

逢 甲 大 學

材 料 與 製 造 工 程 碩 士 在 職 專 班

機 械 工 程 組

碩 士 論 文

應 用 田 口 方 法 分 析 鈦 合 金 切 削 之
表 面 粗 糙 度 與 參 數 最 佳 化

Analysis of Surface Roughness and
Parameter Optimization for Titanium
Machining Based on Taguchi Method

指 導 教 授：羅 致 卿 博 士

研 究 生：廖 永 富

中 華 民 國 一 百 年 一 月

逢 甲 大 學
材料與製造工程碩士在職專班
機械工程組
學位論文

應用田口方法分析鈦合金切削之表面粗糙
度與參數最佳化

Analysis of Surface Roughness and
Parameter Optimization for Titanium
Machining Based on Taguchi Method

研究生：廖永富

經碩士學位考試合格特此證明

評審委員

林通儒

黃宗之

羅致卿

指導教授

羅致卿

所 長

劉顯光

考試日期：中華民國 99 年 12 月 20 日

誌謝

在逢甲大學材料與製造研究所碩士在職專班就讀期間，感謝 **羅致卿** 教授對本論文研究給予學生悉心指導與付出，適時的給予學生指正與引導學生研究方向，不厭其煩的解決學生的困惑，其以身作則的態度讓學生能引以仿效，使得本論文研究能夠順利完成；再來要謝謝兩位口試委員 **黃宗立** 博士與 **林孟儒** 博士對學生論文提出改善建議與細節的修正叮嚀，使學生的論文內容更加完善。

再者，感謝家人父親大人、母親大人、丈人、丈母娘與兩位小姨子在學生求學研究階段全力支持，尤其是內人**芮庭**在這期間將家裡打理的無微不至，也將入學時剛出生的女兒**昱喬**照顧的健康茁壯，因為您們的辛苦付出才使得我能無後顧之憂全力將學業完成，在此向您們說一聲辛苦了、感謝您們、有您們真好。

同時也謝謝一同度過美好的求學時光與研究階段給予我課業與研究幫助的學長**鵬志**、**昌明**、**柏鈞**、**宏穎**與同學**智豪**和材製專班的同班同學們，希望您們都能工作順心、事事如意。

最後謝謝學生所任職的鏡鈦科技股份有限公司的栽培與**蔡永芳**副總的提攜之情。願大家都能身體健康、萬事如意、心想事成，謝謝您們。

作者：廖永富 謹誌

於逢甲大學材料與製造工程研究所碩士在職專班

中華民國一百年一月

摘要

表面粗糙度是評定加工品質最為重要的因子之一。本文係針對鈦合金 (Ti-6Al-4V ELI) 之切削加工，設定表面粗糙度為性能指標，運用田口方法之望目品質特性來進行實驗規劃與分析工作。其中，主要之切削參數因子包含主軸轉速、進給速率、及切削深度。藉由直交表實驗規劃，先判斷其相關因子與水準的重要程度，然後求得最佳之切削加工參數組合。最後，以此提升加工品質與加工效率達到 337.7%。



關鍵字：田口方法、表面粗糙度、鈦合金、切削加工

Abstract

Surface roughness is one of the most important factors for evaluating machining quality. In the thesis, the surface roughness is set as the performance index and the study is focused on the machining of the titanium alloy (Ti-6Al-4V ELI). In the analysis, the machining parameters include the spindle speed, feed rate, depth of cut, etc. Based on the Taguchi method, an orthogonal table is scheduled to determine the concerned factors and the level of importance, and then to obtain the optimal set of machining parameters. Consequently, we have achieved the improvement in machining quality and efficiency reached 337.7%.



Keywords: Taguchi method, surface roughness, titanium alloy, machining

目錄

誌謝.....	I
摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VII
第一章 緒論	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究目的.....	5
1.4 本文架構概述.....	6
第二章 研究方法與理論	7
2.1 銑削原理[15-16].....	7
2.1.1 輪廓銑削.....	7
2.1.2 逆銑削.....	7
2.1.3 順銑削.....	7
2.1.4 材料移除率.....	8
2.1.5 鈦合金加工[17].....	8
2.2 表面粗糙度[18-19].....	10
2.2.1 表面粗糙度定義.....	10
2.2.2 粗糙度形成原因[19-20].....	12
2.3 田口方法[21]	14
2.3.1 使用田口方法的步驟.....	14
2.3.2 實驗設計法(Experimental Design Methods).....	15
2.3.3 直交表概觀(Overview Of Orthogonal Arrays).....	16
2.3.4 品質損失.....	17
2.3.5 品質計量S/N比	18
2.3.6 變異分析.....	20
2.3.7 製程能力與標準差[22-23].....	21
第三章 實驗設備與實驗方法	25
3.1 實驗流程.....	25

3.2 實驗測試設備、刀具與材料.....	27
3.2.1 三軸切削中心加工機.....	27
3.2.2 表面粗糙度量測儀.....	28
3.2.3 銑削刀具.....	30
3.2.4 加工材料.....	31
3.3 因子與水準參數決定.....	32
3.3.1 問題概述.....	32
3.3.2 Ti-6Al-4V ELI切削加工品質特性(y)分析.....	35
3.3.3 Ti-6Al-4V ELI切削加工Level Setting.....	35
3.3.4 選用直交表.....	36
3.4 加工路徑規劃.....	38
3.5 表面粗糙度量測與紀錄.....	40
第四章 實驗結果與討論	42
4.1 表面粗糙度數值S/N比計算	42
4.2 S/N比數值分析.....	44
4.3 Y Avg數值分析.....	46
4.4 計算與預估最佳加工參數.....	48
4.4.1 第一階段預估控制因子最佳水準之S/N比數值(db).....	48
4.4.2 預估原始加工參數控制因子水準之S/N比數值(db).....	49
4.4.3 第二階段調整預估控制因子最佳水準之表面粗糙度數值(Ra)	49
4.4.4 預估原始加工參數條件與最佳條件之差異.....	50
4.4.5 變異數分析(ANOVA)	51
4.5 驗證實驗.....	52
4.5.1 原始加工參數條件與最佳條件之水準參數.....	52
4.5.2 驗證加工數據紀錄.....	52
4.5.3 驗證加工數據分析.....	53
4.5.4 原始加工參數條件與最佳條件數據比較.....	54
4.6 效率提升	56
第五章 結論與未來展望	57
5.1 結論.....	57
5.2 未來展望.....	57
參考文獻.....	59

圖目錄

圖 1. 逆銑削與順銑削示意圖	8
圖 2. 中心線平均粗糙度RA曲線	11
圖 3. 最大粗糙度RMAX曲線	11
圖 4. 十點平均粗糙度Rz曲線.....	12
圖 5. 實驗步驟流程圖	26
圖 6. LEADERWAY-V650 CNC三軸切削加工機.....	28
圖 7. SURFCOM 130A表面粗糙度量測儀	28
圖 8. 鎢鋼銑刀各部位名稱對照圖	30
圖 9. S220-CES20400A鎢鋼銑刀實體外觀型式	30
圖 10. 醫療級鈦合金(Ti-6AL-4V ELI)加工實驗前之實際外觀.....	31
圖 11. 影響表面粗糙度之重要因子分析圖	34
圖 12. 刀具路徑示意圖	38
圖 13. 測試工件實際加工情形	39
圖 14. 加工後之模型(9 代表實驗之次數).....	39
圖 15. 表面粗糙度量測位置示意圖	40
圖 16. 表面粗糙度實際量測模式	40
圖 17. 各控制因子之水準S/N比反應圖	44
圖 18. 各控制因子之水準AVERAGE反應圖.....	46
圖 19. 最佳條件之表面粗糙度量測圖示	53
圖 20. 原始條件之表面粗糙度量測圖示	53
圖 21. 確認實驗加工最佳條件之表面粗糙度 100 倍放大圖	55
圖 22. 確認實驗加工原始加工參數條件之表面粗糙度 100 倍放大圖	55

表目錄

表 1. 粗糙度等級與粗糙度RA值之對照(μM)	10
表 2. LEADERWAY-V650 機型規格.....	27
表 3. SURFCOM 130A表面粗糙度量測儀規格參數	29
表 4. S220-CES20400A 鎢鋼銑刀刀具尺寸.....	30
表 5. 醫療級鈦合金(Ti-6AL-4V ELI)之主要成分(單位：%).....	31
表 6. 醫療級鈦合金(Ti-6AL-4V ELI)之機械性質：	31
表 7. 常見的品質特性	35
表 8. 各因子與水準的參數設定	36
表 9. 直交表 $L_9(3^4)$	37
表 10. 直交表之各水準值	37
表 11. 實驗用參數表	38
表 12. 表面粗糙度量測數值紀錄表	41
表 13. 各實驗組之S/N比與MSD數值	43
表 14. S/N比控制因子重要度分析數據.....	45
表 15. AVERAGE控制因子重要度分析數據	47
表 16. 各因子的相關連性	50
表 17. 各控制因子變異數貢獻率分析結果	51
表 18. 原始加工參數條件與最佳條件的水準參數	52
表 19. 原始條件與最佳條件的表面粗糙度量測數據	53
表 20. 原始加工參數條件與最佳條件的表面粗糙度量測分析數據	53
表 21. 原始加工參數條件與最佳條件之驗證結果比較	54

第一章 緒論

1.1 前言

工業時代的來臨，機器的發展使用成了一種有效率的生產製造方式，工業之母首推加工機，由傳統的車床、銑床等等，漸漸發展成至今的電腦輔助加工機，讓一致性高的工作內容走向無人化自動作業方式來取代人力，足以見到加工機的發展對作業模式的進步息息相關。

電腦輔助加工機也就是通稱的 CNC 工具加工機，如 CNC 車床與 CNC 銑床等皆屬之，加工軸向也由傳統的三軸加工漸漸演變成四軸、五軸，甚至是現今較為熱門的多軸向車銑複合加工機；目前的產業中仍屬三軸與四軸加工機最為普遍，五軸以上多為航太工業或是醫療產業有較多的使用，工具機的應用除了依照各產業特性需求而有所不同外，基本上都是生產製造的工具。

生產製造不外乎是將一種材料切削加工成型為我們所希望賦予的功能性或是外觀造型，加工產品可以是很簡單的一個零件或是一組複雜的零組件，這些需求顯示了工具機的重要性；但是只有工具機是無法完成上述的工作，另一關鍵的因素就是加工刀具，扮演不可或缺的重要角色，通稱的車刀、銑刀即屬此類，刀具的演變跟被加工材質有絕對的關係，因應現今被加工材質的高硬度需求，切削刀具材質由 HSS(高速鋼)、碳化鎢、陶瓷到鑽石都有其應用的範圍，還有利用鍍層等方式來增加刀具硬度；切削加工模式都是使用旋轉的方式來做材料移除動作，銑床是以刀具為旋轉方式加工、車床則以材料做為旋轉方式進行加工。

有了工具機與刀具後，切削條件更是對產品品質影響有舉足輕重的地位，參數條件設定好壞影響著品質、加工時間、成本等，因為對不同被加工材質有良好加工參數設定的話，其效益則是品質符合需求、加工時間縮短、刀具與機台的耗損降低，總括成本也就相對降低；反之則無法達到上述效益更可能會加速工具機與刀具的損耗而得不償失，故要搭配良好的切削參數是很重要的；切削加工參數以主軸轉速、進給速率為主，搭配切削深度、刀具正逆轉、刀具材質、冷卻劑種類等為輔。

現今被加工材料的種類有很多，以目前較為熱門的 3C 電子產業、新興的醫療產業為主，其應用的材料都以不鏽鋼居多，另外醫療產業在植入物的材質選用除了不鏽鋼外就以鈦合金為主要應用材質，原因是植入物材質需要有高的生物相容性，而鈦合金與人體組織有良好的親和性，並且比不鏽鋼的質量輕，不鏽鋼的比重為 8.00、鈦合金的比重為 4.43，故被大量應用於植入物之骨釘與骨板等相關產品。

切削加工為了達到要求的品質水準，通常會對調整加工條件希望得到最佳化的應用參數，最常用的方法是經驗法則的試誤法，因為人為誤差很大，不僅費時也不一定會得到最佳加工參數，近些年對調整品質水準多使用田口方法，因為該方法可以透過極少的實驗與分析得到最佳參數條件，而田口方法是一種實驗設計法，也是品質改善的手法之一，因為運用簡便與快速且實驗次數少，能減少實驗時間與實驗成本，相當適合運用於工業製程參數改善，能獲得很高的效益。

所以運用田口方法設計規劃與實驗分析，找出切削速度、每刃切削量、切削深度等因子參數條件對切削加工表面粗糙度之影響程度，尋求最佳加工參數提升切削加工表面粗糙度品質。

1.2 文獻回顧

Ti-6Al-4V ELI 鈦合金加工參數範圍方法基本上可以先由 Machining Data Handbook 工具書[1-2]獲得，對切削加工參數有基本的認知後，再搭配刀具形式與材質做加工參數的調整[3]，方可符合當下合適的加工條件，再者鈦合金屬於難切削材[4-5]，在切削加工過程中容易產生高溫，所以當切削加工時必須要有良好的冷卻系統，如 Y. Su , N. He , L. Li , X. L. Li 等人[6]研究指出 Ti-6Al-4V 鈦合金在高速加工時以壓縮氮氣冷卻效果最佳、水冷卻則不適用於高速切削；另外邱衍智[7]研究 Ti-6Al-4V 鈦合金之可加工性探討指出，當切削能量增加時，刀具磨耗範圍也逐漸擴大，而在初期刀腹磨耗（Flank Wear）階段，表面粗糙度會隨切削能量上升而呈現正比趨勢，意謂切削能量愈大則表面粗糙度愈差。

