

人工智能化的形雕放電加工

Intelligent die sinking Electrical Discharge Machining

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-065

執行期限：88/08/01-89/07/31

主持人：廖運炫 臺灣大學機械系教授
共同主持人：許春耀 龍華技術學院機械系講師

一、中英文摘要

本報告提出對放電波列的自然訊息，進行特徵化分類以及資料的壓縮，以利電腦分析。藉由自組織特徵映射網路學習法，文中發展了一可用於辨識放電波列的特徵，指出目前加工近似於何種狀態的方法。本研究先從樣本學習轉換成各種代表加工狀態的 $[W]_n$ 權矩陣。在新的一串波列的分類時，求取串列資料與已知的各種加工狀態 $[W]_n$ 的距離，最小距離的 $[W]_i$ 即是代表串列資料最接近此一加工狀態。經測試後，發現此法能客觀的辨識加工狀態。放電波列更多訊息的提供可對自適應控制 (ACO) 及模糊控制 (FUZZY) 的語意邏輯規則的建立，有進一步的幫助。

關鍵詞：放電波列分類、特徵辨識、自適應控制、模糊控制

ABSTRACT:

This report addresses features recognition from the pulse trains of EDM, and compression of information to facilitate computer analysis. Based on the self-organization feature mapping network a method for feature recognition from pulse trains, and determination its most possible associated machining state is developed. From the learning samples, the weighting matrix $[W]_n$ for different machining states are obtained. In discriminating a new pulse trains, its weighting matrix $[W]_i$ is computed, and it is compared with $[W]_n$ of different machining states. The least distance represents the corresponding state. After testing, it is found that the machining state can be discriminated more objectively by this method. Retrieving of more information from pulse trains is helpful in construction of logistic rules for adaptive control optimization and fuzzy control.

Keywords: pulse trains discriminating, feature recognition, adaptive control optimization, fuzzy control

二、計畫緣由與目的

放電加工去除材料的過程，是將電極和工件浸在絕緣液中，施於超過 60 伏特以上電壓，當二者之間逐漸接近時，在間隙中電場最強之處開始引起放電，由於局部超過 10000 以上的溫度，將金屬氣化，融熔

最後爆炸去除加工。

眾所周知，其加工過程充滿隨機性並且比其他種類的加工機器慢得多。最佳的加工狀況是連續的、緩變的，但是又可能因某種突然的因素（排渣不良或極間短路搭橋）造成集中的電弧放電，在電極及工件面上可能轉變成積碳惡化，破壞了製程的持續進行。因此，在過去就有很多的大學、研究單位及 EDM 專業製造廠，不斷努力地投入 EDM 製程最佳化的研究或開發。為了使多個參數能達成最佳操作的操作點，提出一種不同參數有不同時間距 (time constant) 的尋優策略，通常分成幾個層次或部份系統：

第一層次：應用適應限制 (ACC) 進行高速的異常處理。

第二層次：應用適應最佳化 (ACO) 進行放電參數尋優。

第三層次：應用專家系統提供線上或線外加工工序的指引。

回顧過去的 EDM 製程適應控制的研究，Tseng 於 1978 年提出一個有系統的方法應用於放電加工的適應控制[1]，以放電效率及加工狀況（好、中、差、最差）將加工狀況分成一組二維的區域，總共六個工作區域。每一個區域對應一個調整策略，可藉由增減調整放電平均電壓 (gap voltage) 及休止時間 (pause or off time) 等，來避開電弧危險。如此可提供較好的加工適應性。但是因為缺乏對放電波列的精確檢測分類，所以性能指標的可信度不足。這種區域化的調整策略雖然簡單，但是無法作到精密量化，所以通常無法尋找到最佳操作的參數。

於八五年代，Snoeys[2,3]首度引入 ACO 手法，將實驗搜尋最佳法 (Hill climbing) 應用在 EDM 參數的適應調整，這方法的缺點是搜尋速度很慢（每 10 秒一個步階），在多參數調整時有交互作用，因此有區域最佳化的問題。經與本研究合作的億曜企業公司測試，發現此方法在最高效率區會有失去調整方向的可能，而從啟始點到高效率點，至少需 10 分鐘左右，對於加工變動反應不夠。

