

主軸熱溫升對平面度與斷差之影響

A Study of CNC Machine-tool Thermal Errors and Measurement

陳紹賢¹、洪 韡²、邱 基²

Shao-Hsien Chen¹, Wei-Hong², and Chi-Chiu²

¹ 國立勤益科技大學機械工程系

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

E-mail: wayne6036@gmail.com

² 國立勤益科技大學機械工程系學士

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

E-mail: wei30i@yahoo.com.tw

E-mail: wawooooo@yahoo.com.tw

摘要

在這工業發達的時代，工具機的普遍性已經是有目共睹，競爭者眾多，推出的機台也日新月異，然而在激烈的環境下，工具機機台的穩定性要求更是嚴苛，無論是工具機本身或是外在環境都將直接或間接的影響加工的精密度。

然而近年來熱變形的要求逐漸受到重視，高速切削的工具機除了要求轉速快之外更重視了加工長時間所導致的平面度問題、環境溫度影響精密度、溫機較長時間而影響時效等問題。因此在這次研究中必須找出主軸熱溫狀態下刀具升長的幅度，並在諸多的因素中找出幾個影響較大的因素進行討論因而補償。

關鍵字：平面度、溫機時間、環境溫度

Abstract

In this age of advanced industrial, universality of machine tools is already obvious to all, many competitors, the introduction of the machine is also changing. However, in the intense environment, the stability of the machine tool machine requirements more stringent, precision machine tools or external environment will directly or indirectly affect the processing.

However in recent years the requirements of thermal deformation gradually attention, high-speed cutting machine tools in addition to the processing for a long time due to the flatness problem, ambient temperature affect the precision and temperature machine a longer period of time affect aging. Therefore, in this study must identify the state of the spindle thermal temperature tool liters long amplitude, and identify several larger impact factors are discussed in many factors which compensate.

Keyword: flatness, warm-up time, ambient temperature.

1 前言

由於高科技產品以及汽車產業的高度需求，產品所需要的精度相對提高，勢必工具機的精確度及生產率也需要更精進。高速運轉的傳動之下，可能導致精度受細微影響，其中主軸溫度變化的趨勢影響了刀具切削的精度、高低轉速可能使刀具切削工件表面時所產生的振動形成斷層的現象，種種因素將是最直接的顯示出工具機加工精密產品的品質優劣，更是在未來市場上的競爭與必修課程。

2. 熱溫升變形因素

熱源可能會造成誤差，然而造成工具機熱誤差的來源可分為外部熱源及內部熱源，所謂外部熱源主要為工具機所處的外在環境溫度的變化或光輻射熱等，而內部熱源也就是工具機傳動的同時，各機械元件產生摩擦所形成的。例如切削產生的熱能。工具機產生熱誤差的元素不外乎為幾何誤差和熱變形誤差，其中以熱變形誤差較為複雜，往往會在切削加工進行中所觀測到的，包括切削主軸熱溫升、主軸頭結構熱伸長、立柱熱彎曲等。

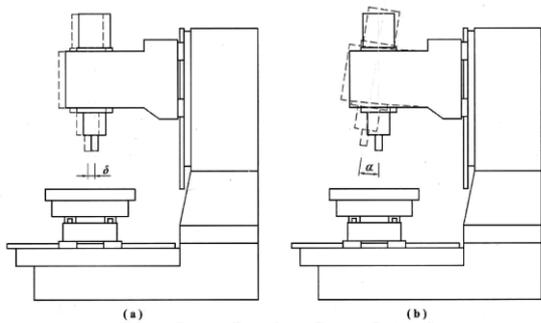


圖 1 工具機熱變形示意圖[1]

2.1 主軸運轉的熱變形誤差

工具機內部能量轉換彼此相互影響，然而熱變形是依靠熱的產生而作用，因此無論是藉由傳導、對流、輻射等均彼此影響，主軸運轉時都會產生溫升現象(即高溫的熱源會往低溫的熱源流動)。其中主要是由於主軸上下軸承因旋轉產生的摩擦熱，熱傳遞至主軸軸心導致主軸伸長變形，

熱經由套筒及冷卻系統傳遞至鑄鐵上，使整體結構因為溫度差而導致主軸頭及立柱等結構產生熱伸長及熱彎曲現象[2]，因此造成刀具與工件間相對尺寸及形狀上的差異，導致工具機的精度降低。

