

逢甲大學學生報告 ePaper

田口穩健設計方法於甩炮產品品質改善分析

Analysis of Quality Improvement for Cannon-throwing Experiment
Using Taguchi Robust Design Method

作者：洪嘉怡、徐肇隆、葉若彤、李宜姍、趙彙彝

系級：工業三甲

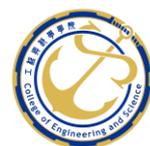
學號：D1149117、D1148603、D1123777、D1185060、D1123720

開課老師：王姿惠 教師

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：113 學年度 第二學期



中文摘要

本研究旨在使用田口方法實驗甩炮在不同製程條件下之性能(音量分貝之大小)，並分析其在不同品質製程之適用性及應用價值。透過結合課堂所學及參數設計流程，設計一系列實驗並量測數據，探討甩炮在摺法、紙張種類、紙張尺寸、施力位置各方面表現，並根據 Minitab 直交表製作不同製程參數的甩炮並依據音量分貝大小進行比較。

研究結果顯示，紙張厚度與尺寸為影響甩炮聲響(以分貝計)之重要因素。經分析可得知，採用較輕薄且面積大之紙張，能有效提升甩炮所產生之聲響分貝數，具有更好的應用性。本研究利用田口方法 (Taguchi Method) 進行參數設計，藉由系統化之 S/N 因子反應分析，確認紙張種類及紙張尺寸為顯著影響聲響之關鍵控制因子，並於後續確認實驗中進一步驗證之有效性與可靠性。研究同時證實田口方法能於有限次數之實驗條件下，準確找出最佳之甩炮製程參數組合，凸顯此方法於產品品質改善與參數最佳化之實務價值。

關鍵字：田口方法、穩健設計、參數最佳化、紙張甩炮、Minitab 統計軟體

Abstract

This study aims to use the Taguchi method to test the performance (volume in decibels) of the firecracker under different process conditions, and to analyze its applicability and application value in different quality processes. By combining what we have learned in class with the parametric design process, we designed a series of experiments and measured data to explore the performance of firecrackers in terms of folding methods, paper types, paper sizes, and force application locations. We also made firecrackers with different process parameters based on Minitab orthogonal tables and compared them based on the decibel level.

The research results show that paper thickness and size are important factors affecting the sound of firecrackers (measured in decibels). After analysis, it can be found that using lighter, thinner and larger paper can effectively increase the decibel level of the sound produced by the firecrackers and has better applicability. This study used the Taguchi Method for parameter design. Through systematic S/N factor response analysis, it was confirmed that paper type and paper size are key control factors that significantly affect sound. The effectiveness and reliability were further verified in subsequent confirmation experiments. The study also confirmed that the Taguchi method can accurately find the best combination of blasting process parameters under a limited number of experimental conditions, highlighting the practical value of this method in improving product quality and optimizing parameters.

Keyword : Taguchi Method; Robust Design; Parameter Optimization; Paper Poppers; Minitab Statistical Software

目 次

1	緒論.....	4
1.1	研究背景.....	4
1.2	研究動機.....	4
1.3	研究目的.....	5
2	文獻回顧.....	5
2.1	田口方法.....	5
2.1.1	田口方法發展與理論基礎.....	5
2.1.2	田口方法的步驟與應用.....	6
2.1.3	田口方法常用方式.....	6
2.2	Minitab 統計軟體.....	9
3	研究方法.....	10
3.1	研究架構.....	10
3.1.1	實驗設計流程說明.....	10
3.2	實驗內容介紹.....	12
3.3	實驗材料及設備.....	17
3.3.1	紙張材料.....	17
3.3.2	分貝計.....	17
3.3.3	攝影裝置.....	17
3.4	成品介紹.....	18
4	研究實作及結果分析.....	21
4.1	Excel 實驗記錄.....	21
4.2	Minitab 實驗記錄.....	27
4.3	結果分析.....	29
5	結論.....	31

1 緒論

1.1 研究背景

田口方法由日本品質工程專家田口玄一博士所提出，其核心理念為「穩健設計 (Robust Design)」，即使產品在受到外部雜訊干擾時，仍能維持穩定的性能表現。田口方法結合直交表設計 (Orthogonal Arrays) 訊噪比 (Signal-to-Noise Ratio, S/N Ratio) 的概念，使得研究者在眾多因子與水準組合中，只需要進行少量實驗，就可以找出最具影響力的製程參數組合，進而達到提高品質、降低變異的目的。

與傳統的全因子實驗設計相比，田口方法能夠大幅度減少實驗次數與成本，並強調「預防遠遠勝於檢驗」的概念，使得在產品設計初期便導入品質規劃，避免後續的瑕疵與重工。其應用範疇廣泛，從電子產品、汽車零組件、醫療器材，到食品加工與日常用品皆可見其足跡，顯示其方法的高度通用性與實用價值。

此外田口方法也重視將系統內部可控因子與外部不可控因子（即雜訊因子）區隔開來，透過對可控因子的最佳化配置，讓系統降低對雜訊變異的影響力，從而提升產品或製程的穩健性。

1.2 研究動機

在學生時期，甩炮曾是許多人童年中常見的紙張遊戲，特別是在國小階段，我們經常利用考卷或廢紙摺成甩炮，並與同學比較誰的甩炮聲音最大。為了讓「音量表現更大」，我們會嘗試不同的摺法、紙張材質與使用方式，希望做出聲響最響亮的甩炮。這樣的經驗不僅具有趣味性，更潛藏著一個實用的工程問題：如何在有限資源下，設計出最佳的製造條件，提升產品的性能表現。

基於此，本研究以甩紙炮作為主題，結合田口方法 (Taguchi Method) 進行實驗設計，探討不同製程條件（如紙張種類、尺寸、摺法與施力位置）對甩炮音量大小（以分貝量測）的影響。田口方法具備高效率與低實驗成本的特性，特別適用於在多因子條件下找出最佳參數組合，因此非常適合應用於本次以「音量最佳化」為目標的趣味實驗。

透過本研究的進行，除了能找出最適合製作甩炮的參數組合外，也希望藉此提升我們對實驗設計、品質工程與參數最佳化流程的理解，進而培養將生活經驗轉化為系統性科學探究的能力。

1.3 研究目的

本研究的主要目的在於運用田口方法 (Taguchi Method) 進行實驗設計，探討影響甩炮音量大小的各種因子，並藉由訊噪比 (Signal-to-Noise Ratio, S/N Ratio) 分析，找出能保持穩定及最大音量的最佳製程參數組合。田口方法以其高效率與低成本的特性，適合用於多因子實驗設計的情境，能在有限的資源與實驗次數中，協助研究者有效掌握影響結果的關鍵因素，進而達到品質提升與變異控制的目的。

以童年常見的甩炮為實驗主體，結合品質工程的理論架構，將生活經驗轉化為具科學性與系統性的實驗。透過設定紙張種類、尺寸大小、摺法方式與施力位置等因子，實際量測分貝值作為輸出反應值，我們希望能找出各因子對音量大小表現的影響，並進一步透過田口方法所提供的直交表與 S/N 比進行計算。此外，也希望透過完整的實驗流程，加強在對品質工程、實驗設計與參數最佳化等領域的實際應用，藉由將理論應用於實際案例的實作過程，培養分析問題以及提出解決方案的能力。

2 文獻回顧

2.1 田口方法

本章節將針對田口方法 (Taguchi Method) 相關文獻進行探討，說明其發展背景、理論基礎與在製程品質管理上的應用，並彙整田口方法的主要步驟與常見公式及名詞如下所示：

