

線切割放電加工工件厚度之線上估測

ON-LINE ESTIMATION OF WORKPIECE HEIGHT IN WEDM

廖運炫^{*} 余永平[†]

Yunn-Shiuan Liao Young-Ping Yu

^{*}教授 [†]博士班研究生
國立台灣大學機械工程學研究所

^{*}Professor [†]Ph.D. Graduate student

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Abstract

On-line estimation of workpiece height is essential for wire rupture prevention in WEDM process. In addition, it can provide the reference of machining parameters setting for increasing machining speed and stability. A new on-line WEDM workpiece height estimation system for the iso-energy type wire EDM machine is presented. The concept of specific discharge energy (SDE) is proposed, and a mathematical model relating workpiece height, machining speed and sparking frequency is derived. By assuming a linear discrete model between machining speed and sparking frequency, the workpiece height under a specific condition is estimated. The actual workpiece height is obtained by modifying the estimated value by a correction factor. Experimental results show that the system works satisfactorily. The estimation error of workpiece height is within 1mm while the response time is less than 1 second in general.

Keywords: wire electrical discharge machine, specific discharge energy, thickness identification coefficient, on-line workpiece height identification.

摘要

線切割放電加工線上工件厚度估測，不但可以抑制斷線，且可以提供加工參數設定的參考，以提高加工速度與加工穩定度，本文利用比放電能 (Specific Discharge Energy) 的觀念，並配合加工速度與放電頻率間一階線性分離模式的關係，推導出工件厚度、加工速度與放電頻率間之數學模式，實際的工件厚度是將模式所估測出的工件厚度乘一修正因子而得，最後針對等能量線切割放電加工機建立一新的線上厚度估測系統，實驗證明所建構的厚度估測系統在加工有段差的工件時，能準確且快速的估測工件厚度，厚度估測的誤差為 1mm，反應時間在 1sec 以內。

關鍵詞：線切割放電加工、比放電能、厚度鑑別係數、線上工件厚度估測。

1. 前言

線切割放電加工的工件樣式很多，加工過程中往往工件厚度高低起伏，因為伺服控制之關係，若工件厚度由厚變薄，加工速度會增加，有放電集中現象，容易產生斷線 [1~3]，工件厚度若由薄變厚，加工速度會變慢，生產力降低 [4~7]，因此在加工過程中，當工件厚度變化時，要避免斷線與保持一最佳加工速度，必須進行線上工件厚度預測，根據預測的厚度，自動調整加工參數，使加工保持穩定且具有高的生產力。Obara 與 Ishibashi 均曾經利用能量守衡的觀念進行工件厚度估測 [8,9]，模式中的係數假設為僅與材料相關的常數，然而考慮實際加工狀況，從多方面觀察這些係數應不僅與材料有關，應該亦與加工參數有

關，甚至會隨工件厚度變化，要能準確估測工件厚度，必須要能掌握這些係數。Rajurkar 亦曾利用材料移除率與放電功率成比例的關係推導出單輸入的估測模式 [10,11]，其後為改善線上估測的穩定性與準確度，提出同時導入間隙電壓、進給率與放電頻率的多輸入模式進行線上估測厚度 [12]，但無論那一模式，模式中的係數均為放電頻率的函數，函數中的係數需靠大量實驗，不易獲得，且當工件厚度變化的範圍較大時，線上估測厚度的誤差應該會較大，所以可準確估測厚度的範圍也會受到限制，此外其所研究的為等頻率放電型式線切割機，與本研究探討之等能量放電型式線切割機在加工參數的選擇與設定上即大不相同，且模式中係數之特性也不一樣。本文針對等能量放電型式線切割機嘗試以比放電能的觀念，推

導線上厚度估測之數學模式，並定義厚度鑑別係數，使模式中之係數有明確的定量關係，結合加工速度與放電頻率之線性分離模式，提出一新的線切割放電加工工件厚度估測系統，以進行線上厚度估測，文中亦探討厚度鑑別係數與加工參數、加工特性及比放電能間的關係，以提高此種估測模式的適用範圍。未來可以根據估測厚度調整適當的加工參數，使加工過程穩定，並避免斷線以及提高加工速度。