日本三菱公司的 Morita 等人在九年首度發表應用模糊控制語意邏輯的控制法則[4]，將加工經驗融入控制技術，屬於高度非線性控制。後來於九五年，瑞

士的 AGIE 公司也提出應用 Fuzzy 技術在間隙調整進給率的控制[5]，獲得一個完善的改良。應用 Fuzzy 顯然易於導入產品技術，但是 Fuzzy 的語法規則需要專家的智慧，加工經驗的偏頗或不正確推論，可能造成處置不當，因此有必要有一個累積知識的方法，才能建立一組模糊控制器。

近來來類神經網路(Neural Net)非線性建模技術非常熱門，也被應用在 EDM 上[6]，但是必須是屬於非時變的因果關係，對於時變的部份，可能會有更不好的預測。如果是用於處理加工訊息狀態的分析與辨識則可能是有用的方法。

過去研究放電波列大致分成兩類，第一類是對每一個放電波的辨識，通常分成正常、過渡電弧、空壓、短路、污染波等，對連續短路，連續不正常放電作出串列行為的偵測，來進行 ACC 門檻檢查，進而改變參數設定，以提昇加工安全性。第二類則是以幾秒鐘的統計並分析平均及變異量，例如：平均 td，變動 td，或者 ARC 比率，SHORT 比率 平均放電效率，變動放電效率等等，主要應用在最佳化的參數搜尋。但尚未有研究者提出對放電波列串的動態行為的研究成果，至今對於加工狀態即時辨識仍付之闕如。

為能夠對一串波列可以即時提報目前的加工狀態，本研究計劃嘗試採用語音字元辨識的方法，探討波列特徵辨識的可行性。

三、理論基礎

人腦由大量的神經位元所組成，但並非同時起相同作用。Kohonen 認為神經網路接受外界輸入模式時，不同的區域有不同的回應。這樣不同的輸入模式則在神經網路上形成不同的「興奮」，表現為外界刺激最強的區域，稱之為一個 Bubble。

在 Bubble 中，神經元權向量會自動調節，直到與輸出向量的某一最大主分量方向重合為止。Kohonen 網路可以說是無導師的自組織特徵映射網路。一般其輸出節點成 2D 陣列分布，每個輸出節點之間可由變數值連接，輸出節點之關聯可形成許多如圖 1 所示的局部連接關係，。

Bubble 是 2D 輸出節點上的較大值域，隨著時間縮小而形成。在該值域中心處 C 處的輸入和權值的內積 () 稱之為歐氏距離 Y，是其間的最小值，。

$$Y = W^T \cdot X$$

$$X \cdot Y_c = \text{MIN} \{ X \cdot Y \}$$

此為以 C 為中心的 N 個神經元形成初始的 Bubble。

接著我們可以調整 Bubble 的權值以增強這種刺激。

$$\begin{cases} w_i(t+1) = w_i(t) + r(t)[x_i(t) - w_i(t)] & , i \in N_{AREA} \\ w_i(t+1) = w_i(t) & , i \notin N_{AREA} \end{cases}$$

依照不同時間大事件的增加，值域 N_{AREA} 縮小，誤差也縮小，可獲得一個收斂於某一種輸入模式的 Bubble，其算法如下：

步驟一：初始化權值

將 N 個輸入到 M 個輸出之間的節點，假設一組預設的權值(可以是範圍內之隨機)並設定有最大值域範圍 $N_{AREA}(0)$ 如圖 2 所示。

步驟二：加入新的輸入 X_i

步驟三：計算從輸入 X_i 到 j 個輸出節點的距離 d_j

$$d_j = \sum_{i=1}^n (x_i(t) - w_{ij}(t))$$

其中 $X_i(t)$ 是 t 時刻 i 節點的輸入， w_{ij} 是大時刻輸入節點 i 到輸出節點 j 的數。

步驟四：選擇具有最小距離 d_j 的結點 j 為輸出結點，其最小距離為

$$d_j^* = \min(d_j)$$

步驟五：修改以 j 為中心的範圍 $N_{AREA}(t)$ 內校值。

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \mathcal{Y}(t)[x_i(t) - w_{ij}(t)]$$

(t) 是按時間而逐漸變小的增益值

$$0 < \mathcal{Y}(t) < 1$$

如果 $\mathcal{Y}(t) < 0.005$ ，則結束工作，如果不是，則接下去步驟六。

步驟六：再回去步驟二

這樣的算法可以通過調整 N 個輸入節點到 2D 網路 M 個輸出節點的權值，使得不同的輸入樣本在網路輸出平面有不同的「興奮值」或是「較大值」。輸入樣本在訓練時，儘量給予類似近似之樣本，最後可收斂此種類樣本的 w_{ij} 。當往後不同型式的樣本有不同 w_{ij} 組合，我們就確認了該樣本的聚落中心或向量中心。此中心的點密度函數大到是輸入向量的概率密度函數。如果一個未知樣本，通過各種已知的 w_{ij} 時，那一個 w_{ij} 其內積成最小 d 距離我們就推論某種狀態可能發生了。

