

放電銑削製程之研究 (3/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91 - 2212 - E - 002 - 050

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：廖運炫

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

中華民國九十二年八月一日

Abstract

ED milling is a process in which a plane or 3-D geometry is generated by a small size cylindrical electrode following specified paths resulting from a CAD/CAM system. Because of the simple shape of the electrode, ED-milling provides the most economic advantage where several electrodes would otherwise be needed to produce a part by traditional die-sinking EDM. In the experiments, 2D ED milling processes are conducted with the solid electrode and the tubular electrode respectively for comparing. The results show that the bottom edge of the solid electrode is more easily worn out than that of the tubular electrode. For the solid electrode, the deformation of edge brought about by the wearing-out effect is so severe that makes it very difficult to find adequate ways for compensation. On the other hand, the tubular electrode, incorporated with compensation in Z-axis, is able to guarantee a uniform depth along working paths on the work piece. As a result, it suggests that the tubular electrode would be more ideal for ED milling. The stable shape electrode using layer-by-layer machining with electrode wear compensation. The compensation value per machining length can be calculated by frontal electrode area, electrode section area and electrode wear ratio. The effects for distance of two machining paths on the machined surface, when the distance of two tool paths is greater than electrode inner diameter, some material is left unremoved resulting in the formation of scallops on the machined surface, which caused the longer time during finishing, usually the distance of two tool paths is smaller than electrode inner diameter, ensuring the machined surface is flat. On

the machining characteristics, the greater distance of two tool paths leads to the increase of metal removal rate, decrease of electrode wear ratio, surface roughness is not apparent difference, on the whole the greater distance of two tool paths is better. On the discharge pulses, the greater distance of two tool paths leads to the decrease of relative frequency of $T_d=0$ pulses, normal pulses average ignition delay duration and arc pulses ratio, increase of discharge frequency and normal pulses ratio, the short pulses ratio is under 1%.

目錄

中文摘要.....	一
英文摘要.....	二
目錄.....	四
圖目錄.....	六
表目錄.....	八
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 研究目的	6
1.4 本文結構	7
第二章 放電加工基本原理及相關理論	8
2.1 放電加工過程	8
2.2 放電能量的結構與分配	10
2.3 放電加工組成與加工特性	12
第三章 實驗設備與實驗規劃	18
3.1 實驗設備	18
3.2 實驗規劃	23
3.2.1 電極消耗補償策略之建立	23
3.2.2 加工路徑間距之決定	24
第四章 實驗結果與分析討論	26
4.1 建立電極消耗之補償策略	26
4.1.1 圓柱電極消耗模式	26
4.1.2 圓柱電極消耗與電極補償對加工可行性之探討	28
4.1.3 管狀電極消耗模式	30

4.1.4 管狀電極消耗與電極補償策略	32
4.2 決定適當之加工路徑間距	37
4.2.1 加工路徑間距對加工面之影響	38
4.2.2 加工路徑間距對加工特性之影響	39
4.2.3 加工路徑間距對放電波列之影響	41
第五章 結論與建議	44
參考文獻.....	46

圖目錄

圖 2.1 放電加工過程說明圖.....	10
圖 2.2 放電火花結構圖	11
圖 2.3 等頻率電晶體電壓及電流波形示意圖	13
圖 2.4 等能量電晶體電壓及電流波形示意	13
圖 2.5 正常放電、電弧放電、短路放電及開路波型示意圖	17
圖 3.1 放電訊號量測系統	21
圖 3.2 電極消耗觀察之加工路徑規劃	24
圖 3.3 工件表面輪廓之加工路徑規劃	24
圖 4.1 圓柱電極在各行程下電極消耗模式之連續圖	26
圖 4.2 使用 z 軸長度補償時，每 20mm 行程圓柱電極長度 消耗量	27
圖 4.3 使用 z 軸長度補償加工後 5mm 圓柱電極的穩定輪廓	27
圖 4.4 圓柱電極在未經任何補償工件表面實際加工情況	28
圖 4.5 圓柱電極加工工件表面沿 x 加工方向之輪廓變化	28
圖 4.6 圓柱電極配合長度補償，銑削加工結果模擬示意圖	29
圖 4.7 使用穩定電極輪廓加工後，工件表面在 x 方向輪廓 剖面圖	29
圖 4.8 管狀電極在各行程下電極消耗模式之連續圖	31
圖 4.9 使用 z 軸長度補償時，每 20mm 行程管狀電極長度 消耗量	32
圖 4.10 使用 z 軸長度補償加工後 5mm 管狀電極的穩定輪	32
圖 4.11 管狀電極在未經任何補償工件表面實際加工情況	33
圖 4.12 管狀電極加工工件表面沿 x 加工方向之輪廓變化	33
圖 4.13 管狀電極配合長度補償，銑削加工結果模擬示意圖	34

圖 4.14 管狀電極加工示意圖	35
圖 4.15 管狀電極在長度補償下，工件表面實際加工情況	36
圖 4.16 管狀電極補償後工件表面沿 x 方向之輪廓變化	36
圖 4.17 管狀電極補償後工件表面沿 y 方向之輪廓變化	37
圖 4.18 電極之穩定輪廓	37
圖 4.19 加工之路徑	38
圖 4.20 加工後溝槽的輪廓	38
圖 4.21 不當的加工路徑間距	39
圖 4.22 加工路徑的 overlap	39
圖 4.23 加工路徑間距 3.2mm 加工後的工件輪廓	39
圖 4.24 加工路徑間距對金屬去除率之影響	40
圖 4.25 加工路徑間距對電極消耗比之影響	40
圖 4.26 加工路徑間距對工件表面粗糙度之影響	41
圖 4.27 加工路徑間距對 $T_d=0$ 放電波比率之影響	41
圖 4.28 加工路徑間距對 T_d 分佈之影響	42
圖 4.29 加工路徑間距對 \bar{T}_d 之影響	42
圖 4.30 加工路徑間距對總放電頻率之影響	43
圖 4.31 加工路徑間距對各種波型之影響	43

表目錄

表 3.1 加工參數調整範圍	18
表 3.2 波型的分類	22
表 3.3 SKD61 模具鋼主要成份	22
表 3.4 圓柱與管狀電極加工參數	23

第一章 緒論

1.1 研究背景

由於工業的發展，合金或模具鋼等具有特殊機械性質的材料被廣泛的應用，需求日益增高，傳統的加工法無法滿足這些材料的加工，而必須使用非傳統的加工法來予以加工成型。

放電加工 (Electric Discharge Machining, EDM) 是一種有效的加工法，因為放電加工藉由電極放電火花 (discharge spark) 蒸發、熔融材料的原理，以放電火花產生的超高溫度 (約 10000°C) 與放電火花的力學作用 (火花衝擊壓力及爆炸力)，將熔融的渣屑噴濺至周遭的加工液中，達到去除材料的目的，所以放電加工可以用來加工任何高韌性、高強度、高硬度、高熔點的導電性材料，解決了傳統加工無法加工具有特殊機械性質材料的缺點。

傳統的放電加工方式，乃是利用 NC 銑床或加工中心製作成型電極作為刀具，再以此刀具對工件進行火花放電蝕刻，最後再經人工打磨拋光，終至完成成品，常用於對中、大型模穴之加工，倘若加工件之型腔複雜時，往往需要數拾支電極才能完成，然校正及準備工作則變得繁瑣。

1995 年開始，日本、瑞士等先進研究單位致力於精微小模具加工的新方法—放電銑削加工技術 (EDM Milling technology)，放電銑削是利用直筒狀小直徑電極作為刀具，由 CAD/CAM 之路徑軌跡之規劃，自動控制放電加工曲面或平面幾何形狀，利用放電銑削可以避免準備很多形狀複雜而製作成本又高的電極，對未來之光電資訊、自動化零組件模具生產，深具貢獻之潛力。

1.2 文獻回顧

放電銑削屬於較新的技術，世界知名的放電加工機廠商瑞士的Charmilles 公司於 1995 年開發成功放電銑削機(ROBOMILL 200)，但或限於商業機密，少有對應之研究文獻。針對本研究所述之放電銑削，電極為圓柱狀，除了本身旋轉外，亦沿著規劃之路徑進行放電銑削之工作。

在日本方面有很多專注於微放電加工製作細微 3D 形狀或形雕的研究 [1-8]，Panasonic 以及 Mitsubishi 等公司亦有商品化之微放電加工機。在這些研究中，東京大學之增澤隆久教授 (Prof. Masuzawa) 之研究最為深入，對於電極磨損之補償亦有很多研究 [3,6]，其加工及補償策略是採用均勻磨耗方法 UWM(uniform wear method)，該方法包含使用極淺之加工深度、來回掃描(to-and-fro scanning)、刀具路徑間距(overlap)與交替加工工件內外部輪廓等方法，確保電極在每一層加工後使電極輪廓回復，並配合對每一層加工量與電極消耗之分析，針對各種不同大小及形狀的加工輪廓，以實驗量測出電極磨耗比，可獲得在加工每一層後之長度補償量，並於同一機器上進行微小方錐及半圓球等 3D 輪廓的放電雕刻工作，以實驗結果說明對某一輪廓的補償情況，同時對於實驗結果之誤差，說明了可能的原因是來自於電極磨耗比的變化、加工面積的誤差及電極尺寸之誤差數，並分別使用 UWM 公式推算誤差對加工結果之影響，最後建議只要在加工模穴已知尺寸下儘量採用大斷面積之電極與小電極磨耗比，則可降低誤差之影響。並配合其所開發之線放電研磨 (WEDG) 技術 [9]，可以在床台上使用逆放電方式製作微細電極。

國內雲林科大之郭佳儻教授亦開發出微小 CNC 綜合放電加工

機，並進行微小 3D 零組件之製造研究 [10]。張義芳教授亦曾針對微放電加工領域，提出使用波形的偵測方式維持加工深度的方法，來改善均勻磨耗方法的缺點[11]。這些研究均屬於微放電加工領域（電流甚小，其間隙電流只有數安培），其形雕模穴或雕刻之 3D 零組件僅是數 μm 至數百 μm 等級，雖然原理近似，但其應用與 Charmilles 公司之放電銑削機或本研究所述之數 mm 或數拾、數百 mm 等級者不同，由於所探討之尺寸相異甚多，其電極消耗及加工上的補償策略將有很大不同。

Kruth 等人曾針對使用電極進行路徑加工定義三種場合的輪廓加工，分別為 EDM Profiling、EDM Pocketing 及 EDM Grooving，研究採用 Charmilles 公司所生產型號為 Roboform 200 放電銑削機，比較傳統放電加工電極前端面積(frontal area of electrode)與放電銑削前端面積對於電流密度大小差異，說明使用大尺寸之圓柱電極於放電銑削時，由於放電渣屑易導出及冷卻容易的優點可容許較大的電流密度，而轉速對金屬去除率沒有很大的影響，但卻影響電極磨耗，文中大部份著重於前端面積及沖流情況對金屬去除率之影響，以實驗結果說明了較大的前端面積之電極因有較大之熱容積，產生較少的放電集中現象而有金屬去除率較高之趨勢，而採用一般沖流對金屬去除率的影響並不大；並對於圓柱電極在銑削時所產生之間隙、轉角精度及 overlap 長度對金屬去除率的影響各問題作逐一說明，最後使用兩種不同大小之方柱電極進行加工結果比較，以結果說明前端面積的影響 [12]。

2001 年 Kruth 等人並進一步將管狀電極應用於放電銑削製程，說明使用管狀電極中空部分可導入沖流，並簡單說明管狀電極可減少圓柱電極輪廓的嚴重變化，其放電銑削之加工方向為橫軸加工配合即時 z 軸長度方向補償以維持一定之加工深度，將深度誤差經由不斷的測

量控制在 $5\mu\text{m}$ 以內，並自訂一套加工流程，並說明以 layer-by-layer 為主的 3D 輪廓加工與 3-axis 放電銑削製程在加工精度上之差異，除了放電加工本身之放電條件對表面粗糙度之影響外，說明不同加工模式的製程電極輪廓對工件表面精度的影響，並以制定出公式說明，最後在模穴的輪廓傾斜角(inclination angle)變化下，定義一變量上限傾斜角(change-over angle)，說明當工件輪廓傾斜角小於變量上限傾斜角時，建議使用 3-axis 放電銑削製程可獲得較佳之表面精度，而當大於其值時，則建議採用 layer-by-layer 的 3D 輪廓加工[13]；Kruth 等人同時對前述放電銑削製程方法及整體發展流程作較完整陳述[14]。2002 年 Kruth 等人提出結合預期的磨耗補償與線上即時偵測，對加工路徑中無材料去除的缺口，可不需預先知道缺口的形狀，也能對加工中的電極正確地加以補償；因為一般的預期磨耗補償量，可由加工前的實驗得知，且需對加工路徑中無材料去除的缺口的幾何形狀，要預知才能在加工過程對電極作正確的補償[15]。

