

逢甲大學學生報告 ePaper

應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量之
實證研究

An Empirical Study on Optimizing Metal Grinding
Process Quality and Carbon Emissions Using the Taguchi
Method

作者：呂函湘、鄭羽喬、蕭予綺、匡玘

系級：工業工程與系統管理學系 工業三甲

學號：D1050677、D1090123、D1018423、D1050090

開課老師：王姿惠 博士

課程名稱：品質與可靠度工程

開課系所：工業工程與系統管理學系

開課學年：112 學年度 第 2 學期



中文摘要

本次研究主要參考王霈穎於 2023 年發表之論文「應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量」。該論文提及到，受到全球暖化的影響，極端氣候變遷逐漸出現各國紛紛以降低碳排放為目標，有鑒於此歐盟制定碳關稅政策，將針對高碳排產品收取碳稅。其中金屬加工產業即屬於高碳排之產業且因勞動人口老化，老師傅們逐漸退出工廠，使得產品加工之品質受到影響。因此原論文希望在維持產品加工品質的同時降低碳排放量。而本研究基於使用論文數據集，應用田口方法實驗設計流程再次檢視其正確性，並利用 Minitab 統計軟體驗證實驗數據進行分析。最後再將本研究之實驗結果與該論文之實驗分析結果進行比較，總結差異。

關鍵字：田口方法、低碳排、金屬研磨加工、Minitab

Abstract

This study primarily references the paper "Optimization of Metal Grinding Process Quality and Carbon Emissions Using Taguchi Method" published by Wang Pei-Ying in 2023. First, the research background and motivation of the paper are introduced. With the impact of global warming, extreme climate changes are gradually emerging, and countries are aiming to reduce carbon emissions. In view of this, the European Union has formulated a carbon tariff policy to levy carbon taxes on high-carbon products. The metal processing industry is one such high-carbon industry. Additionally, the aging workforce and the gradual retirement of skilled workers have affected the quality of product processing. Therefore, the original paper aims to reduce carbon emissions while maintaining product processing quality. Next, this study uses the Taguchi method and Minitab statistical software to analyze the experimental data from the referenced paper. Finally, the experimental results of this study are compared with the experimental analysis results of the original paper, and the differences are summarized.

Keyword : Taguchi method, low carbon emissions, metal grinding process, Minitab

目 錄

目 錄.....	3
第一章 緒論.....	7
1.1 研究背景及動機.....	7
1.1.1 研究背景.....	7
1.1.2 研究動機.....	7
1.2 研究目的.....	8
第二章 文獻探討.....	9
2.1 溫室氣體與國際碳稅.....	9
2.1.1 溫室氣體.....	9
2.1.2 國際碳稅.....	9
2.2 品質工程.....	10
2.2.1 各類實驗手法.....	10
2.2.2 直交表.....	11
2.2.3 田口方法於生產工廠之應用.....	13
2.2.4 S/N 比.....	14
2.2.5 品質損失函數.....	16
2.3 田口方法相關文獻.....	18
2.3.1 單品質目標田口方法.....	18
2.3.2 多品質目標田口方法.....	19
第三章 研究方法.....	20
3.1 研究說明.....	20
3.2 研究流程介紹.....	20
第四章 改善案例.....	22
4.1 改善案例之實驗說明.....	22

4.1.1	本實驗之研究限制.....	22
4.1.2	本實驗器材.....	22
4.1.3	焊道研磨加工考量因素.....	23
4.2	實驗參數介紹.....	24
4.2.1	焊道研磨耗材.....	24
4.2.2	砂輪轉速.....	28
4.2.3	進給速率.....	28
4.2.4	BUFF 力量控制器施力.....	29
4.2.5	研磨工具與平面焊道夾角.....	30
4.2.6	實驗控制因子參數設定.....	30
4.3	第一階段實驗流程介紹.....	31
4.3.1	田口方法設計.....	31
4.3.2	Mintanb 統計軟體實作.....	33
4.3.3	確認實驗.....	40
4.4	第二階段實驗流程介紹.....	42
4.4.1	實驗研究限制與公式說明.....	42
4.4.2	實驗數據計算.....	42
4.4.3	Minitab 統計軟體.....	43
4.4.4	確認實驗並比較 4.3 與 4.4 章節之實驗結果.....	46
第五章	結論.....	47
5.1	研究結論.....	47
參考文獻	48

圖目錄

圖 1、直交表符號定義.....	12
圖 2、參數設計步驟.....	14
圖 3、各因子與目標值之關係圖.....	15
圖 4、田口方法之品質損失函數觀念圖.....	17
圖 5、影響焊道研磨加工之品質因素探討魚骨圖.....	24
圖 6、焊道加工工件之實作材料.....	27
圖 7、焊道加工工件之實作材料.....	27
圖 8、砂輪轉速與砂輪磨損量之關係圖.....	28
圖 9、進給速度與砂輪磨損量之關係圖.....	29
圖 10、創建田口設計之操作.....	34
圖 11、控制因子與水準數參數設定.....	35
圖 12、直交表與雜音因子設定.....	35
圖 13、控制因子名稱與其三水準參數設定.....	36
圖 14、分析田口設計之操作.....	37
圖 15、受力值標準差之回應值設定.....	38
圖 16、圖表呈現及線性模型設定.....	38
圖 17、S/N 比品質特性設定.....	39
圖 18、實驗數據結果之 S/N 比因子反應值.....	39
圖 19、實驗數據結果之 S/N 比因子反應圖.....	40
圖 20、Minitab 統計軟體之回應值設定.....	44
圖 21、第二階段實驗數據結果之 S/N 比因子反應.....	45
圖 22、第二次實驗數據結果之 S/N 比因子反應圖.....	45

表目錄

表 1、研究步驟說明.....	21
表 2、焊道研磨耗材之三水準.....	27
表 3、控制因子參數設定及其三水準.....	30
表 4、L9直交表九組實驗之控制因子組合.....	31
表 5、九組實驗原始數據蒐集.....	32
表 6、九組實驗整理後之數據.....	33
表 7、九組實驗數據之受力值平均值與標準差.....	33
表 8、受力值標準差之實驗數據輸入.....	36
表 9、實驗數據結果之最佳參數組合.....	40
表 10、各實驗參數組合之 S/N 比.....	41
表 11、原始與最佳參數組合 S/N 比之計算與比較.....	41
表 12、原始與最佳參數組合之實驗值與預測值之比較.....	41
表 13、各實驗組合換算可運行次數、時間、用電度數及碳排放量值.....	43
表 14、各實驗組合之受力值標準差及碳排放量.....	43
表 15、Minitab 統計軟體輸入之數據.....	44
表 16、第一與第二階段最佳參數組合 S/N 比之計算與比較.....	46
表 17、第一與第二階段最佳參數組合 S/N 比實驗值及預測值之比較.....	46

第一章 緒論

1.1 研究背景及動機

1.1.1 研究背景

在王霈穎「應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量」論文中之研究背景為，因全球氣候受到地球暖化影響，嚴峻的氣候變遷出現，各國紛紛簽定相關國際公約希望在 2050 年達到淨零碳排的目標。而中華民國雖非國際組織的成員但也跟進國際的腳步，制定相關法案並依據 ISO 國際標準組織制訂相關碳盤查之程序，詳細解說其程序內容及計算規則並輔導企業執行。而在各產業中，工業屬於高碳排的產業，雖然現在已有許多相關碳捕捉及儲存之技術，但對於許多中小企業而言導入相關技術之成本過於龐大，不易導入執行。所以只能從製程著手，主要針對高碳排製程進行改善。此論文使用田口方法探討是否將碳排放量加入加工考量後產品會有品質變化作一研究。

1.1.2 研究動機

在王霈穎「應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量」論文中之研究動機為，金屬加工是製造業的基礎，但因其惡劣的工作環境造成長期缺工。因金屬加工需因應不同產品的製程需求，涵蓋許多不同的加工技術。其中以焊道研磨最常見，但因製造過程中複雜的加工程序及表面粗糙度不一，仍須仰賴老師傅的相關經驗進行判斷。但受到勞動力人口高齡化影響，老師傅之經驗傳承也出現斷層，工廠須藉由自動化及智慧製造等技術將老師傅加工技術傳承下去，但對於一般機械手臂而言無法精準判斷加工時是否需更換研磨輪盤或研磨劑等加上新進之作業員因相關經驗不足，導致加工品質不穩定。2050 淨零排放為大部分國家之共同目標，而歐盟為了在期限內達成目標提出了碳邊境調整機制計畫，而中華民國為出口導向之國家，且歐洲地區為中華民國第二主要出口貿易區，而歐盟將針對高碳排放之產品進行碳關稅之徵收，若不降低相關產品之碳排放量，將大幅

增加企業的成本，因應未來低碳排之貿易趨勢，高碳商品可能失去市場競爭力。

本研究之研究動機為因在品質工程課程中學習到如何運用田口法進行實驗設計，以及使用相關軟體進行數據分析。因此想藉由探討田口法相關論文了解田口法實際應用。

1.2 研究目的

本研究透過分析王需穎「應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量」論文，了解如何利用田口法進行金屬加工產業之實驗設計，使用論文中的實驗數據進行分析驗證，最後與論文之實驗結果進行比較並分析本研究之結果與論文之結果是否有差異。

第二章 文獻探討

2.1 溫室氣體與國際碳稅

2.1.1 溫室氣體

此部分將介紹造成地球暖化之主要五大溫室氣體。首先為二氧化碳，其約占大氣中溫室氣體含量之 55%，主要來源為人類不斷大量開採石油、天然氣及煤等化石燃料所產生。其次為氟氯碳化物，約占大氣中溫室氣體含量之 24%，其中以 CFC-11、CFC-12 及 CFC-13 為主，為破壞臭氧層之元兇，維拉 布哈德蘭·拉馬納森 (Veerabhadran Ramanathan) 於 1987 年推動了《蒙特婁議定書》(Montreal Protocol)，並於 1994 年起逐步禁止氟氯碳化物的使用。第三為甲烷，約占大氣中溫室氣體含量之 15%，為生物體發酵及腐化之變更過程及物質的燃燒不完全所致，主要來自農業、汽機車及掩埋場之排放。第四為氧化亞氮，又稱一氧化二氮，約占大氣中溫室氣體含量之 6%，為石化燃料之燃燒、微生物及化學肥料分解排放所產生。最後為臭氧，氮氧化物與碳氫化合物經化學作用所產生，為地球的守護者，主要為地球表面生物抵擋紫外線之傷害，可反射約 99% 的紫外線，但因氟氯碳化物進入平流層後，使得平流層受到紫外線的照射，進而分解產生氯原子，並與臭氧進行反應，使得臭氧被分解消失，而過量的紫外線直接照射至地球表面，導致地表溫度升高。

2.1.2 國際碳稅

為達成 2050 年淨零碳排的目標，依照「污染者付費」原則，碳邊境稅 (carbon border tax)，俗稱碳關稅隨之誕生。主要針對進口商品中碳密集型產 (carbon-intensive production)，亦稱為高碳排產品，徵收二氧化碳排放之特別關稅。製造過程中碳排放愈高的產品需支付愈多碳關稅。

率先提出碳關稅的歐盟為了實現「2050 氣候中和」及「2030 年溫室氣體排放量減量 55%」之目標，已於 2021 年 07 月正式公布《碳邊境調整機制計畫》

(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)，並預計 2027 年開始執行。而美國版碳關稅——《清潔競爭法案》(Clean Competition Act, CCA) 搶先歐盟於 2024 年上路。