2. 工件厚度估測理論

放電過程相當複雜，影響放電過程的因素亦相當多，但以放電加工能量輸出的觀點考量，放電過程每一發即為能量輸出，至於工件與線極間能量的分佈、實際有效的移除能量，端視線極與工件間距離、沖水壓力、加工液導電度、放電時間等來決定。線切割放電加工的放電功率是由單發放電能量與放電頻率之乘積決定，實際加工時，為獲得均勻槽寬與安定的加工，同一道次加工的放電時間 T_{on} 須保持定值。圖 1 所示為典型的電壓與電流波形，假設放電時的平均工作電壓為常數 V_D ，且實驗用機器之放電電流為等邊三角形波，則單發放電能量可由下式計算：

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_{\text{Pulse_Duration}} v(\tau) i(\tau) d\tau \\ &= V_D \times K \times T_{on}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 K 為放電電源的設計參數，代表電流的上升斜率，單位為 $A/\mu s$ 。本實驗採用等能量機器，隨各種加工狀況，產生不同的放電頻率，若假設放電頻率為 Fq ，則放電功率 W 可以表示為

$$W = Fq \times \Delta E = Fq \times K \times V_D \times T_{on}^2 \quad (2)$$

本研究中所採用的機器，其加工參數的設定，在放電時間方面包括正常放電時間 T_{on} 與電弧放電時間 A_{on} ，放電休止時間方面包括正常放電休止時間 T_{off} 與電弧放電休止時間 A_{off} ，其他尚有伺服電壓 S_s 、線速度 W_s 以及沖水壓力 F_w 。在實際加工過程中，不是每一發均為正常放電，有些是不正常放電包括電弧放電與短路。若 r 表示不正常放電佔全部放電的比例即不正常放電比，根據實驗結果電弧放電普遍約佔不正常放電次數的一半，短路沒有提供能量，因此實際上電源提供之放電功率 W' 可以表示為

$$W' = V_D \times K \times Fq \times (T_{on}^2 \times (1-r) + A_{on}^2 \times (r/2)) \quad (3)$$

電源提供之能量一部分用於工件之去除，一部分

分佈在線極，另一部分散在加工液，因此實際能到達工件處，有效移除工件的能量只佔總能量的一部分，其大小與加工參數及電極與工件材料之組合有關，定義實際有效移除工件的能量佔總能量的比例為放電效率 η ，因此有效放電功率 (Effective Discharge Power, W'') 為

$$W'' = \frac{T_{on} K}{T_{on} K} W' \times \eta \quad (4)$$

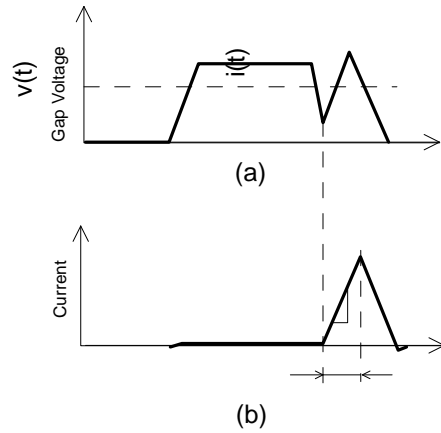


圖 1 典型的放電波形示意圖：(a)電壓；(b)電流

Fig. 1 Typical wave form of a single discharge (a) voltage; (b) current

放電效率的大小與加工參數及機器狀態有關，有效放電功率值隨著加工狀況會有很大的變動，且無法觀察出特定之趨勢。考慮加工過程中去除單位材料體積所需之能量定義為比放電能 (Specific Discharge Energy, u_0)。 u_0 可以表示為

$$u_0 = \frac{V_D \times K \times Fq \times (T_{on}^2 \times (1-r) + A_{on}^2 \times (r/2)) \times \eta}{G \times H \times F} \quad (5)$$

其中 G 為加工溝槽寬， H 為工件厚度， F 為加工速度。將(5)式移項可得

$$H \times F = \left(\frac{V_D \times K \times (T_{on}^2 \times (1-r) + A_{on}^2 \times (r/2)) \times \eta}{u_0 \times G} \right) \times Fq \quad (6)$$

若令

$$\gamma = \left(\frac{V_D \times K \times (T_{on}^2 \times (1-r) + A_{on}^2 \times (r/2)) \times \eta}{u_0 \times G} \right) \quad (7)$$

