

放電加工之模糊控制

張義芳¹ 石興銓² 粘永峰³

¹大葉大學機電自動化研究所

²大葉大學機械工程研究所

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

³工業技術研究院機械工業研究所

台中市工業區三十八路 191 號

摘要

本研究將根據放電狀況如導弧延遲時間百分比 ($T_d\%$) 與參考值之誤差量即導弧延遲時間誤差量 (E_{Td})、此誤差量的變化量 (ΔE_{Td})、電弧 (arcing) 發生次數, 經由模糊控制 (fuzzy control) 推論出適當的伺服進給率、放電波休止時間 (T_{off})、強迫跳躍排渣的觸發訊號, 以維持其放電加工之速度。

先以導弧延遲時間百分比誤差量 (E_{Td})、導弧延遲時間誤差量的變化量來進行模糊控制電極位置, 使導弧延遲時間百分比維持在合適的狀態。當渣屑不易排除, 致使導弧延遲時間百分比持續趨於過低的狀態時, 可再經由電弧發生的次數百分比判斷後, 就能以模糊理論來進行放電休止時間的提升。若放電休止時間調整值超過原始設定值三段大後, 則需進行強迫排渣以平衡間隙中的渣屑濃度, 如此才能確實將碳渣排出並確保不會積碳。

此放電參數模糊控制法與軟體架構, 將應用於裝置在工研院機械所發展之放電加工電腦數值控制器 (ITRI EDM CNC) 的放電加工機台, 以驗證其增進之放電效果。

關鍵詞: 電腦數值控制, 放電加工, 模糊控制, 跳躍排渣控制

Fuzzy Control of Electrical Discharge Machining

YIH-FANG CHANG¹, SHING-CHYUAN SHIH² and YUNG-FENG NIEN³

¹Graduate Institute of Electro-Mechanical-Automation Engineering, Da-Yeh University

²Graduate Institute of Mechanical Engineering, Da-Yeh University

112 Shan-Jiau Rd., Da-Yeh, Changhua, Taiwan

³Mechanical Industry Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

191 Gung Ye 38 Rd., Taichung, Taiwan

ABSTRACT

In this study focusing on a computerized numerical controller (CNC) for an electric discharge machine (EDM), a fuzzy controller for discharge-gap control and discharge-parameters control are proposed in order to improve the erosion performance during the eroding process.

After determining the discharge conditions such as the percentage of deflection of ignition delay (E_{id}), the variation in the deflection of the ignition delay (ΔE_{id}) and the arcing times, the



appropriate feed rate, the pulse-off time (T_{off}) and the jump frequency can be generated via a fuzzy-control rule.

The percentage of the practical ignition delay can be maintained at the desired value by regulating the electrode position according to the deflection of the ignition delay and its variation. During the long term of the discharging process, the carbon powder may scarcely be ferreted out from the discharge gap; hence the ignition delay cannot be maintained at the reference value. A strategy for increasing the pulse-off time can be developed via fuzzy control with inputs from the measured deflection of the ignition delay and the arcing times of the sparks. While the increased pulse-off time is larger than three times the original setting value, the electrode-jumping process should proceed to decrease the carbon density in the gap and avoid the carbon welds on the eroding surface.

This fuzzy-control algorithm and its software structure will be installed in the hardware of the computerized numerical controller (CNC) of an electric discharge machine (EDM) developed by the Mechanical Industry Research Laboratory of the Industrial Technology Research Institute (ITRI), Taichung, Taiwan in order to verify the improvement in the electrode-discharging process.

Key Words: CNC, EDM, fuzzy control, jump control

一、前言

放電加工去除材料的方式是在浸泡於絕緣加工液中的電極和工件中施加一大於兩者間隙所需的崩潰電壓，就會根據當時兩極間最近點的距離、絕緣液體的絕緣特性及間隙中污染的程度，在間隙中電場最強之處開始間續放電。在局部極高溫下將金屬材料熔化、氣化、爆離而去除。

放電加工中必須設定的加工參數主要有電流 (I_p)、脈寬 (T_{on})、放電電壓休止時間 (T_{off})、間隙設定、伺服靈敏度、跳躍排渣加工時間 (T_W)、排渣高度等等。當材料加工表面的粗糙度決定後， I_p 、 T_{on} 就已被決定 [7]。EDM 製造廠也會依放電電源特性建議一間隙設定值、排渣高度通常是加工起始位置。所以要如何決定伺服靈敏度、放電電壓休止時間 (T_{off})、跳躍排渣加工時間 (T_W) 就成為加工是否順暢的主要條件。

間隙控制的穩定性一直是影響放電效率的一重要因素。放電不穩定將使加工時間拉長，不但會浪費加工時間，尤其在修細時會增大了電極消耗。伺服不穩定時會造成放電間隙大小交替變化。間隙太大會讓加工能量太小則加工速度太慢；間隙太小會讓加工能量太大電極易消耗且此時渣屑不易排除，而渣屑濃度過大造成放電集中容易積碳。過去也有不同的控制法則研究用來增強電極控制的穩定性 [2, 6, 10, 16]。為使放電時的電極運動能比平均電壓回授法更能增進放電的反應效率，先進的控制法直接以最能代表放電效率的導弧延遲時間比 ($T_d\%$) 做為控制的狀態 [10-12, 16]。通常一商品化的控制器必須考慮生產與維護的便利性，因此在控