表面粗糙度則是切削加工一定會遇到的問題現象，其值沒有好壞之分，僅是依品質需求的差異，一般而言在機械加工都會有特定可達到的表面粗糙度範圍值，如 M. Alauddin , M. A. ElBaradie , M. S. J. Hashmi 等人[8]在端銑刀加工表面粗糙度分析有提到中心線平均粗糙度值 Ra 的預估公式，不過加上刀具與機器設備等因素所產生的刀具顫動與機台震動干擾，在尤世承[9]研究球形端銑刀加工曲面之表面粗糙度及精度探討中有提到切削顫振在切削過程中，刀具與工件之間經常會產生自由振動、強制振動或自激顫振等三種類型的機械振動；另外刀具形式與鍍層類型亦影響切削加工之表面粗糙度，如李昭佐[10]在研究端銑刀之傾角、螺旋角與鍍膜對銑削硬鋼工件表面粗糙度之影響中提出，當使用順銑削、刀具使用負傾角、大的螺旋角之端銑刀，銑削硬鋼 SKD11 時可獲得較佳表面粗糙度，此外在各種螺旋角下，使用有被覆 TiAlN 及 TiCN 者，均較無鍍膜之端銑刀獲得較佳的工件表面粗糙度，故影響切削加工表面粗糙度值的因素很多，經實驗分析通常無法吻合預測的 Ra 值。

品質手法之一的田口實驗方法與分析普遍被運用在製程改善上，切削加工也不例外，因為田口方法主要就是要改善縮小品質變異與調整參數成最佳水準，如 J. P. Davim , P. Reis , V. Lapa , C. C. Antonio 等人[11]以田口方法為基礎的設計實驗計劃，建立 PEEK 工件在旋轉加工時切削參數的數據，探討使用 PCD 刀具(聚合金剛石)對 PEEK 的切削特性變異分析，指出進給速率的增加與切削速度的降低對表面粗糙度 (Ra) 與尺寸精度(IT)有影響；鄭忠賢[12]研究不同鍍膜端銑刀對 SUS304 之銑削特性探討中使用田口方法實驗獲得影響工件表面粗糙度之主要因素為鍍膜刀具，其次為每刃進給、切削速度；許芄銘[13]研究應用田口方法於陶瓷刀具硬車削模具鋼之切削條件最適化研究中指出依據田口實驗分析得知，影響陶瓷刀具磨耗的主要因子為刀具材質，其次是切削速度與切削深度、影響工件表面粗糙度的主要因子為切削進給、影響刀具壽命的主要因子為切削速度，其次是切削進給，最後是切削深度；陳映伸[14]研究以田口實驗法在工具機軸向定位精度之研究，利用田口品質設計法經由實機測試實驗後得出了最佳組合配方，並找出各關鍵零件影響工具機軸向定位精度間的關係。以上的研究中，皆是用田口方法來減少實驗次數並能快速分析獲得結果，故田口方法深受工程人員的喜愛與應用，對提升製程能力有很大的幫助。

另一品質手法 Six Sigma 標準差是現今工廠生產加工最重視的品質水準系統，其中又以製程能力 Cpk 值的應用最廣，製程的穩定性可由該 Cpk 值看出，當 Cpk 值越大代表該製程越穩定，通常基本要求 Cpk 值最少要 1.33 以上，而 1.67 以上代表製程能力穩定性高不易出錯。

1.3 研究目的

銑床工具機仍是目前製造加工最為廣泛應用的機器之一，隨著時間演變漸漸提升了加工精度與技術到微觀尺寸，可加工軸向由三軸到多軸，切削刀具雖然也歷經變革，不過也僅是提升切削刀具的硬度與鍍層形式，但不變的是其主要加工模式，一樣是使用夾持銑刀來完成切削加工需求，當切削加工後一定會在被加工零件表面留下切削痕跡，而該切削痕跡之紋路大小不明顯就稱為表面粗糙度，表面粗糙度值高或低都影響著尺寸精度與外觀等品質，又以現今對尺寸精度品質之要求日趨嚴格及 3C 消費電子產品對外觀品質的要求亦同，所以表面粗糙度值也早已被納入品質系統要求的一部分，造成表面粗糙度值的因素不能全歸咎於加工參數，如主軸轉速、進給速率等，其他如工具機剛性與機床震動、切削刀具剛性與震顫、順銑與逆銑、材質與幾何外型、被加工零件夾持方式等等都是有可能影響表面粗糙度值大小的變化。

再者近些年來新興醫療產業的發展迅速，如醫療植入物骨釘與骨板的加工生產、人工牙釘的生產製造，其使用的材料皆以不鏽鋼(SUS316LVM)與鈦合金(Ti-6Al-4V ELI And Pure Ti)為大宗，尤以目前對鈦合金的發展趨勢逐日提升，因為該材質被定義屬於難切削材，故對其切削加工參數有迫切的需求，期望找出符合該切削加工之最佳條件因子與水準，而目前對切削加工之表面粗糙度研究以田口方法來說多為望小品質特性，但是實際應用上這是沒必要的，雖然說望小品質特性可以得到最佳的表面粗糙度值，但是卻會使加工時間增加、加速切削刀具的磨耗，切削加工效率與成本皆不符合現今對交期縮短、品質提升、成本降低等需求。

本研究希望以品質手法，搭配田口方法規劃實驗與分析，以望目品質特性設定一規格值，試圖找出對鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)造成該望目品質特性需求之表面粗糙度值最佳切削條件因子與水準，便於日後產業應用。

1.4 本文架構概述

第一章 介紹相關文獻回顧與研究目的之闡述。

第二章 介紹表面粗糙度與田口方法之理論基礎。

第三章 介紹實驗設備與實驗方法。

第四章 介紹實驗分析與結果

第五章 結論與未來展望

文末 參考文獻資料



第二章 研究方法與理論

2.1 銑削原理[15-16]

2.1.1 輪廓銑削

輪廓銑削(Peripheral Milling)又稱為平面銑削(Plain Milling)，切削時銑刀軸是平行於工件表面轉動，在輪廓銑削上的銑刀有直線與螺旋齒，可以分別產生正切削或斜切削的作用，螺旋齒通常比直齒的銑刀好，因為作用在齒上的負載或扭矩較少，所以在操作上比較平滑，且可以減少刀具的切削力與振顫。

2.1.2 逆銑削

逆銑削(Conventional Milling)也稱為向上銑削(Up Milling)中，如圖 1 所示，最大的切屑厚度是在末端當刀齒離開工件表面時。逆銑削的優點是(a)刀齒的觸合量不是工件表面特性的函數、(b)工件表面的油污或鱗片不會影響刀具的壽命。這是最常用的銑削方法，此種銑削方法是很平穩且可保持尖銳的銑刀齒，但是刀具會有振顫的傾向，工件也會有向上推移傾向，因為銑刀旋轉的方向，因此工件的適當夾持是很重要的。

2.1.3 順銑削

順銑削(Climb Milling)又稱為向下銑削，如圖 1 所示，銑刀在開始切削時即是切屑的最厚位置，優點是切削力的向下分量會夾住工件，特別是細長的工件更為明顯。然而因為當刀齒觸合到工件時會有很高的衝力，因此此種方法的操作必須有堅固裝置，且必須消除床台進給機構上的齒隙。順銑法不適切削有鱗片的工件，如熱加工的金屬、鍛造及鑄造等工件，此鱗片很硬且具摩擦性，對銑刀齒會產生激烈的磨耗和破壞，

因此縮短了刀具的壽命。

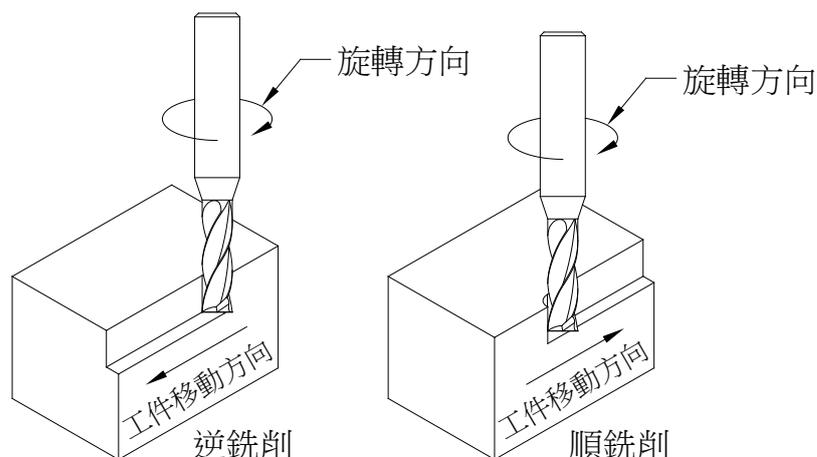


圖 1. 逆銑削與順銑削示意圖

2.1.4 材料移除率

材料移除率(Material-Removal Rate, MRR)是指每單位時間切削材料的移除體積(mm^3 / min)。

l是切削長度(mm)、w是切削寬度(mm)，當工件較銑刀的寬度窄時，則此值與工件寬度相同、d是切削深度(mm)、t是切削時間(秒或分鐘)、v是工件的線速度或進給率(mm / min)，以經濟性考量應減少非切削循環上所走的距離，這是銑刀的銑切操作中是很重要的，則材料的移除率為(2-1)：

$$\text{MRR} = \frac{lvw}{t} = wdv \quad (2-1)$$

2.1.5 鈦合金加工[17]

對鈦和鈦合金進行銑削加工比車削加工困難，在銑削中也一定要符合“鈦材切削加工基本原則”，鈦材切削加工的基本原則如下各點：

- a. 為防止溫升過大，應採用較低的切削速度，一般來說，應比與它相同硬度的鋼件的切削速度低 25~50%或更低。
- b. 採用大的進刀量，進刀量對溫升影響很小。

- c. 在切削過程中不要停止走刀，否則會引起加工硬化或產生燒結擠裂而損壞刀具。
- d. 切削刀具要鋒，否則刀具極易磨損，因為切削刀具的磨損和切削量不成比例，開始時磨損很小，刀具一旦變鈍，磨損立即加劇。
- e. 使用足夠的切削液(潤滑冷卻液)，進行潤滑冷卻，將刀刃上的熱量帶走，並沖走切屑，建議使用 5%氯化鈉水溶液、5~10%的水性油的水溶液切削液。

銑削過程中的不連續切削，使刀具承受衝擊載荷，加上刀齒熔敷切屑造成的黏附磨損，使刀具壽命受到嚴重影響，當使用高速鋼刀具或硬質合金鋼刀具對鈦和鈦合金進行銑削，一般都能獲得滿意效果。

對鈦和鈦合金進行銑削時，應採用順銑，宜用直徑小、齒數多的銑刀，這樣可以減少偏斜和振動，通常銑削鈦的銑刀刀齒的後角比普通銑刀大 30~50%，如果崩刀，後角可取小些。前角一般選用正前角，若加工有困難，前角應減少 0 度或為負角。

對於銑削來說，正確選擇潤滑冷卻液十分重要，一般宜用易溶於水的潤滑冷卻液，添加方式以噴霧狀噴射為好。

2.2 表面粗糙度[18-19]

2.2.1 表面粗糙度定義

表面粗糙度值有中心線平均粗糙度 R_a 、最大粗糙度 R_{max} 和十點平均粗糙度 R_z 等三種表示法，其單位均為 μm 。中心線平均粗糙度 R_a 值、最大粗糙度 R_{max} 值及十點平均粗糙度 R_z 值間之關係約為 $R_z = R_{max} = 4R_a$ 。

我國國家標準採用“中心線平均粗糙度”，數值之後不加單位及“a”字， R_a 數值中優先選用光胚面的有 100、粗切面的有 50、25、12.5、細切面的有 6.3、3.2、精切面的有 1.6、0.80、0.40、0.20、超光面的有 0.100、0.050、0.025 以及 0.012。

表面粗糙度除用 R_a 、 R_{max} 、 R_z 值表示外，有時亦可用粗糙度等級表示之，粗糙度等級計分十二級，即 N1、N2、N3、N4...N12 等，各等級與中心線平均粗糙度 R_a 值之對照如表 1 所示。

表 1. 粗糙度等級與粗糙度 R_a 值之對照(μm)

粗糙度等級	N12	N11	N10	N9	N8	N7
粗糙度 R_a 值	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6
粗糙度等級	N6	N5	N4	N3	N2	N1
粗糙度 R_a 值	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025

表面粗糙度曲線並非等間距之規則曲線，故在測量粗糙度值時，需規定在曲線上截取一定長度測量之，所規定之測量長度，即稱為基準長度。基準長度共有六種分別為 0.08、0.25、0.8、2.5、8、25，單位為 mm，其中 0.8 為最常用之基準長度，稱為標準基準長度。基準長度與加工精度有關，即加工越精細者，採用越小之基準長度；加工越粗糙者，則採用越大之基準長度。銑削加工方法所能達到之中心線平均粗糙度 R_a 值為 25 ~ 0.2 μm ，其最適宜銑削使用之量測基準長度為 0.8 mm、2.5

mm、8.0 mm 三種。在測量中心線平均粗糙度值時，為求準確起見，常以二至三位之基準長度為實際的測量長度。

a. 中心線平均粗糙度

中心線平均粗糙度 R_a 如圖 2 所示，設於表粗糙度曲線上截取測量長度 L ，以該長度內曲線部分中心線為 X 軸，再取此中心線之垂線為 Y 軸，則粗糙度曲線可以 $y = f(x)$ 表示之，而依下式計算，可得中心線平均粗糙度 R_a 值(2-2)。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (2-2)$$

