

以六標準差導入粉末冶金模具製程品質提昇之研究

林文燦¹ 蔣義心² 周永燦³ 李偉正⁴

¹國立勤益科技大學工業工程與管理系教授兼院長

²國立勤益科技大學工業工程與管理系碩士班

³中原大學工業工程系助理教授

⁴中原大學工業工程系博士班

台中縣太平市中山路一段 215 巷 35 號

E-mail: lin505@ncut.edu.tw

摘 要

粉末冶金模具之精度與其產品之優劣息息相關，目前粉末冶金所製造的產品範圍越來越廣泛，所應用的領域，除了汽、機車、家電等產業更擴大至醫療、電子、航太、國防等相關產業，生產之產品精度不斷提升，面對全球市場激烈之競爭，模具品質格外顯得重要。

線切割加工為粉末冶金模具製造時常用之加工方法，而且是影響品質之關鍵，本研究運用六標準差 (6-Sigma) 的 DMAIC 模式，首先將線切割加工製程流程化，再經文獻以及實務之經驗加以探討，分析造成精度不良之因素，並結合田口品質工程的參數設計方法，找出粉末冶金模具在線切割加工製程時最佳化的實驗水準組合。

本研究的主要貢獻為運用 6-Sigma 之改善步驟 DMAIC 五階段，結合田口品質工程的參數設計方法，藉由個案之實證研究，獲得改善粉末冶金模具製程能力之模式，並找出影響線切割加工製程品質之相關因子。研究結果顯示製程能力 Cpk 值由 0.73 顯著提升至 1.46，確實提升製程能力及模具精度，本研究之研究結果可供實務上提升品質的參考。

關鍵字：六標準差 (6-Sigma)、粉末冶金 (Powder Metallurgy)、線切割 (Wire Electrical Discharge Machining, WEDM)

1. 前言

隨著材料科技不斷的進步，以各種不同金屬粉末為原料，經過攪拌混合、沖壓成型、燒結、後續加工等程序所發展的粉末冶金工業也隨之新興成長，粉末冶金應用領域廣泛，是金屬工業未來發展的重點。粉末冶金工業發展的過程中，模具技術是影響品質的關鍵之一。模具屬於訂單生產形態，粉末冶金模具之特性為少量多樣，精密度

要求較一般模具高，為產品量產過程中不可或缺之技術與工具。[3] 近年來隨著機械工業的發展進步，各種高硬度、高韌性、耐衝擊的合金材料運用的比例增高，然而這些合金材料之加工不易，傳統加工方式材料去除率不佳，也因此新的加工方法如電解研削法、超音波加工法及放電加工法等非傳統加工方式就被廣泛的應用。其中線切式放電加工以線電極當作工具，利用電能能量轉換，用高溫熔融的方式去除材料，屬於非接觸式加工，故不受工件硬度、韌性影響，在使用上常用於超硬合金、導電性精密陶瓷及等材料。因其高精密度高、加工之表面之耐蝕與耐磨性佳，對於模具業的發展有相當的幫助 [7]。

本研究之研究動機是運用六倍標準差之 DMAIC 手法來導入線切割粉末冶金模具製程，嘗試於現有環境下，找出最佳的製程實驗結果，並期望透過此六標準差解決問題的手法，改善粉末冶金模具製程能力並提升其輪廓精度。

在粉末冶金模具中模具的輪廓精度為一項重要的品質指標，因模具不是最終的產品，其精密度要求當然是希望越高越好，在業界中也因為產品精度不斷提升以及減少後續再加工的要求下，對於模具輪廓精度的要求也相對的更為注重。本研究之目的有三：(1) 探討將六倍標準差之 DMAIC 手法結合田口實驗設計中的參數設計，提供一改善粉末冶金模具製程能力的模式；(2) 將此模式導入改善提升粉末冶金模具製程能力之過程中，以有系統的分析方法找出影響製程的參數，據以探討影響品質的關鍵因子，以獲得最佳化製程；(3) 以實證方式提升模具之精密度，並供實務上之應用參考。

