

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

080109

太乙飛豬的祕密～紙製有翼飛行筒探究

學校名稱：臺中市西屯區上安國民小學

作者：	指導老師：
小六 賴朋禹	蘇子傑
小六 張禕信	郭秀惠
小六 陳宥澄	
小五 柯建廷	
小五 陳桂鈞	

關鍵詞：太乙飛豬、飛行筒、機翼

摘要

本研究來自於 YOUTUBE 網站很熱門的影片～「太乙飛豬」飛行器的好奇，太乙飛豬是一種以摺紙方式製成的紙製有翼飛行筒，以自由落體投放時，能出現滑翔前進、盤旋等狀況。研究以改良的製作方式及自製投放裝置，針對紙製飛行筒的製作方式、機翼有無及造型、筒身配重及造型等因素，進行飛行效果的定量實驗。實驗方式測量飛行筒投放後的飛行時間、距離，並記錄飛行軌跡、落點分布，配合簡易風洞及慢動作錄影，確認各項因素影響飛行效果的結果。研究結果發現「中空環狀、上短下長的有尾造型，及前緣適當配重」的飛行筒是造成穩定飛行的主要因素，可能因白努利定理產生升力，而機翼的構造反而不利穩定飛行，但能製造「迴旋」的飛行效果。

壹、研究動機

去年在 YOUTUBE 網站上，有一種特別的紙摺飛行器非常熱門，構造是以一張方形紙折成特殊造型的圓筒，並加上一片長條狀的機翼，樣子神似動畫電影《哪吒之魔童降世》裡，太乙真人乘坐的飛豬座騎，因此有「太乙飛豬」的稱號（如圖 1-1-1）。

雖然圓筒狀的飛行器已有相當多的研究，但「太乙飛豬」的圓筒有類似尾巴的造型，又加上了機翼，這是在其他筒狀飛行器中少見的形式。除此之外，「太乙飛豬」是由高處做自由落體的投放，卻能有滑翔或是盤旋的飛行效果，這也與一般用投擲或旋轉丟出的方式相異。

我們對這樣簡單的紙摺飛行器卻能產生特別的飛行效果很有興趣，不過因摺紙的製作方式對於研究限制較大，我們試著以方便定量測試的標籤貼紙條取代，並藉由飛行時間、位置與飛行軌跡、落點分布的紀錄，研究改變飛行器的機翼、配重、筒身造型，對飛行器飛行效果的影響，最後則藉由簡易風洞及慢動作錄影的觀察，驗證「太乙飛豬～紙製有翼飛行筒」特殊飛行效果的祕密。



圖 1-1-1 太乙飛豬飛行器
與電影造型比較

貳、研究目的

- 一、探討製作與投放紙製有翼飛行筒的最佳方式
- 二、探討定量測量有翼飛行筒飛行效果的方式
- 三、製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果之影響
- 四、機翼造型對有翼飛行筒飛行效果之影響
- 五、筒身配重對有翼飛行筒飛行效果之影響
- 六、筒身造型對有翼飛行筒飛行效果之影響
- 七、紙製有翼飛行筒於風洞測試及慢動作錄影之研究

參、研究設備及器材

一、紙製有翼飛行筒材料與工具：

- (一) 有翼飛行筒材料：A4 影印紙、18mm 寬雙面膠、24mm 寬雙面膠。
- (二) 投放裝置材料：電線壓條、圓形磁鐵、中國結繩、PP 板、絕緣膠帶。
- (三) 製作工具：鉛筆、尺、美工刀、剪刀、焊槍。

二、風洞裝置：10 吋排風扇、透明桌墊、吸管、PP 板、熱熔膠、絕緣膠帶、棉線。

三、測量設備：碼錶、捲尺、書面膠帶

四、記錄設備：數位相機、平板電腦、描軌跡用投影膠片、實驗記錄表。

			
圖 3-1-1 飛行筒材料	圖 3-1-2 風洞裝置	圖 3-1-3 測量設備	圖 3-1-4 記錄設備

肆、研究過程或方法

研究首先依據 YOUTUBE 影片中介紹的紙摺有翼飛行筒作為參考，改良為方便製作、調整型態的製作方式，及適合的投放裝置，研究取代摺紙的製作方式與進行定量測量飛行效果的方法。其次分別針對紙製有翼飛行筒的機翼有無、機翼造型、筒身配重、筒身造型的改變，配合數據量測與飛行軌跡的繪製，探討紙製有翼飛行筒造型與飛行效果之關係。最後利用自製的簡易風洞設備及慢動作錄影紀錄，驗證空氣流動對於紙製有翼飛行筒飛行效果的影響。

一、初探實驗～紙製有翼飛行筒製作與投放方式改良

(一) 初探網站紙製有翼飛行筒的實驗：

1. 紙摺有翼飛行筒：

經過查詢網路上許多相關紙製有翼飛行筒或太乙飛豬飛行器影片，研究決定先依據 YOUTUBE 影片《BIRD SHAPED PAPER AIRPLANE GOES VIRAL IN CHINA!》所介紹的紙摺有翼飛行筒製作方式，進行初探實驗：(表 4-1-1)

表 4-1-1 紙摺有翼飛行筒步驟

			
步驟 1. 將 A4 影印紙裁切成正方形	步驟 2. 將正方形紙對摺	步驟 3. 將其中半面的三角形再對摺	步驟 4. 重複步驟 3，共摺三次成 1/8 寬

			
步驟 5.將對摺後的紙帶摺入另一邊三角形底部	步驟 6.將三角形捲成筒狀，兩底角黏合	步驟 7.裁切適當大小的長方形紙作為機翼	步驟 8.將機翼黏貼於三角形底角連接處

2. 投放紙摺有翼飛行筒實驗：

由研究者用手握住飛行筒的尾端，以自由落體之方式由高處投放（圖 4-1-1），測試地點與結果如下表 4-1-2：



表 4-1-2 投放紙摺有翼飛行筒地點與結果

	A.	B.	C.	D.	E.
投放地點	走廊上 高舉手	走廊上 架設鋁梯	二樓教室 走廊	四樓教室 走廊	活動中心 二樓通道
高度	150cm	220cm	550cm	1350cm	480cm
實驗結果	有小幅度的向前滑翔，或迴旋半圈降下，但落地時間太快，無法觀察完整飛行狀況。		有明顯的滑翔或是迴旋狀況，尤其在四樓投放更明顯，過程中飛行筒會有出現幾次前緣浮起的「抬頭」現象。但高樓投放受風的影響很大。		能觀察明顯的滑翔或旋轉降下的效果，關閉門窗避免風的影響。

圖 4-1-1 手握投放實驗

3. 初探實驗問題分析：

- (1) 紙摺方式製作有翼飛行筒雖然簡便，但不易調整機身樣式、紙帶配重與位置，不利於後續實驗。
- (2) 前方紙帶摺疊多層，造成飛行筒不容易形成完美的圓筒狀，形成許多稜角，容易使製作出的有翼飛行筒存在造型上的差異。（圖 4-1-2）
- (3) 依據投放結果發現，投放高度不足，有翼飛行筒飛行的效果不明顯，建議投放高度需在一層樓（3m）以上高度。
- (4) 因有翼飛行筒採用紙製，重量很輕，於室外進行實驗，容易受到風的影響，實驗需於無風的大型室內場地（如活動中心）進行。
- (5) 採用手持投放，每位研究者的投放動作不一致，應有統一的投放工具。
- (6) 初探實驗發現，有翼飛行筒投放時常形成盤旋向下的飛行狀況，若投放位置有柵欄或牆面，容易投放後就發生碰撞，使實驗失敗。（圖 4-1-3）



圖 4-1-2 紙摺有翼飛行筒造型差異



圖 4-1-3 投放後碰撞柵欄或牆面

(二) 紙製有翼飛行筒製作方式改良：

1. 「紙帶摺疊」改為「標籤貼紙條黏貼」：

針對摺紙方式製作紙製有翼飛行筒的問題，我們試著在不變動原有造型、尺寸與重量的前提下，使用與原機身相同大小的等腰直角三角形 A4 紙捲成筒狀，而原本紙摺多層的紙帶，則以文具店購得的一種 A4 全張標籤貼紙取代。