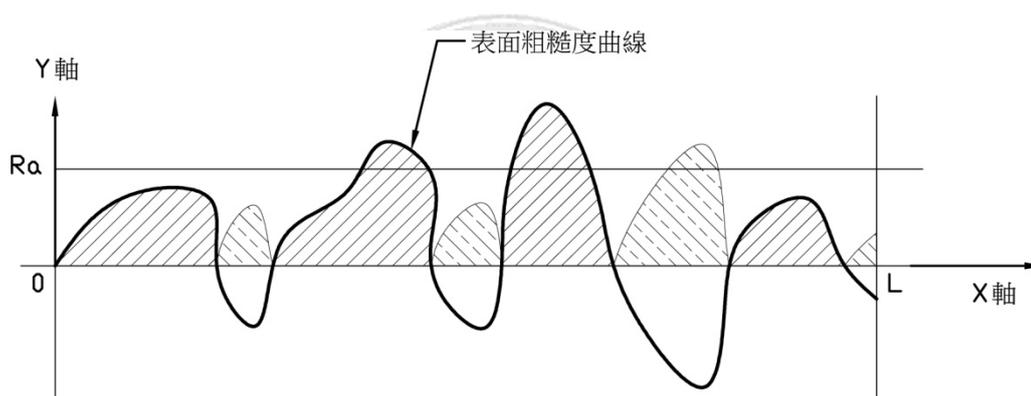


圖 2. 中心線平均粗糙度 R_a 曲線

b. 最大粗糙度

最大粗糙度 R_{max} 如圖 3 所示，設於表粗糙度曲線上截取測量長度 L ，在該長度內曲線最高峰至最低谷之垂直距離即為最大粗糙度 R_{max} 值。

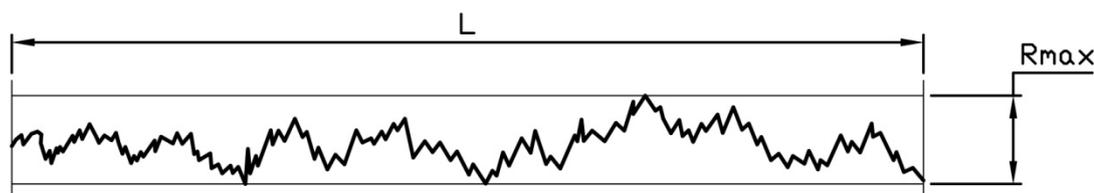


圖 3. 最大粗糙度 R_{max} 曲線

c. 十點平均粗糙度

十點平均粗糙度 R_z 如圖 4 所示，設於表面粗糙度曲線上截取測量長度 L ，在該長度內曲線中，自最高凸出點依次取五點，再自最低凹下點依次取五點，測出第三高峰點與第三低谷點間之距離，即為十點平均粗糙度 R_z 值。

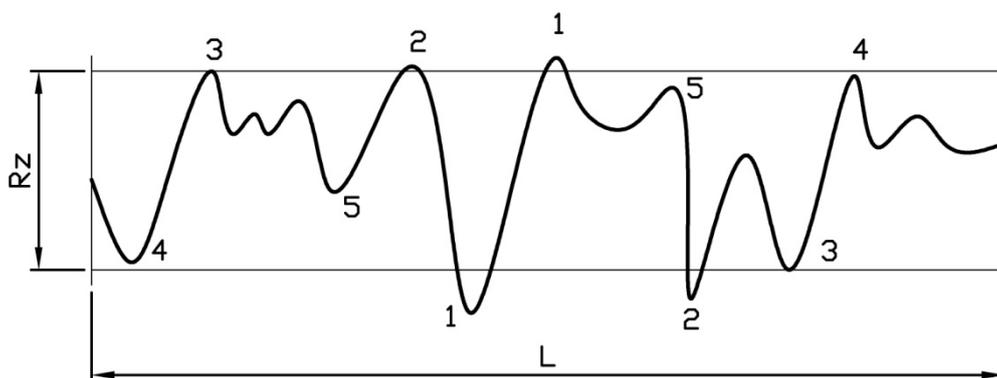


圖 4. 十點平均粗糙度 R_z 曲線

2.2.2 粗糙度形成原因[19-20]

表面情況最多包含四種現象：粗度、痕向、似波及疵病等，有些雖為視力所不可察，但經高倍率放大之後，原形畢露。

粗度(Roughness)乃製造過程中固有作用所產生較微小的不平坦現象，其主要成因出自橫進給的遺跡。痕向(Lay)為顯著的刀痕方向，視採用的切削方法而定。倘遇機器或者工件撓曲(Deflection)、振動(Vibration)、顫動(Chatter)或撓曲(Warp)時，則復可能產生起伏節距較長的所謂似波(Waviness)，該長度通常比粗度取樣長度還長。似波不一定有規律，可能僅局部有之。較不常見的疵病，諸如裂痕(Crack)、氣孔(Blow hole)、裂縫(Crack)、及刮痕(Scratch)等均屬之。

振動面之不良是由於切削時的異響振動所造成的，這種振動是由機械固有的振動引起，或由機械機構發生，容易發生振動不良面的情況有：

- a. 形狀較複雜，夾持較為困難之工作物加工時。
- b. 以長刃端銑刀(包含伸出長度太長)加工時。
- c. 進行強力動切削(包含超過機器、夾具、端銑刀等剛性條件時)。

眾所周知的，端銑刀的切削為斷續切削，並不是因它而引起振動，在切削狀態中由於機械的馬達、皮帶、齒輪等所引起的強制振動源，使得被勵振的刀具及加工物之間產生相對變位，又除了這些以外，與切削機構也有關連。

切削力是做週期性的變動，在端銑刀裡，切削機構中有使刀具產生振動的情形，這是因為在切削中會造成週期性的變動所引起的，在端銑刀加工中，切削刀刃的長度時時刻刻在發生變化，切屑也隨著刀刃的進入與離開，其間切屑厚度也跟著發生變化。

端銑刀是以一定的切削速度、進給來加工，所以具有一定的週期，又因端銑刀是以單側夾持刀柄來切削，在加工時必然受到橫向力，而呈現一般的撓曲狀態，依切削力的強弱，而使撓曲增減，也就是剛性應該是與異響振動有很大的關係。

如此，切削力如以一定的週期變動，則由刀具或加工物上的振動或振動痕跡可以很容易的就了解，刀刃的振動依振動大小而使各刀刃的切削量產生變化，使切削力也產生週期性的變動，長刃端銑刀很容易產生撓曲並容易受到切削力的影響，強力重切削(包含各部剛性相抵以上的切削條件時)所造成的振動面。

2.3 田口方法[21]

一種類似實驗設計法的方法用來改善與追求品質，這套基本理論在日本被加以改良，並應用在日本工業界已經幾十年，被美國工業界稱為田口方法(Taguchi Methods)，因為田口玄一博士被公認為這套方法的最大貢獻者。

田口方法是以實驗的手段來決定設計參數，為了減少實驗的次數，依控制因子及其水準的數目選用適當的實驗直交表，設計的目標是尋求最佳的產品或製程之機能(性能)，並且維持此一機能的穩健性，亦即受干擾因子的變異影響減至最少。

參數設計(Parameter Design)是一般界定田口方法的主要範圍，參數設計的目標是去決定或選擇系統內部的參數，使系統達到它理想的機能，包括這些機能的變異必須達到最小，也就是品質損失達到最小，而且成本能最小化，機能變異(Function Variations)大小可以做為品質量化的指標，在田口方法中常將品質以金錢來量化，此稱為品質損失(Quality Loss)，越小的機能變異等於越少的品質損失，亦即越高的品質表現。

當一個系統的機能不因干擾因子的變化而有太大的變異時，亦即對干擾因子的變化不敏感(Insensitive)時，可以說這個系統是穩健的(Robust)，田口方法也被稱為穩健參數設計法(Robust Parameters Design)。

2.3.1 使用田口方法的步驟

- a. 問題定義
- b. 決定品質特性、理想機能
- c. 列出影響品質特性的因子
- d. 決定各種因子與變動水準
- e. 設計實驗直交表
- f. 執行實驗
- g. 資料分析

h. 設計最佳化

i. 確認實驗

2.3.2 實驗設計法(Experimental Design Methods)

以實驗的方法來決定設計參數，實驗的安排有下列幾種方法：試誤法、一次一因子實驗法、全因子實驗法、田口式直交表實驗法。

a. 試誤法(Trial And Error)

試誤法不是一種有系統的方法，太過依賴個人的經驗，絕大部分浪費時間、人力、物力，縱使可以獲得可接受的設計值，但這些經驗也很難傳承給其他人。

b. 一次一因子實驗法(One Factor At A Time)

一次一因子實驗法指每一次實驗只變動一個因子而固定其他因子，有很明顯的缺失存在，即因子效應是在某種偏見(Bias)下被評估出來，其因子間的比較是不公平的(Unfair)。

c. 全因子實驗法(Full Factorial Experiments)

全因子實驗法是考慮所有可能的因子變動組合，全因子實驗表必然是直交的，因此在評估因子效應時能將偏見完全排除，可獲得較可靠的統計資訊，但此方法的缺點就是沒有效率，需要太多組實驗，其實驗成本太高。

d. 田口式直交表實驗法(Taguchi's Orthogonal Arrays)

田口式直交表實驗法是以較少的實驗次數來獲得有用的統計資訊，雖然偏見不能完全排除，但對解決工程品質問題目的而言，是兼顧實驗成本及精確度下很好的折衷方法，不過最佳因子組合通常不在實驗組中，在適當的假設下，可以根據因子反應表或因子反應圖來預測最佳製程參數組合。

2.3.3 直交表概觀(Overview Of Orthogonal Arrays)

直交表依主要水準數分成下列四類：

- a. 二水準直交表： $L_4(2^3)$ ， $L_8(2^7)$ ， $L_{12}(2^{11})$ ， $L_{16}(2^{15})$ ， $L_{32}(2^{31})$
- b. 三水準直交表： $L_9(3^4)$ ， $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ ， $L_{27}(3^{13})$ ， $L_{36}(2^3 \times 3^{13})$ ， $L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$ ， $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$
- c. 四水準直交表： $L_{16}(4^5)$ ， $L_{32}(2^1 \times 4^9)$
- d. 五水準直交表： $L_{25}(5^6)$ ， $L_{50}(2^1 \times 5^{11})$

在所有的直交表中， $L_{12}(2^{11})$ 、 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 、 $L_{36}(2^3 \times 3^{13})$ 、 $L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$ 、 $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$ 是最被田口博士推薦使用的直交表，當使用直交表時要注意，當配置控制因子的直交表稱為內直交表，而配置干擾因子的直交表稱為外直交表，表示外直交表為放置與控制因子無關的干擾因子與信號因子；另外直交表又分飽和直交表與不飽和直交表，而飽和直交表(Saturated Orthogonal Arrays)的意思為所有自由度都被充分利用了，也就是填滿了控制因子。

直交表中的交互作用可以從點線圖(Linear Graphs)得知，點線圖中的點所標註的行號可以配置控制因子，而線上所標註的行號可以用來評估控制因子間的交互作用(Interaction)。

直交表實驗的解析度(Resolutions)指因子間交互作用的關係，而飽和直交表實驗都是三級解析度實驗，其解析度的關係為：

- a. 三級解析度：指直交表實驗只有在交互作用可以忽略下才有意義。
- b. 四級解析度：指直交表實驗只能計算因子效應但無法計算交互作用。
- c. 五級解析度：指直交表實驗可以計算因子效應與交互作用。

2.3.4 品質損失

田口博士認為一個產品的品質可以定義為：此一產品在它的整個生命週期內，整個社會(包括製造商、消費者、及所有其他人)對他所付出的總代價，並稱為品質損失(Quality Loss)，越少的品質損失代表越高的品質。

田口博士假設：當產品的品質特性 y 開始偏離目標值 m 時，品質損失 L 是以二次曲線的速度增加(2-3)，亦即

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2-3)$$

其中 k 是一個待定係數(2-4)，稱為品質損失係數(Quality Loss Coefficient)，通常取 50%的消費者可以忍受的偏移量極限，品質損失則取在此極限時的平均損失，一般而言，若 50%的消費者可以忍受的偏移量極限是 Δ_0 ，稱為消費者容忍限度(Customer Tolerance)， $m \pm \Delta_0$ 稱為機能極限(Function Limits)，而平均品質損失是 A_0 ，則

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (2-4)$$

平均品質損失(Average Quality Loss)，表示計算整批產品的品質損失，若將總品質損失除以產品總數 n ，可以得到平均每一個產品的品質損失 Q 值(2-5)，亦即

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n k(y_i - m)^2}{n} = k \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} \right] \quad (2-5)$$

統計學上另一個名稱叫做均方偏差(Mean Square Deviation, MSD)(2-6)，相當於此 n 個品質特性值平均偏離目標值量的平方， S_n 代表 n 個品質特性值偏離其平均值 \bar{y} 的量，而 $(\bar{y} - m)$ 是平均值 \bar{y} 偏離目標值的量，亦即

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = (\bar{y} - m)^2 + S_n^2 \quad (2-6)$$

2.3.5 品質計量 S/N 比

在通訊工程中，通訊品質定義為有意義的信號(Signal)與無意義的背景雜訊(Noise)之間的比值，並稱之為 S/N 比或 SNR(Signal To Noise Ratio)，在田口方法中同樣是使用 S/N 比做為品質指標，單位為分貝 (Decibel, dB)，而 S/N 比越大代表品質越高，S/N 比每提高 3 個 dB，則品質損失降為原來的一半，在望目特性下 S/N 比每提高 6 個 dB，標準差降為原來的一半，依照品質特性區分其計算式如下列各式：

a. 望目特性第一型(2-7)

使用於調整因子不存在時。

$$S/N_{NB1} = -10\log \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} \right] = -10\log[(\bar{y} - m)^2 + S_n^2] \quad (2-7)$$

b. 望目特性第二型(2-8)

使用於目標值為零的情況。

$$S/N_{NB2} = -10\log \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right] = -10\log(S_n^2) \quad (2-8)$$

c. 望目特性第三型(2-9)

使用於平均值有明顯差異時的情況。

$$S/N_{NB3} = -10\log \left(\frac{S^2}{\bar{y}^2} \right) \quad (2-9)$$

d. 望小特性(2-10)

使用於品質特性越小越好的情況。

$$S/N_{SB} = -10\log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = -10\log(\bar{y}^2 + S_n^2) \quad (2-10)$$

e. 望大特性(2-11)

使用於品質特性越大越好的情況。

$$S/N_{LB} = -10\log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \quad (2-11)$$

f. 原點直線型第一型(2-12)

使用於品質特性與某一信號因子成正比的情況。

$$S/N_{ZP1} = -10\log(S_d^2) \quad (2-12)$$

g. 原點直線型第二型(2-13)

使用於品質特性與原點直線型第一型各組資料之 β 值相差很大的情況。

$$S/N_{ZP2} = -10\log\left(\frac{S_d^2}{\beta^2}\right) \quad (2-13)$$



2.3.6 變異分析

變異分析的其中一個目的是評估實驗誤差(Experimental Error)，可以用實驗誤差作為基準，評估每一個因子效應在統計上是否有意義(Significant)，代表有意義的、重要的、有影響力的三種內涵，第二個目的是因子的重要性測試(Significance Test)，重要性不足的因子效應則被視為實驗誤差的一部份。