則(6)式可寫成

$$H \times F = \gamma \times Fq \quad (8)$$

其中 γ 稱為厚度鑑別係數 (Thickness Identification Coefficient)，此式與 Rajurkar 所引用的式子相似 [10]，但式中定義係數的特性則不相同，Rajurkar 式中係數為放電頻率的函數，而本文利用比放電能的觀念，定義厚度鑑別係數，使厚度鑑別係數與加工參數、加工特性及材料性質有明確的定量關係，且由式中可知，厚度鑑別係數相當複雜與放電時間、電弧放電時間、比放電能、放電效率、加工溝槽寬、不正常放電比有關，其中放電效率、加工溝槽寬無法在線上量測，因此將所有影響的因素綜合以厚度鑑別係數 γ 來表示。影響厚度鑑別係數的因素中屬於材料性質的為比放電能，屬於加工參數的為加工能量（放電時間、電弧放電時間），屬於加工特性的為加工溝槽寬、放電效率、不正常放電比。不同材料有不同的比放電能 u_0 ，由(7)式可以看出 γ 為一隨材料而異的係數，但(7)式中含有加工特性，因此工件材料變化時會使得加工特性變化，不同材料的 γ 值不是只經比放電能修正後即可得到，還要考慮加工特性的變化來加以修正。當工件厚度變化時，亦會使得加工特性變化，影響厚度鑑別係數。因為厚度鑑別係數無法在厚度估測出之前進行修正，因此先使用固定厚度鑑別係數進行線上厚度估測，再依估測出之厚度乘上一修正因子進行修正。加工時若使用不同材料與線徑的線極，會影響放電效率 η 、加工溝槽寬、不正常放電比等加工特性，因此使用不同材料與線徑的線極加工時，通常乘一係數修正即可。

將(8)式兩邊乘取樣時間 Δt 則

$$H \times F \times \Delta t = \gamma \times Fq \times \Delta t \quad (9)$$

或者
$$H \times \Delta S = \gamma \times \Delta N \quad (10)$$

其中 ΔS 與 ΔN 分別為在取樣時間 Δt 內工件與線極間的相對進給量與放電次數。從(10)式可得

$$H = \gamma \times \frac{\Delta N}{\Delta S} \quad (11)$$

參考 Rajurkar 和 Wang 所提之模式 [12]，加工過程中 ΔS 與 ΔN 的關係，可以線性一階分離模式 (Linear First Order Discrete Model) 來表示，在任何瞬間 k ，可以表示為

$$\Delta S(k) = \beta \times \Delta N(k) + \varepsilon(k) \quad (12)$$

其中 $\varepsilon(k)$ 為線切割放電加工過程的雜訊， β 為 ΔN 轉換為 ΔS 的增益。若 $\hat{\beta}$ 為 β 的估測值，則 $\hat{\beta}$ 可藉由下式之快速最小平方投影演算法 (Fast Least-squares Projection Algorithm) 進行線上估測 [10]

$$\hat{\beta}(k) = \hat{\beta}(k-1) + \frac{(1-\lambda)(\Delta N(k) + 0.4)}{10^{-7} + (\Delta N(k))^2} (\Delta S(k) - \Delta N(k) \hat{\beta}(k-1)) \quad (13)$$

其中參數 λ 為遺忘因子 (Forgetting Factor)，其值的大小，決定當加工過程工件厚度變化時，鑑別 β 的反應速度與穩定性，要獲得較快反應速度與較平滑的厚度預測，需採用可變遺忘因子 [10]，當工件厚度變化不大時， λ 逼近於 0.999，可以獲得平滑的厚度預測，但當工件厚度變化大時，鑑別誤差增加，則需減小遺忘因子，以增加系統反應的速度。依據(11)與(12)式厚度可利用下式加以估測

$$\tilde{H} = \gamma \times \frac{1}{\beta} \quad (14)$$

欲利用上式線上估測厚度，尚須事先曉得式中之厚度鑑別係數 γ ，求法上可先選定固定的材料與加工參數，在已知工件厚度的情形下加工，依(13)式求得 $\hat{\beta}$ ，再利用(14)式反推求得。然而工件厚度變化會影響加工溝槽寬與不正常放電比，因此厚度鑑別係數亦會隨著厚度變化而變化，而厚度鑑別係數無法在厚度估測出之前進行修正，因此在估測前必須先實驗找出各厚度的厚度鑑別係數 γ ，估測時再利用疊代的方式直至收斂以估測出工件的厚度，但在實用上僅須使用固定厚度的厚度鑑別係數進行估測，在估測出厚度後乘上一修正因子 (Correction Factor, C.F.) 加以修正即能獲得正確的工件厚度，如此較為簡單方便且快速，至於修正因子的求法將在後面討論。

