

刀具磨耗考量下之數控車削參數最佳化研究

藍天雄

德霖技術學院 機械工程系 副教授
育達商業技術學院 資訊管理系 副教授

摘要

減低刀具磨耗乃現今電腦數值控制(CNC)切削工業常追求之目標；本研究依據國家粗糙度標準，將車削參數規劃在細加工區間，選定勝傑公司 ECOCA-3807 數值控制車床，運用田口分析法，以容納四個因子（切深、進給、轉速、刀尖中心度）三個水準（低、中、高）的 $L_9(3^4)$ 直交表；配合加工環境差異，導入三個因子（頂心、切削液、刀具伸長量）的 $L_4(2^3)$ 外直交表，以單位材料移除量之刀具磨耗程度為品質特性，分析所建立之實驗；同時藉由 SONY COLOR VIDEO 電子影像顯微鏡量測刀具之磨耗，分析並建立最適切削參數組合，並討論各別參數對刀具磨耗之影響；結果顯示，轉速與切深對刀具磨耗度之影響較為顯著，最佳切削參數之實際切削結果的確達成令人滿意之品質特性。

本研究確實針對實務數值控制切削作業，提供一套經濟且前瞻的最佳切削參數分析方法，並建立最佳切削參數之參考依據，以有效減省刀具成本與設置時間，提昇數控切削產業之競爭力。

關鍵詞：電腦數值控制、刀具磨耗、直交表

CNC Turning Parameter Optimization for Tool Wear

T. S. Lan

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, De Lin Institute of Technology
Associate Professor, Department of Information Management, Yu Da College of Business

Abstract

Tool life is considered as the major objective in the modern CNC (computerized numerical control) machining industry. This paper is proposed to experimentally perform finish turning operations within the National Standard on an ECOCA-3807 CNC lathe. The Taguchi method is commenced through selection of orthogonal array $L_9(3^4)$ for four machining parameters (cutting depth, feed rate, spindle speed, and tool runoff) with three different levels (low, medium, and high). A three-parameter (back centering, coolant, and tool extension) environmental orthogonal array $L_4(2^3)$ is also introduced for the deviations between experiment and real industry to analyze the established experiment. The SONY COLOR VIDEO Microscope is utilized to evaluate the tool wear for unit material removed. Through the analytical practice of Taguchi method, the optimum cutting conditions are received. It is shown that the surface speed and depth of cut are the most critical parameters to the tool life. Additionally, the optimum parameters are exemplified to reach satisfactory tool wear after machining. Through this study, the analytical orientation of the optimum cutting parameters for the machining industry is established. The setup time of the machining operation, machining cost, as well as competition of the industry are deemed to be improved.

Keywords: computerized numerical control, tool wear, orthogonal array

壹、前言

切削加工為機械製造加工方法之一，隨著科技發展的進步，非傳統的金屬加工技術，已朝向少切屑、無切屑的高精度數值控制加工[1]。數值控制車削加工對金屬切削而言是常見的基本製程，在加工精密且細微的要求下，切深、進給與轉速仍為數值控制車削加工之主要參數[2]；刀具成本乃切削成本之重要部分之一，然而，車削加工作業之設置，常依賴實務經驗作切削參數之設定[3]，以降低刀具磨耗。

切削加工的可控制參數，大致是工件轉速、進刀深度、進給速率以及刀具材料、型式的選擇等。而影響加工精度的因素甚多，如刀具及工件材質、工具機精度、切削條件、切削液等；電腦數值控制（CNC）車床為現今切削加工之主軸，整體而言，在 CNC 車床切削工作時，主要需考量切削條件，以符合切削作業之精度要求，同時又要能提高加工效率，降低加工成本。依經驗或切削便覽選擇參數，通常較為主觀，且容易造成刀具及機器損傷[4]；甚或因其它因素，使得效率低落、成本增加；為了改善上述困擾，如何經濟地研究並建立一套有效的製程參數依據，以降低刀具磨耗及成本，亦為當前相當重要之課題。