McKell 與 Kohkonen 以實驗比較了旋轉與非旋轉電極，發現不同電極材料下，旋轉轉速高低會影響加工時間、電極長度消耗及孔之真圓度，提出轉速高低的影響程度，並評估適當的轉速，但加工的運動模式與本文所述之目的不同，僅只於探討旋轉向下加工[16]。1988 年 Kaneko 等人利用旋轉的圓柱電極，加工時電極輪廓持續改變，包括徑向及軸向消耗，需作週期性的碰邊量測，加工分粗、中、細三過程，粗加工只對軸向消耗作補償，其餘的加工過程均對徑向及軸向消耗兩者作補償[17]；於 1995 年又加入了光學量測裝置，可以量測電極之變形[18]。

1975 年 Snoeys 將加工過程中電壓波形區分成有效放電(effective discharge)、電弧(arc)、短路(short circuit)、開路(open circuit)四種，並

指出放電過程中有效放電的放電時間(discharge duration)可用來測量材料移除率(material removal rate)；根據放電時間的總和求出最佳平均放電電壓，以平均放電電壓為參數來控制加工過程；並提出有效放電的放電時間分佈與加工參數的關係，作為加工過程最佳化的參考[19]。

1982 年 De Bruyn 與 Pikelharing 研究放電延遲時間(ignition delay time)對直徑 22mm 圓柱電極消耗與材料移除的影響，利用特殊的電源回路，將放電延遲時間低於某設定值的放電波截斷，以排除放電延遲時間過短的放電波對加工過程的影響，實驗結果顯示電極的消耗比反而些微增加，而材料移除率並無明顯變化，也就是加工過程中放電延遲時間過短的放電波次數增加並不會增加電極消耗也不會減低材料移除率[21]，所獲得結論與 Snoeys[20]在 1980 年提出的看法有出入。

1988 年 ÇOĞUN 依每個放電波放電延遲時間的長短予以分組，並且利用矩陣數值分析的方式將每組放電波產生的電極消耗與材料移除率計算出來，在研究各種波列組合後，發現以短路、電弧、 T_d 小於單發放電波百分之 15 的時間及 T_d 大於單發放電波百分之 15 時間的組合最能反映實際放電加工過程中材料移除率的大小[22]。

1989 年 ÇOĞUN 與 Savsar 利用 gama 分佈函數統計在不同加工參數下放電延遲時間與加工特性的關係，並進一步指出若能找到不同電極幾何形狀、面積下的 gama 函數模型，即可用在線上預測電極消耗、材料移除率...等加工特性[23]。

1992 年 Weck 與 Dehmer 以等頻率放電迴路實驗得知，平均放電持續時間長，材料移除率高；而電極的消耗最主要是短的 T_d 的放電波所造成[24]。

1.3 研究目的

由前述文獻回顧中，由於在放電加工時，其電極損耗難以避免，各種應用於放電銑削之加工及補償策略，皆考量電極的消耗對加工尺寸及精度之影響後，提出可行性之策略，以作為放電銑削之加工基礎，不同之電極損耗程度將決定不同之加工補償策略，在微放電領域時，由於電極的尺寸非常小，此種尺寸下管狀電極成本高與製作不易，有違放電銑削使用低成本電極來加工複雜電極的目的，因此加工使用管狀電極作為放電銑削的電極並不適當，因此使用圓柱電極作為加工電極，在此種加工策略下，增澤教授的補償策略是以變換加工起點及路徑規劃來改善加工深度的誤差，並將所得到的誤差平均由每一層的加工深度來定量補償，可得到加工尺寸精度的要求，此種加工策略的缺點除了必需針對每一種加工輪廓都必須要以一套公式計算外，由於電極磨耗比在電極消耗變化下，並非為一常數，因此可知其採用的計算方法是使用平均的磨耗比，在加工輪廓及工件尺寸改變後，必須重新實驗求得磨耗比，因此只能針對某一特定的輪廓及尺寸大小提供使用者計算公式與電極磨耗比大小，當加工的工件尺寸改變後，必須重新實驗與計算公式，在放電銑削生產小量複雜的原則下，對每一工件製作及程序上顯得繁瑣。

在數 mm 至數十 mm 大尺寸的放電銑削時，kruth 等人提供一有效之加工策略，對於以 2D 層狀加工為主的放電銑削，提供使用管狀電極可減少輪廓變化，但其策略建立在 Charmilles 的機器下，此機器提供了加工深度的維持在不斷的碰觸加工基準點，量測電極長度的誤差變化，不斷的從高度的誤差中再補償電極長度的誤差值，最

後可得到穩定的即時補償 z 軸變化的補償量，但在實驗上仍為了避免電極輪廓之變化，所採用數至數十 μm 的加工深度，但對於數至數十 mm 之等級的電極而言，此種加工策略將耗費不少時間。

本文重點在針對一般三軸 CNC 放電加工機，作放電銑削改良之研究，因此首先以 2D 層狀加工的 3D 加工模式下，從觀察比較圓柱與管狀電極損耗模式和工件加工精度的影響中，建立電極消耗的補償策略，以獲得工件所需之加工精度要求，提出改良一般 CNC 放電加工機的可行性的加工方式，目的在建立後續之加工基礎，在建立適當之加工策略後，並以適當的電極與加工條件[25]，分析加工路徑間距對放電加工的影響。希望經由粗加工再細加工，以獲得所要求的尺寸加工精度，在粗加工時以穩定輪廓的電極，較大的加工深度，配合 z 軸電極長度消耗補償，利用一層層的加工，可快速獲得工件初步的輪廓形狀；只保留小的尺寸作最後的精加工，此時每層的加工深度宜小，以確保電極的角隅消耗減至最少，維持良好的尺寸精度。

1.4 本文結構

本章介紹本文的研究背景、相關研究文獻、研究目的及本文結構。

第二章介紹形雕式放電加工原理及相關分析理論。

第三章介紹實驗設備與實驗規劃。

第四章為實驗結果與分析討論。

第五章是結論與建議。

第二章 放電加工基本原理及相關理論

2.1 放電加工過程

放電加工是將電極工具與工作物置於絕緣的加工液中(其中離模式放電加工是以成型電極為電極工具，加工液以煤油為主)，當電極與工件兩端施予一直流電壓，當兩極徐徐接近至一適當間隙(約5~50 μm)時，超過加工液的絕緣耐壓強度，於是在該處發生放電現象，並以每秒數千至數十萬次的放電頻率放電，於是在發生放電的微小面積上，產生將近8000 $^{\circ}\text{C}$ 至12000 $^{\circ}\text{C}$ 的高溫，放電點的金屬因此被熔融、蒸發，進而產生許多放電凹坑，此乃放電加工切削工作物的方式，其整個過程如圖2.1所示放電加工整個過程，並說明如下：

1. 放電產生：

先在兩極間充滿絕緣煤油，並在電極與工作物兩端通以直流電壓，當兩電極表面上的兩個微小凸起點間的電場梯度最先超過加工液的絕緣抗壓強度時，於是在該處發生放電現象，電子由陰極射出並往陽極前進，此時為放電現象開始。

2. 電離作用：

當飛散而出的電子藉電場予以加速，因而衝擊到電極間的絕緣液原子時，會激發最外層的電子脫離束縛而形成陽離子，因此飛離的電子數會急劇增加，同時這些電子更會跑向陽極部位，再次進行電離作用，導致電子數形成倍增的現象，形成電流增加的主要因素。

3. 氣化、熔融作用：

由於放電現象的產生，陽極或陰極會藉由電子或陽離子持續性的電離作用並衝擊電極工具時，動能轉變成熱能，因而產生高達 $10,000^{\circ}\text{C}$ 左右的高溫，使得電極與工作物發生熔融與氣化的現象。

4. 氣化膨脹，融屑除去：

放電瞬間產生的高溫，造成加工液突然氣化、膨脹，而產生了巨大的壓力，此壓力波使熔融的金屬噴出，形成微小顆粒而散佈在周圍加工液中，達到金屬融屑去除的效果。

5. 放電痕形成及加工液復原：

氣化爆炸的壓力使熔融之金屬噴成小圓團，四散於加工液中，於工件表面形成凹坑，接著關閉兩極之外加電壓，熔融屑被循環加工液帶走，於是放電痕形成，而凹坑周圍未噴散的熔融金屬形成隆起的部份，此部份可能就是下次的放電點，此時間隙之絕緣耐壓重新恢復，等待進行下一次的放電。

實際上放電加工是反覆的脈衝性放電，包含氣體相放電與金屬相放電的火花放電與過度電弧的電弧放電兩部份所組成，由於金屬相與氣體相放電的時間短暫且因放電火花之緊束效應(Pinch Effect)，通常放電火花都產生在微小的放電點上，因此單位面積上的電流密度甚高，造成局部相當高的溫度，可使金屬熔融或氣化，產生的放電區域小，加工粗糙度亦佳。放電加工就是累積無數個這樣的放電痕而達到加工的目的。

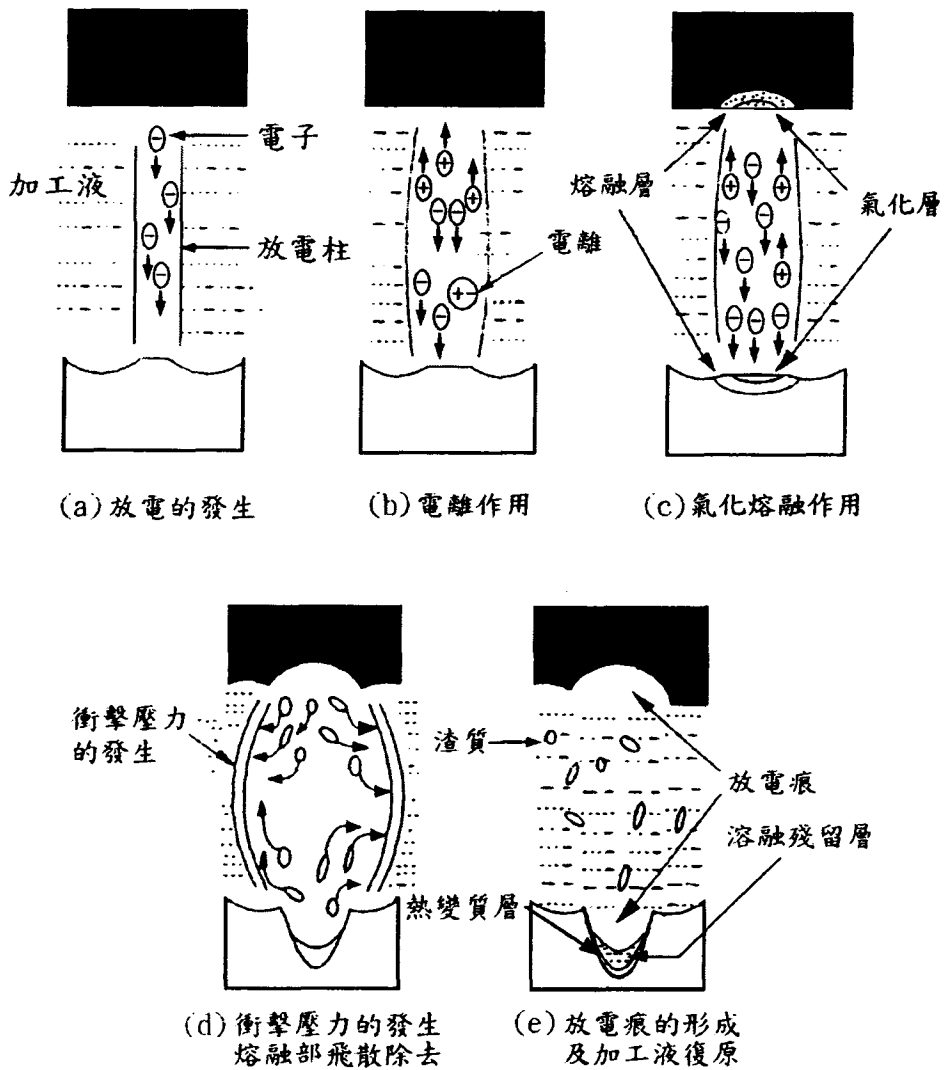


圖 2.1 放電加工過程說明圖

2.2 放電能量的結構與分配

圖 2.2 為放電火花三個區域能量的分佈圖，放電火花是由陰極、陽極、電漿(Plasma)、陰極位降區與陽極位降區所組成，電漿則是產生在兩位降區之間的氣體，其中包含電子、正離子和中性原子，其溫度約在 $8,000^{\circ}\text{C}$ 到 $10,000^{\circ}\text{C}$ 左右。電子因有足夠的熱量與在陰極附近有正離子的吸引，可以使陰極放射出電子，並與陰極附近的正離子形成一位降區，此位降區僅足夠加速電子撞擊陰極附近的原子，使之離子

