

逢甲大學學生報告 ePaper

應用田口方法優化氣球衝鋒車行駛性能之研究

An Optimization Study on the Running Performance of an Air-Powered Balloon Car Based on the Taguchi Method

作者：謝晨欣、林姍妤、盧侑岑、葉童、張瑀芹、柯奕蓉

系級：工業工程與系統管理學系三年級

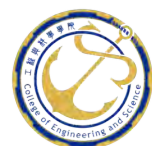
學號：D1283927、D1268250、D1248874、D1248679、D1248622、D1248182

開課老師：鍾健平 老師

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：114學年度 第二學期



中文摘要

本研究旨在應用田口方法優化氣球衝鋒車行駛性能，並以縮短小車行駛 2 公尺所需之時間作為「望小特性」指標。實驗選擇氣孔大小、噴氣管長度、氣球充氣體積及車身材質共 4 項控制因子，各設定 3 個水準，採用 $L_9(3^4)$ 直交表進行實驗設計。為降低量測誤差並提升數據可靠度，實驗過程輔以慢動作錄影及 3 次重複試驗 ($n=3$)。

實驗與信噪比 (S/N 比) 分析結果顯示，各控制因子對行駛時間之影響顯著性依序為：出氣孔大小、車身材質、噴氣管長度及氣球充氣體積。確認實驗證實，最佳參數組合為 $A_2B_1C_2D_2$ ，即中出氣孔、5 cm 噴氣管、中等充氣量及冰棒棍車身。在此最佳化配置下，平均行駛時間自 2.117 秒顯著縮短至 1.173 秒，行駛效率提升達 44.57%；同時，系統 S/N 比由 -6.513 dB 提升至 -1.388 dB，獲得 5.125 dB 品質增益。本研究結果不僅具體驗證了田口方法於載具參數最佳化實用性，亦成功提升氣球衝鋒車系統整體效率與穩健性。

關鍵詞：田口方法、直交表、望小特性、信噪比、參數最佳化、確認實驗

Abstract

This study applies the Taguchi method to optimize the running performance of an air-powered balloon car, utilizing the time required to travel a 2-meter distance as a "smaller-the-better" quality characteristic. Four control factors—aperture size, nozzle length, balloon inflation volume, and chassis material—were selected at three levels each, and an $L_9(3^4)$ orthogonal array was employed for the experimental design. To ensure measurement reliability and mitigate observational variance, high-speed slow-motion video recording and three experimental replications ($n=3$) were implemented. The signal-to-noise (S/N) ratio and main effects analysis indicate that the relative significance of the factors is ranked as follows: aperture size, chassis material, nozzle length, and balloon inflation volume. The confirmation experiment verified that the optimal parameter combination is $A_2B_1C_2D_2$ (medium aperture, 5-cm nozzle length, medium inflation volume, and wooden popsicle stick chassis). Under this optimized configuration, the average travel time was significantly reduced from 2.117 to 1.173 seconds, achieving a 44.57% improvement in driving efficiency. Furthermore, the S/N ratio increased from -6.513 dB to -1.388 dB, yielding a substantial quality gain of 5.125 dB. These empirical findings demonstrate that the Taguchi method effectively enhances both the driving efficiency and robust performance of the vehicle system.

Keywords: Taguchi method, Orthogonal array, Smaller-the-better characteristic,

Signal-to-noise (S/N) ratio, Parameter optimization, Confirmation experiment

目 次

第一章 緒論	4
1.1 研究背景與動機	4
1.2 研究目的	4
第二章 文獻探討	5
2.1 田口穩健參數設計與直交表	5
2.2 品質特性機能與信噪比 (S/N 比)	5
2.3 載具檢測設備之多因子製程最佳化實務	6
2.4 氣壓動力推進載具之功率特性與參數設計	6
第三章 實驗對象說明	7
3.1 實驗所需材料	7
3.2 氣球衝鋒車標準製作步驟	8
第四章 實驗規劃與執行步驟	12
4.1 實驗流程與步驟總覽	12
4.2 實驗規劃與執程序	13
第五章 實驗結果與資料分析	17
5.1 直交表實驗結果與因子反應分析	17
5.2 確認實驗與改善績效評估	19
第六章 結論與建議	21
6.1 結論	21
6.2 建議	22
6.3 實作心得	22
參考文獻	23

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

在課程中，我們學習到田口方法（Taguchi Methods）的核心在於「穩健設計（Robust Design）」，即透過選擇最佳的參數組合，使產品在受到不可控因素（雜音）干擾時，仍能維持穩定的品質表現。然而，課堂上的理論計算多為書本上的數據，為了能深層內化實驗設計（DOE）的邏輯，我們選擇實作來將抽象理論具象化。