實驗誤差(2-14)被定義為變異向量內各數值的平方和(Sum Of Square，簡稱 SS)除以它們的自由度後再取平方根，亦即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r (y_i - \bar{y})^2}{r-1}} \quad (2-14)$$

F 分佈(F Distribution)的 F 值(2-15)分母(S_y^2)代表直接由原樣本所估計的變異數(Variance，等於標準偏差的平方)，而分子(mS_z^2)代表經由樣本平均值所估計的原樣本變異數，亦即

$$F = \frac{mS_z^2}{S_y^2} \quad (2-15)$$

貢獻度(Contribution)(2-16)是指每個因子的平方和(SS)所佔的比例，貢獻度具有統計上的意義，它代表該因子(實驗誤差)的變異造成總品質損失的比例，亦即

$$\text{Contribution} = SS_{\text{factor}}/SS_{\text{total}} \quad (2-16)$$

2.3.7 製程能力與標準差[22-23]

A. 製程能力

製程能力(Process Capability)係指製程能達成品質要求之能力，即產品在製造過程中能達成品質在準確度及一致性上要求之程度。

製程能力分析需將自然公差與規格公差作一比較，以判定規格公差是否大於自然公差，如是，則製程能力無虞；反之，若規格公差小於自然公差，則製程將會產生高比率之不合格品，故瞭解自然公差與規格公差之差別，為製程能力分析之基礎。

自然公差(Natural Tolerance, NT)係指產品或製程之自然變異，產品在製造過程中常會產生若干差異，這些差異可分為機遇原因與非機遇原因，機遇原因是由某些不可控制之干擾因素所致，可不必去理會，而歸諸於自然現象，通常自然變異係指製程處於常態分配下其變異在平均數上、下各三個標準差內($\mu \pm 3\sigma$)的範圍，亦即製程上、下界限之落差，因此產品品質特性自然變異之幅度，即可稱之為自然公差。

規格寬度或公差(Specification Width / Tolerance, ST)(2-17)則是指工程規格上界與下界之範圍，若以 USL(Upper Specification Limit)代表規格上限、LSL(Lower Specification Limit)代表規格下限，則

$$ST = USL - LSL \quad (2-17)$$

工程規格常指顧客對產品品質特性之要求，若顧客未指定此範圍或區間，並非意味顧客對產品來者不拒、一概收受，此時製程設計者對於製程之目標參數需自行指定，以期掌控制程能力使變異不致太大。

一般而言，工程規格有兩種類型：

- a. 雙邊規格：同時有 USL 與 LSL。
- b. 單邊規格：僅有 USL 或 LSL。僅有 USL，係指產品品質特性值不可大於 USL，不論小到多小，均屬合格，愈小愈好，此即望小特性；僅有 LSL，係指產品品質特性值不可小於 LSL，不論大到多大，均屬合格，愈大愈好，又稱為望大特性。

欲評估製程之表現，應包括製程平均是否偏離目標值及製程變異是否太大，至於製程能力之衡量則有三種指標可供使用：即製程準確度能力指標 C_a 、製程精密度能力指標 C_p 、及製程能力綜合指標 C_{pk} ； C_a 指標可反映製程之平均是否偏離目標值， C_p 指標可反映製程變異之大小，而 C_{pk} 指標則是結合 C_a 與 C_p 之衡量指標。

1. 製程準確度能力指標 C_a (2-18)(2-19)(2-20)

目的在於衡量製程平均(\bar{X})與規格中心或目標值(T)之一致性程度，其指標公式為：

$$C_a = \frac{\bar{X}-T}{\Delta} \dots\dots \text{雙邊規格} \quad (2-18)$$

$$C_a = \frac{\bar{X}-T}{USL-T} \dots\dots \text{單邊規格}<\text{望小特性}> \quad (2-19)$$

$$C_a = \frac{\bar{X}-T}{T-LSL} \dots\dots \text{單邊規格}<\text{望大特性}> \quad (2-20)$$

其中， \bar{X} ：製程平均、 T ：規格中心或目標值(Target)、 Δ ：工程容差或規格寬度之一半，即 $(USL-LSL)/2$ 。

C_a 值之絕對值愈小，表示製程偏離規格中心(目標值)愈少，即製程愈集中，準確度之表現愈好。反之， C_a 值之絕對值愈大即表示製程平均偏離規格中心愈遠，準確度之表現愈差。由上述公式可知：當雙邊規

格時，若製程平均 \bar{X} 等於規格中心 T 則， $C_a=0$ ，代表製程準確度之表現最佳。當品質特性為望小特性之單邊規格時，若 \bar{X} 等於單邊上限規格 USL ，則 $C_a=1$ ；反之，若 \bar{X} 等於單邊下限規格 LSL ，則 $C_a=-1$ ，兩者準確度之表現均甚差，將會製造出許多不合格品，當品質特性為望大特性之單邊規格時亦然。

2. 製程精密度能力指標 $C_p(2-21)(2-22)(2-23)$

C_p 係衡量規格寬度(2Δ)與製程自然變異幅度(6σ)相比之情形，其指標公式為：

$$C_p = \frac{2\Delta}{6\sigma} = \frac{USL-LSL}{6\sigma} \dots\dots \text{雙邊規格} \quad (2-21)$$

$$C_p = \frac{USL-\bar{X}}{3\sigma} \dots\dots \text{單邊規格}<\text{只有上限}> \quad (2-22)$$

$$C_p = \frac{\bar{X}-LSL}{3\sigma} \dots\dots \text{單邊規格}<\text{只有下限}> \quad (2-23)$$

C_p 值愈小，代表產品之品質特性變異愈大，故製程精密度之表現不佳，反之 C_p 愈大，製程精密度之表現愈佳。

3. 製程能力綜合指標 $C_{pk}(2-24)(2-25)(2-26)(2-27)$

由於 C_p 指標僅能評估製程變異之大小而無法反映製程平均偏離目標之程度，故此指標意在同時兼顧衡量製程偏離目標之程度與變異之大小，亦即綜合評估準確度與精密度，其指標公式為：

$$C_{PK} = (1 - K) \times \frac{2\Delta}{6\sigma} \quad \text{其中，} K = \frac{|\bar{X}-T|}{\Delta/2} = |C_a| \quad (2-24)$$

$$C_{PK} = (1 - |C_a|) \times \frac{2\Delta}{6\sigma} \quad (2-25)$$

$$C_{PK} = (1 - |C_a|) \times C_p \text{ 已知雙邊規格之目標值 } T, \text{ 或已知單邊規格} \quad (2-26)$$

$$C_{PK} = \min \left[\frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma} \right] \dots \dots \text{ 未知雙邊規格之目標值 } T \quad (2-27)$$

C_{pk} 值愈大，表示製程能力愈佳，反之 C_{pk} 值愈小，代表製程能力愈差，當 $k = 0$ 時(即 $|C_a| = 0$)，即表示製程平均值等於規格中心值， $C_{pk} = C_p$ 此為理想狀況；若 $\bar{X} = USL$ 或 $\bar{X} = LSL$ 時， $k = 1$ (即 $|C_a| = 1$)， $C_{pk} = 0$ 代表製程能力甚差。

B. 標準差

標準差可以反映資料偏離平均值的程度，若資料呈常態分配，則 99.73% 的資料點會落在離平均值的正負 3 倍標準差之區間內，在統計學中的 Sigma 是一組資料的標準差，其希臘符號為 σ ，而 6σ 提供了一種衡量變異的方法。

標準差在統計學上是指代表群體的“標準差”，一組數據或資料出現變異的狀況；在管理學上是指投入生產、活動、服務的流程中，因作業流程、方法或其他因素的控管問題，所出現的變異或不一致性，另外當標準差越大，離散程度就越大，反之當標準差越小，離散程度也越小。

6 Sigma 的管理意義是一種為追求高品質，以顧客為對象、數據為基礎、流程為導向的系統性改善做法；利用執行專案來分析原因、減少變異與解決問題，以 6 Sigma 為標竿，規劃和落實持續改善於企業的關鍵流程，以達成最佳的顧客滿意，更強的競爭力，以及更高獲利的經營策略。

6 Sigma 的統計意義是指每百萬各不良機會中，最多只有 3.4 個缺點，一個穩健的流程，它對干擾是不敏感的，對 6 Sigma 而言，即使流程受到干擾，都不會產生缺點，所以只有規格涵蓋 $\pm 6 \text{Sigma}$ ，才是可靠的品質。

第三章 實驗設備與實驗方法

3.1 實驗流程

切削加工之表面粗糙度測試實驗之前，應針對該問題提出一實驗計畫方法，再依照實驗計畫內容相關規畫進行測試實驗，如此可以避免雜亂無章的進行實驗測試，又可以對該研究主題有更深入的了解，其步驟大綱如下列各點所示，圖 5 為規劃實驗步驟流程圖。

實驗規劃

- a. 問題分析評估與選定主要實驗因子數目
- b. 決定各個主要實驗因子之水準數目
- c. 評估選用合適的直交表
- d. 建立實驗用之直交實驗參數表
- e. 準備實驗所需之機台設備、加工刀具、測試工件
- f. 依照直交實驗參數表進行加工測試
- g. 對測試工件進行表面粗糙度值量測並記錄
- h. 對獲得的測試實驗數據進行分析
- i. 對分析獲得之預估最佳實驗參數進行確認實驗
- j. 比較原始參數與預估最佳參數之差異
- k. 提出結論

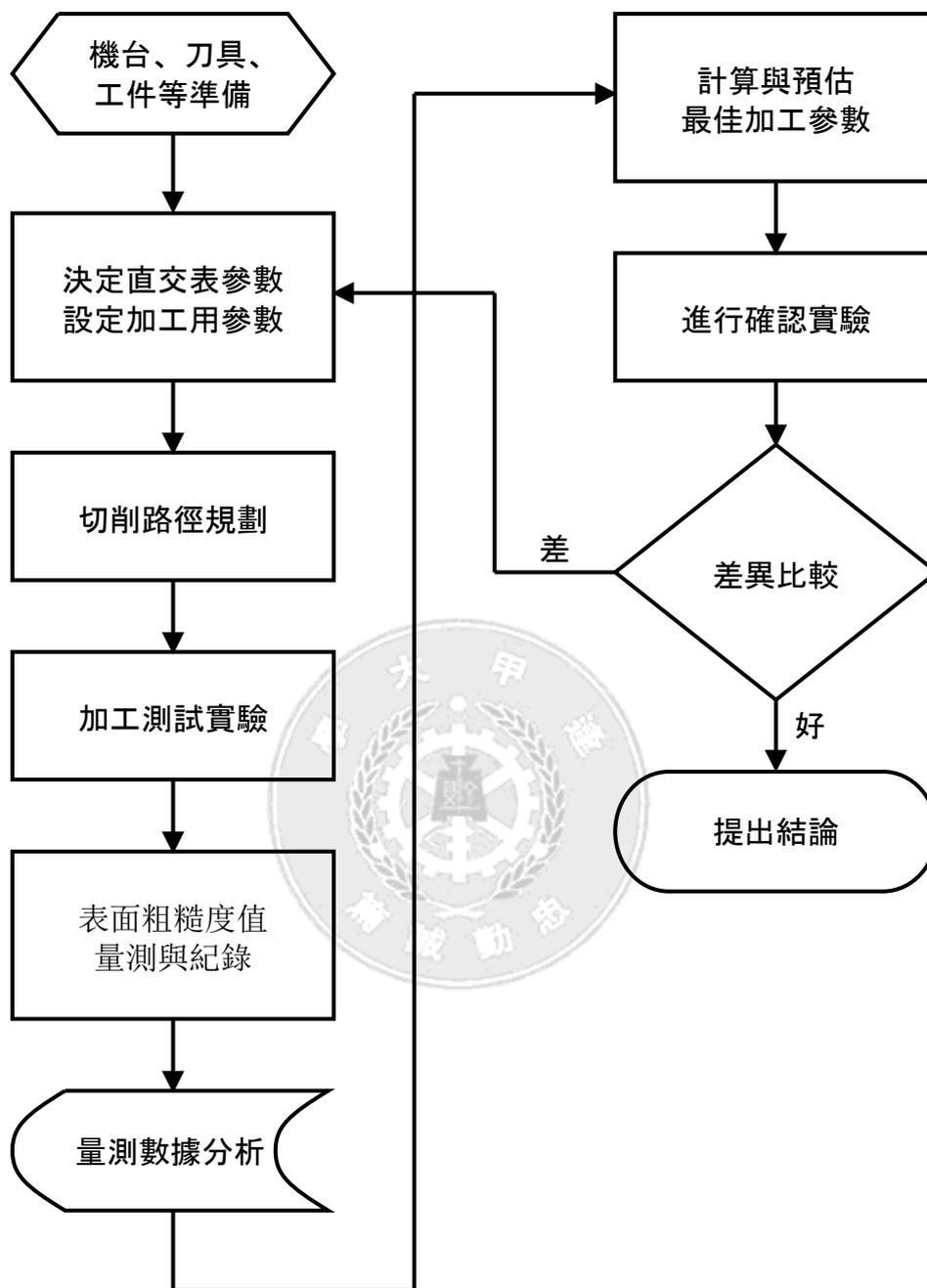


圖 5. 實驗步驟流程圖

3.2 實驗測試設備、刀具與材料

3.2.1 三軸切削中心加工機

本文中實驗所使用的銑床機台是鏡鈦科技股份有限公司所擁有的 CNC 三軸切削加工機，是由台灣力得衛科技股份有限公司所生產之立式加工機(LEADERWAY-V650)，高速化設計使 3 軸快速位移可達 24 / 24 / 20 m/min，其中 X、Y、Z 三軸螺桿採用 C3 精密級，線性馬達直接式驅動，並採用預拉式無背隙設計，定位精度為 ± 0.01 mm、重複精度為 ± 0.005 mm，主軸為直接式傳動，轉速可達 8000 rpm，符合高精度、高穩定性的精密加工要求，機型規格如表 2 所示，圖 6 為 LEADERWAY-V650 設備外觀。