制增益 (control gain) 設定後就不再調整應是最理想的操作方式。然而在加工中放電間隙的變化、電極幾何型狀的不同，而且放電參數又不斷被改變，都需要對此控制增益略做調整以維持其穩定性。因此能自動調整間隙控制迴路的控制增益將可使加工操作更容易。

當伺服穩定性夠時，放電的加工效率就決定在放電參數是否設定得當。為了能以最快的速度加工出最終的粗糙度，在過去研究中已建立一擴孔修細加工放電電源參數最佳控制的方法 [7]，其能在不同深度及擴孔半徑時根據操作者設定的粗糙度及電極消耗限制來自動調整放電參數為最佳的狀態 [13, 14]。然而使用的電極幾何型狀複雜、加工深度的深淺，影響了放電間隙中渣屑排出的難易度。當渣屑產生率大於排除率時導致渣屑濃度增加。渣屑濃度增加後容易造成放電位置集中。此時間隙中可能呈現電弧放電 (arcing) 的狀況。長久下來會形成積碳的現象。因此在加工中適時的調大放電波修正時間 (T_{off}) [8, 11, 12, 17] 或是進行電極跳躍排渣的動作 [7, 8, 10, 17] 是有必要的。而此判斷及控制導弧延遲時間 T_{off} 及排渣的方法必須融入人工智慧才能控制得有效。

以往自動控制需要精確的數學運算及周密的建模，否則將無法精確控制機器的運動特性。但愈需精確的建模其系統就愈複雜，而模糊控制方法 [15] 恰好可以彌補這個缺點。模糊理論最早由 Lotfi Zadeh 在 1965 年提出有關“Fuzzy Sets”文章之後，一直到 1970 年代持續的發展，1974 年美國的 Mandoni 博士，以模糊控制的方式完成蒸氣引擎的自



動運轉，並獲得良好效果，成為 Fuzzy 控制實用化的起源。到了 1980 年代，模糊控制蓬勃的發展，並在世界各國中舉辦有關模糊控制的會議及成立相關機構，一直到今日 Fuzzy 理論的應用更是普及於各個層面，舉凡家電用品、汽車燈光、雨刷、變速系統，工業鍋爐、放電加工機，等等都可應用到模糊控制。

本研究的目標是希望能產生快速反應的伺服馬達命令值，使導弧延遲時間百分比 ($T_d\%$) 控制能更快速穩定，同時產生合適的放電修正時間 T_{off} 與排渣動作，以避免放電間隙內的渣屑濃度過高。而控制時所面對的是複雜而難測的放電程序，因此將以模糊控制來達成控制目標。

間隙控制時，由導弧延遲時間百分比與參考值之誤差量，即導弧延遲時間誤差量 (E_{td}) 與此誤差量的變化量 (ΔE_{td}) 來決定電極速度命令。此觀念與傳統的比例微分 (PD) 控制法很相似，但因模糊控制所訂定的經驗表格將更符合放電加工的實際需要，所以會更加強傳統方法不能顧及的接近短路與接近開路的處理。

導弧延遲時間百分比 ($T_d\%$) 與放電電弧的狀態，也可以用來判斷極間渣屑的污染程度。導弧延遲時間百分比愈小代表渣屑污染較嚴重，電弧時間愈久也代表渣屑污染較嚴重。本研究將以 E_{td} 及電弧狀態來判斷是否發生渣屑濃度太高導致加工效率降低。本控制會在渣屑濃度較高時，加長放電修正時間 (T_{off})。若因加工深度加深或電極幾何形狀的關係，造成放電修正時間加長後降低渣屑濃度的效果不大時，就可利用強迫跳躍排渣的方式，造成強大之對流力量將渣屑排除。因此當放電修正時間調整無法減少電弧產生時，則啟動排渣訊號做跳躍排渣。當系統穩定時就可停止跳躍排渣以減少加工時間的損失。

二、系統簡介

本研究硬體系統採用工研院 (ITRI) 機械所新開發 CNC EDM 的硬體。其機電連線示意圖如圖 1。此 EDM CNC 可經由 EPG 板直接控制放電電源參數，同時能偵測當時放電波的導弧延遲時間、電弧產生時間，因此可以做到導弧延遲時間百分比 ($T_d\%$) 偵測及電弧偵測的目的。

根據上述理由本研究建立模糊控制方塊圖如圖 2，來進行調整進給率 V_f 、調整放電修正時間 T_{off} 、啟動放電排渣的工作 (Jump=on)。所研究之方法將在 CNC 放電加工機上驗證其效果。圖中之放電波形產生介面 (EPG) 可以計數導