2.2 品質工程

品質工程為田口玄一 (Taguchi Gen'ichi) 博士所創史的一種工程方法，以統計學為基礎來進行各種實驗及生產過程中之控管，可達到產品之品質改善 並降低實驗成本與時間 (Jayarjun Kandam & Mahajan, 2021)，品質工程又名田口式品質工程 (Taguchi quality engineering) 或稱田口方法 (Taguchi methods)。

2.2.1 各類實驗手法

(1) 試誤法 (trial and error method)

試誤法為傳統之實驗策略，根據實驗結果，於下一次之實驗中改變部分 (一個或兩個) 因子水準 (factor level)，試誤法需經過長時間不斷地更換因子水準進行嘗試，就算有結果也無法保證其結果為最佳解。

(2) 實驗設計 (Design of Experiments, DOE)

又稱試驗設計，以較少的實驗次數、較小的實驗規模、較短的實驗週期以及較低的實驗成本來設計實驗，並應用變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 作為統計分析計算工具，使實驗受到其他因素及環境之干擾為最小並提高獲得資訊的效率，使其達到目標之最佳化。

(3) 單因子實驗 (single factor experiment)

僅針對一項要素因子進行實驗，稱之為「一次一因子法」。因為一次僅探討一個因子之變化及影響，忽略因子間之交互作用 (interaction)，因此實驗結果容易產生變異，再現性 (reproducibility) 較差。

(4) 全因子實驗 (full factorial experiment)

考慮到所有可能的因子水準組合，隨著因子水準數的增加，所需之實驗次數也將以幾何級數成長，進而提升實驗之時間、成本以及複雜度，全因子

在實際操作上也有一定的難度。

(5) 田口方法

田口博士使用直交表來蒐集資料，目的是透過較少的實驗組合次數來決定最佳因子參數設定，為部分因子實驗 (fractional factorial experiment)，其重點特色為交互作用與因子的混合，可調查各控制因子 (control factor) 間是否有交互作用，以避免產生的結果為非最佳組合，並可減少設計及生產時產生之錯誤及成本；而田口方法亦稱「穩健設計 (robust design)」，所謂穩健係指設計之產品品質對於周圍影響之敏感度為最小，Bisgaard (1990)；Al Hazza et al. (2017) 皆表示田口方法著重於設計，其原則包括使用較少之實驗次數，以低成本達到高品質，且探討品質特性之變異，降低變異原因使其最小化，以致產品對於變異來源不敏感是進行田口方法實驗中之重要技巧，並以 S/N 比作為衡量尺度，著眼於工程系統中之機能轉換，以理想品質機能為主軸，設法找出最強健之因子組合，將能量轉到有用的功能上，使其訊號及雜音之比值為最大 (盛其安，2004)，再利用直交表進行「再現性核對 (check)」，藉此核查研究開發時產品品質在市場上之再現性。完成實驗設計後，須根據最佳結果再行確認實驗以作核對，確認其可靠性，也可藉由成效數據化了解最佳組合結果與原組合之品質改善差異變化。

2.2.2 直交表

直交表起源於拉丁方陣 (Latin Square)，拉丁方陣是一種 $n \times n$ 的方陣，內有 n 種不同元素，其各元素在同一行或同一列裡僅會出現一次。1776 年瑞士數學家及物理學家萊昂哈德·歐拉 (Leonhard Euler) 提出了第一篇有關拉丁方陣之論文 De Quadratis Magicis，談論若兩個拉丁方陣疊合後，沒有兩個格子具有相同之一對符號，則稱這兩個方陣為「正交」，而合併後的方陣稱之為「希臘拉丁方陣」或「歐拉方陣」。

直交表規格表示為 $L_n(b^c)$ 其中符號定義 (如圖 1 所示)：L 取自於拉丁方陣

之英文 Latin 的第一個字母，為直交表之代號，並結合數字表示其矩陣規模大小；
 a 為列數，表示實驗次數； b 為因子水準數； c 為行數，表示最多可容納的因子數。



圖 1、直交表符號定義

田口博士一共列舉十八種規格的直交表，一般稱之為標準直交表，而常用之直交表，二水準直交表為 L_8 、 L_{12} 、 L_{16} ；三水準直交表為 L_9 、 L_{18} 、 L_{36} 。

直交表選用步驟：

步驟一：計算總自由度 (degree of freedom, df)，即為列數 $a - 1$

步驟二：計算最少實驗次數，即為 $df + 1$ ，並利用最少實驗次數挑選合適之直交表。

直交表中內含兩種參數設計 (parameter design) 因子配置：

- (1) 控制因子：可由設計人員控制及決定的，使非機遇原因 (assignable cause) 所造成變異的損失達到最小，置於內側直交表中。
- (2) 雜音因子 (noise factor)：會隨著環境而變化的、無法預估及確認在何種情況下或是何時會發生的機遇原因 (chance causes)，置於外側直交表。

2.2.3 田口方法於生產工廠之應用

一、線上品質管制

可應用於計量值的管制及製程的診斷與調節、規格、安全與檢查、預防保養、製程條件的回饋及檢查設計 (鍾清章, 2019)。線上品質管制雖然有許多應用方式, 如品質管理七大手法, 但實際能解決的品質問題卻不多。

二、線外品質管制

線外品質管制是一個能在相較低成本下產出高品質的有效方法, 係基於開發設計來定義品質, 為產品售出後帶給社會的損失, 重視損失之評價 (洪錦輝, 1990; Tong et al., 1997), 其中開發設計包括零件、原材料及材料之參數設計與公差設計 (tolerance design) 以及量測器具之校正系統。線外品質管制是田口方法中較為重視的管理方法。

線外品質管制將設計開發分為以下三階段:

(1) 第一階段: 系統設計

又稱為概念設計 (concept design), 用於檢視並選出可達成目標品質機能之適當系統或技術。簡單的問題採用魚骨圖 (fishbone diagram); 複雜的問題採用關連圖法; 模糊不清的問題採用 KJ 法以選定合適之實驗控制因子及水準。

(2) 第二階段: 參數設計

此階段為進入生產前的品質規劃階段, 透過確認所有實驗過程中可能會影響品質特性的參數, 並以達成最佳化結果為目標。盡可能採用較多的參數並選用合適的直交表, 取得實驗組合進行實驗, 確認最佳結果提升系統穩健性。使用統計推論及變異數分析進行比較得到最佳條件, 再進行最佳結果之確認實驗, 使平均值與目標值一致且變異最小。參數設計步驟 (如圖 2 所示)。

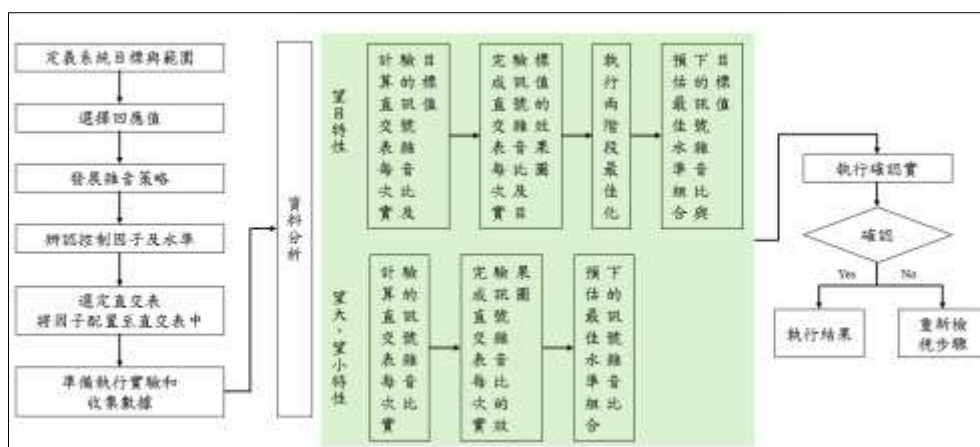


圖 2、參數設計步驟

(3) 第三階段：公差設計

調整公差範圍係以最佳化設計參數、減少產品之變異及品質損失，並利用成本與品質平衡方法來考量，係針對最佳條件的水準及公差進行考量 (白賜清, 2012)。此外針對不同的生產現場亦不可忽略其中細節，應採用不同的方法，如全體實驗次數無法在同一時間或同一地點完成時可採用交絡法；現場除製造條件外之實驗因子，另有環境實驗不同因子時可採用直積法。

2.2.4 S/N 比

田口博士將品質分成兩類，一為顧客的需要，與顧客之個人所得收入及價值觀有關，此種品質問題非工程師能夠解決，主要取決於產品之策略；第二種為顧客不需要的，包含社會損失、失效、缺點、汙染及機能變異等，為工程師之職責，而第二種品質問題之起因源於環境使用狀況、退化與磨損及製造不良等雜音因子 (蘇朝墩, 2004)。

S/N 比原為測試收音機及電視機等信號功能，後藉由 S/N 比代表所有品質特性之好壞及穩定性，S/N 值越大，表示變異越小。S/N 比包含可預測的訊號及不可預測的雜音，其目的為最大化可預測部分 (訊號) 及最小化不可預測部分 (雜音)。S/N 比基本公式如下 (公式 1)。

$$\eta = \frac{\text{信號功率 (S)}}{\text{雜音功率 (N)}} \quad (\text{公式 1})$$

雜音因子可分為以下三種：

- (1) 內部雜音或劣化雜音：為製程中產生變異導致產品不良、儲存期間或使用中發生變質及因磨損而無法達到目標之品質機能者，例如產品劣化、材質變異、製造不良等。
- (2) 外部雜音：外在環境或加工條件導致品質特性變異，與產品無直接關係，如溫度、濕度、電壓、灰塵及個人間的差異。
- (3) 變異雜音或產品間雜音：以相同規格製造出來產品之間的品質差異。

由工程師選擇一目標值 (y)，當目標值改變時，可調整訊號因子，使 y 的平均值與目標值一致，目標值與信號因子之關係 (如圖 3 所示)，田口博士定義好的品質為「品質特性平均值與目標值一致」、「品質特性變異越小越好」。

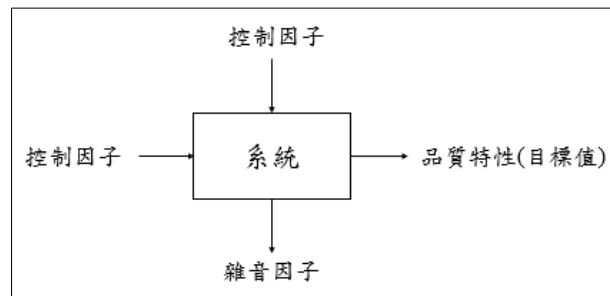


圖 3、各因子與目標值之關係圖

S/N 比根據各種不同的產品品質特性分為三種特性如下：

- (1) 望大特性 (larger-the-better, LTB)

在望大特性下，產品的品質特性值越大越好，一般為正數，其理想值為無限大。望大特性之 S/N 比公式如下 (公式 2)：

$$\eta_{LTB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (\text{公式 2})$$

(2) 望目特性 (nominal-the-better, NTB)

在望目特性下， y 值為正，有一目標值 m ($m \neq 0$)，其產品品質特性越靠近目標值越好。望目特性之 S/N 比公式如下 (公式 3)：

$$\eta_{NTB} = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (\text{公式 3})$$