2.1.1 田口方法發展與理論基礎

田口方法最早由田口玄一博士於 1950 年代提出，主要目的是利用實驗設計 (Design of Experiments, DOE) 的方法，提升產品品質並降低生產變異。田口方法強調「穩健設計」(Robust Design)，即在產品設計及製程參數最佳化時，盡量降低雜訊因素 (Noise Factors) 對品質的影響，進而提升產品一致性及可靠度 (ScienceDirect, 2024)。其核心工具包括直交表 (Orthogonal Array) 與訊噪比 (Signal-to-Noise Ratio, S/N)，透過系統化的實驗設計，有效分析多因子對品質特性的影響，並減少所需實驗次數 (Kuczek, 2018)。

2.1.2 田口方法的步驟與應用

根據，田口方法主要分為以下步驟：

1. 定義系統目標、範圍
2. 選擇回應值
3. 發展雜音策略
4. 辨認控制因子與其水準
5. 選定直交表，並將控制因子指派至直交表中
6. 準備及執行實驗、收集數據
7. 資料分析
 - (1) 望目特性
 - 計算直交表中每一次實驗的 S/N 比與 \bar{y}
 - 完成各因子對於 S/N 比與 \bar{y} 的效果圖
 - 執行二階段最佳化程序
 1. 最佳化 S/N 比
 2. 調整 \bar{y}
 - 預估最佳水準組合下的 S/N 比和 \bar{y}
 - (2) 望小/望大特性
 - 計算直交表中每一次實驗的 S/N 比
 - 完成各因子對於 S/N 比與效果圖
 - 預估最佳水準組合下的 S/N 比
8. 執行確認實驗
 - (1) 確認
 - No → 重新檢視步驟 1~8
 - Yes → 進行步驟 9
9. 執行結果

2.1.3 田口方法常用方式

1. 品質損失函數 (Loss Function)

產品在出廠後的整個使用期間內，除了其原有的功能之外，若對個人或整體社會造成額外的影響或損害，這些附加損失可透過品質損失函數來表示與評估。

(1) 望大

品質特性在望大情況下，可視為目標值為無限大望目型，將品質特性取倒數($\frac{1}{y}$)後，以望小特性來處理 $\frac{1}{y}$ 。

$$L(y) = k \frac{k}{(y)^2}$$

(2) 望小

品質特性在望小情況下，可視為望小的望目型，將 $m=0$ 代入式子即可得望小情況的品質損失函數。品質損失係數 k 估計方式與望目相同。

$$L(y) = k(y)^2$$

(3) 望目

當品質特性偏離目標值達到某個程度時，會產生對應的可量化品質損失，根據這個損失反推回去，就可以計算出品質損失係數 k 的數值。

$$L = k(y - m)^2$$

L ：損失

k ：待定係數

y ：實測值

m ：目標值

2. 交互作用分析 (Interaction Effect)

指一個因子各個水準間反應變數(y)的差異，會隨其他因子的不同水準而發生變化的現象。

1. 交互作用可用以下方式計算：

$$\text{交互作用}(A_i, B_j) = \text{平均}(S/N)_{A_i, B_j} - \text{主效應}(A_i) - \text{主效應}(B_j)$$

2. 交互作用判定方式：

- 若交互作用圖中，兩直線平行，則不存在交互作用。
- 若交互作用圖中，兩直線不平行，則存在著交互作用。

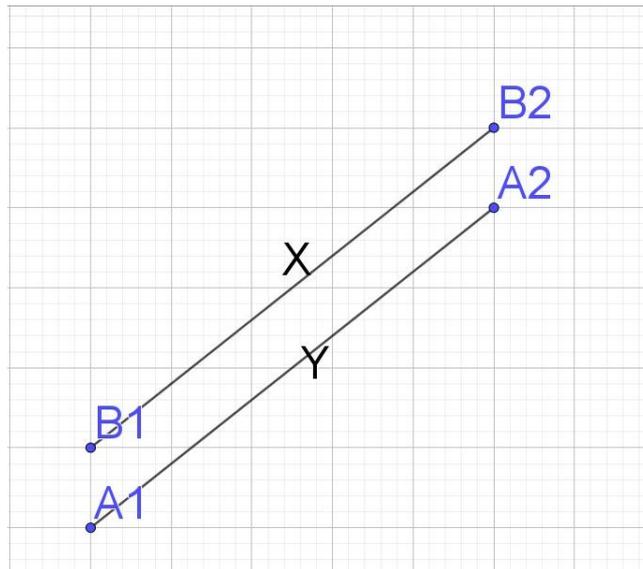


圖 1 無交互作用

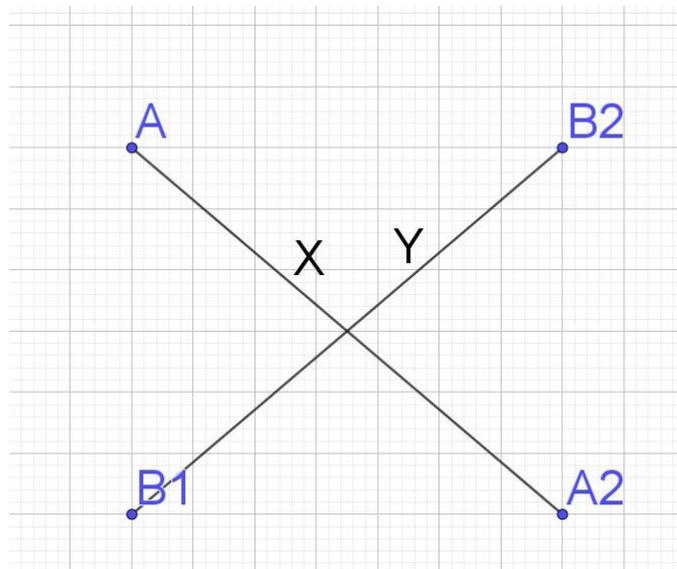


圖 2 有交互作用

3. 整體最佳參數組合

田口方法會根據「訊噪比最大原則」，選取各因子水準組合，使系統對雜訊因素有最大穩健性。

5. 訊噪比 (S/N Ratio) 計算公式

平均品質損失雖可做為衡量一批產品的品質指標，但在田口方法中，較常使用 S/N 比作為品質指標。

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD)$$

(一) 望大 (Larger-the-better) :

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2}\right)}{n}$$

(二) 望小 (Smaller-the-better) :

$$S/N = -10 \log_{10}[(\bar{y}^2) + s^2]$$

(三) 望目 (Nominal-the-best) :

$$S/N = -10 \log_{10}\left(\frac{S^2}{y^2}\right)$$

6. S/N 預測值

預測 $S/N = \text{總平均 } S/N + \sum (\text{最佳水準下的主效應} - \text{總平均 } S/N)$

田口實驗法所得之最佳製程參數組合可能不在實驗組中。田口實驗法會依據因子效應表，用來預測最佳製程參數組合。實驗會依據，每個因子效應是獨立的（或者說兩個因子間無交互作用），因此因子效應可以被疊加。其中 S/N 比預測值會依據因子效應表中顯著的因子取一半以上進行分析，在此，我們舉幾個例子說明，如果實驗因子數量為雙數，例：全部有 4 個因子通常會取 2 個顯著因子作為最佳水準的主效應，實驗因子數若為奇數，例：全部有 5 個因子會取 3 個顯著因子作為最佳水準的主效應進行計算，並且其中會分成實驗組（最佳製程），對照組（原始製程）分別進行 S/N 比預測值的計算。