化，此位降區的壓降視材料而定，從銅 12V 到石墨的 25V 不等。

當電流不大時，電子會被陽極吸引且迅速吸收，因而無法滯留在陽極附近，故不能與陽極表面的正電荷形成位降區；但當電流足夠大時，陽極會因溫度升高而氣化，此氣化原子會干擾電子進入陽極，此時陽極位降區便可形成 0 V(位降區不存在)到 40 V 之間的壓降區。所以當施加的放電電流較小時，電極應接陽極，工件則接陰極，我們可以控制電流使陽極的位降區為 0 V，使電極工具的消耗為零，或低消耗，此種接法稱為「正極性加工法」；當施加的放電電流較大時，電極應接陰極，而工件改接陽極，藉由控制電流的大小，使陽極位降在 0 V 到 40V 間，雖然電極會消耗，但卻因而可控制加工物粗糙度，雖然電極消耗率高，但工件去除量更高，此種接法稱為「負極性加工法」。

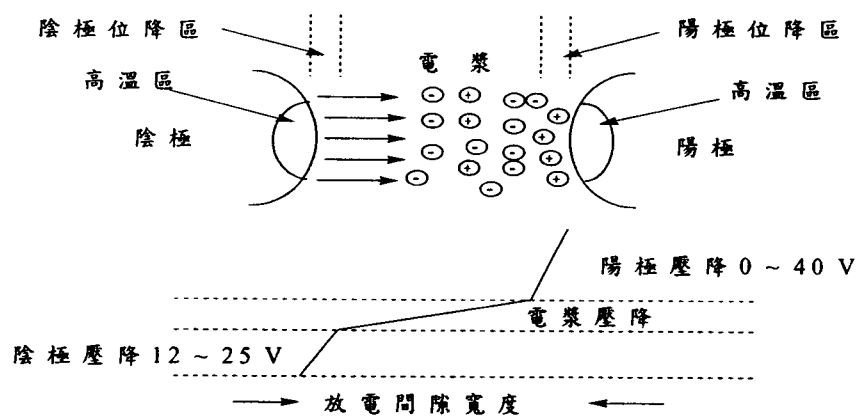


圖 2.2 放電火花結構圖

另一種說法是當放電幅較短時，電子流占電流的比例較大，而電子將撞擊陽極並將能量傳給陽極，使陽極熔融或氣化而消耗，且因離子流的比例較少，所以陰極的消耗比陽極少，這時若採負極性接法，則可獲低消耗，相反地，當放電幅較長時，離子流占電流的比例較，故陽極的消耗較陰極少，此時若採正極性，對低消耗而言是較有利的。

2.3 放電加工組成與加工特性

雕模放電加工之金屬切削過程中，影響因素甚為複雜，影響加工速度、加工後工件精度及表面品質(表面粗糙度、變質層大小與殘留應力)的因素很多，如放電電源系統、伺服控制系統、油液迴路系統、機械系統等，以下就加工組成與加工特性分別說明：

(一)加工組成：

1. 放電電源系統：

一般常用之雕模式放電加工之放電電源，乃採用電晶體控制迴路為主要電源系統，如圖 2.3(a)及 2.4(a)所示，此迴路係由直流電源通過開關用的電晶體與電流限制用的電阻連接於極間的迴路，由於設有開關迴路，可強制遮斷放電電流，抑止電弧放電，縮短放電間隔，且極間的絕緣回復，可經由無負載電壓之確認，提供為極間狀態之檢知，以使加工效率達到最高。電壓與電流波形形狀、放電時間與放電尖峰電流值會直接影響放電能量大小，進而影響單發放電金屬去除量，此乃對加工速度影響很大。一般放電迴路可以提供電壓的範圍是 100~270 V。若以放電持續時間區分，有以下兩種不同的電源供應型式。

- (a) 等頻率放電之電源：連續的放電波皆具有相等的週期，亦即放電延遲時間(T_d)與放電持續時間(T_c)之和與放電休止時間(T_o)是固定，即為等頻率放電(Iso-Frequency)，此種電源供應方式，放電持續時間大小是一個隨機值，所以放電能量不均一，造成表面去除坑陷大小不一，表面粗糙度亦不佳。但由於具有相等週期之放電脈衝，因此在波形產生器的設計上較為簡易。圖 2.3(b)為等頻率放電電壓及電流

波形示意圖。

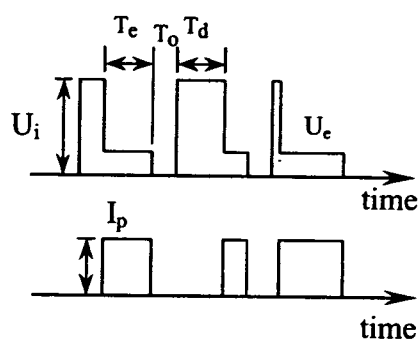


圖 2.3 等頻率電晶體電壓及電流波形示意圖

(b) 等能量放電之電源：放電持續時間(T_c)及放電休止時間(T_o)皆控制為固定時，即為等能量放電(Iso-Pulse or Iso-Energy)。這樣的電源供應，放電持續時間大小一定，每一脈衝的放電能量固定，所以表面去除坑陷大小較均勻，粗糙度亦較佳，有利於粗糙度控制。圖 2.4(b)為等能量放電電壓及電流波形示意圖。

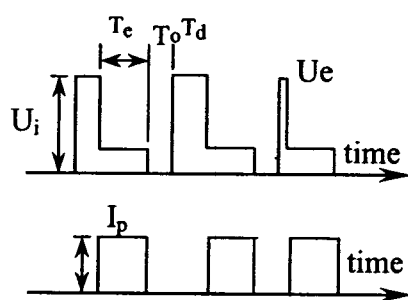


圖 2.4 等能量電晶體控制電壓及電流波形示意圖

2. 伺服控制系統：

放電伺服系統控制放電間隙大小，其中以參考電壓 V_{ref} 來設定放電間隙。控制原理乃在某一間隙大小時放電之狀態予以得一直流準位，再將此一準位與所設定之參考電壓相比較得其差值，利用此差值致動主軸上下。另外如床台進給伺服系統可自動調整床台進給以提高加工速度，而放電加工狀況監視系統、放電狀況適應控制等對加工速度、加工穩定度及加工精度皆有不可或缺影響的因素。

3. 油液迴路系統

放電加工大多在加工液中進行，所以加工液對放電加工特性的影響也扮演著極為重要的角色。一般而言，油加工液的絕緣性佳 ($10^{10} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$)，但油屬於可燃性物質，易發生火災，而使用水當加工液時，必須將過多的雜質、離子等去除，以增加比電阻。綜合目前放電加工機所使用的加工液，其作用有下列幾項：1. 工具電極與工作物間隙絕緣液 2. 產生氣爆以噴出熔渣和沖走去除加工屑 3. 冷卻工具電極部位。正確的噴流使用方法，將大幅增加了金屬去除率。由以上可知，加工液除了要求具有相當程度的絕緣性、低黏度、高引火點及優越的削減離子特性外，噴流壓力大小及方式、加工液溫度控制也必須考慮。

4. 機械系統：

放電加工機頭是因電極與被加工物之距離而做上下之移動調整，其上下之運動可用電動機械帶動油壓的方式使其運動，且須設有固定電極與使其上下之伺服機構。加工機頭之上下行程大部份是 200mm~300mm，若電極驅動系統剛性不良則會引起加工過程電極擺振，造成加工精度不良，因此必須考慮整個機械系統的結構剛性測試

以及結構靜態、動態和熱變形分析。

(二)加工特性：

所謂加工特性是包含了放電加工前的放電參數定義及在設定的加工條件參數下進行放電加工後的結果兩個部份，分述如下：

1. 放電加工輸入參數：

放電加工機加工參數中，最主要的設定參數有：伺服間隙 SV、峰值電流 I_p 、開路電壓 V_p 、放電休止時間 T_o 、放電持續時間 T_c 、極性 (Polarity) 等，如圖 2.5 所示正常放電(Normal)與電弧放電(Arc)波型之比較，並分別說明如下：

(a) 伺服電壓 (Servo Voltage ,SV)：

伺服電壓即為放電間隙，亦為兩極間實際的平均放電電壓值，伺服系統根據此電壓的偵測，對放電間隙距離做伺服控制。此值會直接影響放電間隙的大小，伺服電壓太高則放電間隙加大，能有效去除工件材料的能量因而減少，加工速率降低。

(b) 峰值電流 (Peak Current , I_p)：

峰值電流指的是正常放電波所能達到的最大電流值，此值可在加工時直接於放電加工機的控制面盤上設定。一般應用範圍是 1Amp ~ 50 Amp。

(c) 開路電壓 (Open Voltage , V_p)：

放電時間內電源系統所提供的電壓，此電壓決定了放電機的最大電

流容量。本實驗放電加工機範圍為 100 V ~ 270 V。

(d)放電休止時間(Pause Duration , T_0)

放電加工時，在兩次脈衝放電之間，必須有一段休止時間來排渣與冷卻，並恢復絕緣，才能使放電加工過程正常進行。雖然為了提高加工速度，休止時間愈小愈好，但太短時則會影響加工屑的排除，導致積碳或放電不穩定的現象。實驗可調整範圍在 $1\mu s \sim 1000\mu s$ 之間。

(e)放電持續時間(Pulse Duration , T_e)：

此時間係指放電時的持續時間，其值在數 $\mu s \sim$ 數千 μs 。當脈衝時間增長時，雖然放電能量增加，但是由於放電持續時間過長時，會因放電柱擴大而使單位面積所接受的能量反而下降，造成加工速度變慢，表面粗糙度變大與伺服間隙增加。實驗可調整範圍在 $1\mu s \sim 1000\mu s$ 之間。

(f)極性(Polarity ,P)：

放電加工極性的定義，一般分為『正極性加工』與『負極性加工』，本實驗係以工件接負極之加工方法，電極接正極的方式，稱為正極性加工，反之則為負極性加工。

2. 放電加工輸出性能：

(a)金屬移除率(Material Removal Rate ,MRR)：

放電加工一般以金屬移除率來表示加工速度。金屬移除率以單位時間內去除的工作材料體積或質量來表示，單位為 mm^3/min 或 g/min 。

(b)電極磨耗比(electrode wear ratio,EWR)

一般在實際運用上，比較不同之設定下電極消耗率，不具太大的意義。一般另以相對消耗比 EWR，來提供合理的指標。電極磨耗比定義為電極消耗量除以金屬去除量來表示，此值為無因次，通常此值愈小，電極以較小的消耗獲得較多的去除工件材料。

(c)放電延遲時間(Ignition Delay Duration , T_d)

此放電時間是指橫跨電極與工件最近距離的兩點間發展適於放電狀態所需的時間。由於極間的渣屑濃度、溫度、接觸面積...等的不同，導致每一發放电波的放電延遲時間不一定相同，通常與伺服間隙有極大關係，不同的 T_d 的放電波會對電極與工件有不同的去除率，因此根據 T_d 的長短，一般可將放電波分成：正常放電(Normal pluse)、電弧放電(arc)、短路放電(short circuit)、開路(open circuit)，如圖 2.5 所示。