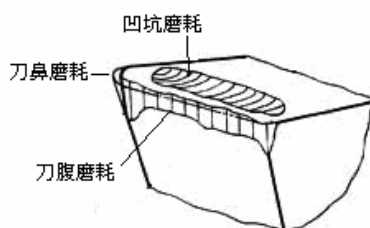
業界在金屬切削產品的考量上不外乎以品質、成本為要點，因而本研究設定細切削之刀具磨耗為目標，考量品質為第一優先，其次再考量刀具成本；故本研究將車削參數規劃在細加工區間，以田口氏品質設計法[5, 6, 7]來進行實驗規劃，並採用外直交表來配合實驗，以符合實務業界之不同加工環境需求，期能快速選擇最佳加工參數，以降低刀具磨耗及成本，並保有一定精度；本研究確實針對實務數值控制切削作業，建立一套最佳切削參數之分析及參考依據，有效減省刀具成本與設置時間。

貳、理論背景

2.1 刀具磨耗

刀具磨耗為刀具在切削時熱和摩擦所產生的物理作用和化學作用的綜合結果。刀具由開始切削達到刀具壽命判據以前所經過的切削時間稱為刀具壽命，刀具壽命判據一般採用刀具磨損量的某個預定值，也可以把某一現象的出現作為判斷依據，如振動激化、加工表面粗糙度惡化，斷屑不良和崩刃等[8]。達到刀具壽命後，應將刀具重磨、轉位或廢棄，而刀具在廢棄前的各次刀具壽命之和稱為刀具總壽命。泰勒提出的刀具壽命和切削速度之間相互制約的經驗公式為 $vT^n = C$ 式中 T 為刀具壽命(分)； v 為切削速度(米/分)； n 和 C 為常數(與切削條件有關)。生產中常根據加工條件，按最低生產成本或最高生產率原則，來確定刀具壽命和擬定工時定額。

刀具磨損表現（如圖一）為在刀具後面上出現的磨損帶、缺口和崩刃等，包括前面常出現的月牙窪狀的磨損，及後面有時出現的氧化坑和溝紋狀磨損等。在不同切削速度的條件下，刀具受上述一種或幾種磨損機理的作用，當這些磨損擴展到一定程度以後就引起刀具失效，不能繼續使用。



圖一、 刀具的磨損形式

2.2 田口方法

田口實驗計畫法是一種品質改善的實驗計畫法[9]，透過實際操作或電腦模擬的手段決定「設計參數」，以最低成本與最短時間內生產高品質為目標。為了減少傳統分析所需之大量實驗，田口法依設計參數（即控制因子 control factor）及水準（level）的數目選用適當的直交表，透過有效的分析，可快速找到使產品變異縮小的設計或製程，並能瞭解各設計參數對品質特性的影響，進而得到最佳參數組合，其分析流程如圖二所示。