2.2 Minitab 統計軟體

Minitab 作為一款廣泛應用於品質工程的統計軟體，在田口方法的實作上提供了完整的功能介面。使用者可以透過 Minitab 的圖形化操作流程，例如「Stat > DOE > Taguchi > Create Taguchi Design」，選擇合適的直交表（如 L₉、L₁₈、L₂₇ 等），輸入控制因子及其水準，快速建立實驗架構。透過這種設計方式，即使實驗因子數量眾多，也能以極少的實驗次數取得有代表性的結果，顯著節省人力與物力成本 (Gaonkar *et al.*, 2015)。

在實驗完成後，Minitab 可透過「Analyze Taguchi Design」功能自動計算每一組參數的 S/N 比，協助分析哪些因子最具穩定性與抗干擾能力。同時，也能產生主效應圖、交互作用圖與反應圖，幫助使用者更直觀地掌握因子之間的影響關係與趨勢。最後，透過「Predict Taguchi Results」功能，還可以針對尚未實驗的參數組合進行預測與最佳化設定，進一步提高實驗效率與應用價值。

針對田口方法與 Minitab 的結合應用，工業技術研究院曾規劃實務導向的課程，協助工程師從理論到實作全面掌握這項技術。課程內容涵蓋穩健性設計概念、直交表與自由度規劃、參數設計流程、S/N 比類型與計算方式，以及完整的 Minitab 操作練習。透過課堂上的案例演練與小組討論，學員不僅能學會如何建

構與分析田口實驗，更能培養獨立規劃實驗與解讀結果的能力（工業技術研究院，2020）。

這類課程特別適合從事產品研發、製程優化、品質改善等領域的工程師與技術人員參加，透過工具與方法的結合，不但能提升設計效率與決策準確性，還能強化品質穩定性與企業競爭力。Minitab 與田口方法的整合應用，已逐漸成為推動六標準差 (Six Sigma) 與設計六標準差 (DFSS) 等品質管理體系的實務基礎。

總結來說，Minitab 所提供的田口法分析工具，讓原本需仰賴大量計算與實驗的設計過程變得更為簡單、直觀與高效。搭配工研院此類專業課程的教學引導，不僅能加速企業內部人才技術提升，也有助於推動產業整體的品質水準與創新發展。

3 研究方法

3.1 研究架構

3.1.1 實驗設計流程說明

本研究採用田口方法進行實驗設計，藉以分析影響甩紙炮聲音大小(分貝值)的各項製程因子，並找出最佳製作條件。圖中為田口方法的標準程序，以下將各步驟結合本實驗內容逐一說明：

1. **定義系統目標/範圍**：本研究之目標為找出最適合製作甩炮之製程參數組合，使用甩炮聲音達到最大化。系統輸出為音量分貝值，目標則為「望大特性」。
2. **選擇回應值**：回應值為甩炮聲音的大小，使用分貝計測量每次實驗的音量分貝(dB)，作為品質特性指標。
3. **發展品質策略**：本實驗採用穩健設計概念，即在面對使用者施力不同等外部雜訊時，甩炮依然能維持穩定而高的音量表現。
4. **辨認控制因子及其水準**：依據前期測試與文獻探討，本研究選定四個主要控制因子：
 - A. 紙張種類（如：報紙、影印紙、海報紙）
 - B. 紙張尺寸（如：A5、A4、B4）
 - C. 摺法方式（如：單折、雙折、特殊折）
 - D. 施力位置（如：中央、上方、下方）

每一因子設計三個水準，共組成多因子實驗設計。

5. **選定直交表並將控制因子指派至直交表中**：根據 4 個因子、每因子 3 水準的需求，選擇 $L_9(3^4)$ 直交表，並依序配置各控制因子。
6. **準備執行實驗，收集數據**：製作九種條件的甩炮樣本，每種樣本進行三次獨立測試，使用手機分貝計 APP 記錄每次甩炮之音量，並取其平均值作為分析數據。
7. **資料分析（依據望大特性計算 S/N 比）**：
 - (1) **望大特性計算**：根據「望大」特性，採用 S/N 比公式：

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right)$$

計算每組試驗之 S/N 比，以評估品質穩健性。

- (2) **各因子主效應圖與交互圖繪製**：進一步畫出各因子水準與 S/N 比變化趨勢圖，分析哪些因子對音量影響最大，並評估可能的交互作用。
- (3) **執行最佳化程序**：根據 S/N 比最高的水準組合預估最佳製程組合，並計算其預估 S/N 比。
- (4) **執行確認實驗**：根據分析結果，實際製作並測試預估最佳組合下之甩炮，量測音量並與預估值比較，進行確認。
- (5) **執行結果與評估**：若確認實驗結果與預測值相符，即完成製程優化；若偏差過大，則需重新檢討控制因子設定與實驗流程，並重啟步驟 1 至 8。在其中的第七步驟到第八步驟會分別以 Excel 及 Minitab 進行分別計算，來驗證是否有誤。

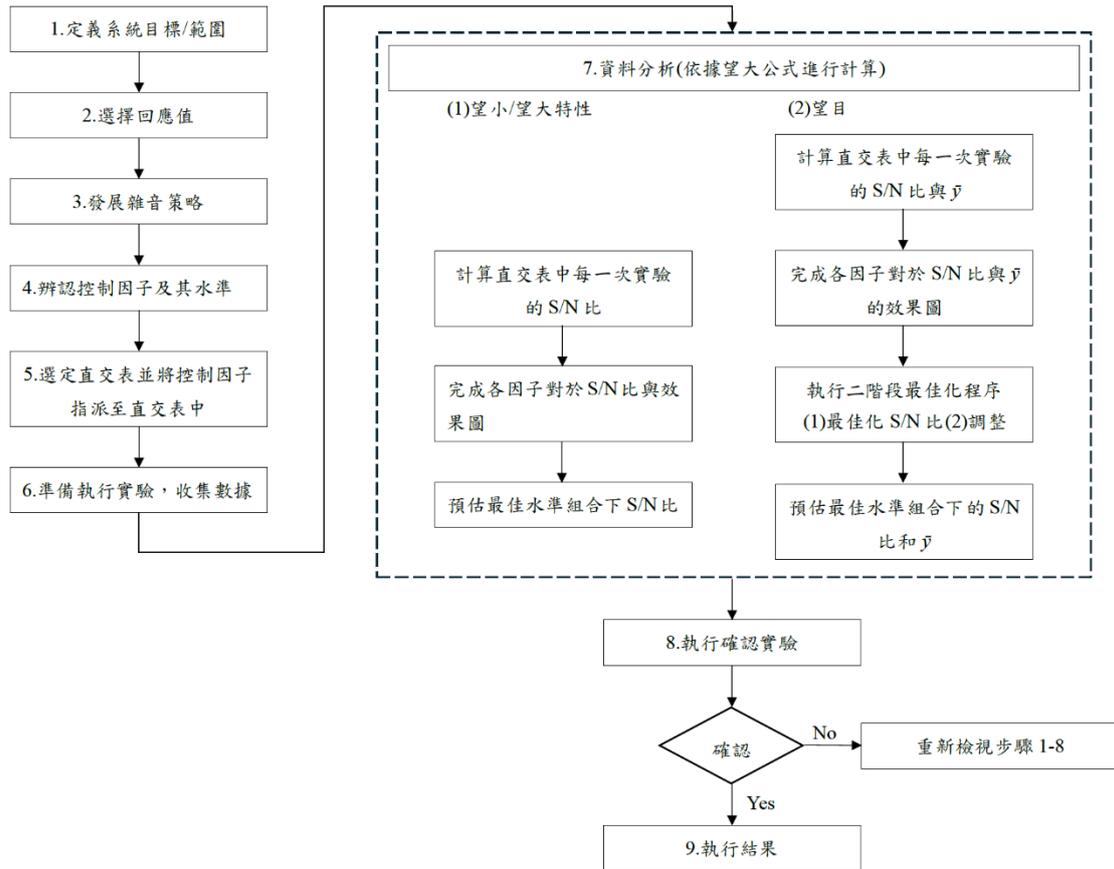


圖 3 參數設計分析流程圖

(品質工程：線外方法與應用，2013)

