

【積體電路封裝】

黃聖杰、林民教	IC封裝金線偏移現象的觀測與分析.....	86
黃聖杰、陳明宏	IC封裝金線偏移現象的數值分析.....	95
柯俊勇、蘇耀藤	應用拋光法於矽晶圓平面控制之探討.....	103
吳煌榮、周明	水刀切割技術在印刷電路板製造之應用研究.....	110

【模具設計製造】

楊宏智、馮輝賢	應用特徵辨識於模具設計之研究.....	118
楊申語、龐紹華	Flow Visualization of Gas-Assisted Injection Molding Process	127
楊申語、黃進生	Curvature Predictions of Flat Advanced Composite Tools Based Measured Volume Fraction Gradient	135
楊申語、劉熙銘	Analysis of Post-filling Process During Injection Compression Molding	143
賴新一、蔡振發	模組化夾具最佳夾持設計.....	151
曹中丞、陳文洲	三通管模具電腦輔助製造加工之研究.....	158

【切削加工(二)】

張永沂、蘇耀藤	液動壓拋光法於半接觸潤滑狀態下之加工率特性.....	164
簡文通、關錦穗 王柏村	工具機最大金屬切除率基於工件表面粗糙度之探討.....	172
王俊志、楊志雄	順逆銑在銑削加工中的影響比較.....	180
陳建宏、蘇耀藤	工件表面輪廓曲率效應對液動壓拋光法加工率的影響.....	187
王俊志、鄭棍泉 彭仕良	端銑加工刀具撓曲及表面誤差分析.....	194
郭春寶	高速主軸能量產銷過程分析.....	201
王俊志、鄭棍泉 彭仕良	撓件端銑加工尺寸誤差之補償.....	210

【複合材料】

王俊博、單秋成 黃玉寶、楊春欽	陶瓷基複合材料之機械性質探討.....	217
曾世昌、鄭茂彬	熱固型複材轉移成型三維纖維配向與機械行為實驗研究.....	225

工具機最大金屬切除率基於工件表面粗糙度之探討

簡文通

國立屏東技術學院
機械工程技術研究所

關錦穗

國立屏東技術學院
機械工程技術研究所

王柏村

國立屏東技術學院
機械工程技術研究所

摘要

如何得到最大金屬切除率是許多有關金屬切削最佳化的研究重點。本研究利用反應表面法發展出在容許表面粗糙度範圍內，預測最佳切削參數以得到最大金屬切除率的數學模式。首先建立表面粗糙度與切削參數，即切削速度、進給率和切削深度的數學關係式，接著使用綜合切削中心加工機進行中碳鋼的平面銑削實驗，根據實驗數據利用最小平方方法求得數學模式之常數值。然後依此數學式繪出反應值曲線，並以最大金屬切除率為評估函數，求出最佳的切削條件。

本文並應用遺傳學演算法以最大金屬切除率為目標函數，表面粗糙度為侷限條件作最佳化分析。結果顯示最佳進給率與切削深度接近切削範圍的上限值，切削速度則依據表面粗糙度的不同而變化，其結果與實驗值比較之誤差約為12%左右。日後可藉由此實驗分析模式及遺傳學演算法改變不同的刀具材料及工件材料，建立一套專家系統，提供工業界在切削參數的選擇上，有快捷且準確的工具可用。

前言

工具機銑削在機械加工中的使用非常廣泛，然而在機械廠中，如何選擇最佳的切削加工條件是一件繁瑣而困難的工作。目前製造工具機的廠商並沒有一份簡單而完整的資料，提供給操作人員來選擇切削加工條件。因此現場操作人員只能憑本身的經驗來作取捨。但是這些經驗大都只著重於如何使得加工容易進行而非在最佳的切削條件下，以致造成產品操作成本較高及加工效率不佳的情況。

目前從事於切削加工條件最佳化的研究，大多集中於車削加工[1~3]。但近幾年來，世界各國正積極推動生產自動化，因此高精密度、高效率的綜合切削中心加工機在未來工廠將扮演更重要角色。所以在1991年

Suliman and Hassan [4]曾利用反應表面方法，並以最小能量消耗或最短銑削時間為評估函數，求出最佳化曲線。另外有 Gim; Cho and Taraman [5]經由減少加工振動以提升面銑削的效率，利用電腦輔助銑削系統模擬器進行面銑刀之最佳化。Sotirov et al. [6]提出一多項判別準則最佳化模式，以最少技術花費及最大切削過程輸出做為判別準則。Schulz and Bimschas [7]經由不同切削路徑、進給率之修正以獲得最佳化切削條件。王和楊[8]則設計一套專家系統程式，提供正確的刀具及加工參數的選擇。

在最佳化設計的問題中遺傳學演算法(Genetic Algorithm)是相當熱門的方法，其原始構想主要是以達爾文物競天擇理論為基礎，經再生(Reproduction)、互換(Crossover)、突變(Mutation)等運算過程來模擬"適者生存"的自然現象，使得設計參數能夠讓目標函數(Objective Function)達到極值而求得最佳解[9]。國內則有幾位學者對遺傳學演算法的最佳化應用提出研究論文，陳和曾[10]以焊接設計與螺旋彈簧設計為例，展現遺傳學演算法在解最佳化設計問題的能力。吳、周和翁[11]將遺傳學演算法應用在結構最佳化設計上，結果顯示此方法在結構最佳化設計的幾何和拓撲方面的優越性。楊[12]透過平板設計問題，闡明遺傳學演算法在工程上應用的潛力。王、林和彭[13]則將遺傳學演算法應用於螺栓組合的最佳化設計。

