

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

精密線切割放電加工之研究(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-079-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：廖運炫

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 12 月 14 日

精密線切割放電加工之研究(1/3)

Research on the precision wire electrical discharge machining (1/3)

計畫編號：NSC 92-2212-E-002-079

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：廖運炫 台灣大學機械系教授

一、中、英文摘要

線切割放電加工是一廣用於精密加工與模具業之製程。過去有關線切割放電加工之研究主要在於加工速度的提升，精度的改善則多集中於轉角精度的控制研究，對於加工後工件之另一形狀精度 - 鼓形量方面，則研究報告甚少。本研究計畫全程之目的在於提出減少鼓形量之策略，以改善加工精度。本報告為第一年之進度報告，目的在於探討鼓形量誤差之成因，並提出初步的改進方案。本年度的主要工作為建立研究環境，研製線上偵測放電點位置分佈電路，建立放電點分佈的量測系統，以探討放電點分佈與鼓形量之關係。另外，亦進行線極振動的分析，以釐清線極振動對鼓形量之影響。從實驗結果發現鼓形量與放電點分佈成正相關關係，其形成主要係因衝水未配合良好引起；增加進給速率或減少放電休止時間可以讓放電點分佈較為均勻，使得鼓形量減少。從振動的頻譜，亦發現粗加工中的銅線在側向上的振動並沒有特定之振動基頻，所以振動並不會造成特定形狀之鼓形誤差。

關鍵字：放電加工、放電點、鼓形量、線振動。

Abstract

Wire electrical discharge machining (Wire-EDM) has been applied widely in precision machining and die and mold industry. The past researches of Wire-EDM are mainly on the improvement of machining speed. Regarding the machining accuracy, the studies are mainly focus on corner accuracy control strategy, and there is very few report on the drum shape accuracy. The whole purpose of this three years' project is to understand comprehensively the causes of drum shape error, and to develop appropriate strategy to increase straightness accuracy accordingly. This is the progress report of the first year's project. The purpose is to find out the reason why the drum shape machined workpiece is formed, and the factors that would affect its magnitude. A discharge location detection system is designed and implemented. The relationship between the distribution of discharge locations and the drum shape error is investigated. The effect of the vibration of wire on drum shape error is studied. The experimental results show that the drum shape machined workpiece is formed mainly due to not uniform flush of the dielectric. There is positive relationship of the location distribution of discharge with drum shape error. A higher table feed and a smaller discharge off time lead to less drum shape error. It is also found from the spectrum of wire vibration that there is no specific apparent frequency, and hence it is concluded that

the drum shape error is not the result of wire vibration as proposed by other studies.

Keyword: Wire-EDM, discharge location, drum shape error, wire vibration

二、計劃緣由與目的

放電加工技術為目前非傳統加工中最受國內業者普遍應用的一種加工方式，線切割放電加工更廣受模具加工業者採用，主要原因是模具加工業中產品的大小與形狀會影響所設計模具的厚度，因此經常需要加工厚度較厚的板材。但一旦厚度加大，同時也增加沖水清潔的困難，斷線機率與惡化的情形也會增加。另一方面在精度的要求上，加工後模具側腹的鼓形問題嚴重影響工件精度及使用壽命，一般研究粗切時多半未深入探究工件厚度方向的真直度，雖然鼓形問題可以藉著往後的多次切削細修而減少，但顯然遺留的鼓形量愈大，則所需的細修加工愈困難與耗時，因此本計畫的主要目的是探討如何在粗加工時減少鼓形量之下進行的研究。