2. 文獻探討

工業界技術水準與模具是息息相關的，因線切割放電加工能加工複雜而精密度高的工件，在模具加工時，扮演著重要的角色，而線切割放電加工之參數值為加工精度之主要關鍵因素。[5]

Dekeyser 等人 [1] 提出造成隅角誤差主要由於放電產生作用力所造成之線極振動現象、電場過度集中造成隅角產生過切現象、線極落後於上下導具產生線撓曲現象。

許文政 [2] 提出控制放電功率與調整線張力相結合的隅角控制策略，以改善隅角加工精度，在線電極進入轉角頂點前將放電功率調降並逐漸提高線張力，使線撓曲及振幅減小，當線電極轉換方向後，則依照金屬去除率變化調升放電功率並且降低線張力。

莊宗仁 [4] 提出結合軌跡補償與加工參數調整方法以改善隅角加工精度，應用田口式品質設計實驗計畫法來探討加工參數與隅角形狀誤差間的關係以及加工參數對進給率之影響，從變異數分析的結果得知，線張力與沖水壓力是對於隅角精度影響最顯著因子。

陳信憲 [6] 以結合 6 σ 手法與田口實驗設計對改善製程能力之研究，運用 6 σ 品質系統之 DMAIC 手法為分析的架構，結合田口方法的直交實驗，導入製程能力分析(C_{PK})

的過程，結果發現經由 C_{PK} 的提高可以用來驗證製程能力的改善。

蔡宗峰等 [10] 運用六標準差手法於配向膜塗佈製程能力改善之研究，定義配向膜塗佈製程中之膜厚為其改善項目，並進行分析探討，發現相較於原有製程之 C_{PK} 值，最佳製程參數之 C_{PK} 值明顯提升。由此可推論運用六標準差手法可作為液晶顯示器面板製程能力改善之依據。

葉秋鈴 [8] 以六標準差應用於導光板印刷製程之最佳研究中運用實驗設計中的反應曲面法，找到最佳的製程參數組合，驗證導光板印刷製程之製程能力，並將最佳參數標準化作為管制項目。使導光板印刷製程明顯得到改善，並且更為穩定。

曾英富 [9] 應用六標準差的專案手法改善塗裝製程不良率研究中，以六標準差管理手法的 DMAIC 步驟進行塗裝製程的改善，首先找出關鍵品質特性，衡量量測系統及製程能力，歸納出影響製程的關鍵因子，結果顯示在塗裝失敗成本由 808,498 元/年，降低為 268,985 元/年。

3. 研究方法與架構

本研究蒐集 6-Sigma 與線切割之相關文獻加以整理歸納，做為本研究之理論基礎架構如圖 1，運用 6-Sigma 之觀念、改善工具及方法，透過實證研究，期能提供業界在實務上相關應用。



圖 1 研究架構

3.1 定義問題 (Define)

在現今線切割技術不斷提升下，隅角的精度不斷改善，但實際加工時仍有其盲點，以符合 ISO 230-1:1996 以及 ISO 230-2:1997 精度檢驗標準之 AGIECUT EXCELLENCE eCut2 線切割放電加工機為例，如圖 2 所示，加工高度 30mm 以內之工件，T 值之誤差範圍在 $1\mu\text{m}\sim 6\mu\text{m}$ 之間。本研究就某公司實際加工之情況加以討論，T 理想值為零，上界規格為 $1.4\mu\text{m}$ ，目前現況製程能力 C_{PK} 值為 0.73，所預期改善之目標為 C_{PK} 值達到 1.33 以上。本研究以 T 值為關鍵品質特性。首先將線切割製程予以流程化如圖 3，期望能從流程圖中找到影響製程的關鍵因素並加以改善。