綜合以上文獻，有關於銑削加工中最佳化及遺傳學方面的研究不少，但基於表面粗糙度及金屬切除率所發表之文獻則尚未見到。本文即是針對綜合切削中心加工機來進行銑削加工試驗，在滿足所需工件表面粗糙度的限制條件下，決定獲得工具機最大金屬切除率之切削速度、進給率及切削深度等參數。配合使用反應表面法(Response Surface Methodology)所推導出的表面粗糙度及最大金屬切除率與切削條件之關係函數，繪出曲線圖表，以提供最大金屬切除率之預測模式。然後結合遺傳學演算法為理論基礎的最佳化設計

軟體分析其結果，求得最佳的切削條件，其結果可提供工業界實際銑削時之參考。

理論分析

反應表面法(Response Surface Methodology)是使用統計的技巧於實驗模式的建立及模式的應用。藉由實驗的設計和分析能夠尋找出相對於反應(Response)或是輸出變數的一些預測值範圍；或者是輸入變數對反應的影響。在銑削加工中，假設表面粗糙度R與切削參數的關係方程式如(1)式所示。

$$R = a_0 v^{a_1} f^{a_2} d^{a_3} \quad (1)$$

(1)式中 v 是切削速度 (m/min)， f 是進給率 (mm/min)， d 是切削深度 (mm)， a_0, a_1, a_2, a_3 是未知參數。把方程式(1)式取對數值，將其線性化，形式如下：

$$\ln R = \ln a_0 + a_1 \ln v + a_2 \ln f + a_3 \ln d \quad (2)$$

定義：

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{\ln v - \ln v_m}{\ln v_h - \ln v_m} \\ x_2 &= \frac{\ln f - \ln f_m}{\ln f_h - \ln f_m} \\ x_3 &= \frac{\ln d - \ln d_m}{\ln d_h - \ln d_m} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中

$x_i (i=1,2,3)$ ：轉換碼

v_h, v_m, v_l ：實驗時高、中、低三種等級的切削速度。

f_h, f_m, f_l ：實驗時高、中、低三種等級的進給率

d_h, d_m, d_l ：實驗時高、中、低三種等級的切削深度。

將(3)式代入(2)式，可得三元一階多項式迴歸模型：

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (4)$$

(4)式中 y 為表面粗糙度的對數值，估計迴歸係數 $b_i (i=0,1,2,3)$ 將由迴歸分析之最小平方方法與實驗結果求得。最小平方方法求估計迴歸係數的基本公式如下：

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

其中 b 是估計迴歸係數的矩陣， X 是轉換碼所構成的矩陣， X^T 為 X 的轉置矩陣， $(X^T X)^{-1}$ 為 $(X^T X)$ 的反矩陣， Y 則為實驗測量之表面粗糙度取對數後的

矩陣。求得估計迴歸係數後，代入(4)式經轉換可得到表面粗糙度R與切削參數的關係方程式。

實驗程序與結果

1. 實驗設計與設備

一個有規畫的實驗能夠減少迴歸參數所需要的實驗點數目，所以設計實驗時以反應表面法來選取實驗點，考慮12個實驗點，用以推導出一階數學模式。因此一階方程式(4)式中的四個參數 b_0, b_1, b_2, b_3 ，僅需要 2^3 階層設計的四個對角線之實驗點即可評估求得。一個 2^3 階層的設計，實驗點的組成是一個立方體的頂點(如圖1之點1到點8)，每一實驗點是由不同的切削條件所構成。然而整個實驗為了更為精確，附加四個實驗點於立方體的中間，以減少純誤差(Pure Error)產生[3]。

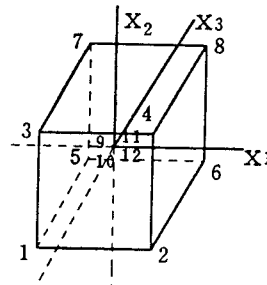


圖1 切削條件的實驗點模型

實驗中以友嘉公司提供的FV-600型立式切削加工中心機為實驗設備，以三菱金屬SE445型面銑刀為銑削刀具，其直徑100mm，刀片材質為超硬合金(UTi20T)，工件材料為360×147×180mm的中碳鋼(S45C)，其切削狀況為直線銑削，切削液為半合成水溶性切削液。每一切削條件切削完成後，透過手提式表面粗度儀量測工件的表面粗糙度值。切削時，依據綜合切削加工機的銑削能力、工件材質及刀具種類選用合適的高、中、低三種不同的切削條件。原則上， v_m 為幾何平均數，使得 $v_m^2 = v_h^2 \times v_l^2$ 以及 $\ln v_h - \ln v_m = \ln v_m - \ln v_l$ ，進給率與切削深度亦是如此[14]。詳細的數據如表1所示。轉換碼(Coding)的計算由方程式(3)式求得。