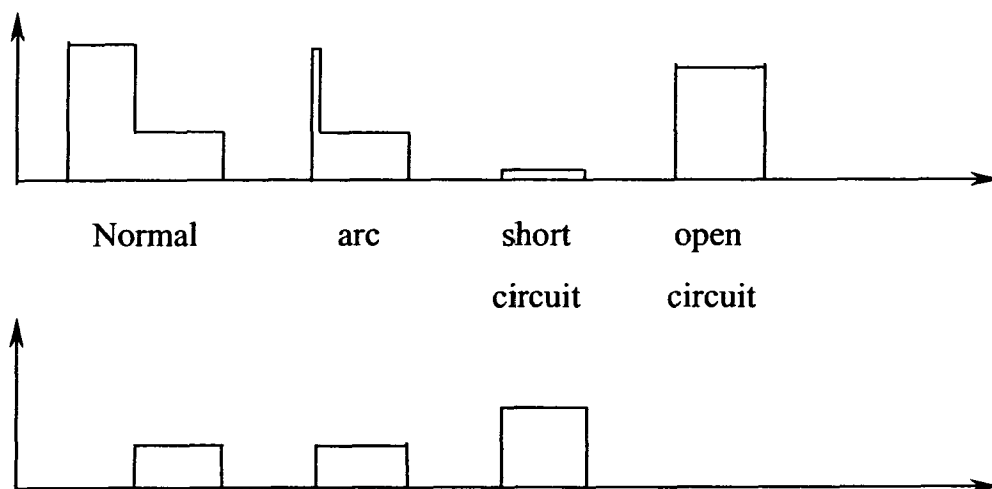


圖 2.5 正常放電、電弧放電、短路放電及開路波型示意圖

第三章 實驗設備與實驗規劃

本章將介紹實驗設備、實驗規劃及實驗方法。依序分述如下：

3.1 實驗設備

1. 雕模放電加工機 (Die-Sinking EDM Machine)

雕模放電加工機是本實驗最主要的加工設備，是由國內億曜企業股份有限公司所研究製造之 M35B 型放電加工機。主要裝置包括以下設備：

- (1) 電源供應系統(Pulse Generator Unit)。
- (2) 介電液冷卻過濾系統(Dielectric Circulation)。
- (3) CNC 適應伺服控制系統(Servo Control System)。
- (4) 電極機頭之三軸(X、Y、Z)
- (5) 工作機台(Mechanical Structure)，有安全保護監控系統。

其加工參數調整範圍如表 3.1 所示。

項 目	範 圍
加工電流 I_p	5 – 32 A
放電脈衝時間 T_e	25 – 400 μs
放電休止時間 T_o	15 – 400 μs
放電開路電壓 V_p	100 – 270 V
極間放電電壓 U_e	17 – 25 V
伺服電壓 SV	0 – 50
電極工件極性 P	(–) / (+)

表 3.1 加工參數調整範圍

2.旋轉軸組件(Rotating Spindle)

本實驗對於上述 CNC 雕模放電加工機，加裝旋轉軸以增加放電加工機 C 軸旋轉功能，採用瑞典 3R 公司所生產型號 3R-1.321-HS 旋轉軸配合型號 52500-00 的轉速控制箱，將旋轉軸固定於放電加工機之油壓夾頭上，配合 3R-ER16E 之精密套筒組來進行實驗。主要規格及功能如下：

- (1) 套筒組規格(Collet Capacity)—0.5 - 10mm。
- (2) 轉速範圍 (Speed Range) —100 - 2000rpm。
- (3) 旋轉軸總重(Weight Spindle)—2kg。
- (4) 最大電極載重(Max.Electrod Weight)—2kg。

3.光學投影機 (Mitutoyo Projector, PJ-2500)

具光學尺之數位式功能，用以精確量測工件去除量、工件表面與電極消耗長度。其測量精度可達 $1\ \mu\text{m}$ ，可用來觀察實驗完成後之試片表面外觀與電極形狀。

4.數位式示波器(Digitizing Oscilloscope, TEKTRONIX TDS 540A)

觀察實驗過程中放電波列，並儲存放電時高頻的放電波形。

5.精密電子天平秤 (AND Electric Balance, HF-400)

使用電子天平，用以量測加工物、電極於加工前後之重量差，可計算出其金屬去除量。本天平精密度可達 $\pm 0.001\text{g}$ 。

6 表面粗糙度測量儀

使用探針式粗糙度測量儀，用以測量加工完成之加工面的平均粗糙度值 (Ra) 的大小。

7. 放電訊號量測系統及個人電腦

由億曜公司協助完成的圖 3.1 放電訊號量測系統，能擷取的放電訊息為對每一筆放電波作波列分析，除整體（巨觀）的各類波型所佔百分比、總放電頻率、放電延遲時間的相對頻率、正常波平均放電延遲時間已知外，還可微觀的依序檢視每一發的放電波型及放電延遲時間，這將更明瞭放電時瞬間如何變化，更能精準掌握放電是否有逐漸惡化的傾向，對極間的間隙狀況能更清楚描述，有助於伺服控制策略的訂定。

圖 3.1 放電訊號量測系統，其原理是 CNC 以運動控制卡，取得放電進給率電壓 V_{cs} ，經數值轉換應用 12 bit D/A 將速度命令傳給三軸之 XYZ 馬達驅動器，並配合 $1\mu m$ 解析度之光學尺，將位置回授給 CNC 進行位置控制。另外，放電波的產生由電源供應箱所設定控制。放電訊號的模組是將放電電源箱及極間的檢測訊號連接進入檢測前級電路，放電波在進入後，分解出 T_d 時間及放電間隙電壓 U_e 準位大小，分類出短路波、電弧波 A、電弧波 B、電弧波 C 及正常波，如表 3.2 波型的分類。每一個放電波發生時，設計一個專屬即時處理的微處理機 8051，將每一個放電波依序儲存入系統的暫存緩衝區中。其包含每一個波的 T_d 及波型，所能儲存最大容量是兩組 16K Byte 位元的資料。專屬 8051 將放電波交替地儲存入在 16K Byte RAM 中，必須等到額滿後，再放入另一個 16K Byte RAM 中。此時，PC 不會對正儲存的 RAM 資料做提取。但可以對不正儲存的 RAM 做資料提取。PC 與 8051 之間設計一個旗標以辨識，現在操作的記憶體是 RAM1 還是 RAM2。藉由這樣的方法，不但能即時依序地紀錄每一個放電波的 T_d 及波型，更能做為往後調查控制方法與放電波之間統計上的關係。

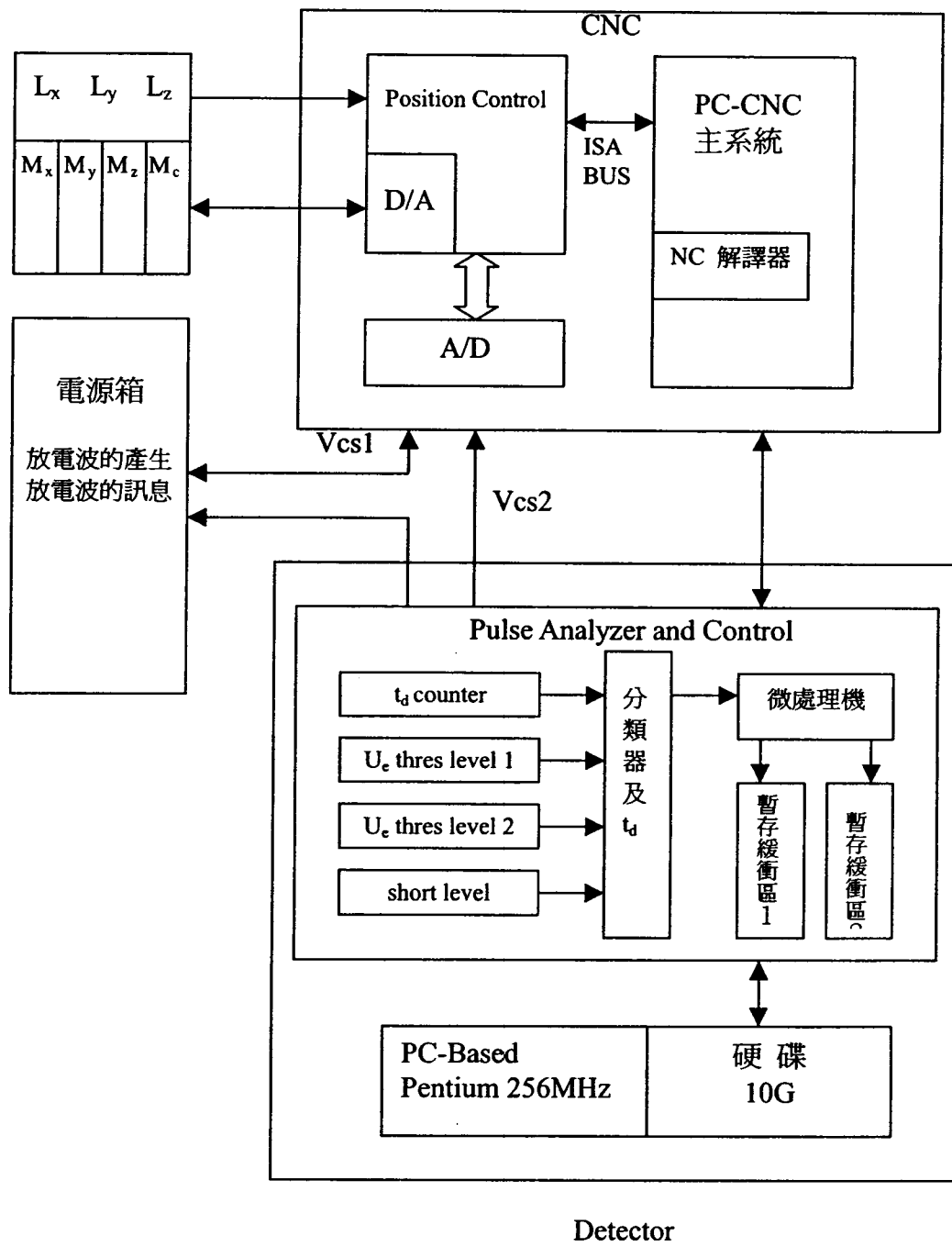


圖 3.1 放電訊號量測系統

	U_e (Volt)	T_d (μs)
short	$U_e < 7$	0
arcA	$7 \leq U_e < 18$	don't care
arcB	$18 \leq U_e < 35$	$T_d < 4$
arcC	$35 \leq U_e$	don't care
normal	$18 \leq U_e < 35$	$4 \leq T_d$

表 3.2 波型的分類

8. 實驗材料

(a) 電極材料(正極): 電解銅主要物理特性如下:

抗拉強度約 26 kgf/mm^2 ，密度約為 8.94 g/cm^3 ，電阻係數約為 $16.7 \times 10^6 \text{ n}\Omega\text{-cm}$ ，熱傳導率 $0.941 \text{ cal/cm-sec-}^\circ\text{C}$ ，熔點 1083°C 。

(b) 工件材料(負極):

SKD61 冷作模具用合金工具鋼，密度約為 7.75 g/cm^3 ，素材之硬度在 $HR_c 20$ 以上，熱處理硬化後，硬度在 $HR_c 53$ 以上，其主要成份如表 3.3 所示。

%			
C	Si	Mn	Cr
0.35~0.42	0.8~1.2	0.3~0.5	4.8~5.5
Mo	V	P	S
1.2~1.6	0.5~1.1	0.03 以下	0.01 以下

表 3.3 SKD61 模具鋼主要成份

3. 2 實驗規劃

先比較圓柱電極與管狀電極在放電銑削時的消耗狀況，建立適合加工的電極消耗補償策略，再以適當的電極與加工條件配合補償策略，分析加工路徑間距對放電加工的影響。

3. 2. 1 電極消耗補償策略之建立

本節在觀察比較圓柱電極與管狀電極應用於放電銑削時，電極消耗之變化與對工件幾何精度之影響，主要目的在建立電極消耗之補償策略以加工工件之輪廓。由於管狀電極中心部份呈中空，熱容積亦不若圓柱電極，電極消耗較為迅速，因此經試驗評估後選用較高之放電持續時間將比較容易觀察電極消耗，本節中使用各加工參數如表 3.4 所示，分別以圓柱與管狀電極進行圖 3.2 與 3.3 不同之路徑放電銑削，並於圖中定義各軸加工方向。

	放電電壓 $V_p(\text{volt})$	放電電流 $I_p(\text{A})$	持續時間 $T_c(\mu\text{s})$	休止時間 $T_o(\mu\text{s})$	伺服電壓 SV	加工深度 $d(\text{mm})$	電極轉速 $\omega(\text{rpm})$
圓柱電極	100	16	20	15	20	0.5	400
管狀電極	100	16	40	15	20	0.5	400

表 3.4 圓柱與管狀電極加工參數

其他的加工參數則固定如下：

1. 圓柱電極直徑為 5mm；管狀電極外徑為 5mm，內徑為 3.3mm。
2. 噴流壓力為 $0.05 \sim 0.1\text{kgf/cm}^2$ ，採側向噴流方式排渣，且加工之處必須沒入油中。