改良方式 (1)：將標籤貼紙裁成與原本紙帶相同的結構，從短到長的梯形紙條，一層層黏上，因為標籤貼紙和原本 A4 影印紙材質不同，經過測量，7 層的梯形標籤貼紙條，與原本 8 層的 A4 紙帶重量相似，故僅黏貼 7 層標籤貼紙條。(圖 4-1-4、4-1-5)

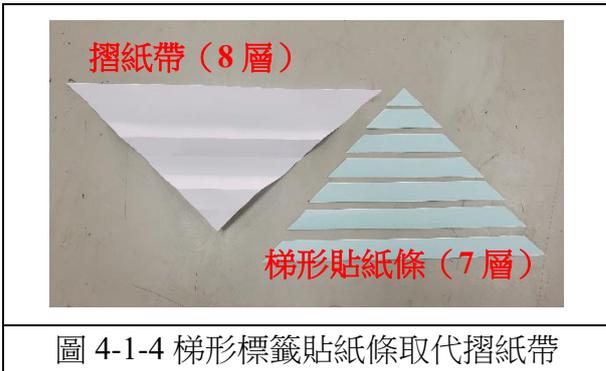


圖 4-1-4 梯形標籤貼紙條取代摺紙帶

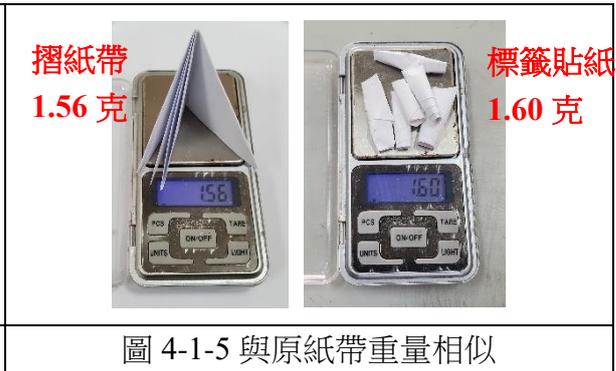


圖 4-1-5 與原紙帶重量相似

改良方式 (2)：由於梯形紙條的製作與黏貼仍較為麻煩，且不易等量增減重量，因此我們再試著將標籤貼紙條改為單純的長方形紙條，長度取 A4 紙短邊 (21cm)、寬度取前述紙帶寬度 (1.9cm)，經過測量，4 層長方形紙條的重量與原本的紙帶相似。(圖 4-1-6、4-1-7)

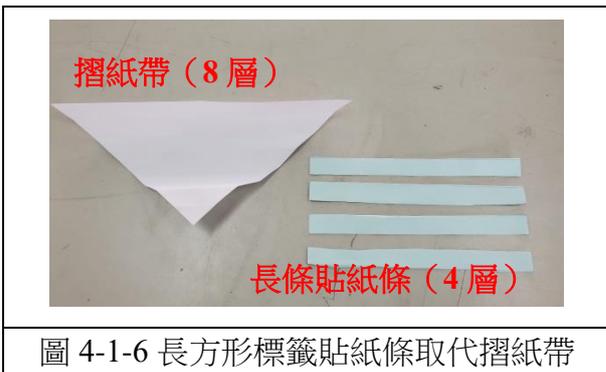


圖 4-1-6 長方形標籤貼紙條取代摺紙帶

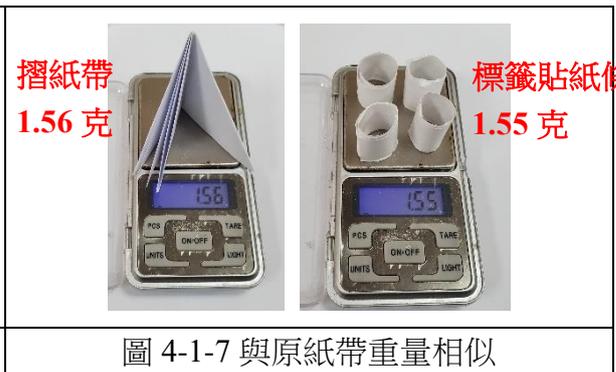
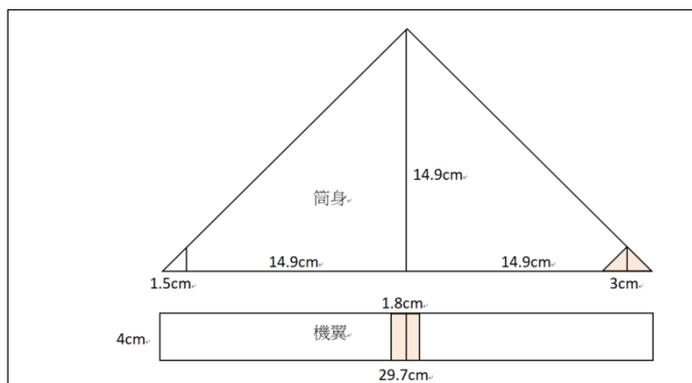


圖 4-1-7 與原紙帶重量相似

2. 確認黏貼尺寸：

因為紙製飛行筒非常輕，僅增減一些雙面膠或黏貼位置偏離，就可能影響配重。為了讓製作出的有翼飛行筒能有一致性的規格，我們詳細規劃了黏貼的尺寸，說明如下圖 4-1-8。

圖 4-1-8
紙製有翼飛行筒設計圖



藉由上方的設計圖，我們能固定每個飛行筒的黏貼面積及位置（上圖淺橘色區域），也能透過中央線，準確黏貼機翼、標籤貼紙帶的位置。

（三）投放裝置設計：

1. 第一代投放裝置：

- （1）裝置說明：利用試管夾、竹筷，用書面膠帶捆緊組合，以試管夾取代手握減少手投放的差異，前方的圓塑膠片增加與飛行筒的接觸面積，避免紙筒垂下。（圖 4-1-9）
- （2）投放方式：於活動中心二樓通道的欄杆上投放，投放裝置放置點以膠帶標示位置，聽從口令按開試管夾，讓飛行筒自由落下。（圖 4-1-10）



圖 4-1-9 第一代投放裝置



圖 4-1-10 第一代投放裝置投放方式

（3）使用問題：

- ① 試管夾張開幅度不足，飛行筒尾端容易在落下時碰撞試管夾下緣。
- ② 投放位置距離欄杆太近，飛行筒仍容易在盤旋時撞到欄杆。

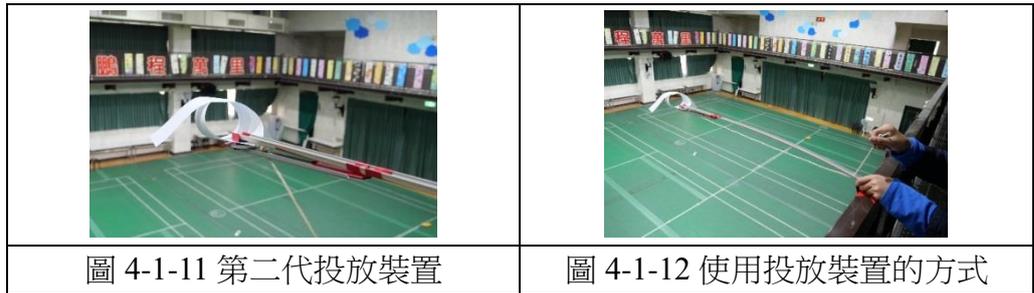
2. 第二代投放裝置：

（1）裝置說明：（圖 4-1-11）

- ① 利用長短各一的電線壓條以絕緣膠帶黏合，較短的一段可自由垂下。
- ② 前方貼上塑膠圓片，上下各貼上一個圓形磁鐵，使壓條可夾住飛行筒。
- ③ 用焊槍在壓條上穿孔。
- ④ 利用中國結繩穿過前後的孔洞，並打結。

（2）投放方式：於活動中心二樓維修通道的欄杆上投放，投放裝置的放置點用

膠帶標示位置，一手扶住投放裝置，另一手拉起後方繩頭，使壓條大幅度開啟，讓飛行筒自由落下。(圖 4-1-12)



