分為下列兩點：

1. 主軸前後軸承的散熱量不同，主軸箱前端壁的熱膨脹量大於後端壁的熱膨脹量，使主軸中心現在垂直面內，以主軸箱垂直方向的定位面為基準，傾斜的向上升高。
2. 主軸箱內潤滑油吸收了傳動件運轉時的摩擦熱，並經過飛濺攪拌後，形成一個熱源通過箱體底部傳給床身，床身受熱後產生變形、翹曲，使主軸箱在床身上的垂直方向定為基準面和測向定位基準面的位置產生了變化。車削中心熱誤差解決方法，由以上討論得知，高摩擦力、高速旋轉或移動的構件（諸如：傳動軸、線性滑軌、高速主軸）會造成車削中心的熱誤差，而專家學者研究車削中心熱誤差已經行之有年，改善的方法有三大方向：1. 防止熱的傳遞；2. 降低或防止熱變形；3. 熱變形後加以補償。

- (1) 防止熱的傳遞：直接採用斷熱(Thermal Break)的方式來隔絕熱緣，利用陶瓷或天然花崗岩構件來組裝車削中心，但是此一種方法往往不合乎經濟效益，並且採用斷熱的方法會使車削中心局部溫度高於其他組件，造成溫度奇異點，使溫升熱變形更加嚴重。
- (2) 降低或防止熱變形：利用循環冷卻液降低或是事先加溫使工具機在一穩態且整機均溫下達到避免阿貝誤差的效果，但是此種方法花費較高，且效果不好，因為要達成整機熱平衡相當困難若冷卻或溫機不當極有可能造成車削中心局部溫場偏離(相對於整機太高或太低)，舉一邊對外部軸承護套施以冷卻的方法為例，若只對外部軸承護套降溫，則軸承內部的膨脹將大於軸承外部的膨脹，該軸承產生縮緊、更大的熱效應之後果。

3. 熱變形後加以補償：對於熱誤差不採用抑制的方法，而任其自由生長，但對於熱誤差成長的方向採用追蹤的方式，找出溫度與熱誤差的關係式，在使用補償的方法，修改 NC 指令，使熱誤差對工件的誤差貢獻量達到最小。

4. 轉速對溫升之影響[9]

以內藏式主軸為例，主軸之軸承可分為前軸承、後軸承。當主軸高速旋轉時，會由前軸承與後軸承之滾珠轉動摩擦而產生熱量，由於摩擦熱量會造成主軸溫度上升而產生熱變形，為了瞭解軸承摩擦所產生之熱量，經由文獻可得知軸承熱量之計算公式為：

$$Q = 1.047 \times 10^{-1} n M \quad (1)$$

其中，Q：5 軸承產生之熱量(W)；

n：軸承轉速(rpm)；

M：摩擦力矩(Nm)。

在式子(1)中軸承摩擦力矩 M，為軸承負荷引起的力矩 M1 與軸承潤滑油引起之力矩 M2，故可將摩擦力矩表示為：

$$M = M_1 + M_2 \quad (2)$$

在式子(2)中，由軸承負荷引起的力矩可表示為：

$$M_1 = \mu_0 \cdot f_0 \cdot F \cdot d_m / 2 \quad (3)$$

其中， μ_0 ：摩擦係數；

f_0 ：負荷方向係數；

F：軸承負荷(N)；

d_m ：公稱軸承內徑(m)。

由軸承潤滑油引起的力矩可表示為：

$$M_2 = f_1 \cdot (\nu \cdot n)^{2/3} d_m^3 \quad (4)$$

其中， f_1 ：軸承結構類型與潤滑劑類型之係數；

ν ：潤滑油黏度(m²/s)；

d_m ：公稱軸承內徑(m)。

簡單的軸承發熱量估計可直接由軸承所受的摩擦力乘與上限速度而得到故計量，預估量方程式如下所示：

$$H = F \cdot V = F \cdot r \omega = \frac{F r N (2\pi / 60)}{12 \times 550} \approx \frac{M N}{63000} \quad (5)$$