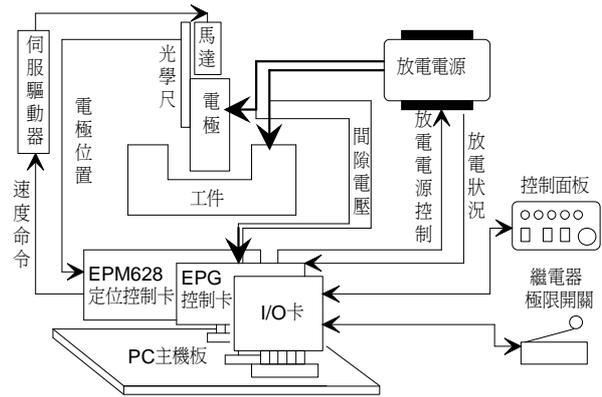


圖 1. 系統連線

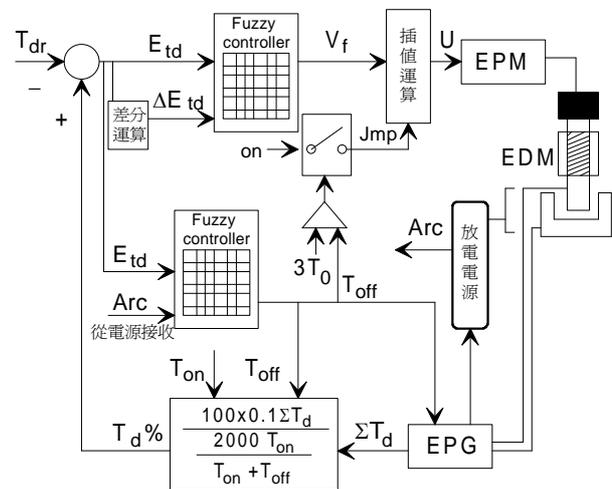


圖 2. 放電參數模糊控制方塊圖

弧延遲時間，也能控制放電電源參數如 T_{off} 。而放電定位控制介面 (EPM) 內部有三顆 LM628 晶片可以進行電極之定位控制。其特性為每一個定位指令必須包含本週期運動所需的加速度 (A)、速度 (V)、位置 (P) 三個物理量。Arcing 狀態可經由 EPG 板內部判斷放電電壓的大小，若放電電壓低於設定準則則會輸出一 on 之訊號。個人電腦若讀取該點訊號為 on 時即表示 arcing 發生，此時電腦可以用一計數變數來計數，就能算出某時段的發生 arcing 的百分比了。圖中之間隙模糊控制器與放電修正時間與自動跳躍排渣模糊控制為本文研究之重點。

由圖 3 所示，讀到計數器內藏值後要與前一控制週期得到的值相減才能得到此 2ms 中超過 70V 的計數值 N_{td} 。 N_{td} 得到後就能由放電參數設定值 T_{on} 與 T_{off} 算出 $T_d\%$ 。而 $T_d\%$ 能測得後就能計算模糊控制所需的變化量：



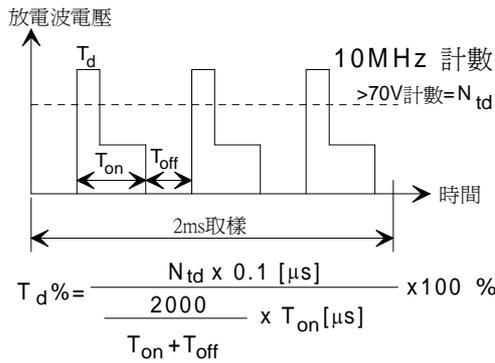


圖 3. 導弧延遲時間百分比計算法

$$\Delta T_d\%(t) = T_d\%(t) - T_d\%(t-1) \quad (1)$$

三、運動控制程式架構

插值運算在中斷服務副程式 (ISR) 內被固定頻率觸發執行，才能保證控制輸出訊號的週期固定。如圖 4，此架構在 ISR 內執行插值運算與位置控制。插值器運算出的速度命令被積分成位置命令後，傳給 LM628 位置控制器的輸入後，就可讓此控制迴路根據實際位置回受運算出伺服馬達的命令來。主流程 (MAIN) 則需有手動模式 (JOG mode) 畫面讓操作者移動機台準備加工，接著是放電參數輸入。放電參數輸入後，這些參數就可傳入 ISR 而經由 ISR 透過 EPG 的輸出點對放電電源切換放電參數。接下來則接受工件程式區段資料的輸入，待輸入結束後將每一個區段資料傳給 ISR 以執行插值運算。

插值運算可用直線型插值法 [1, 9] 來計算中斷週期內各軸在中斷時間內的位置增量 (速率)。而為增強放電加工

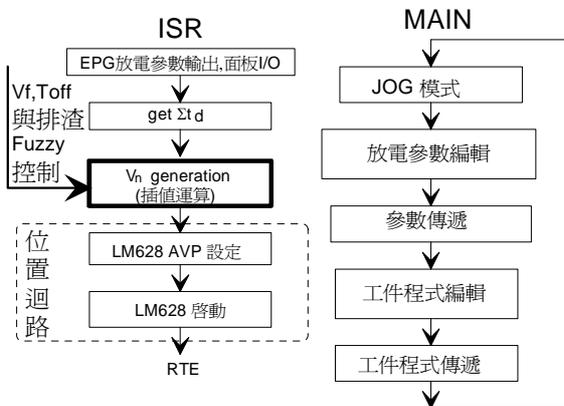


圖 4. 運動控制程式架構圖

中的加工效率所需的放電參數模糊控制器，可置於圖 4 之插值運算內如圖 5 所示。所需的進給率由間隙模糊控制器根據當時的 $T_d\%$ 運算後，轉換成合適的進給率提供給插值器使用。接著是 T_{off} 的模糊控制器會產生 T_{off} 的段數後利用 EPG 輸出點控制放電電源。當需要排渣時則設定變數旗標 jmp 為 on，就可通知插值器進行跳躍排渣的兩段直線插值運算。