(3) 改良成效：

- ①壓條可成 90 度打開，不會影響飛行筒落下。
- ②投放位置伸出欄杆達 1 公尺，增加飛行筒落下時的迴轉半徑，經過測試可避免碰撞欄杆之狀況。

二、定量測量有翼飛行筒飛行效果之設計

(一) 定量測量方式：

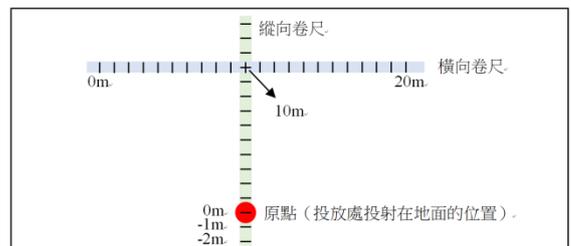
1. 飛行時間之測量：

由負責計時的研究者持碼錶於活動中心一樓觀察，與投放飛行筒的研究者同步口令，同時按下碼錶與投放飛行筒，計時者於飛行筒落地時停止碼錶計時，測量飛行筒從同樣高度 (4.8m) 自由落至地面的時間，研究飛行筒的滯空能力。

2. 飛行距離之測量：

經過初探實驗發現，有翼飛行筒自由投放的飛行效果，與一般手擲機或手擲飛行筒不同，並非以直線或單向拋物線的方式向前飛出，而是可能朝向四面八方，甚至以盤旋、迴轉的方式飛行，但由於在空中的實際飛行長度難以量測，所以先以單純的直線距離進行飛行效果的評估。我們以投放點投射在地面上的位置作為「原點」，以測量平面上縱向和橫向兩種落地位置，一方面可利用畢氏定理計算距原點的直線距離，另一方面也可以統計出落點分析。設置方式如下圖 4-2-1：

圖 4-2-1 飛行距離測量設置方式



若落地縱向位置為 x 公尺處、橫向為 y 公尺處，則飛行筒離原點直線距離為：

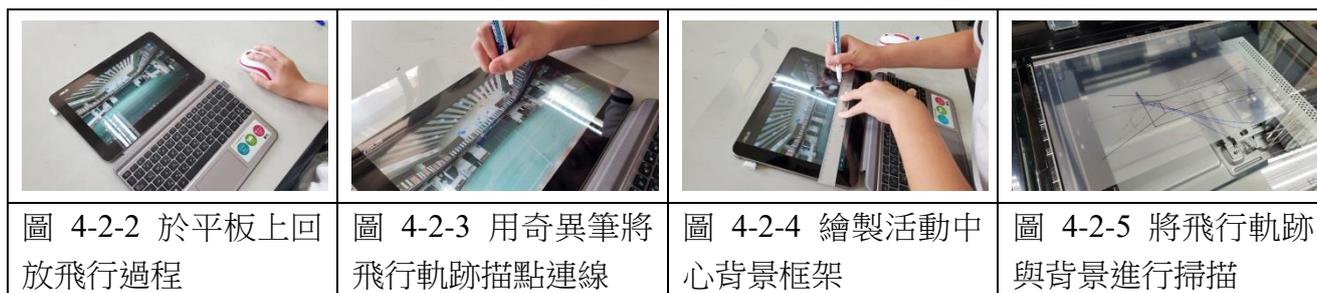
$$\sqrt{|x|^2 + |y - 10|^2} \text{ 公尺。}$$

3. 飛行軌跡之測量：

由於在初探實驗中發現有翼飛行筒會呈現盤旋、迴旋等特殊的飛行方式，因

為前述距原點的飛行距離測量及落點位置，都無法完全表現飛行筒的飛行狀況，我們決定要記錄下飛行軌跡，方式如下：

- (1) 錄影：從活動中心舞台，以數位相機固定位置錄影飛行筒飛行過程。
- (2) 回放：在平板電腦上定格回放飛行軌跡。(圖 4-2-2)
- (3) 描圖：將透明投影片平鋪在平板電腦螢幕上，以奇異筆描繪飛行經過的點，再將其連成飛行軌跡。(圖 4-2-3)
- (4) 背景：另取投影片繪製螢幕中活動中心的立體背景供對照。(圖 4-2-4)
- (5) 記錄：將同項目的飛行筒飛行軌跡投影片，疊於背景圖上，以影印機掃描成單一圖檔，即可觀察飛行軌跡的差異與變化。(圖 4-2-5)



(二) 減少誤差之實驗設計方式：

經過初探實驗發現，即使在無風的活動中心，同樣規格的紙製有翼飛行筒，飛行狀況仍有不小的差異，推論是因為紙製飛行筒重量太輕，許多實驗的因素會干擾結果（剪裁的精細度、黏貼的位置誤差、紙筒的造型維持、機翼狀況等），為了減少實驗誤差，我們決定採用以下兩個方式：

1. 增加每個實驗項目飛行筒的數量：

針對**每個實驗項目，我們均製作 3 個相同的飛行筒**，除了以測量的平均值減少單一飛行筒可能產生的誤差，也可以比較同一項目的飛行筒是否有一致性的飛行效果。

2. 增加每個飛行筒的實驗次數：

針對**每個飛行筒，均實施 3 次的實驗**，若遇投放或記錄失誤、碰撞牆壁，則會重做，除了以測量的平均值減少單一次實驗可能產生的誤差，也可以比較同一個飛行筒是否有一致性的飛行效果。

(三) 測量結果之統計方式：

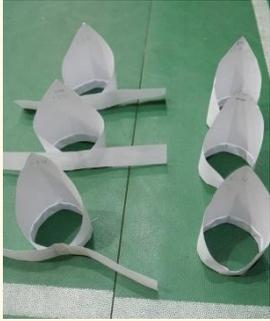
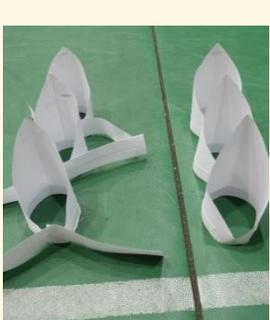
1. **平均值**：每個實驗項目三個飛行筒各三次實驗（共 9 次）所測得的飛行時間與飛行距離，計算平均值。
2. **變異係數**：由於每個實驗項目測得數據的平均值不同，將每個項目測得的飛行時間與飛行距離標準差除以平均值，得到變異係數的百分比數據，了解每個實驗項目的飛行效果是否穩定。
3. **落點分析**：利用每次實驗所測得的縱向及橫向位置，畫出平面上的落點分析，了解落點分布狀況。

三、製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果影響之實驗設計

在確認實驗的定量測量方式後，我們首先針對製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果影響進行實驗設計。關於製作方式的影響，我們以 YOUTUBE 影片中的摺紙方式，與改良的兩種標籤貼紙條的方式進行比較，確認是否能以改良的方式取代不易改變實驗因素的紙摺飛行筒；此外在一開始的研究動機中，我們就對於有翼的飛行筒與一般常見的無翼飛行筒的差異感到好奇，因此針對三種不同製作方式的飛行筒，各分別設計有翼及無翼兩種形式，進行比較。

(一) 實驗組別：實驗組別以 **A、B、C** 分別作為摺紙帶、梯形貼紙條、長條貼紙條等三種製作方式的代號；另外以 **x** 代表無機翼、**o** 代表有機翼構造。每組各製作三個飛行筒，如表 4-3-1：

表 4-3-1 製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	製作方式	機翼	飛行筒照片	
A-x-1	3.21	摺紙帶 8 層	無		
A-x-2	3.19				
A-x-3	3.22				
A-o-1	4.14		有		
A-o-2	4.13				
A-o-3	4.14				
B-x-1	3.23	梯形貼紙條 7 層	無		
B-x-2	3.26				
B-x-3	3.27				
B-o-1	4.16		有		
B-o-2	4.10				
B-o-3	4.08				
C-x-1	3.06	長條貼紙條 4 層	無		
C-x-2	3.10				
C-x-3	3.08				
C-o-1	4.03		有機翼		
C-o-2	4.07				
C-o-3	4.05				

(二) 實驗控制：

- 1.造型：六組飛行筒均為開口圓周長 26.8cm、筒身長（含尾部）14.9cm。
- 2.重量：無翼飛行筒重量為 $3.15 \pm 0.15\text{g}$ 、有翼飛行筒重量為 $4.1 \pm 0.1\text{g}$ 。
- 3.機翼：三組有翼飛行筒機翼均為長 29.7cm、寬 4cm，黏接部分 1.8cm 寬。
- 4.投放：六組飛行筒投放高度均為 4.8m，採無施力的自由落體方式投放。