此公式為英制功率，其中，F 為摩擦力(N)；V 為切線速度(m/s)；r 為半徑(m)； ω 為角速度(rad/sec)；N 為轉速(rpm)；M 為摩擦力矩(N·m)。此外，由文獻可得知運轉過程中可利用摩擦力矩與轉速之轉換公式來預估發熱量：

$$Q = 0.0525 \cdot \mu \cdot d \cdot F \cdot n \quad (6)$$

其中， μ ：摩擦係數；

d ：軸承公稱內徑(m)；

F ：軸承負荷(N)；

由上述之公式可得知，當主軸轉速 N 越高時相對軸承發熱量 Q 會越高，因此，主軸軸承因長時間運轉會使發熱量越高，造成機台溫度上升熱變形而影響精度。

3. 實驗規劃與設備

3-1 實驗規劃

1. 本實驗主要測試不同夾持重量與負載對熱溫升之影響，其主軸轉速由 1000rpm 增加至 4000rpm，觀察其主軸熱溫升之變化。其實驗流程圖如圖 2. 所示。

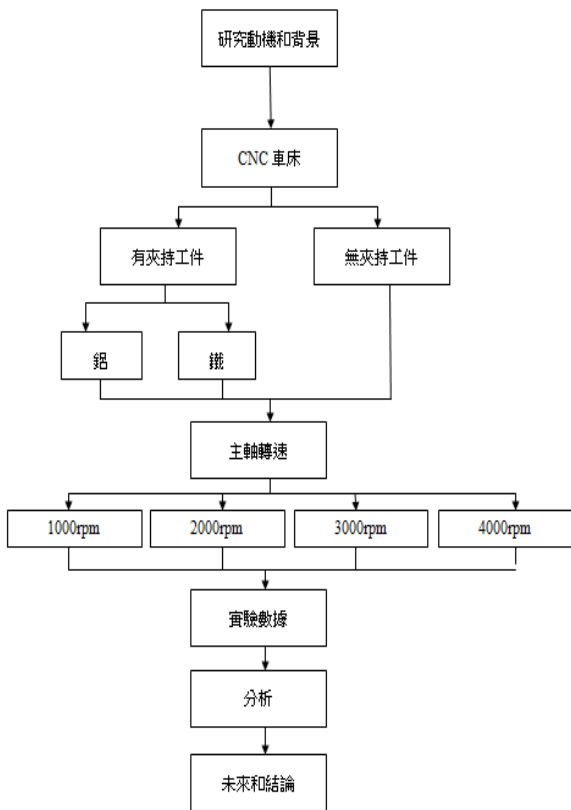


圖 2. 實驗流程圖

2. 本實驗溫度感測器黏貼位置如圖 3. 至圖 5. 所示。其各位置之說明如表 1. 所例，為 8 個溫度感測器。

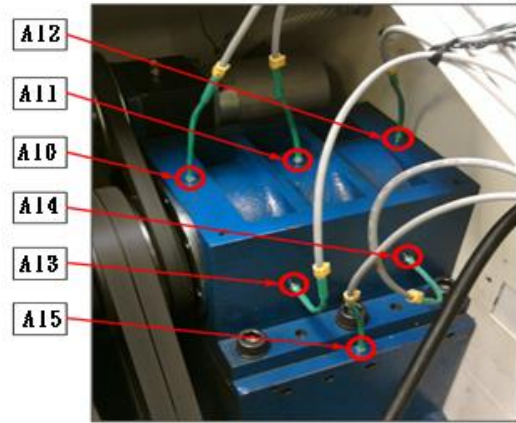


圖 3. 溫度感測器黏貼位置(主軸頭)



圖 4. 溫度感測器黏貼位置(後底座)



圖 5. A17 溫度感測器黏貼位置(室溫)

表 1. 感測器黏貼位置名稱

感測器編號	感測器位置名稱
A10	主軸頭後軸承
A11	主軸頭兩軸軸承中央
A12	主軸頭前軸承
A13	主軸頭側面後端
A14	主軸頭側面前端
A15	主軸頭底中央
A16	底座
A17	室溫

3-2 實驗設備

1. 本實驗以智能化量測模組，並配合 IC 型溫度感測器
2. CNC 車床為昇岱 SDC-32A

表 2. 車床規格

規格	SDC-32A
控制器	Syntec PC-based
最大外徑	φ 200mm
滑座上旋徑	φ 300mm
X 軸行程	150mm
Y 軸行程	200mm
夾頭	5" 三爪油壓夾頭
主軸鼻端	A2-4
主軸馬達	5HP/3.7KW
主軸轉速	50~4500rpm

4. 實驗結果與討論

4-1 不同負載與轉速之關係

本次實驗主要是以未夾持工件與其他兩種不同工件(鋁、鐵)做比較，主要觀察不同重量對溫升之變化，其重量為模擬切削負載之狀態，而進行切削負載對主軸熱溫升之影響，鋁與鐵其重量與密度比為表 3. 所例。