放電加工時，絕緣破壞一旦發生則會形成電漿通道，使得電流通較其他地方更為容易，因此電極與工件放電發生的位置，瞬間只會在一點產生。如此不斷的重複放電，便可持續切割工件。放電點的位置分布，關係到放電加工過程狀況的好壞，於是 Kaneko 等人[1]提出放電點位置量測的方法，而放電點的分佈均勻與否直接會影響鼓形量的大小與分佈。Obara[2]在單發放電力與單發放電金屬移除率的研究中設計一種直接量測工件腹中撓曲量的方法，可以得到撓曲量大小並且直接會影響形狀精度與鼓形大小，最後推導單發放電力的分析模式。該撓曲量與放電力的分析模式限於在精修中切削直線路徑的狀況，因此粗加工中的行為是否相同有必要進一步探究。線極振動方面的研究上，Dauw [3-4]是較早提出線極振動的基礎研究與應用者，其主要結論為由頻譜圖發見線振動的能量並非集中在振動基頻(fundamental vibration mode)，加工液對線振動具有阻尼特性可有效地衰減振幅，但是其量測的方式採用光學感測器，應用範圍在精加工上否則無法量測，無法推測粗加工中振動對鼓形的影響。Yamada[5]希望藉由分析振動、線位移及各基本模態，以統計分析線振動的基本特性(針對 1mm 厚的薄板)以提高加工精度。主要結論為對抑制線振動而言，從作用力到線位移響應的相位落後(phase-lag)嚴重地影響線位移，在隨機的切削動態下，線位移呈常態分佈，研究中忽略阻尼的影響並不符合實際粗加工時的情形。Lee[6]主要探討線振動對切削動態及對加工穩定性的影響，另有探討加入超音波振盪

對改善異常放電的貢獻。結論是沿進給方向的線振動較激烈，沿側向則受切槽限制而較小；提高線張力，縮短跨距，則振幅縮小，線振動頻率提高。Kunieda [7]於2002年也發表振動靜電力與對工件成形影響的模擬，結論為利用放電點搜尋算則模擬驗證靜電力與放電力所導致線共振，因而破壞工件面精度，第三振動模態的振型將複製到工件加工面。

尤以上的研究看來必須深入研究探討粗加工中造成鼓形的原因。振動對鼓形的影響以及改善鼓形量大小方法，本研究第一年將實際建構放電點偵測設備，建立一套可以線上即時偵測放電點分佈的儀器以量測分析放電點分佈與鼓形之關係，也可以得到加工條件對鼓形量的影響，並利用微動力計等設備嘗試分析振動是否是影響鼓形之主因。

三、實驗設備之建構

實驗根據放電點位置量測原理，設計與製作一量測系統（圖1）。系統分為前置電路與微處理器電路兩部份，其中前置電路包含電流波形處理電路、類比數位轉換電路與比較器電路。可以將放電波形之電流類比訊號轉換為數位訊號，提供數位電路處理波形資料，而數位電路內含 25k 的記憶體，用以記錄每發放電的上下分電流差值，並能由 PC 透過 RS-232 進行通訊，存取資料執行放電點位置分佈分析。於實際放電加工時，可利用 Tektronix 電流探針量測線極之上下兩分電流，並透過 Tektronix 電流轉換器，將電流訊號轉換成電壓訊號，以作為前置電路的輸入訊號。前置電路中的電流波形處理電路，是將所量測的上下兩分電流轉換成電壓輸入訊號，加以相加放大及相減放大，處理後的電流和訊號與電流差訊號，分別送至比較器電路與類比數位轉換電路。放電點位置偵測系統的另一部分為微處理器電路，此電路將前置電路送來的訊號加以處理並儲存，可連續量測每發放電訊號（每發間隔時間可以小至 8 μs 左右）並加以儲存。