2.2 環境溫度變化所導致的熱變形誤差

環境變化對工具機之影響是緩慢的，誤差在短時間內差異甚小，但進給導螺桿主軸的影響變化劇烈，故不容忽視。

2.3 切削熱所導致的變形誤差

切削加工中產生熱源是必然的現象，適當排屑設計、刀具設計的改良可以有效抑制切削刀具與工件摩擦產生的熱能，進而改善切削熱對工具機變形誤差的影響。

2.3.1 轉速對升溫的影響

本實驗中也針對了不同高轉速切削加工平面，量測其平面度，觀察熱溫升的現象，由於摩擦熱量造成主軸升溫而產生變形，為了瞭解軸承摩擦所產生的熱量，經由文獻可得知熱量之計算公式為[3]：

$$Q = 1.047 \times 10^{-1} nM \quad (2.1)$$

Q：軸承產生之熱量(W)；

n：軸承轉速(rpm)；

M：摩擦力矩(N-m)；

在式(2.7)中軸承摩擦力矩 M，為軸承負荷引起的力矩 M_1 與軸承潤滑油引起之力矩 M_2 ，故可將摩擦力矩表示為：

$$M = M_1 + M_2 \quad (2.2)$$

在式(2.8)中，由軸承負荷引起的力矩可表示為：

$$M_1 = \mu_0 \cdot f_0 \cdot F \cdot dm/2 \quad (2.3)$$

μ_0 ：摩擦係數；

f_0 ：負荷方向係數；

F：軸承負荷(N)；

D_m ：工稱軸承內徑(m)；

由軸承潤滑油引起的力矩可表示為：

$$M_2 = f_1 \cdot (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_m^3 \quad (2.4)$$

f_1 ：軸承結構類型與潤滑劑類型之係數；

v ：潤滑油黏度(m^2/s)；

d_m ：供稱軸承內徑(m)；

簡單的軸承發熱量估計可直接由軸承所受的摩擦力乘上線速度而得到額計量，預估量方程式如下所式[4]：

$$H = F \cdot V = F \cdot \gamma \omega = \frac{F r N \left(\frac{2\pi}{60} \right)}{12 \times 550} \quad (2.5)$$

F 為摩擦力；

V 為切線速度；

r 半徑；

ω 為角速度；

N 為轉速；

M 為摩擦力矩(N·m)；

此外，由文獻[5]中可得知滾珠軸承運算過程中可以利用摩擦力矩與轉速之轉換公式來預估發熱量：

$$Q = 0.0525 \cdot \mu \cdot d \cdot F \cdot n \quad (2.6)$$

μ : 摩擦係數；

d: 軸承公稱內徑；

F: 軸承負荷；

由上述之公式可得知，當主軸轉速 M 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，造成機台溫升熱變形而影響精度。

3. 實驗設備與測試方法

針對平面度及斷層現象的研究，起初決定了加工轉速以及溫機時間銑削一平面，刀具為直徑 4mm 球刀，工件材料為鋁合金 6061 將其等待至

溫機時間飽和後以設定轉速之下進行高速放射狀銑削，加工完成後量測其平面 8 分點位置，經由千分量錶量測加工面後找出此工件最大斷層之差並紀錄，多次進行重複流程，增加溫機時間、改變加工轉速與進給，由量測與紀錄找出主軸熱溫升改變其精度影響的趨勢。

3.1 實驗設備-

本實驗主要探討 CNC 工具機主軸熱溫升產生變形之量測，使用工具機如圖 2 所示規格如下表 1。



圖 2 CNC 銑床實驗設備

表 1 CNC 銑床規格

行程	
X軸(主軸左右)	1000mm
Y軸(工作面前後)	800mm
Z軸(主軸上下)	700mm
主軸鼻端至工作台面	100-800mm
XYZ軸傳動	安全扭力限制連軸器
工作台	
尺寸	1350×1300mm
T型槽	18x11x125mm
工作台型式	固定
主軸(內藏式)	
主軸轉速	14000rpm
馬達	25Kw
端孔斜度	HSK-A80
主軸油冷卻	機體同調，定溫±1°C
進給速率	
切削進給	1-20000mm/min
X、Y、Z軸快速進給	20000mm/min (0%,30%, 50%, 100%)
機台精度	0.004mm
重覆精度(X/Y/Z)	0.002mm

3.2 實驗程序

本實驗加工之流程主要改變主軸轉速由轉速 8000rpm 改至 12000rpm，經由溫機後進行不同待機時間，隨後加工，加工結束後量測該斷層及平面度，下圖 3 為加工狀態，流程圖為下圖 4，且針對此項做討論評估。