表 3. 鋁、鐵合金比較表

	體積 mm ³	密度 g/mm ³	重量 kg
鋁	502654	0.0027	1.6
鐵	502654	0.0079	4.5

4-1-1 未夾持工件對轉速之關係

在未夾持工件之實驗中，發現轉速愈高其收斂時間愈短，如圖 6. 和圖 7. 比較所知。

由公式(1)得知，轉速愈高，則產生之熱量愈高，最高溫度點為 AI3，其位置為車床後軸承處，所產生之熱量較高。

其圖 6. 中轉速 4000rpm 之收斂時間為 13060 秒。其圖 7. 中轉速 1000rpm 之收斂時間為 22810 秒。

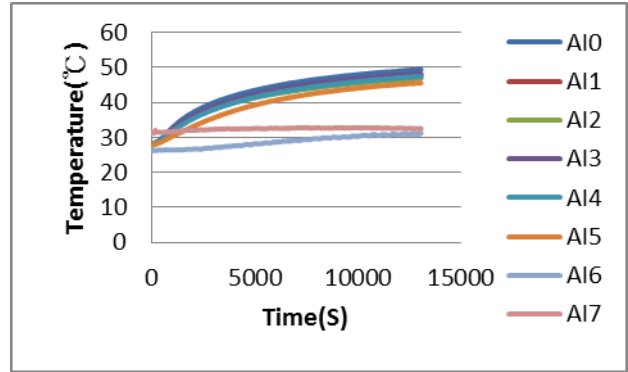


圖 6. 4000rpm 之量測溫度曲線圖

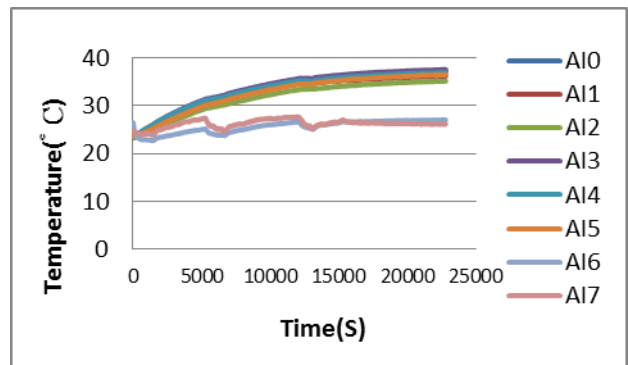


圖 7. 1000rpm 之量測溫度曲線圖

4-1-2 鋁合金工件對轉速之關係

在鋁合金工件之實驗中，發現轉速愈高其收斂時間愈短，如圖 8. 和圖 9. 比較所知。

其圖 8. 中轉速 4000rpm 之收斂時間為 15255 秒。其圖 9. 中轉速 1000rpm 之收斂時間為 24790 秒。

由公式(1)得知，轉速愈高，則產生之熱量愈高，最高溫度點與未夾持狀態相同。

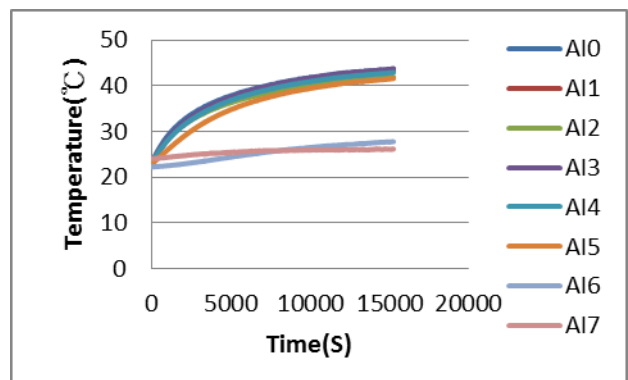


圖 8. 4000rpm 之溫度量測圖

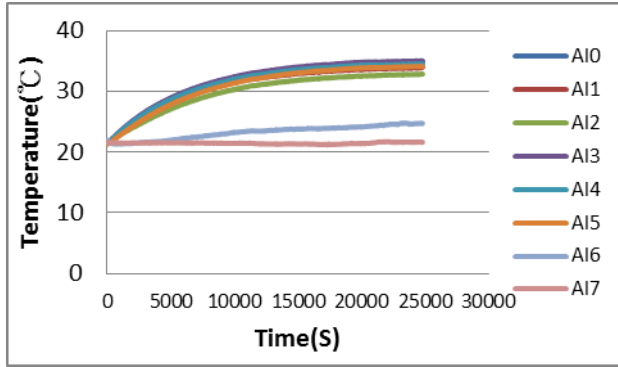


圖 9. 1000rpm 之溫度量測圖

4-1-3 鐵合金工件對轉速之關係

在鐵合金工件之實驗中，發現轉速愈高其收斂時間愈短，如圖 10. 和圖 11. 比較所知。其圖 10. 中轉速 4000rpm 之收斂時間為 16555 秒。其圖 11. 中轉速 1000rpm 之收斂時間為 24795 秒。由公式(1)得知，轉速愈高，則產生之熱量愈高，最高溫度點與其前兩次實驗相同。