表1 實驗的切削參數等級及轉換碼

等級	切削速度, X1	進給率, X2	切削深度, X3	轉換碼(Coding)		
	(m/min)	(mm/min)	(mm)	X1	X2	X3
高	172.79	200	2.4	1	1	1
中	125.66	140	1.39	0	0	0
低	94.25	100	0.8	-1	-1	-1

2. 實驗步驟與結果

- (1) 設定綜合切削加工機的主軸轉速為正轉，並且開啓切削液。
- (2) 選擇第一實驗點的切削條件來進行銑削實驗，因第一實驗點的碼 $X_1 = -1, X_2 = -1, X_3 = -1$ ，對應其

切削條件 $v=94.25\text{m/min}$ ， $f=100\text{mm/min}$ ， $d=0.8\text{mm}$ 。同理第二實驗點、第三實驗、...第十二實驗點皆有其對應的切削條件，依序選擇來進行實驗。

- (3) 在每一實驗點切削完成後，將主軸停止，關閉切削液，並且務必將工件表面清理乾淨之後才測量表面粗糙度值。為求實驗數據精確，避免儀器及人為誤差，表面粗糙度儀的探針應盡量平行工件表面且同一切削條件重複切削四次，每次量取工件三處的粗糙度值，並刪除數據差異性過大的資料，因刀具磨耗引起的異常值等，並求其平均值。整個實驗的切削條件及測量結果如表2所示。
- (4) 最後在切削範圍內隨機選取八組不同的切削條件進行銑削，量測表面粗糙度值，並且與數學預測模式所推導的表面粗糙度值比較如表3所示，計算其誤差值用以判斷數學預測模式的可靠度。

表2 實驗的十二組切削條件與粗糙度測量值

實驗點	切削速度 V (m/min)	進給率 f (mm/min)	切削深度 d (mm)	轉換碼 (Coding)			表面粗糙度 Ra μm
				X ₁	X ₂	X ₃	
1	94.25	100	0.8	-1	-1	-1	2.46
2	172.79	100	0.8	1	-1	-1	0.81
3	94.25	200	0.8	-1	1	-1	2.96
4	172.79	200	0.8	1	1	-1	1.18
5	94.25	100	2.4	-1	-1	1	2.92
6	172.79	100	2.4	1	-1	1	0.98
7	94.25	200	2.4	-1	1	1	3.40
8	172.79	200	2.4	1	1	1	1.24
9	125.66	140	1.39	0	0	0	2.49
10	125.66	140	1.39	0	0	0	2.53
11	125.66	140	1.39	0	0	0	2.57
12	125.66	140	1.39	0	0	0	2.43

表3 隨機選取的八組切削條件與表面粗糙度值

組別	切削速度 v(m/min)	進給率 f(mm/min)	切削深度 d(mm)	表面粗糙度 Ra(μm)
1	141.37	200	0.8	1.67
2	157.08	200	2.4	1.59
3	125.66	100	2.4	2.12
4	109.96	140	1.39	2.37
5	172.79	100	0.8	1.29
6	109.96	200	0.8	2.53
7	94.25	100	1.9	2.73
8	172.79	100	1.9	1.33

遺傳學演算法的最佳化設計

1. 遺傳學演算法的簡介

遺傳學演算法是結合工程、數學及生物學而發展的一門科學，它是利用達爾文進化論觀念來進行學習。進行遺傳學演算法時，要讓許多個體在設定好的環境中去競爭，首先將所有個體進行編碼(Encoding)及適存度(Fitness)評判，使較能適應環境的個體經由再生、互換和突變三種基本運算過程產生下一代，接著

在重複上述三種運算過程，一代代的演化，最後將可產生最能適應環境的個體，也就是最佳化的目的。

整個演算過程中變數的設定及運算子包括編碼(Encoding)、族群數(Population Size)及最大世代數目(Number of Maximum Generation)的設定、解碼(Decoding)、族群統計資料(Population Statistics)、再生、互換及突變等。上述的各種變數中，主要的運算子包含再生、互換和突變三項，而遺傳學演算法的解題程序分別說明如下：

1. 開始。
2. 輸入資料，包含字串長度、族群數、最大世代數目、交換機率及突變機率等。
3. 產生初始族群數。
4. 將初始族群數全部加以解碼，並計算全部初始族群的適存度函數值以及統計族群數資料，包含適存度的最大值、最小值、總和及平均等。
5. 以輪盤檢選法選取再生的字串並檢選兩條親代字串進行互換及進行突變的運算。
6. 將新的子代字串加以解碼、計算適存度值及統計族群資料。
7. 輸出結果。
8. 檢查是否以達到最大世代數目？若是則結束；若否，則回到第5步。
9. 結束。

2. 遺傳學演算法的應用

以FORTRAN語言撰寫電腦程式來求解在表面粗糙度及最大金屬切除率的考量下之最佳切削條件。程式的設計以三變數為考量，有關最佳化問題的敘述如下：

(1) 設計變數

令 v 、 f 、 d 為銑削過程之設計變數。其定義如下：

v ：切削速度(m/min)

f ：進給率(mm/min)

d ：切削深度(mm)