3. 採用正極性接法，電極為正極，工件為負極，由於採用正極性接法於多數銅對鋼加工時有較低的電極消耗。

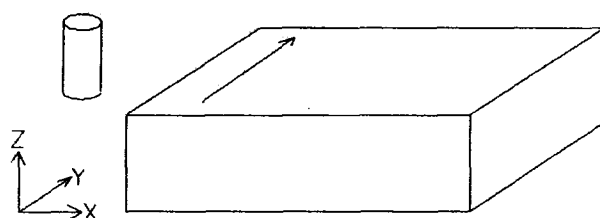


圖 3.2 電極消耗觀察之加工路徑規劃

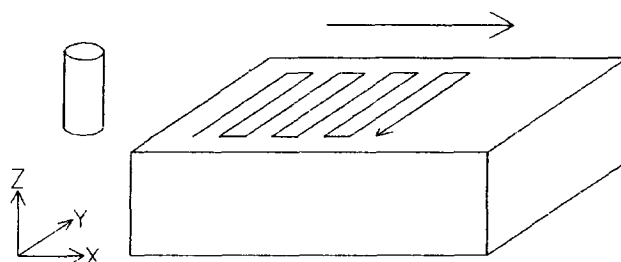


圖 3.3 工件表面輪廓觀察之加工路徑規劃

3.2.2 加工路徑間距之決定

本實驗針對加工時，加工路徑因不同的 overlap 對工件加工面、金屬去除率、電極消耗比及表面粗糙度的影響，以決定合適的加工路徑間距，並藉由放電波列分析了解其放電狀況。實驗時以適當的加工條件，利用穩定輪廓的管狀電極，配合電極長度消耗即時補償之策略，在達到一致加工深度下，以確保實驗之準確性。加工條件如下：

1. 電極：電解銅外直徑 5mm，內直徑 3.3mm 之空心電極。
2. 工件材料：SKD-61 模具鋼。
3. 放電電源：電流波形為矩形。
4. 加工行程：20mm。
5. 加工路徑間距：1.6，2.4，3.2mm。
6. 極性：電極為正極，工件為負極。
7. 加工液：吸流壓力 0.9 kgf/cm^2 。
8. 開路電壓：100Volt。
9. 電極轉速：500rpm。
10. 放電尖峰電流：16A。
11. 放電持續時間： $120 \mu\text{s}$ 。
12. 放電休止時間： $15 \mu\text{s}$ 。
13. 伺服參考電壓：51.2Volt。
14. 加工深度：0.5mm。

對於加工特性的量測，為固定深度下材料去除的總量，亦即將工件加工固定行程後，工件前後的重量量測值相減，可得到工件去除量的重量，電極消耗量亦使用加工前後之重量量測值相減可獲得，將工件去除量除以工件密度獲得工件去除體積，同理可得電極去除體積，最後將工件去除體積再除以加工時間可得金屬去除率，電極磨耗比則將電極消耗體積除以工件去除體積可獲得。

第四章 實驗結果與分析討論

4.1 建立電極消耗之補償策略

本節討論之重點為：對於圓柱電極與管狀電極進行放電銑削，觀察電極消耗模式及加工工件表面之形狀及幾何精度後，提出加工及電極補償策略，並藉由實驗結果說明加工補償策略之可行性。

4.1.1 圓柱電極消耗模式

由 3.2.1 的實驗規劃，未經任何補償下，圖 4.1 為使用外徑為 5mm 的圓柱電極進行 0.5mm 深度之槽狀銑削時，採用表 3.4 之放電加工參數及圖 3.2 之加工方式，所觀察電極在各行程下電極消耗模式之連續圖，由圖可觀察圓柱電極消耗主要集中於電極外圓之輪廓，且角隅因二次放電現象，因此在接近電極底面部份之外徑消耗較接近工件表面之外徑消耗來得快，當接近電極底面之外徑消耗至電極中心時，電極才開始產生 Z 軸方向長度消耗。

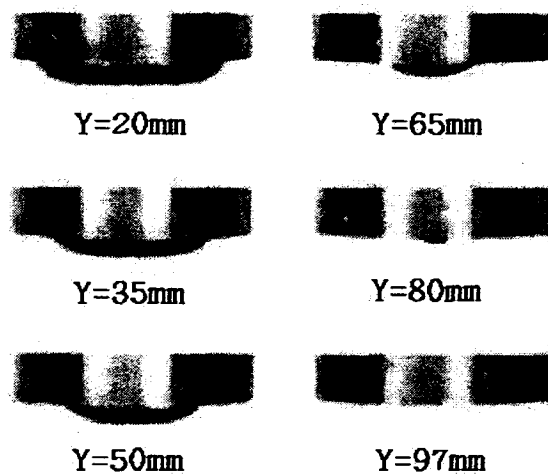


圖 4.1 圓柱電極在各行程下電極消耗模式之連續圖

當電極產生 Z 軸方向長度消耗後，所對應工件表面也產生加工深度的變化，因此工件表面將由一開始所設定的加工深度逐漸變淺，最後因為電極消耗完全後，此時不再產生火花放電，因此對於電極長度消耗，若藉由不斷偵測電極長度消耗的變化，當電極長度變化時，根據電極的長度消耗量作 Z 軸位置補償，在適當之 Z 軸補償值下，將可維持電極加工在一定的深度，以 5mm 圓柱電極在加工深度維持在 0.5mm 下，以表 3.4 之加工參數加工，每 20mm 行程變化時量測電極長度之損耗量後，將記錄之長度消耗量作為下一個 20mm 行程的 Z 軸電極補償量，圖 4.2 為在各行程時，電極長度的消耗量，經由如此反覆量測與補償後，最後結果可獲得在每 20mm 的行程下 Z 軸補償量為 0.061mm，使用這樣的加工方式可維持獲得加工深度在相同的 Z 軸深度，圖 4.3 為電極在補償下，加工 200mm 行程後後實際電極穩定輪廓。

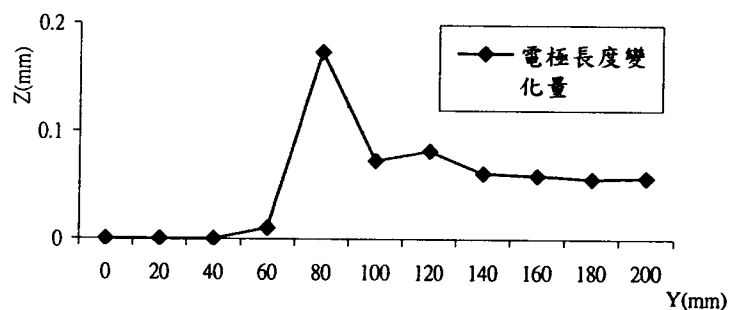


圖 4.2 使用 Z 軸長度補償時，每 20mm 行程圓柱電極長度消耗量

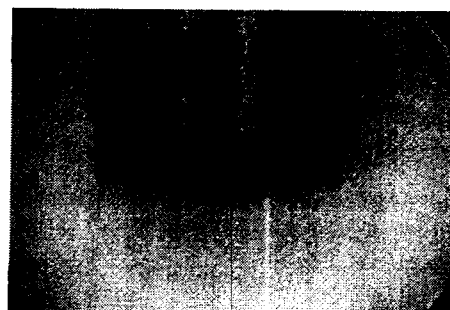


圖 4.3 使用 Z 軸長度補償加工後 5mm 直徑圓柱電極的穩定輪廓

4.1.2 圓柱電極消耗與電極補償對加工可行性之探討

本實驗是研究以 2D 層狀加工為主之 3D 輪廓加工，因此對於在 layer-by-layer 的加工方式下，每一層加工後的工件精度確有探討之必要，根據 3.2.1 的實驗規劃進行放電銑削，各加工條件如表 3.4 所示，加工方式如圖 3.3 所示，圖 4.4 為未經任何 z 軸長度補償下，工件表面實際加工情況，而圖 4.5 則為在使用輪廓儀量測工件表面在 x 方向之輪廓變化。

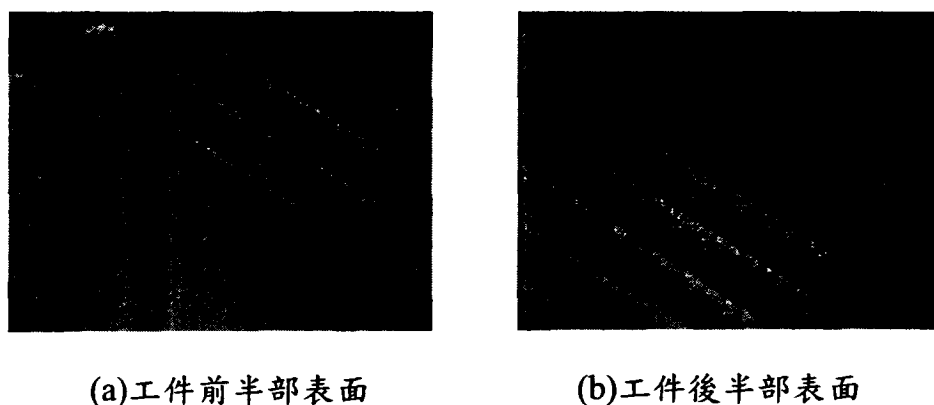


圖 4.4 圓柱電極在未經任何補償工件表面實際加工情況

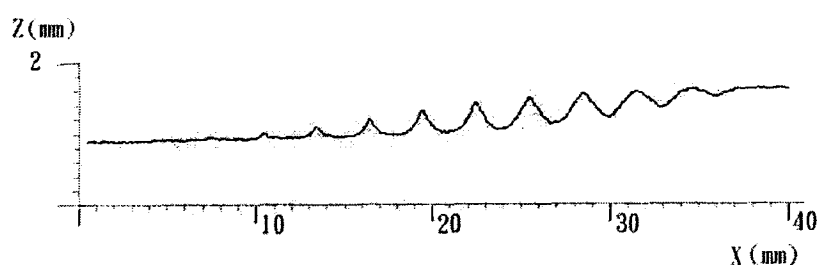


圖 4.5 圓柱電極加工工件表面沿 x 加工方向之輪廓變化

由結果可觀察在未予任何 z 軸長度補償下，由於電極輪廓及長度將如圖 4.1 所示依序產生變化，致使加工深度逐漸變淺，因而使工件

表面加工深度並未能達到所欲加工之深度，然由上節的實驗發現在即時 z 軸長度補償下，將可維持加工深度並獲得穩定電極輪廓，圖 4.6 為以 Pro/Engineer CAD 軟體模擬圓柱電極在能適時補償其長度消耗下，利用穩定電極輪廓，在 0.5mm 加工深度及加工路徑間距為 3mm 下的加工結果，圖 4.7 為使用穩定電極輪廓加工後工件表面在 x 方向的輪廓剖面圖，由結果觀察發現在單層加工時，使用穩定電極輪廓加工時，工件表面則因電極之穩定輪廓及 overlap 長度之規劃，雖可獲得在電極中心處達到所要求的加工深度，但在電極重疊處與電極中心加工過後的加工深度仍有明顯之落差，此種現象將導致在後續進行下一層加工時，由於加工表面的凹凸不平而使得電極之實際接觸放電面積產生變化而影響電極磨耗，並使電極難以維持穩定輪廓。

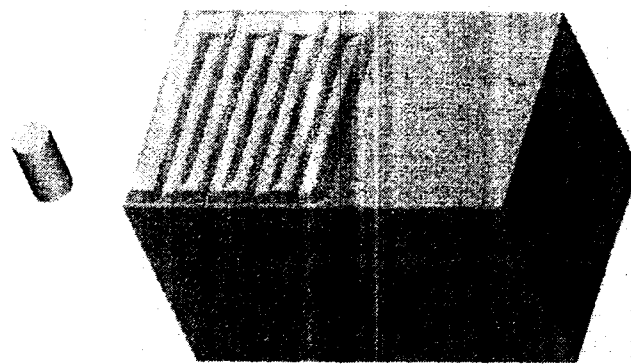


圖 4.6 圓柱電極配合長度補償後，銑削加工結果模擬示意圖



圖 4.7 使用穩定電極輪廓加工後，工件表面在 x 方向的輪廓剖面圖

針對上述使用圓柱電極之缺點，為了減少因電極消耗所產生之輪廓變化與工件表面高低誤差，可從調整電極之尺寸、使用極淺之加工深度及增加 overlap 長度三方面來獲得改善，然若為了降低工件表面之高度高低不平現象，選擇小尺寸電極，此時由於電極熱容積變差使加工效率低落，同時對於每一層之路徑長度將大幅增加，將使整體加工效率大幅降低。若使用極淺加工深度之進給量，則將對於整體加工總層數的增加亦造成效率低落，對於一般 CNC 放電加工機而言，並未具有相關設計，以本實驗機種為例，目前並未有如 NC 加工機針對平面圖形可自動產生 NC 程式之相關設計，因此對於每一層之加工路徑的程式撰寫均是極大之負擔，若增加 overlap 長度由於放電接觸面減少，仍然由於減少接觸面積與路徑增加，一樣會降低加工效率，因此經由圓柱電極特性之觀察發現諸多問題，難以針對形狀精度與加工效率兩者兼顧，因此以穩定輪廓的圓柱電極配合 z 軸即時補償，無法滿足加工之要求。本研究將針對管狀電極進行相似之實驗觀察其電極輪廓與工件形狀與尺寸精度之研究，比較兩者在加工上是否有相異之處，及是否能建立適合加工的電極消耗補償策略。