再回到 EDM 波列串動態行為的描述上，我們該如何應用 Kohonen 的 Bubble 技巧呢？

已知放電加工波列的間隙迴路在不穩定加工時，有 50ms 週期的來回搜尋(Hunting)的現象，這代表間隙電壓上下調整自然有一個迴路頻寬，這一種頻寬如果太小，或太大都可能造成問題，將對微弱訊息太敏感或太遲鈍。因此 50ms 是一個經驗值。假設我們以 50ms 為一個取間隔 T，以此為視窗字元，辨識其基本的分類狀態，一個一秒時間長的放電波列，可以化成一串以 A、B、C、J 的各狀態組成的資訊，展現放電波的語音。這樣的方法，也可以視為資訊的壓縮，以節省分析成本以及儲存成本，傳送成本，往後才有可能做到即時的處理。

因此，我們依據工程經驗，把放電波列的基本分類 (T, 50 ms) 建立成一組 10 個字元的表格，如表 1 所示。如果把一組一秒鐘的放電波列，切割成 20 組 50ms 串列訊號，將會變成如圖 3 所示的波列行徑圖。

由於主要係觀察加工平衡時的狀態及可延續長度，另外，暫態變遷的反應與範圍，包括從空壓狀態

至平衡狀態，從平衡態至不良狀態，以及再從不良狀態至平衡狀態，或者從平衡狀態脫離至空壓狀態，也是重點。這裡的平衡狀態，指的是機器期望的聚焦點，也就是本文分類 D 區中。在這個適中狀態的上方，分別是：「空 A，鬆 B，弱 C」，在適中之下方，分別是：「緊 E，險 F，危 G，橋 H，污 I，碳 J」。在單格分析時只抓取各項狀態的百分比，在雙格分析抓取持續及變遷過程。舉例 DD 代表二個 T 時間的平衡以及 CD 從弱到中，或者 DE 從中到緊，甚至 EF 從緊到危險。當一加工狀態有一個良好穩健的狀態時，其 DD 狀態在連續 20 個 T (50ms) 分析，可能佔 90% 的時間格，反之，加工狀態不穩定短路橋 H 與空壓 A 來回變動，則 HA、AH 可能各佔 50% 左右的時間格，那麼我們稱之短路頻繁運作。再者，如果發現加工 DI、DJ、ID 或 JD 比例高時，則代表突變現象發生，加工過程有可能從一個加工處或狀態，突然因某因素轉移。

每一串波列的行徑相似性，或許有無限多種的分析方法，但基本上，必須掌握波列串成員的比例原則，屬於 A%、B%、C% 及暫態過程類進原則(AB, CD,)，因此分析方法除了單格成份分析外，也對連續性的暫態變動行為做分析，連雙格、連三格，性質相同，才算接近；雙格或連三格有不同情形，不能認為類似。

這樣的分析對象將有多少？依照排列組合最大的可能，如表 2 所示，包括：

單格分析：10 組 (A, B, C, J)

連續雙格分析：10 × 10 組 (AA, BB, AB, BC)

連續三格分析：10 × 10 × 10 組 (AAA, BBB, CCC,)

因此總共有 1110 組的對象，如果有兩組波列，其波列的成員在這 1110 組的出現的結果 (outcome) 相似達 90%，主觀上即認定此二組波列可能是相似的。因此必須對所謂的“相似”提出一個距離觀念。在應用 Kohonen 方法，把[W1]、[W]、[W3]分別代表單格、雙格、三格分析的權函數。樣本距離的觀念就是指對[W1]、[W2]、[W3]的距離差。

另外，由於只關心有特徵性的組合，即正常或各式不正常加工的辨識。有可能這數十億以上的各種組成，有些是不可能出現的，因此要做到的只是建立各種常見的樣本空間。

依據經驗，常見加工不良的來源或現象，可能來自電極幾何外形、排渣因素（噴油方法，加工深度）或者放電參數的不正確操作，因此可以歸納出如下列之各種測試樣本，並收集每一類型至少 20 次以上。