表 2. LEADERWAY-V650機型規格

行程	
X/Y/Z 軸行程 (mm)	650 x 410 x 400
主軸	
主軸推拔角度	BT40
主軸轉速 (rpm)	8000
主馬達轉速(基底/最大) (rpm)	1500 - 8000
馬達出力(連續 30min) kw(hp)	7.5 (10)
三軸進給	
X/Y/Z 伺服馬達出力 kw(hp)	1.0/1.0/1.0(1.3/1.3/1.3)
X/Y/Z 快速進給 (m/min)	24/24/20
X/Y/Z 切削進給 (m/min)	20/20/5
控制器系統	
FANUC 控制器系統	0i-MC
冷卻系統	
馬達出力 (kw)	0.86
泵浦流量 (l/min)	65
泵浦壓力 (bar)	1.8
冷卻液箱容量 (liter)	200



圖 6. LEADERWAY-V650 CNC三軸切削加工機

3.2.2 表面粗糙度量測儀

本文中實驗所使用的表面粗糙度量測儀為鏡鈦科技股份有限公司所擁有，目的為求得加工件之表面粗糙度數值，做為後續相關分析與研究之用，設備為探針接觸式表面粗糙度量測儀，被測工件經量測後，量測訊號經過轉換與放大並經過計算後，會將所設定之要求規格數值顯示在面板上，亦可列印資料留存保管；量測數值以業界常用之 Ra 值(中心線平均粗糙度)為主，量測標準使用 ISO-1997 之規範，設備規格相關參數設定如表 3 所示，圖 7 為 SURFCOM 130A 設備外觀。



圖 7. SURFCOM 130A表面粗糙度量測儀

表 3. SURFCOM 130A表面粗糙度量測儀規格參數

型號		SURFCOM 130A
量測範圍	X 軸 (橫向)	50 mm
	Y 軸 (縱向)	8、80、800 μ m
真直度精度		0.3 μ m / 50 mm
分析項目	使用規格	JIS-2001、JIS-1994、JIS-1982、ISO-1997、ISO-1984、DIN-1990、ASME-1995、CNOMO 規格
	參數	Ra、Rq、Ry(RzDIN)、Rp、Rv、Rc、R3z、RzISO、Rt、RmaxDIN、PC、S、R Δ A、R Δ q、Ir、RsK、Rku、tp、tp2、Rmr、Rk、Rpk、Rvk、Mr1、Mr2、Vo、K、CNOMO-Parameters、ISO、DIN、ASME、JIS
	量測曲線	剖面曲線、粗糙度曲線、濾波波紋度曲線、濾波中心線波紋度曲線、滾動圓波紋度曲線、滾動圓中心線波紋度曲線、DIN4776 特殊曲線、粗糙度中心曲線 (Motif)、波紋度中心曲線(Motif)、包絡波紋度曲線
	表面特性圖表	負荷曲線、功率曲線圖、振幅分佈曲線
	傾斜補償方式	直線補償、R 面補償、前半補償、後半補償、兩端補償、(直線、R 面、兩端補償可以在任意範圍內)
倍率	縱倍率 (Z 軸)	50、100、200、500、1K、2K、5K、10K、100K、AUTO
	橫倍率 (X 軸)	1、2、5、10、20、50、100、200、500、1K、2K、AUTO
濾波器種類		標準型濾波器 2RC、相位補償型濾波器 2RC、相位補償型濾波器 (高斯濾波器)
量測速度		0.3、0.6、1.5、3 mm / s (4 種速度)
傳感器		前端半徑 2 μ m、材質為金剛石、測量力為 0.75mN
其他功能	AI 測量	有測量 AI 功能，使初學者容易使用
	斷差分析功能	合適於測量半導體零件膜厚與面積
	PC 卡	輸出文件、將數據傳送至電腦
標準配備		標準校正片、紀錄紙、觸控筆、操作說明書
各尺寸規格	電源	AC100 ~ 240V \pm 10%、50 / 60 Hz、30VA
	設備尺寸	700 (W) *300 (D) *150 (H) mm
	重量	8Kg

3.2.3 銑削刀具

本次實驗所使用的刀具是由景明精密工具有限公司[24]所生產的鎢鋼銑刀，型號為 S220-CES20400A，為泛用型超微粒端銑刀，應用於低硬度(HRC55 以下)材料之加工，刀具詳細資料如表 4 所示，圖 8 為鎢鋼銑刀各部位名稱對照圖，圖 9 為刀具實體外觀型式。

表 4. S220-CES20400A 鎢鋼銑刀刀具尺寸

銑刀材質	鎢鋼	銑刀外徑(D1)	4.0 mm
適用被加工材質硬度	HRC 55 以下	銑刀柄徑(D2)	6.0 mm
銑刀螺旋角	35°	銑刀刃長(L1)	10 mm
銑刀刃數	2 刃	銑刀全長(L2)	50 mm

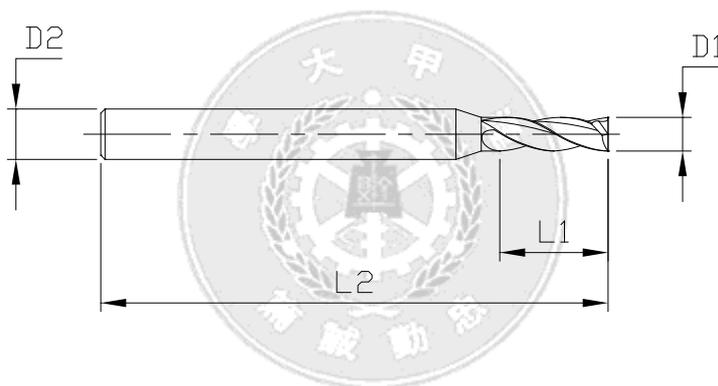


圖 8. 鎢鋼銑刀各部位名稱對照圖



圖 9. S220-CES20400A鎢鋼銑刀實體外觀型式

3.2.4 加工材料

本次實驗所使用的工件材料是醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)，材料尺寸外徑為 $\varnothing 14$ mm，長度為 14 mm，實驗加工前需先在圓外徑銑削深 1 mm 之基準平面，方便加工實驗與檢驗表面粗糙度量測時之夾持定位，表 5 為醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)的主要成分，表 6 為醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)之機械性質，圖 10 是醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)加工實驗前之實際外觀。

表 5. 醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)之主要成分(單位：%)

AL	V	C	Fe	O	N
6.11	3.97	0.002	0.16	0.118	0.006

表 6. 醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)之機械性質：

抗拉強度(UTS) psi	降伏強度(YS 0.2%) psi	
150000	132000	
伸長率(EL) %	斷面縮率(RA) %	硬度(HRC)
14	48	31



圖 10. 醫療級鈦合金(Ti-6Al-4V ELI)加工實驗前之實際外觀

3.3 因子與水準參數決定

3.3.1 問題概述

現今有許多產業都以鈦合金材料來加工使用，使用最頻繁的產業如航太工業、與近些年來蠻被看好的新興醫療產業與一些傳統產業等等，當使用的需求一增加，相對的也就需要相關的加工產業，雖然就加工而言有很多種方式可以達成我們所需要的目的，但一般而言仍然離不開車床、銑床等最基本加工方式，況且近幾年車銑複合加工機的快速發展，產品加工製程上一體成型的加工模式也越來越被要求；另外加工品質精度一直是最被要求的項目，因為牽涉到零件的尺寸精度、幾何形狀、後續加工模式與成本，若是品質精度在一開始就有相關規定與要求的話，如何正確快速完成工作需求、減少後續的加工流程步驟與加工時間和最重要的成本支出等重要議題，因為鈦合金屬於難切削材料，又是現今醫療產業發展趨勢所使用的材料，故本研究將針對常見之 Ti-6Al-4V ELI 銑削加工對表面粗糙度的影響進行研究，以期提供相關加工數據資料給產業應用。

首先決定控制因子，選擇經由特性要因圖判斷出影響切削加工表面粗糙度之切削速度(V)、每刃切削量(Ft)、軸向切削深度(ap)與徑向切削深度(ae)等主要控制因子，其他因子則在相關文獻已有提到，故不再重新驗證而直接以文獻的最佳論點為依據，接著使用田口實驗方法來做因子與水準的設定，而品質特性(y)就是切削加工後的表面粗糙度值(Ra)，該粗糙度數值則由銑床切削粗糙度標準值最精細可達成程度為主，即為 $Ra = 0.4 \mu m$ ，但卻不希望超過或是過於偏低該規格範圍值，所以使用製程能力綜合指標 Cpk 來輔助計算該規格值範圍，設定 Cpk 為穩定的製程狀態，該值為 1.67，且必須吻合該製程能力信心水準達 99%，表示該標準差 σ 為 0.01，帶入公式(2-27)計算後得到該規格值 Ra 範圍下限 LSL

為 $0.35\mu\text{m}$ ，故實驗結果必須符合於該規格值範圍 $Ra = 0.35 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ，並將該品質特性(m)當為望目品質且屬於靜態不隨時間改變，接著設定各因子之水準，選定以三水準為主，由工具書資料範圍設定切削速度(V)為 20、40、60 m/min；切削進給(F)則由粗糙度預估值公式 $Ra = Fz^2/32R$ 先以目標值 $Ra = 0.4 \mu\text{m}$ 做初步估算、刀具設定為 $\varnothing 4.0 \text{ mm}$ ($R = 2.0 \text{ mm}$)帶入計算得每刃切削量(Fz)為 0.16mm，考量文獻提到的誤差，以 0.16 mm 之一半為基準，挑選出 0.12 mm、0.08 mm、0.04 mm 當成 Fz 水準值；軸向切削深度(ap)參考刀具目錄設定範圍為刀具直徑(d)之 0.5 倍(2.0 mm)、1 倍(4.0 mm)與 1.5 倍(6.0 mm)；徑向切削深度(ae)因為是在精切削製程故設定為 0.02 mm、0.04 mm、0.06 mm；本實驗不考慮干擾因子與信號因子，所以經由計算因子與水準之自由度與點線圖的關係後，選定直交表 $L_9(3^4)$ 為本實驗設計使用之直交表格，因為直交表 $L_9(3^4)$ 已將交互作用混和於因子行數中，故無獨立之交互作用行數，其交互作用可參考 $L_9(3^4)$ 交互作用三角表得知，而將控制因子帶入直交表中得到共需要執行 9 次實驗；最後將各實驗設計之水準值轉換成銑床切削加工用參數值，故完成此次之田口實驗規畫。

在田口方法中，找出對品質特性有影響的因子是十分重要的，我們將影響表面粗糙度的各項因素整理成圖 11 的要因分析圖，總共分成六大類，分別為設備、材料、方法、人為、量測與環境，其中以加工方法之相關條件因子對加工面表面粗糙度的影響最大，而本文中所要探討的就是切削參數中的切削深度、每刃切削量、切削速度與刀具切削方式(順逆銑)等因素對鈦合金使用端銑刀進行切削加工時的表面粗糙度影響關係。

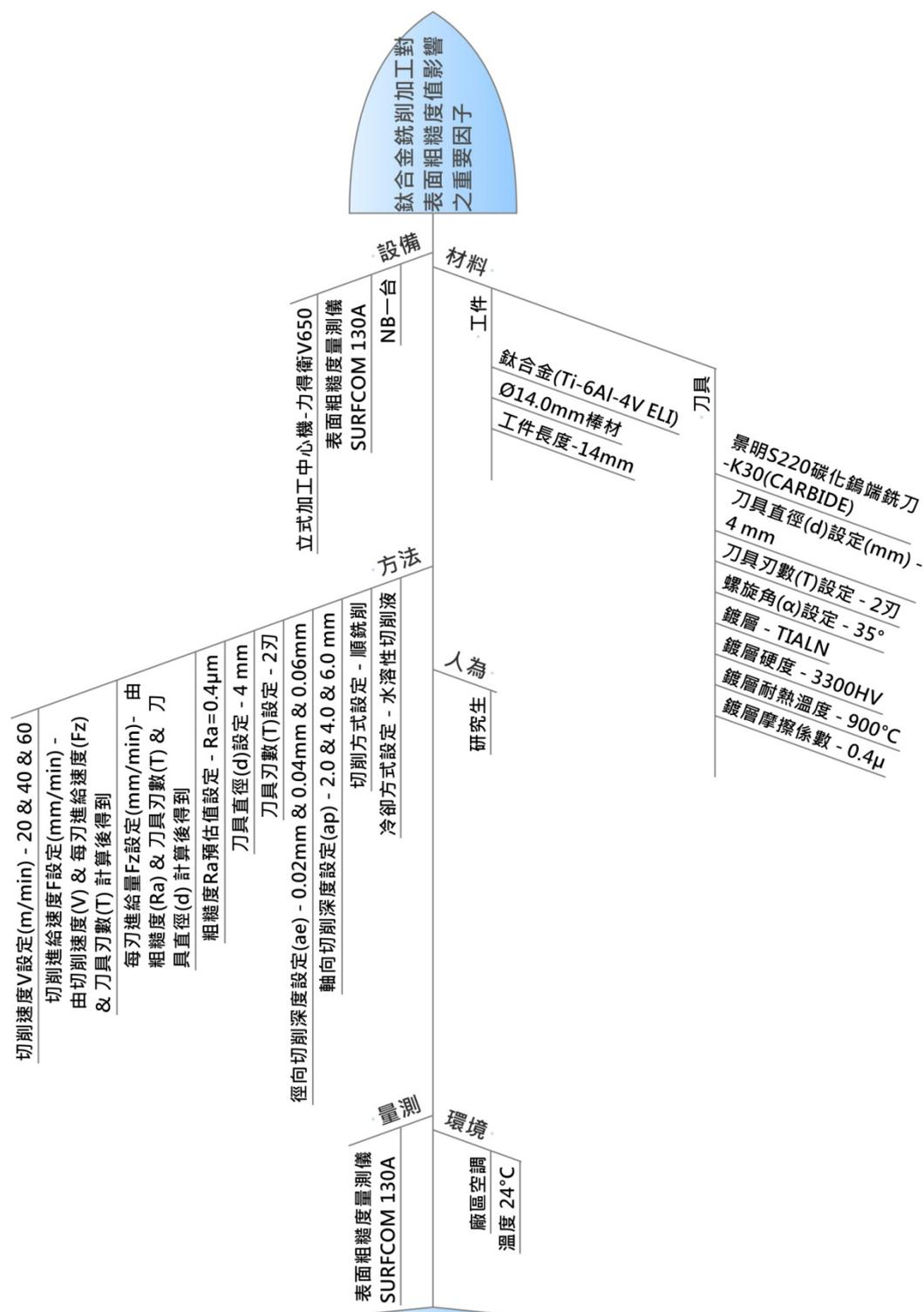


圖 11. 影響表面粗糙度之重要因子分析圖

3.3.2 Ti-6Al-4V ELI 切削加工的品質特性(y)分析

常見四種品質特性如表 7 所示：

表 7. 常見的品質特性

品質特性	理想機能	靜態或動態
望目特性 (nominal-the-best)	$y = m$	靜態
望小特性 (smaller-the-better)	$y = 0$	靜態
望大特性 (larger-the-better)	$y = \infty$	靜態
原點直線型 (zero-point proportional)	$y = \beta M$	動態