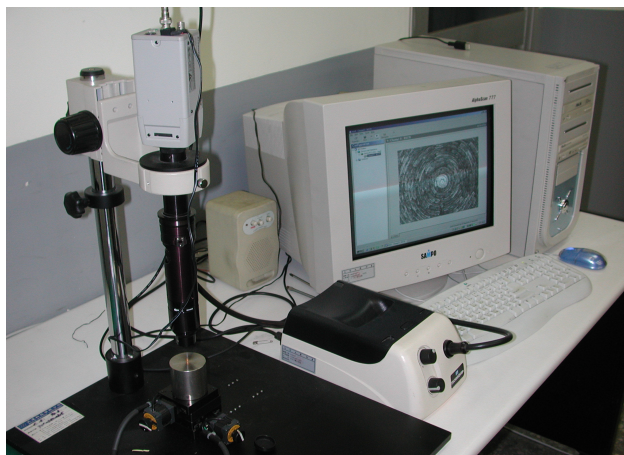


圖二、田口法分析流程圖

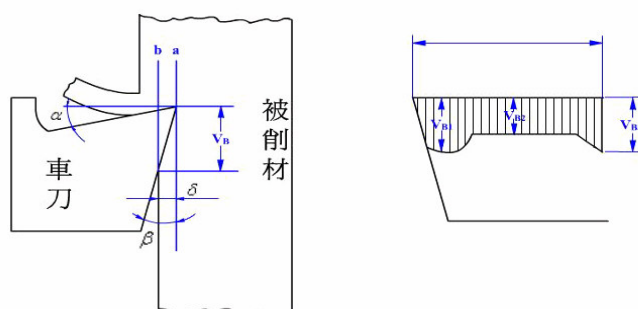
參、研究設計

本研究採田口氏直交表實驗法，以較少的實驗次數，獲得有用的統計資訊，雖然理論上會有精度上的損失（通常 bias 的情況不能完全排除），但對於解決工程品質問題的目的而言，田口氏直交表應是足夠用的。而切削參數在田口法的應用上區分為可控制與不可控制、可控制者稱為控制因子，本研究選定切削速度、進給量、切削深度、刀尖中心度三個水準（低、中、高）的 $L_9(3^4)$ 內直交表；而不可控制者稱為環境因子，本研究選定刀柄伸長、頂心、切削液三項的 $L_4(2^3)$ 外直交表。依田口實驗法建立內外直交表，選定各水準參數區間，進行品質特性之實驗，利用 SONY COLOR VIDEO CAMERA 電子顯微鏡（如圖三），透過灰階設定，自動判讀並量取精切削後之刀腹磨耗的寬度基準 V_{B2} （mm）（如圖四）之數據結果。並除以該切刀所移除之材料總體積，定義成為“刀具磨耗比”（ μm^2 ），作為刀具磨耗品質特性。

藉由田口分析技巧建立“刀具磨耗比”為品質特性之實驗表，分析並尋求最小刀具磨耗目標下之最適切削條件。進而將最佳切削參數，在數控車床上進行實際切削，以驗證“刀具磨耗比”是否符合預期結果。



圖三、電子影像顯微鏡



圖四、刀腹磨耗

肆、實驗步驟

4.1 實驗條件

本實驗使用 ECOCA-3807 數值控制車床(最高轉速 3000rpm) (如圖五)，工件材料為 $\phi 40\text{mm} \times 260\text{mm}$ 的 S45C 中碳鋼鋼棒，其最高切削速度為 339.292 m/min。選用東芝 WTJNR2020K16 型刀柄，及住友電工 AC700G 型 TNMG-160404 捨棄式刀片參考拋棄式刀片 (如圖六) 其建議切削速度範圍 (如圖七)，切削速度值定為 250 m/min、200 m/min 及 150 m/min，其切削深度為 1mm、2 mm 及 3 mm，其進給速率為 0.2 mm/rev、0.3 mm/rev 及 0.4 mm/rev，作為三個水準 (如表一)。



圖五、ECOCA PC-3807 型 CNC 車床

4.2 實驗操作

本研究以刀具磨耗為品質特性，其回應值為 μm^2 ，為望小特性，依田口實驗配置（如圖八），進行實際切削以分析實驗。並以 SONY COLOR VIDEO CAMERA MOLD 電子影像顯微鏡量測刀具之磨耗。所得數據根據品質特性計算直交表中實驗的 SN 比與 y ，並繪出 SN 比與 y 的效應圖，及決定控制因子的最佳水準組合，進而納入系統中執行驗證。

| | | | | L4外側直交表(雜音因子) | | | | | |
|---------------|---|---|---|---------------|------|---|---|---|---------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| | | | | W | 1 | 1 | 2 | 2 | Ave S/N |
| | | | | M | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| L9內側直交表(控制因子) | | | | T | 1 | 2 | 2 | 1 | |
| Exp. | A | B | C | D | 數 據 | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | | | | | |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | | | | | |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | | | | | |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | | | | | |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | | | | | |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | | | | | |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | | | | | |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | | | | | |
| | | | | | AVE: | | | | |

圖八、實驗配置

伍、結果討論

5.1 刀具磨耗量測結果

本研究藉由電子影像顯微鏡量測可棄式刀片之刀腹磨耗的寬度，以判斷刀具磨耗情形，考量每刀刀因配合田口實驗表規劃參數設定，故材料移除量不同，因而將材料車削總體積除以刀片磨耗長度 VB2，作為刀具磨耗比判斷的基礎，單位為 μm^2 。