(2) 目標函數

此次演算的目的在於容許的粗糙度下，求取最大金屬切除率之切削參數。表面粗糙度的限制條件在此為不等式侷限函數，所以採用外部懲罰函數法(Exterior Penalty Function Method)可將目標函數定義如下：

$$F(v, f, d) = Q(f, d) + r[R(v, f, d) - R_0]^2 \quad (6)$$

式中 $Q(f, d)$ 是以進給率 f 、切削深度 d 及銑刀直徑 D 三者乘積所構成的金屬切除率函數， r 為懲罰係數， $R(v, f, d)$ 為粗糙度與切削參數之關係函數， R_0 為設定的粗糙度值。

(3) 設計參數的界限

設計參數的最大、最小值分別為演算法中的上下限值，其值是由綜合切削中心加工機的主軸負載、刀具材質及工件材料所決定。根據實驗的切削範圍可定義如下：

$$\begin{aligned}
 94.25 \leq v \leq 172.79 & \text{ m/min} \\
 100 \leq f \leq 200 & \text{ mm/min} \\
 0.8 \leq d \leq 2.4 & \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

在此應用中族群大小設定為100；字串長度為30，每一設計變數以10個字元來表示；演生代數為30；互換機率為0.6；突變機率為0.06；懲罰係數則設定為0.08。接著依遺傳學演算法之演算順序逐一演算，直到演生代數所定之數值，便可挑選出最佳值。

3 懲罰係數的選擇及目標函數收斂情形

在遺傳學演算法求解最佳切削參數的過程中，目標函數的定義是金屬切除率加上以表面粗糙度為限制的外部懲罰函數，其中，懲罰係數會影響程式運算結果收斂到正確值的準確性。圖2為懲罰係數改變所造成程式運算結果與實驗結果之切削速度誤差百分比圖。為了方便於觀察其趨勢的變化，橫軸與縱軸的刻度均取對數值。從圖2曲線的變化中看出懲罰係數在0.1之後，誤差百分比有逐漸升高的趨勢，並無收斂的情形，誤差值又高達30%以上，而懲罰係數為0.05~0.1之間時，誤差百分比穩定且最低。因此在遺傳學演算法的程式分析時，選擇懲罰係數為0.08。此外由圖3和圖4得知，目標函數的最大值與平均值皆有很快升高且最後趨於穩定的趨勢，可見遺傳學演算法的收斂速度相當快，並且收斂性良好。在經過一些世代的演算後，大多能獲得近最佳解，演算到最大世代後便能得到最佳的結果。

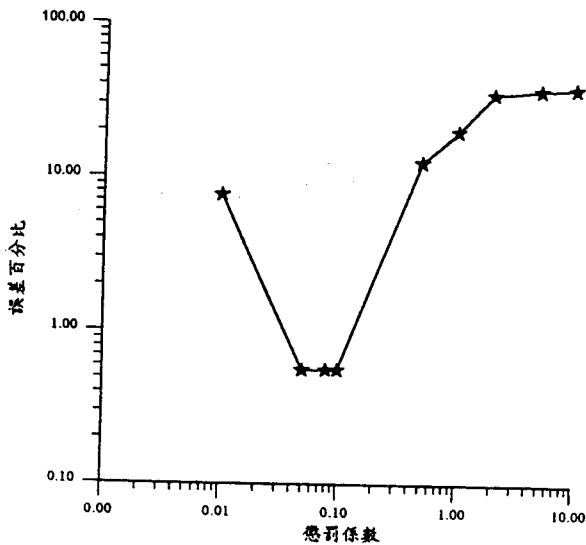


圖2 懲罰係數對於程式分析結果之切削速度的影響

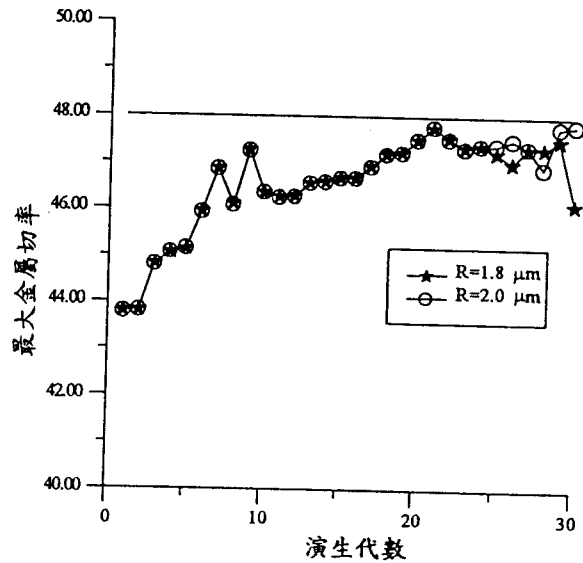


圖3 不同表面粗糙度對於目標函數最大值收斂性之影響($R = 1.8\mu\text{m}$ 和 $2.0\mu\text{m}$)