四、模糊控制器設計

模糊控制器是一個採用規則決策的系統。規則由系統控制要求或人的經驗所制定。通常將代表控制規則的模糊條件語句，簡寫成一個表格形式，稱為模糊控制決策表。由於模糊控制是經由語言形式的控制規則所組成，因此可以很容易由控制規則了解控制器的動作，並且可以針對系統某部份的響應加入特別加強的控制規則，進而改善系統控制情況，也可藉著修改控制規則，將人類的經驗加入，來達到控制的目的。所以模糊控制是屬於非線性形式的經驗加在無法以線性模式精確描述的受控系統上。其經由適當調整控制規則後，具有比傳統控制方法更佳的控制性能。

規則決策主要構成要素是 IF-THEN rule，它是模糊系統中的核心，其表示方法為

$$Ru^{(i)}: \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i, \text{ THEN } y \text{ is } B^i$$

由這些規則及推論法所組成的資料庫，即為 Fuzzy Rule Base。推論決策原本是一對一的推論，但是自然界的現象尤其是控制系統，往往一個變量的描述可以用幾種口語的定義

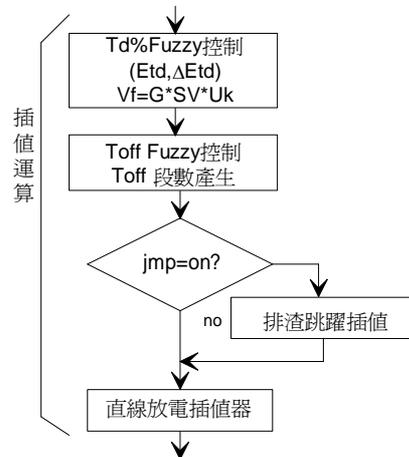


圖 5. 放電加工模糊控制直線插值程式流程圖



以不同成份來組合定義出，此即模糊推論的觀念。因此從一對一的口語推論到多對多的推論組合，就要應用模糊控制理論提出的方法來完成。

模糊控制器設計的步驟如下：

(一) 定義輸入及輸出變數

設計時，首先必須定義輸入及輸出變數，並且再針對輸入變數與輸出變數的空間做模糊分割。所謂模糊分割即是將控制器變數的空間劃分為若干個區域，對部份空間表示為模糊狀態，並以模糊歸屬函數來表示這個模糊空間。通常可以用 7 個三角形模糊歸屬函數來進行模糊分割其中： NB （負大）、 NM （負中）、 NS （負小）、 ZE （零）、 PS （正小）、 PM （正中）、 PB （正大），至於變數的選擇方式，因為模糊控制器的控制規則大都是根據操作人員的經驗來提出，而一般操作人員只能觀察到受控對象的輸出變量與此變量的變化率。所以在模糊控制器中，總是選取誤差以及誤差的變化量做為控制的輸入變數。本系統之模糊控制採用兩個輸入變數，一個輸出變數，其中共有二個模糊控制器。一個用來產生進給率來控制放電間隙，一個用來調整放電修正時間（ T_{off} ）及跳躍排渣。每一模糊控制器基本方塊圖如圖 6 所示。如圖 2 所規劃，間隙控制時 $I_1=T_d\%$ ，誤差量 $=E_{td}$ 、 $I_2=$ 誤差的變化量 $=\Delta E_{td}$ 、 $O_t=$ 常規化進給率 U_k 。放電修正時間控制時 $I_1=E_{td}$ 、 $I_2=arc\%$ 、 $O_t=T_{off}$ 。當放電修正時間 T_{off} 超過原先設定值三段大後則發出強迫跳躍排渣的訊號 $Jump=on$ 。

(二) 定義各變數模糊化的條件

決定好控制器的變數後，選取適當的比例因子將系統中的誤差、誤差變化的實際範圍調整為準備進行分割的基本論域。由於事先對受控對象了解不多，故開始時，只能大略定出。至於適當的比例因子則必須靠實際系統特性或實驗來修正。

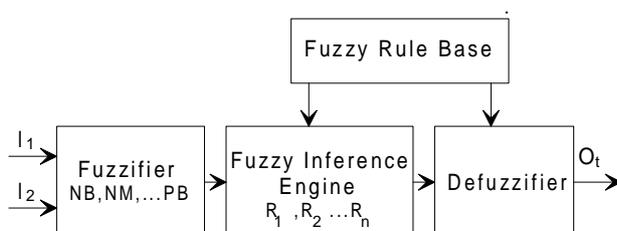


圖 6. 模糊控制器方塊圖

(三) 設計控制規則與模糊推論

在模糊控制設計中，利用歸屬函數將實際系統的訊號轉換成模糊計算可以接受的模糊量。根據實際經驗，模糊集合的數目是越多越好。但是在系統輸入輸出訊號範圍之內，選擇太多的模糊集合反而會造成控制規則數增加，徒增計算或電腦記憶體的負擔，這是因為模糊集合數與控制規則數是成正比的。

(四) 選擇解模糊化的方式

解模糊化，就是將這個模糊集合轉化為一個明確量，送至受控系統上。

解模糊化必須注意三個要點：

1. 可信度要高，能解釋其解模糊方法，
2. 計算要簡單。
3. 連續性：每個小變動量不會造成整個輸出大改變。

本研究採用最常使用之中心平均法（center average defuzzifier）。

(五) 選擇控制方式

線上模糊運算法是在模糊控制過程中，每次輸入都經由模糊推論而即時計算輸出，因此可以精確計算出推論輸出。但因每次都必須重複做推論計算，所以也造成計算費時的缺點。因此模糊控制實際應用時大都採用離線設計法，事先利用 matlab 軟體做模糊控制規則的推論、合成、歸屬度的計算後，算出模糊推論的結果，並寫成一查詢表（look-up table），再將此表建入電腦程式中。經由查表可獲得控制輸出的方式，可以減少控制器的運算時間。若要使查詢表精度提高，記憶體容量相對要增加，這在實際應用時要權衡考量。