氣球衝鋒車是許多人童年科學營的共同回憶，有趣的是，就讀國小五年級的姪子小胖寒假時也在冬令營製作了同樣的小車。他回家時問過我：「小姑姑，到底要怎麼做，這台車才能跑得最快？」我想，與其憑感覺調整，倒不如利用大學所學的專業知識，以「望小特性」為目標，透過直交表與信噪比（S/N 比）分析，科學化地找出最佳配置。

1.2 研究目的

本研究旨在應用田口方法對氣球衝鋒車進行參數設計優化，並以科學化的工程分析，回應姪子小胖對「如何讓氣球衝鋒車跑得更快」的好奇。有鑑於傳統憑直覺或經驗的嘗試往往缺乏系統性，本專題期望透過品質工程與實驗設計（DOE）的邏輯，將抽象理論具象化於實際的載具改良中。具體而言，本研究之主要目的可歸納為以下3點：

1. 最佳化行駛速度配置：以小車行駛固定距離（2公尺）所需時間作為品質特性，透過田口方法的實驗設計，找出能使行駛時間最短、速度最快的最佳控制參數組合。
2. 提升系統穩健性與降低變異：藉由 S/N 比分析，尋求一組不僅能提升車輛絕對速度，且在重複實驗中具有高度穩定性、能有效降低操作誤差與環境雜音影響的最佳設定。

3. 驗證品質工程理論之實用性：將課堂所學之田口穩健參數設計實際應用於氣球衝鋒車的實作改良，並透過比較優化前後的性能數據差異，具體驗證該方法在產品參數設計與性能優化上的工程實用性與成效。

第二章 文獻探討

為了確立「應用田口方法優化氣球衝鋒車行駛性能」之學術基礎，本研究針對「品質工程方法論（田口設計）」與「載具氣壓推進系統（流體力學機制）」兩大核心維度進行文獻系統化梳理。

2.1 田口穩健參數設計與直交表

在品質設計與產品開發的方法論上，李輝煌（2011）指出，傳統實驗設計在面對多因子、多水準的系統優化時，往往面臨實驗次數呈指數型膨脹的困境。田口玄一博士所創立的田口分析法，核心價值在於利用具備高度正交特性的「直交表（Orthogonal Arrays）」，系統性地減少多變數時之試驗次數。這種設計能讓工程師在有限的預算及資源下進行製程最佳化，在控制因子、雜音因子（Noise Factors）及品質特性間之錯綜複雜關係中，找出最佳製程參數組合，以最低的成本支出達成高品質與高穩定性的產品表現。本研究選用之 $L_9(3^4)$ 直交表，即是奠基於此正交統計原理，用以在充滿操作變異的真實環境中定位出關鍵控制因子。

2.2 品質特性機能與信噪比（S/N 比）

根據田口方法的理論架構，評估製程或產品的品質績效並非單純依賴平均值，而是透過 S/N 比來衡量系統的穩健度。李輝煌（2011）說明，S/N 比越大表示標準偏差（變異）越小，亦即產品品質越佳、受雜音干擾越小。在應用上，依據不同的品質期望，主要區分為三種理想機能：

1. 望目特性（Nominal-the-Best）：目標在使品質特性趨近於特定目標值。

2. 望小特性 (Smaller-is-Better): 品質特性越小越好。胡文明、郭文田 (2018) 指出, 國內規範之鋪面平坦度試驗結果值越小代表路面越平整、品質越好, 即屬於望小特性。
3. 望大特性 (Larger-is-better): 品質特性越大越好。例如智慧型鋪面檢測車在執行路面檢測時, 為了確保大範圍路網量測數據的極大重現性與可靠度, 期望求得該道路之平坦度最大值, 其品質特性即採用望大公式進行優化。

本研究之氣球衝鋒車以「縮短行駛固定距離所需之時間」為唯一目標, 在理想機能分類上完全扣合李輝煌 (2011) 所定義望小特性, 旨在透過極小化時間均值與降低重複測試的變異, 實現速度與穩健性的雙重最佳化。

2.3 載具檢測設備之多因子製程最佳化實務

田口方法在載具性能調校與檢測設備優化上具有廣泛的實務應用。胡文明、郭文田 (2018) 針對國內自行研發之智慧型鋪面檢測車進行了多因子參數優化。該研究指出, 影響鋪面檢測車 IRI (國際糙度指標) 量測精確度與數據可靠性的潛在控制因子錯綜複雜, 包含車輪胎壓、行車速度、車輛載重 (乘員人數) 及人員駕駛技巧等。該研究最終藉由田口方法之 S/N 比判定, 成功在錯綜複雜的系統中找出智慧型鋪面檢測車的最佳控制因子組合為: 胎壓 (40 psi)、速度 (50 km/h)、乘員 (2 人) 及駕駛 (H 員)。此文獻為本專題提供了重要的實務示範: 面對具有複雜機械與流體擾動的載具系統, 田口直交表能有效排除不必要的人為或環境雜音, 大幅提昇試驗數值的正確性與數據可靠度。