3.2 實驗內容介紹

本實驗主要運用田口方法 (Taguchi Method) 設計實驗，針對影響甩炮聲音大小(分貝值)的各項因素進行探討與分析，目的是找出能夠讓聲音表現更加大(望大)的製作程序以及施放條件。為了達成這個目標，我們設計了包含四個主要因子(折法、紙張種類、紙張尺寸、施力位置)，每個因子設置三個不同水準，以進行全面性的測試與比較。

表格 1 各項因子及水準示意圖

Factor	Description	Level 1	Level 2	Level 3
A	折法	單響	雙響	四角
B	紙張種類	卡紙	報紙	書面紙
C	紙張尺寸	2K	4K	A4
D	施力位置	手捏甩炮尖端	手捏甩炮中間	手握住甩炮

在進行實驗時，會依照 L₉ 直交表搭配不同因子與水準組合製作用炮，並確

保每種組合皆製作完整且數量充足，為了避免單次失誤影響實驗結果，會重複三次實驗。

表格 2 L₉ 直交表因子與水準組合

Exp.	A	B	C	D
	1	2	3	4
1	單響	卡紙	2K	手捏甩炮尖端
2	單響	報紙	4K	手捏甩炮中間
3	單響	書面紙	A4	手握住甩炮
4	雙響	卡紙	4K	手握住甩炮
5	雙響	報紙	A4	手捏甩炮尖端
6	雙響	書面紙	2K	手捏甩炮中間
7	四角	卡紙	A4	手捏甩炮中間
8	四角	報紙	2K	手握住甩炮
9	四角	書面紙	4K	手捏甩炮尖端

為確保公平性，每一種組合的甩炮皆由相同實驗人員以相同動作與施力方式操作，並保持相同施放高度與距離。可以看到下圖操作時手舉的高度會超過白板上的字。



圖 4 實驗高度示意圖

每次甩炮施放過程中，使用數位分貝計測量甩炮爆響瞬間的最大聲音強度 (dB 值)，並全程錄影，方便日後確認紙張是否如預期方式展開、爆響及是否

存在失敗情形（如未爆、爆響微弱等）。另外，為減少外界干擾，實驗在固定安靜空間內進行，並統一分貝計與施作區域間的距離與方位，確保數據的可比性與有效性。

在甩炮製作與施放操作過程中，特別注意以下幾點：

1. 折法變化（單響、雙響、四角）直接影響空氣進入紙張內部的速度與衝擊波產生方式。
2. 紙張種類（卡紙、報紙、書面紙）影響紙張展開速度、韌性及爆破時空氣流動特性。

表格 3 詳細紙張種類說明

紙張種類	優點	缺點
卡紙	1. 厚實有韌性，不易變形。 2. 支撐力強。	1. 成本較高。 2. 較厚重。
報紙	1. 質地輕薄。 2. 回收率高，環保。 3. 易折疊裁切。	1. 易吸水、易撕破。 2. 表面粗糙，不適合高品質印刷。 3. 保存時間短，易變黃。
書面紙	1. 厚度適中，便於裝訂。 2. 吸墨均勻，不易滲透。	1. 不夠厚實，易折皺破損。 2. 製作消耗資源較多。

在選擇紙張種類時，常見的有卡紙、報紙以及書面紙，各自具有不同的優缺點。卡紙最大的優勢在於厚實且具韌性，不易變形，能提供良好的支撐力，適合用於需要強度的場合。然而相對而言，卡紙成本較高，且材質較厚重，增加運輸與加工的不便。

報紙則以質地輕薄著稱，不僅便於折疊與裁切，也因回收率高而符合環保需求。然而報紙易吸水、容易撕破，表面較粗糙，不適合高品質印刷，同時保存時間短，容易因氧化而發黃，影響美觀與耐用度。

至於書面紙，厚度適中，非常適合裝訂使用，其吸墨均勻、不易滲透，有助於保持印刷品質。然而書面紙的韌性與強度不如卡紙，較容易折皺或破損，且其製作過程對資源的消耗相對較多，對環境的負擔也較高。紙張尺寸（2K、4K、A4）決定甩炮能容納的空氣量，進而影響聲音強弱。

表格 4 詳細尺寸說明

紙張	尺寸(cm)	備註
A4	21 × 32	取 A4 短邊，在取 4K 的短邊
2K	64 × 54.5	全開的一半，再裁成報紙的尺寸
4K	32 × 54.5	報紙長邊的一半



圖 5 實際裁切示意圖 1



圖 6 實際裁切示意圖 2

在常見的紙張規格中，A4、2K 與 4K 各自具備不同的尺寸與應用特性。A4 尺寸約為 21 × 32 cm，通常是辦公與印刷文件的標準規格。在本

研究中，會以 A4 紙的短邊（21 cm）作為基準，對應到 4K 紙的短邊，以便進行比例設計與裁切。

2K 紙的尺寸約為 64 × 54.5 cm，為全張大紙（通常稱為全開紙）的一半，常用於需要較大面積的印刷用途。再經過裁切後，可取得報紙常用的 4K 尺寸。

4K 紙則約為 32 × 54.5 cm，等於 2K 紙長邊對半裁切後的大小，也就是報紙常見的尺寸。由於其長度接近標準報紙規格，方便於印刷與閱讀。透過這樣的規格搭配與比例裁切，可以在設計與製作時，靈活地選擇最適合的紙張尺寸，以符合不同產品或實驗需求。

3. 施力位置（捏尖端、捏中間、握整體）則左右操作穩定性與施力效率，間接影響甩爆效果。

表格 5 施力位置詳細說明

施力位置	穩定性	力量輸出	空氣阻力
手握尖端	低	小	小
手握中間	中	中	中
手握整體	高	大	大

- (1) 穩定性 (Stability) 根據槓桿原理與人體動作控制理論：

手握尖端時，手與施力點距離短，對工具的控制力降低，容易晃動，穩定性差。手握中間時，接觸面與距離適中，手腕能提供一定控制，穩定性中等。手握整體時，整個手掌與工具有大面積接觸，可由整個手腕協調施力，提升整體穩定性。

- (2) 力量輸出 (Force Output) 依據力矩原理 (moment arm)：

(a) 手握尖端：因為握在最前端，力臂最短，只需施加小力量就能產生工具末端運動，但穩定性差，適合細小快速的動作。

(b) 手握中間：力臂增加，需要中等力量才能完成同樣動作，操作較穩，但較耗力。手握整體：握住整個工具時，槓桿長度最大，若不靠近施力點，完成動作需用較大力量，雖然穩定，但肌肉耗能最多。

- (3) 空氣阻力 (Air Resistance) 根據流體力學 (aerodynamics)：

空氣阻力與迎風面積有關，面積越大，阻力越高，手握尖端時，裸露面積小、阻力小。手握整體時，因整個手包覆工具，增加迎風面

積，導致空氣阻力增加。

此外，對每組樣本進行重複測試（至少三次），取平均分貝值作為該組數據，以降低個別操作誤差對結果造成的影響。所有數據紀錄後使用 Excel 與 Minitab 進行 S/N 比計算、因子效應圖繪製與最佳製程參數分析，最終篩選出最佳甩炮製作方式，並進行驗證性試驗。

