

## 線切割之最佳加工參數探討

劉旭昉<sup>1</sup>、蔡銘峰<sup>2</sup>、黃議鋒<sup>2</sup>、陳俊生<sup>2</sup>

<sup>1</sup>黎明技術學院機械系、<sup>2</sup>龍華科技大學機械系

\*Email: sfl@mail.lit.edu.tw

### 摘要

線切割放電加工是非傳統加工方法，特別適合高硬度、高強度等特性材料。本研究以田口法實驗計劃結合灰關聯分析在建立一套多重品質分析的最佳方法，再用反應曲面法得到目標值的預測方程式，以及最佳加工參數水準組合，最後並驗證此演算的實用與正確性。本研究實驗材料為 SKD11 工具鋼，工件厚度 60mm，線電極直徑 0.25mm。放電加工參數為電流加工時間、電流休止時間、線張力、沖水速度，先應用田口法來找出鼓形量、表面粗糙度與加工速度的各個品質特性的預測方程式與最佳參數水準值，再結合灰關聯分析方法來打破各個品質特性的差異，並以反應曲面法建立多品質特性模型架構並優化與驗證。

**關鍵詞：**田口法、灰關聯、線切割

### 1 前言

因應 5G 科技的發展，微形零組件需求數量大幅增加，除了要求複雜外形，其大量生產模具材料更是要選用高硬度、高強度、耐磨、耐蝕...等特性，如果運用傳統機械加工法，較困難且不經濟，因此線切割放電加工是精密模具不可少的加工法。線切割加工 (WEDM) 參數多，要針對所需要產品需求，去設定放電最佳參數組合，需要花費大量時間和成本所累積經驗而來。參數設定可能因為工程人員不同，而產生認定標準的差異，進而產生了模糊空間。當品質特性間的關聯性越強或所考量的品質特性變多時，會造成各種品質特性之間互相衝突的問題並增加困難度。

田口法能在最少的實驗次數下，有效率的完成最佳化設計，但其缺點都比較偏重單一品質特性，而 WEDM 參數很多，且要探討多重品質特性，是無法用田口法來尋求最佳化製程。即滿足一種品質特性的最佳參數組合，並不是另一種品質特性的最佳組合，也無法滿足整體的品質特性，因此建立一個客觀同時又可以滿足多個品質特性的製程最佳化方法，有其必要性。本研究應用田口法探討放電加工參數電流工作時間、電流休止時間、線張力、沖水速度，希望找出鼓形量、表面粗糙度與加工速度的各個品質特性的預測方程式與最佳參數水準值，並結合灰關聯分析多品質特性，並以反應曲面法優化並尋找多品質特性最佳化參數組合。

Han[1]模擬分析精加工分析線切割材料移除率，並分析線材振動。由於放電間隙、爆炸力與沖水速度

的阻尼系數的參數難以測量確定，因此使用參數編程方法，可最大程度地減小模擬結果與實驗結果的誤差。而 Okada[2]針對 WEDM 沖水速度和排渣的流動狀態進行模擬，利用高速攝影機進行拍攝加工液體在加工槽的流動狀態。結果顯示，沖水會形成一個水流道帶走殘渣，沖水水蓋越靠近工件沖水排渣效果越佳，但越到工件中央位置沖水速度其流動速度會降低。