5.2 S/N 比計算

本研究採用田口法之望小特性，並結合外直交表，依下式計算其 SN 比

$$SN_{STB} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{單位 dB}$$

其結果如表二所示。在表二中，SN 比較大值代表刀具磨耗比較佳，其中第 9 項實驗數據為 9 個實驗中最佳切削條件。

表二、刀具磨耗實驗結果

| | 一 | 二 | 三 | 四 | 平均 | S/N |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 4.63E-07 | 4.46E-07 | 4.97E-07 | 4.72E-07 | 4.70E-07 | 1.27E+02 |
| 2 | 2.68E-07 | 2.86E-07 | 2.77E-07 | 3.08E-07 | 2.85E-07 | 1.31E+02 |
| 3 | 1.96E-07 | 2.10E-07 | 2.29E-07 | 2.49E-07 | 2.21E-07 | 1.33E+02 |
| 4 | 3.45E-07 | 3.45E-07 | 4.04E-07 | 3.54E-07 | 3.62E-07 | 1.29E+02 |
| 5 | 2.13E-07 | 1.95E-07 | 2.68E-07 | 2.04E-07 | 2.20E-07 | 1.33E+02 |
| 6 | 1.34E-07 | 1.34E-07 | 1.51E-07 | 1.38E-07 | 1.39E-07 | 1.37E+02 |
| 7 | 3.37E-07 | 3.45E-07 | 3.71E-07 | 3.62E-07 | 3.54E-07 | 1.29E+02 |
| 8 | 1.72E-07 | 1.54E-07 | 1.68E-07 | 1.86E-07 | 1.70E-07 | 1.35E+02 |
| 9 | 1.24E-07 | 1.15E-07 | 1.38E-07 | 1.34E-07 | 1.28E-07 | 1.38E+02 |

5.3 繪製回應圖

依據 S/N 比回應表（如表三），藉由 MINITAB 14 軟體繪製如圖九所示之回應圖及圖十所示之因子靈敏度；圖九中斜率代表該條件在因子所佔有之影響，可根據因子回應圖選最大值作為最佳切削參數，根據回應圖選定最佳切削參數組合為 A3(150 m/min) B3 (3 mm)C1(0.2 mm/rev) D1 (0.1mm)。

根據選定之最佳切削參數組合 A3 B3 C1 D1，其 S/N 比預測值為：

預測最佳 S/N= $132 + (134.1 - 132) + (136 - 132) + (133 - 132) + (132.5 - 132) = 139.6$

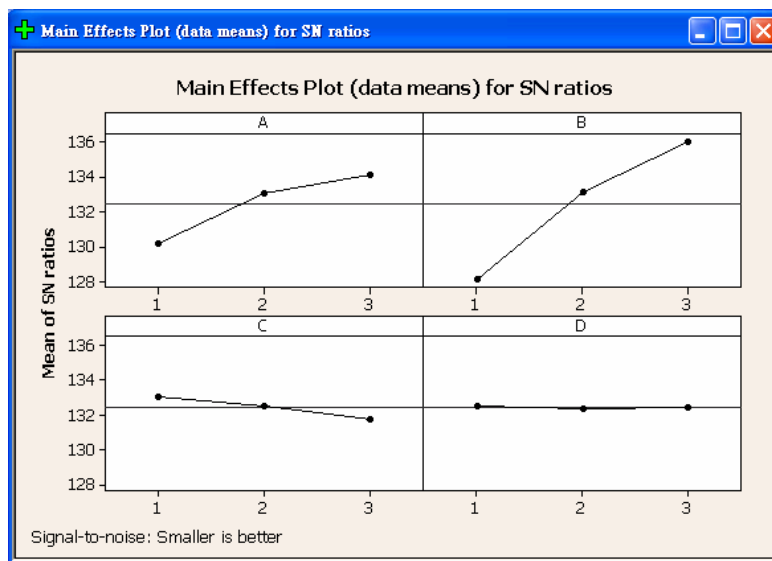
若改用顯著因子選定，參考回應表中的靈敏度平均之 1/2 值來判斷：

則靈敏度 A > 0.0123，靈敏度 B > 0.0123，靈敏度 C < 0.0123，靈敏度 D < 0.0123，故因子 A、B 為顯著因子，C、D 為不顯著因子。