3.3 實驗材料及設備

3.3.1 紙張材料

本實驗選用三種不同種類的紙張作為製作用炮的基礎材料，分別為報紙、西卡紙與書面紙。

- **報紙**：質地輕薄，易於摺疊且成本低，具環保再利用價值。
- **西卡紙（卡紙）**：厚度較高，支撐力與韌性良好，不易在施力過程中變形，但折疊與施力時難度相對增加。
- **書面紙**：厚度適中，兼具良好的挺度與柔軟性，適用於一般折疊用途。



圖 7 報紙



圖 8 卡紙



圖 9 書面紙

3.3.2 分貝計

使用手機內建的分貝計進行聲音強度量測，平放桌面固定裝置位置，確保量測時距離一致，以減少操作誤差，提升實驗數據的穩定性與準確度。

3.3.3 攝影裝置

使用手機作為錄影設備，拍攝每次甩炮的完整過程，並作為後續分析紙張摺痕、裂痕變化及甩炮是否成功爆響之判別依據。

3.4 成品介紹

下圖是依據表格 2 的水準組合製作出來所有甩炮，分別依據實驗順序進行編號，其中，實驗 1 的折法是單響，使用的紙張材質是卡紙，紙張尺寸是 2K，施力位置是手捏甩炮尖端；實驗 2 的折法是單響，使用的紙張材質是報紙，紙張尺寸 4K，施力位置是手捏甩炮中間；實驗 3 的折法是單響，使用的紙張材質是書面紙，紙張尺寸 A4 施力位置是手握住甩炮；實驗 4 的折法是雙響，使用的紙張材質是卡紙，紙張尺寸 4K，施力位置是手握住甩炮；實驗 5 的折法是雙響，使用的紙張材質是報紙，紙張尺寸 A4，施力位置是手捏甩炮尖端；實驗 6 的折法是雙響，使用的紙張材質是書面紙，紙張尺寸 2K，施力位置是手捏甩炮中間；實驗 7 的折法是四角，使用的紙張材質是卡紙，紙張尺寸 A4，施力位置是手捏甩炮中間；實驗 8 的折法是四角，使用的紙張材質是報紙，紙張尺寸 2K，施力位置是手握住甩炮；實驗 9 的折法是四角，使用的紙張材質是書面紙，紙張尺寸 4K，施力位置是手捏甩炮尖端。



圖 10 甩炮展示圖

以下為不同折法的甩炮介紹：

1. 雙響甩炮

是指將紙張折兩次，形成兩個摺痕，紙張被折成四個部分，形狀特徵是內部有兩個撞擊點，造成兩次聲響。



圖 11 甩響甩炮展示

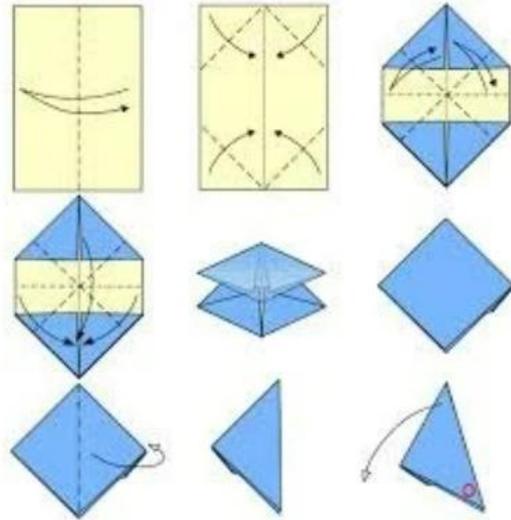


圖 12 雙響甩炮折法步驟
(生生學堂响炮, 2017)

2. 單響甩炮

是指將紙張對摺一次，即折成兩個摺痕（或一個摺痕，看習慣說法）。這樣一張大紙可以變成兩個面。



圖 13 單響甩炮展示

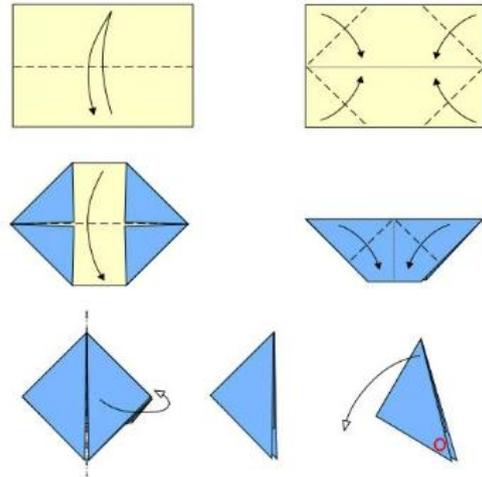
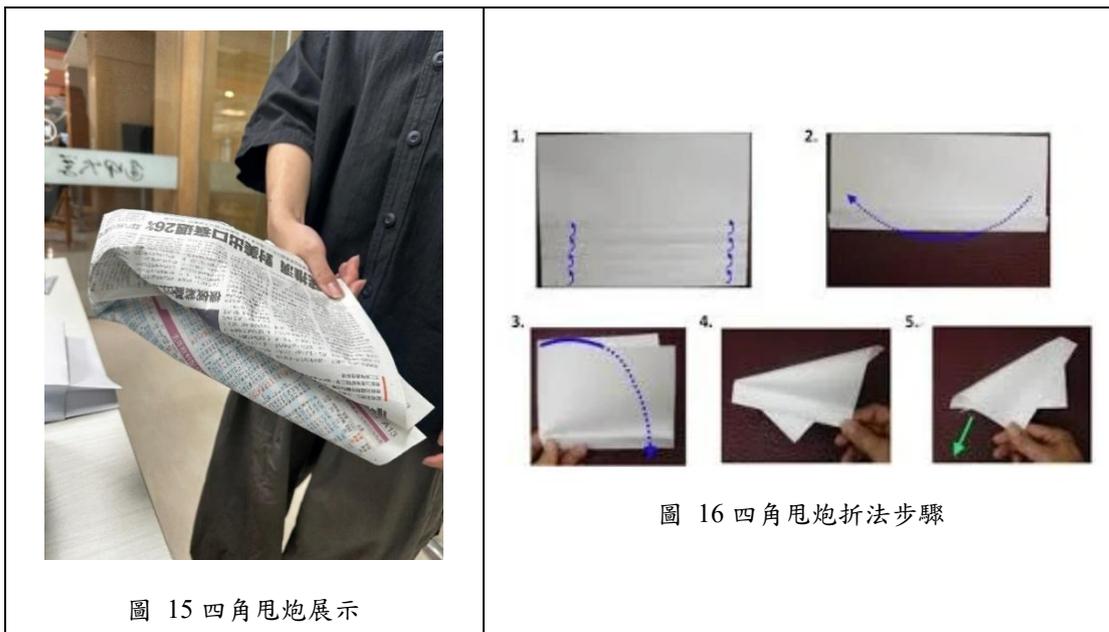


圖 14 單響甩炮折法步驟
(生生學堂响炮, 2017)

3. 四角甩炮

是指紙張依據長邊重複對折多次，短邊對折一次的摺法，最後將一個角下拉，形成一個較大的空腔。



4 研究實作及結果分析

4.1 Excel 實驗記錄

在本次實驗中，我們主要是想找出什麼樣的條件能讓甩炮發出最大的聲音。為了做到這一點，我們用了田口方法的 L_9 直交表，也就是把四個會影響聲音大小的因素：像是甩炮的折法、用的紙張種類、紙的大小，還有怎麼拿甩炮來甩，這四個因子各分成三種不同的方式，然後組合起來做出九種不同的實驗組合。