(三) 實驗步驟：

- 1.投放者持第二代投放裝置及飛行筒，於活動中心 2 樓通道同一位置就位。
- 2.錄影者固定位置，開始進行錄影。
- 3.投放者與計時者同步口令（1、2、放）後，同時拉動投放拉繩與按下碼錶計時。
- 4.確認飛行筒於飛行過程中未碰觸物體，並落於地面。
- 5.兩位測量者分別以地面卷尺確認飛行筒落點的縱向及橫向位置。
- 6.計時者與測量者回報數據給記錄者，錄影結束，完成一次實驗記錄。
- 7.每組飛行筒重複三次實驗，彙整實驗記錄並描繪飛行軌跡。

四、機翼造型對有翼飛行筒飛行效果影響之實驗設計

在確認改良方式可作為實驗取代，並了解機翼有無對飛行效果之影響後，研究在維持長條狀 A4 紙的機翼設計下，嘗試以不同的機翼造型～包含機翼的寬窄、長短，設計不同的有翼飛行筒，進一步研究機翼對飛行效果的影響。

- (一) 實驗組別：實驗組別以 **D、E、F、G** 分別作為**寬機翼、窄機翼、長機翼、短機翼**等四種機翼造型的代號；另外以 **C-o** 作為**對照組**，每組各製作三個飛行筒，如表 4-4-1：

表 4-4-1 機翼造型對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	機翼造型	飛行筒照片	
C-o-1	4.03	正常翼 長 29.7cm 寬 4cm		
C-o-2	4.07			
C-o-3	4.05			
D-1	4.98	寬翼 長 29.7cm 寬 8cm		
D-2	4.98			
D-3	4.95			
E-1	3.62	窄翼 長 29.7cm 寬 2cm		
E-2	3.58			
E-3	3.62			
F-1	4.35	長翼 長 39.6cm 寬 4cm		
F-2	4.40			
F-3	4.34			

組別	重量 (g)	機翼造型	飛行筒照片	
G-1	3.76	短翼 長 19.8cm 寬 4cm		
G-2	3.86			
G-3	3.83			

(二) 實驗控制：

- 1.造型：五組飛行筒均為開口圓周長 26.8cm、筒身長（含尾部）14.9cm。
- 2.重量：因機翼造型不同，無法控制總重量，但筒身重量均為 $3.10 \pm 0.1g$ 。
- 3.機翼：黏接筒身部分均為機翼中央 1.8cm 寬處。
- 4.投放：五組飛行筒投放高度均為 4.8m，採無施力的自由落體方式投放。

(三) 實驗步驟：同前項實驗設計之步驟。

五、筒身配重對有翼飛行筒飛行效果影響之實驗設計

多數的飛行筒裝置，於筒身前緣都會增加配重，本研究以 4 層長條貼紙條模擬原本 8 層摺紙帶約 1.55g 的重量，大約為筒身重量的 40%。本項實驗設計透過改變貼紙條的數量，研究改變飛行筒配重時，對有翼飛行筒飛行效果之影響。

(一) 實驗組別：實驗組別以 **H、I、J、K** 分別作為**無貼紙條、2 層貼紙條、6 層貼紙條、8 層貼紙條**等四種機翼造型的代號；另外以 **C-o (4 層貼紙條)** 作為**對照組**，每組各製作三個飛行筒，如表 4-5-1：

表 4-5-1 筒身配重對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	貼紙條層數/配重	飛行筒照片	
H-1	2.55	無 0g 配重佔 0%		
H-2	2.53			
H-3	2.54			
I-1	3.35	2 層 $0.8 \pm 0.05g$ 配重佔 23.9%		
I-2	3.33			
I-3	3.35			
C-o-1	4.03	4 層 $1.55 \pm 0.05g$ 配重佔 38.3%		
C-o-2	4.07			
C-o-3	4.05			
J-1	4.9	6 層 $2.4 \pm 0.05g$ 配重佔 48.8%		
J-2	4.94			
J-3	4.92			

組別	重量 (g)	貼紙條層數/配重	飛行筒照片	
K-1	5.61	8 層 3.1±0.05g 配重佔 55.3%		
K-2	5.62			
K-3	5.59			

(二) 實驗控制：

- 1.造型：五組飛行筒均為開口圓周長 26.8cm、筒身長（含尾部）14.9cm。
- 2.重量：因配重不同，無法控制總重量，但無黏貼條筒身重量均為 $2.5\pm 0.1g$ 。
- 3.機翼：五組機翼均為長 29.7cm、寬 4cm，黏接部分 1.8cm 寬。
- 4.投放：五組飛行筒投放高度均為 4.8m，採無施力的自由落體方式投放。

(三) 實驗步驟：同前項實驗設計之步驟。

六、筒身造型對有翼飛行筒飛行效果影響之實驗設計

經過前述幾項實驗之結果，我們能對有翼飛行筒的機翼、配重之影響，有初步的了解，在本項實驗中，我們進一步針對幾項特殊的筒身造型改變進行研究：

1.尾部造型：本研究中的飛行筒另一項特殊造型是上短下長的尾部造型，可能也是造成特殊飛行模式的原因，我們試著做下列三種尾部造型的調整：

- (1) 無尾造型：將飛行筒改成上下等長的標準圓筒狀造型，不具尾部構造。
- (2) 長尾造型：將無尾造型的圓筒縮短，多出來的面積作為較長的尾部構造。
- (3) 顛倒造型：將飛行筒上下顛倒，貼紙條配重仍貼在下方，使尾部改至上側。

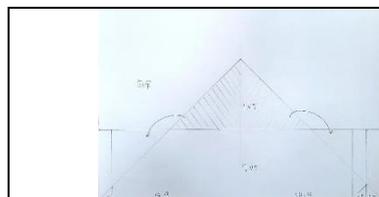


圖 4-6-1 無尾飛行筒設計圖

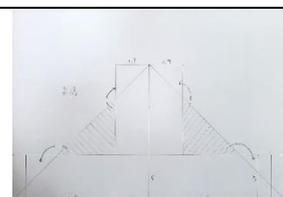


圖 4-6-2 長尾飛行筒設計圖

2.固定機翼：本研究製作的飛行筒，因機翼僅是一張長條狀影印紙，飛行時機翼會出現立起、抖動、平展等不同的狀況，我們推測可能是因此造成盤旋的原因，因此本項實驗試著將機翼改以長 14.9cm、寬 8cm 的紙縱向對摺，在不改變總面積大小的方式下，將機翼變成一個立起的固定造型。（圖 4-6-3）



圖 4-6-3 固定式機翼樣式

3.筒身封口：飛行筒的特色是氣流可以從筒中的空間流過，我們試著將筒身的開口，用直徑 8.5cm 的圓形紙封口，實驗對飛行效果的影響。

(一) 實驗組別：實驗組別以 **L**、**M**、**N**、**O**、**P** 分別作為**無尾造型**、**長尾造型**、**顛倒造型**、**固定機翼**、**筒身封口**等五種機翼造型的代號；另外以 **C-o** 作為對

照組，每組各製作三個飛行筒，如表 4-6-1：

表 4-6-1 筒身造型對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	筒身造型	飛行筒照片	
C-o-1	4.03	正常造型		
C-o-2	4.07			
C-o-3	4.05			
L-1	4.16	無尾造型		
L-2	4.1			
L-3	4.14			
M-1	4.2	長尾造型		
M-2	4.27			
M-3	4.24			
N-1	4.2	顛倒造型		
N-2	4.2			
N-3	4.19			
O-1	4.17	固定機翼		
O-2	4.2			
O-3	4.2			
P-1	4.75	筒身封口		
P-2	4.76			
P-3	4.78			

(二) 實驗控制：

- 1.造型：六組飛行筒筒口圓周長均為 26.8cm。
- 2.重量：除封口增加圓形紙片之重量外，其餘飛行筒重量均為 $4.15 \pm 0.15g$ 。
- 3.機翼：除固定機翼造型外，其餘機翼為長 29.7cm、寬 4cm，黏接部分 1.8cm 寬。
- 4.投放：六組飛行筒投放高度均為 4.8m，採無施力的自由落體方式投放。