圖 3 平面度測試

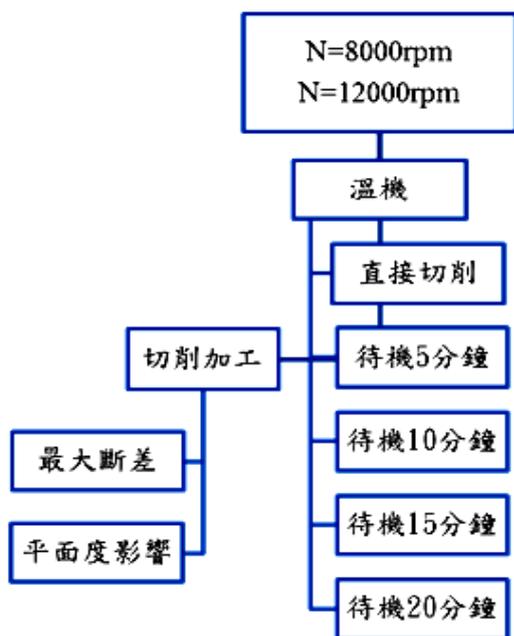


圖 4 加工流程圖

4. 實驗結果與討論

在工具機誤差的各種來源，熱引起的誤差高達百分之七十，其次是幾何誤差。因此，散熱問題比幾何問題更為複雜，根據工作週期不斷變化 [6] 工具機熱溫升變形補償於 1960 年在學術界就

開始討論研究。經由機器加裝冷卻機抑制熱源、內部熱隔絕及結構對稱設計後，仍需要藉由軟體補償系統來改善溫升變形，然而得以透過研究、紀錄哪項因素受到溫升影響最為頻繁，也可以針對該因素去做改良。

由下表 2 與下表 3 的實驗結果發現，溫機後直接測試加工，其最大斷差及平面度數值會是最小，表示加工誤差較小也就是愈理想加工精度，當溫機結束後此狀態為飽和穩定的因此狀態尤佳，然而隨著溫機後停滯時間變長而溫度逐漸下降，這時刀具切削工件表面時將會產生微小的向下位移，此現象將導致工件誤差增大，加工品質變差等問題，由數據可得知最大斷層與平面度隨著主軸靜止時間增長而增加，因此溫機時間與溫度將直接影響品質。圖 5 為主軸溫度的趨勢，由此可以證實溫度與停滯時間息息相關，接著測試轉速不同對平面度有何影響。轉速越快其刀具不僅在切削中產生熱位移，而且切削面也會因為主軸高速運轉之下產生些微的誤差，其中由下表 3 可證在轉速 12000rpm 的參數下隨著時間增加其最大斷差、平面度與轉速 8000rpm 相較之下較來的不穩定，因此由這次實驗結果，將使我們有根據的去注意該事項及針對補償。

表 2 實驗結果(一)

轉速 (rpm)	進給	停機時間 (min)	主軸溫度 (°C)	最大斷差 (mm)	平面度 (mm)
8000	1000	直接測試	36.9	0.002	0.003
8000	1000	5	34.7	0.001	0.006
8000	1000	10	32.3	0.001	0.008
8000	1000	15	31.7	0.002	0.008
8000	1000	20	29.8	0.002	0.010

表 3 實驗結果(二)

轉速 (rpm)	進給	停機時間 (min)	主軸溫度 (°C)	最大斷差 (mm)	平面度 (mm)
12000	2500	直接測試	36.9	0.008	0.018
12000	2500	5	34.8	0.004	0.014
12000	2500	10	34.2	0.006	0.028
12000	2500	15	33.3	0.014	0.032
12000	2500	20	32.6	0.012	0.036

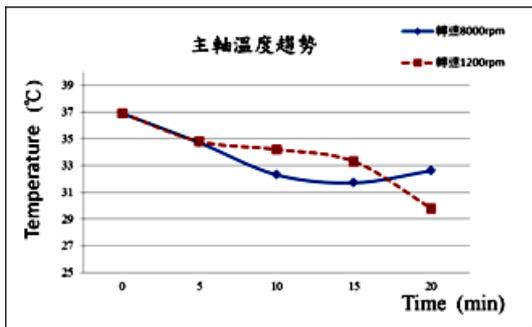


圖 5 溫機完成後待機之主軸溫度變化

4.1 不同待機時間對加工斷差之影響

由於設定轉速參數的不同，轉動速度愈快愈容易使主軸產生熱伸長，則起始位置與終止位置之誤差量為加工斷差，待機時間愈長則斷差愈大，在不同轉速之下轉速愈高則斷差影響愈大。其中以圖 6 顯示數據下得知不同轉速下其最大斷差數值曲線。