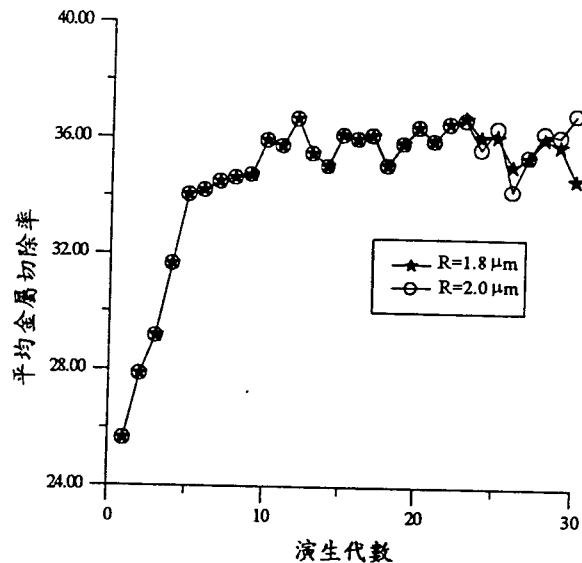


圖4 不同表面粗糙度對於目標函數平均值收斂性之影響($R = 1.8\mu\text{m}$ 和 $2.0\mu\text{m}$)

結果與討論

1. 實驗結果分析

由實驗設計所得的轉換碼矩陣 X 以及將實驗所量測的表面粗糙度值取對數值，得到粗糙度測量值矩陣 Y ，表示如下：

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} 0.9002 \\ -0.2107 \\ 1.0852 \\ 0.1655 \\ 1.0716 \\ -0.0202 \\ 1.2238 \\ 0.2151 \\ 0.9123 \\ 0.9282 \\ 0.9440 \\ 0.8879 \end{bmatrix}$$

將轉換碼矩陣X及粗糙度測量矩陣Y代入最小平方法估計矩陣(5)式運算，得到估計迴歸係數矩陣如下：

$$b = \begin{bmatrix} 0.6752 \\ -0.5164 \\ 0.1186 \\ 0.0688 \end{bmatrix} \quad (8)$$

再將(8)式代入(4)式，可得一階多項式迴歸模型：

$$\ln R = Y = 0.6752 - 0.5164x_1 + 0.1186x_2 + 0.0688x_3 \quad (9)$$

使用(3)式的定義將(9)式轉換成表面粗糙度 $R(\mu\text{m})$ 與切削速度 $v(\text{m}/\text{min})$ 、進給率 $f(\text{mm}/\text{min})$ 、切削深度 $d(\text{mm})$ 的數學關係函數，運算結果如下：

$$R = 50.76 v^{-0.8521} f^{0.1711} d^{0.0626} \quad (10)$$

此關係函數的使用條件是利用面銼刀在濕切削的情形下，銼削中碳鋼(S45C)，且切削條件的限制範圍為：

$$\begin{aligned} 94.25 &\leq v \leq 172.79 && \text{m/min} \\ 100 &\leq f \leq 200 && \text{mm/min} \\ 0.8 &\leq d \leq 2.4 && \text{mm} \end{aligned}$$

利用MATLAB軟體，將(10)式以不同切削深度及表面粗糙度值繪製成圖5至圖7，圖中橫座標為切削速度，縱座標為進給率。從圖5至圖7可看出切削速度越大，表面粗糙度越小；進給率越大，表面粗糙度越大；而且由曲線的斜率得知切削速度對表面粗糙度的影響遠大於進給率對表面粗糙度的影響。另外，由(10)式知切削深度越大也會使表面粗糙度變大。

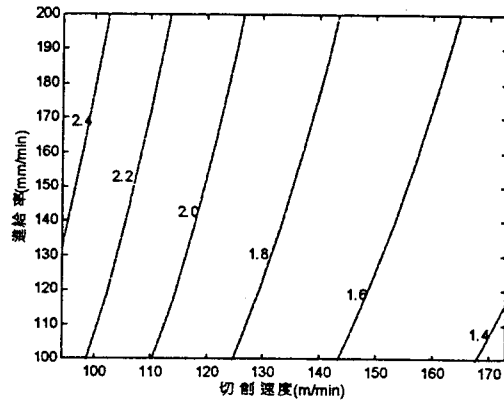


圖5 切削速度與進給率在不同表面粗糙度(單位 μm)限制條件下的關係曲線($d=0.8\text{mm}$)

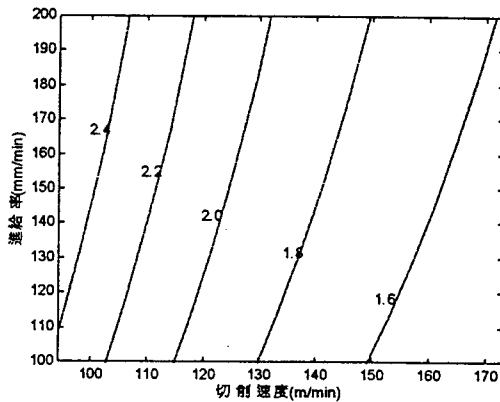


圖6 切削速度與進給率在不同表面粗糙度(單位 μm)限制條件下的關係曲線($d=1.39\text{mm}$)