至此整個線上厚度估測的數學模式已經建立完成，參考圖 2 為工件厚度估測系統的架構，系統主要分為三部分，分別為資料庫、線切割放電加工機的間隙電壓伺服控制系統、工件厚度估測，在加工前選定工件材料、線極的線徑與材料、加工能量（正常放電時間、電弧放電時間），則厚度鑑別係數可由資料庫中獲得，接著依前述工件厚度估測理論，進行線上工件厚度估測，將所估測厚度 \tilde{H} 乘上一修正因子即可獲得正確的工件厚度 \hat{H} 。

3. 實驗驗證

3.1 實驗設備

實驗採用的機台是由慶鴻公司生產的 CW430F 型沖水式機種，主機配備等能量放電波形電源供應系統，產生尖峰電流斜率 450A/ μ s 之等斜率三角波，平均工作電壓為 80V，加工參數可由控制面板調整。

線電極採用直徑 0.25mm 之六四黃銅線，含銅 (Cu) 60%、鋅 (Zn) 40%，抗拉強度 95 ~ 105kgf/mm²，導電率 23 ~ 24%，熔點 930°C。工件採用 SKD11 冷作模具用合金工具鋼，加工時採用 G95 模式，即以間隙電壓為伺服，加工時要給定伺服電壓。

如圖 3 所示，本實驗利用 PC 中之 AX5216 計數卡擷取每單位時間 Δt (ms) 之放電次數 ΔN ，取樣時間的範圍一般設為 20 ~ 1000ms，瞬間放電頻率可由 $\Delta N / \Delta t$ (KHz) 計算而得。CNC 單元內有一介面電路經

由 PC 介面卡 RS-485 達成 PC 與 CNC 間的資料傳輸，放電加工機中之運動控制模組和放電參數控制模組所有可控制參數，均可即時由 PC 監視與複寫。加工過程，加工速度 (F) 從 CNC 單元傳輸至 PC，位移量 ΔS (mm) 可經由加工速度乘上取樣時間，即 $F \times \Delta t$ 得到，同時 PC 經由 AX5216 計數卡讀取取樣時間內的放電次數 ΔN ，工件厚度鑑別系統即利用 ΔN 與 ΔS 數據，進行線上工件厚度鑑別。