註：望小及望大品質特性都假設是正值

以田口實驗方法分析 Ti-6Al-4V ELI 切削加工最佳表面粗糙度值。

- Ti-6Al-4V ELI 切削加工的品質特性(y)為表面粗糙度值(Ra)，規格值 $m = 0.4 \mu\text{m}(\text{Ra})$ 。
- 該 Ti-6Al-4V ELI 切削加工品質特性(y)屬於靜態，並不隨時間改變。
- 該 Ti-6Al-4V ELI 切削加工品質特性(y)判定為望目品質特性 (nominal-the-best)的理想機能 $y = m$ ，因為表面粗糙度值($\text{Ra} = 0.4\mu\text{m}$)即是要達成的目標。

3.3.3 Ti-6Al-4V ELI 切削加工 Level Setting

原始加工參數如下所示：

切削速度(V) = 40 m/min

每刃切削量(Fz) = 0.04 per/mm

軸向切削深度(ap) = 4.0 mm

徑向切削深度(ae) = 0.04 mm

依照原始加工參數設計實驗加工測試相關參數值如表 8 所示：

表 8. 各因子與水準的參數設定

Control Factor	Label	Level1	Level2	Level3	Setting Controllable (Easy/Difficult)
切削速度 (V)	A	20	40	60	Easy
每刃切削量 (Fz)	B	0.04	0.08	0.12	Easy
軸向切削深度 (ap)	C	2.0	4.0	6.0	Easy
徑向切削深度 (ae)	D	0.02	0.04	0.06	Easy

3.3.4 選用直交表

控制因子

三水準控制因子(3 Level Factor)：A (切削速度(V))、B (每刃切削量(Fz))、C (軸向切削深度(ap))、D (徑向切削深度(ae))。

交互作用(Interaction)：無。

點線圖(Linear graph)：· A · B · C · D

因子的自由度： $df = 4 \times (3-1) = 8$

交互作用的自由度： $df = 0$

總自由度： $Total\ df = 8 + 0 = 8$

所需直行的數目(Column Required)： $4 + 0 = 4$

選擇合適的直交表： $L_9(3^4)$

由控制因子得到直交表 $L_9(3^4)$ 如表 9 所示：

表 9. 直交表 $L_9(3^4)$

Factor	A	B	C	D
Exp.	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

將水準值帶入直交表中得到如表 10 所示：

表 10. 直交表之各水準值

Factor	A (切削速度(V))	B (每刃切削量 (Fz))	C (軸向切削深度 (ap))	D (徑向切削深度 (ae))
Exp.	1	2	3	4
1	20	0.04	2.0	0.02
2	20	0.08	4.0	0.04
3	20	0.12	6.0	0.06
4	40	0.04	4.0	0.06
5	40	0.08	6.0	0.02
6	40	0.12	2.0	0.04
7	60	0.04	6.0	0.04
8	60	0.08	2.0	0.06
9	60	0.12	4.0	0.02

將水準值轉換成加工用參數值，實驗用參數表如表 11 所示：

表 11. 實驗用參數表

Factor	轉速 (N)	進給 (F)	軸向切削深度 (ap)	徑向切削深度 (ae)
Exp.	1	2	3	4
1	1592	127	2	0.02
2	1592	255	4	0.04
3	1592	382	6	0.06
4	3183	255	4	0.06
5	3183	509	6	0.02
6	3183	764	2	0.04
7	4775	382	6	0.04
8	4775	764	2	0.06
9	4775	1146	4	0.02

3.4 加工路徑規劃

為求加工時之穩定性與一致性，故規劃加工路徑來限制規範，並應該符合特性要因分析之內容，刀具為順時針旋轉、使用順銑模式、刀具切削接觸工件前應該先空跑一段距離來避免減少背隙的影響、加工前將會先以一支 $\varnothing 12.0$ mm 端銑刀切削相同標準之銑削平面，接著才會以實驗用端銑刀進行各參數之銑削，以求其銑削真實性與穩定性，圖 12 為刀具路徑簡圖。

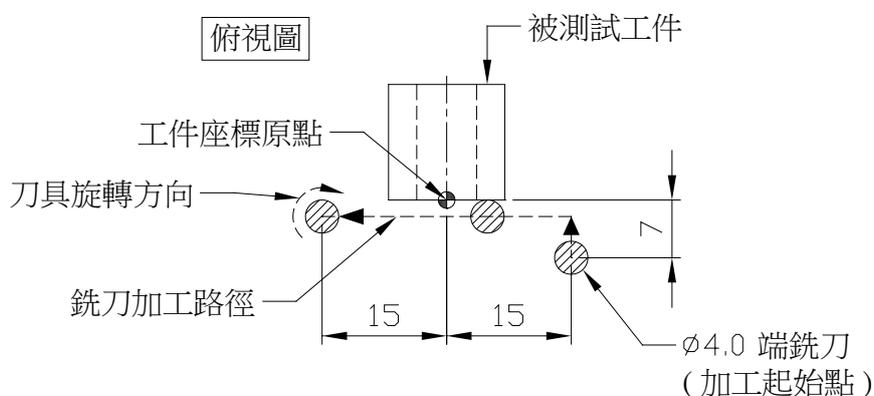


圖 12. 刀具路徑示意圖

依照直交實驗表進行銑削參數調整與測試加工，圖 13 為工件測試加工情形，圖 14 為加工後之模型。



圖 13. 測試工件實際加工情形



圖 14. 加工後之模型(9代表實驗之次數)

3.5 表面粗糙度量測與紀錄

將銑削工件依照實驗次數刻上編號，在進行表面粗糙度量測與紀錄，量測時將量測面分成五次[25]依序量測並記錄，去除銑削前後端不穩定區避免影響量測穩定性來增加表面粗糙度值可性度，量測位置取距離銑刀刀尖 1 mm 之處進行量測，表 12 是表面粗糙度量測數值紀錄表，圖 15 為表面粗糙度量測位置示意圖，圖 16 是表面粗糙度實際量測模式。

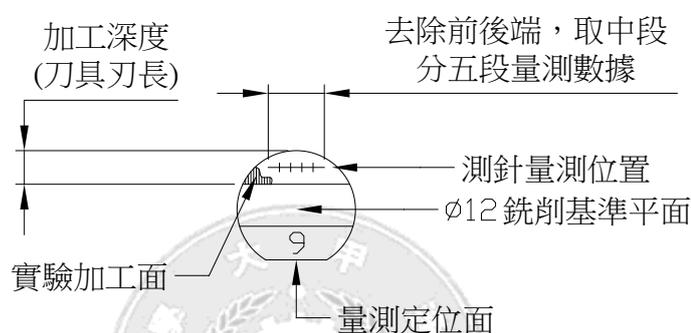


圖 15. 表面粗糙度量測位置示意圖

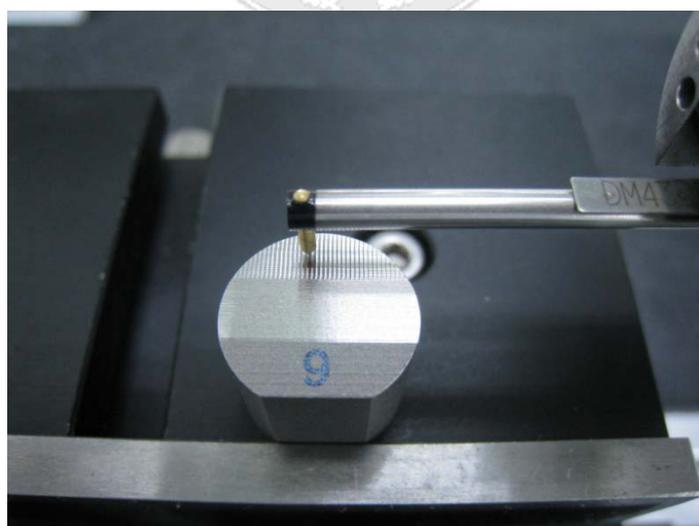


圖 16. 表面粗糙度實際量測模式

表 12. 表面粗糙度量測數值紀錄表

Exp.	y1	y2	y3	y4	y5
1	0.153	0.146	0.136	0.142	0.158
2	0.422	0.404	0.410	0.409	0.407
3	0.760	0.754	0.762	0.751	0.778
4	0.193	0.194	0.193	0.191	0.200
5	0.385	0.381	0.374	0.385	0.388
6	0.641	0.652	0.628	0.612	0.636
7	0.141	0.151	0.142	0.146	0.145
8	0.399	0.384	0.386	0.386	0.398
9	0.479	0.461	0.482	0.482	0.505



第四章 實驗結果與討論

4.1 表面粗糙度數值 S/N 比計算

先計算實驗各組之五個量測值平均值 Average 與標準差 σ ，然後使用望目品質特性第三型計算式(2-9)計算望目 S/N 比，其 S/N 比數值越大代表產品的品質特性越佳，越不容易使產生品質變異；另外一同計算每一組實驗之平均品質損失(Average Quality Loss)，在統計學上稱為均方偏差(Mean Square Deviation, MSD)，計算 MSD 使用(2-6)計算公式，帶入產品的品質特性(y)規格值 $m = 0.4 \mu\text{m}$ (Ra)，其 MSD 數值越小代表產品的品質損失越小，品質也就越佳，表 13 為各實驗組之 S/N 比與 MSD 數值。

$$S/N_{NB3} = -10\log\left(\frac{S^2}{\bar{y}^2}\right) \quad (2-9)$$

S 為標準差， \bar{y} 為平均值。

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = (\bar{y} - m)^2 + S_n^2 \quad (2-6)$$

n 為實驗量測次數， y_i 為實際量測值，m 為規格值。

表 13. 各實驗組之S/N比與MSD數值

Exp.	y1	y2	y3	y4	y5	Average (Ra)	σ	MSD	S/N (db)	
1	0.153	0.146	0.136	0.142	0.158	0.147	0.009	0.064	24.538	
2	0.422	0.404	0.410	0.409	0.407	0.410	0.007	0.000	35.516	
3	0.760	0.754	0.762	0.751	0.778	0.761	0.010	0.130	37.214	
4	0.193	0.194	0.193	0.191	0.200	0.194	0.003	0.042	35.083	
5	0.385	0.381	0.374	0.385	0.388	0.383	0.005	0.000	36.986	
6	0.641	0.652	0.628	0.612	0.636	0.634	0.015	0.055	32.533	
7	0.141	0.151	0.142	0.146	0.145	0.145	0.004	0.065	31.324	
8	0.399	0.384	0.386	0.386	0.398	0.391	0.007	0.000	34.608	
9	0.479	0.461	0.482	0.482	0.505	0.482	0.016	0.007	29.771	
						y avg. 總和 T	3.546		S/N 總和 T	297.573
						y avg. 平均 \bar{T}	0.394		S/N 平均 \bar{T}	33.064



4.2 S/N 比數值分析

由表 13 所得之 S/N 比數值進行分析計算，得到表 14 之 S/N 比控制因子重要度分析相關數據，先計算出各控制因子相同水準之 S/N 比總合(Level S/N Sum)，再加以平均計算處理得相同水準之 S/N 比平均值(Level S/N Average)，如圖 17 為各控制因子之水準 S/N 比反應圖，接著計算由各控制因子的各水準平均 S/N 比最大值與最小值之絕對差($|\Delta|$)，比較各控制因子之絕對差值大小即可以得到 S/N 比控制因子的重要度排序(Rank)，絕對差值越大表示該控制因子越重要，本實驗數據經過計算分析後得到 S/N 比控制因子重要度排序為：B2 > D3 > C3 > A2，每刃切削量(Fz) > 徑向切削深度(ae) > 軸向切削深度(ap) > 切削速度(V)，並以一半原則挑選出本實驗之重要控制因子有三個：

B：每刃切削量(Fz)

C：軸向切削深度(ap)

D：徑向切削深度(ae)