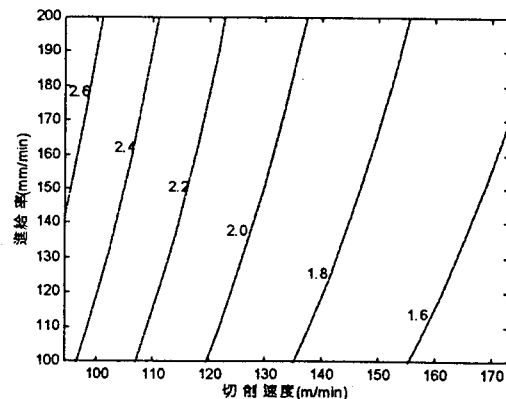


圖7 切削速度與進給率在不同表面粗糙度(單位 μm)限制條件下的關係曲線($d=2.4\text{mm}$)

為了進一步驗證(10)式的正確性，以隨機方式選取8組切削條件，進行實驗，得到8組表面粗糙度值，再

將8組切削條件代入(10)式運算，得到8組數學模式預測值，比較其結果及誤差值如表4所示。從表4可知，誤差的平均值在10%以內。此乃因為產生表面粗糙度誤差的可能原因是工件材質不均勻，刀具的磨耗，機台的振動，表面粗糙度量測位置的不同或表面粗糙度儀本身的誤差等因素。另外圖8是上述隨機實驗結果與理論預測的比較曲線圖，橫座標代表實驗的組別，其切削條件可由表4得知，縱座標為每組實驗所得的表面粗糙度值。由圖8可看出實驗與理論預測的曲線，其升降的趨勢具有一致性，因此可以推斷(10)式來預測表面粗糙度值與切削參數之關係，其準確性頗高。

表4 表面粗糙度之實驗量測值與數學模式預測值之比較

組別	切削條件			表面粗糙度 Ra(μm)	理論預測值 Ra(μm)	誤差 %
	v(m/min)	f(mm/min)	d(mm)			
1	141.37	200	0.8	1.67	1.82	8.98
2	157.08	200	2.4	1.59	1.79	12.38
3	125.66	100	2.4	2.12	1.92	9.43
4	109.96	140	1.39	2.37	2.20	7.17
5	172.79	100	0.8	1.29	1.36	5.43
6	109.96	200	0.8	2.53	2.26	10.67
7	94.25	100	1.9	2.73	2.41	11.72
8	172.79	100	1.9	1.33	1.44	8.27
平均						9.26

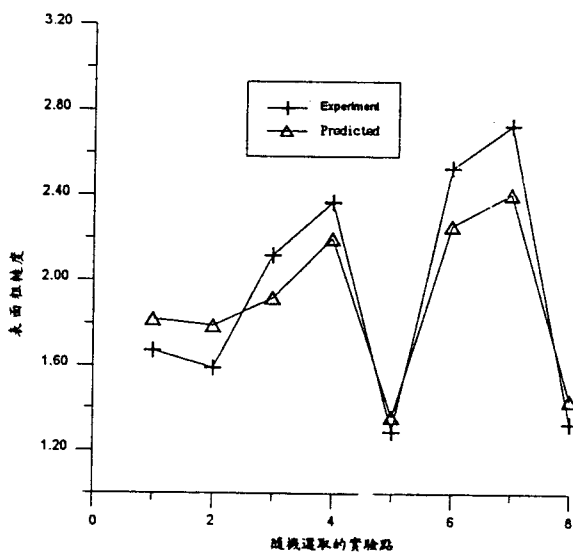


圖8 實驗量測與理論預測之表面粗糙度。

減少銑削的時間，可增加生產量，其方法可以從提高進給率及切削深度著手，但相對的表面精度會降低，也就是說表面粗糙度會升高。但在產業現場，生產率及產品品質都是要求的重點，如何在綜合切削中心加工機的容許功率內及刀具壽命的考量下，選出適當的切削條件，以獲得最大金屬切除率及滿足表面粗糙度的要求是令人迫切想知道的。解決方式為利用圖5至圖7中表面粗糙度與切削速度、進給率之關係曲

線，再加上最大金屬切除率的曲線，便可得到一組不增加表面粗糙度又能達到最少銑削時間的最佳切削條件。

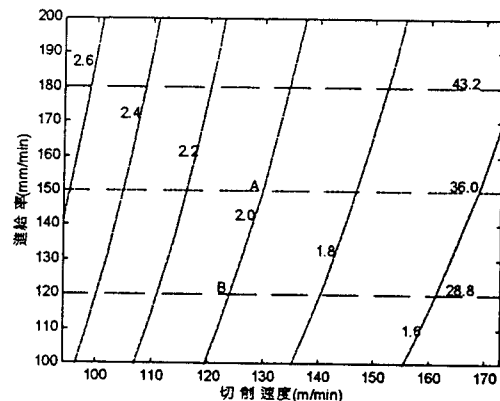
由銑削過程中金屬切除率的定義如下：

$$Q = f \times d \times D \text{ mm}^3 / \text{min} \quad (11)$$

Q 為金屬切除率， D 為銑刀直徑(mm)，此次實驗中選用的銑刀直徑為100mm，所以(11)式可寫成：

$$Q = 0.1 \times f \times d \text{ cm}^3 / \text{min} \quad (12)$$

其中 f 單位為 mm/min ， d 單位為 mm ，將(12)式依 $d=2.4\text{mm}$ 繪製成曲線，結合在圖7，結果如圖9所示。由圖9可看出在表面粗糙度為 $2.0\mu\text{m}$ 時，A、B兩點的切削條件均可達到此表面粗糙度值，但A點的金屬切除率較B點的金屬切除率高出25%，所以若是機器性能及刀具材質能承受的原則下，選擇A點的切削條件能減少加工的時間，增加產能且不影響加工表面的粗糙度。