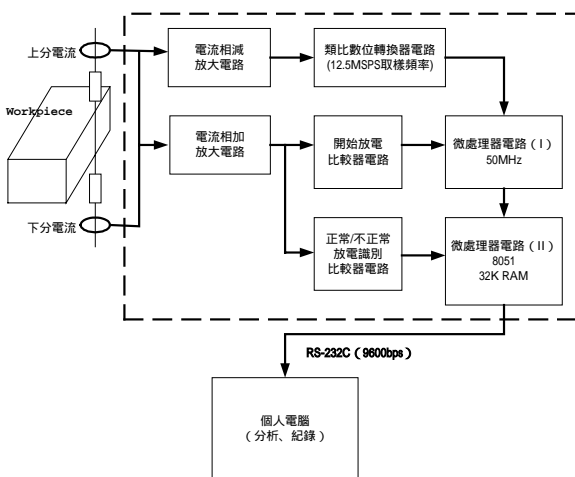


圖 1 放電點位置偵測系統示意圖

線振動量測實驗部分是使用 KISTLER 微動力計（Type9256B1）針對放電加工機加工時進行力量訊號量測，微動力計可以量測力量範圍為 0 250 N，透過

AD/DA 卡以及 KISTLER 放大器 (Type5019) 將處理過的訊號傳入 PC，其主要功能為透過軟體讀取放大器傳送之訊號等資料，透過運算並將其轉換為對應之力量大小，最後存成所需之資料檔。過程中實驗量測方式以取樣頻率為 50KHz，取樣樣本數為 100000 筆資料進行比較分析，量測資料經過傅立葉轉換可以由時域 (time domain) 轉換為頻域 (frequency domain) 而得到頻譜分佈。實驗並利用 CCD 照像及影像擷取裝置可對放電前端去除情形情況作分析，藉由以上各項實驗設備的建構，建立精密放電加工基礎性研究設備。

四、放電點位置偵測系統

本實驗根據放電點位置量測原理，設計與製作一量測系統，並實際進行實驗以觀察放電點分佈的情形。並進行實驗觀察加工參數對放電點位置分佈的影響。

4-1. 進給速率對放電點位置分佈的影響

改變進給速率以觀察其對放電點位置分佈的影響，結果如圖 2 所示。由圖可知，當進給速率越大時，線極對工件各個位置的放電越均勻；反之，進給速率越小時，放電點位置的分佈越不均勻。正常放電的放電位置分佈隨進給速率而變，進給速率小時，處於工件中間位置的放電次數較上下兩側多，而進給速率越大時，工件各個位置的放電次數均差不多。

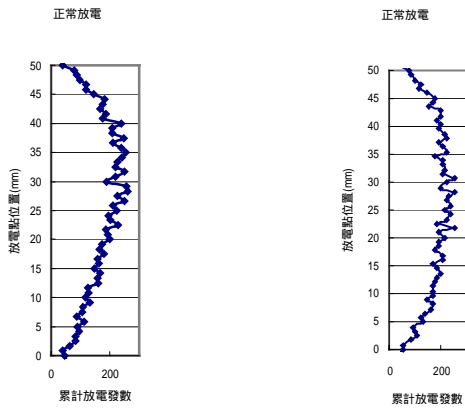
分析其原因，可能是進給速率較慢時，線極於同一位置停留時間較久，使得加工方向兩側壁上的放電次數較多；反之，進給速率快時，來不及對加工方向兩側放電便移動到新的位置，因此中間放電次數多的情況較不顯著。因此要使鼓形量減少應該使進給速率加大，各個位置的放電點分佈會越均勻較不易使中間部分放電次數增加而形成鼓形。

4-2 放電休止時間對放電點位置分佈的影響

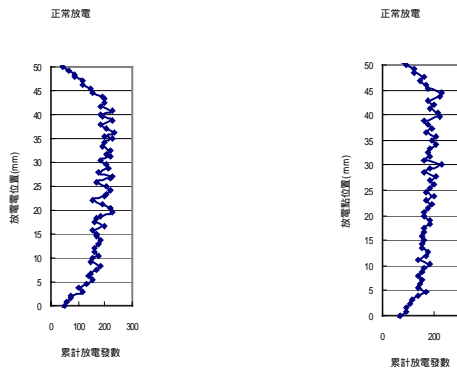
改變正常放電休止時間，以觀察其對放電點位置分佈的影響，結果發現放電位置分佈並不隨正常放電休止時間而變，處於工件中間位置的放電次數均較上下兩側多。正常放電休止時間越大時，處於工件中間偏上位置的放電次數較上下兩側多，而正常放電休止時間越小時，工件各個位置的放電次數均差不多顯的很均勻，因此以減少鼓形著眼要使正常放電休止時間越小，則放電點分佈愈均勻鼓形量愈小。