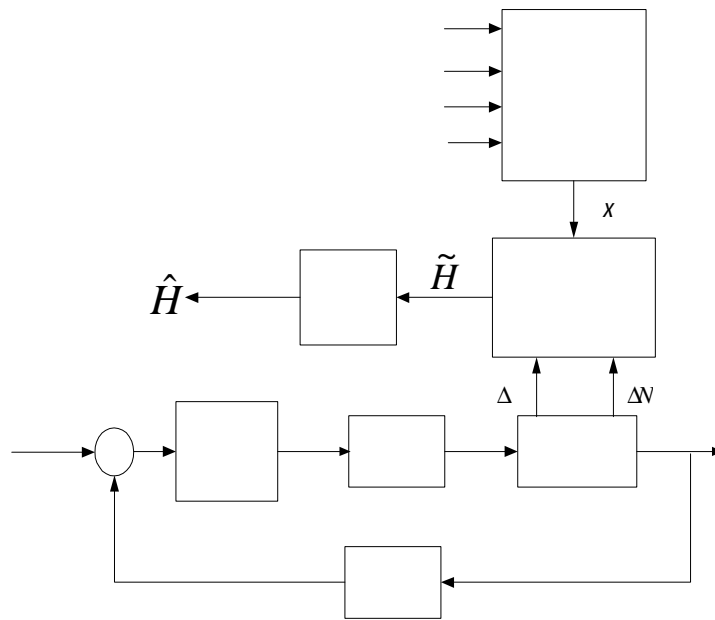


圖 2 線切割放電加工厚度估測系統架構圖

Fig. 2 Structure of the WEDM of workpiece height identification for system

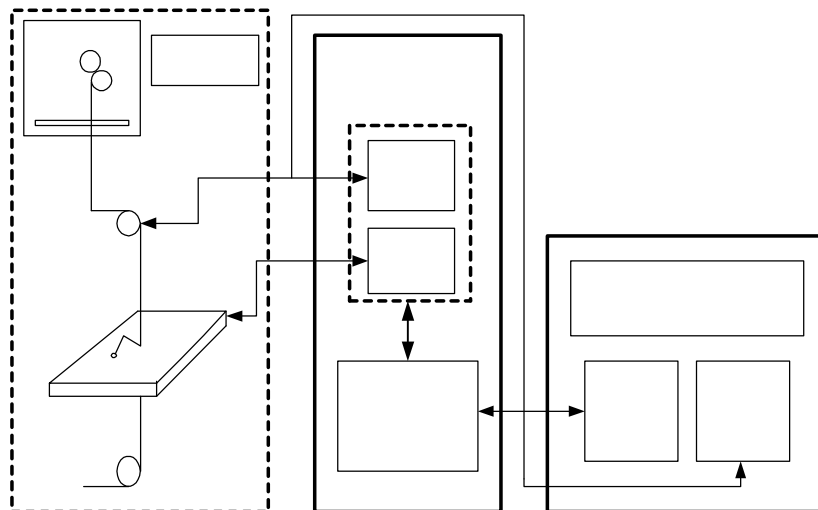


圖 3 線切割放電加工控制系統硬體架構

Fig. 3 The hardware setup of WEDM control system

3.2 修正因子

厚度鑑別係數會隨厚度變化而變化，而厚度鑑別係數無法在厚度估測出之前進行修正，因此在估測出厚度後要乘上一修正因子進行修正才能獲得正確的工件厚度。本文採用之方法為選用最薄厚度 (10mm) 的厚度鑑別係數進行線上厚度估測。首先在已知工件厚度 (10mm) 下，利用(14)式反推 10mm 的厚度鑑別係數，以此厚度鑑別係數進行線上厚度估測，線上估測厚度的範圍從 10mm 至 50mm，實際厚度與估測厚度的差異參考表 1，由於採用較薄工件厚度的厚度鑑別係數所估測的厚度會較實際為大，將實際厚度除以估測厚度，分別計算出各工件厚度的修正因子，將計算所得修正因子與估測出厚度 \tilde{H} 的關係利用迴歸分析可得 $C.F. = 3.84 \times 10^{-5} \tilde{H}^2 - 0.0047 \tilde{H} + 1.04438$ 表示，修正因子與迴歸模式的結果參考圖 4。

表 1 不同工件厚度之修正因子

Table 1 Correction factors for various workpiece height

實際厚度 (mm)	10	20	30	40	50	60
估測厚度 (mm)	10	20.7	32.1	44.1	55.3	66.5
修正因子 (C.F.)	1	0.965	0.936	0.907	0.904	0.902