2.4 氣壓動力推進載具之功率特性與參數設計

為了確立本研究中氣球衝鋒車 (氣壓推進系統) 參數設計的學術基礎, 本研究參考了 Shi 等人 (2016) 關於新型氣壓動力載具功率特性的研究。該文獻針對利用氣液轉換器 (Hydropneumatic transformer) 推動之氣動力系統, 建立了數學

模型與實驗平台，並針對多項關鍵結構參數進行了動態特性分析與最佳化探討。其研究結果對本專題的因子設計提供了重要的理論支持：

1. 輸入氣壓 (Input Air Pressure) 與效能的權衡：研究結果顯示，增加系統的輸入氣壓雖然能夠有效提升輸出的功率，但同時會導致整體的系統效率 (Efficiency) 下降，這與本研究中「因子 C：氣球充氣體積」的物理意義相符，說明了單純只增加初始氣壓（吹大氣球）未必能達到最佳的動能轉換效率，需要尋找最適當的充氣水準。
2. 排氣孔徑 (Discharge Orifice) 的關鍵影響：該實驗證實，較大的排氣孔徑能夠同時提升系統的輸出功率與效率，然而文獻也指出，孔徑若設置過大，將會破壞節流原理 (Orifice throttling)，反而阻礙系統內部壓力的建立。這為本研究設置「因子 A：出氣孔大小（瓦楞紙圈）」提供了堅實的學術依據，證明孔徑大小的微調是影響推進效率的絕對關鍵。

在氣壓驅動系統中，參數之間存在著複雜的交互影響，單一參數的極大化（如無限擴大出氣孔或氣壓）並不能保證整體表現的最佳化。

第三章 實驗對象說明

本研究針對氣壓推進小載具（氣球衝鋒車）進行最佳化設計。為確保後續田口直交表實驗能精確且具高重現性地切換各項參數水準，對實驗材料進行規格化整理，並建立標準作業程序 (SOP)，作為元件製作與車體組裝之依據。

3.1 實驗所需材料

本研究之優化標的為氣壓推進小載具（氣球衝鋒車），車體製作方式主要參考樂樂 TV (2023) 發布之 YouTube 教學影片。本實驗所使用之車體結構、輪軸及動力推進元件之耗材清單與規格如表 1 所示。

表 1 實驗材料清單

元件名稱	規格	功能說明
粗吸管	市售標準波霸珍奶粗吸管	作為噴氣管之主通道及動力源接口
細吸管	市售標準飲料細吸管	剪裁後套在輪軸外部，充當軸承
氣球座	塑膠氣球夾座	作為小車之車輪使用
氣球棍	配氣球座之塑料實心棍	裁切後作為前後傳動之輪軸結構
氣球	標準規格圓形乳膠氣球	蓄積空氣之儲能與動力源
寬版冰棒棍	實木材質	小車底盤之車身主骨架
瓦楞紙	16K 彩色瓦楞紙板	捲起後塞入粗吸管，藉由調整長度以控制出氣孔徑
橡皮筋	市售標準橡皮筋	綁緊氣球與吸管接口，確保系統氣密性
泡棉膠帶	3M Scotch 雙面泡棉膠帶	結構部件與輪軸軸承之間之固定

3.2 氣球衝鋒車標準製作步驟

為了將人為組裝誤差（製程雜音）降至最低，本研究制定一套標準裝配流程（SOP）。車體組裝程序與規範如下：

步驟一：製作輪軸與車輪

1. 使用剪刀剪下一段長度為 6cm 的氣球棍，作為輪軸主體。
2. 另剪下一段長度為 3cm 的細吸管，於系統中作為容納輪軸的「軸承」。
3. 將一個氣球座（車輪）緊密插上氣球棍的一端，接著套入 3cm 的細吸管軸承，最後將另一個氣球座套入輪軸的另一端進行固定。
4. 完整重複上述程序兩次，分別製成前輪與後輪，如圖 1 所示。



圖 1 前輪與後輪

步驟二：製作車身

5. 取一根車身基底材料（依據實驗設計變更為 PP 板、寬版冰棒棍或瓦楞紙）。
6. 於該材質的前端與後端表面，各貼上一小段雙面泡棉膠帶。
7. 將步驟一完成之前輪與後輪，平行且對稱地黏貼於泡棉膠帶上，確保輪軸與車身成 90 度正交，即完成基礎底盤架構，如圖 2 所示。