在加工參數的影響方面，蘇信哲[3]討論 WEDM 的加工參數與加工特性間的關係，希望找出決定性影響鼓形量的重要因子，藉以調整重要因子來減少鼓形量，結合類神經網路建立預測功能並規劃出相對應加工條件。廖哲偉[4]針對厚 SKD11 從事線切割的研究，以找出合適的控制策略。結果顯示線張力仍是造成鼓形量的主因，但是但控制線張力達到一定的程度，殘渣的流動模式會變成影響鼓形量的主要因素。放電相關參數對於厚工件製程的影響上，賴諺柏[5]以放電工作、休止時間、伺服電壓，線張力、送線速度，以及沖水相關參數的沖水壓力、沖水方式，從事對於表面粗糙度、加工速度、鼓形量的影響研究。結果顯示，在放電加工時間增加會對鼓形量和表面粗糙度，線張力增加能獲得較好的真直度，而沖水的速度增加不會改變表面粗糙度但能增加加工速度。郝光哲[6]在碳化鎢之線切割放電加工特性研究，討論銻含量、排渣模式對加工特性影響，發現銻量越高放電延遲時間越長。在實驗設計法中，盧昆宏[7]以田口式實驗結合灰關聯分析設計能同時滿足多重品質特性之最佳參數組合，再以反應曲面法來進一步找出最佳水準點，以液晶顯示器製程中基板為例，驗證演算法模式的可行性。呂詔安[8]探討 SMT 如何降低成本又能增加焊點強度的要求，使用田口灰關聯分析可減少實驗次數得到有用的結構性資料。林效賢[9]則應用反應曲面法探討 SMT 迴焊製程的最高爐溫、預熱時間、迴焊時間及冷卻速率四種參數，找到焊接點可以承受推力並找出最佳參數組合。

規劃一個好的線切割加工方法，需要考慮工件加工的品質和效率，如何在品質和效率間建立一個平衡點，所以加工參數最佳化組合是重要的課題。鑑於過去文獻可知，利用田口法分析最佳加工參數，只找到的單一品質特性的最佳組合，而根據使用者的加工經驗設定因子水準，容易因主觀的因素影響。如果能建立一個簡單的實驗設計方法，可以分析多重品質特性且可以驗證參數水準組合是否最佳，來幫助使用



者在訂定加工參數水準的可靠的依據。本研究應用田口法探討放電加工參數電流工作時間、電流休止時間、線張力、沖水速度，希望找出鼓形量、表面粗糙度與加工速度的各個品質特性的預測方程式與最佳參數水準值，並結合灰關聯分析多品質特性，並以反應曲面法優化並尋找多品質特性最佳化參數組合。

## 2. 實驗方法

本研究採用國產慶鴻浸水式線切割放電加工機，如圖 1 所示，採用断面加工如圖 2 所示，材料是 SKD11 硬度 HRC60，對 60mm 厚工件放電加工切割長度為 10mm，放電加工參數為電流工作時間、電流休止時間、線張力、沖水速度，並對鼓形量、表面粗糙度、加工速度三種品質特性做一量測，最後藉由 ANOVA 及反應曲面法驗證判斷品質特性水準組合是否最佳。採用如圖 3 英國 Taylor Hobson 公司形狀量測儀水平臂接觸式探針，進行三維加工表形狀輪廓尺寸及表面粗糙度量。

在進行線切割加工實驗前，首覺要確定主要探討問題是鼓形量、表面粗糙度、加工速度，實驗加工機是國產慶鴻的線切割機，由於機台設定參數有 13 樣只能針對主要影響參數實驗，依據慶鴻提供加工參數資料配合自己的加工經驗，選取電流加工時間、電流休止時間、線張力、沖水速度做實驗。再考慮形狀量測儀量測方式，決定線切割断面形狀以方便量測。



圖 1 浸水式線切割放電加工機

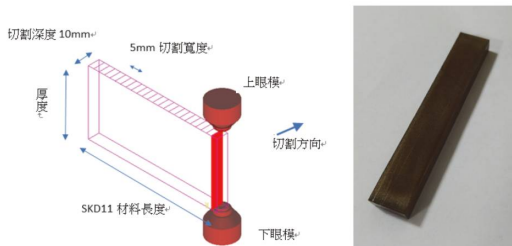


圖 2 加工断面

## 3. 結果與討論

依照實驗計劃應用田口式品質設計的 L9 直交表，對線切割機加工參數的電流工作時間、電流休止時間、線張力、沖水速度四種因子，參數代號依序為 A~D，每個變因參數有大、中、小三種水準值，運用實驗規劃進行表 1 的 9 組製程配置，參數因子和水準值的配置如表 2 所示。經由田口分析可得圖 4~6 的鼓形量、表面粗糙度、加工速度信號雜訊比(S/N)反應圖。



圖 3 形狀量測儀

表 1 實驗計劃實驗參數水準表

代碼	控制因子	水準 1	水準 2	水準 3
A	電流工作時間(ON)	4	5	6
B	電流休止時間(OFF)	17	16	15
C	線張力(WT)	8	7	6
D	沖水速度(WT)	4	5	6