五、間隙模糊控制器設計

依據放電加工原理，當導弧延遲時間很長時，表示電極與工件之間隙很大。而導弧延遲時間愈短則表示電極及工件之間隙愈小。由於導弧延遲時間的大小能表現出放電效率，所以我們以導弧延遲時間（ T_d ）作為控制對象。

建立決策表的原則可根據模糊理論中的直覺式推論法：

- 前提 1：當導弧延遲時間誤差大時，則極間隙過大或過小。
 前提 2：極間隙過大或過小則放電效率差。
 結論：導弧延遲時間誤差大時，放電效率差。

對 ΔE_{td} 值而言：

- 前提 1：當 ΔE_{td} 大時，則電極移動很快。
 前提 2：當電極移動很快時，放電不穩定。



結論：當 ΔE_{id} 大時，放電不穩定進給率應減少。

用口語變數將之分成首先訂出 E_{id} 及 ΔE_{id} 的範圍。

E_{id} 範圍定義在 $[-10,90]$ ， ΔE_{id} 範圍定義在 $[-100,100]$ 。在實際間隙控制中， E_{id} 所影響的進給率，通常在誤差大時的進給率轉換增益必須要比誤差小時的進給率轉換增益值更大如圖 7 所示。因此在調整 E_{id} 歸屬函數的間隔時若能將此經驗置入將更有助於間隙控制的穩定性。如圖 8 的實際調整中，因為想在誤差大時考慮將進給率歸屬於較大的成份，所以將 PB, PM, PS 往右移，如此就能在誤差大時 (>50) 具有較高之解析度，而在誤差小時 (<50) 大部份以小量值來描述。 ΔE_{id} 在實際的間隙控制應用上為一線性的微分控制法，所以在設計 ΔE_{id} 的歸屬函數時以等距離排列如圖 9 所示即可。接著將 E_{id} 及 ΔE_{id} 用口語變數各分成七個變量大小，並由其相關性獲得許多的推論，如此一來可獲得 Fuzzy IF - THEN rule，如表 1。以等比例的歸屬函數間格區分 $[-1,1]$ 的 U_k 輸出成為七段定義如圖 10。如此便能經由 Matlab 幫助可對應出 U_k 的數值如圖 11。當 $\Delta E_{id}=0$ 時之截面來看即可如圖 7 的特性來變化。

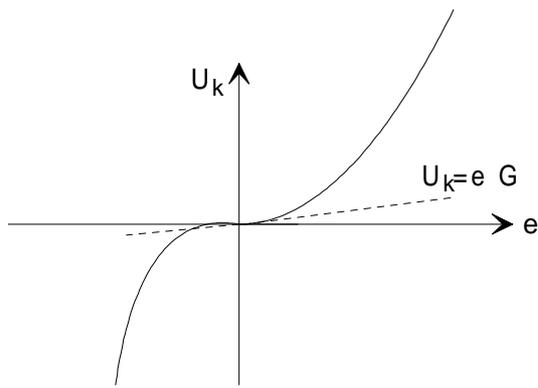


圖 7. 非線性間隙控制進給率關係圖

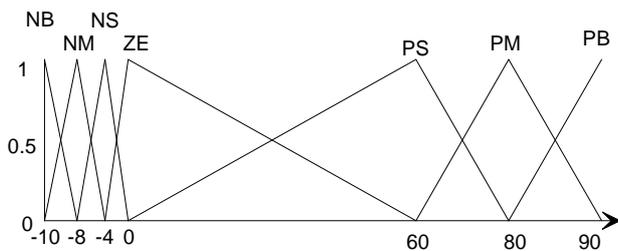


圖 8. 間隙控制 E_{id} 輸入之歸屬函數

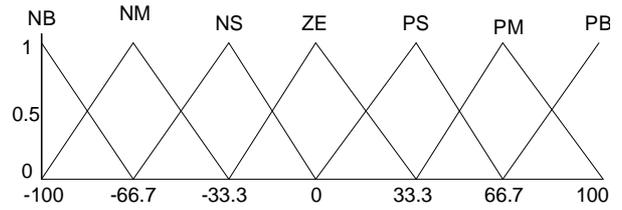


圖 9. 間隙控制 ΔE_{id} 輸入之歸屬函數

表 1. 間隙控制 U_k 決策表

		ΔE_{id}						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E_{id}	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS
	PM	PB	PM	PM	PM	PM	PS	ZE
	PS	PM	PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	NS	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	NM
	NM	NS	NM	NM	NM	NM	NM	NB
	NB	NM	NB	NB	NB	NB	NB	NB