圖 2 車身製作完成

步驟三：製作噴氣管

8. 剪下一段長度為 6cm 的粗吸管作為噴氣管主體。
9. 依據直交表配置裁切特定面積的瓦楞紙條（3*5 cm、3*6 cm 或 3*7 cm），將其緊密捲起後塞入粗吸管的末端，如圖 3 所示，用於製成出氣孔徑管制結構，瓦楞紙條裁切長度越長，捲繞層數越厚，塞入吸管後內

部預留的空心出氣孔徑則越小。

10. 孔徑管制結構，瓦楞紙條裁切長度越長，捲繞層數越厚，塞入吸管後內部預留的空心出氣孔徑則越小。

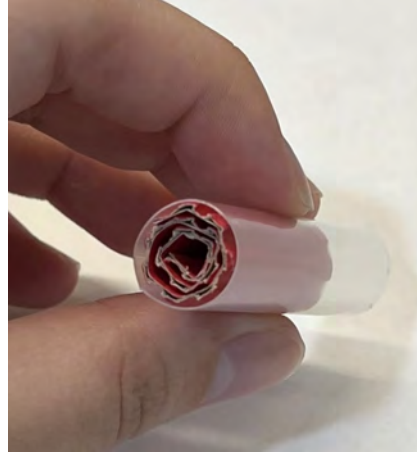


圖 3 出氣孔徑管制結構特寫

11. 將噴氣管牢牢黏貼於步驟二完成之車身底盤上方，如圖 4 所示。

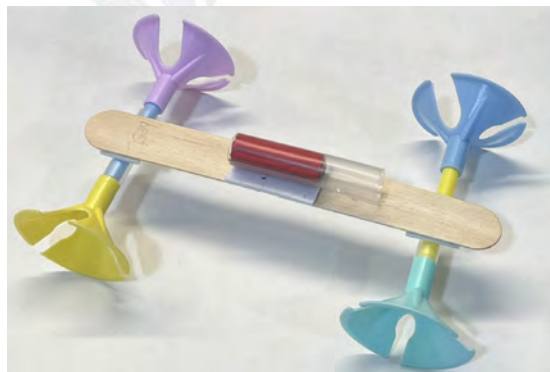


圖 4 噴氣管固定於車身

步驟四：組裝噴射動力源

12. 剪下一段長度為 5cm 的粗吸管作為動力對接管。



圖 5 噴射動力源

13. 使用橡皮筋在氣球開口與吸管的連接處進行多圈纏繞並綁緊，組裝完成後必須進行吹氣檢驗，確保空氣不會從接口縫隙中漏出，以落實製程之氣密管制。

步驟五：動力系統固定至車身

14. 在步驟三已經固定於小車上的噴氣管管身中間，使用剪刀小心剪開一個約 1cm 的對接缺口。
15. 將步驟四製作完成之噴射動力源吸管末端，緊密塞入該 1cm 小缺口中。
16. 微調氣球座車輪與噴嘴的角度，確保噴氣軸線與小車前進方向完全水平，即完成標準氣球衝鋒車之組裝，如圖 6 所示。

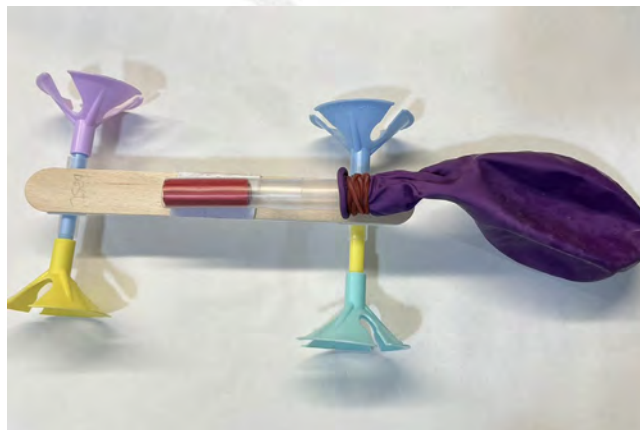


圖 6 氣球衝鋒車完成

第四章 實驗規劃與執行步驟

本研究之核心在於應用田口玄一博士所創立之「穩健參數設計 (Robust Parameter Design)」理論，針對氣球衝鋒車的結構與推進系統進行優化。本章將詳細說明本研究之科學配置流程與執执行程序。