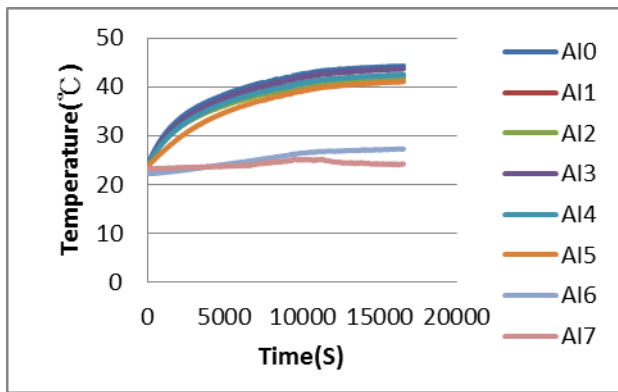


圖 10. 4000rpm 之溫度量測圖

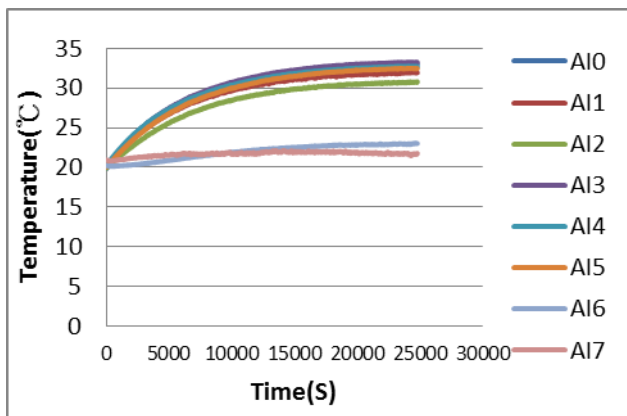


圖 11. 1000rpm 之溫度量測圖

表 4. 收斂時間比較表

	1000rpm	2000rpm	3000rpm	4000rpm
未夾持	22810(S)	19260(S)	17425(S)	13060(S)
鋁合金	24790(S)	20755(S)	23325(S)	15255(S)
鐵合金	24795(S)	17425(S)	14730(S)	16555(S)

以上實驗得知主軸轉速愈高收斂時間愈快，4000rpm 收斂時間幾乎接近 1000rpm 收斂時間的一半。而有載重(鋁、鐵)收斂時間在同轉速也會有此狀況。

4-2 溫升變化與時間之關係

由結果得知主軸轉速為 4000rpm 時，溫升量最高且收斂時間最短，反之，當主軸轉速為 1000rpm 時，溫升量最低、收斂時間最長，由公式中可得知滾珠軸承運轉過程中可利用摩擦力矩與轉換公式來預估發熱量。當轉速越高時，熱量 Q 就越大，溫升量亦隨之增加。

表 5. 未夾持溫度量測表

	未夾持(秒)	最高溫(°C)	室溫(°C)	溫差(°C)
1000rpm	1000.156	25.27472	22.83272	2.442001
	3000.156	28.5409	23.96215	4.578754
	5000.156	31.04396	25	6.043957
	7000.156	32.53968	24.35897	8.18071
	9000.156	33.91331	25.6105	8.302807
4000rpm	1000.156	32.32601	26.43468	5.891331
	3000.156	38.76679	27.04518	11.72161
	5000.156	42.27717	28.1746	14.10257
	7000.156	44.56654	29.1514	15.41514
	9000.156	46.18437	30.00611	16.17827

表 6. 鋁合金溫度量測表

	鋁合金(秒)	最高溫(°C)	室溫(°C)	溫差(°C)
1000rpm	1000.172	23.35165	21.337	2.014652
	3000.172	26.5873	21.5812	5.006105
	5000.172	28.9072	21.97802	6.929182
	7000.172	30.64713	22.4359	8.211233
	9000.172	31.86813	22.95482	8.913309
4000rpm	1000.156	28.4188	22.558	5.860807
	3000.156	34.34066	23.38217	10.95849
	5000.156	37.57631	24.42002	13.15629