(三) 實驗步驟：同前項實驗設計之步驟。

七、紙製有翼飛行筒於風洞測試及慢動作錄影之實驗設計

經前述實驗結果，我們對於影響飛行效果的因素進行歸納，但因為飛行過程中無法近距離觀察飛行筒投放後的飛行狀況，因此我們設計一款簡易風洞裝置，針對歸納出的因素以風洞裝置作驗證；除此之外，利用慢動作錄影觀察飛行筒自由投放後的飛行樣態，以了解太乙飛豬造型飛行筒能於自由投放後飛行的原因。實驗設計如下：

(一) 風洞裝置設計：經搜尋風洞相關研究，一般自製簡易風洞會有下列四個部分：

【出風段】-產生風的裝置

【收縮段】-縮小風洞直徑將風加速

【整流段】-利用直線導管將風整流成均勻直線前進

【實驗段】-可進行實驗測試的部份

由於本研究飛行筒採自由落體的投放方式，飛行過程並未承受很強的風，因此我們捨棄「收縮段」設計。研究利用透明桌墊捲成圓柱作為風洞管，下方以 10 吋排風扇作為「出風段」裝置，中央以 PP 板做方盒銜接，並以熱熔膠黏貼約 1000 支吸管於風洞管中作為「整流段」，風洞管上方則為「實驗段」。如圖 4-7-1 及 4-7-2：

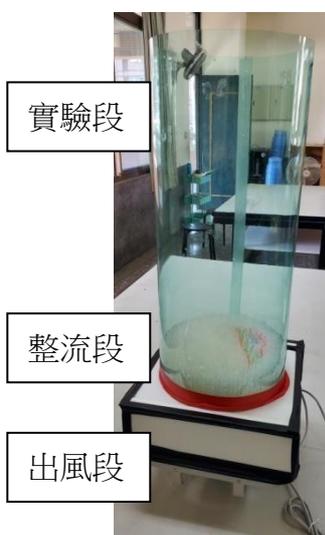


圖 4-7-2 排風扇（出風段）及吸管（整流段）裝置

圖 4-7-1 自製風洞裝置

(二) 風洞裝置實驗方式：

1. 實驗組別：經過前面四項實驗，歸納對於飛行效果影響較大的類型，另選擇對照組 C-o 型作為有翼比較，共選擇下列七組飛行筒作風洞測試：

組別	A-x 組	C-x 組	H 組	L 組	N 組	P 組	C-o 組
飛行筒樣式	手摺無翼	長條貼紙 無翼	無貼紙條 配重	無尾造型	顛倒造型	筒身封口	長條貼紙 有翼

2. 實驗步驟：

- (1) 在每個飛行筒尾端中心 2cm 處黏貼上棉線。
- (2) 依序將每個飛行筒上的棉線，另一端固定於風洞實驗段管壁上。
- (3) 以手持將飛行筒斜下 45 度擺放，模擬飛行筒投放後重心斜向下的狀況。
- (4) 開啟排風扇，放開手持，觀察飛行筒受風流動影響，直到飛行筒不再移動或維持動作為止。
- (5) 以相機錄影風洞測試過程，並各擷取三張過程照片進行說明。

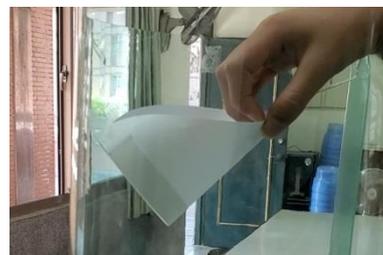


圖 4-7-3 實驗操作方式

(三) 慢動作錄影實驗設計：

1. 實驗組別：以對照組 C-o 型及無翼的 C-x 型，觀察標準的太乙飛豬造型飛行筒，於投放後的飛行狀態。

2. 實驗步驟：(如圖 4-7-4)

- (1) 設定可近距離錄影的投放高度：2m。
- (2) 手機設定為慢動作錄影模式，每秒 240 格畫面，速度變慢 8 倍。
- (3) 同時以相同的兩部手機，於飛行筒的側面及正面錄影。
- (4) 錄影開始後，以投放裝置投放飛行筒，錄影投放至降落地面之畫面。
- (5) 錄影結果於電腦上回放，並以回放每秒（實際時間 1/8 秒）截圖一張照片。
- (6) 將截圖照片裁切出飛行筒區段，並拼接為飛行過程，觀察飛行筒投放後的飛行樣態。

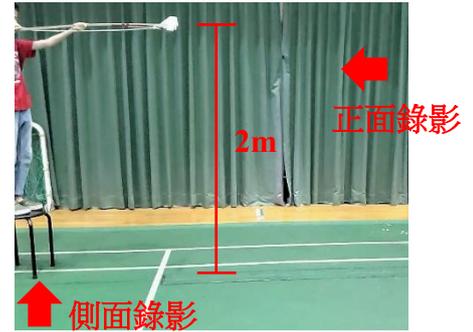


圖 4-7-4 慢動作錄影實驗

伍、研究結果與討論

依據各項實驗設計，分別提出研究結果與討論。首先針對初探實驗的研究結果，提出紙製有翼飛行筒的改良及投放裝置的製作，並討論進行定量測量的方式。其次分別說明飛行筒製作方式、機翼構造與造型、筒身配重與造型對飛行效果的研究結果，並討論各項變因對飛行筒飛行效果的影響。最後利用自製的簡易風洞，測試飛行筒在空氣流動時的運動狀態，並透過慢動作錄影，驗證有翼飛行筒自由落下卻能滑翔或盤旋的主要因素。

一、初探實驗的研究結果與討論

(一) 紙製有翼飛行筒製作方式改良結果與討論：

本研究考慮後續實驗需改變飛行筒型態，避免紙摺飛行筒不易改變製作方式或變因，在同樣使用 A4 影印紙及維持相同大小的條件下，改以長 21cm、寬 1.9cm 的標籤貼紙條 4 層取代摺疊的 8 層紙帶（重量相仿），黏貼位置偏飛行筒下方，與原摺疊法配重偏下方相同。貼紙條具有方便增減、調整位置等優點，且不像摺紙方式造成圓筒有稜角，讓每個飛行筒的造型更趨一致。

另外，研究也固定飛行筒開口直徑、圓筒長度，及機翼尺寸。完成的改良版紙製有翼飛行筒構造與規格如圖 5-1-1：



圖 5-1-1 紙製有翼飛行筒



- 飛行筒開口圓周 26.8cm
- 飛行筒開口直徑約 8.5cm
- 飛行筒底部長度 14.9cm
- 貼紙條長 21cm、寬 1.9cm*4
- 機翼長 29.7cm、寬 4cm
- 黏接處寬 1.8cm

(二) 自製投放裝置結果與討論：

本研究為減少手握飛行筒投放之動作誤差，並且讓投放位置盡量遠離欄杆，避免投放後碰撞欄杆使實驗失敗，製作長形投放裝置。利用 1m 長的電線壓條，以磁鐵固定前方可鬆放的壓條夾合處，再利用中國結繩於末端拉動投放。利用此一裝置，投放時壓條開啟角度達 90 度以上，裝置不會干擾到飛行筒，伸出足夠的距離也不易使飛行筒一投放就碰觸欄杆。自製投放裝置與構造介紹如圖 5-1-2：



圖 5-1-2 自製投放裝置

二、製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果影響的研究結果與討論

(一) 研究結果：以原手摺 8 層紙帶的飛行筒 (A 組)，改良為 7 層梯形貼紙條 (B 組) 及 4 層長條貼紙條 (C 組)，並分別設計無翼 (x)、有翼 (o) 兩種形式，研究製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果之影響，研究結果如表 5-2-1。