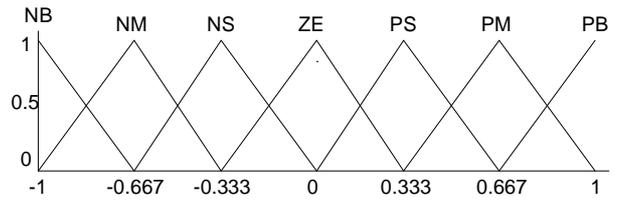


圖 10. 間隙控制 U_k 輸出之歸屬函數

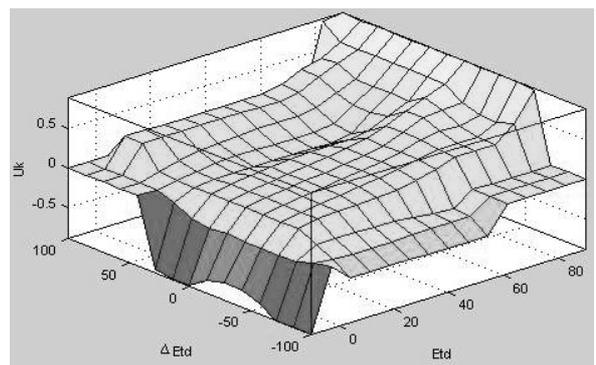


圖 11. 間隙控制推論結果 U_k 立體圖

六、放電休止時間與自動跳躍排渣模糊控制

放電加工效率大小與 T_{on} 及 T_{off} 分配的比例有關。當系統因渣屑濃度過高造成不穩定時，我們希望延長 T_{off} 使渣屑濃度降低而使系統穩定下來。但系統一旦穩定後，我們希望



能減少 T_{off} 時間來增加放電頻率，所以就須降低 T_{off} 。

在實際放電過程中 E_{td} 與 arcing 比例較能表現出放電間隙的渣屑狀況。由於放電加工機的 T_{off} 調整乃是以撥段控制，而用模糊控制來調整 T_{off} 有其便利性，而且在 T_{off} 調整太大時，會表示間隙內的渣屑濃度過高且無法以提高 T_{off} 來處理，因此需進行強迫跳躍排渣。

根據實際放電加工經驗，將 arcing 次數比例定在每一週期 50% 當作啟動跳躍排渣的依據，而 50% 以內則以模糊控制來調整 T_{off} 。因為跳躍排渣動作時間比 T_{off} 調整時間長，所以不能完全依賴跳躍排渣來降低渣屑濃度。先將輸入變數 arcing\% 訂出如圖 12 之歸屬函數。

圖中 A0 表示無 arcing ，A3 表示 50% arcing 。通常渣屑濃度會因間隙太小即 E_{td} 負值過大時容易造成渣屑不易排除。所以在 E_{td} 負值過大時以模糊控制法加大 T_{off} 以避免渣屑濃度過高而加大 arc\% 。當以 E_{td} 為輸入變數時就要以歸屬函數將其分類。如圖 13。

在實際加工中我們瞭解 arcing 發生的時機只有在 E_{td} 負值過大的時候，其他時間均不會發生 arc 現象。但是若等到 arcing 持續一段時間才開始調整 T_{off} 已經太慢了。此時 arcing 次數會持續擴大，造成無效放電過多。但若太早反應雖然可以使電極間絕緣性良好，但是因加大 T_{off} 時間會導致加工時間延長，使加工效率提昇有限。而且若因次數太多而經常啟動強迫排渣功能，也造成加工時間的浪費。由以上經驗來推論， T_{off} 控制規則表如表 2 所示。

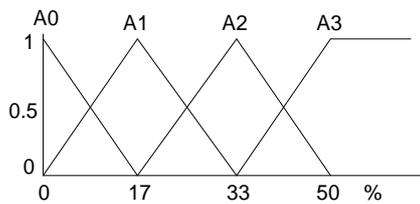


圖 12. T_{off} 控制 arcing 輸入之歸屬函數

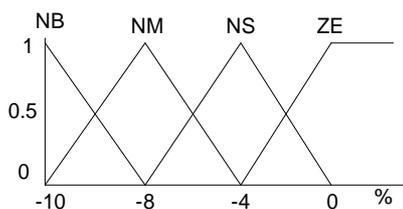


圖 13. T_{off} 控制 E_{td} 輸入之歸屬函數

表 2. T_{off} 控制決策表

		Arc			
		A0	A1	A2	A3
E_{td}	ZE	T_0			
	NS	T_0			
	NM	T_0			
	NB	T_0	T_1	T_2	T_3

其中之規則定在 E_{td} 小於 -8 就是 T_{off} 模糊控制的時機。 T_{off} 輸出值則以加工前操作者所設定的值 T_0 當作起始值。 T_1 為兩倍起始值 ($T_1=2T_0$)。 T_2 為三倍起始值 ($T_2=3T_0$)。 T_3 為四倍起始值而此時須進行強迫跳躍排渣 (Jump-on)。以等比例的歸屬函數間格區分 [0,1] 的 T_{off} 輸出成爲四段定義如圖 14，如此便能經由 Matlab 軟體對應出 T_{off} 的數值如圖 15。

經由先前的實驗中我們得知 E_{td} 爲 -8 時是一個相當好的調整界線，因此基於系統的穩定及讓電極間在休止時間保持良好的絕緣特性，故由 $E_{td}=-8$ 時開始變化。 E_{td} 大於 -8 的成分在實際控制器內不需建表才能節省記憶體空間。而 E_{td} 值愈小，則需要調整的 T_{off} 段數愈大，若 E_{td} 值爲 -10 而 arc 值超過 50%，此即 T_{off} 將對應出大於原始值三倍的時間，則啟動強迫跳躍排渣功能。