4-1.3 水壓對放電點位置分佈的影響

改變水壓對放電點位置分佈的影響，實驗結果如圖 3 所示，當下水壓較大時，偏下端位置的放電次數較少；下水壓較小時，放電點位置分佈明顯較往下偏移，也就是說，下端位置的放電次數增多了，而且無論是正常放電或不正常放電位置分佈圖的趨勢均相同。因此，發現鼓形量的成因主要與衝水水壓有關，放電的同時位於工件之中央部分因為衝水排渣較為困難，加工後之殘渣較難清除因而使得此區域中水的比電阻值與上下兩端相比在中間部分較低，因而容易產生放電而形成鼓形。

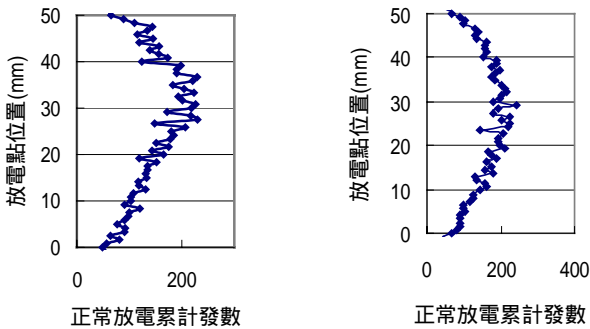


(a) 進給速率 0.4mm/min (b) 進給速率 0.6mm/min



(c) 進給速率 0.8mm/min (d) 進給速率 1.0mm/min

圖 2 進給速率對放電點位置分佈之影響



(a) 下水壓較大時 (上水壓 6.5, 下水壓 8), G94 (b) 下水壓較小時 (上水壓 8, 下水壓 6.5), G94

圖 3 水壓對放電點位置分佈之影響

4-2 放電點位置分佈與工件形狀精度的關係

由前文討論可知，進給速率、放電休止時間、水壓等加工參數，對於放電點位置分佈的確會有影響。本文嘗試以加工後之形狀精度，來探討其與放電點位置分佈的關係。

一般線切割放電加工於直線粗加工時，影響工件精度的原因為：腹部鼓形及槽寬變化，若將放電能量(放電時間)加以固定，於是槽寬固定，則腹部鼓形誤差即為主要加工誤差的原因。以前學者的看法通常認為線極

振動是造成工件鼓形誤差的原因，而放電負荷與線極張力將影響線極振動。實驗發現，進給率越快則鼓形量越小，進給率提高時左右振動的線極尚未於工件側腹部有效地挖深便已近入下一新位置，因此進給率越快則鼓形量越小。另一影響工件鼓形誤差的原因是加工液比電阻值過低。由於工件腹部的殘渣較多，容易形成二次放電使腹部的金屬移除量增加，然而此項因素屬於局部微觀現象。綜合上文所述，以下實驗結果，將討論放電點位置分佈與工件腹部形誤差的關係。

實驗結果如圖 4 所示，為進給速率較慢，且放電休止時間較大時，量測得到的放電點位置分佈，及工件形狀精度圖。由於切割工件的主要是正常放電，因此選擇正常放電的位置分佈狀況，作為觀察的對象。圖(a)的放電點位置分佈較不均勻，位置中間放電的發數較多，而由實際量測工件腹部鼓形量的結果，其值達到 30 ~ 40 μ m。圖(b)的放電點位置分佈較為均勻，而由實際量測工件腹部鼓形量的結果，其值均不超過 10 μ m。由此可知，若放電點位置分佈不均勻，將會造成較大的工件鼓形量，反之則鼓形量較少。(圖(a)加工參數為進給速率 0.2mm/min，放電休止時間均為 50 μ s，線張力為 600gf，線速度 3m/min，水壓 5kg/cm²，G94，工件厚度 50mm；圖(b)加工參數為進給速率 1.4mm/min，放電休止時間均為 20 μ s，線張力為 1000gf，線速度 6m/min，水壓 5 kg/cm²，G94，工件厚度 50mm。)