表 5-2-1 「不同製作方式與機翼構造飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次				第二次				第三次			
	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)
A-x-1	4.40	5.76	1.5	10.27	3.88	6.50	2.10	10.23	4.09	7.10	2.29	10.48
A-x-2	3.86	-1.50	1.31	8.82	3.79	-2.00	4.51	5.84	4.40	9.42	6.48	10.06
A-x-3	4.00	0.00	18.42	8.42	3.09	6.30	12.70	6.85	3.56	5.00	3.80	7.96
A-o-1	3.04	5.78	9.78	5.78	2.43	0.20	7.90	2.11	3.31	2.45	6.40	4.35
A-o-2	3.71	0.74	8.84	1.38	3.46	-1.40	4.10	6.06	4.61	-1.80	15.47	5.76
A-o-3	4.48	5.86	12.43	6.34	3.69	-1.40	11.00	1.72	3.92	-2.00	11.45	2.47
B-x-1	3.72	6.16	15.22	8.07	3.31	8.50	11.43	8.62	3.65	-1.00	1.00	9.06
B-x-2	3.96	4.80	2.82	8.64	4.10	-2.00	4.30	6.04	3.71	6.19	16.36	8.88
B-x-3	4.20	8.56	11.79	8.75	4.21	6.00	8.10	6.29	3.90	6.48	13.40	7.32
B-o-1	2.49	0.80	9.7	0.85	3.71	-1.00	6.00	4.12	2.83	-2.00	14.06	4.53
B-o-2	2.53	0.20	8.8	1.22	3.25	1.40	8.80	1.84	3.82	0.53	10.08	0.54
B-o-3	3.6	0.26	10.1	0.28	3.36	0.60	10.90	1.08	3.19	0.90	10.54	1.05
C-x-1	3.48	6.73	15.32	8.58	3.31	-2.00	16.20	6.51	3.61	0.00	1.35	8.65

C-x-2	3.49	8.86	11.38	8.97	3.65	3.60	18.40	9.14	3.91	-1.00	17.92	7.98
C-x-3	4.12	-1.10	16.95	7.04	3.53	-1.70	16.50	6.72	3.57	4.55	13.00	5.45
C-o-1	3.04	0.45	11.1	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.6	3.09	3.88	4.73	13.2	5.71

(二) 結果分析與討論：依據研究結果，彙整成各組飛行時間及飛行距離的「平均值」及「變異係數」統計表，進行比較與穩定性分析，如表 5-2-2。

表 5-2-2 「不同製作方式與機翼構造飛行筒」飛行效果平均值與變異係數統計表

組別	製作方式	機翼構造	飛行時間		飛行距離	
			平均值	變異係數	平均值	變異係數
A-x	摺紙帶 8 層	無機翼	3.90	10%	8.77	19%
A-o		有機翼	3.63	19%	4.00	52%
B-x	梯形貼紙條 7 層	無機翼	3.86	8%	7.96	14%
B-o		有機翼	3.20	15%	1.72	89%
C-x	長條貼紙條 4 層	無機翼	3.63	7%	7.67	17%
C-o		有機翼	3.01	12%	2.04	74%

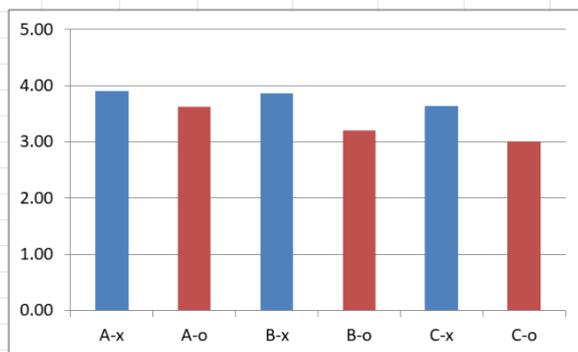


圖 5-2-1 不同製作方式與機翼構造飛行筒平均飛行時間比較圖

1. 飛行時間討論：

- (1) 由統計表可發現不同製作方式與機翼構造對飛行時間影響較小，平均都在 3-4 秒內。進一步將飛行時間平均值畫為長條圖做比較（圖 5-2-1），則可發現：**有翼飛行筒 (o) 的飛行時間平均較無翼飛行筒 (x) 略短**；另外改良的貼紙條飛行筒 (B、C)，飛行時間也略短於手摺紙帶 (A)。
- (2) 由統計表發現各項變異係數都在 20% 內，代表飛行的時間較穩定，尤其**無翼飛行筒的變異係數都在 10% 以內**，較有翼飛行筒穩定。

2.飛行距離討論：

- (1) 由統計表可發現機翼構造對於距出發點直線距離有很大的影響，進一步將飛行距離平均值畫為長條圖做比較（圖 5-2-2），無翼飛行筒的平均飛行距離在 7m 以上，有翼飛行筒則在 4m 以下，無翼飛行筒（o）平均飛行距離明顯較長；另外改良的貼紙條飛行筒（B、C），平均飛行距離略短於手摺紙帶（A）。
- (2) 由統計表發現無翼飛行筒的變異係數皆在 20% 以下，有翼飛行筒的變異係數較大，皆在 50% 以上，尤其是貼紙條的有翼飛行筒變異係數明顯較大，兩種製作皆可達 70-80%。

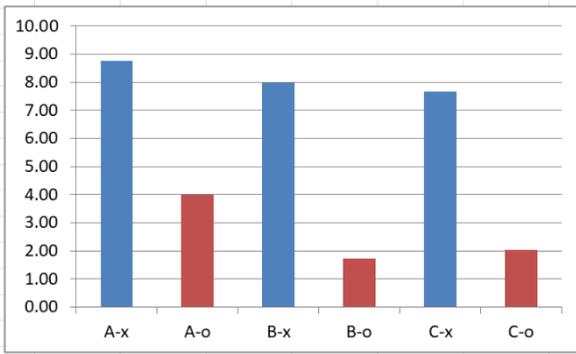


圖 5-2-2 不同製作方式與機翼構造飛行筒平均飛行距離比較圖

(三) 飛行軌跡與落點分析討論：

研究利用錄影方式記錄飛行軌跡，並以飛行筒落地的縱向、橫向位置，進行落點分析，以了解更詳細的飛行過程與狀況，如表 5-2-3。

表 5-2-3 「不同製作方式與機翼構造飛行筒」飛行軌跡與落點分析表

<p>A-x 手摺紙帶無翼飛行筒</p>	<p>A-o 手摺紙帶有翼飛行筒</p>
<p>B-x 梯形貼紙條無翼飛行筒</p>	<p>B-o 梯形貼紙條有翼飛行筒</p>
<p>C-x 長條貼紙條無翼飛行筒</p>	<p>C-o 長條貼紙條有翼飛行筒</p>

1.飛行軌跡：

- (1) 此項實驗六組飛行筒，投放後都會在垂直下降一段距離後，出現偏於水平飛行的軌跡。實際觀察飛行過程中，都有出現數次筒身前緣「抬頭」向上，再往下降的飛行趨勢。
- (2) 無翼飛行筒飛行軌跡較少彎折；有翼飛行筒的飛行軌跡有明顯「迴旋」狀況。
- (3) 手摺紙帶的飛行筒，飛行軌跡差異較大；使用貼紙條的飛行筒，飛行軌跡較為一致。

2.落點分析：

- (1) 無翼飛行筒的落點分布較廣；有翼飛行筒的落點則較為集中在原點附近。
- (2) 有翼飛行筒中，使用貼紙條的飛行筒落點幾乎在原點 3m 範圍內，明顯較手摺紙帶的飛行筒落點更集中。

(四) 綜合歸納：

- 1.改良的製作方式稍減少飛行時間與距離，但影響不大，可取代手摺紙帶的方式。
- 2.增加機翼裝置並未提昇飛行時間與飛行距離，反而有所減少，且變異性增加。
- 3.增加機翼裝置會增加「迴旋」的飛行效果，落點較為集中。
- 4.本項實驗六種飛行筒都出現筒身前緣「抬頭」造成水平飛行的效果，顯示影響主因應在於筒身結構，而非原本預測的機翼影響。

三、機翼造型對飛行筒飛行效果影響的研究結果與討論

- (一) 研究結果：以寬翼 (D 組)、窄翼 (E 組)、長翼 (F 組)、短翼 (G 組) 四種形式，並以正常翼 (C-o 組) 作為對照，研究機翼造型對飛行筒飛行效果之影響，研究結果如表 5-3-1。