(3) 望小特性 (smaller-the-better, STB)

在望小特性下，產品的品質特性值越小越好，一般為正數，其理想值為零。望小特性之 S/N 比公式如下 (公式 4)：

$$\eta_{STB} = -10 \log(\bar{y}^2 + S^2) \quad (\text{公式 4})$$

2.2.5 品質損失函數

田口博士對於品質的定義為：「產品的品質就是該產品售出後對社會成本的最小損失」，基於上述理念發展出品質損失之概念：「一個產品在出廠後的整個生命週期內，除了產品內建之機能外，對個人或是整個社會所造成之附加損害。」其中越小的損失代表品質越高，並以損失函數計算成本。

品質損失可分為兩類：產品內建機能 (顧客需要的部分) 的變異所造成之損失及產品內建機能外有害的副作用 (顧客不需要的部分)。而所有會造成產品偏離內建機能 (目標值) 或產生任何副作用之因子皆稱為雜音因子。

以田口博士之觀念而言，產品的品質特性符合目標值時，損失為零，當產品品質特性偏離了目標值，即有損失產生。損失函數 $L(y)$ 與產品品質特性與目標值所產生偏差值的平方成正比 (鍾清章，2019) (如圖 4 所示)。

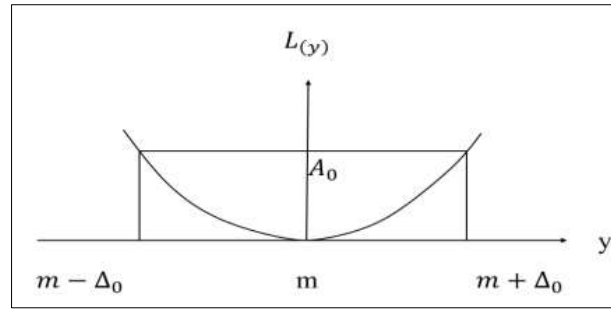


圖 4、田口方法之品質損失函數觀念圖

品質損失函數搭配各品質特性分為以下三種：

(1) 望目特性之品質損失函數

因每一位消費者對於產品會有不同的感受，因此不同消費者對於特定產品有特定之 k 值 (品質損失係數)，造成的品質損失會不一樣。通常取 50% 的消費者可容忍的偏離量極限， Δ_0 為消費者容忍度， A_0 為平均損失。計算公式如下 (公式 5 到 6)。

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (\text{公式 5})$$

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (\text{公式 6})$$

(2) 望大特性之品質損失函數

品質特性 (y) 在望大情況下，可視為目標值 (m) 為無限大的望目型。實務上將品質特性取倒數 ($\frac{1}{y}$) 後，以望小特性來處理。計算公式如下 (公式 7 到 8)。

$$L(y) = \frac{k}{y^2} \quad (\text{公式 7})$$

$$k = A_0 \Delta_0^2 \quad (\text{公式 8})$$

(3) 望小特性之品質損失函數

品質特性為望小情況下，可視為目標值 (m) 為零的望目型。計算公式如下 (公式 9 到 10)。

$$L(y) = ky^2 \quad (\text{公式 9})$$

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (\text{公式 10})$$

2.3 田口方法相關文獻

此部分主要製造加工業之焊道研磨製程中田口法的運用，第一部分為單品質目標；第二部分則為多品質目標。

2.3.1 單品質目標田口方法

Lu et al. (2008) 之研究以自行開發之 PC-Based 控制兩軸工具磨床研究端銑刀再研磨表面品質問題，磨削參數為砂輪主軸轉速、進給率及磨削深度，結果顯示磨輪主軸轉速越快，表面粗糙度越小；進給率越大及磨削深度越深，表面粗糙度也越大。Jin (2013) 之研究為提高銑削加工之銑刀壽命及最佳化製程參數，以砂輪主軸轉速、進給率及磨削深度為控制因子研究經過研磨修復後之端銑刀表面粗糙度變化，其中進給率影響最大，研究顯示砂輪主軸轉速越快將使表面粗糙度越小；進給率越大及磨削深度越深，表面粗糙度則越大。葉雲霆 (2014) 之研究為改善高成本之曲面拋光對於環境的污染及人體的傷害，採用新開發之膠體磁力研磨其研磨參數選擇磁鐵數量、進給率、轉速、磨料量、磨砂號數、鋼砂量及鋼砂號數探討其表面粗糙度之變化，實驗結果顯示磨料量為最顯著之因子。李孟宸 (2016) 之研究分為兩部分進行，第一部分探討刀具幾何角度之最佳化以減少工件之毛邊並增加刀具之壽命，其參數因子為主要幾何角度之切削角及離隙角，實驗結果顯示離隙角為影響刀具磨耗之主要因子，切削角則是影響工件毛邊大小之主要因子；第二部分為刀具研磨效能之最佳化以提升刀具之品質並降低研磨刀具之時間，參數因子選擇砂輪線速度、進給及排屑槽之砂輪粒度，其結果顯示排屑槽之砂輪粒度選擇為最主要影響因子。

2.3.2 多品質目標田口方法

Logothetis & Haigh (1988) 之研究應用多元迴歸技術及線性規劃並通過田口方法優化多響應過程，但研究發現若迴歸係數之 t 值不顯著或是決定係數值較低，且此方法運用了較多之數學模型，增加了計算過程之複雜性，使其難以用於製造現場。Phadke (1989) 之研究利用田口方法研究超大型積體電 (very-large-scale integration, VLSI) 製造的多晶矽沉積工藝中晶片表面缺陷及厚度，在選擇多重品質特徵問題的最佳因子水準時，需透過人工相關經驗進行判斷，因此此方法只能由經驗豐富的工程師使用。洪錦輝 (1990) 之研究透過田口方法之直交表進行積體電路製造中之電漿蝕刻製程為，此法可使工程師以經濟的方式同時研究多個因子對於製程平均值及變異之影響並提出一新品質統計量法，係以製程中各響應值之品質損失期望值總和定義及新的品質特性轉換法，使其響應單位統一化，兩者結合為一新的多響應最佳化技術，但該技術無法處理含有連續及離散數據之問題，且當品質特性增加時，最佳條件不會往該品質特性之相同方向移動。Lin & Lu (2006) 之研究應用模糊邏輯結合田口方法探討側面銑削 SUS304 不銹鋼中切削之製程參數優化，發展一模糊性設計目標之多品質特性演算法，實驗結果證實其演算法可簡化多重品質特性切削參數之最佳化設計並透過最佳化參數組合可改善刀具壽命、金屬移除率及相關切削性能，其中切削參數以軸向切深最有影響力。Lu et al. (2007) 之研究利主成分分析 (Principal components analysis, PCA) 搭配田口方法探討高速端銑 SKD61 模具鋼之精加工製程最佳切削參數設定，將實驗結果轉為 S/N 比並做正規化處理，將各成分加入權重計算品質特性值之總變異。透過主成分分析將多品質特性轉為單一性能指標，而該研究之演算法證明可簡化精加工製程之切削參數最佳化設定。

第三章 研究方法

本章將依本研究參考之論文—王霈穎 (2023)「應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量」，論文中所使用的研究方法進行分析及探討。

3.1 研究說明

本研究以台中某金屬加工廠為例，其主要製程為透過焊道研磨加工製作電箱及置物櫃等金屬鈹金件，因此本研究針對焊道研磨加工中之 BUFF 施力所回饋之受力值進行製程改善，並結合未來之低碳經濟趨勢，加入碳排放量之考量，探討加工品質是否會因為加了碳排放量之考量因素進而產生變化。

3.2 研究流程介紹

本研究主要分為兩個階段，分別於 4.4 及 4.5 章節呈現。

第一階段將進行焊道研磨加工製程之參數設定最佳化，使用 Minitab 統計軟體及田口方法進行優化改善，並依據分析數據得出最佳參數組合；第二階段是將上述成果加入碳排放量之因素考量，觀察其中之品質評價變化，最終比較兩者之品質差異，進而得出碳排放量是否會影響品質之結論。

針對本研究的流程，首先，需決定參數因子、水準並根據選定的因子級水準數挑選適合的直交表，接著選定合適的加工方式以及確認使用分析的模式，就能透過數據的分析得到第一階段的數據，接著是第二階段，會在實驗數據項多「碳排放量」，一樣進行數據分析後，即可以針對兩階段的實驗結果做比較，研究步驟說明如下**錯誤! 找不到參照來源。**。

表 1、研究步驟說明

步驟	內容
1	參數因子及水準選定
2	直交表之選定
3	分析數據
4	確認數據
5	直交表之選定 (加入碳排放量之數據)
6	分析數據
7	數據比較
8	確認數據
9	實驗結果之比較

第四章 改善案例

4.1 改善案例之實驗說明

Ribeiro et al. (2017) 認為機械加工為現今工業中最重要的製造工藝之一，不同之加工技術及條件，其呈現之效率不盡相同，因此為了能夠在較低的加工時間與消耗成本之下提供最好之品質，技術的選擇需取決於要實現的目標。而該案例主要實驗目的在於透過輸入最佳參數組合，獲得最佳之焊道研磨條件，以達成焊道研磨產品加工品質穩定之目標。以下將詳細說明本實驗之研究限制及其製程加工中須考量之因素。

4.1.1 本實驗之研究限制

本實驗之研究限制如下：

- (1) 本實驗過程中，雖然表面粗糙度為焊道研磨加工中之重要指標，但因焊道研磨過程中，進行表面粗糙度偵測之探針會斷裂，無法進行相關數據蒐集，因此本實驗不以表面粗糙度值來探討其加工相關問題及結果。
- (2) 其加工工件之表面焊道粗糙度不一，無法針對其表面平整度進行控制，因此將焊道之不平整視為不可控之非機遇原因。
- (3) 因加工過程中，需進行三次研磨才可蒐集到有效之磨損值，因此本實驗之限制必須反覆進行三次研磨，其每一次研磨長度為 10 公分。而因前者之表面粗糙度及平整度皆無法作為本研究之品質依據，因此以加工過程受力值作為依據，每一組實驗將量測九次，去除差異較大之數據，計算成標準差，作為本研究之品質數據依據，探討其標準差之變異最小。

4.1.2 本實驗器材

本實驗進行加工焊道研磨之機器人型號為 KUKAKR60HA，此款機器人適用於各種加工作業，包含機器搬運、測量及檢驗、組裝與拆卸、切削機床、激光及水刀切割、塗裝作業及焊接工藝等等，控制器為 KRC2ed05，運行時間為 637.4

小時，發動機容量為 14.9 千瓦 (kilowatt, kW)，變壓器連接為 7.3 千伏安 (kilovolt-ampere, kVA)。

4.1.3 焊道研磨加工考量因素

焊接是金屬加工重要環節，焊接完成後容易形成焊蝕及焊裂，使得焊道與溶合面溶合不良，不平滑之表面缺陷會影響加工工件之結構安全性，而若有加工上的瑕疵則須進行二次加工，進而降低其生產效率 (Li et al., 2010)，因此在研磨加工進行表面處理時，為了使焊道能夠更加的平滑，研磨過程中必須加以注意及控制。Roopa et al. (2018) 認為現代工業最重要的目標是要在短時間內以最低的成本產出最高品質。而該案例為焊道研磨加工鈹金件產品，如電箱及置物櫃等，其加工過程中，因加工工件表面之粗糙程度不一，會影響承載能力、摩擦、磨損及潤滑劑特性等功能，對於研磨品質產生嚴重影響，刀具的磨耗對於精加工製程有顯著影響 (Lu et al., 2007)，因此須探討加工要素影響金屬焊道研磨加工品質之相關性，並使用魚頭向右之原因探討型魚骨圖，與現場老師傅腦力激盪製成下圖 5。於 Li et al. (2008) 研究中亦提及其研磨加工之影響因素，可控制的因素包含加工工件材料、進給速率、BUFF 力量控制器之施力力度、研磨工具轉速及研磨工具與平面焊道的夾角。