由以上結果發現放電點分佈可以清楚對應鼓形之真實形狀，以及加工條件會改變鼓形量之大小，例如適當的加大進給速率減少放電休止時間配合適當的衝水壓力、張力等相關條件可以減少鼓形量的大小，因此有必要進行後續之研究。

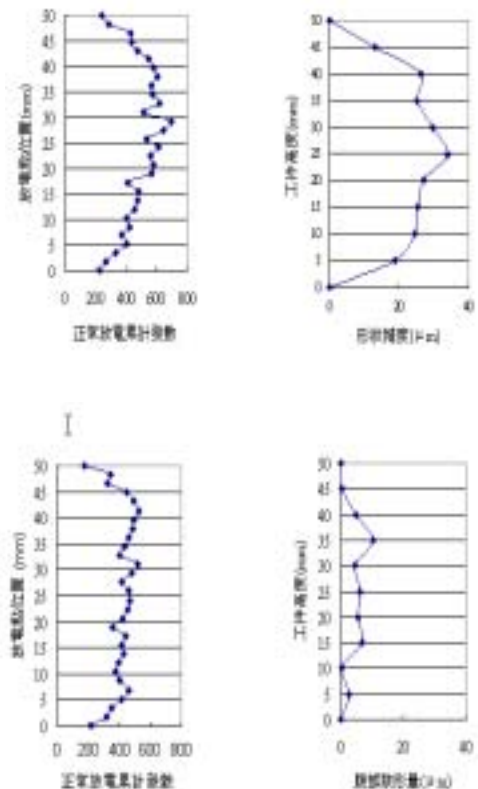


圖 4 放電點位置分佈與工件腹部鼓形的關係

五、粗加工中線振動對鼓形量影響的探討

如果粗加工進行中的銅線由於振動關係而使銅線中段較靠近工件兩側形成放電，並且因而造成工件的鼓形，量測銅線在工件兩側之放電將可以得到銅線之振動頻率。如果振動因此而造成鼓形，則設計量測實驗將可以得到固定之振動基頻，或是可以觀察到如上所述之細繩、簡支樑等之振動頻率，本實驗利用微動力計量測銅線因振動在工件兩側所產生放電的頻率，實驗中是採用工研院研發之線切割放電加工機，線極採用直徑 0.25mm 之黃銅線，其成分如下：銅(Cu)60%，鋅(Zn)40%，抗拉強度 95~105Kgf/mm²，導電率 23~24%，熔點 930。加工材料使用模具鋼 (SKD11)，工件之厚度為 50mm。因為放電頻率如果以 20 KHz 計算則取樣頻率至少應為 2 倍，因此實驗取樣頻率訂為 50KHz，總樣本數為 100000 筆，將取得之資料經過傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform FFT) 可以計算得到振動之頻率與頻譜分析。實驗結果如圖 5

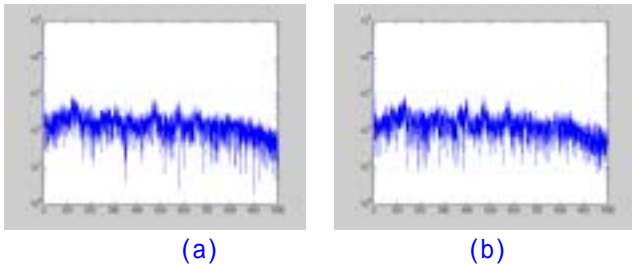


圖 5 加工時之頻譜圖

圖(a)加工參數為進給速率 0.4mm/min，放電時間為 0.5 μ s，放電休止時間均為 18 μ s，線張力為 1000gf，線速度 5 m/min，水壓 4kg/cm²，G94，工件厚度 50mm；圖(b)加工參數為進給速率 1.0mm/min，放電時間為 0.8 μ s，放電休止時間均為 16 μ s，線張力為 1100gf，線速度 5 m/min，水壓 5 kg/cm²，G94，工件厚度 50mm。