註：-表面粗糙度(μm) -金屬切除率(cm^3/min)

圖9 表面粗糙度與金屬切除率在切削速度-進給率平面之曲線圖($d=2.4\text{mm}$)

2. 遺傳學演算法結果分析

以遺傳學演算法計算的過程中，選取五組不同的表面粗糙度為限制條件，並以最大金屬切除率為目標函數，得到五組不同的切削速度、進給率及切削深度，如表5所示。從表5得知以最大金屬切除率為目標函數時，進給率接近 $200\text{mm}/\text{min}$ ，切削深度接近 2.4mm ，此兩數值均分別為其上限值。此時表面粗糙度為自變數，隨著表面精度的要求不同而改變其設定值，切削速度則隨表面粗糙度設定值的增加而減低。因此將進給率及切削深度分別設定為 $200\text{mm}/\text{min}$ 及 2.4mm ，由五組表面粗糙度與切削速度之關係，經由曲線嵌合(Curve Fitting)以6階多項式去趨近，得到如圖10的曲線。圖10中是設定進給率及切削深度為上限值，橫座標為切削速度，縱座標為表面粗糙度，由圖10也可明顯看出切削速度與表面粗糙度成反比的關係，且能夠

很快找出要達到某一表面粗糙度時所對應的切削速度。

表5 五組表面粗糙度的限制下之切削參數

設定之表面粗糙度 Ra(μm)	切削條件		
	v(m/min)	f(mm/min)	d(mm)
1.8	153.8535	199.8495	2.3906
2.0	145.1010	199.7076	2.3922
2.2	137.4239	198.1427	2.3884
2.4	132.8942	199.8045	2.3953
2.6	126.7058	199.3157	2.3937

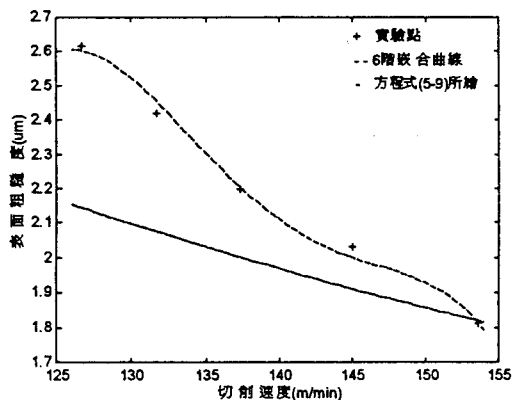


圖10 程式分析與數學函數之切削速度-表面粗糙度關係曲線圖($f=200\text{mm/min}$, $d=2.4\text{mm}$)

由遺傳學演算程式分析結果得知，為了得到最大金屬切除率，進給率及切削深度應盡可能接近切削範圍的上限值，因此將進給率設定為 200mm/min ，切削深度為 2.4mm ，代入(10)式計算，可將實驗推導的表面粗糙度與三種切削參數之關係函數簡化成表面粗糙度與切削速度之關係函數，如(13)式所示：

$$R = 132.75 v^{-0.8521} \quad (13)$$

把(13)式繪製成曲線圖，加在圖10中。明顯比較出實驗與程式分析的曲線趨勢一致，平均的誤差為 12.29% ，所以以遺傳學演算法來分析預估最佳的切削參數仍有其準確性。而造成誤差的原因是程式分析時表面粗糙度只要在設定值以內就符合限制條件，以致於程式求得的切削速度皆有高於實驗所得之切削速度的情形。

綜合實驗與遺傳學演算法分析的結果得知，要達到某一表面粗糙度的要求時，其切削條件的配合有多種的選擇。透過遺傳學演算法分析後，若以最大金屬切除率來考量，進給率及切削深度應選擇切削範圍的上限值，切削速度在依據表面粗糙度的要求來調整。往後若想知道其他刀具切削不同材料時，在最大金屬切除率的前提下之最佳切削條件，便可根據同樣的實驗方法得到表面粗糙度與切削參數的數學關係函數，將

此函數代入遺傳學演算法的程式中運算，即可找出最佳值。雖然此種實驗方法的實驗點數不多，但透過這樣的實驗結果及程式分析，所能預測的切削範圍很廣且準確性頗高。故此實驗的方法及結果對於工業上實際銑削時，選擇切削參數的最佳值具有很高的參考價值。