我們在實作的時候，會先依照這些不同條件折出各種甩炮，然後在固定的位置甩炮，再利用分貝計來量測聲音有多大聲。我們也很注意每一次的實驗環境，像是保持背景安靜、保持距離一致，避免因為外在干擾而影響數據的準確性。從下面表格可以看到每一組都會做三次。

表格 6 每次實驗的數據紀錄

Exp.	A	B	C	D	實驗 1	實驗 2	實驗 3
	1	2	3	4	P1	P2	P3
1	1	1	1	1	88.00	75.00	88.00
2	1	2	2	2	77.00	70.00	72.00
3	1	3	3	3	43.00	41.00	39.00
4	2	1	2	3	82.00	64.00	68.00
5	2	2	3	1	84.00	82.00	77.00
6	2	3	1	2	72.00	74.00	81.00
7	3	1	3	2	50.00	49.00	47.00
8	3	2	1	3	78.00	73.00	76.00
9	3	3	2	1	52.00	51.00	54.00

為了降低偶然因素造成的誤差，讓數據更可靠。在數據處理時使用了三個指標 \bar{y} 和 S 還有 S/N 比對每一組實驗去做計算。也就是用來衡量品質變異的方法。因為我們的目標是聲音越大越好，所以就用田口方法裡針對這種情況的計算公式來處理，最後就可以知道哪一組組合表現最好。

以下為三個指標公式：

1. \bar{y} 的公式：

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

\bar{y} : y 的平均值

y_i : 第 i 個 y 值

n = 總資料筆數

2. 樣本標準差 (sample standard deviation) :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2}$$

s : 樣本標準差

n : 樣本數

x_i : 樣本數 i 筆樣本資料

\bar{x} : 樣本平均數

3. S/N 比公式 :

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right)$$

n : 重複實驗的次數

y_i : 第 i 次實驗的觀測值

$\sum \frac{1}{y_i^2}$: 觀測值平方的倒數，用來強調不希望有小值出現

表格 7 各組實驗的三個指標紀錄

Exp.	A	B	C	D	ybar	S	S/N
	1	2	3	4			
1	1	1	1	1	83.6667	7.5056	38.3759
2	1	2	2	2	73.0000	3.6056	37.2458
3	1	3	3	3	41.0000	2.0000	32.2350
4	2	1	2	3	71.3333	9.4516	36.9242
5	2	2	3	1	81.0000	3.6056	38.1521
6	2	3	1	2	75.6667	4.7258	37.5454
7	3	1	3	2	48.6667	1.5275	33.7360
8	3	2	1	3	75.6667	2.5166	37.5684
9	3	3	2	1	52.3333	1.5275	34.3683

Average =	66.9259	4.0518	36.2390
------------------	---------	--------	---------

從結果可知，第 1 組實驗 (A=1, B=1, C=1, D=1) 表現最佳，其平均音量(ybar) 達到 83.67 dB，為所有組別中最高值，S/N 比亦為 38.38 dB，顯示其不僅音量最大且表現穩定。相對地，第 3 組實驗為表現最差者，其平均音量僅 41.00 dB，S/N 比亦為最低的 32.24 dB，顯示該組合對聲音表現效果不佳。此外，像第 5 組與第 8 組分別達到了 81.00 dB 與 75.67 dB 的高平均音量值，且其 S/N 比亦分別為 38.15 dB 與 37.57 dB，亦屬表現優良的製程組合。

就變異性而言，標準差 (S) 可用來觀察數據穩定度。第 4 組的 S 值達 9.45 dB，顯示其音量表現波動大，穩定性較差；而第 7 組與第 9 組的 S 值皆僅為 1.53 dB，為所有實驗中最穩定者。然而須注意的是，儘管第 7 組與第 9 組表現穩定，其平均音量僅分別為 48.67 dB 與 52.33 dB，聲音表現仍屬中下，因此不能僅以變異小來視為最佳組合。

從整體平均觀察，本次九組實驗之平均音量為 66.93 dB，整體標準差平均為 4.05 dB，顯示音量在不同組合下確實存在顯著差異與波動。S/N 比的整體平均為 36.24 dB。

表格 8 S/N 比因子反應表

Level	A	B	C	D
1	35.9522	36.3453	37.8299	36.9654
2	37.5406	37.6554	36.1794	36.1757
3	35.2242	34.7162	34.7077	35.5758
E1→2	1.5883	1.31007	-1.6505	-0.7897
E2→3	-2.3164	-2.9392	-1.4717	-0.5999
Range	2.3164	2.9392	3.1222	1.3896
Rank	3	2	1	4

為探討各控制因子對甩炮音量穩定性的影響程度，本研究依據田口方法計算各因子於不同水準下的平均信號雜訊比 (S/N 比)，並彙整成上面表格。分析結果顯示，紙張尺寸 (因子 C) 對實驗結果的影響最為顯著，其 S/N 比的範圍最大，達到 3.1222。從水準比較可知，當紙張尺寸為 2K 時 (水準 1)，S/N 比最高，達到 37.8299；而當尺寸縮小至 A4 (水準 3) 時，S/N 比降至最低的 34.7077，顯示較大的紙張能產生較高且穩定的聲響表現。因此，紙張尺寸被認為是本實驗中影響力最強的因子，在四個控制因子中排名第一。

其次為紙張種類（因子 B），其 S/N 比範圍為 2.9392，影響程度亦屬顯著。當使用報紙（水準 2）時的 S/N 比為 37.6554，優於卡紙與書面紙，表示報紙較能穩定地釋放音量。紙張種類因此在各因子中排名第二。

摺法（因子 A）的 S/N 比範圍為 2.3164，影響程度中等，排名第三。其中以雙響摺法（水準 2）表現最佳，平均 S/N 比為 37.5406，顯著高於單響與四角摺法。此結果說明結構內部的撞擊點設計可能會對聲音效果產生關鍵性的差異。

最後是施力位置（因子 D），其 S/N 比變化最小，範圍僅為 1.3896，表示在本實驗條件下，施力位置對甩炮音量的穩定性影響有限。水準 1（手捏甩炮尖端）略優於其他兩個位置，但整體影響力不大，因此排名第四。

綜上所述，控制因子對甩炮音量穩定性的影響程度由高至低依序為：紙張尺寸、紙張種類、摺法與施力位置。這些結果將作為後續最佳參數組合預測與確認實驗的重要依據，亦能協助未來在甩炮製作過程中更有效地選用材料與操作方式以達到最佳音效。



圖 17 S/N 比因子反應圖

上圖為本研究根據實驗結果繪製的「S/N 比因子反應圖」，主要用以觀察四個控制因子（A、B、C、D）在不同水準下對音量穩定性（S/N 比）的影響趨勢。橫軸依序為各因子的三個水準（A₁A₂A₃、B₁B₂B₃、C₁C₂C₃、D₁D₂D₃），縱軸為對應的平均 S/N 比值。每一條折線代表某一因子在三種水準下的變化，而紅色圓圈為該因子表現最好的水準，即具有最高 S/N 比的點，亦即最佳水準。