4.1 實驗流程與步驟總覽

為落實品質工程之嚴謹度，本研究將整體實驗優化製程標準化為六大核心步驟，流程如圖 7 所示。

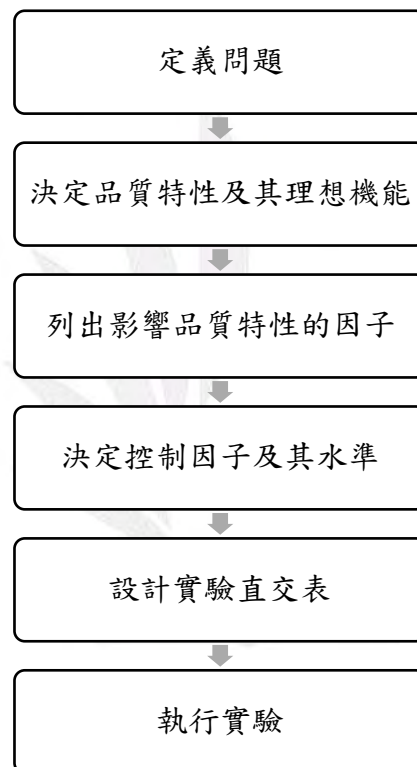


圖 7 優化製成六大步驟流程圖

透過上述六大步驟之循序推進，本研究得以最精簡的實驗次數，科學化地找出具穩健性之最佳參數配置。

4.2 實驗規劃與執行程序

以下將針對圖 7 所示六大執行步驟進行詳細說明。

1. 步驟一：定義問題

氣球衝鋒車在實際行駛過程中，常面臨動力輸出不穩、車身過重或接觸面阻力不當等問題，導致行駛速度過慢或行駛距離過短。本研究之改善目標為：透過田口方法優化控制因子的參數設定，使氣球衝鋒車能以最短的時間完成 2 公尺的直線行駛。

2. 步驟二：決定品質特性及其理想機能

配合上述定義之問題，本實驗選取小車行駛 2 公尺所需之「時間（秒）」作為品質特性（記為 y ）。在理想機能的判定上，本研究追求行駛耗時極小化，因此判定為標準的「望小特性（Smaller-is-Better）」。本實驗重複測試次數設定為 $n=3$ ，用以衡量系統穩定性與穩健度 S/N 比，轉換公式定義如下：

$$S/N = -10 \cdot \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}$$

3. 步驟三：列出影響品質特性的因子

在篩選控制因子前，首先進行系統化的因果要因盤點。本研究將影響衝鋒車行駛速度（即望小時間特性）的因素繪製成圖 8 之特性要因圖（魚骨圖），並歸納為三大核心面向：

(1) 動力面因子：包含出氣量大小、噴氣壓力與氣球充氣量。

(2) 阻力面因子：包含車身自重、噴氣管長度與地面的摩擦力。

(3) 結構面因子：包含整體的重量分佈、車身材質與噴氣管安裝角度。

(4) 外部環境面因子：包含測試地面的材質、賽道坡度以及測試場域內之風速與風向。

透過這樣全面的要因盤點，為我們下一步篩選控制因子打下了基礎。



圖 8 氣球衝鋒車速度特性要因圖（魚骨圖）

4. 步驟四：決定控制因子及其水準

經步驟三之要因盤點後，本研究最終篩選出 4 個關鍵控制因子，各控制因子皆配置 3 個變動水準，其詳細規格如表 2 所示。此外，本研究未將干擾因子納入考量；在信號因子方面，由於本研究追求單一且固定之最佳速度目標，屬於靜態參數設計，因此無信號因子。

表 2 控制因子與實驗水準設定表

因子	敘述	Level 1	Level 2	Level 3	備註說明與量化基準
A	出氣孔大小	大(3*5)	中(3*6)	小(3*7)	塞入吸管内之瓦楞紙條尺寸
B	噴氣管長度 (阻力)	5cm	6cm	7cm	裁切粗吸管長度
C	氣球充氣體積(動力)	小 (55cm)	中 (60cm)	大 (65cm)	以氣球充飽氣後之最長圓周作為基準，實體量測畫面如圖 9 所示。
D	車身材質	PP 板	冰棒棍	瓦楞紙	更換不同材料作為車身



圖 9 控制因子 C (氣球充氣體積) 之量測

表 3 $L_9(3^4)$ 實驗配置直交表

實驗組別	因子 A (出氣孔)	因子 B (噴氣管長度)	因子 C (氣球充氣體積)	因子 D (車身材質)
1	1 (大孔徑)	1 (5 cm)	1 (55 cm)	1 (PP 板)
2	1 (大孔徑)	2 (6 cm)	2 (60 cm)	2 (冰棒棍)
3	1 (大孔徑)	3 (7 cm)	3 (65 cm)	3 (瓦楞紙)
4	2 (中孔徑)	1 (5 cm)	2 (60 cm)	3 (瓦楞紙)
5	2 (中孔徑)	2 (6 cm)	3 (65 cm)	1 (PP 板)
6	2 (中孔徑)	3 (7 cm)	1 (55 cm)	2 (冰棒棍)
7	3 (小孔徑)	1 (5 cm)	3 (65 cm)	2 (冰棒棍)
8	3 (小孔徑)	2 (6 cm)	1 (55 cm)	3 (瓦楞紙)
9	3 (小孔徑)	3 (7 cm)	2 (60 cm)	1 (PP 板)