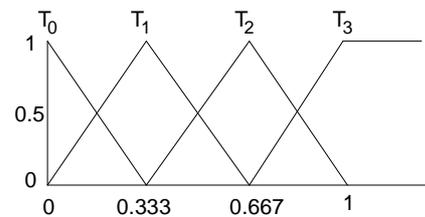


圖 14. T_{off} 控制之 T_{off} 輸出歸屬函數

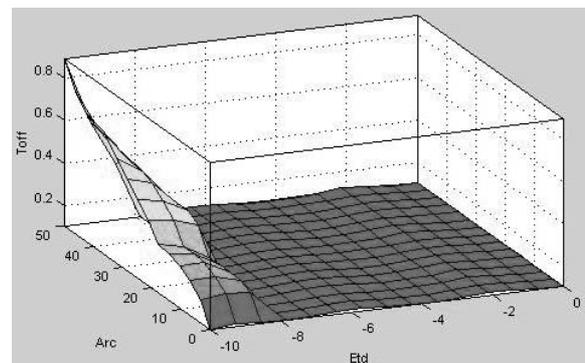


圖 15. T_{off} 控制推論之 T_{off} 結果立體圖



七、系統驗證

首先將圖 11 之 U_k 控制輸出之數據以電腦 C 語言 [4, 5] 建成陣列 Fuzz1，再將圖 15 之 T_{off} 控制輸出之數據建成陣列 Fuzz2。如圖 5 間隙控制時，以圖 3 之方法獲得 $T_d\%$ 後，將誤差量 E_{td} 算出就能一起計算出變化量 ΔE_{td} 。由於圖 11 與圖 15 中之 E_{td} 輸入變化間隔為 1，因此可以直接將實際獲得的 E_{td} 存入整數變數值，就能找到陣列中之 E_{td} 所在之指標如圖 16 與圖 17 之 i 。然而，圖 11 U_k 輸出圖中 ΔE_{td} 變化間隔解析度較高，所以須以實際 ΔE_{td} 前後陣列值 (Fuzz1[j], Fuzzy1[j+1]) 來比例內插後，才能得到較合理的 U_k 輸出值。

圖 15 T_{off} 控制時 arcing% 變化間隔也不等於 1 所以也可以經由 Fuzz2[k] 與 Fuzz2[k+1] 兩 U_{toff} 值比例內插求得較精細之輸出 U_{toff} 。如圖 17 以 U_{toff} 值區分合適的 T_{off} 輸出值。若 U_{toff} 值大於 0.892 則判斷成 T_{off} 超過原始設定值三倍，則設定 Jump=on 啟動跳躍排渣。



圖 16. 模糊間隙控制查表流程圖

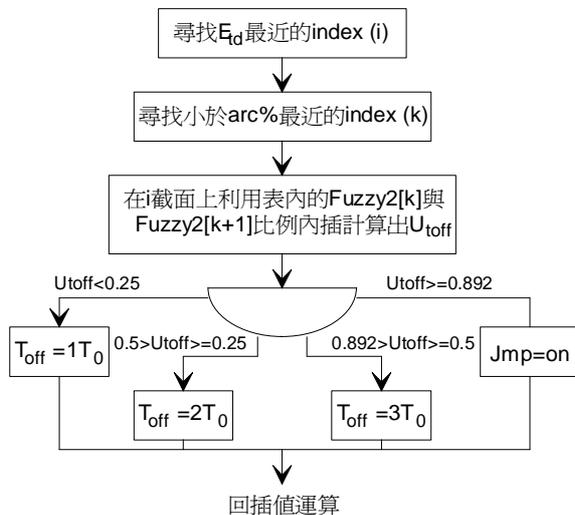


圖 17. 模糊 T_{off} 與強迫排渣控制器查表與輸出流程圖

圖 17 所得之 T_{off} 會在下一次 ISR 執行時，將 T_{off} 訊號經由 EPG 輸出點輸出至放電電源控制板即時調整電源的 T_{off} 。若需強迫跳躍排渣，則在 Jump=on 後進入插值運算，就會分支進入額外的兩段直線插值運算，進行向上與向下的快速直線運動。

為了驗證此模糊控制法在放電加工之改進，特與傳統之平均放電電壓經由 A/D 轉換器回受的比例控制 (P) 方式來比較(表 3 及圖 18 中之 GV 所示)。先以過去之研究 [7] 求得一組粗加工之加工參數如表 3 所列。電流從 15A 至 1A 的變化可以用來多段修細工件表面。為了更切合實際放電加工，先以大電流 15A 粗加工 5mm 深後開始比較兩種控制法的加工時間。如表 3 及圖 18 所示，模糊控制法節省將近 24% 的加工時間。

接下來的修細過程以固定時間(一小時)來比較不同放電參數下的加工深度。此方法可以在固定加工時間下來比較加工深度。在比較 6A 加工一小時的加工深度時：模糊控制法的位置增量為 0.670mm，而傳統控制法為 0.633mm。所增加之距離為 6% 的差距。在比較 3A 加工一小時的加工深度時：模糊控制法的位置增量為 0.172mm，而傳統控制法為 0.092mm。所增加之距離為 87% 的差距。在比較 1A 加工

表 3. 控制方法比較表

Wp=5% $T_{on}=140\mu s$ $T_{off}=40\mu s$ $GV=40V$		
加工條件	Fuzzy Control	GV Control
15A 加工 5mm	37 分 33 秒	49 分 10 秒
6A 加工 1 小時	加工深度 0.670mm	加工深度 0.633mm
3A 加工 1 小時	加工深度 0.172mm	加工深度 0.092mm
1A 加工 1 小時	加工深度 0.104mm	加工深度 無法加工