由結果觀察發現粗加工時的銅線在側向上並沒有明顯的振動基頻產生，也就是銅線在工件加工的側向上並沒有以特定的頻率振動，所以並不會造成如固定振動外型的鼓形誤差情況產生。

六、結論

1. 探討加工參數對 WEDM 放電點位置分佈的影響，實驗結果發現：

- 進給速率：當進給速率越大時，線極對工件各個位置的放電越均勻鼓形量小；反之，進給速率越小時，放電點位置的分佈越不均勻鼓形量較大。
- 正常放電休止時間：越大時，放電點位置的分佈越不均勻鼓形量較大；反之，正常放電休止時間越小時，放電點位置的分佈越均勻鼓形量小。
- 水壓的影響：當下水壓較大時，偏下端位置的放電次數較少，而下水壓較小時，放電點位置分佈明顯往下偏移，也就是說，下端位置的放電次數增多。由實驗結果發現衝水上下水壓相

等時，鼓形發生在厚度的中間部分，加大上衝水之水壓則發現鼓形位置隨著下移；同樣情形下衝水加大也會使鼓形位置隨著上移。因此可能發生的原因是中間部分因為清潔困難加工後的殘渣不易清除，容易造成放電情形發生而使工件中間部分放電多金屬去除較多。因此上下衝水改變則會改變鼓形發生的區域。

- 根據之前實驗的結果，利用放電點位置分佈偵測系統進行實驗，結果發現放電點位置分佈與工件腹部鼓形量確實存在對應關係。要使工件有較小的鼓形量，即放電點位置分佈要均勻，則要有較大的進給速率、較小的正常放電休止時間適當的衝水壓力、張力、送線速度等條件之配合則可以得到較均勻的放電，而會有較小的鼓形量。
- 由實驗之結果發現粗加工時的銅線在側向並沒有明顯的振動基頻產生，也就是銅線在側向並沒有以特定的頻率振動，所以振動並不是造成固定振動外型的鼓形誤差的主要原因，其原因是振動受到衝水高壓產生的阻尼影響，不像精加工時水的阻尼影響較小而使振動造成明顯的影響。

七、參考文獻

- [1] Kaneko, Y. and Nishimura, H., "Wire Cut Electrical Discharge Machining Apparatus," U.S. Patent No. 5,306,889, 1994.
- [2] Obara, H., Makino, Y., and Ohsumi, T., "Single Discharging Force and Single Discharging Volume of Wire EDM", Proc. of the 11th Int. Symp. for ElectroMachining (ISEM-11), Switzerland, pp.85-93, (1995).
- [3] Dauw, D.F., Sthioul, H., Delpretti and Tricarico, C., "Wire Analysis and Control for Precision EDM Cutting", Annals of the CIRP, 38(1), pp.191-194, (1989).
- [4] Sthioul, H., Delpretti, R., Tricarico, C., Dauw, D.F., "Improvement of the Wire EDM Cutting Precision by Vibration Analysis and Control", Proc. of the 9th Int. Symp. for ElectroMachining (ISEM-9), Nagoya Japan pp.214-218, (1989).
- [5] Yamada, H., Mohri, N., Saito, N. and Furutani, K., "Modal Analysis of Wire Electrode Vibration in Wire-EDM", Int. J. Electrical Machining, 2, pp.19-24, (1997).
- [6] Lee, T.C., Yue, T.M. and Lau, W.S., "The Measurement and Analysis of the Wire Vibration in Ultrasonic Aided Wire Cut Machining", Int. Conference on Precision Machining (ICPE'97), Taipei, Taiwan, pp.677-683, (1997).
- [7] Han, F., Kunieda, M., Sendai, T., Imai, Y., "High Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming", Annals of the CIRP, 2002(b).
- [8] Puri, A B., Bhattacharyya, B., "Modelling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM", Journal of Materials Processing Technology, 141, pp.295-301, (2003).