5. 步驟五：設計實驗直交表

針對上述 4 個 3 水準之控制因子，若執行全面試驗需要做 $3^4=81$ 組測試，為了提升工程效益，本研究選用 $L_9(3^4)$ 直交表，僅需進行 9 組不同參數組合的實驗，即可有效推估出最佳解。直交表之具體配置如表 3 所示。

6. 步驟六：執行實驗

本研究實地架設長度為 2 公尺之直線精密賽道。為免傳統人工按壓電子碼錶引發之人為觀測雜音與反應時間延遲，本研究全程使用智慧型手機錄影紀錄行駛過程，實驗後將影片匯入電腦剪輯軟體中，以慢動作逐影格（Frame-by-Frame）精確捕捉小車前輪抵達起點與終點線之瞬間時間。為計算內在製程變異並確保數據可信度，每組實驗組別皆嚴格重複執行 3 次實驗（ $n=3$ ）。



圖 10 兩公尺直線賽道標線與小車量測之實體場域

(實際操作與行駛過程請見影片連結：<https://youtu.be/j5cp8dPfKNQ>)

第五章 實驗結果與資料分析

本章將針對直交表實測所得之數據進行系統化之工程統計分析。我們首先定義三個評估品質之靈魂統計量，接著匯入 9 組直交表數據，透過逢甲大學所提供之校園授權統計分析軟體 Minitab (Minitab, LLC, 2020) 與 Excel 進行分析，科學化地推導出最佳參數配置，最後透過確認實驗評估本優化製程之最終改善績效。

5.1 直交表實驗結果與因子反應分析

本研究依據 $L_9(3^4)$ 直交表，由一位操作員於賽道執行 3 次重複量測 ($n=3$)，表 4 為各組合的實驗數據紀錄與整理。

表 4 實驗數據紀錄與整理

			各組合的實驗數據							
No.	Hole	Booster	Volume	Material	y1	y2	y3	S	Ave	S/N
1	Large	5cm	Small	PP	1.12	1.10	1.11	0.01	1.11	-0.907
2	Large	6cm	Medium	Stick	1.19	1.15	1.16	0.02	1.17	-1.340
3	Large	7cm	Large	Corrugated	2.06	1.25	1.19	0.49	1.50	-3.815
4	Medium	5cm	Medium	Corrugated	1.24	1.15	1.23	0.05	1.21	-1.637
5	Medium	6cm	Large	PP	1.18	1.12	1.09	0.05	1.13	-1.066
6	Medium	7cm	Small	Stick	1.10	1.12	1.10	0.01	1.11	-0.881
7	Small	5cm	Large	Stick	2.09	2.04	2.11	0.04	2.08	-6.362
8	Small	6cm	Small	Corrugated	3.01	2.18	4.08	0.95	3.09	-10.066
9	Small	7cm	Medium	PP	2.24	2.05	2.20	0.10	2.16	-6.709
							average	0.19	1.62	-3.642

從表 4 結果可知，第 6 組 (Medium / 7cm / Small / Stick) 擁有全表最高的 S/N 比 (-0.881)，且平均時間僅 1.11 秒，標準差更低至 0.01。第 1 組 (Large / 5cm / Small / PP) 表現同樣優異，平均時間也是 1.11 秒，S/N 比為 -0.907。而第 8 組 (Small / 6cm / Small / Corrugated) 表現最不理想，平均行駛時間長達 3.09 秒，標準差高達 0.95，S/N 比亦是全表最低的 -10.066，不僅跑得慢，表現也極度不穩定。

表 5 S/N 比因子反應表

	Hole	Booster	Volume	Material
Level 1	-2.021	-2.968	-3.951	-2.894
Level 2	-1.195	-4.157	-3.228	-2.861
Level 3	-7.712	-3.802	-3.748	-5.173
E1→2	0.826	-1.189	0.723	0.033
E2→3	-6.518	0.356	-0.520	-2.312
Range	6.518	1.189	0.723	2.312
Rank	1	3	4	2