從圖形變化可明顯看出，摺法 (A) 的最佳水準為 A₂，對應的 S/N 比值最高，代表雙響摺法能產生最穩定且高音量的效果。紙張種類 (B) 在水準 2 (B₂) 時亦達到最高點，表示使用報紙能獲得最佳音效表現。紙張尺寸 (C) 的反應趨勢最為明顯，水準 1 (C₁，即 2K 紙) 具有顯著的最高 S/N 比，而隨著尺寸減小至 A4 (C₃)，S/N 比快速下降，顯示紙張尺寸對甩炮聲音穩定性影響最大。

表格 9 最佳製程參數組合

Level	A	B	C	D
Optimal	A2	B2	C1	D1

從上面表格 6 對照表格 1 可以得知 A₂ 是 (摺法因子) 最佳水準是雙響摺法；B₂ 是 (紙張種類因子) 最佳水準是報紙；C₁ 是 (紙張尺寸因子) 最佳水準是 2K；D₁ 是 (施力位置因子) 最佳水準是手捏甩炮尖端。

為了驗證最佳製程參數組合的預期效益，本研究依據田口方法中 S/N 比的預測公式，計算在選用兩個顯著因子原先水準為 1 所能達到的預期 S/N 比值。預測公式如下：

$$\eta_{original} = \bar{\eta} + (\bar{\eta}_{B1} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{C1} - \bar{\eta}) = 37.9363$$

其中， $\bar{\eta}$ 為全部九組實驗的 S/N 比總平均值，為 36.2390； $\bar{\eta}_{B1}$ 表示紙張種類為水準 1 (卡紙) 時的 S/N 比平均值，為 36.3453； $\bar{\eta}_{C1}$ 就是紙張尺寸為水準 1 (2K) 時的 S/N 比平均值，為 37.8299。

$$\eta_{optimal} = \bar{\eta} + (\bar{\eta}_{B2} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{C1} - \bar{\eta}) = 39.2463$$

其中， $\bar{\eta}$ 為本實驗九組試驗的 S/N 比總平均值，為 36.2390； $\bar{\eta}_{B2}$ 表示紙張種類的最佳水準 2 (報紙) 時的 S/N 比平均值，為 37.6554； $\bar{\eta}_{C1}$ 是紙張尺寸的最佳水準 1 (2K) 時的 S/N 比平均值，為 37.8299。

從結果可以得知，若製作甩炮時採用紙張種類為報紙 (B₂) 與紙張尺寸為 2K (C₁) 的最佳參數組合，則理論上可獲得預期的 S/N 比為 39.2463，明顯高於原始的實驗平均值。

表格 10 原始與最佳製程參數組合確認實驗

Step 5: 原始與最佳製程參數組合確認實驗							S/N 比			
Level	實驗數據						平均數	標準差	實際值	預測值
Original	71.0	86.0	72.0	73.0	76.0	75.6	6.10737	37.5091	37.9363	
Optimal	77.0	78.0	88.0	84.0	81.0	81.6	4.50555	38.2027	39.2463	

Improvement =	0.6935	1.3100
---------------	--------	--------

為了驗證田口方法所推導出的最佳製程參數組合之有效性，最後進行了確認實驗，分別針對原始製程參數組合與預測最佳參數組合進行實際試驗，並比較兩者的音量表現差異。每組條件皆進行五次實驗測量，計算其平均值、標準差與 S/N 比，並與預測值進行對照。

在原始製程條件下，五次實驗所測得的音量分貝為 71.0、86.0、72.0、73.0 與 76.0，平均值為 75.6，標準差為 6.10737，對應的 S/N 比為 37.5091，預測值則為 37.9363，兩者相當接近，顯示模型對原始條件的預測準確。

在最佳參數組合條件下（紙張種類為報紙、紙張尺寸為 2K），五次實驗的分貝值為 77.0、78.0、88.0、84.0 與 81.0，平均達 81.6，標準差為 4.50555，S/N 比提升至 38.2028，對應的預測值為 39.2463。雖然實際值略低於預測值，但整體表現明顯優於原始條件，證實最佳組合確實有助於提升音量穩定性與強度。

根據計算結果，S/N 比由原始條件的 37.5091 提升至最佳條件的 38.2028，提升幅度為 0.6936 dB，若以預測值為基準，則理論提升幅度為 1.3101 dB。儘管實驗結果略低於預期，但整體趨勢一致，驗證了田口方法在製程參數優化上的應用效果具參考價值與實際改善潛力。

表格 11 判定結果

Step 6: 判定結果

預測值及實際值之比較後，可得知兩數值相當接近，表示此結論是可靠的。

在確認實驗階段中，本研究進一步將最佳製程參數組合所對應的預測 S/N 比值與實際實驗所得的 S/N 比值進行比較。預測值為 39.2463，而實際試驗所得為 38.2028，兩者之間的差距僅為 1.0435，落在可接受的誤差範圍內。雖然實際值略低於預測值，但整體趨勢一致，顯示最佳製程條件確實能有效提升甩炮的音量表現與穩定性。

由此可判定，此次依據田口方法所建立的實驗參數分析模型具有良好的預測能力，其分析結果亦具實務參考價值。最佳製程參數組合不僅理論上優於原始條件，實際試驗亦證實其改善效果，說明本研究所提出之最佳化策略具有可靠性與穩健性。因此，本次試驗的結論可視為有效，最佳參數設定可作為後續甩炮製作改良與應用的參考依據。

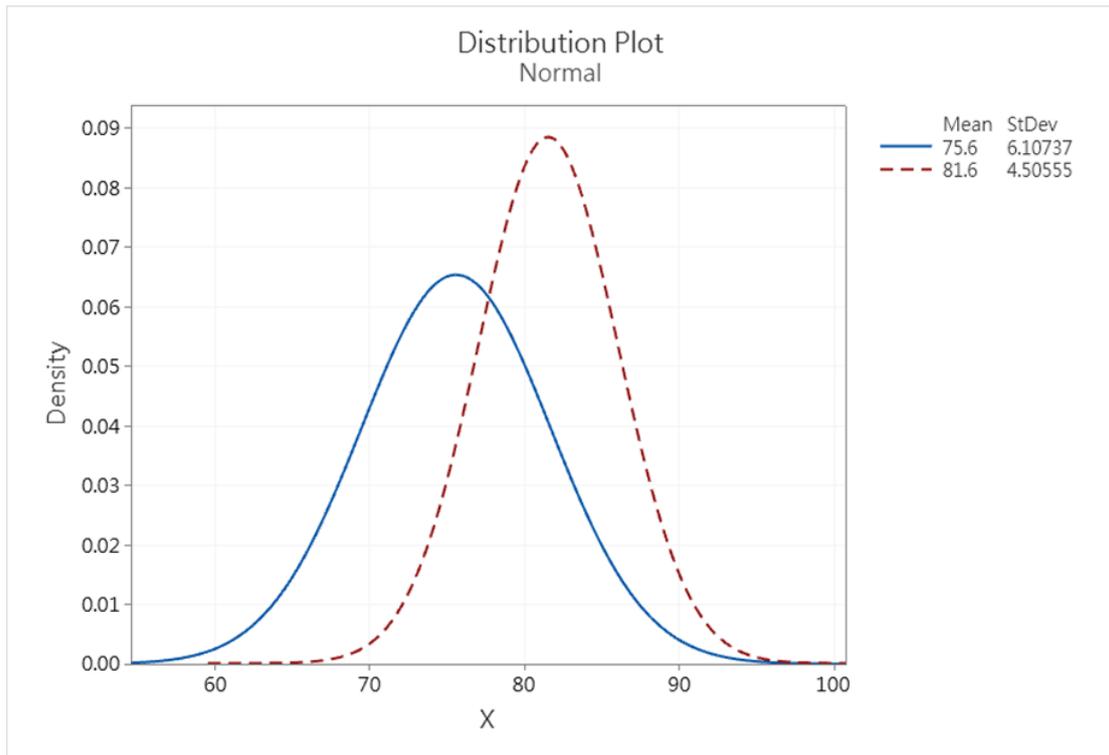


圖 18 Step 7：繪製實驗前後機率分布圖

表格 12 Step 8: 計算改善前後不良率結果

	不良率計算
Original	46.09%
Optimal	7.15%

4.2 Minitab 實驗記錄

為確認 Minitab 計算結果的準確性與一致性，本研究同步使用 Excel 手動套用「望大特性」S/N 比公式，逐一計算各實驗組別的 S/N 比，並進一步彙整各水準的平均值與範圍。經下圖比對發現，Excel 計算所得的各因子 S/N 比值、Delta 變異值與因子排序結果皆與 Minitab 輸出一致，在數值還是趨勢上均呈現高度相符。此結果驗證了研究中以 Excel 進行的推導與 Minitab 分析具一致性，並進一步確認整體資料分析流程的準確性與可信度。