而當研磨、磨削時，有大小相等、方向相反的力量分別作用在砂輪及加工工件上時，就會產生「磨削力」，進而引起砂輪的彈性變形，影響加工之精度。磨削力是切削過程中一重要指標參數，技術人員可藉此準確評估其磨削值，在 Ikumapayi & Akinlabi (2019) 研究中亦提及磨削力的大小能判斷機台 電流負載的問題，藉此可監控機台加工之品質以及刀具磨損等問題，進而提升產品品質；而當 BUFF 力量控制器在施力時所產生之振動幅度，會引起加工工件與研磨加工之夾角產生相對作用，其施力大小也會影響加工工件凸起之毛邊數，進而影響產

品品質，因此本實驗將透過 BUFF 施力後，BUFF 得到反饋加工工件之受力值進行計算，並將其受力值標準差視為加工品質之品質目標，受力值差異越小，表示加工品質越穩定，因此以標準差變異最小為品質目標，進行實驗並找出最佳之研磨參數組合，以獲得最佳品質水準。

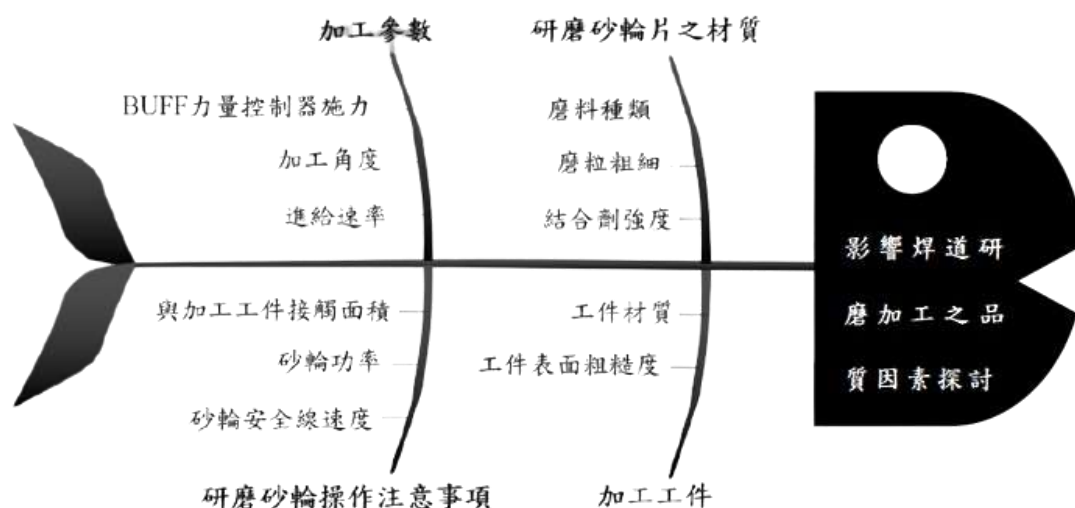


圖 5、影響焊道研磨加工之品質因素探討魚骨圖

(資料來源：王需穎(2023) 應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量)

4.2 實驗參數介紹

根據第三章文獻探討之整合及上述之說明，本實驗之參數因子包含焊道研磨耗材、進給速率、BUFF 力量控制器施力及研磨工具與平面焊道夾角，以下將詳細介紹各參數因子及其水準，並忽略因子間之交互作用。

4.2.1 焊道研磨耗材

每一個加工工件之零組件功能需求皆不盡相同，不同之研磨加工方式會因為接觸面積與手臂操作動向的不同而產生不同效果，因此選擇研磨方式是一重要環節。本實驗選用的是平面研磨方式，其焊道研磨相關耗材，分為研磨砂輪磨料及焊道加工工件兩種。

1. 研磨砂輪磨料

本實驗使用可彎曲砂輪，係主要由磨料、樹脂結合劑及玻璃纖維網所組成之研磨工具，中心凹陷處為進行斜角研磨時補強之結構，表面之紋路可使砂輪在使用中更加有彈性，研磨面積更廣泛。其磨料之粒度須根據加工工件要求選擇，粒度值越小，表示磨料顆粒越粗、磨量越多，適合粗加工；而粒度值越大，表示磨料顆粒越細、磨量越少，僅適用於拋光及細面加工。

磨料有棕剛玉、白剛玉、黑碳化矽及綠碳化矽四種材質，以下個別說明其原料、特性及用途。

(1) 棕剛玉

透過電弧爐將鋁礬土、碳素材料及鐵屑在高溫下冶煉而成，耐高溫、耐侵蝕、耐磨損、硬度高、韌性大、顆粒鋒銳、價格便宜，用於研磨抗張强度高之金屬、噴砂及防火材料。

(2) 白剛玉

透過電弧爐將高純度氧化鋁在高溫下冶煉而成，比棕剛玉有更強之硬度，但韌性較棕剛玉低，粒形成尖角狀，適用於研磨一般金屬及硬度較高之不銹鋼。

(3) 黑碳化矽

透過電阻爐將石英砂及石油焦在高溫下冶煉而成，硬度高於棕剛玉，低於鑽石，具有導電性及導熱性，其特性非常之尖銳、鋒利，適用於研磨非鐵金屬、非金屬材質及石材。

(4) 綠碳化矽

以石油焦及優質矽石為主要原料，食鹽為添加劑，通過電阻爐高溫冶煉而成，硬度最高，其特性非常之鋒利，切削能力最強、化學性質穩定、導熱性好，適用於研磨硬質和金、硬脆金屬、寶石、光學玻璃及陶瓷等材料。

2. 焊道加工工件焊道加工工件之材質分為以下四種，其根據碳含量之高低分為高碳鋼、中碳鋼、半低碳鋼及低碳鋼，以下個別詳細介紹其碳含量、特性及用途。

(1) S15C

碳含量為 0.13%至 0.18%的低碳鋼，其特性機械強度低、韌性及塑性好、有良好的加工性及焊接能力，主要用於機械構造的焊接件、冷沖壓件、鍛件及滲碳零件。

(2) S20C

碳含量為 0.18%至 0.23%的半低碳鋼，硬度比 S15C 高，其特性鋼強度較低、韌性及塑性好，用於汽車、加工機械及農業機械之零件。

(3) S45C

碳含量為 0.42%至 0.48%之中碳鋼，因有較高之含碳量，其抗拉強度、延展性及耐磨性都較高，不適合焊接及成形，常應用於機械零件及構造。

(4) SK2

碳含量為 1.15%至 1.25%之高碳鋼，為冷沖壓模具鋼，其特性硬度高、有良好之耐磨性及加工性，適用於模具工具。

本研究因成本考量，磨料選用棕剛玉，粗度選用 60、80 及 100，對 S45C 中碳鋼進行焊道研磨實驗。控制因子之焊道研磨耗材三水準如下表 2，焊道加工工件之實作材料如下圖 6、焊道加工工件之實作材料圖 6。

表 2、焊道研磨耗材之三水準

研磨耗材	水準 1	水準 2	水準 3
可彎曲 砂輪型號			
	AC60	AC80	AC100



圖 6、焊道加工工件之實作材料

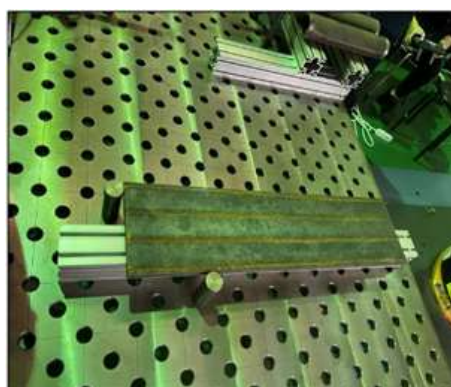


圖 7、焊道加工工件之實作材料

4.2.2 砂輪轉速

田欣利等人(2016)於《小砂輪軸向大切深緩進給磨削的磨損特徵》研究報告中得出砂輪轉速越高，單位時間參與磨削作用之磨粒數越多，導致單顆磨粒未變形之切削厚度越小，其所承受之磨削作用力越少，使得磨粒與結合劑之磨損及脫落程度逐漸降低，以致砂輪磨損量逐漸減少之結論，其砂輪轉速與砂輪磨損量之關係如下**錯誤! 找不到參照來源。**。其砂輪每分鐘轉速介於 0 至 12000 (revolution (s) per minute, rpm)，而本實驗之砂輪轉速固定為最高之轉速 12000 rpm。

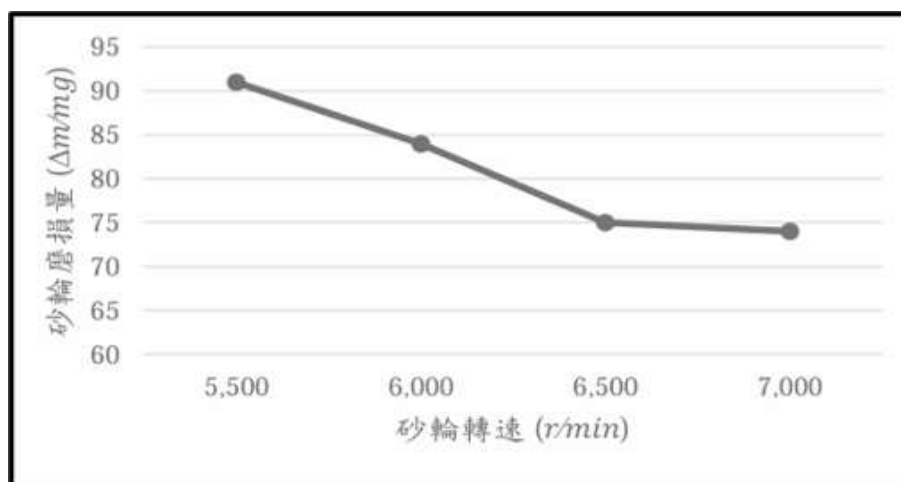


圖 8、砂輪轉速與砂輪磨損量之關係圖

(資料來源：田欣利等人 (2016)《小砂輪軸向大切深緩進給磨削的磨損特徵》)

4.2.3 進給速率

進給速率為研磨刀具對於加工工件進給切削之速度，又稱為進給率。根據田欣利等人 (2016) 之研究顯示，其隨著進給速度越快，研磨磨粒的每轉磨削深度增大，砂輪與加工工件之接觸寬度也隨之增加，單位時間內材料去除量也越多，進而導致磨削能力增大，砂輪之磨損量也隨之增大(圖 9)，磨粒與結合劑產生嚴重之磨損，因此若要降低磨損，其進給速率應越低越好。進給速率之單位為公尺