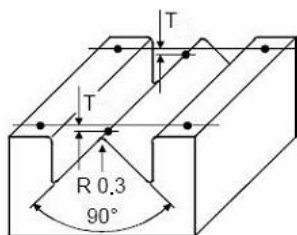


圖 2 T 值示意圖

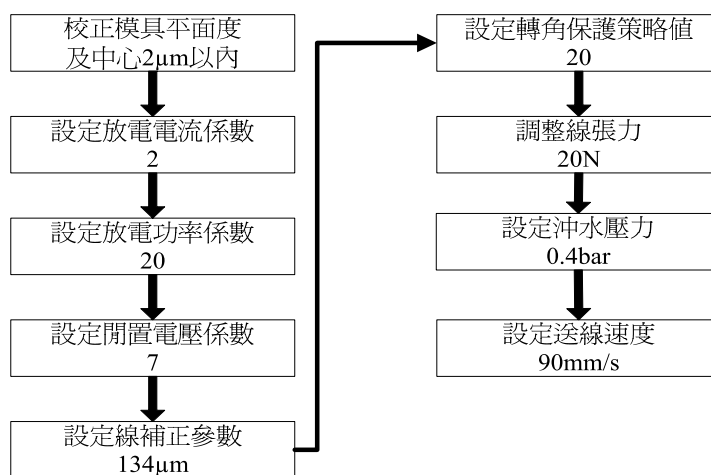


圖 3 線切割加工流程圖

3.2 現況衡量 (Measure)

本研究之量測設備為日本 Mitutoyo/CV-3000S4 輪廓量測儀，依規定定期校驗，品值穩定。經蒐集近況相類似二十件模具之 T 值如表 1，並進行現況製程能力分析。一般以製程能力(C_{PK})為評價指數， $C_{PK} < 1$ 表示不合格、 $1 \leq C_{PK} < 1.33$ 表示警告、 $C_{PK} \geq 1.33$ 表示合格，如圖 4，現況 C_{PK} 值為 $0.73 < 1.33$ ，表示製程能力不足，仍有改善之空間。

表 1 現況數據

現況 T 值 (μm)				
1.1	1.2	1.3	1.1	
1.0	1.1	1.2	1.0	
1.2	1.4	1.2	1.2	
1.1	1.1	1.3	1.1	
1.0	0.9	1.3	1.0	

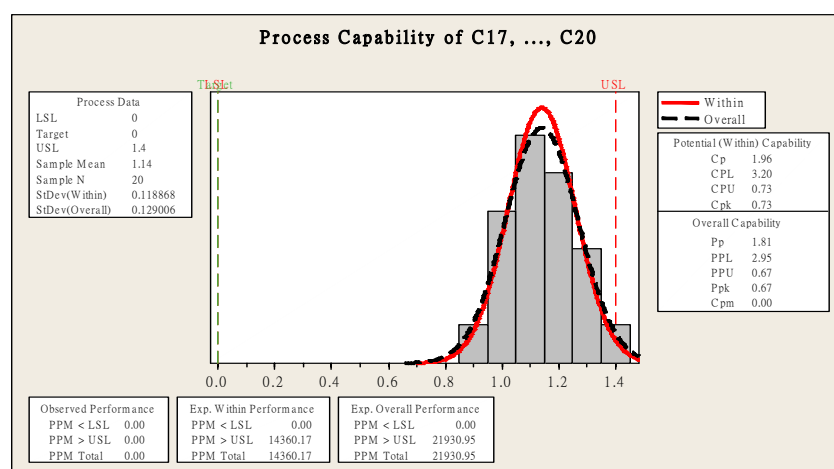


圖 4 現況製程能力計算結果圖
資料分析 (Analyze)

因子分析

為了經由相關文獻探討，以及機器製造廠商之專家與資深工程師小組討論後，將影響線切割加工製程的因子解析，在參數設定方面：有放電功率係數、轉角保護策略值、線張力、沖水壓力等因子。在操作流程方面：有模具平面度、模具中心校正、放電電流係數、閒置電壓係數、線補正參數、送線速度、環境溫度等因子。詳如表 2。

表 2 析因子分析表

		因子	要求規格	現況
可控因子	子 固 定 因	放電功率係數 (P)	15~25	20
		轉角保護策略值 (Str)	0~25	10
		線張力 (Fw)	18~22N	20N
		沖水壓力 (p)	0.2~0.6bar	0.4bar
		模具平面度及中心	0~2μm	2μm
	子 控 制 因	放電電流係數 (I)	2~18	2
		閒置電壓係數 (UHP)	5~9	7
		線補正參數 (OFS)	134~256μm	134μm
		送線速度	45~195mm/s	90 mm/s
環境		製造環境採氣冷式空調系統由電腦自動控制 冰水溫度不超過 14℃，室內溫度設為 24℃		