7000.156	39.65202	25.39683	14.25519
9000.156	41.11722	26.221	14.89622

表 7. 鐵合金溫度量測表

	鐵合金(秒)	最高溫(°C)	室溫(°C)	溫差(°C)
1000rpm	1000.156	22.03907	20.20757	1.831501
	3000.156	25.18315	20.4823	4.700853
	5000.156	27.442	20.87912	6.562881
	7000.156	29.09035	21.337	7.753359
4000rpm	9000.172	30.21978	21.67277	8.547009
	1000.156	29.12088	22.40537	6.715506
	3000.156	34.67643	23.19902	11.47741
	5000.156	37.66789	24.08425	13.58364
	7000.156	39.80464	25	14.80464
	9000.172	41.20879	25.94628	15.26251

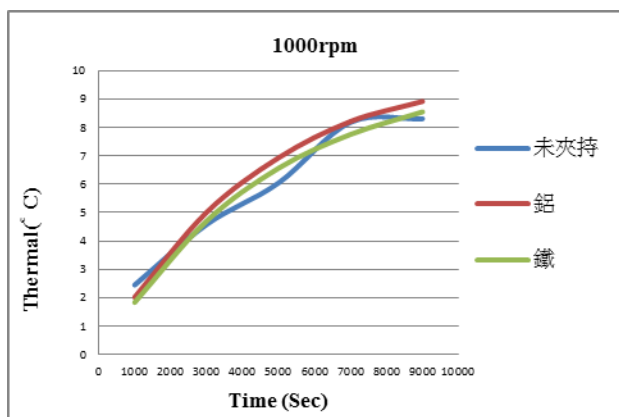


圖 12. 1000rpm 溫升變化圖

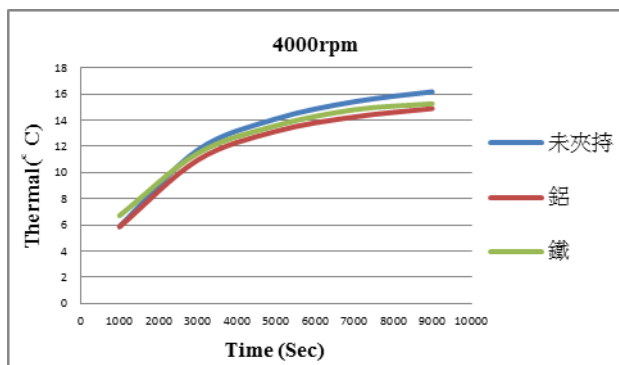


圖 13. 4000rpm 溫升變化圖

5. 結論

1. 當主軸轉速愈高時，則收斂時間愈短；負載愈大時產生熱量愈多，本實驗在轉速較高時會產生較大之變化。

2. 由不同測量位置實驗結果得知，在主軸頭後軸承溫度點因靠近皮帶軸處，承受預壓力較大產生較明顯之溫升。
3. 本研究之量測技術主要探討不同位置、轉速與負載之熱溫升變化，未來可使用回歸分析或類神經網路進行建模與補償。
4. 未來將進行固定轉速，且夾取不同重量的材料及未夾持工件實驗，觀察不同負載對於溫度變化之影響。

6. 參考文獻

1. ZC.Du, J.G.Yang, Z.Q.Yao and B.Y.Xue, "Modeling approach of regression orthogonal experiment desing for the thermal error compensation of CNC turning center", Journal of Materials Processing Technology, Volume 129, Issues 1 - 3, 619-623, 2002.
2. Jianguo Yang, Jingxia Yuan and Jun Ni, "Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center", S.M. Wu Manufacturing Research Center, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA, Received 29 May 1998; received in revised form 22 December 1998, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1367-1381, 1999.
3. 楊宏智, 王榮邦, CNC 車床熱誤差分析暨改善研究, 機械月刊, 第 24 卷, 第 3 期, 266-274, 1998。
4. 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, 48-58, 2003。
5. 曾伯昌, 高精密進給系統之熱抑制效能分析, 機械工業雜誌, 第 324 期, 54-62, 2010。
6. 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。
7. 陳紹賢, 林詠智, 邱薰平, 蔡一郎, 2012 綠色科技工程與應用研討會(GTEA)暨綠色能源與冷凍空調學術研討會(GERA), 2012。
8. 鄭昇芳, 工具機之溫升熱變形, 機械工業雜誌, 第 28 期, 4 月號, 1985。
9. 蔡一郎, 應用迴歸分析法於 CNC 工具機熱溫升量測與補償, 碩士論文, 2012。