根據 S/N 比因子反應表(如表 5 所示)，四個控制因子對氣球衝鋒車行駛時間的影響力排行依序為出氣孔大小、車身材質、噴氣管長度、氣球充氣體積。影響第一的出氣孔大小不是越大越好，當孔徑從大變中時，穩定度是微幅上升的(+0.826)，但一從中變成小，S/N 比直接暴跌了 6.518。這代表小孔徑會造成系統不穩定，在實務放車時，小孔徑會導致排氣速度過快、氣球劇烈晃動，進而造成嚴重的操作誤差(標準差暴增)。再來看影響第二的車身材質，從 PP 板(Level 1)切換到冰棒棍(Level 2)，其效應只有微小的 0.033(兩者結構剛性與表現差不多)，但一更換成瓦楞紙(Level 3)，效應立刻退步了 2.312。以物理角度來解釋，軟質材質(瓦楞紙)在系統承受氣壓反作用力時，會產生結構變形與震動吸收，是破壞系統穩健度的主要干擾源。

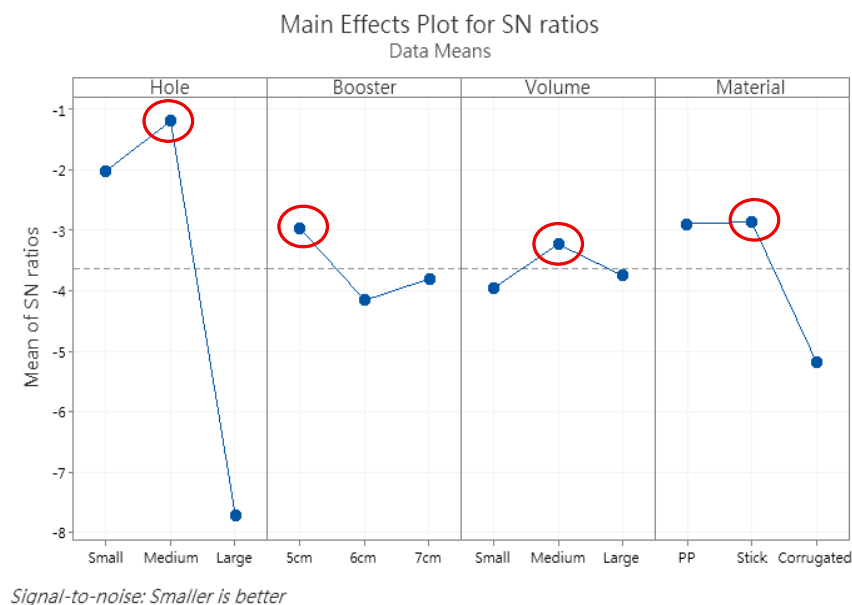


圖 11 S/N 比因子反應圖

圖 11 為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在不同水準下對時間穩定性（S/N 比）的影響趨勢，橫軸依序為各因子的三個水準，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。因此我們的最佳參數組合為 $A_2B_1C_2D_2$ ，也就是中孔徑、5cm 管長、中充氣量、冰棒棍車身。

5.2 確認實驗與改善績效評估

本研究依據最佳參數組合 ($A_2B_1C_2D_2$) 重新製作實體小車進行「確認實驗」。我們將其與優化前的憑經驗隨機基準組 ($A_2B_2C_2D_2$) 進行 3 次重複測試，實測紀錄如表 6 所示，最終之改善定量效能則彙整於表 7。

改善前（基準組）：

在中孔徑、管長 6 cm、中充氣量及冰棒棍車身之配置下，共進行三次實驗，量測行駛時間分別為 2.12 s、2.13 s 及 2.10 s，平均行駛時間為 2.12 s。

改善後（最佳組合）：

將管長調整為 5 cm，其餘因子維持配置後，共進行三次驗證實驗，量測行駛時間分別為 1.18 s、1.17 s 及 1.17 s，平均行駛時間為 1.17 s。

表 6 優化前後確認實驗之實測數據紀錄

	出氣孔 大小 (因子 A)	噴氣管 長度 (因子 B)	氣球充氣 體積 (因子 C)	車身材質 (因子 D)	實驗時間	平均時間
改善前	中(3*6)	6 cm	中(60 cm)	冰棒棍	2.12 s	2.12 s
					2.13 s	
					2.10 s	
改善後	中(3*6)	5 cm	中(60 cm)	冰棒棍	1.18 s	1.17 s
					1.17 s	
					1.17 s	

經過田口方法優化參數後，氣球衝鋒車的平均行駛時間由 2.12 秒縮短至 1.17 秒，成功提升了 44.57% 的行駛效率（速度近乎翻倍）。在系統穩健度方面，最佳參數組合的 S/N 比達到了 -1.388 dB，相較於改善前的 -6.513 dB，實現了 5.125 dB 的品質增益（S/N Gain）。這證明小車不僅速度變快，且對環境雜音（如操作誤差、地面摩擦）的抗干擾能力大幅提升，展現了極佳的穩健性。

