



## AC旋轉工作台冷卻控制分析研究

李坤穎<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 國立勤益科技大學，智慧自動化工程系

### 摘要

國內五軸加工機的設計主要以剛性需求為主，在模擬分析方面大多只考慮機台的靜剛性表現或是機台自然頻率的分布情形，但五軸加工機中的主軸及旋轉工作台在動態加工時所產生的熱誤差極大，目前因應作法在結構內部採用冷卻機進行冷卻或補償。在冷卻方法上，並無相對應冷卻熱抑制的對策方法，一般均使用定溫定流量的冷卻方式，然而機台在加工時的負載為持續變化且熱源的冷卻位置、迴路或分流的设计、流量的大小等因素沒有妥善地考量與分析，則可能造成「具有冷卻裝置但沒有冷卻效果」的窘境、抑或是「冷卻過度」的反效果，相較於國外高階工具機尚有些許落差。國際大廠在工具機的冷卻熱抑制技術發展上，均屬於商業機密，故針對工具機冷卻熱抑制的研究，在未來可以開拓不一樣的研究思維及應用發展。本研究主要針對五軸加工機中的關鍵零組件-AC旋轉工作台進行多重物理耦合分析，探討DD傳動馬達(DD motor, Direct drive motor)設計的AC旋轉工作台在動態行為中的熱效應所造成的精度變異，得到在冷卻流量變化下的精度變化，並在實際的五軸加工機透過冷卻流量及溫度控制提昇AC旋轉工作台的動態精度。

**關鍵字：**旋轉工作台、冷卻、五軸工具機

### 前言

工具機精度影響的因素包括設計、製造、組裝、量測、伺服控制、切削、環境及加工中所產生的熱誤差、刀具磨耗與工件的熱變形、以及外在工作環境的變異...等等。根據文獻Bryan研究[1]，工具機加工時之誤差有40%至70%是由熱變位所造成的，影響這些誤差因子包含環境溫度、切削熱源、冷卻流體、馬達、軸承及電子元件...等等，主要透過熱傳、對流及輻射的方式影響工具機精度。為了降低熱源影響，工具機業者目前是利用熱補償的方式來對減少熱誤差[2]，主要是透過位置控制的方式將熱誤差降低。然而，熱誤差補償的方法雖然為一經濟、有效的方法，但是熱誤差的精度會隨著環境溫度變化而失準[3]。現階段的解決方法是採用冷卻系統[4]來進行熱源的冷卻降低熱誤差。除了利用冷卻系統來減少熱源降低熱誤差外，也有一些方法是設計冷卻流道供給冷卻流體來降低熱源的影響[5]。本研究主要針對五軸加工機中的關鍵零組件-AC旋轉工作台進行多重物理耦合分析，探討DD傳動馬達(DD motor, Direct drive motor)設計的AC旋轉工作台在動態行為中的熱效應所造成的精度變異，得到在冷卻流量變化下的精度變化，並在實際的五軸加工機透過冷卻流量及溫度控制提昇AC旋轉工作台的動態精度。

### 研究設備

本研究選用的載台為慶鴻五軸加工機的AC旋轉工作台，產品型號為HM6050L，如圖1所示。使用ITRI控制器，AC軸旋轉工作台轉速為A軸100rpm、B軸120rpm。

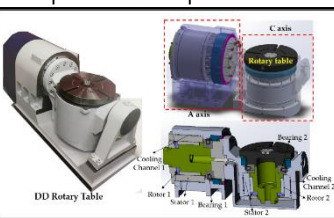


圖1. DD旋轉工作台模組

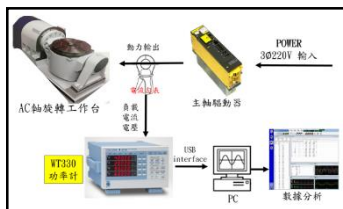


圖2. 功率量測

在馬達發熱理論及計算中，更進一步透過功率量測儀(Power Meter)進行主軸馬達量測，如圖2所示。計算馬達發熱需求得馬達之銅損與鐵損，銅損與馬達電阻有關，電阻愈大銅損愈大，依據本研究中的DD馬達所使用的馬達型號透過不同的負載下的電阻值量測及計算後可計算基本銅損( $P_{cu}$ )。

### 冷卻流場及發熱理論

冷卻流道內部維持流場的均勻性，因此流體的流速不大，假設流場計算區域的流體為不可壓縮流體。簡化的平均時間Navier-Stokes方程及能量方程式，三維的不可壓縮流體可寫為如下：

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, j = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} - g_i \beta (T - T_\infty) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right), \text{ and } \frac{\partial (T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{T' u_j} \right)$$

(1) 在軸承(bearing)發熱理論及計算中，使用SKF提出軸承發熱量(heat generating rate)計算公式，根據滾動軸承中不同摩擦類型，分別計算出不同摩擦源的影響，其公式如下：

$$M = \varphi_{ish} \varphi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (2)$$