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	折法	紙張種類	紙張尺寸	施力位置
1	35.95	36.35	37.83	36.97
2	37.54	37.66	36.18	36.18
3	35.22	34.72	34.71	35.58
Delta	2.32	2.94	3.12	1.39
Rank	3	2	1	4

圖 19 S/N 比因子反應表

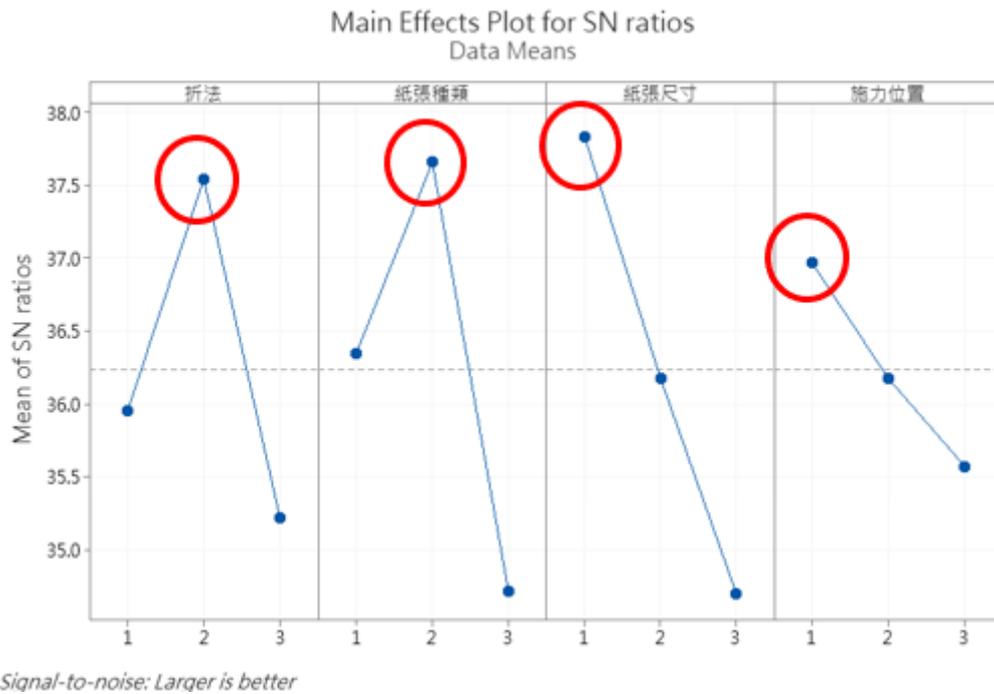


圖 20 S/N 比因子反應圖

表格 13 最佳製程參數組合

Level	A	B	C	D
Optimal	A2	B2	C1	D1

Prediction

<u>S/N Ratio</u>	<u>Mean</u>	<u>StDev</u>
37.9363	79.2963	7.02581

圖 21 預測值 (Original)

Settings

<u>紙張種類</u>	<u>紙張尺寸</u>
1	1

圖 22 預測值 (Original)水準示意圖

Prediction

<u>S/N Ratio</u>	<u>Mean</u>	<u>StDev</u>
39.2463	87.9630	4.10681

圖 23 確定實驗 S/N 比預測值

Settings

<u>紙張種類</u>	<u>紙張尺寸</u>
2	1

圖 24 確定實驗 S/N 比預測值

4.3 結果分析

分析結果顯示，聲音最大的是用「雙響」的折法、選用「報紙」這種紙張、紙張大小是「2K」，施力的位置是「手捏甩炮尖端」的這種方式。這樣的結果其實也蠻符合直覺的。因為雙響甩炮的結構本來就會讓它有兩個聲音點，可以造成更強的爆破效果；報紙又輕又薄，甩動的時候比較容易被撐開，聲音自然比較大；2K 的紙張最大，能裝的空氣也最多，打開的時候產生的空氣衝擊波會更強；至

於手捏尖端這種拿法，雖然比較不好控制，但可以讓末端的速度變快，瞬間的聲音也會比較大。

為了確認這個結果是不是準的，我們還特別再做了一次用這組最佳參數的實驗。結果發現實際的聲音大小跟我們原本分析出來的預測值幾乎一樣，這也證明了我們這次的實驗設計和分析方法是有效的。另外我們還把聲音數據畫成圖，可以看到聲音分布集中在高分貝區，跟之前的組合比起來真的有明顯差異。

總結來說，我們成功找出了讓甩炮聲音最大的方法，也讓我們對這個看起來很簡單的童玩有了更深入的了解。不只好玩，還真的學到不少東西。



5 結論

本研究透過田口方法進行實驗設計與分析，成功找出影響甩炮音量表現的關鍵因子與最佳參數組合。結果顯示，使用「雙響」摺法、選用「報紙」作為材質、紙張大小採用「2K」，並以「手捏甩炮尖端」的方式施力，能有效產生最大聲響。這樣的結果不僅與我們的直覺觀察相符，也在驗證實驗中得到相同的結果，顯示本研究的實驗設計具有良好的準確性與實用性。

從結構與物理特性來看，雙響摺法提供了多個爆破點，能提升音量表現；報紙材質較為輕薄，較容易在甩動時產生聲響；2K 紙張提供更大的內部空間，有助於形成更強的空氣衝擊波；而握住尖端施力則是能夠提高末端速度，進一步強化瞬間聲音效果。結合這些特性，形成了最具穩健性與效能的組合。進一步將聲音資料視覺化後可以發現，最佳組合在分貝表現上呈現集中於高音量區段，明顯優於其他組合，證實其穩定性。

綜合而言，本研究不僅成功優化了甩炮的聲音表現，也展現田口方法在多因子實驗下的應用價值與效率。同時，我們也從中深化了對實驗設計、品質工程與參數最佳化等知識的理解，並體會到如何將生活經驗轉化為系統性的科學探究，提升了我們解決問題的能力。

參考文獻

1. Kuczek, T. (2018). Taguchi Methods, Purdue University.
2. Owen, A. (2022). Taguchi Methods – Experimental Design, Stanford University.
3. ScienceDirect. (2024). Taguchi Method.
4. Gaonkar, S., Karanjavkar, N., & Kadam, S. (2015). *Taguchi Method*.
5. 工業技術研究院 (2020)。《實驗設計與田口方法實務－在 Minitab 上的應用優化》。
6. 蘇朝敦(2013)。品質工程：線外方法與運用。台北：前程。
7. 楊海峰(2017)。生生學堂響炮摺紙。