4.1.3 管狀電極消耗模式

由 3.2.1 的實驗規劃，未經任何補償下，改以外徑為 5mm 內徑為 3.3mm 的管狀電極，採用表 3.4 所列放電加工參數，加工方式如圖 3.2 所示，圖 4.8 為使用管狀電極進行一 0.5mm 深度之溝槽銑削時，所觀察電極在各行程下電極消耗模式之連續圖，由圖可觀察管狀電極消耗相同集中於電極外圓部份之輪廓，由於角隅二次放電現象致使接近電極底面部份之外徑消耗較接近工件表面消耗來得快，由於管狀電極中空部份特性，當底面部份之外徑消耗至管狀電極中空部份時，電極開

始產生 z 軸方向長度消耗，因此工件表面將由一開始所設定的加工深度逐漸變淺，最後因為電極消耗完全後，電極與工件因未有接觸，亦不再產生放電現象。

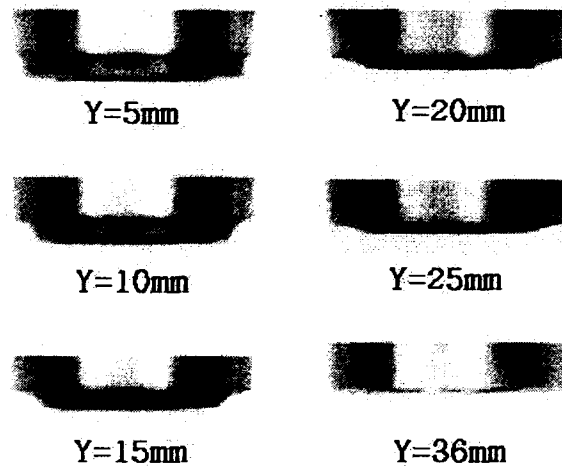


圖 4.8 管狀電極在各行程下電極消耗模式之連續圖

因此對於電極長度消耗，仍藉由前述偵測電極長度消耗的變化，並根據所量測電極的長度消耗之誤差量適時作 z 軸位置補償，以維持電極在一定的加工深度，圖 4.9 為 5mm 壁厚為 0.85mm 之管狀電極在維持 0.5mm 的加工下，以表 3.4 之加工參數作單軸橫向加工，在加工每 20mm 行程時量測電極長度消耗量，並將所量測長度消耗量當作下一 20mm 行程的電極 z 軸補償量，最後結果可發現在每 20mm 行程的補償量將亦趨於穩定值，此時電極也逐漸達到穩定輪廓，圖 4.10 為電極在加工 200mm 後電極之穩定輪廓圖，由圖中可觀察得到管狀電極之穩定輪廓，從外徑至內徑部份的壁厚部份接近線性變化，電極底部部份則呈一圓盤平面。

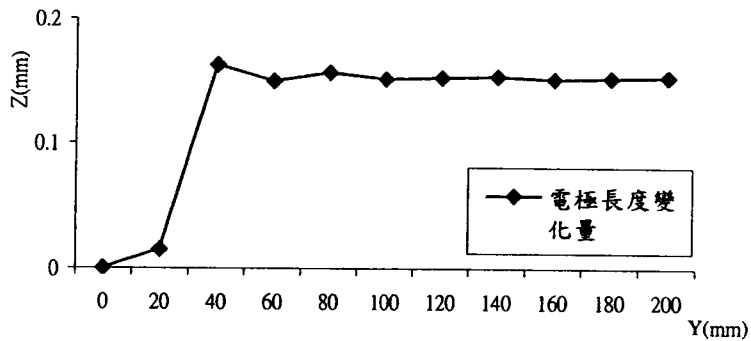


圖 4.9 使用 z 軸長度補償時，每 20mm 行程管狀電極長度消耗量

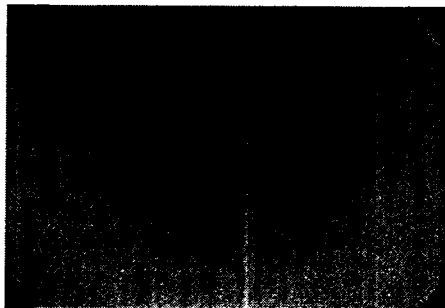


圖 4.10 使用 z 軸長度補償加工後 5mm 直徑管狀電極的穩定輪廓

4.1.4 管狀電極消耗與電極補償策略

本節實驗根據 3.2.1 的實驗規劃，進行 2D 平面的放電銑削，各加工參數如表 3.4，加工方式如圖 3.3 所示，圖 4.11 為未經任何 z 軸長度補償下，使用管狀電極加工後工件表面實際加工情況，而圖 4.12 則為在 x 加工方向之輪廓變化，由圖中可發現表面輪廓變化由於中空部份的圓盤平面特性，使得工件表面呈一階梯狀高度變化，反觀使用圓柱電極則因不規則電極輪廓變化，對工件表面呈不規則變化，因此研判若能有效控制電極底面部份的高度，將可使每一階梯高度變化一

致，而獲得均一的加工深度之工件表面。

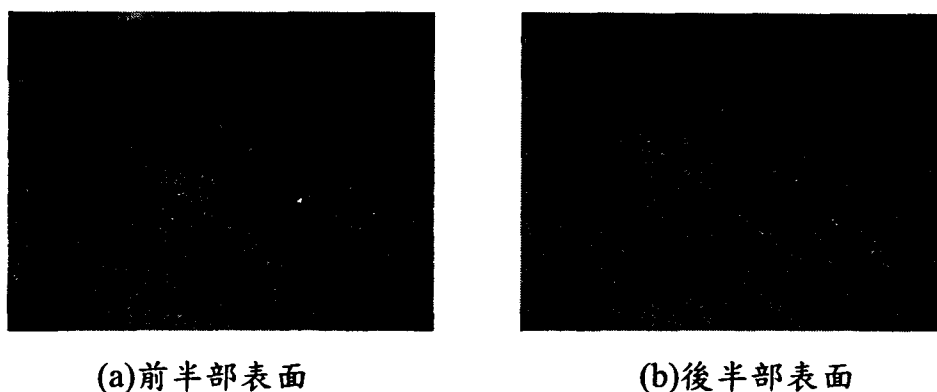


圖 4.11 管狀電極在未經任何補償工件表面實際加工情況

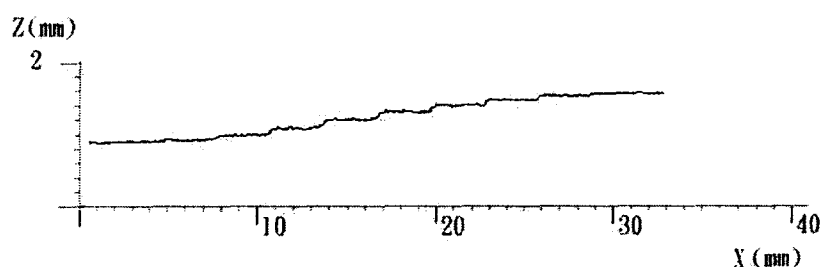


圖 4.12 管狀電極加工工件表面沿 x 加工方向之輪廓變化

由上節可獲得管狀電極的穩定輪廓，且中空部分之特性使對應之工件表面具有一底面平面之溝槽，圖 4.13 為利用 Pro/Engineer CAD 軟體模擬穩定輪廓圓柱與管狀電極作層狀加工後工件表面結果，由圖觀察出若能有效利用此種平面特性於以 2D 層狀加工下，並配合適當之 z 軸補償量誤差，可在較小的 overlap 長度及較深之加工深度下，維持穩定電極輪廓並獲得均一深度的層狀金屬去除，而反觀圓柱電極使用於以 2D 層狀加工為主的放電銑削結果，對於單層加工則難以獲得完全均一深度之金屬去除，因此使用管狀電極確實能解決不少工件幾何及形狀精度上之缺點。

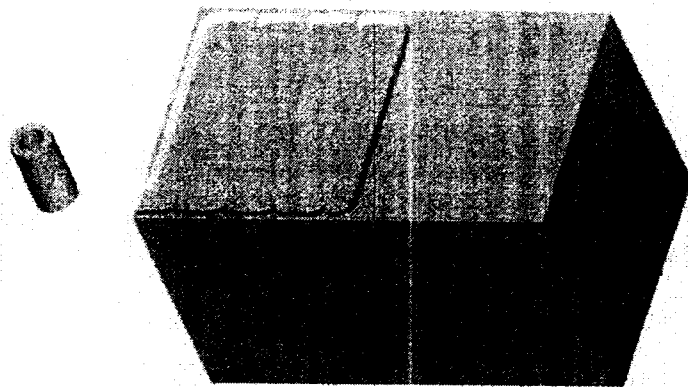


圖 4.13 管狀電極配合長度補償後，銑削加工結果示意圖

由上節實驗結果可發現管狀電極在適當的 z 軸長度補償下，除可獲得穩定的電極輪廓，並可維持均一深度的層狀金屬去除，此種加工方式可應用於較大加工深度之 layer-by-layer 之放電銑削，因此本實驗將利用穩定輪廓的管狀電極應用於 layer-by-layer 為主之 3D 輪廓加工，因此除了可使用不斷偵測方式來維持加工深度外，提出另一可能之方式，以減少電極位置之偵測次數，由圖 4.10 所示可獲得管狀電極之穩定輪廓的加工前端面積(frontal area)接近梯形輪廓，假設 A_L 為電極銑削前進方向的投影面積， L 為加工前進的總行程量， A_e 為管狀電極的斷面積， L_e 為電極的補償長度，EWR 為電極磨耗比，如圖 4.14 所示，欲維持均一加工深度時，因此：

金屬去除體積約為 $A_L \times L$

因為工件被去除的溝槽輪廓截面積 = 穩定輪廓的管狀電極的前端面積 + 電極與工件溝槽輪廓間之間隙面積，但在較大加工深度時，間隙面積遠小於電極的前端面積，故可用穩定輪廓的管狀電極的前端面積表示工件被去除的溝槽輪廓截面積。

電極磨耗體積為 $A_e \times L_e$ 。

所以

$$A_L \times L \times EWR = A_e \times L_e$$

$$L_e/L = A_L/A_e \times EWR$$

即可獲得在加工行程下，電極 z 軸即時補償量。

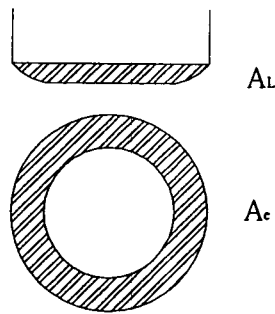


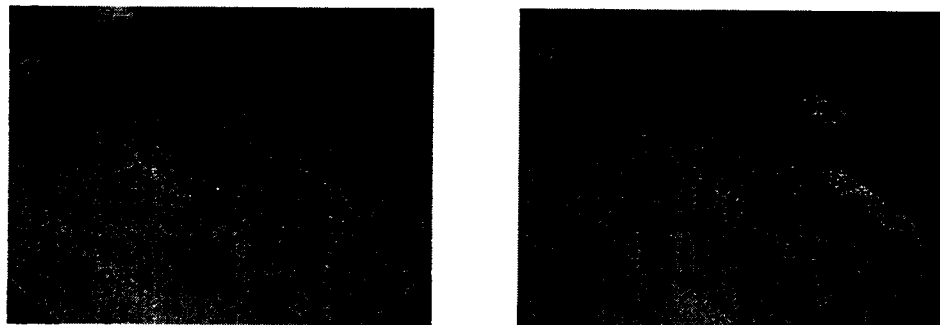
圖 4.14 管狀電極加工示意圖

上述之電極磨耗比 EWR 是由實驗前的試加工得知，即在圖 9 每行程的補償量趨於穩定值時，量測加工前後電極、工件重量，可知電極消耗量、金屬去除量，再分別除以電極、工件之密度，得出電極磨耗體積與金屬去除體積，電極磨耗比即電極磨耗體積與金屬去除體積之比值。