表 7 優化前後品質改善績效量化表

	改善前配置 $A_2B_2C_2D_2$	改善後最佳配置 $A_2B_1C_2D_2$	改善績效
平均行駛時間	2.117 秒	1.173 秒	耗時縮短 44.57%
S/N 比	-6.513 dB	-1.388 dB	穩健度提升 +5.125 dB

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究成功應用田口穩健參數設計與 $L_9(3^4)$ 直交表，針對氣球衝鋒車行駛性能進行實作優化。對照本專題初期所設定之研究目的，各項核心成果總結如下：

1. 成功最佳化行駛速度配置（呼應目的 1）：經由實驗數據與主效應分析，本研究確認影響小車行駛時間之控制因子重要度依序為：出氣孔大小（Rank 1）、車身材質（Rank 2）、噴氣管長度（Rank 3）與氣球充氣體積（Rank 4）。實驗推導出之最佳參數組合為 $A_2B_1C_2D_2$ ，即採用「中孔徑、5 cm 噴氣管、中充氣量、冰棒棍車身」之配置。在確認實驗中，此最佳化配置使小車行駛 2 公尺之平均時間由原本的 2.117 秒大幅縮短至 1.173 秒，行駛效率（速度）顯著提升了 44.57%。
2. 具體提升系統穩健性與降低變異（呼應目的 2）：本研究不僅追求絕對速度，更強調系統抗干擾的能力。透過望小特性之 S/N 比分析發現，若一味縮小出氣孔徑或採用軟質瓦楞紙作為車身，雖可能在單次測試中獲得衝力，卻會導致排氣過快引發車體劇烈晃動，進而使標準差與操作誤差暴增。採用最佳參數組合後，系統的 S/N 比從優化前的 -6.513 dB 躍升至 -1.388 dB，獲得了高達 5.125 dB 的品質增益，這證明小車在重複行駛中具備極佳的重現性與高度穩定性。
3. 驗證品質工程理論實用價值（呼應目的 3）：本實驗成果破除了「氣球吹越大、車身越輕，車子就跑越快」直覺迷思，證實在複雜的流體力學與機械互動中，「極大化並不等於最佳化」。透過系統化的品質工程分析，我們能在有限的試驗次數內，於爆發力與續航力之間找到最佳平衡。這不僅具體驗證了田口方法於產品參數設計上的強大成效，也展現了課堂理論解決實際工程問題的高度實用性。

6.2 建議

本實驗在直交表設計階段，將各控制因子視為獨立變數進行探討。然而，基於流體力學之原理，「出氣孔徑大小」與「噴氣管長度」之間極可能存在非線性的交互作用。建議未來的延伸研究，可規劃進一步的交互作用分析，或引入反應曲面法（Response Surface Methodology, RSM）進行連續製程參數的極值精確定位，以求得更細緻的流體動力邊界條件。

6.3 實作心得

在這次的實作過程中，最深刻的體會是「極大化不等於最佳化」。在實驗開始前，我和姪子小胖一樣，直覺認為氣球吹得越大、車身材質越輕，小車就會跑得越快。然而，數據與反應圖清楚指出，過大的孔徑不僅會破壞節流原理，還容易造成車體劇烈晃動，反而是適中的孔徑搭配剛硬的冰棒棍車身，才能在爆發力與續航力之間取得最佳平衡。

工業工程的理論並不只存在於工廠生產線中，它同樣能解答生活中的各種好奇與問題。與其憑直覺摸索答案，我們透過系統化的穩健設計與直交表分析，便能夠在充滿雜音的真實環境中找出關鍵因子，進而得到最穩定、最有效率的最佳方案。

參考文獻

1. 李輝煌（2011）。*田口方法：品質設計的原理與實務*（第四版）。高立圖書有限公司。
2. 胡文明、郭文田（2018）。利用田口方法探討智慧型鋪面檢測車設備之最佳化。*鋪面工程*，16(2)，47–54。
3. 樂樂 TV（2023 年 1 月 7 日）。【動手玩科學】「氣球衝鋒車」開跑囉！教你用氣球認識「作用力」與「反作用力」的祕密！／小行星樂樂 TV [影片]。YouTube。 <https://www.youtube.com/watch?v=PGOYWysRq0w>
4. Shi, Y., Wang, Y., Liang, H., & Cai, M. (2016). Power characteristics of a new kind of air-powered vehicle. *International Journal of Energy Research*, 40(8), 1112–1121. <https://doi.org/10.1002/er.3507>
5. Minitab, LLC. (2020). *Minitab* (Version 19.2020.1) [電腦軟體]. <https://www.minitab.com>