- 1、過強工作電流，面積無法承載
- 2、初始加工不穩定
- 3、深孔加工
- 4、側修加工
- 5、伺服過強
- 6、伺服過弱
- 7、間隙伺服太大

- 8、間隙伺服太小
- 9、加工時間太久
- 10、尖端放電
- 11、積碳
- 12、污染
- 13、正常加工
- 14、Taper 加工

透過實際訓練樣本 {W1}、{W2}、{W3} 可以建立上述各種樣本種類的權函數值，至少 14 種以上。

四、實驗設計與數據分析

將加工穩定時，及短路頻繁時兩種常見的加工狀況當成測試樣本，表三與四分別為三種 W 分析的 {X1}、{X2} 及 {X3} 資料表。很顯然加的加工穩定及短路頻繁二者有很大的不同，比較此二表，發現其在 W 分析上各有自己的 W 權網路配置，可以很清楚的被分開成兩類，。

五、結論

1. 本文提出一波列特徵分類方法，可用以特討放電波列的動態行為。本方法是以距離的定義來進行分類，好處是無需監督，比較客觀。
2. 對於暫態現象的比對，使用連續三格可能有長的訓練時間，研究者對於龐大矩陣無法掌握，需要用更簡單的方式來改進。

本研究計劃尚未能研究參數變動對波列動態行為的影響分析，對未來工作的建議如下：

1. ACO 搜尋前，先以波列行為引導消去不適用範圍，減少參數試驗時間。
2. 研究參數變動對波列的行為資訊有何影響，期許有定性及定量的分析。

六、參考文獻

- [1] M.M. Tseng, "A Systematic Approach to the adaptive Control of the Electro-Discharge Machining Process" ASME, J. of Eng. For Industry, Vol.100, Aug., 1978, pp. 303-310.
- [2] R. Soneys, D.F. Dauw and J.P. Kruth, "Improved Advanced Control System for EDM Process" Annals of the CIRP, Vol.29/1, 1980, pp.97-100.
- [3] R. Soneys, D.F. Dauw and J. Jenes, "Survey of Adaptive Control and Detection System", Annals of the CIRP, Vol.31/2, 1982, pp.483-489.
- [4] A. Morita, Y. Imai, A. Noda, H. Moruyama, and K. Kobayashi, "Fuzzy Controller for EDM", ISEM-9, 1989, pp.236-239
- [5] M. Boccadoro and D.F. Dauw, "About the Application of Fuzzy Controllers in High Performance Die-Sinking EDM Machines", ISEM 11, April 17-21, 1995, pp.333-341.
- [6] B. Van Coppenolle, D.F. Dauw, "On the Evolution of

七、圖表

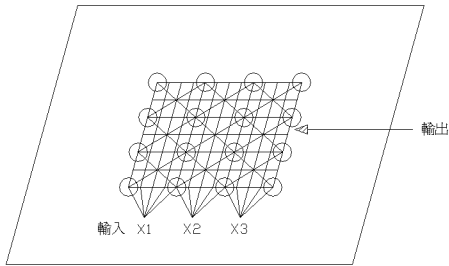


圖 1 : Kohonen 網路

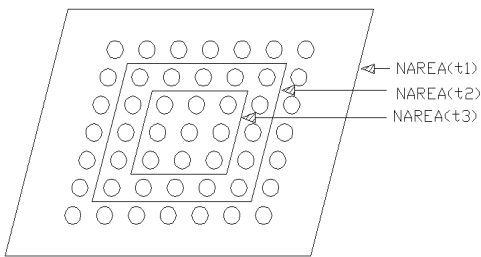


圖 2 : 輸出終點範圍變化 $0 < t_1 < t_2$

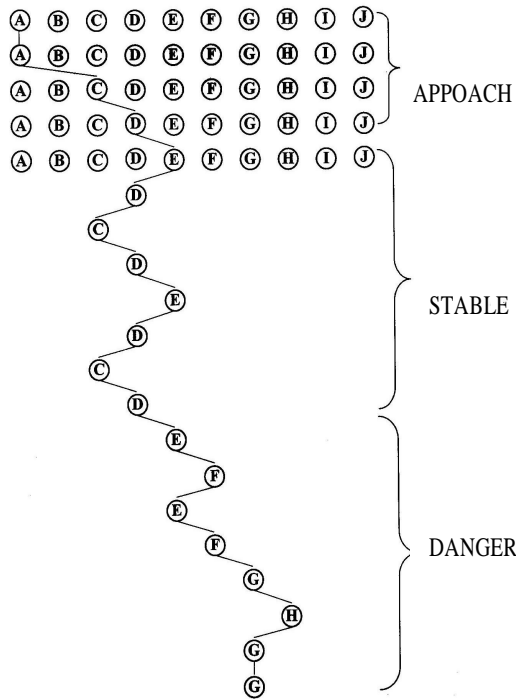


圖 3 : 波列行進次序圖 (從上到下)