參數設計

參數設計又稱穩健設計 (Robust Design)，目的是在眾多的參數組合中，找出一組最適切的參數水準組合，目標是使平均值與目標值趨於一致，且變異數越小越好。

為了使模具精度提升(T 值越小)，本研究採用田口參數設計法，以得到線切割最適切之參數組合。經由前述之參考文獻，以及實驗機器之機器製造廠商之專家師與現場資深工程師討論後，決定採用放電功率係數、轉角保護策略值、線張力、沖水壓等四個控制因子，每個控制因子皆為三個水準，不考慮因子間交互作用，故選擇之直交表。將因子配置於直交表上，進行三水準四因子之實驗如表 3，直交表如表 4。

表 3 控制因子與水準表

因子 \ 水準	水準 1	水準 2	水準 3
A. 放電功率係數 (P)	16	20	24
B. 轉角保護策略值 (Str)	16	20	24
C. 線張力 (Fw)	19N	20N	21N
D. 沖水壓力 (p)	0.3bar	0.4bar	0.5bar

表 4 實驗因子與水準配置 $L_9(3^4)$ 直交表

因子	A	B	C	D	放電功率係數 (P)	轉角保護策略值 (Str)	線張力 (Fw)	沖水壓力 (p)
1	1	2	3	4	16	16	19	0.3
2	1	2	2	2	16	20	20	0.4
3	1	3	3	3	16	24	21	0.5
4	2	1	2	3	20	16	20	0.5
5	2	2	3	1	20	20	21	0.3
6	2	3	1	2	20	24	19	0.4
7	3	1	3	2	24	16	21	0.4
8	3	2	1	3	24	20	19	0.5
9	3	3	2	1	24	24	20	0.3

實驗改善 (Improve)

實驗設備與材料

本研究採用之實驗設備與材料如圖 5，使用機器為 AGIECUT EXCELLENCE eCut2 線切割放電加工機，量測設備為日本 Mitutoyo/CV-3000S4 輪廓量測儀，線電極材料性質如表 5，而使用之材料為粉末冶金模具常用之 ASP 2023 材料，如表 6。