表 2 田口 L9 直交實驗配置表

編號	A 電流加工 時間(us)	B 電流休止 時間(us)	C 線張力(g)	D 沖水速度 (kg/cm <sup>2</sup> )
1	4	17	8	4
2	4	16	7	5
3	4	15	6	6
4	5	17	7	6
5	5	16	6	4
6	5	15	8	5
7	6	17	6	5
8	6	16	8	6
9	4	17	8	4



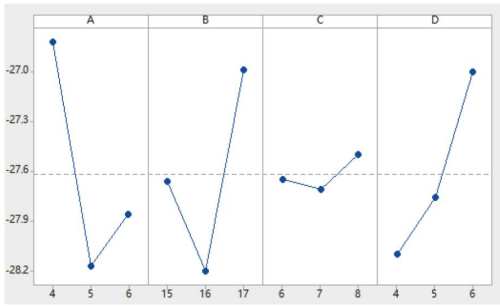


圖 4 鼓形量信號雜訊比(S/N)反應圖

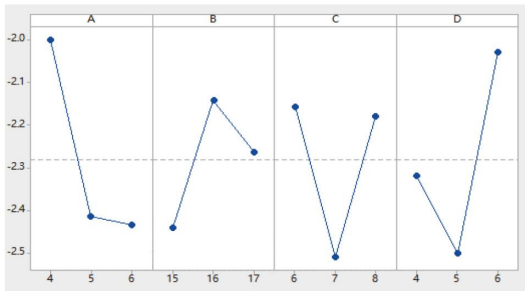


圖 5 表面粗糙度信號雜訊比(S/N)反應圖

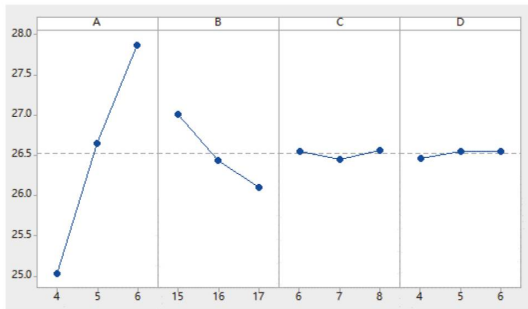


圖 6 加工速度信號雜訊比(S/N)反應圖

可以了解加工參數在不同水準下對鼓形量加工特性的影響與差異，鼓形量具有望小的特性，鼓形量的值愈小愈好，其重要性依序為 A>B>D>C。最大影響因子為 A(電流工作時間)其次重要影響因子 B(電流休止時間)。以統計軟體 Minitab 建立在二階模式下，反應曲面分析預測交互作用之鼓形量方程式為：

$$Pt = -667.1 + 25.34A + 77.75B + 3.493C + 2.662D - 2.395A^2 - 2.460B^2 - 0.2700C^2 - 0.4250D^2$$

若將其優化處理可得到最佳化設計參數為 A(電流加工時間)4us、B(電流休止時間)17 us、C(線張力)8g、D(沖水速度)6 kg/cm<sup>2</sup>，將最佳化之參數水準值代入鼓形量方程式可得最佳鼓形量數值為 18.0833(um)。

影響表面粗糙度重要性最大為 D(沖水速度)次要為 A(電流工作時間，表面粗糙度為望小特性，最佳參數為 A1、B2、C3、D3。反應曲面分析預測之表面粗糙度方程式為：

$$Ra = 5.417 + 0.3198A - 1.056B + 0.7187C + 0.4630D - 0.028$$

$$70A^2 + 0.03255B^2 - 0.05120C^2 - 0.04850D^2$$

若將其優化處理可得到最佳化設計參數為 A(電流加工時間)4 us、B(電流休止時間)16.212us、C(線張力)6g、D(沖水速度)6 kg/cm<sup>2</sup>，將最佳化之參數水準值代入表面粗糙度 Ra 方程式可得最佳鼓形量數值為 1.1788um。