每秒 (meter per second, m/s)，範圍介於每秒 0 至 3 公尺，常用範圍為每秒 0.005 至 0.05 公尺。本實驗依據老師傅之經驗傳授選擇每秒 0.01 公尺、每秒 0.018 公尺及每秒 0.025 公尺作為進給速率之三水準。

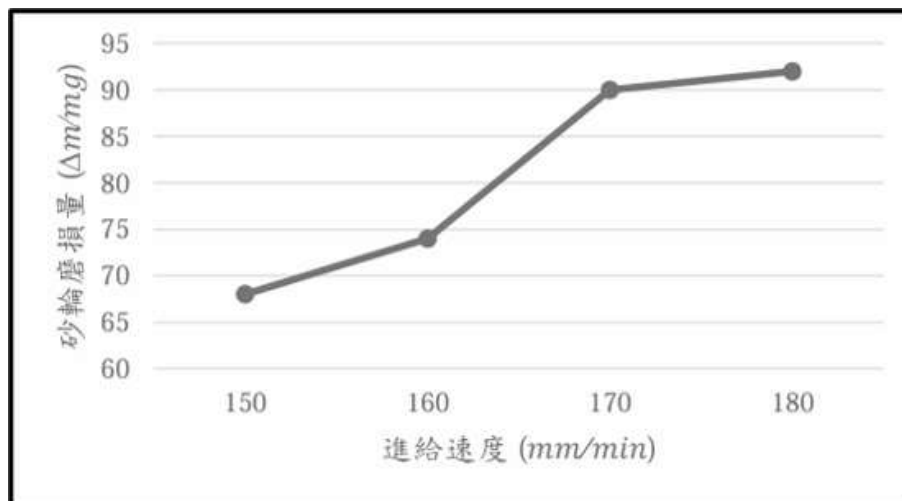


圖 9、進給速度與砂輪磨損量之關係圖

(資料來源：田欣利等人 (2016)《小砂輪軸向大切深緩進給磨削的磨損特徵》)

4.2.4 BUFF 力量控制器施力

BUFF 力量控制器為研磨時對於加工工件所施加的力道，如老師傅的手臂般，能夠以穩定力度柔性接觸，並有位置訊息精準定位及快速回饋資訊等特點。此裝置適用於各牌機械手臂，可使原機械手臂多增加一軸力感控之能力，並且提供任一角度實時補償載具之負載。因此藉由 BUFF 力量控制器施力，可有效的減少對於機台的振動影響，並具有高度調適靈敏性及雙向回饋，使其更加擬真如老師傅般之手藝，而 BUFF 力量控制器之力度回饋值即為加工工件之受力值，BUFF 力量控制器之施力範圍介於 0 至 200 牛頓 (Newton, N)，常用範圍為 8 至 40 牛頓。本實驗依據老師傅之經驗傳授選擇 15 牛頓、25 牛頓及 35 牛頓作為 BUFF 控制器施力之三水準。

4.2.5 研磨工具與平面焊道夾角

加工工件之夾角會隨著研磨過程中研磨機器對加工工件所施力的角度範圍呈現斜度進給，其角度的大小會影響施力範圍及刀具之磨損率。夾角範圍為 0 至 100 度，常用範圍為 10 至 15 度，而本實驗依據老師傅之經驗傳授選擇 10 度、13 度及 15 度作為研磨工具與平面焊道夾角之三水準。

4.2.6 實驗控制因子參數設定

本實驗之可控因子包括砂輪磨料、焊道加工工件之材質、研磨方式、焊道研磨耗材、進給速率、BUFF 力量控制器施力及研磨工具與平面焊道夾角。

其砂輪磨料固定為棕剛玉、焊道加工工件之材質固定為 S45C 中碳鋼、研磨方式固定為平面研磨。原始加工參數為焊道研磨耗材 AC80、進給速率 0.018 m/s、BUFF 力量控制器施力 30 N 及研磨工具與平面焊道夾角 13°，為下表 4.2 紅字之水準 2 組合，並以原始加工參數依據老師傅之經驗建議，各自發展成三水準之實驗控制因子，如下表 3。

表 3、控制因子參數設定及其三水準

控制因子	水準 1	水準 2	水準 3
A 焊道研磨耗材	AC60	AC80	AC100
B 進給速率	0.010 m/s	0.018 m/s	0.025 m/s
C BUFF 力量控制器施力	15 N	25 N	35 N
D 研磨工具與平面焊道夾角	10°	13°	15°

4.3 第一階段實驗流程介紹

4.3.1 田口方法設計

本實驗共有 4 個控制因子，每個控制因子各有 3 個水準，不考慮因子間之交互作用，其總自由度為 8，最少實驗次數須為 9 次，因此，選擇 L_9 直交表進行實驗，如表 4 所示。在研磨過程中，需經過 3 次研磨且每次研磨長度為 10 公分，才能取得砂輪磨損值。因此，每組實驗需重複進行 3 次，以取得砂輪磨砂值。為降低數據偏差，將重複取得 3 次砂輪磨砂值取平均，以取得每組實驗的受力值，共九筆數據，如表 5 所示，並去除差異較大之數據值，每組共刪除三筆受力值，以取得最終實驗數據，如表 6 所示，最後，將表 6 中的受力值進行標準差計算，以四捨五入至小數點第四位，如表 7 所示。

表 4、 L_9 直交表九組實驗之控制因子組合

實驗編號	控制因子			
	A	B	C	D
	焊道研磨耗材	進給速率 (公尺每秒)	BUFF力量 控制器施力 (牛頓)	研磨工具與 平面焊道夾 角
1	AC60	0.01	15	10
2	AC60	0.018	25	13
3	AC60	0.025	35	15
4	AC80	0.01	15	15
5	AC80	0.018	25	10
6	AC80	0.025	35	13
7	AC100	0.01	15	13
8	AC100	0.018	25	15
9	AC100	0.025	35	10

表 5、九組實驗原始數據蒐集

實驗編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9
焊道研磨耗材	AC60	AC60	AC60	AC80	AC80	AC80	AC100	AC100	AC100
進給速率 (公尺每秒)	0.01	0.018	0.025	0.01	0.018	0.025	0.01	0.018	0.025
BUFF力量 控制器施力(牛頓)	15	25	35	25	35	15	35	15	25
研磨工具與 平面焊道夾角(度)	10	13	15	15	10	13	13	15	10
受力值1	8.25	8.35	8.45	28.52	29.12	28.36	14.32	14.52	14.85
受力值2	8.25	8.72	8.64	28.96	29.52	28.45	14.25	14.62	14.25
受力值3	9.52	9.27	9.85	28.42	29.54	28.79	15.62	15.25	15.75
受力值4	8.25	8.64	8.36	11.25	11.75	11.57	37.85	37.65	37.82
受力值5	8.32	8.24	8.42	11.36	11.26	11.85	37.24	37.52	37.57
受力值6	9.75	9.65	9.36	12.65	11.58	11.24	37.52	37.42	37.84
受力值7	26.68	26.35	26.21	21.36	21.53	21.62	11.25	11.23	11.35
受力值8	26.85	26.65	26.74	21.24	21.46	21.75	11.45	11.52	11.85
受力值9	28.24	28.11	28.62	22.85	22.96	22.67	11.85	11.92	11.78

表 6、九組實驗整理後之數據

實驗編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9
焊道研磨耗材	AC60	AC60	AC60	AC80	AC80	AC80	AC100	AC100	AC100
進給速率 (公尺每秒)	0.01	0.018	0.025	0.01	0.018	0.025	0.01	0.018	0.025
BUFF力量 控制器施力(牛頓)	15	25	35	25	35	15	35	15	25
研磨工具與 平面焊道夾角(度)	10	13	15	15	10	13	13	15	10
受力值1	8.25	8.35	8.45	28.52	29.12	28.36	14.32	14.52	14.85
受力值2	8.25	8.72	8.64	28.96	29.52	28.45	14.25	14.62	14.25
受力值3	9.52	9.27	9.85	28.42	29.54	28.79	15.62	15.25	15.75
受力值4	8.25	8.64	8.36	21.36	21.53	21.62	11.25	11.23	11.35
受力值5	8.32	8.24	8.42	21.24	21.46	21.75	11.45	11.52	11.85
受力值6	9.75	9.65	9.36	22.85	22.96	22.67	11.85	11.92	11.78

表 7、九組實驗數據之受力值平均值與標準差

實驗編號	焊道研磨耗材	進給速率 (公尺每秒)	BUFF力量 控制器施力 (牛頓)	研磨工具與 平面焊道夾角 (度)	受力值 平均值 (牛頓)	受力值 標準差 (牛頓)
1	AC60	0.01	15	10	8.7233	0.7104
2	AC60	0.018	25	13	8.8117	0.5460
3	AC60	0.025	35	15	8.8467	0.6147
4	AC80	0.01	15	15	25.2250	3.7809
5	AC80	0.018	25	10	25.6883	4.0965
6	AC80	0.025	35	13	25.2733	3.5923
7	AC100	0.01	15	13	13.1233	1.8366
8	AC100	0.018	25	15	13.1767	1.8055
9	AC100	0.025	35	10	13.3050	1.8720

4.3.2 Minitab 統計軟體實作

Minitab 是一款功能強大的統計軟體，能夠透過數據發現變數之間隱藏的關係，並對其趨勢進行判斷和預測。該軟體在品質分析方面具有廣泛的應用，包括量測系統分析、管制圖、製程能力分析、允收抽樣及容忍區間評估。

在產品開發方面，Minitab 提供了多種實驗設計選項，如全因子實驗、部分

因子實驗以及田口方法等，能夠根據實驗需求靈活選擇。透過使用 Minitab 統計軟體，企業可以進行製程設計、驗證及持續製程確認的三個階段，從而保證產品的一致性和高品質，此外，Minitab 還包含強大的迴歸分析和變異數分析功能，幫助使用者進行深入的數據分析和模型建構。

其 Minitab 統計軟體操作過程如下：

- (1) 開啟 Minitab 統計軟體，依序點選「stat」統計功能、「DOE」實驗設計、「Taguchi」方法以及「Create Taguchi Design」，操作方式如圖 10 所示。

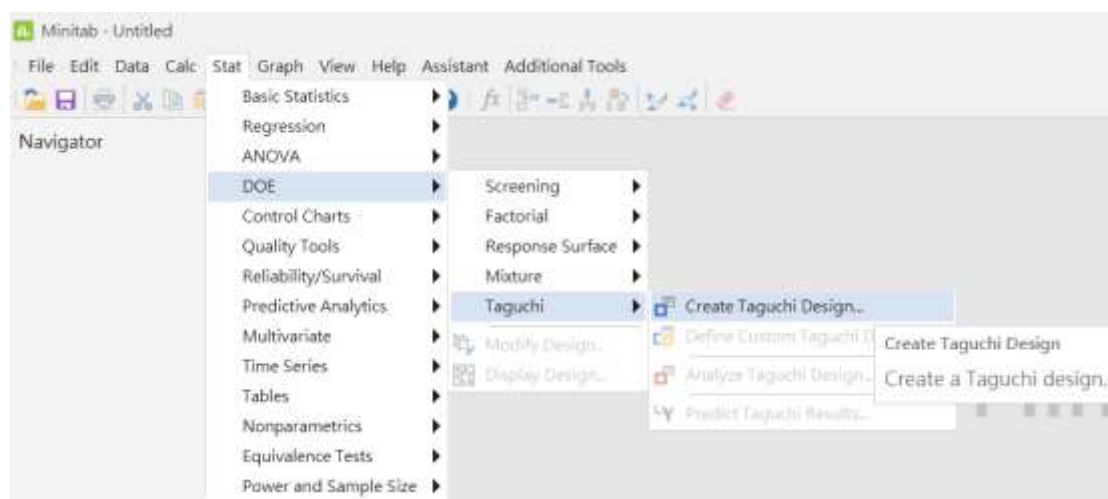


圖 10、創建田口設計之操作

- (2) 依據實驗之控制因子及水準數選取對應之設定參數，該實驗共有 4 個控制因子，每控制因子各有 3 個水準，因此，需選擇「3-Level Design」，控制因子數設定為「4」，並點選「OK」，參數設定如圖 11 所示。