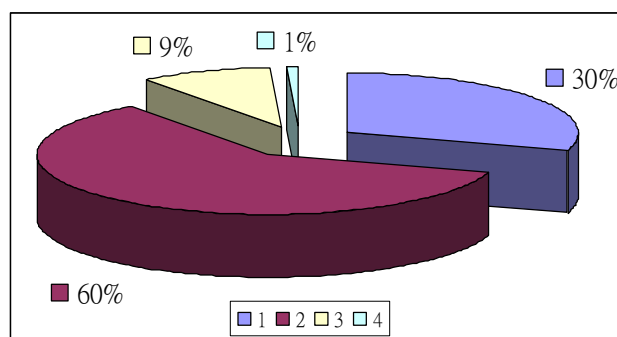
表三、S/N 比回應表

| | A | B | C | D |
|-----|------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 130.2 | 128.1 | 133 | 132.5 |
| 2 | 133 | 133.1 | 132.5 | 132.4 |
| 3 | 134.1 | 136 | 131.8 | 132.4 |
| 平均 | 132.433333 | 132.4 | 132.433333 | 132.433333 |
| 差 | 3.9 | 7.9 | 12 | 0.1 |
| 靈敏度 | 0.02944878 | 0.05966767 | 0.00906116 | 0.000755097 |

靈敏度平均之 1/2 = 0.01236659



圖九、S/N 比回應圖



圖十、因子靈敏度百分比

再以 A3 B3 C1 D1 參數組合在數控車床上進行確認實驗，結果如表四所示，進而求得如表五所示之 S/N 結果；由表五之 $S/N = 139.3851$ 可知，實驗數值十分接近預估值 ($S/N = 139.6$)，研究結果的確令人滿意。

表四、刀具磨耗確認實驗

| 刀片編號 | 刀腹磨耗 | 切削時數 | 磨耗比 | 材料移除量 |
|------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.03094 | 4.241282 | 0.007295 | 1.01E-07 |
| 2 | 0.030577 | 4.241282 | 0.007209 | 1.00E-07 |
| 3 | 0.035117 | 4.241282 | 0.00828 | 1.15E-07 |
| 4 | 0.034231 | 4.241282 | 0.008071 | 1.12E-07 |

表五、最佳參數之 S/N 結果

| | 加油 | 加油 | 不加油 | 不加油 | 平均 | S/N |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 有尾座 | 無尾座 | 有尾座 | 無尾座 | | |
| | 刀柄25 | 刀柄0 | 刀柄0 | 刀柄25 | | |
| A3 B3 C1 D1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1.07E-07 | 139.3851 |
| | 1.01E-07 | 1.00E-07 | 1.15E-07 | 1.12E-07 | | |

陸、結論

本文依據國家粗糙度標準，將車削參數規劃在細加工區間，並運用田口分析法，以刀具磨耗為品質特性進行實驗，分析並建立最適切削條件；結果顯示，轉速與切深對刀具磨耗度之影響較為顯著，細切削各項數據所決定的最佳組合 A3 B3 C1 D1 在系統中執行驗證，十分符合預期。

本研究結果能提供實務數值控制切削作業，一套經濟且前瞻的多目標競爭式最佳切削參數分析方法，並建立最佳切削參數之參考依據，以縮短數控切削作業之設置時間，提昇產業競爭力。未來更可針對不同刀具與材料之各項切削作業，建立關聯式資料庫檢索系統，供數控切削業界實務參考。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會計畫（編號：NSC 95-2212-E-237-006）補助，特此致謝。

參考文獻

- [1] C. Y. Nian, W. H. Yang, and Y. S. Tarng, "Optimization of Turning Operations with Multiple Performance Characteristics", Elsevier Science, 1998.
- [2] J. P. Davim, C. A. Conceicao Antonio, "Optimization of Cutting Conditions in Machining of Aluminium Matrix Composites Using a Numerical and Experimental Model", Elsevier Science, 2001.
- [3] D. Gillibrand, M. Sarwar, and C. T. Pierce "The Economic Benefit of Finish Turning with Coated Carbide", Elsevier Science, 1996.
- [4] O. Masory, "Real-Time Estimation of Cutting Process Parameters in Turning", Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 218-221, 1980.
- [5] 李輝煌, "田口方法—品質設計的原理與實驗", 高立圖書有限公司, 2000。
- [6] 張志昌 "應用田口法於大型引伸板件最佳壓板結構之有限元素分析" 國立中興大學機械工程系碩士論文, 民國 89 年 6 月。
- [7] 蘇朝墩, 品質工程, 中華民國品質學會, 2002。
- [8] 林維新, "車削精度與刀具磨耗可靠度研究", 國立中央大學機械工程研究所博士論文, 民國 87 年。
- [9] A. Bendell, J. Disney, and W.A. Pridmore, Taguchi Methods: Applications in World Industry, IFS Publications, UK, 1989.