表 5-3-1 「不同機翼造型飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次				第二次				第三次			
	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)
C-o-1	3.04	0.45	11.10	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.60	3.09	3.88	4.73	13.2	5.71
D-1	3.35	-0.82	10.10	0.83	3.20	0.35	9.86	0.38	3.68	0.00	10.10	0.10
D-2	3.46	-1.99	10.25	2.01	3.70	1.28	10.63	1.43	4.06	0.45	10.10	0.46
D-3	3.15	2.54	11.63	3.02	2.96	3.15	10.20	3.16	3.40	1.46	9.80	1.47
E-1	3.89	-2.00	15.35	5.71	3.69	6.17	14.10	7.41	3.81	7.42	10.5	7.44
E-2	3.70	0.83	9.30	1.09	4.20	1.18	9.90	1.18	4.17	1.05	9.40	1.21
E-3	3.08	1.04	10.59	1.20	3.80	0.70	10.16	0.72	3.97	-1.40	13.80	4.05
F-1	3.20	0.50	10.10	0.51	2.80	-0.20	9.40	0.63	3.46	2.09	10.70	2.20
F-2	2.26	0.90	10.68	1.13	2.42	2.10	10.00	2.10	2.81	1.58	9.29	1.73

F-3	3.59	0.77	9.51	0.91	2.97	1.23	8.96	1.61	2.91	1.90	10.80	2.06
G-1	4.85	-0.50	5.41	4.62	4.07	-1.00	9.67	1.05	5.08	-0.50	8.85	1.25
G-2	4.89	-2.10	4.55	5.84	5.00	6.85	7.50	7.29	4.98	2.06	4.70	5.69
G-3	3.18	0.00	11.00	1.00	3.18	0.90	10.57	1.07	3.46	0.17	11.05	1.06

(二) 結果分析與討論：依據研究結果，彙整成各組飛行時間及飛行距離的「平均值」及「變異係數」統計表，進行比較與穩定性分析，如表 5-3-2。

表 5-3-2 「不同機翼造型飛行筒」飛行效果平均值與變異係數統計表

組別	機翼造型		飛行時間		飛行距離	
			平均值	變異係數	平均值	變異係數
C-o	正常翼	長 29.7cm、寬 4cm	3.01	12%	2.04	74%
D	寬翼	長 29.7cm、寬 8cm	3.44	10%	1.43	78%
E	窄翼	長 29.7cm、寬 2cm	3.81	9%	3.33	86%
F	長翼	長 39.6cm、寬 4cm	2.94	15%	1.43	46%
G	短翼	長 19.8cm、寬 4cm	4.30	19%	3.21	81%

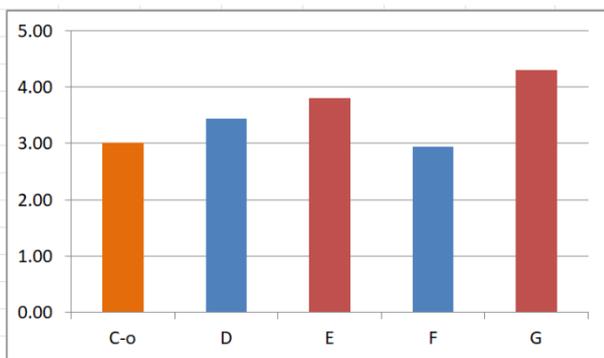


圖 5-3-1 不同機翼造型飛行筒平均飛行時間比較圖

1. 飛行時間討論：

- (1) 由統計表可發現不同機翼造型對飛行時間影響較小，平均都在 3-4 秒左右。進一步將飛行時間平均值畫為長條圖做比較（圖 5-3-1），則可發現**機翼較窄（E）、較短（G）的飛行筒平均飛行時間較長**；**機翼較寬（D）、較長（F）的飛行筒，平均飛行時間較短**。且長短機翼造型差距超過 1 秒、寬窄機翼造型則僅差距 0.5 秒以內，顯示**機翼長度影響較大**。
- (2) 由統計表發現各項變異係數都在 20% 內，代表飛行時間穩定。

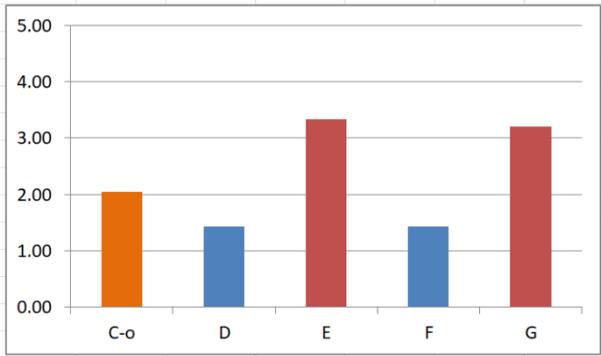


圖 5-3-2 不同機翼造型飛行筒平均飛行距離比較圖

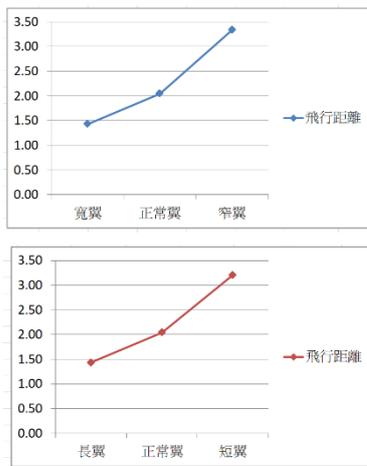
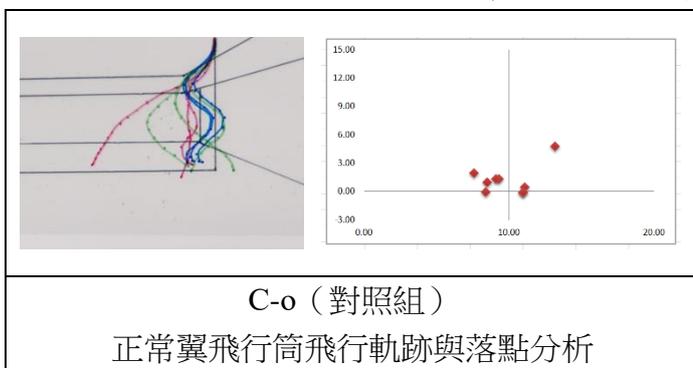


圖 5-3-3 機翼大小與飛行距離關係圖

(三) 飛行軌跡與落點分析討論：

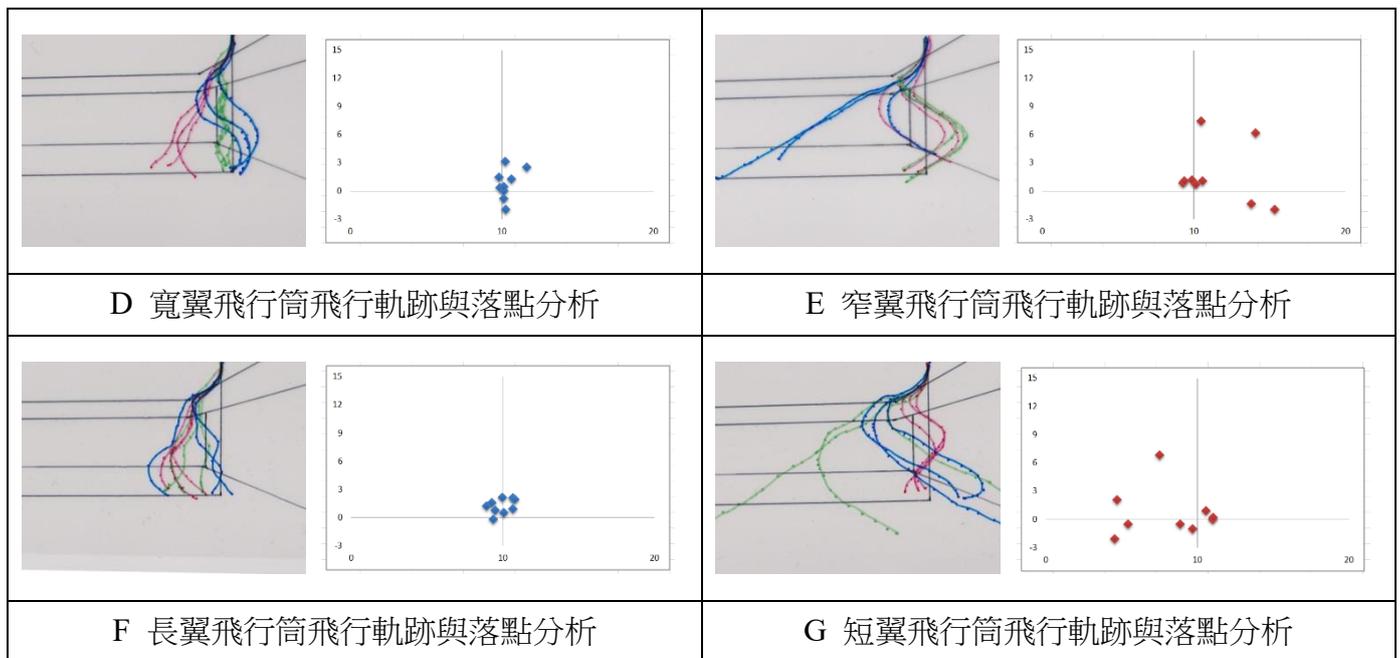
研究利用錄影方式記錄飛行軌跡，並以飛行筒落地的縱向、橫向位置，進行落點分析，以了解更詳細的飛行過程與狀況，如表 5-3-3。