結論及建議

1. 反應表面法成功的運用在中心切削加工機面銑中碳鋼材料，發展出一階的數學預測模式，適用的切削範圍為切削速度 $94.25\sim 172.79\text{m/min}$ ，進給率 $100\sim 200\text{mm/min}$ ，切削深度 $0.8\sim 2.4\text{mm}$ 。
2. 遺傳學演算法應用於銑削加工的最佳化設計，能夠快速且穩定預測出最佳的切削參數。
3. 由反應表面法及遺傳學演算法的結果得知，表面粗糙度與切削速度成反比，與進給率、切削深度成正比，且切削速度的影響遠大於進給率及切削深度的影響。
4. 利用一階模式的反應曲線，能得到增加金屬切除率，卻不影響表面精度的切削參數。如此便可減少加工時間，增加產能。
5. 在最大金屬切除率的考量下，進給率及切削深度盡量選取切削範圍的上限值，切削速度在依據表面粗糙度的要求做調整。
6. 選擇適當的懲罰係數，可明顯提高遺傳學演算法預測的準確性。
7. 此次實驗方法雖然只取少量的實驗點，卻能獲得大量的切削資料，提供多種切削參數的組合。

最後將本論文所提之實驗方法，期望能推廣為二階模式，以使預測結果更接近實際值，並在設計變數的考量上，增加刀具磨耗、切屑形式等因素的影響，使適用的範圍更廣，切削加工的資料更完善。再者，日後可藉由此實驗分析模式改變不同的刀具材料及工件材料，建立出一套專家系統，提供工業界在機器切削參數的選擇上，有簡單快捷且準確的工具可用。

參考文獻

- [1] Jang, D.Y. and Seireg, A., "Machining Parameter Optimization for Specified Surface Conditions," Journal of Engineering for Industry, 114(2), 1992, pp.254-257
- [2] Starkov, V. K. and Kiselev, M. V., "Cutting Process Optimization by Energy Criteria," Soviet Engineering Research, 9(4), 1989, pp.55-60
- [3] El Baradie, M. A., "Computer Aided Analysis of a Surface Roughness Model for Turning," Journal of Materials Processing Technology, 26(2), 1991, pp.207-216
- [4] Suliman, S. M. A. and Hassan, G. A., "Modelling, Optimization and Response Curves of Milling Low

- Carbon Steel," International Journal Production Research, 29(4), 1991, pp.725-737
- [5] Gim, J. S.; Cho, D. W. and Taraman, K. S., "Optimization of Face-Milling Cutters by Use of a Computer-Aided Milling-System Simulator," International Journal Advanced Manufacturing Technology, 6(3), 1991, pp.263-284
- [6] Sotirov, G. R.; Vitanov, V. I.; Ghosh, S. K. and Mincoff, N. Ch., "Multi-Criteria Optimization of Cutting Process," Journal of Materials Processing Technology, 31, 1992, pp.307-315
- [7] Schulz, H. and Bimschas, K., "Optimization of Precision Machining by Simulation of the Cutting Process," CIRP Annals, 42(1), 1993, pp.55-58
- [8] 王朝榮、楊世偉, "銼削加工參數的最佳化", 機械月刊, 第21卷, 第7期, 1995, 第285-294頁
- [9] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [10] 陳家豪、曾以正, "遺傳演算法於機械元件最佳化設計之應用", 中國機械工程學會第八屆學術研討會論文集, 民國八十年十一月, 第715-720頁
- [11] Wu, S. J.; Chow, P. T. and Oung, K. K., "Applications of the Genetic Algorithms for Structural Optimization," 8th. National Conference on Mechanical Engineering, CSME, Taipei, 1991, pp.1589-1596
- [12] 楊慶煌, "應用基因演算法於最佳化平板設計", 中國機械工程學會第十屆學術研討會論文集, 民國八十二年十一月, 第143-148頁
- [13] 王柏村、林義勝、彭耀哲, "遺傳學演算法在螺栓組合結構最佳化之應用", 國立屏東技術學院機械系實務專題報告, 1994
- [14] Wong, W. C. K. and Middleton, D., "On the Estimation of Parameters for a Nonlinear Model of a Milling Process," International Journal Production Research, 22(2), 1984, pp. 247-252

The Study of the Maximum Metal Removal Rate of the Machine Tool Based on the Surface Roughness of the Workpiece

Wen-Tung Chien, Bor-Tusen Wang
Chin-Shui Kuan

Department of Mechanical Engineering
National Pingtung Polytechnic Insitutue

Abstract

To find the maximum metal removal rate is one of the most important topics of searching the optimization in metal cutting process. The response surface methodology is employed, and a mathematical model to predict the maximum metal removal rate under the

accepted surface roughness conditions with the optimum cutting parameters is developed. First, the relationship between the surface roughness and cutting parameters, considering cutting speed, feed rate and depth of cut, is built. Then, a series of experiments on milling the medium carbon steel by using a machining center is carried out. Evaluating the experimental data by the method of least squares, the constants of the predicted equation are obtained. The results are used to draw the response curves, and the maximum metal removal rate is taken as the estimate function. Thus, the optimum cutting conditions can be obtained directly.

The optimization analysis by applying genetic algorithm is conducted. The maximum metal removal rate is taken as the objective function, and surface roughness is taken as the constraints. It is shown that feed and depth of cut are close to the upper limits; while cutting speed varies with the difference of the surface roughness. The error is found about 12% by comparing with the experimental results. Furthermore, this experimental and analytical model with the genetic algorithm can be used for various tool and work materials to obtain an expert system. This system can provide the optimum choice of cutting parameter in industry.