因此對於在放電銑削的過程中，若能有效預知加工方向的投影面積，並配合一穩定之電極磨耗比，則在對一般溝槽加工時獲得適當行程的電極長度補償，可將電極維持於穩定之輪廓，而在對單層面加工時，對於不同 overlap 長度之變化，所造成對每一層之加工行程以及電極磨耗比值的改變，亦會改變電極長度即時補償量，因此若能有效掌握在每一行程時給予適時補償，電極將可維持穩定輪廓並期望能對單層銑削獲得均一加工深度，如此將有利於以 layer-by-layer 為主之放電銑削加工。

圖 4.15 為採用 z 軸即時補償加工，在每加工 30mm 行程下補償 148 μm 後，獲得之加工結果及沿量測方向的表面輪廓變化，由圖可看出

使用管狀電極配合電極長度之補償策略可獲得良好之加工表面，圖 4.16 為工件表面沿 x 方向之輪廓變化，圖 4.17 為工件表面沿 y 方向之輪廓變化，其高低誤差最大值為 0.043mm，由結果觀察使用管狀電極配合 z 軸即時補償策略作為放電銑削之基礎，較使用圓柱電極來得有利，本節主要目的在確定即時 z 軸長度補償策略之可行性，所得結論是以穩定輪廓管狀電極並配合 z 軸長度即時補償，可滿足加工之要求，此即為本文建立的電極消耗之補償策略。對於後續加工路徑間距對放電銑削加工之影響，需在均一加工深度與使用穩定輪廓管狀電極並配合 z 軸長度即時補償策略下，進行測量與分析放電銑削之各項加工特性。



(a)前半部表面

(b)後半部表面

圖 4.15 管狀電極在長度補償下，工件表面實際加工情況

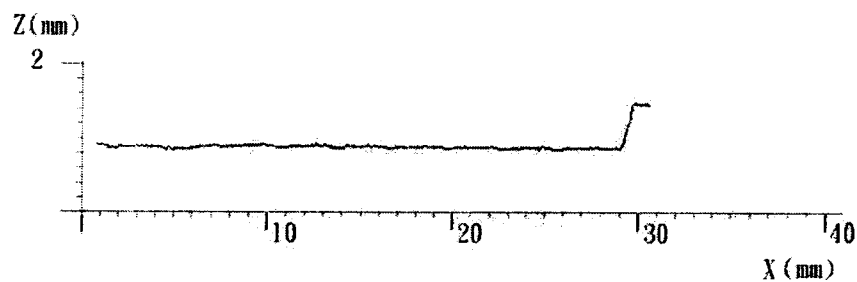


圖 4.16 管狀電極補償後工件表面沿 x 方向之輪廓變化

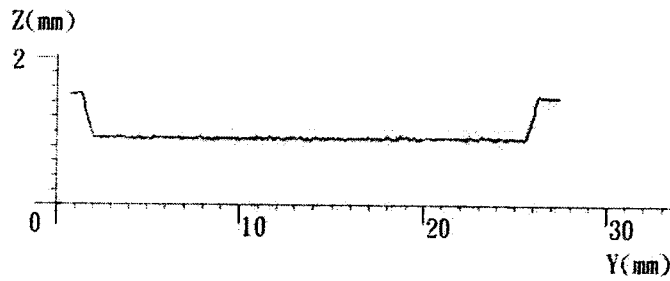


圖 4.17 管狀電極補償後工件表面沿 y 方向之輪廓變化

4.2 決定適當之加工路徑間距

本實驗的放電銑削是利用管狀電極加工工件，因為電極旋轉所以電極消耗是均勻對稱，在深度方向補償電極長度消耗，使電極維持穩定之輪廓，圖 4.18 為電極之穩定輪廓，當電極沿圖 4.19 加工之路徑加工，配合建立的電極消耗補償策略，加工後的工件表面是平面並維持一定加工深度，圖 4.20 為加工後溝槽的輪廓，藉由一層又一層的加工，可獲得工件初步的輪廓形狀。

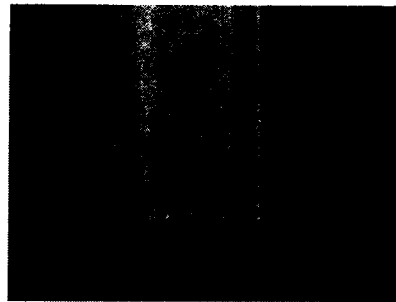


圖 4.18 電極之穩定輪廓

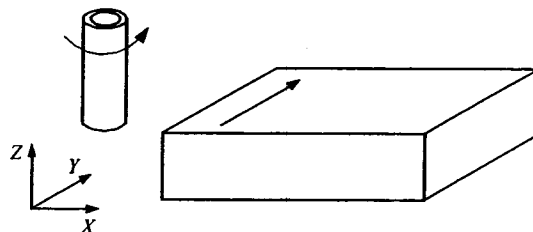


圖 4.19 加工之路徑

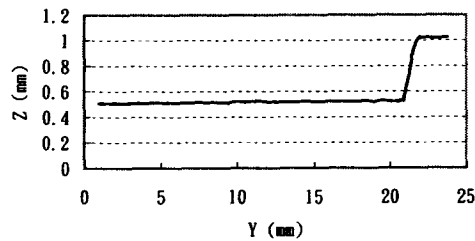
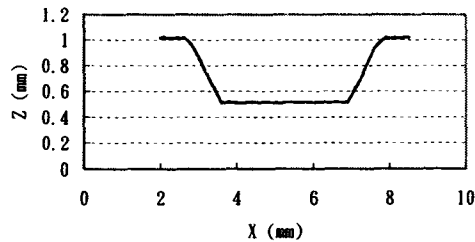


圖 4.20 加工後溝槽的輪廓

4.2.1 加工路徑間距對加工面之影響

圖 4.21 為不當的加工路徑間距，過大的加工路徑間距，則在加工面產生突起的未加工部分，對往後的精加工造成時間增加的困擾，因此加工路徑間距以小於電極內徑為原則，確保加工面的平坦。圖 4.22 為加工路徑的 overlap 示意圖。圖 4.23 為加工路徑間距 3.2mm 加工後的工件輪廓，XZ 輪廓的加工面高度差為 0.017mm，YZ 輪廓的加工面高度差為 0.022mm。

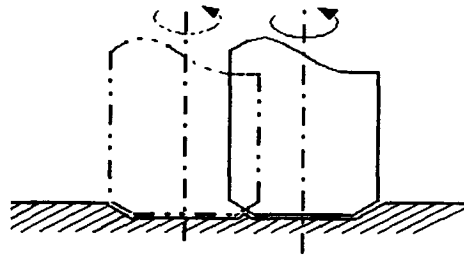


圖 4.21 不當的加工路徑間距

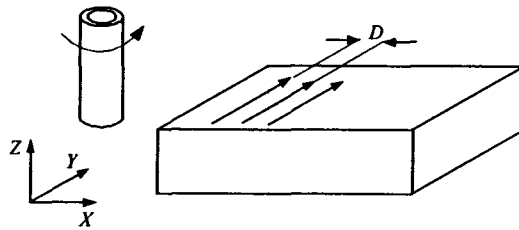


圖 4.22 加工路徑的 overlap

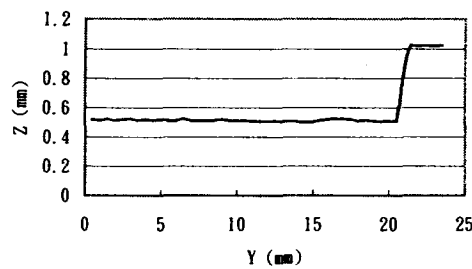
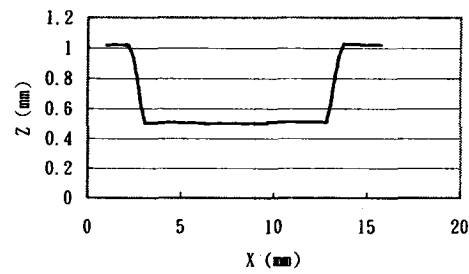


圖 4.23 加工路徑間距 3.2mm 加工後的工件輪廓

4.2.2 加工路徑間距對加工特性之影響

圖 4.24 為加工路徑間距對金屬去除率之影響，路徑間距愈大金屬去除率愈高，在加工參數組合條件不變，有較大的前端面積(frontal electrode area)會有較高的金屬去除率。路徑間距小，加工的前端面積

小，電流密度高，易產生集中放電現象，因此金屬去除率因而下降。若考量較高的金屬去除率，以加工路徑間距 3.2mm 較合適。

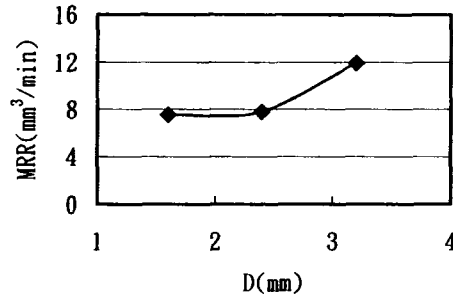


圖 4.24 加工路徑間距對金屬去除率之影響

圖 4.25 為加工路徑間距對電極消耗比之影響，當路徑間距愈小，電極消耗比愈大。因有相同的放電尖峰電流，前端面積小，則有較高電流密度，電極溫度較高，導致電極消耗比較大，後節提到的短路波及電弧波的比率較高，也會造成電極消耗比較大。若考慮較低的電極消耗比，以加工路徑間距 3.2mm 較佳。

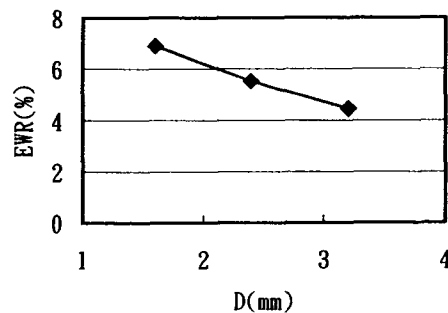


圖 4.25 加工路徑間距對電極消耗比之影響

圖 4.26 加工路徑間距對工件表面粗糙度之影響，沿加工路徑方向即 Y 方向的表面粗糙度無太大差異。而垂直加工路徑方向即 X 方向的表面粗糙度較高些，這與加工路徑重疊時會有明顯的路徑痕跡有關，造成 X 方向的表面粗糙度較大。

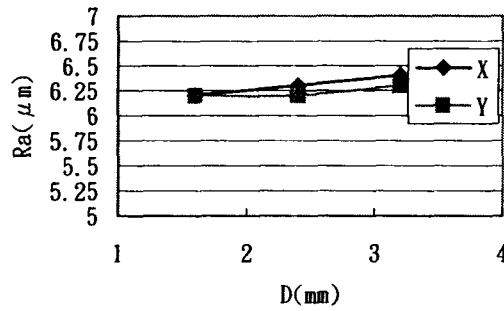


圖 4.26 加工路徑間距對工件表面粗糙度之影響

4.2.3 加工路徑間距對放電波列之影響

圖 4.27 加工路徑間距對 $T_d=0$ 放電波比率之影響，加工路徑間距大時，加工面積大，放電加工較穩定，不正常的放電波的比率較低。此時具有較高的金屬去除率及較低的電極消耗比。

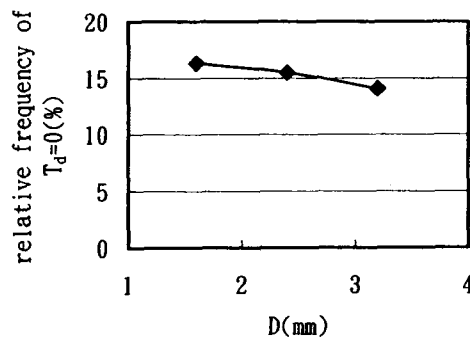


圖 4.27 加工路徑間距對 $T_d=0$ 放電波比率之影響

圖 4.28 加工路徑間距對 T_d 分佈之影響，加工路徑間距 3.2mm 時，放電延遲時間 T_d 小於 $70 \mu s$ 的放電波比率較高，對金屬去除率的貢獻較大；相對的加工路徑間距愈小時，該區間放電波佔的比率較低，因此金屬去除率較小。