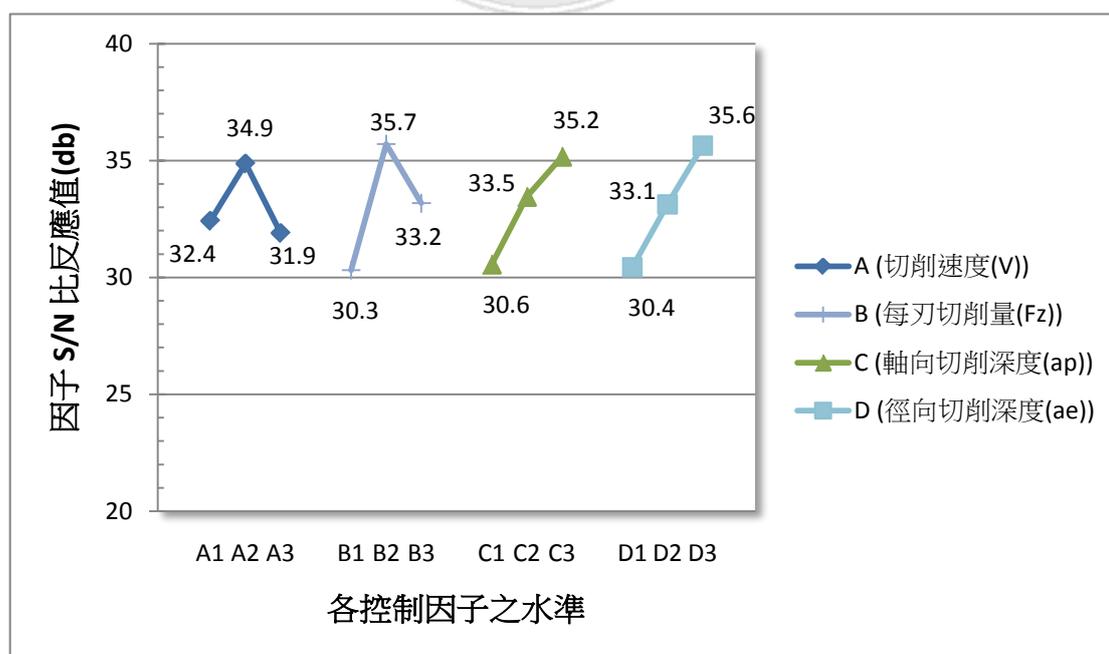


圖 17. 各控制因子之水準S/N比反應圖

表 14. S/N比控制因子重要度分析數據

	A (切削速度 (V))	B (每刃切削量 (Fz))	C (軸向切削深度 (ap))	D (徑向切削深度 (ae))
S/N Level 1	97.3	90.9	91.7	91.3
S/N Level 2	104.6	107.1	100.4	99.4
S/N Level 3	95.7	99.5	105.5	106.9
S/N Avg. Level 1	32.4	30.3	30.6	30.4
S/N Avg. Level 2	34.9	35.7	33.5	33.1
S/N Avg. Level 3	31.9	33.2	35.2	35.6
Δ	2.97	5.39	4.61	5.20
Rank	4	1	3	2
Optimum	34.9	35.7	35.2	35.6
Optimum Level	2	2	3	3
Effect		2.64	2.11	2.57
S/N Sum Effect	40.4			

4.3 Y Avg.數值分析

由表 13 所得之 Average 平均數值進行分析計算，得到表 15 之控制因子重要度分析相關數據，先計算出各控制因子相同水準之 Average 總合 (Level Y Avg. Sum)，再加以平均計算處理得相同水準之 Average 平均值 (Level Y Avg. Average)，如圖 18 為各控制因子之水準 Average 反應圖，接著計算由各控制因子的各水準平均 Average 最大值與最小值之絕對差($|\Delta|$)，比較各控制因子之絕對差值大小即可以得到 Average 控制因子的重要度排序(Rank)，絕對差值越大表示該控制因子越重要，本實驗數據經過計算分析後得到 Average 控制因子重要度排序為：B2 > D3 > A2 > C3，每刃切削量 (Fz) > 徑向切削深度(ae) >切削速度(V) > 軸向切削深度(ap)，並以一半原則挑選出本實驗之重要控制因子有三個：

B：每刃切削量(Fz)

D：徑向切削深度(ae)

A：切削速度(V)

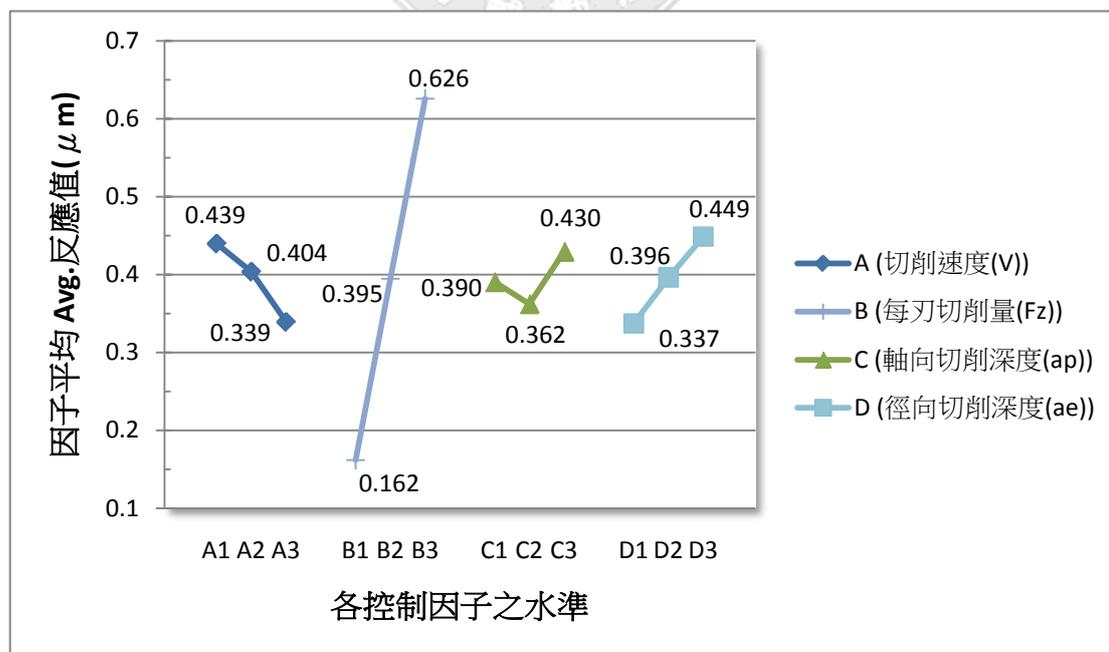


圖 18. 各控制因子之水準Average反應圖

表 15. Average控制因子重要度分析數據

	A (切削速度 (V))	B (每刃切削量 (Fz))	C (軸向切削深度 (ap))	D (徑向切削深度 (ae))
Y Avg. Level 1	1.318	0.486	1.171	1.011
Y Avg. Level 2	1.211	1.184	1.086	1.189
Y Avg. Level 3	1.017	1.877	1.289	1.346
Y Avg. Average Level 1	0.439	0.162	0.390	0.337
Y Avg. Average Level 2	0.404	0.395	0.362	0.396
Y Avg. Average Level 3	0.339	0.626	0.430	0.449
\Delta	0.100	0.463	0.067	0.111
Rank	3	1	4	2
Optimum	0.44	0.63	0.43	0.45
Optimum Level	2	2	3	3
Effect	0.009	0.000		0.055
Y Avg. Sum Effect	0.459			

4.4 計算與預估最佳加工參數

4.4.1 第一階段預估控制因子最佳水準之 S/N 比數值(db)

各控制因子的各水準平均 S/N 比最大值所對應的水準即為該控制因子之最佳條件(Optimum Level)，從表 14 與圖 17 可得知本實驗最佳條件水準為：A2、B2、C3、D3，對照實驗加工參數則為：

A2 = 40 m/min 切削速度(V)

B2 = 0.08 mm 每刃切削量(Fz)

C3 = 6 mm 軸向切削深度(ap)

D3 = 0.06 mm 徑向切削深度(ae)

而該控制因子最佳條件所產生的效應數據(S/N Effect)則由表 14 之該控制因子的各水準平均 S/N 比最大值減去表 13 之 S/N 比平均值獲得，計算公式如(4-1)所示，為了避免高估最佳條件所產生的總效應(S/N Sum Effect)數據，故以一半原則挑選出控制因子重要度排序前半將該控制因子所產生的效應數據(S/N Effect)相加並加上表 13 之 S/N 比平均值，所以當使用該最佳條件加工時所得 S/N 比數據預估為 40.4 (db)，計算公式如(4-2)所示。

$$\hat{\eta}_{\text{prediction}} = \bar{T} + (\bar{y}_{A_{\max}} - \bar{T}) + (\bar{y}_{B_{\max}} - \bar{T}) + (\bar{y}_{C_{\max}} - \bar{T}) + (\bar{y}_{D_{\max}} - \bar{T}) \quad (4-1)$$

$$\hat{\eta}_{\text{prediction}} = \bar{T} + (\bar{y}_{B2} - \bar{T}) + (\bar{y}_{C3} - \bar{T}) + (\bar{y}_{D3} - \bar{T}) \quad (4-2)$$

4.4.2 預估原始加工參數控制因子水準之 S/N 比數值(db)

原始加工參數如下所示：

切削速度(V) = 40 m/min

每刃切削量(Fz) = 0.04 per/mm

軸向切削深度(ap) = 4.0 mm

徑向切削深度(ae) = 0.04 mm

原始加工參數控制條件之水準為：A2、B1、C2、D2，同樣為了避免高估條件所產生的總效應(S/N Sum Effect)數據，以一半原則挑選並參考表 14 所選定之控制因子重要度排序前半將該控制因子條件依照原始加工參數水準所產生的效應數據(S/N Effect)相加並加上表 13 之 S/N 比平均值，故當使用該原始加工參數條件水準加工時所得數據預估為 27.9 (db)，計算公式如(4-3)所示。

$$\hat{\eta}_{\text{prediction}} = \bar{T} + (\bar{y}_{B1} - \bar{T}) + (\bar{y}_{C2} - \bar{T}) + (\bar{y}_{D2} - \bar{T}) \quad (4-3)$$

4.4.3 第二階段調整預估控制因子最佳水準之表面粗糙度數值(Ra)

經過實驗數據分析得表 16 之各因子相關連性，得知要調整表面粗糙度值與 A 控制因子之切削速度有關，可由 S/N 比之最佳條件 A2B2C3D3 分析 A 控制因子之 3 個水準實驗值個別分析得到，當 A 控制因子為水準一時分析所得之預估表面粗糙度值為 0.495 μm (Ra)，當 A 控制因子為水準二時分析所得之預估表面粗糙度值為 0.459 μm (Ra)，當 A 控制因子為水準三時分析所得之預估表面粗糙度值為 0.394 μm (Ra)，所以得到當 A 控制因子為水準三時為 0.394 μm (Ra)最接近符合望目規格值 0.4 μm (Ra)，預估誤差值為 1.46%，故最佳條件應修正為 A3B2C3D3。

表 16. 各因子的相關連性

項次	相關聯性	因子
1. 討厭因子	與 S/N & Y Avg.皆有相關聯	B、D
2. S/N 調整因子	僅與 S/N 有關	C
3. Y Avg.調整因子	僅與 Y Avg.有關	A
4. 成本因子	皆無相關聯	

4.4.4 預估原始加工參數條件與最佳條件之差異

比較兩者的數據得到預估最佳條件之 S/N 比數值高出預估原始加工參數條件之 S/N 比數值達 12.5 (db)，表示該組最佳條件將因子之變異因素減至最低，品質水準也優於原始加工參數條件；再者比較兩者的數據得到預估最佳條件之表面粗糙度值高出預估原始加工參數條件之表面粗糙度值達 0.220 μm (Ra)，更能符合接近要求之望目規格值 $m = 0.4 \mu\text{m}$ (Ra)，預估提升效益達 55.88%。

4.4.5 變異數分析(ANOVA)

變異數分析(ANOVA)針對各個控制因子計算出對表面粗糙度之影響程度，因為從實驗分析中得到 A 控制因子之切削速度(V)並非重要的控制因子，所以先將該控制因子 Pooled 當成 Error 數據，經過計算後得到表 17 之各控制因子變異數貢獻率分析結果：B 控制因子之每刃切削量(Fz)變異數貢獻率為 33.05%、C 控制因子之軸向切削深度(ap)變異數貢獻率為 24.74%、D 控制因子之徑向切削深度(ae)變異數貢獻率為 30.80%，三個控制因子對表面粗糙度的貢獻率都大於 Error 貢獻率 11.41%以上，足以證明這三個控制因子對表面粗糙度值有著大小不一的影響程度，尤其以每刃切削量(Fz)該控制因子對品質變異數的影響最大。

表 17. 各控制因子變異數貢獻率分析結果

變異數分析 ANOVA	因子的變異 SS	因子 自由度 DOF	每個自由度的變異數 V	變異數 分佈比值 F	變異數 貢獻率(%) P
A (切削速度(V))	15.05	2	7.52		Pooled
B (每刃切削量(Fz))	43.60	2	21.80	2.90	33.05%
C (軸向切削深度(ap))	32.64	2	16.32	2.17	24.74%
D (徑向切削深度(ae))	40.63	2	20.31	2.70	30.80%
Error	0	0	0		
Pooled Error	15.05	2	7.52		11.41%
Total	131.92	8			100.00%

4.5 驗證實驗

4.5.1 原始加工參數條件與最佳條件之水準參數

經過分析所得到的原始加工參數條件與最佳條件必須經過實際加工測試來證明分析的準確性與再現性，表 18 為原始加工參數條件與最佳條件兩組實驗的水準參數。

表 18. 原始加工參數條件與最佳條件的水準參數

Factor	A (切削速度(V))	B (每刃切削量(Fz))	C (軸向切削深度(ap))	D (徑向切削深度(ae))
Exp.	1	2	3	4
原始條件	40	0.04	4.0	0.04
最佳條件	60	0.08	6.0	0.06

4.5.2 驗證加工數據紀錄

驗證加工後，一樣進行表面粗糙度量測與紀錄，量測時將量測面分成五次依序量測記錄，去除銑削前後端不穩定區避免影響量測穩定性來增加可性度，量測位置取銑削深度距刀具底部 1mm 處進行，表 19 為原始加工參數條件與最佳條件之表面粗糙度量測數據紀錄，圖 19 為最佳條件之表面粗糙度量測曲線圖(縱比例 10 μm / 10 mm，橫比例 100 μm / 10 mm)，圖 20 為原始加工參數條件之表面粗糙度量測曲線圖(縱比例 10 μm / 10 mm，橫比例 100 μm / 10 mm)。

表 19. 原始條件與最佳條件的表面粗糙度量測數據

Exp.	y1	y2	y3	y4	y5
原始條件	0.142	0.133	0.137	0.139	0.138
最佳條件	0.394	0.389	0.390	0.392	0.388



圖 19. 最佳條件之表面粗糙度量測圖示



圖 20. 原始條件之表面粗糙度量測圖示

4.5.3 驗證加工數據分析

經過計算分析得到平均值 average、標準差 σ 、使用 2 - 6 公式計算 MSD 與 2 - 9 公式計算 S/N 比，表 20 為原始加工參數條件與最佳條件的表面粗糙度量測分析數據。