而影響表加工速度重要性最大 A(電流工作時間)次要為 B(電流休止時間)，加工速度屬於望大特性，反應圖顯示的最佳參數為 A3、B1、C3、D3。以統計軟體 Minitab 建立在二階模式下，反應曲面分析預測之加工速度方程式為：

$$V = 94.96 + 5.758A - 10.31B - 2.128C + 0.6141D - 0.2301A^2 + 0.2879B^2 + 0.1596C^2 - 0.05928D^2$$

優化處理可得到最佳化設計參數為 A(電流加工時間)6 us、B(電流休止時間)15us、C(線張力)8g、D(沖水速度)5.17 kg/cm<sup>2</sup>，將最佳化之參數水準值代入加工速度方程式可得最佳加工速度數值為 26.165mm<sup>2</sup>/min。

藉用灰關聯多重品質特性來要整合線切割各品質特性的因子水準最佳組合。灰關聯度採用望大值來做計算藉由 Minitab 程式的計算結果我們可得到鼓形量、表面粗糙度與加工速度各因子間相互影響時哪個貢獻度最大，以圖 7 灰關聯度反應圖所示，重要性依序為 A>B>D>C，最佳參數的因子水準組合為 A3B1C2D1。

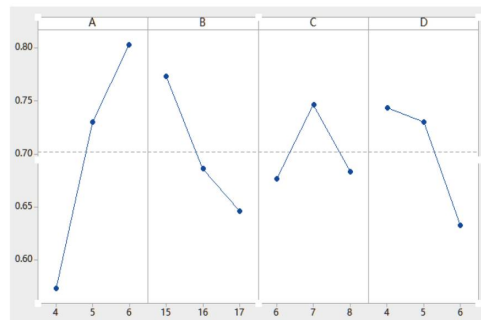


圖 7 灰關聯度反應圖

以 Minitab 統計分析軟體來進行分析，進行分析可求得各品質特性方程式如下：

$$\text{關聯度} = 2.100 + 0.5317A - 0.8100B + 0.9367C + 0.3617D - 0.04167A^2 + 0.02333B^2 - 0.06667C^2 - 0.04167D^2$$

將方程式進行優化處理，可得到灰關聯度佳化設計參數為 A(電流工作時間)6us、B(電流休止時間)15us、C(線張力)7.03g、D(沖水速度)4.34 kg/cm<sup>2</sup>。

由表 3 各個品質特性應用反應曲面法優化最佳參數組合，其預測最佳組合參數求得各個品質特性為鼓形量 18.08um、表面粗糙度 1.17um、加工速度 26.125 mm<sup>2</sup>/min。根據反應曲面優化最佳參數值，重新實際加工後量測值鼓形量 20.50um、表面粗糙度 1.31um、加工速度 23.67 mm<sup>2</sup>/min。

灰關聯分析多重品質特性主要用來整合各品質特



性達到一個均衡的參數值，運用反應曲面法的回歸方程式優化灰關聯分析進行驗證，以灰關聯度最佳參數與反應曲面優化參數重新實做後量測，結果顯示如表 4 對於灰關聯優化比較改善增益為鼓形量 2.25um、表面粗糙度 0.03um、加工速度 1.08 mm<sup>2</sup>/min。綜合以上結果利用反應曲面方法優化進行最佳化製程確實能有效提升品質特性。

表 3 品質特性最佳化

品質特性	優化最佳參數				驗證	
	A	B	C	D	預測	量測
鼓形量	4	17	8	6	18.08	20.50
表面粗糙度	4	16.21	6	6	1.17	1.31
加工速度	6	15	8	5.17	26.16	23.67

表 4 多重品質特性增益

	灰關聯度	灰關聯度優化	增益
鼓形量	23.68	21.43	2.25
表面粗糙度	1.32	1.29	0.03
加工速度	24.75	23.67	1.08

#### 4. 結論

本文針對線切割製程之鼓形量、表面粗糙度、加工速度的問題進行探討，先以田口法對電流工作時間、電流休止時間、線張力、沖水速度四種因子影響因素，使用反應表跟變異數分析找出線切割的鼓形量、表面粗糙度與加工速度三個品質特性的之預測方程式與貢獻度，再結合灰關聯分析將數值正規化，平衡不同品質特性的差異，最後利用反應曲面以優化線切割製程的多種品質最佳製程參數。