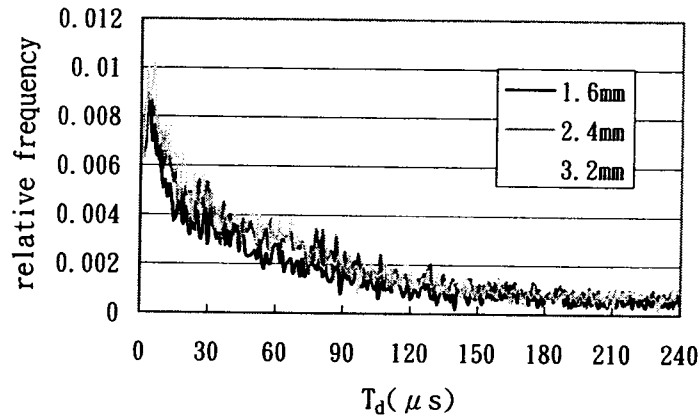


圖 4.28 加工路徑間距對 T_d 分佈之影響

圖 4.29 加工路徑間距對 \bar{T}_d 之影響， \bar{T}_d 是正常波的平均放電延遲時間，因加工路徑間距小，排渣效果佳，渣屑濃度低，所以放電延遲時間長， \bar{T}_d 因而較長。

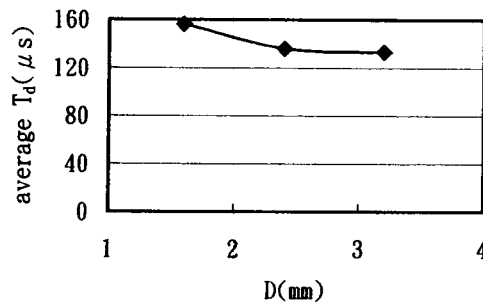


圖 4.29 加工路徑間距對 \bar{T}_d 之影響

圖 4.30 加工路徑間距對總放電頻率之影響，加工路徑間距大，總放電頻率較高，且不正常的放電波比率較低，故金屬去除率高。

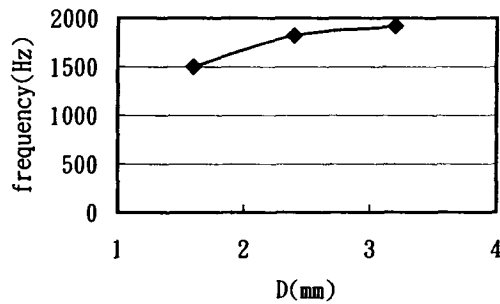


圖 4.30 加工路徑間距對總放電頻率之影響

圖 4.31 加工路徑間距對各種波型之影響，加工路徑間距大，加工面積大，加工穩定性高，正常波佔的比率(RN)較高，電弧波佔的比率(A 電弧波 RA 及 B 電弧波 RB)較低，短路波佔的比率(RS)極低不及 1%。金屬去除率主要是由正常波放電造成，正常波佔的比率較高，金屬去除率較大；電弧波及短路波高，電極消耗比較大。

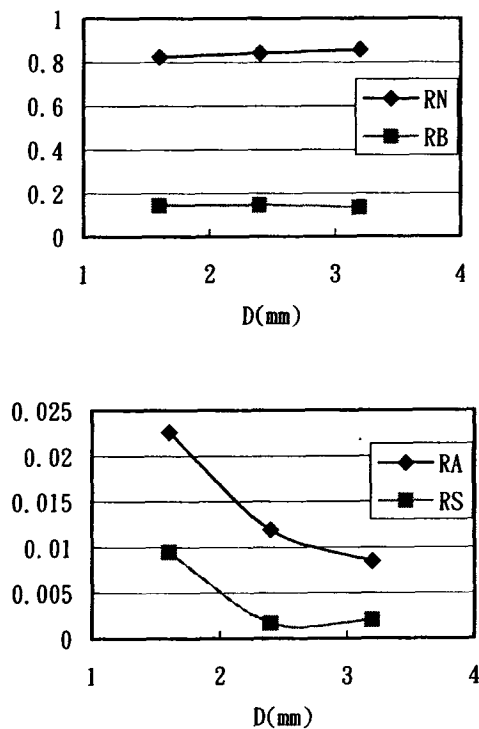


圖 4.31 加工路徑間距對各種波型之影響

第五章 結論與建議

本文主要在研究放電銑削電極消耗的補償策略，以獲得工件所需之加工精度要求。透過實驗規劃觀察比較圓柱與管狀電極應用於放電銑削在 z 軸不補償及補償時，電極的消耗模式中，建立適合加工的電極消耗補償策略，是以穩定輪廓的管狀電極配合 z 軸即時補償，作為後續加工基礎，並分析加工路徑間距對工件的加工面、放電加工特性及放電波列之影響，本章將對於前述之實驗結果所獲得的結論，綜整分述如下：

1. 經實驗對圓柱電極與管狀電極進行輪廓消耗觀察，可獲得圓柱電極與管狀電極電極輪廓之變化，並使用配合 z 軸長度即時補償可在一定加工深度下，分別可獲得圓柱與管狀電極之穩定輪廓。
2. 放電銑削電極消耗的補償策略，是以穩定輪廓的管狀電極配合 z 軸即時補償。故除使用管狀電極在極淺之加工深度 layer-by-layer 的 2D 加工下，可減少電極輪廓變化所衍生之相關問題外；在加工深度 0.5mm 下配合 z 軸即時補償亦可獲得穩定輪廓，因此可作為以 layer-by-layer 為主的放電銑削輪廓加工之使用。
3. 對工件的加工面而言，加工路徑間距應小於空心電極之內徑，避免在加工面上留下突起的未被去除材料，增加以後精加工的時間。
4. 對放電加工特性而言，當加工路徑間距小於電極內徑時，加工路徑間距愈大，其金屬去除率愈高，電極消耗比愈低，表面粗糙度則無太大差異，但沿加工路徑方向的表面粗糙度較垂直加工路徑方向的表面粗糙度略小。加工時對加工特性作整體考量以加工路徑間距大

者較合適。

5. 對放電波列而言，加工路徑間距愈大，加工面積大，加工穩定性高， $T_d=0$ 放電波比率愈低，正常波的平均放電延遲時間縮短，總放電頻率愈高，正常波佔的比率較高，電弧波佔的比率較低，短路波佔的比率極低不及 1%。

經由序列之實驗，發現對於一般三軸 CNC 放電加工機在加裝旋轉軸應用於放電銑削，由於應用極小加工深度下，大量 NC 程式撰寫不易，因此本實驗對於大加工深度討論其電極輪廓維持穩定之可行性，由實驗結果證明穩定輪廓的管狀電極，在大加工深度配合即時 z 軸補償亦可應用於 layer-by-layer 之 3D 輪廓加工上，並可降低 NC 程式之撰寫上之困難，然亦未能真正解決 NC 程式之撰寫困難之缺點，此部份可能為後續研究改良之重點。經由放電銑削電極輪廓變化對工件形狀精度之瞭解，進而建立電極消耗的補償策略，並探討加工路徑間距對工件的加工面、放電加工特性及放電波列之影響，期能對放電銑削有所認識，最後希望經由本論文之研究，能提供研究大尺寸等級的放電銑削學者與國內放電加工機廠商對於開發放電銑削專用機用途上有所裨益。

参考文献

- [1]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, "3D Micro - EDM with simply shaped electrode," Proceedings of 3rd France-Japan & 1st Europe-Asia Conference on Mechatronics, 1986, pp.519-523.
- [2]T. Yuzawa, T. Magara, Y. Imai, T. Sato, "Micro shape generating EDM with slim electrodes," Proceedings of Annual Meeting of Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 1997, pp.65-66.
- [3]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, "3D EDM using simple electrodes – application of uniform wear method to normal size molds," Proceedings of Annual Meeting of Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 1997, pp.67-70.
- [4]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, "3D Micro - EDM with simply shaped electrode (1st report)," Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 31, 66, 1997, pp.18-24.
- [5]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, "3D Micro - EDM with simply shaped electrode (2st report)," Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 31, 67, 1997, pp.14-22.
- [6]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, "3D micro - EDM with simple shape electrode, part 1 -machining of cavities with sharp corners and electrode wear compensation," International Journal of Electrical Machining, No.3, 1998, pp.7-12.
- [7]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, "3D micro - EDM with simple shape electrode, part 2-machining and error analysis of conical and spherical cavities," International Journal of Electrical Machining,

参考文献

- [1]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, “3D Micro - EDM with simply shaped electrode,” Proceedings of 3rd France-Japan & 1st Europe-Asia Conference on Mechatronics, 1986, pp.519-523.
- [2]T. Yuzawa, T. Magara, Y. Imai, T. Sato, “Micro shape generating EDM with slim electrodes,” Proceedings of Annual Meeting of Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 1997, pp.65-66.
- [3]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, “3D EDM using simple electrodes – application of uniform wear method to normal size molds,” Proceedings of Annual Meeting of Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 1997, pp.67-70.
- [4]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, “3D Micro - EDM with simply shaped electrode (1st report),” Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 31, 66, 1997, pp.18-24.
- [5]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, “3D Micro - EDM with simply shaped electrode (2st report),” Japan Society of Electrical-Machining Engineers , 31, 67, 1997, pp.14-22.
- [6]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, “3D micro - EDM with simple shape electrode, part 1 -machining of cavities with sharp corners and electrode wear compensation,” International Journal of Electrical Machining, No.3, 1998, pp.7-12.
- [7]Z. Yu, T. Masuzawa, M. Fujino, “3D micro - EDM with simple shape electrode, part 2-machining and error analysis of conical and spherical cavities,” International Journal of Electrical Machining,

- No.3, 1998, pp.71-78.
- [8]T. Yuzawa, T. Magara, A. Goto, Y. Imai, T. Sato, T. Sendai, "Contouring micro-EDM using a slim electrode," *Journal of Electrical-Machining Technology*, 19, 63, 1995, pp.1-6.
- [9]T. Masuzawa, M. Ujino, K. Kobayashi, "Wire electro- discharge grinding for micromachining," *Annals of the CIRP*, 34/1, 1985, pp.431-434.
- [10]陳順同, 立式微小 CNC 綜合放電加工機之開發與微小 3D 零組件之製造研究, 雲林技術學院機械工程研究所碩士論文, 1997.
- [11]張義芳&邱志浩, 高速創成放電加工伺服控制研究, *機械月刊* 第二十六卷第八期, 2000, pp.400-407.
- [12]J. -P. Kruth, B. Lauwers, W. Clappaert, "Study of EDM pocketing," *EDM Technology*, Vol.4, 1996, pp.31-40.
- [13]P. Bleys, J. -P. Kruth, and B. Lauwers. "Milling EDM of 3D shapes with tubular electrodes," *Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining*, 2001, pp 555-567.
- [14]P. Bleys and J. -P. Kruth. "Machining complex shapes by numerically controlled EDM," *International Journal of Electrical Machining*, No.6, 2001, pp 61-70.
- [15]P. Bleys, J. -P. Kruth, B. Lauwers, A. Zryd, R. Delpretti, C. Tricarico, "Real-time wear compensation in milling EDM," *Annals of the CIRP*, 51/1, 2002, pp.157-160.

- [16]E. K. McKell, K. E. Kohkonen, "Comparisons of rotating and non-rotating electrodes on a ram electrical discharge machine," EDM Technology, Vol.5, 1998, pp.3-10.
- [17]T. Kaneko, M. Tsuchiya, "Three-dimensional numerically controlled contouring by electric discharge machining with compensation for the deformation of cylindrical tool electrodes," Precision Engineering, Vol.10, No.3, 1988, pp.157-163.
- [18]T. Kaneko, M. Tsuchiya, A. Kazama, "Improvement of 3D NC contouring EDM using cylindrical electrodes and optical measurement of electrode deformation and machining of free-curves," EDM Technology, Vol.3, 1995, pp.43-46.
- [19]R. Snoeys, "Correlation between electro-discharge machining data and machining setting," Annals of the CIRP, 24, 1, 1975, pp.83-88.
- [20]R. Snoeys, J. P. Kruth, D. Dauw, "Adaptive control techniques for the optimization of EDM," Proceedings of the 6th International Symposium for Electromachining, 1980, pp.25-30.
- [21]H. E. de Bruyn, A. J. Pikelharing, "Has the «delay time» influence on the EDM-process?" Annals of the CIRP, 31, 1, 1982, pp.103-106.
- [22]C. Çogun, "A technique and its application for evaluation of material removal contributions of pulses in electric machining (EDM)," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 30, 1, 1990, pp.19-31.
- [23]C. Çogun, M. Savsar, "Statistical modeling of properties of

discharge pulses in electric discharge machining,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 30, 3, 1990, pp.467-474.

[24]M. Weck, 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*, 41, 1, 1992, pp.243-246.

[25]邱奕麟，放電銑削加工特性之研究，臺灣大學機械研究所碩士論文，2002.