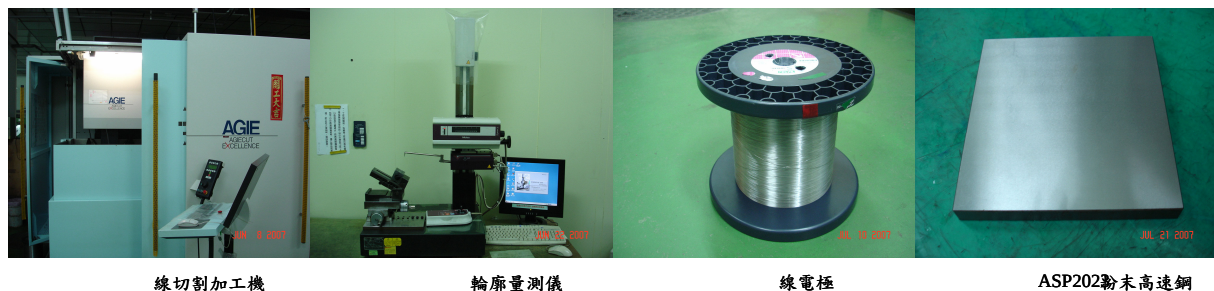


圖 4 實驗設備與材料

表 5 SD 鍍鋅線電極性質表

線徑 (mm)	線徑公差 (mm)	張力強度 (N/mm ²)	延展性 (%)	導電性 (%IACS)
0.25	± 0.001	875	2	20

表 6 ASP 2023 化學組成成分表

C (%)	Cr (%)	Mo (%)	W (%)	V (%)
1.28	4.2	5.0	6.4	3.1

實驗步驟

1. 加工路徑之程式製作並設定相關之參數。
2. 使用酒精及相關工具清洗工件。
3. 線電極垂直校正，高度 150mm 之垂直校正精度需在 2 μ m 之內。
4. 架設並校正工件，模具之平面度與中心位置需在 2 μ m 之內。
5. 將工件浸入去離子水中，準備進行實驗。
6. 按照程式之加工路徑及設定之參數進行實驗。
7. 實驗結束後取下工件，使用輪廓量測儀量測，並紀錄之。
8. 將實驗之回應值加以分析，推定最適條件。
9. 將推定最適條件參數輸入，再進行確認實驗。
10. 在依前項程序完成實驗並將結果紀錄之。

實驗數據分析

本研究之實驗根據 直交表配置，並重複實驗 4 次，其實驗回應值數據如表 7。

表 7 實驗回應值

子	A	B	C	D	T 值(μ m)			
L ₁	1	1	1	1	1.9	2.0	1.7	1.9
L ₂	1	2	2	2	1.6	1.9	1.7	1.9
L ₃	1	3	3	3	1.5	1.6	1.8	1.7
L ₄	2	1	2	3	1.7	1.5	1.6	1.6
L ₅	2	2	3	1	1.1	1.1	1.2	1.0
L ₆	2	3	1	2	1.3	1.2	1.3	1.4
L ₇	3	1	3	2	1.4	1.5	1.3	1.3
L ₈	3	2	1	3	1.3	1.4	1.5	1.4
L ₉	3	3	2	1	1.0	0.9	0.9	1.0

訊號雜音比(S/N)分析

品質在田口方法中,品質特性區分為望小特性(the-lower-the-better)、望大特性(the-higher-the-better) 及望目特性(the -nominal-the-better)三種特性。本研究應用望小特性來求得一組最佳實驗參數組合，使 T 值最小(理想值為 0)。如將 S/N 比單位以分貝(dB)表示，望小特性 S/N 比定義為：

$$(一) \quad SN_{STB} = -10 \log (\text{MSD}) = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

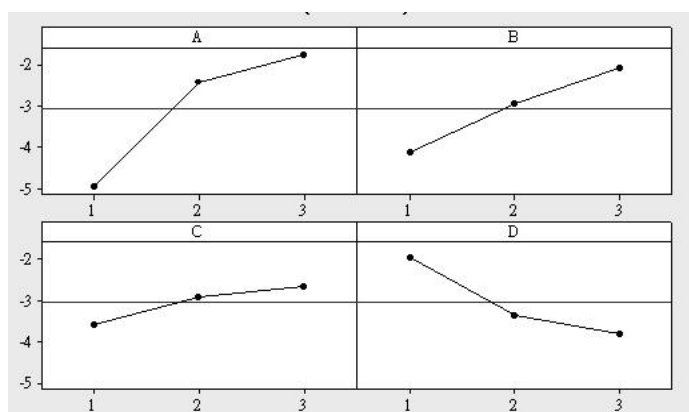
SN 比乘上負號，可達成 MSD(品質損失)越小則 SN 比會越大的一般性原則。

根據上式我們得以求得 SN 比如表 8 所示，然後在繪製圖 6 SN 比之因子效果圖，並可得知，SN 比值較大的因子組合為 A3 B3 C3 D1。

表 8 SN 比表

直	A	B	C	D	SN 比
---	---	---	---	---	------

交表					
1	1	1	1	1	-5.47467
2	1	2	2	2	-5.00717
3	1	3	3	3	-4.36957
4	2	1	2	3	-4.09087
5	2	2	3	1	-0.84576
6	2	3	1	2	-2.29170
7	3	1	3	2	-2.78182
8	3	2	1	3	-2.93363
9	3	3	2	1	0.43351



A. 放電功率係數 B. 轉角保護策略值 C. 線張力 D. 沖水壓力

圖 5 SN 比之因子效果圖

變異數分析(ANOVA)