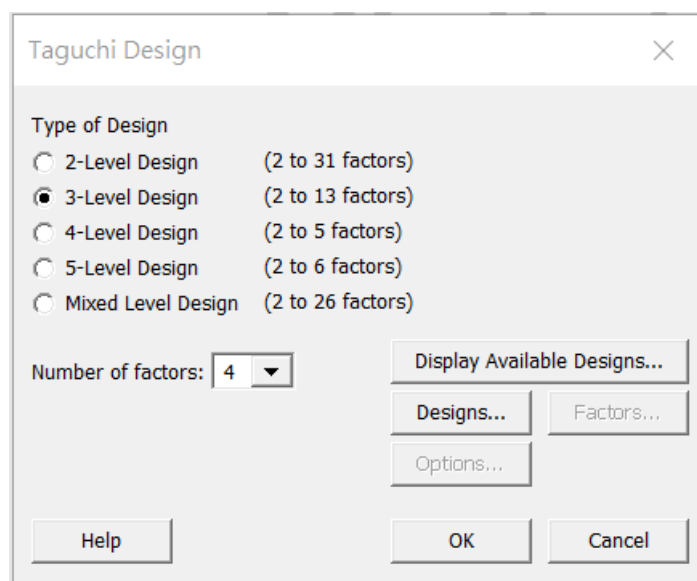


圖 11、控制因子與水準數參數設定

- (3) 接續圖 11 之畫面，點選「Designs」，軟體會提供適當之直交表選項，由於該實驗總自由度為 8，因此，最少實驗次數須為 9，而該實驗無雜音因子，下方之選項無須勾選，並點選「OK」，參數設定如圖 12 所示。

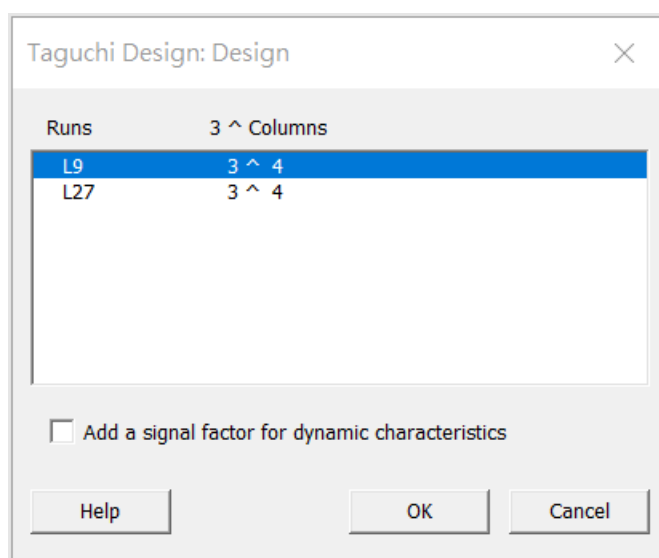


圖 12、直交表與雜音因子設定

- (4) 接續圖 11 之畫面，點選「Factors」，輸入控制因子之名稱及其三水準參數值，而該實驗忽略因子間的交互作用，因此無須設定交互作用之選項，並點選「OK」，其參數設定如圖 12 所示。因統計軟體上之字數限制及

截圖呈現之效果，其控制因子之名稱皆簡略表示，焊道研磨耗材為「研磨耗材」、BUFF 力量控制器施力為「BUFF 施力」以及研磨工具與平面焊道夾角為「夾角角度」，參數設定如圖 13 所示。

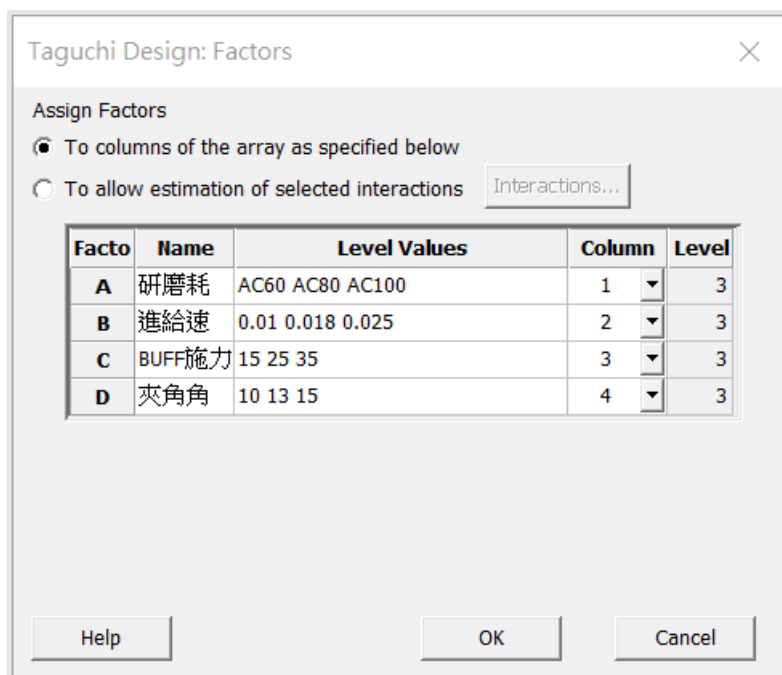


圖 13、控制因子名稱與其三水準參數設定

根據軟體呈現之九組實驗組合，並輸入每組實驗組合之受力值標準差，其表格呈現如表 8。

表 8、受力值標準差之實驗數據輸入

↓	C1-T	C2	C3	C4	C5
	研磨耗材	進給速率	BUFF施力	夾角角度	受力值標準差
1	AC60	0.010	15	10	0.7104
2	AC60	0.018	25	13	0.5460
3	AC60	0.025	35	15	0.6147
4	AC80	0.010	25	15	3.7809
5	AC80	0.018	35	10	4.0965
6	AC80	0.025	15	13	3.5923
7	AC100	0.010	35	13	1.8366
8	AC100	0.018	15	15	1.8055
9	AC100	0.025	25	10	1.8720

- (5) 完成實驗數據輸入後，依序點選「stat」、「DOE」、「Taguchi」以及「Analyze Taguchi Design」，操作方式如圖 14 所示。

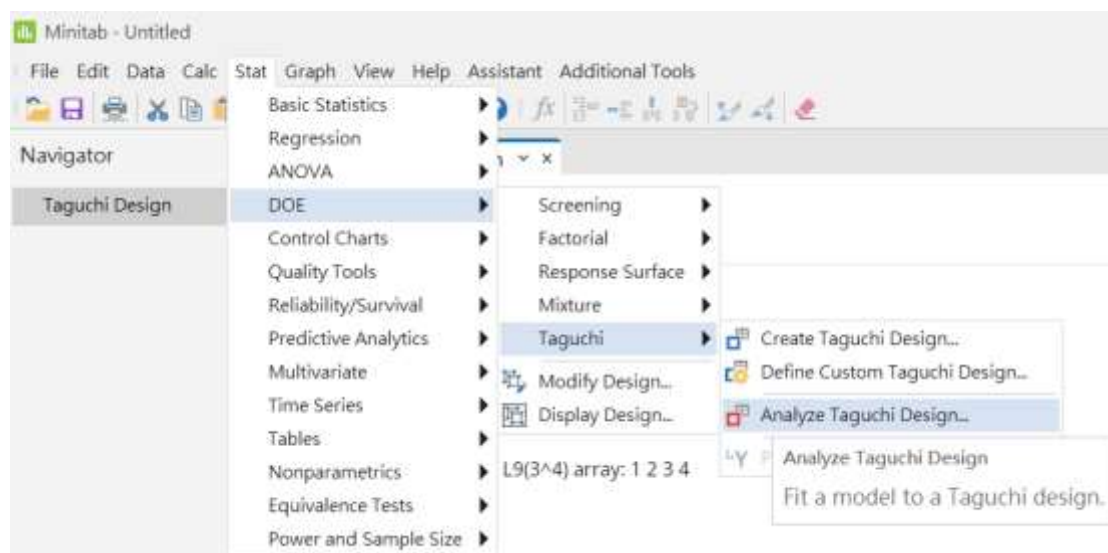


圖 14、分析田口設計之操作

- (6) 點選「select」，並點選「C5 受力值標準差」，使該選項移至「Response data are in」的框框內，其畫面顯示如圖 15 所示。

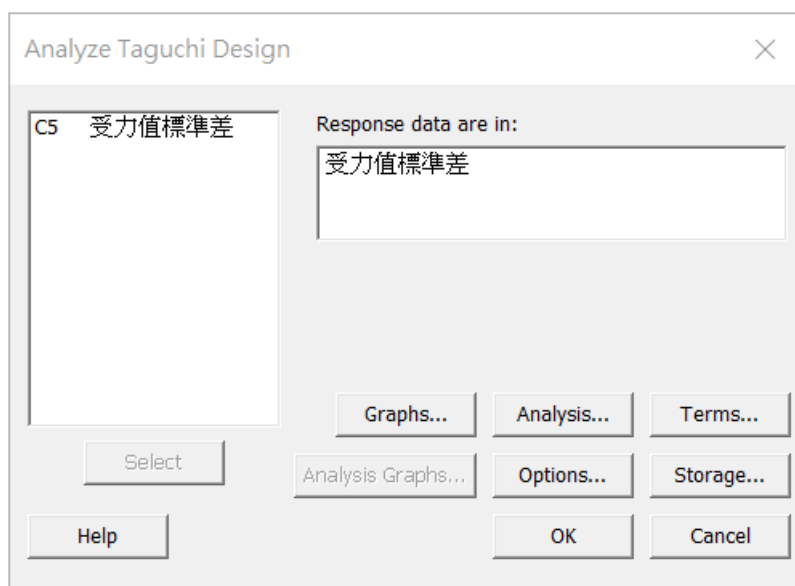


圖 15、受力值標準差之回應值設定

- (7) 接續圖 15 之畫面，點選「Analysis」，選擇欲呈現之回應圖表及線性模型，在此選擇「S/N 比」與「平均值」，並點選「OK」，其操作畫面如圖 16 所示。

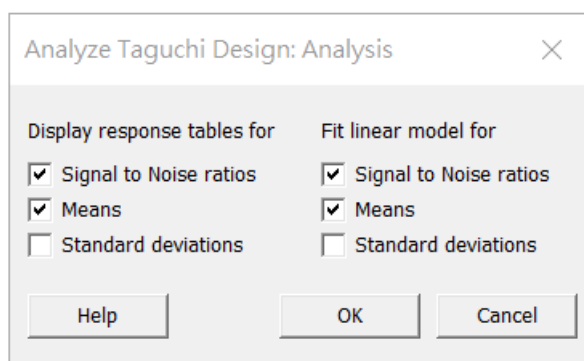


圖 16、圖表呈現及線性模型設定

- (8) 接續圖 15 之畫面，點選「Options」，因實驗中之標準差變異數應越小越好，因此 S/N 比之品質特性選擇「望小特性」，並點選「OK」，如圖 17 所示。