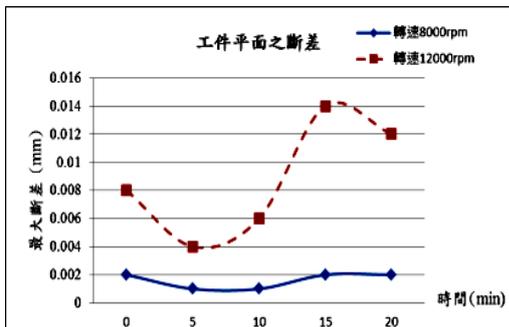


圖 6 待機時間與最大斷差之關係

4.2 不同待機時間對材料平面度之影響

透過研究顯示其主軸受到熱溫升的影響甚大，主要原因參考公式 2.1 所知，轉速 N 愈大則

產生熱量愈大，相對導致主軸熱伸長愈明顯，其中 N12000rpm 的加工面幅度最為明顯，圖 7 數據顯示最為明顯，加工程序後量具量測其平面八分點位置如圖 8，工件夾持位置如圖 9 所示。

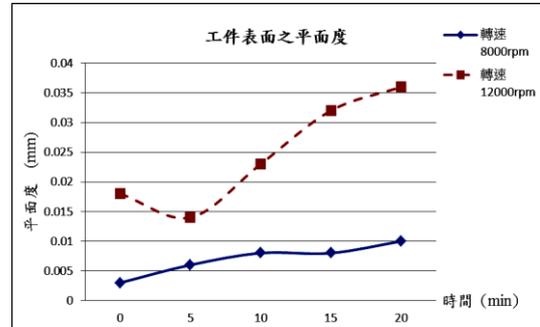


圖 7 待機時間與平面度之關係

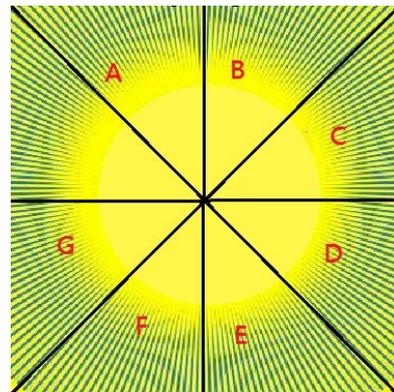


圖 8 平面量測之形式與位置

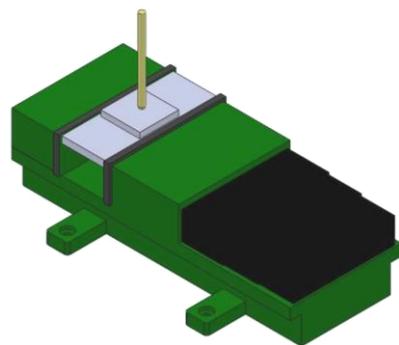


圖 9 實驗中虎鉗夾持工件示意圖

5. 結論

本實驗主要進行主軸熱溫升加工測試不同的待機時間對平面誤差與最大斷

差之影響進行分析比較：

- 一、不同待機時間則加工斷差之比較，當待機時間愈長則最大斷差愈大，不同轉速時轉速愈快斷差愈大。
- 二、當不同待機時間則平面度之比較當待機時間愈長則平面度愈大，不同轉速時轉速愈快平面誤差愈大。

5.1 未來展望

- 一、熱溫升之熱變形誤差導致加工精度變低，除了主軸熱誤差外，進給軸的熱溫升也會對工件誤差產生影響，因此除了主軸熱溫升之外，進給軸及補償技術可做是未來研究方向。
- 二、於未來之研究將進行主軸與進給系統熱溫升補償量測。
- 三、連續之研究進行比較建模，以提供產官學研究之應用與發展。

6. 參考文獻

- [1] 碩士論文，應用回歸分析法於 CNC 工具機熱溫升量測與補償，p16。
- [2] Brend Bossanns, Jay F. Tu “A thermal model For high speed motorized spindles”, International Journal of Machine Tool & Manufacture 39, p1345-1366, 1999.
- [3] 應杏娟，樹空機床主軸系統熱特性有限分析，工具技術，第 44 卷，No.1，p38-40，2010。
- [4] 楊宏智，CNC 車床熱誤差分析暨改善研究，機械月刊，第 24 卷，第 3 期，p266-274，1998。
- [5] 張桂榮，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 月號，p54-62，2010。
- [6] B. Bryan, “International Status of Thermal

Error Research”, Annal of CRIP , Vol.17, 1967.