變異數分析的目的在於了解參數 (控制因子) 對品質特性影響的程度。並能提供客觀的分析，本研究分別對 SN 比及平均數作變異數分析，分析結果如表 9、10。由此可得知，經由變異數分析發現 A、B 與 D 因子具顯著影響，而其中因子 A 影響最為顯著。

表 9 SN 比變異數分析表

SN 比變異數分析表(*表具有顯著影響的因子)					
變異來源	自由度	平方和	均方	F 值	貢獻率 (%)
A*	2	17.0527	8.5264	12.9	56.49%
B*	2	6.2974	3.1487	4.77	20.86%
C	2	1.3215	0.6608	--	--
D*	2	5.5157	2.7579	4.17	18.27%

總合	8	30.18 47	100%
----	---	-------------	------

表 10 平均數變異數分析表

平均數變異數分析表(*表具有顯著影響的因子)					
變異來源	自由度	平方和	均方	F 值	貢獻率 (%)
A*	2	0.471 81	0.235 90	13.92	62.76 %
B*	2	0.152 64	0.076 32	4.50	20.30 %
C	2	0.033 89	0.016 94	--	--
D*	2	0.093 47	0.046 74	2.76	12.43 %
總合	8	0.751 81			100%

最適條件的推定

小組基於上面的數據，我們決定了最佳水準的設定，選出 A 為 A3，B 為 B3，C 為 C3，D 為 D1。接下來我們預測在此最佳狀況下的期望 SN 比和平均值。重複九次實驗得到 SN 比的平均值為 -3.04 ，而在最佳狀況下的預測 SN 比為：

$$\begin{aligned}\hat{\eta} &= \bar{\eta} + (\bar{A}_3 - \bar{\eta}) + (\bar{B}_3 - \bar{\eta}) + (\bar{D}_1 - \bar{\eta}) \\ &= (-3.04) + (1.279) + (0.964) + (1.078) \\ &= 0.281(\text{db})\end{aligned}$$

確認實驗

本研究最佳條件的確認實驗實施了五次，為有效估計各觀察值，先計算在 95%最佳條件下之 SN 比預測平均值信賴區間為：

$$CI_1 = \sqrt{F_{0.05;1,2} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}}\right)} = \sqrt{18.51 \times 0.6608 \times \left(\frac{7}{9}\right)} = 3.084 (\text{db})$$

確認實驗之 SN 比平均值的 95%信賴區間分別為：

$$\begin{aligned}CI_2 &= \sqrt{F_{0.05;1,2} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r}\right)} \\ &= \sqrt{F_{0.05;1,2} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r}\right)} = \sqrt{18.51 \times 0.6608 \times \left(\frac{7}{9} + \frac{1}{5}\right)} = 3.458 (\text{db})\end{aligned}$$

因此確認實驗之期望 SN 比的 95%信賴區間為 -3.04 ± 3.458 ，也就是介於 -6.498 至 0.418 之間；而這次確認實驗結果中 5 個 SN 比分別為 0.22113 、 0.188612 、 0.385789 、

0.188612、0.188612 而其平均值為 0.232595 落在 95%之信賴區間之內，另外 T 值之平均值為 0.97 μm ，亦達到改善之目標，表示實驗成功。

製程能力計算

經確認實驗成功後，再對確認實驗之回應值進行製程能力計算，確認實驗之回應值如表 11，計算之 C_{PK} 值為 1.46 如圖 7。

表 11 確認實驗回應值表

實驗	T 值 (μm)				SN 比
	1	1	1	0	
1	.0	.0	.0	.9	0.21 1350
2	.0	.9	.1	.9	0.18 8612
3	.1	.0	.8	.9	0.38 5789
4	.0	.9	.9	.1	0.18 8612
5	.9	.1	.0	.9	0.18 8612