英文	簡稱	狀態
A	空	擊發數太少
B	虛	$\bar{t}_d > 60\%$
C	弱	$30\% < \bar{t}_d < 60\%$
D	適中	$10\% < \bar{t}_d < 30\%$
E	緊	$1\% < \bar{t}_d < 10\%$
F	險	$0 \cong \bar{t}_d < 1\%$
G	危	$7V < U_e < 18V$
H	橋	$U_e < 3V$
I	污	Td電壓太低
J	碳	$U_e > 30V$

T 50 m s 內的波列平均行為

表 2 : $[X_1][X_2][X_3]$ 陣列輸入

$$\begin{aligned}
 [x_1] &= \begin{bmatrix} A\% \\ B\% \\ \cdot \\ \cdot \\ J\% \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} A\% \\ B\% \\ \cdot \\ \cdot \\ J\% \end{bmatrix}} \right\} 10 \text{ 個} \\
 [x_2] &= \begin{bmatrix} AA\% \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ JJ\% \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} AA\% \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ JJ\% \end{bmatrix}} \right\} 100 \text{ 個} \\
 [x_3] &= \begin{bmatrix} AAA\% \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ JJJ\% \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} AAA\% \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ JJJ\% \end{bmatrix}} \right\} 1000 \text{ 個}
 \end{aligned}$$

表 1 50ms 波列狀態表

表 3 加工穩定(排渣良好)的 $[X_1]$ 、 $[X_2]$ 及 $[X_3]$ 資料表

波列行進次序：AADD DDDDDDDDDDDDDDDDDDD

波列行進次序：ABDEDCHCHCHCHCDHCHCH

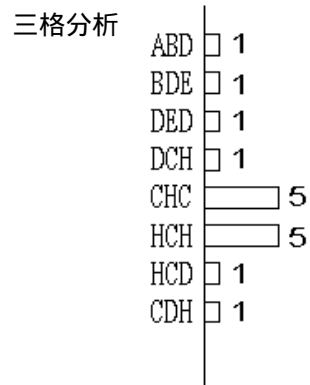
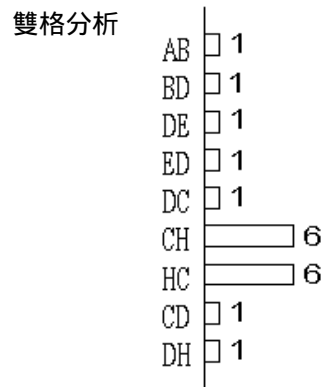
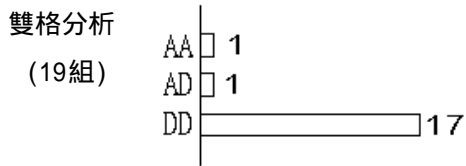
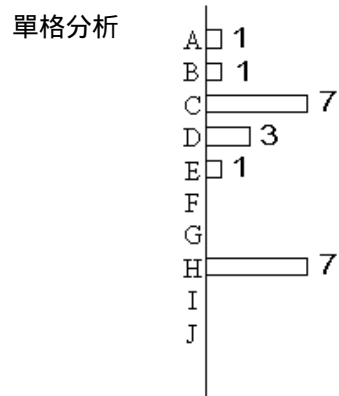
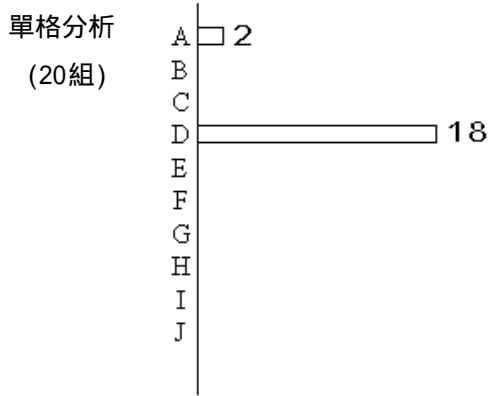


表 4 加工短路頻繁的[X1]、[X2]及[X3]資料表