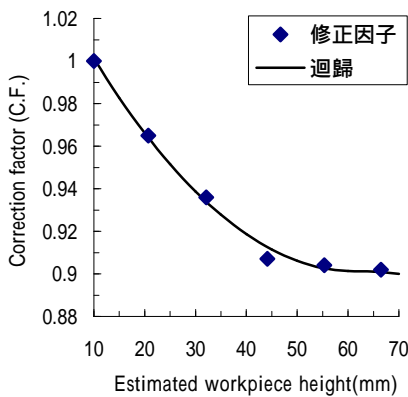


圖 4 修正因子與估測出厚度的關係

Fig. 4 Relationship between correction factor and estimated workpiece height

3.3 工件厚度線上估測

利用建構完成之厚度估測系統，進行工件厚度線上估測，採用 SKD11 加工成 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm 段差階梯形狀，四周再圍起壓克力板以模擬浸水式機台，加工過程中固定加工參數，線上記錄工件厚度突變時所估測的厚度、伺服電壓、放電頻率、進給率等數據。考慮工件厚度由厚變薄，線上記錄數據參考圖 5，而工件厚度由薄變厚，線上記錄數據參考圖 6，從此二圖中顯示估測出之工件厚度與實際工件輪廓相似，厚度估測的誤差在 1mm 以內，反應時間少於 1sec。由圖 6 可知當加工多個段差的工件，若沒有適應控制，當工件厚度由厚變薄時，伺服參考電壓根據最厚的部分設定，當加工至厚度 30mm 時會產生斷線，相反的由圖 5 可知工件厚度由薄變厚時，伺服參考電壓根據最薄的部分設定，雖然加工至較厚部分時仍不會斷線，參考圖 5，但要犧牲生產力，此時若能適當調低伺服參考電壓可以提高加工速度。因此在實際加工，加工過程中工件厚度呈現動態變化，沒有線上估測工件厚度適時調整加工參數，幾乎不可能完全避免加工不穩定與斷線。

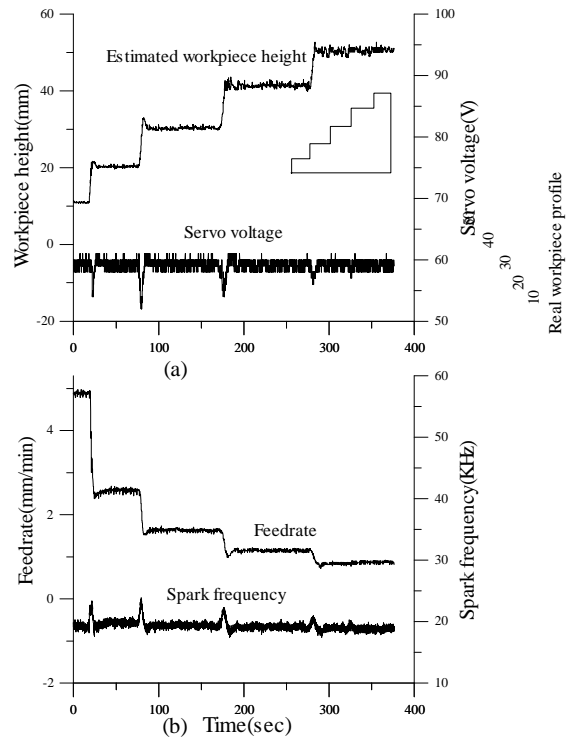


圖 5 (a)工件厚度由 10mm 階梯式變化至 50mm 加工時估測的工件厚度與對應的伺服電壓；(b)對應的進給率與放電頻率

Fig. 5 (a) Estimated workpiece height and the corresponding servo voltage; (b) feedrate and spark frequency when workpiece height changed stepwise from 10 to 50mm.

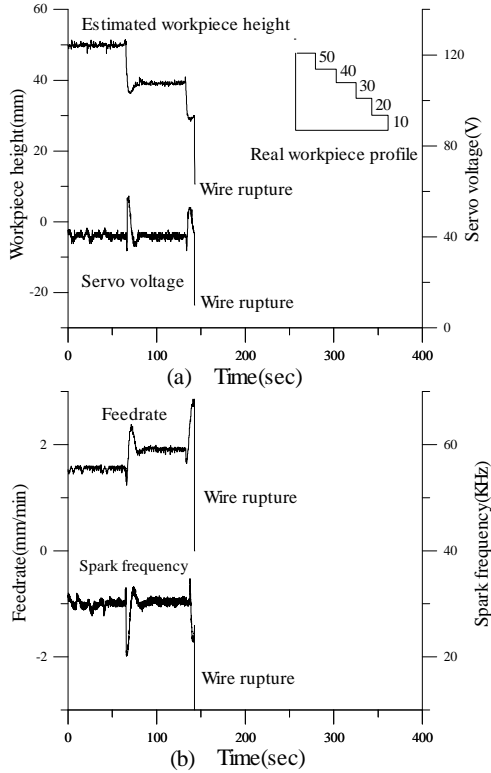


圖 6 (a)工件厚度由 50mm 階梯式變化至 10mm 加工時估測的工件厚度與對應的伺服電壓；(b) 對應的進給率與放電頻率

Fig. 6 (a) Estimated workpiece height and the corresponding servo voltage; (b) feedrate and spark frequency when workpiece height changed stepwise from 50 to 10 mm.