1. 利用田口穩健實驗方法，可以精簡實驗次數而達到全因子實驗效果，實驗結果顯示，影響鼓形量最大的參數因子是電流工作時間，沖水速度是影響表面粗糙度的主要因子，而影響加工速度最重要得因子是電流工作時間，整體來說在線切割製程中，電流工作時間控制因子的影響比重最大。
2. 田口法正規化處理與應用灰關聯生成數據研究，得到整體的參數最佳組合，重要因子依序是電流工作時間、電流休止時間、沖水速度、線張力，影響加工最大參數為電流工作時間與田口法實驗一致。

3. 運用反應曲面法優化，顯示多重品質特性增益值，鼓形量 2.25um、表面粗糙度 0.03um，加工速度 1.08 mm<sup>2</sup>/min。
4. 實驗的探討過程中，本研究方法可以找到的最佳參數水準組合和線切割製程參數的重要影響因子，所以依據本實驗規劃確實有效幫助工程人員提升對線切割製程的加工品質和效率。

#### 參考文獻

1. Han, F., Kunieda, M., Sendai, T. and Imai, Y., "High precision simulation of WEDM using parametric programming," Annals of CIRP, Vol. 51, 2002, pp. 165-168
2. Okada, A., Uno, Y., Onoda, S. and Habib, S., "Computational fluida dynamics analysis of working fluid flow and aebris movement in ire EDMed ker,"annals of CIRP, Vol . 58, 2009, pp. 209-212.
3. 蘇信政，線切割放電加工粗加工鼓形量改善之研究，博士論文，台灣大學機械工程學研究所，(2009)。
4. 廖哲偉，線切割放電加工機鼓形量之探討與抑制，碩士論文，台灣大學機械工程學研究所，(2010)。
5. 賴諺柏，線切割放電加工對厚工件精修之研究，碩士論文，台灣大學機械工程學研究所，(2015)。
6. 侑光哲，碳化鎢之線切割放電加工特性研究，臺灣大學工學院機械工程學研究所，碩士論文，(2017)。
7. 盧昆宏，應用灰關聯分析、田口法與反應曲面法於多重品質特性最佳化製程參數設計，高雄大學亞太工商管理學系，碩士論文，(2009) pp.92-103。
8. 呂詔安，以灰關聯法進行 SMT 焊接強度最佳化迴焊參數之探討，龍華科大學機械工程，碩士論文，(2014)。
9. 林效賢，應用反應曲面法於 SMT 迴焊製，龍華科大學機械工程，碩士論文，(2014)。

## Optimization of processing parameters for wire electrical discharge machining

S.F. Liu<sup>1</sup>, M.F. Tsai<sup>2</sup>,  
Y.F. Huang<sup>2</sup>, C.S. Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering,  
Lee-Ming Institute of Technology

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering,  
Lunghwa University of Science and  
Technology

### Abstract

The wire electrical discharge machining is one kind of unconventional machining method, especially suitable for the processing of materials with the high hardness and high strength. In this study, we apply the Taguchi method to combine with gray correlation analysis to establish a set of best methods for multiple quality analysis. Moreover, we obtain the prediction equation of the target value and the best combinations of processing parameters through Response Surface Methodology. Finally, we verify the practicability and correctness of this algorithm. The main purpose of this experiment is to construct a calculation model and the approach of processing optimization. That can save time and cost, and satisfy objectively multi-characteristics of materials. The experiment tool is SKD11 steel with 60mm in the thickness of the work piece and 0.25mm in the diameter of wire electrode. The electrical discharge machining parameters are discharge time, current off-time, thread tension and flushing velocity respectively. First of all, we find out the optimal parameter levels for individual quality characteristics of the drum-shaped error, surface roughness and processing speed via Taguchi method. Then, we applied gray correlation analysis to resolve the conflict of various quality characteristics. Finally, we establish model structure and verify it by combining response surface methodology with optimization techniques.

**Keywords :** Taguchi methods, grey relational analysis, wire electrical discharge machining