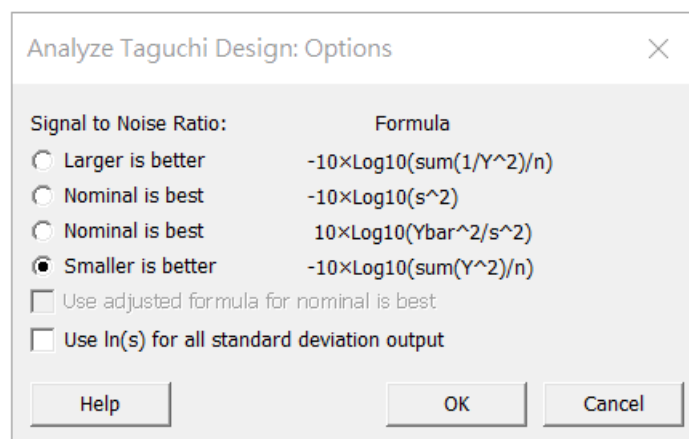


圖 17、S/N 比品質特性設定

經過一系列 Minitab 統計軟體操作過程後，即可產出實驗數據中之控制因子顯著影響與否之排序，由於該實驗為望小特性，因此，不需要計算品質特性，最終根據 S/N 比之排序前兩名為關鍵因子，分別為「研磨耗材」與「夾角角度」，而實驗數據結果之最佳參數組合選擇為「研磨耗材」選擇水準 1 為「AC60」、「進給速率」選擇水準 2 為「0.018(公尺每秒)」、「BUFF 施力」選擇水準 2 為「25(牛頓)」以及「夾角角度」選擇水準 2 為「13(度)」，其相關 S/N 比因子反應值結果如圖 18 與圖 19 所示。

Response Table for Signal to Noise Ratios				
Smaller is better				
Level	研磨耗材	進給速率	BUFF施力	夾角角度
1	4.151	-4.621	-4.423	-4.908
2	-11.636	-4.042	-3.914	-3.711
3	-5.286	-4.109	-4.434	-4.152
Delta	15.787	0.579	0.520	1.198
Rank	1	3	4	2

圖 18、實驗數據結果之 S/N 比因子反應值

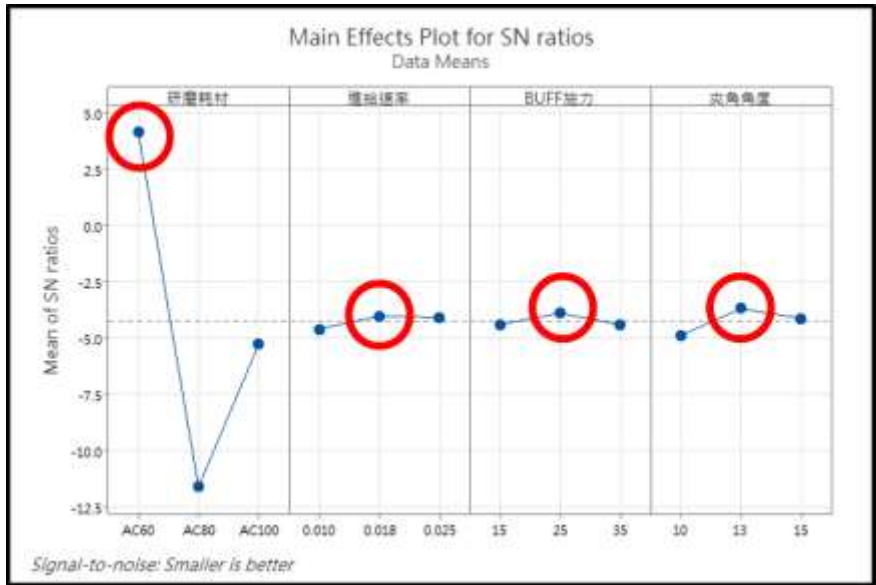


圖 19、實驗數據結果之 S/N 比因子反應圖

表 9、實驗數據結果之最佳參數組合

控制因子	研磨耗材	進給速率	BUFF施力	夾角角度
水準選擇	1	2	2	2
參數數據	AC60	0.018(公尺每秒)	25(牛頓)	13(度)

4.3.3 確認實驗

在確認實驗環節中，使用田口方法中的獨特品質指標 S/N 比進行計算，並比較最佳參數組合與原始參數組合之品質差異，以下計算過程中的數據皆四捨五入至小數點後第四位。

首先，需計算受力值之平均值以及受力值標準差之平方，並代入望小特性之 S/N 比指標公式（如公式 11 所示），即可得出各組實驗組合之 S/N 比（如表 10 所示），其 S/N 比平均值為 -23.1979 dB；其次，透過計算原始參數組合與最佳參數組合各因子水準之 S/N 比，並比較其中之差異（如表 11 所示）；最後，再透過預測公式取顯著影之關鍵因子進行確認實驗（如公式 12 所示），若實驗值與預測值之間差異甚大，則代表結論不可靠，反之，則結論可靠，其計算及比較結果如表 12 所示，由此可證最佳參數組合優於原始參數組合 9.2368 dB，其判定結果為預

測值及實驗值相當接近，表示此結論是可靠的。

$$S/N = -10 \times \log[\bar{y}^2 + S_n^2] \quad (\text{公式 11})$$

$$\eta_{original} = \bar{\eta} + (\bar{\eta}_{Ai} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{Bj} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{Ck} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{Dl} - \bar{\eta}) \quad (\text{公式 12})$$

表 10、各實驗參數組合之 S/N 比

實驗編號	受力值 平均值	受力值 標準差	受力值 平均值平方	受力值 標準差平方	S/N比
1	8.7233	0.7104	76.0965	0.5047	-18.8424
2	8.8117	0.5460	77.6455	0.2981	-18.9178
3	8.8467	0.6147	78.2635	0.3778	-18.9565
4	25.2250	3.7809	636.3006	14.2949	-28.1331
5	25.6883	4.0965	659.8905	16.7815	-28.3038
6	25.2733	3.5923	638.7414	12.9047	-28.1401
7	13.1233	1.8366	172.2219	3.3731	-22.4451
8	13.1767	1.8055	173.6245	3.2599	-22.4769
9	13.3050	1.8720	177.0230	3.5046	-22.5654

表 11、原始與最佳參數組合 S/N 比之計算與比較

因子項目	因子水準	S/N比	S/N比總和	結果
研磨耗材	AC80	-28.1923	-97.7983	9.2868
進給速率	0.018(公尺每秒)	-23.2328		
BUFF施力	25(牛頓)	-23.2055		
夾角角度	13(度)	-23.1677		
研磨耗材	AC60	-18.9056	-88.5115	
進給速率	0.018(公尺每秒)	-23.2328		
BUFF施力	25(牛頓)	-23.2055		
夾角角度	13(度)	-23.1677		

表 12、原始與最佳參數組合之實驗值與預測值之比較

參數組合	研磨耗材	進給速率	BUFF施力	夾角角度	S/N比	
					實驗值	預測值
Original	AC80	0.018(公尺每秒)	25(牛頓)	13(度)	-97.7983	-28.1621
Optimal	AC60	0.018(公尺每秒)	25(牛頓)	13(度)	-88.5115	-18.8753

9.2868 9.2868

4.4 第二階段實驗流程介紹

4.4.1 實驗研究限制與公式說明

本研究之限制有兩項，第一項為僅針對焊道研磨加工製程之碳排放量做計算，不包含整個供應鏈中其上游、下游之相關製程及後續之碳排放量；第二項為本研究為了提供概念使相關產業能做初步的碳排放量計算及探討，計算碳排放量以機器之功率算電力度數、再將各組焊道研磨製程時間與電力排碳係數相乘所得出碳排放量，其公式如下：

$$\text{各實驗一天用電度數} = \text{機器功率} \times \text{一天運行時間} \quad (\text{公式 13})$$

$$\text{各實驗組合碳排放量} = \text{一天之用電度數} \times \text{電力排碳係數} \quad (\text{公式 14})$$

上述公式之補充說明：

1. 機器功率為發電機容量之 14.9kW。
2. 一天可運行次數為各組加工秒數換算一日八小時可運行次數，採無條件可去法至整數位。
3. 各組實驗一天用電度數若根據台灣電力公司（2019 年 11 月 18 日）公告之電費計收方式第二十八條其有效電度之度數以四捨五入法至整數計算，則其碳排放量無法做出差別比較，因此在本實驗中，採四捨五入至小數點第四位。
4. 每年之電力排碳係數均不相同，因此本研究採用經濟部能源局（2022 年 08 月 05 日）「110 年度電力排碳係數」所公告之電力排碳係數 (0.509) 作計算。

4.4.2 實驗數據計算

將各實驗組合之三次焊道研磨加工時間平均後得出各實驗組合之平均加工時間，再根據 4.4.1 之實驗研究限制說明計算出各項數據後整理於表 13，算出一天工作 8 小時可運行之次數（計算結果採無條件捨去法至整數位），再根據 4.4.1

中公式換算一天之用電度數及其碳排放量。各組實驗數據之受力值標準差及碳排放量整理至表 14，並接續進行多品質目標實驗。

表 13、各實驗組合換算可運行次數、時間、用電度數及碳排放量值

實驗編號	平均加工時間 (s)	一天8小時可運行次數	一天運行時間 (hr)	一天用電度數 (度)	碳排放量
1	47	612	7.9900	119.0510	60.5970
2	42	685	7.9917	119.0758	60.6096
3	26	1107	7.9950	119.1255	60.6349
4	61	472	7.9978	119.1669	60.6559
5	33	872	7.9933	119.1007	60.6222
6	24	1200	8.0000	119.2000	60.6728
7	46	626	7.9989	119.1834	60.6644
8	34	847	7.9994	119.1917	60.6686
9	31	929	7.9997	119.1959	60.6707

表 14、各實驗組合之受力值標準差及碳排放量

實驗編號	受力值標準差	碳排量
1	0.7104	60.5970
2	0.5460	60.6096
3	0.6147	60.6349
4	3.7809	60.6559
5	4.0965	60.6222
6	3.5923	60.6728
7	1.8366	60.6644
8	1.8055	60.6686
9	1.8720	60.6707

4.4.3 Minitab 統計軟體

此階段之操作步驟與 4.4 章節大致相同，但於實驗數據輸入時多了一項碳排放量，如下表 15 所示。接著同樣進行田口方法之分析，由於第二階段實驗為多品質目標實驗，因此於第一階段實驗不同之處只於在最後一個部分設定「Analyze

Taguchi Design」時，要「select」的目標為兩項品質特性「C5 受力值標準差」及「C6 碳排量」，其畫面如下圖 20 所示。

表 15、Minitab 統計軟體輸入之數據

實驗編號	研磨耗材	進給速率	BUFF施力	夾角角度	受力值標準差	碳排量
1	AC60	0.01	15	10	0.7104	60.5970
2	AC60	0.018	25	13	0.5460	60.6096
3	AC60	0.025	35	15	0.6147	60.6349
4	AC80	0.01	25	15	3.7809	60.6559
5	AC80	0.018	35	10	4.0965	60.6222
6	AC80	0.025	15	13	3.5923	60.6728
7	AC100	0.01	35	13	1.8366	60.6644
8	AC100	0.018	15	15	1.8055	60.6686
9	AC100	0.025	25	10	1.8720	60.6707