表 20. 原始加工參數條件與最佳條件的表面粗糙度量測分析數據

Exp.	y1	y2	y3	y4	y5	Average (Ra)	σ	MSD	S/N (db)
原始條件	0.142	0.133	0.137	0.139	0.138	0.138	0.003	0.069	32.491
最佳條件	0.394	0.389	0.390	0.392	0.388	0.391	0.002	0.000	44.200

4.5.4 原始加工參數條件與最佳條件數據比較

藉由比較兩者控制因子之 S/N 比差距，與比較表面粗糙度值與規格值之間差距，來證明預測與實驗的準確性，由表 21 的原始加工參數條件與最佳條件分析數據驗證結果比較表可以得知，在確認實驗品質變異 S/N 比的比較上以最佳條件的 44.20 (db)為最佳，比原始加工參數條件多出 11.71 (db)，但是與預估值比較則高出有 3.81(db)的差距，表示確認實驗結果更優於預測之 S/N 比，品質的穩定性更良好，其 S/N 比誤差率為 9.45%；另外確認實驗在表面粗糙度值的結果為原始加工參數條件的 0.138 μm (Ra)、最佳條件的 0.391 μm (Ra)，兩者以最佳條件最接近表面粗糙度規格值 0.4 μm (Ra)，跟預估值比較有 0.003 μm (Ra)的差距，誤差僅有 0.91%，表示最佳條件在調整 A 控制因子真能獲得接近預估規格值之結果，並且可靠性與再現性相當良好；圖 21 為確認實驗加工最佳條件之表面粗糙度使用 Alicona 3D 表面量測儀照攝放大 100 倍圖示，圖 22 為確認實驗加工原始加工參數條件之表面粗糙度使用 Alicona 3D 表面量測儀照攝放大 100 倍圖示。

表 21. 原始加工參數條件與最佳條件之驗證結果比較

驗證比較	原始加工參數條件	最佳條件
控制因子與水準	A2B1C2D2	A3B2C3D3
預估粗糙度 S/N 比(db)	27.87	40.39
驗證粗糙度 S/N 比(db)	32.49	44.20
預估與驗證 S/N 比(db)之差	4.62	3.81
預估與驗證 S/N 比(db)之誤差率	16.57%	9.45%
預估粗糙度平均值(Ra)	0.174	0.394
驗證粗糙度平均值(Ra)	0.138	0.391
預估與驗證粗糙度平均值(Ra)之差	0.036	0.004
預估與驗證粗糙度平均值(Ra)之誤差率	20.76%	0.91%

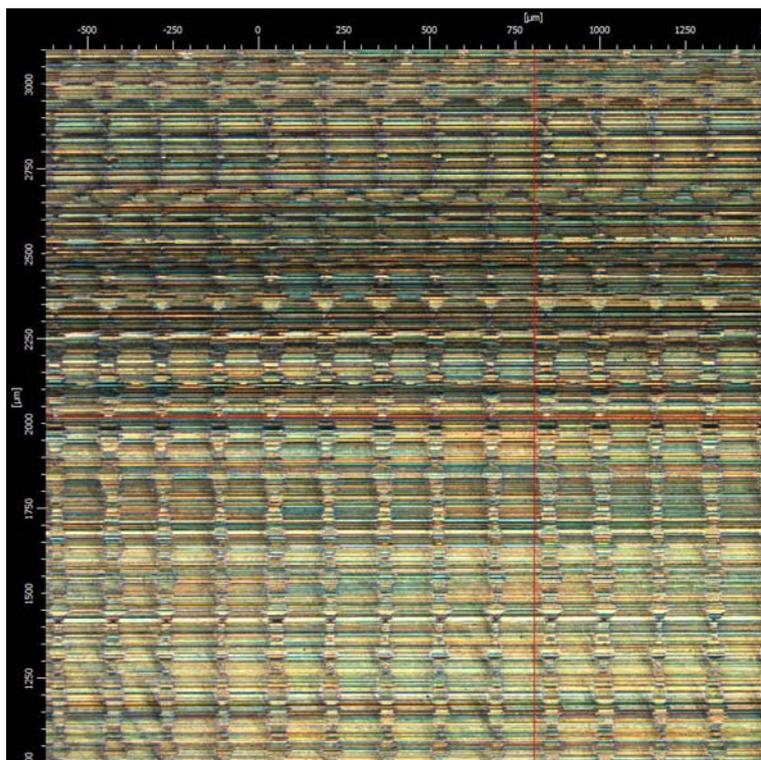


圖 21. 確認實驗加工最佳條件之表面粗糙度100倍放大圖

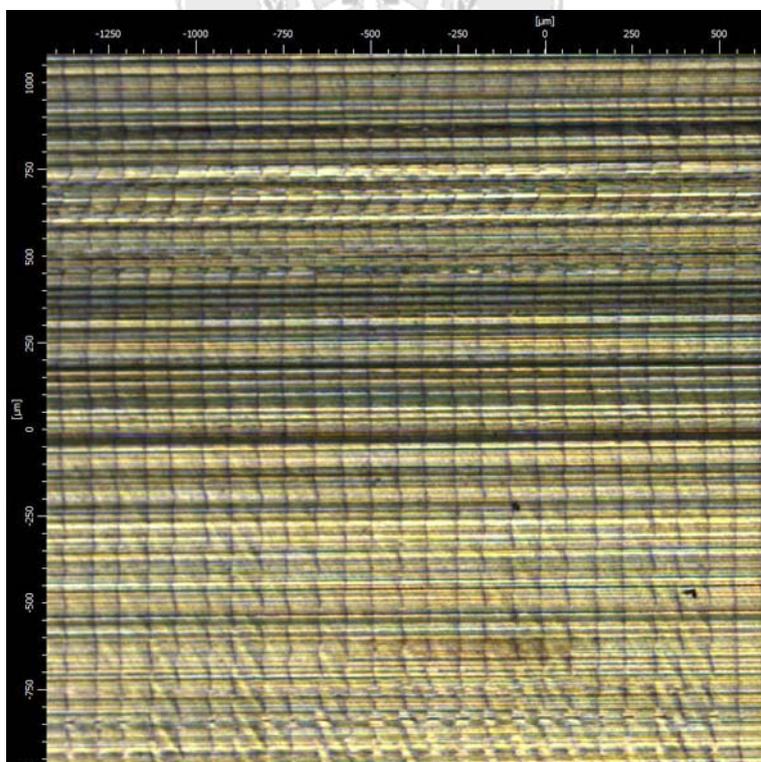


圖 22. 確認實驗加工原始加工參數條件之表面粗糙度100倍放大圖

4.6 效率提升

最佳條件之材料移除率計算參數可由表 18 各因子條件水準與表 12 實驗用參數表得知， $v = F = 764 \text{ mm/min}$ 、 $d = ap = 6 \text{ mm}$ 、 $w = ae = 0.06 \text{ mm}$ ，帶入材料移除率公式(2-1)，得 $275.04 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。

$$\text{MRR} = wdv = 0.06 \times 6 \times 764 = 275.04 \text{ mm}^3/\text{min}$$

原始加工參數條件之材料移除率計算參數可由表 18 各因子條件水準與表 12 實驗用參數表得知， $v = F = 509 \text{ mm/min}$ 、 $d = ap = 4 \text{ mm}$ 、 $w = ae = 0.04 \text{ mm}$ ，帶入材料移除率公式(2-1)，得 $81.44 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。

$$\text{MRR} = wdv = 0.04 \times 4 \times 509 = 81.44 \text{ mm}^3/\text{min}$$

比較兩者材料移除率差異，很明顯的最佳條件優於原始加工參數條件，材料移除率差異比例高達 337.7%，證明最佳條件比原始加工參數條件更有效率移除材料。



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本研究經田口實驗方法規劃與分析，得到切削 Ti-6Al-4V ELI 鈦合金表面粗糙度值最佳條件與水準，在 S/N 比則確實有比原始條件提升，證明使用田口方法可以改善切削加工產生之表面粗糙度品質變異並提升產品品質，且能有效縮短實驗次數與分析時間，對解決工程參數問題有很大幫助。

確認實驗所得之表面粗糙度平均值(Ra)結果落在 $0.391 \mu\text{m}$ (Ra)，與預估值 $0.394 \mu\text{m}$ (Ra)相當接近僅有 0.91%的誤差，與設定規格值 $m = 0.4 \mu\text{m}$ (Ra)相比較也只有 2.25%的誤差，該值 $0.391\mu\text{m}$ 吻合於所設定希望達到規格值範圍 $Ra = 0.35 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 內，表示在設定選擇控制因子與水準時，真正找到影響品質特性(y)的控制因子與水準，該因子重要度排序為每刃進刀量、切削徑向深度、軸向切削深度與切削速度，而該最佳水準經過調整分別為每刃進刀量在水準二的 0.08 mm 、切削徑向深度在水準三的 0.06 mm 、軸向切削深度在水準三的 6 mm 、切削速度在水準三的 60 m/min ；另外比較兩者材料移除率差異，很明顯的最佳條件優於原始加工參數條件，材料移除率差異比例高達 337.7%，證明最佳條件比原始加工參數條件更有效率移除材料。

5.2 未來展望

影響表面粗糙度之品質特性，不僅僅是主軸轉速、進給速率與切削深度之間的相互關係，尚有其他因素也有相關聯，如刀具形式大小、螺旋角大小、鍍層種類、切削損耗、刀具與機台自發性振顫等都是可能造成切削加工表面粗糙度誤差之因素，以上因素幾乎都有人各別做過研究，得到的結論也都是侷限於某幾項選定的條件因子，但幾乎都將刀具與機台自發性振顫忽略不計，若是可以將之納入分析，並找出或推論在某一切削條件因子之水準容易產生振顫現象，讓後人能更輕易地運用或是閃避，也是值得研究方向之一。

田口方法對製程上參數的改善有相當高的助益，但是運用上需要有經驗豐富的人來協助釐清條件與水準重要性，如此方能快速求解並改善品質；但若是經驗不足的人來設定條件與水準，有可能方向錯誤多做幾次實驗與分析，也有可能求得非最佳條件水準之最佳解，所以經驗豐富與專家系統就相對重要，而為了求得真正符合該切削條件之水準，並非實驗設計時之水準，建議能再搭配最佳化方法來解析會得到更精準之表面粗糙度值。



參考文獻

1. CENTER, C.B.T.T.S.O.T.M.D., *MACHINING DATA HANDBOOK 3rd Edition Vol.1*. 1980: METCUT RESEARCH ASSOCIATES INC.
2. JOSEPH R. DAVIS, S.E., *METALS HANDBOOK NINTH EDITION VOLUME 16 MACHINING*. 1989: ASM INTERNATIONAL.
3. 唐文聰編譯, *切削加工技術*. 初版 ed. 1986, 台北市: 全華圖書.
4. 洪榮哲編譯, *難削材料之切削加工*. 初版 ed. 1989, 台北市: 全華圖書.
5. 高道鋼編譯, *鈦銲接技術*. 初版 ed. 2001, 臺北: 全華科技圖書.
6. Su, Y., et al., An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V. *Wear*, 2006. **261**(7-8): p. 760-766.
7. 邱衍智, *Ti-6Al-4V 鈦合金之可加工性探討*, in *機械與自動化工程所*. 2004, 國立高雄第一科技大學: 高雄市. p. 77.
8. Alauddin, M., M.A. ElBaradie, and M.S.J. Hashmi, *Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995. **55**(2): p. 123-127.
9. 尤世承, *球形端銑刀加工曲面之表面粗糙度及精度探討*, in *機電工程學系博碩專班*. 2009, 華梵大學: 台北縣. p. 93.
10. 李昭佐, *端銑刀之傾角、螺旋角與鍍膜對銑削硬鋼工件表面粗糙度之影響*, in *機電工程研究所*. 2007, 華梵大學: 台北縣. p. 76.
11. Davim, J.P., et al., Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components. *Composite Structures*, 2003. **62**(1): p. 67-73.
12. 鄭忠賢, *不同鍍膜端銑刀對 SUS304 之銑削特性探討*, in *機械工程學系專班*. 2002, 國立成功大學: 台南市. p. 72.
13. 許堯銘, *應用田口方法於陶瓷刀具硬車削模具鋼之切削條件最適化研究*, in *機械工程系*. 1911, 國立勤益科技大學: 台中縣. p. 94.
14. 陳映伸, *以田口實驗法在工具機軸向定位精度之研究*, in *材料與製造工程所*. 2009, 逢甲大學: 台中市. p. 56.
15. 黃錦芬等翻譯, *機械製造*. 初版 ed. 2008, 臺北市: 台灣培生教育出版股份有限公司.
16. 高道鋼編譯, *實用銑床加工技術*. 初版 ed. 1999, 臺北市: 全華科技圖書.
17. 王瑤琴主編, *化工設備設計全書 - 鈦制化工設備設計*. 初版 ed. 1985, 上海: 上海科學技術出版社.
18. 王輔春等編著, *工程圖學與電腦製圖之關聯*. 二版 ed, ed. 楊永然、朱鳳傳、康鳳梅、詹世良. 2007, 臺北縣土城市: 全華圖書.
19. 嚴轟編著, *機械設計之允差配合*. 再版八刷 ed. 2001: 財團法人徐氏文教基金會.

20. 唐文聰、韓尚智編著, *端銑刀使用技術*. 再版 ed. 1982, 台北市: 機械技術出版社.
21. 李輝煌著, 田口方法 品質設計的原理與實務(Taguchi methods principles and practices of quality design.). 三版 ed. 2008, 臺北縣五股工業區: 高立圖書有限公司.
22. 科建管理顧問著作委員會, *Six Sigma 綠帶人員培訓*. 初版 ed. 2004: 科建管理顧問股份有限公司.
23. 潘浙楠著, 品質管理 理論與實務 (Quality management principles and practices). 二版 ed. 2009, 臺北市: 華泰文化.
24. *西門德克精密刀具綜合型錄*. 2008, 景明精密工具有限公司: 台南縣.
25. 俞漢清編著, *表面粗糙度標準及應用*. 初版 ed. 1996, 北京: 中國計量出版社.