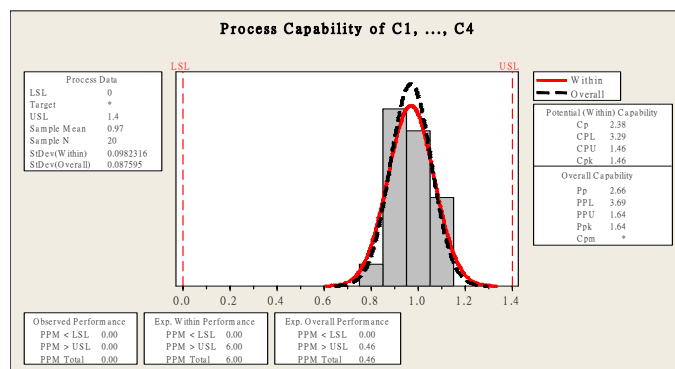


圖 7 確認實驗之製程能力分析圖
管制

本研究藉由導入 6-Sigma 的方法獲得最適條件，在經過確認實驗以及製程能力分析後，可以驗證所獲得之結論為正確，本研究將針對其作三點管制(1)改變因子組合，將固定因子放電功率係數由 20 改為 24、轉角保護策略值由 20 改為 24、線張力由 0.4 改為 0.5、沖水壓力由 20 改為 19；(2)持續觀察紀錄，並運用製程能力分析圖加以監控；(3)在製程品質穩定後，建立 SOP 以利運作。

結論及建議

結論

本研究是以粉末冶金模具之線切割製程為實驗對象，運用六標準差之 DMAIC 改善步驟，將製程流程化，結合田口實驗設計及 ANOVA 分析來推定最適的條件，提升模具精度符合客戶需求。本研究改善成果，製程能力 C_{PK} 值由原來的 0.73 提昇到 1.46，證明本研究建立之改善製程能力的模式能有效提升模具品質。以往 T 值之改善在業界中常用更改程式路徑之方式，而此方式常因為程式路徑之更動造成 R 角輪廓誤差，而本研究之改實驗結果可使 T 值改善並且不影響 R 角精度。在現今產品精度不斷提升的競爭環境下，精度不斷提升是一重要課題，本研究之相關成果可提供業界在實務上相關應用。

建議

粉末冶金模具製作之關鍵製程，除了線切割放電加工製程之外，可將電極加工成為任意形狀之放電加工製程，亦為一相當重要之製程，兩者性質相近，皆擁有眾多參數，如能運用本研究建立之改善粉末冶金模具製程能力的模式，找出關鍵因子，推算出加工時之最最適切參數，則可在不增加成本的情況下，改善加工之製程能力，提升模具的精度。

在模具精度提升之後，可進一步探討粉末冶金整體製程與最終產品品質的相關性，例如燒結時之變形量、整形後之回彈量、加工表面蒸鍍之均勻度等，以提升粉末冶金最終產品之精度。

參考文獻

- [1] W. L. Dekeyser and R. Snoeys, “ Geometrical Accuracy of Wire-EDM,” Proceedings of the International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9), 1989, pp. 226-232
- [2] 許文政，線切割放電加工轉角精度控制策略之研究，臺灣大學機械工程學研究所碩士論文，民國八十七年六月。
- [3] 徐水廉，粉末冶金模具模組化設計與應用，元智大學工業工程與管理研究所碩士論文，2005
- [4] 莊宗仁 2001 線切割放電加工隅角粗加工軌跡補償與加工參數調整策略之研究。私立華梵大學機電工程研究所碩士論文。
- [5] 陳彥宏 線切割放電加工精修表面細緻化之研究 國立臺灣大學機械工程學研究所碩士論文 2001
- [6] 陳信憲、朱豔芳、萬英豪，結合 6 σ 手法與田口實驗設計

對改善製程能力之研究，國防管理學院資源管理研究所碩士論文，2002

[7] 陳松盛，線切割放電加工機加工參數自動化系統研究，大葉大學機械工程研究所碩士班碩士論文，2004

[8] 葉秋鈴、鄭春生，六標準差應用於導光板印刷製程之最佳化研究，元智大學工業工程與管理研究所碩士論文，2004

[9] 曾英富 應用六標準差的專案手法改善塗裝製程不良率 朝陽科技大學工業工程與管理碩士論文 2005

[10] 蔡宗峰、鄭豐聰，運用六標準差手法於配向膜塗佈製程能力改善之研究，逢甲大學工業工程研究所碩士論文，2003