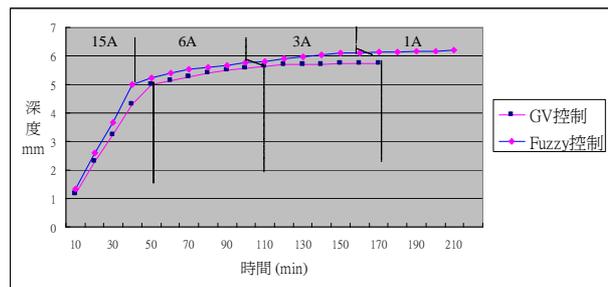


圖 18. 實驗結果比較



一小時的加工深度時：模糊控制法的位置增量為 0.104mm，而傳統控制法已因加工表面積碳無法向下加工。由這一連串的加工實驗結果顯示，在實際放電過程中，本研究提出的模糊控制法，較傳統以平均電壓回受之比例控制法更能幫住完整的深孔多段電流修細加工。

八、結論

根據本論文的模糊控制器設計及實驗結果，可得出以下四點結論：

1. 利用導弧延遲時間回受來控制放電加工機的間隙，比傳統放電加工機利用平均間隙電壓回受控制，其效果較理想。
2. 利用模糊理論方法所作的控制器，其放電效果較傳統加工法有更大的放電效率。
3. 利用模糊理論所作的控制方法，由偵測 arcing 發生的次數百分比與 $T_d\%$ 的誤差量，來調整 T_{off} 的段數或直接啟動排渣功能，比傳統控制固定排渣頻率更能迅速反應當時加工情形，而直接改善渣屑濃度。
4. 由實驗結果顯示本模糊控制法較傳統以平均電壓回受比例控制法，在實際放電過程中更能幫助深孔的多段電流修細加工。確實節省相當多的排渣行程時間，使在放電加工中，更能提高加工效率。

經本次研究後，基於放電加工過程之現象及間隙控制方法的瞭解與認識，對未來放電加工之間隙控制提出兩點建議：

1. 在導弧延遲時間控制下，放電效率較以往間隙控制佳，但導弧延遲時間比例設定值 10% 是過去的經驗值。在不同材料放電中不同 $T_d\%$ 設定值對加工效率是如何影響的，仍有待更多深入探討的地方。
2. 由於加工面積大小會影響廠商提供之加工參數表的數據，因此因應不同的加工面積建立各型加工參數表是一重要的課題。

誌謝

本研究承蒙工業技術研究院機械工業研究所學術委託計畫（計畫編號：903K33BE2）計畫資助，能夠順利完成，特此致謝。

參考文獻

1. 施慶隆、李文猶（民 86），機電整合與運動控制，頁 16-17，高立圖書有限公司，台北。
2. 張義芳（民 82），放電加工機伺服進給控制器設計，第六屆全國自動化科技研討會，頁 909-915，台中。
3. 張義芳、楊信生（民 86），放電加工智慧型間隙控制器設計，第十四屆中國機械工程全國學術研討會，頁 154-161，中壢。
4. 楊米歇爾（民 82），Microsoft C6.0 系統程式（盧東華譯），頁 343-350，儒林圖書有限公司，台北。
5. 賴森祿、游志勇（民 86），C 程式語言指引，頁 367-395，松崗電腦圖書資料股份有限公司，台北。
6. Chang, Y. F. (2002) VSS controller design for gap control of EDM. *JSME International Journal Series (c)*, 45(3), 712-721.
7. Chang, Y. F., S. S. Yang and Y. F. Nien (1998) The optimal control on CNC EDM. The 5th International Conference on Automation Technology, Session B5, 1-7. Taiwan.
8. Klocke, F., R. Raabe and G. Wiesner (1998) Optimization of the EDM sinking process using neuro-fuzzy control. *International Symposium for Electromachining (ISEM)*, 1405, 163-172.
9. Koren, Y. (1983) *Computer Control of Manufacturing Systems*, 116-120. McGraw-Hill, New York, NY.
10. Rajurkar, K. P. and W. M. Wang (1989) A new model reference adaptive control of EDM. *Annals of the CIRP*, 38(1), 183-186.
11. Snoeys, R., D.F. Dauw and J. P. Kruth (1983) Survey of adaptive control in electro discharge machining. *Journal of Manufacturing Systems*, 2(2), 147-164.
12. Snoeys, R., F. Staelens and D. F. Dauw (1986) Adaptive control optimization as basis for intelligent EDM die-sinking machines. *Proceedings of the Winter Annual Meeting of ASME*, 22, 63-78.
13. Staelens, F. and J. P. Kruth (1989) A computer integrated machining strategy for planetary EDM. *Annals of the CIRP*, 38(1), 187-190.
14. Staelens, F., R. Snoeys and J. P. Kruth (1988) A machining strategy and adaptive control optimization for planetary EDM. *Proceedings of the Winter ASME Conference*, 34, 213-227.



-
15. Wang, L. S. (1997) *A Course in Fuzzy System and Control*, 1-3. Prentice Hall, New York, NY.
16. Wang, W. M. and K. P. Rajurkar (1992) Modeling and adaptive control of EDM systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 11(5), 334-345.
17. Zheng, H., Q. B. Liu, Y. F. Guo, W. S. Zhao, Z. Y. Kong and J. C. Liu (1998) A fuzzy controller for EDM process. International Symposium for Electromachining (ISEM), 1405, 185-191.

收件：92.06.09 修正：92.08.13 接受：92.09.01