4. 影響厚度鑑別係數重要因子探討

根據上面的分析可知，欲準確估測工件厚度，要能掌握正確的厚度鑑別係數，本節是要找到影響厚度鑑別係數的重要因子，且要確認那些加工條件將來在線上調整會影響厚度鑑別係數，那些不會影響厚度鑑別係數。實驗的設計與流程規劃是以田口式實驗計畫法為基礎，考量實際加工情況，選用厚度、放電時間、放電休止時間、電弧放電時間、電弧休止時間、線速度、沖水壓力、伺服電壓為實驗控制因子，實驗要控制的因子共有八個，每個參數分為大、中、小三個水準，實驗量之大實非成本與時間所能允許，故採用田口式品質設計實驗計畫法中的 L18 混合型直交表，進行實驗。其他參數固定如下：(1) 線極張力固定在 900gf 左右 (2) 加工液導電度在 30μS/cm，超過則強迫進行離子交換 (3) 採負極性接法，電極為負極，工件為正極。實驗各因素的水準設定如表 2 所示，工件採用 SKD11。實驗中分別記錄不正常放電比、加工溝

槽寬、加工速度、表面粗糙度與總放電頻率，並計算厚度鑑別係數。接著利用信號雜訊比 (S/N)、變異數分析及 F 檢定 [13]，找到影響厚度鑑別係數重要的因子，以確定未來段差加工適應控制模組與斷線抑制模組，線上可以調整的加工條件。

表 2 實驗的因子與其水準別設定
Table 2 Factors and their settings in the experiment

因子 Factor	水準值			單位 Unit
	1	2	3	
厚度 T	10	50		mm
放電時間 T_{on}	3	5	7	0.1μs (1 ~ 9 step)
放電休止時間 T_{off}	20	35	50	1μs (8 ~ 50 step)
電弧放電時間 A_{on}	2	3	4	0.1μs (1 ~ 5 step)
電弧休止時間 A_{off}	20	35	50	1μs (9 ~ 50 step)
伺服電壓 S_v	40	55	70	V (30 ~ 70V)
線速度 W_s	5	7	10	1 ~ 16m/min (0 ~ 15 step)
沖水壓力 F_w	3	5	7	0 ~ 20kg/cm ² (0 ~ 7 step)

實驗所得結果如表 3，從表中可發現放電休止時間、電弧休止時間、伺服電壓不會影響厚度鑑別係數，可做為將來線上調整加工條件選擇的參考，而影響厚度鑑別係數的主要因素為厚度、放電時間與電弧放電時間，放電時間與電弧放電時間兩者代表加工時的加工能量，即不同加工能量有不同的厚度鑑別係數，且正如預期，厚度亦會影響厚度鑑別係數，選定厚度 10mm 的冷作工具鋼 SKD11 在不同能量下加工，分別記錄其厚度鑑別係數，根據實驗結果可利用迴歸分析，建立冷作工具鋼 SKD11 厚度鑑別係數與放電時間、電弧放電時間的數學模式，其方式如下：

$$\gamma = X \beta + \epsilon \quad (15)$$

其中

γ ：厚度鑑別係數

X ：顯著要因所形成的函數型態

$$[X_1^2 \quad X_2^2 \quad X_1X_2 \quad X_1 \quad X_2 \quad 1]$$

若令

$$X_1 = \log(T_{on}) / \max(\log(T_{on}))$$

$$X_2 = \log(A_{on}) / \max(\log(A_{on}))$$

$$3 \leq T_{on} \leq 9 \quad 0.5 \leq X_1 \leq 1$$

$$1 \leq A_{on} \leq 5 \quad 0 \leq X_2 \leq 1$$

$$\gamma = 4.592X_1^2 + 2.016X_2^2 - 0.274X_1X_2 - 2.692X_1 - 1.28X_2 + 1.095 \quad (16)$$

只要選定冷作工具鋼 SKD11 與加工能量（放電時間、電弧放電時間）即可利用(16)式計算出厚度鑑別係數，再以前述之線上厚度估測系統即可於線上估測工件之厚度。

表 3 各因子對加工特性之影響
Table 3 Effects of factors on machining characteristics

加工特性	T	T_{on}	T_{off}	A_{on}	A_{off}	S_v	W_s	F_w
不正常放電比								
加工溝槽寬								
加工速度								
表面粗糙度								
總放電頻率								
厚度鑑別係數								