### 研究結果

從AC軸旋轉工作台的冷卻流道模擬分析研究中，透過模擬分析，針對不同的前馬達的流道設計的冷卻效率與流道管路壓降進行探討。從模擬分析的結果表一可以看出，AC軸旋轉工作台的變形量隨著轉速增加而變大，在C軸轉速從20rpm增加到100rpm的變形量從11.492μm到19.073μm；而A軸軸承及B軸軸承的溫度亦隨轉速增加而溫度上升。從冷卻流道的溫度來看，由於冷卻油流體主要是帶走馬達內部的熱量，隨著旋轉工作台的轉速增加，其冷卻流道的壁溫也隨之增加。從C軸軸承結構溫度變化而言，模擬及實測的結果在低轉速的溫度差異異較大在2.1°C，而隨著轉速越來越高，其溫度差異0.08°C，最為

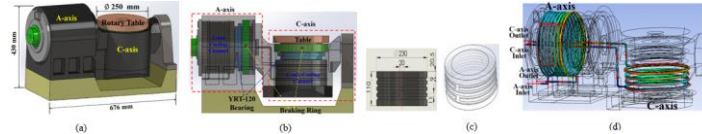


圖3. DD旋轉工作台: (a)本體結構; (b) 細部結構; (c) C軸冷卻水套; (d) 冷卻流道

表1. AC軸旋轉工作台模擬分析結果

轉速(rpm)	AC軸旋轉工作台模擬分析結果					實驗結果
	C軸	A軸		B軸		
	冷卻油溫度(°C)	冷卻油溫度(°C)	軸承溫度(°C)	冷卻油溫度(°C)	軸承溫度(°C)	實際變形量(μm)
20	20.494	21.08	21.987	20.596	22.838	11.492
40	20.611	21.851	23.616	20.614	22.913	13.006
60	20.728	22.639	25.28	20.632	22.987	14.637
80	20.868	23.509	27.09	20.651	23.071	16.716
100	21.026	24.431	28.992	20.672	23.166	19.073

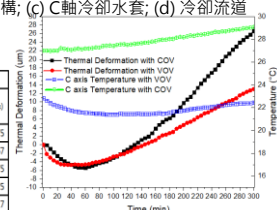


圖4. 冷卻控制變形量及溫度結果

本研究探討DD傳動馬達(DD motor, Direct drive motor)設計的AC旋轉工作台在動態行為中的熱效應所造成的精度變異，得到在冷卻流量變化下的精度變化，並在實際的五軸加工機透過冷卻流量及溫度控制提昇AC旋轉工作台的動態精度。其實驗結果如圖4所示，C軸轉速從10 rpm逐步上升至100 rpm，每30分鐘增加10 rpm。從結果可以發現，在使用變流量冷卻控制(VOV)後所得到的變形量會比使用傳統定溫定流量的控制(COV)減少。冷卻流量未進行控制時的最大變形量在轉速100 rpm，其變形量為26.6 μm，使用變流量冷卻控制(VOV)後的變形量可從26.6 μm降低至13.0 μm，約減少了48.9%的變形量。然而，量測C軸馬達的溫度，溫度從最大24.9°C降低至22.4°C，溫度降低了2.5°C。由此看來，透過冷卻流量的控制能有效降低AC旋轉工作台的變形量。

### 結論

本研究的內容主要是建立五軸工具機中的AC旋轉工作台熱抑制冷卻方法降低熱誤差的研究，現階段的變流量冷卻控制方式，主要還是需要透過建模的方式進行，未來將可利用增強學習結合深度學習方法，融合類神經網絡和Q Learning的方法，建立動態自我學習與調整，建立主軸熱變位/冷卻系統流量/流速控制之智慧決策代理人來整合熱抑制及熱補償的方法，以降低主軸熱誤差對加工精度的影響。

### 誌謝

本研究為科技部計畫編號 MOST-110-2222-E-167-MY3 之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

### 參考文獻

1. J. Bryan, "International Status of Thermal Error Research," Annals of the CIRP, vol. 39, pp. 645-656 (1990).
2. R. Ramesh, M. A. Mannan and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools — a review: Part II: thermal errors," International Journal of Machine Tools & Manufacturing, vol. 40, pp. 1257-1284 (2000).
3. E. Ulmann, and P. Marks, "Compensation of Thermal Deformations at Machine Tools using Adaptronic CRP-Structures," The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, London (2008).
4. Y. Li, W. Zhao, W. Wu, B. Lu and Y. Chen, "Machining-Based Thermal Error Analysis of CFRP-Structured Machine Tool," 20th Machine Innovations Conference for Aerospace Industry 2020 (MIC 2020), Hannover, Germany (2020).
5. X. J. Nie, "Application of Neural Network for Thermal Error Compensation in CNC Machine Tool," 2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, Wuhan, China (2011).