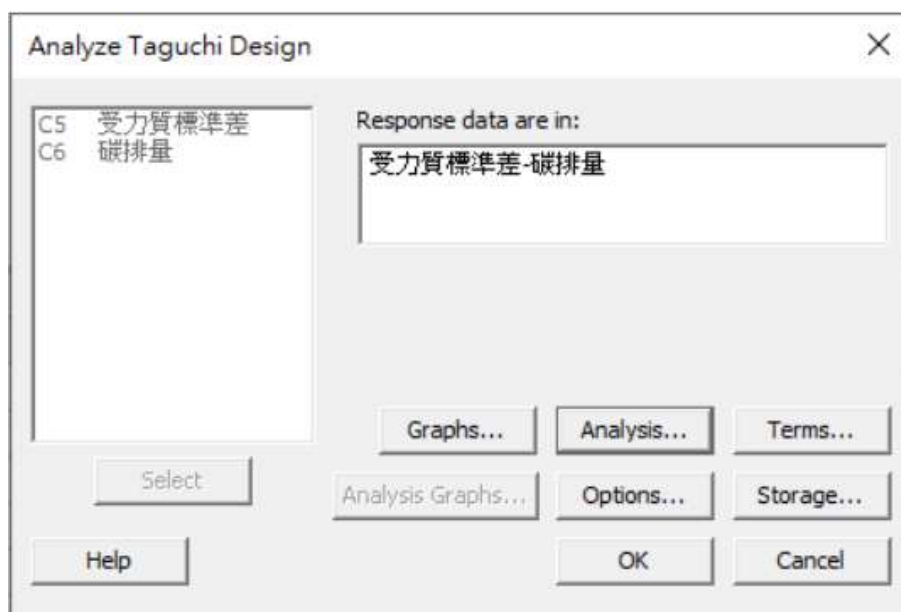


圖 20、Minitab 統計軟體之回應值設定

經過一系列 Minitab 統計軟體操作過程後，即可產出實驗數據中之控制因子顯著影響與否之排序，由於該實驗為望小特性，因此，不需要計算品質特性，最終根據 S/N 比之排序前兩名為關鍵因子，分別為「研磨耗材」與「進給速率」，

而實驗數據結果之最佳參數組合選擇為「研磨耗材」選擇水準 1 為「AC60」、「進給速率」選擇水準 1 為「0.010 (公尺每秒)」、「BUFF 施力」選擇水準 1 為「15 (牛頓)」以及「夾角角度」選擇水準 1 為「10 (度)」，其相關 S/N 比因子反應值結果如圖 21 與圖 22 所示。

Smaller is better				
Level	研磨耗材	進給速率	BUFF 施力	夾角角度
1	-32.64	-32.65	-32.65	-32.65
2	-32.66	-32.65	-32.65	-32.65
3	-32.65	-32.65	-32.65	-32.65
Delta	0.02	0.00	0.00	0.00
Rank	1	2	4	3

圖 21、第二階段實驗數據結果之 S/N 比因子反應

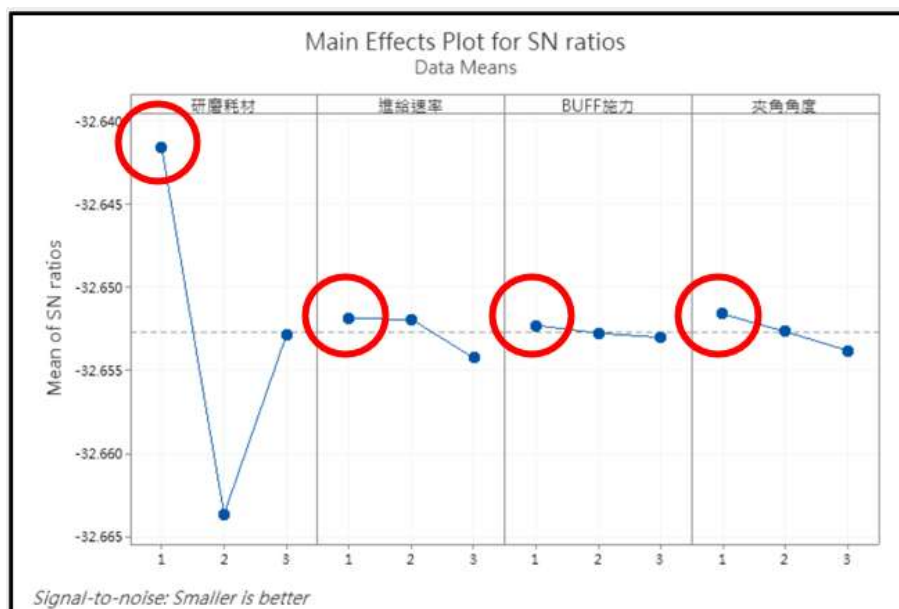


圖 22、第二次實驗數據結果之 S/N 比因子反應圖

4.4.4 確認實驗並比較 4.3 與 4.4 章節之實驗結果

該部分確認實驗與 4.4 章節相同，透過計算第一階段與第二階段最佳參數組合各因子水準之 S/N 比，並比較其中之差異（如表 16 示）；再透過預測公式取顯著影之關鍵因子進行確認實驗，其計算及比較結果如表 17 所示，由此可證第二階段最佳參數組合優於第一階段最佳參數組合 0.1051dB，其判定結果為預測值及實驗值相當接近，表示此結論是可靠的。

將 4.3 章節之參數組合所算出之 S/N 比與 4.5 章節之參數組合作一比較，比較之後發現加入了碳排放量之考量後品質上升 0.1051dB，優於原始製程參數。

表 16、第一與第二階段最佳參數組合 S/N 比之計算與比較

因子項目	因子水準	S/N比	S/N比總和	結果
研磨耗材	AC60	-18.9056	-88.54120447	0.1051
進給速率	0.018 ^{m/s}	-23.2328		
BUFF施力	35 N	-23.2351		
夾角角度	13°	-23.1677		
研磨耗材	AC60	-18.9056	-88.4360711	
進給速率	0.010 ^{m/s}	-23.1402		
BUFF施力	15 N	-23.1531		
夾角角度	10°	-23.2372		

表 17、第一與第二階段最佳參數組合 S/N 比實驗值及預測值之比較

參數組合	研磨耗材	進給速率	BUFF施力	夾角角度	S/N比	
					實驗值	預測值
第一階段最佳	AC60	0.018 ^{m/s}	35 N	13°	-88.5412	-18.9405
第二階段最佳	AC60	0.010 ^{m/s}	15 N	10°	-88.4361	-18.8479
Improvement =					0.1051	0.0926

第五章 結論

5.1 研究結論

田口方法被廣泛運用於品質工程領域，本研究希望透過田口方法針對論文中之實驗結果進行驗證。本研究利用 Minitab 軟體分析論文中之實驗數據。經實驗發現實驗結果與本研究所參考之論文之實驗結果有差異。首先，論文之品質特性屬望小特性，根據田口方法之實驗設計當所求之目標值為望大特性及望小特性時，實驗設計無須進行品質特性因子效應之分析，所以在本研究中只分析 S/N 比，並根據 S/N 比進行因子水準的選擇。其次，根據田口方法對於 S/N 比的定義，挑選因子之水準時，該水準之 S/N 比愈大是較佳的，根據此原則本研究在第一階段實驗中因子 BUFF 施力所挑選的水準為水準 3(35 牛頓)；原論文所挑選之水準為水準 2(25 牛頓)。在第二階段實驗中因子進給速率、BUFF 施力、夾角角度所選擇的水準分別為水準 1(0.010 m/s)、水準 1(15 牛頓)；原論文所挑選之水準分別為水準 2(0.018m/s)、水準 3(35 牛頓)。根據本研究所選擇的水準最後的 S/N 比結果皆較原論文好。

參考文獻

- [1] 王霈穎 (2023)。應用田口方法最佳化金屬研磨加工品質與碳排放量。〔碩士論文。國立虎尾科技大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。
- [2] 田欣利、王龍、郭昉、王望龍、雷蕾 (2016)，小砂輪軸向大切深緩進給磨削的磨損特徵，每日頭條，2022年07月03日檢自 <https://kknews.cc/zhtw/news/leyar9.html>。
- [3] 白賜清 (2012)，「推廣田口品質工程心得」，品質月刊，48卷，07期，頁12-13。
- [4] 白賜清 (2017)，「實驗設計與田口方法之比較」，品質月刊，53卷，06期，頁07-08。
- [5] 李孟宸 (2016)，銑削工程塑膠之最佳化刀具設計與刀具研磨效能分析，國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系碩士班，碩士論文。
- [6] 洪錦輝 (1990)，多響應離線半導體生產製造品質管制，國立交通大學工業工程研究所，碩士論文。
- [7] 盛其安 (2004)，「追念美國移民田口式品質工程專家——吳玉印先生」，品質月刊，40卷，09期，頁30-31。
- [8] 葉雲霆 (2014)，膠體磁力研磨對曲面拋光之特性研究，健行科技大學機械工程系碩士班，碩士論文。
- [9] 蘇朝墩 (2004)，「專訪世界品質大師田口玄一博士」，品質月刊，40卷，03期，頁30-32。
- [10] Al Hazza, M. H. F., Bt Ibrahim, N. A., Triblas Adesta, E. Y. & Ali Khan, A. (2017). “Surface Roughness Optimization Using Taguchi Method of High Speed End Milling For Hardened Steel D2”, International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering 2016, Kuala Lumpur, Malaysia, July 25-27.

- [11] Jayarjun Kandam, B. & Mahajan, K. A. (2021). “Optimization of Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloy Using Response Surface Method, Genetic Algorithm and Taguchi Method”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, No. 47, pp.6285–6290.
- [12] Jin, X. X. (2013). “Optimum Design of Grinding Parameters for End -Mill Based on Taguchi Method”, *Machinery Design & Manufacture*, Vol. 05, pp.235–237.
- [13] Lin, W. F. & Lu, H. S. (2006). “Optimal Cutting–Parameter Design of Heavy Cutting Process for Side Milling Using Taguchi Method with Fuzzy Logics”, *Journal of Technology*, Vol. 21, No. 02, pp.111–116.
- [14] Logothetis, N. & Haigh, A. (1988). “Characterizing and Optimizing Multi-Response Processes by the Taguchi Method”, *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 04, pp.159–169.
- [15] Lu, H. S., Hwang, N. C. & Chang, C. K. (2007). “Optimal Parameter Design of High–Speed End Milling Using Taguchi—Principal Component Analysis Approach”, *Journal of Technology*, Vol. 22, No. 04, pp.325–333.
- [16] Lu, H. S., Lee, B. Y. & Chung, C. T. (2008). “Design Optimization of Grinding Parameters for Resharpener End-Mill”, *Journal of Technology*, Vol. 23, No. 03, pp.149–154
- [17] Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [18] Tong, L. I., Su, C. T. & Wang, C. H. (1997). “The Optimization of Multi-Response Problems in the Taguchi Method”, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 14, No. 04, pp.367–380.