表最顯著因素 表顯著因素 表次顯著因素

5. 結 論

本文利用比放電能觀念，推導出厚度預測的數學模式，從模式中發現過去之研究中，將厚度鑑別係數視為常數或僅為放電頻率的函數，應只適用於估測厚度變化不大的加工狀況。文中提出一厚度鑑別係數的修正方法，經由實驗證明可以線上準確預測工件厚度，其厚度估測的誤差在 1mm 以內，反應時間一般在 1sec 以內。未來在加工工件厚度動態變化之工件時，可以根據線上估測厚度控制伺服參考電壓在一最佳值，使加工穩定，避免斷線並提高加工速度，此研究目前正進行中。

符號說明

$v(\tau)$	放電瞬間電壓
$i(\tau)$	放電瞬間電流
K	電流上升斜率
V_D	平均工作電壓
Fq	放電頻率
W	放電功率
T_{on}	正常放電時間

A_{on}	電弧放電時間
r	不正常放電比
W'	實際電源提供之放電效率
η	放電效率
W''	有效放電效率
u_0	比放電能
G	加工溝槽寬
H	工件厚度
F	加工速度
γ	厚度鑑別係數
Δt	取樣時間
ΔS	取樣時間內相對進給量
ΔN	取樣時間內放電次數
β	轉換增益
$\varepsilon(k)$	加工過程雜訊
$\hat{\beta}$	β 的估測值
λ	遺忘因子
\tilde{H}	修正前工件厚度的估測值
\hat{H}	修正後的工件厚度
T	工件厚度
S_v	伺服電壓
V_s	伺服電壓參考值
W_s	線速度
F_w	沖水壓力
T_{off}	放電休止符時間
A_{off}	電弧休止符時間

參考文獻

- [1] H. Watanabe, T. Sato and I. Suzuki, "WEDM monitoring with a statistical pulse-classification method," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, 1990, pp. 175-178.
- [2] M. Weck and J. M. Dehmer, "Analysis and adaptive control of EDM sinking process using the ignition delay time and fall time as parameter," *Annals of the CIRP*, Vol. 24/1, 1992, pp. 243-246.
- [3] D. Dauw and I. Beltrami, "High precision wire-EDM by on-line wire positioning control," *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, 1994, pp. 193-196.
- [4] W. Dekeyser, R. Snoey and M. Jennes, "A thermal model to investigate the wire rupture phenomenon for improving performance in EDM wire cutting,"

- J. of Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 2, 1985, pp. 179–190.
- [5] N. Kinoshita, M. Fukui and G. Gamo, “Control of wire-EDM preventing electrode from breaking,” *Annals of the CIRP*, Vol. 31, No. 1, 1982, pp. 111–114.
- [6] T. Tanimura, C. J. Heuvelmn, “The properties of the servo sensor with wire spark-erosion machining,” *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, 1977.
- [7] K. P. Rajurkar and W. M. Wang, “On-line monitor and control for wire breakage in WEDM,” *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, 1991, pp. 219–222.
- [8] Y. Ishibashi and A. Komori, “Wire electric discharge machine having alterable discharge period,” U.S. Patent No. 5,362,936, 1994.
- [9] H. Obara, “Wire-cut electric discharge machine,” U.S. Patent No. 4,510,367, 1985.
- [10] K. P. Rajurkar, W. M. Wang and J. A. McGeough, “WEDM identification and adaptive control for variable-height components,” *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, 1994, pp. 199–202.
- [11] W. M. Wang and K. P. Rajurkar, “Adaptive control of WEDM by on-line identifying workpiece height,” *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. XXI, 1994, pp. 73–78.
- [12] K. P. Rajurkar, W. M. Wang and W. S. Zhao, “WEDM-adaptive control with a multiple input model for identification of workpiece height,” *Annals of the CIRP*, Vol. 46/1, 1997, pp. 147–150.
- [13] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill Publishing Company, 1989.



廖運炫 (Yunn-Shiuan Liao) 國立台灣大學機械工程學系教授，生於民國 40 年，民國 69 年獲得美國 Wisconsin-Madison 大學機械博士。專長於放電加工、難切削材料加工、工具機的動態分析與控制。



余永平 (Young-Ping Yu) 民國 49 年生，民國 73 年畢業於台灣大學機械研究所碩士班，目前為台灣大學機械研究所博士班學生，亦為華夏工商專校機械科講師。