表 5-3-3 「不同機翼造型的飛行筒」飛行軌跡與落點分析表



2. 飛行距離討論：

- (1) 由統計表可發現機翼的造型，對於距出發點直線距離有很大的影響，進一步將飛行距離平均值畫為長條圖做比較(圖 5-3-2)，則可發現機翼較窄(E)、較短(G)的飛行筒平均飛行距離明顯較長；機翼較寬(D)、較長(F)的飛行筒，平均飛行時間明顯較短。
- (2) 若一併與對照組(C-o)相較，不論是機翼寬窄或長短，都可以發現與平均飛行距離有負向關連，雖然不是絕對的反比關係，但會隨著機翼越由窄到寬、由短到長，平均飛行距離也會漸漸減小。(圖 5-3-3)
- (3) 由統計表發現，除了長翼飛行筒飛行距離變異係數低於 50%外，其他各種機翼造型的飛行筒，飛行距離的變異係數差異都很大，達 70-90%。



1.飛行軌跡：

- (1) 寬翼飛行筒飛行軌跡與對照組相似，但下墜的狀況較明顯。
- (2) 窄翼飛行筒飛行狀況與對照組相似，但迴旋範圍更大、無迴旋直線飛出的數量較多，變化性較高。
- (3) 長翼飛行筒飛行軌跡呈現不規則墜落狀況。
- (4) 短翼飛行筒飛行軌跡迴旋範圍較大、迴旋數較少，飛行效果的變化性很大。

2.落點分析：

- (1) 寬翼和長翼飛行筒，落點分布比對照組更集中，多在原點附近，尤其是長翼飛行筒最明顯。
- (2) 窄翼和短翼飛行筒，落點分布比對照組更廣。

(四) 綜合歸納：

- 1.機翼大小（寬度或長度）與平均飛行時間、平均飛行距離均為**負向的關聯**。
- 2.**過長的機翼將會明顯減弱飛行效果**，呈現不規則墜落。
- 3.本研究中，**短翼飛行筒有最長的平均飛行時間**（4.3 秒），若要製作滯空時間最長的紙製飛行筒，可考慮此種造型與比例。

四、筒身配重對飛行筒飛行效果影響的研究結果與討論

(一) 研究結果：以無配重紙條 (H 組)、2 層配重紙條 (I 組)、6 層配重紙條 (J 組)、8 層配重紙條 (K 組) 四種形式，並以原始 4 層配重紙條 (C-o 組) 作為對照，研究筒身配重對飛行筒飛行效果之影響，研究結果如表 5-4-1。

表 5-4-1 「不同筒身配重飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次				第二次				第三次			
	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)
H-1	3.83	0.40	9.95	0.40	3.80	0.98	9.50	1.10	3.81	0.80	10.00	0.80
H-2	3.82	-0.10	8.22	1.78	3.40	-0.64	9.79	0.67	3.82	1.21	8.70	1.78
H-3	3.70	0.80	9.35	1.03	3.90	0.24	10.00	0.24	4.11	0.40	9.67	0.52
I-1	4.38	0.70	9.29	1.00	3.84	0.50	10.00	0.50	3.86	0.64	10.60	0.88
I-2	3.88	2.20	9.99	2.20	3.91	0.30	9.79	0.37	3.99	0.60	7.10	2.96
I-3	3.71	0.35	10.03	0.35	3.91	0.75	9.50	0.90	3.96	2.00	11.84	2.72
C-o-1	3.04	0.45	11.10	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.60	3.09	3.88	4.73	13.20	5.71
J-1	2.37	1.10	10.01	1.10	2.60	1.00	6.85	3.30	2.48	0.62	10.00	0.62
J-2	2.52	0.80	10.60	1.00	2.49	0.80	10.90	1.20	2.71	1.08	10.26	1.11
J-3	2.99	0.40	6.98	3.05	2.71	5.60	9.30	5.64	2.69	5.40	10.85	5.47
K-1	2.01	1.80	9.30	1.93	1.83	1.40	9.00	1.72	1.87	1.79	9.30	1.92
K-2	2.41	0.50	5.00	5.02	2.51	-1.02	14.08	4.21	2.76	5.70	9.62	5.71
K-3	1.64	0.70	8.46	1.69	1.66	-0.50	8.64	1.45	1.73	1.40	8.80	1.84

(二) 結果分析與討論：依據研究結果，彙整成各組飛行時間及飛行距離的「平均值」及「變異係數」統計表，進行比較與穩定性分析，如表 5-4-2。

表 5-4-2 「不同筒身配重飛行筒」飛行效果平均值與變異係數統計表

組別	貼紙條層數 / 前緣配重佔比	飛行時間		飛行距離	
		平均值	變異係數	平均值	變異係數
H	無 / 0%	3.80	5%	0.92	60%
I	2 層 / 23.9%	3.94	5%	1.32	78%
C-o-1	4 層 / 38.3%	3.01	12%	2.04	74%
J	6 層 / 48.8%	2.62	7%	2.50	79%
K	8 層 / 55.3%	2.05	20%	2.83	59%

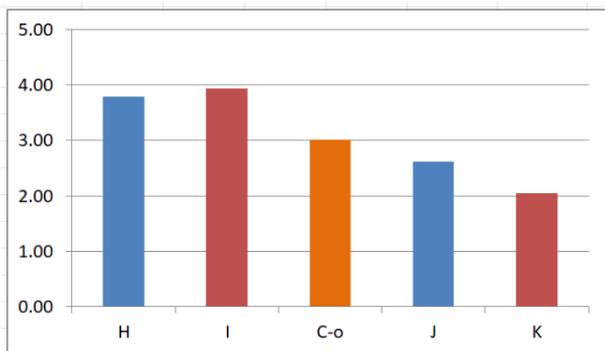


圖 5-4-1 不同筒身配重飛行筒
平均飛行時間比較圖

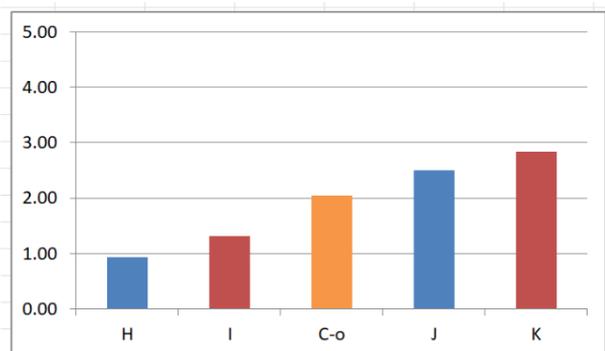


圖 5-4-2 不同筒身配重
平均飛行距離比較圖

1.飛行時間討論：

- (1) 由統計表可發現不同筒身配重對飛行時間影響稍大，平均為 2-4 秒左右。進一步將飛行時間平均值畫為長條圖做比較（圖 5-4-1），可發現筒身前緣的貼紙條**配重越重，平均飛行時間越短**。
- (2) 由統計表發現各項變異係數都在 20% 內，代表飛行的時間較穩定。其中，**配重最重的 K 組，飛行時間變異最大，達 20%**。

2.飛行距離討論：

- (1) 由統計表可發現不同的筒身配重，對於距出發點直線距離影響較前兩項實驗小，各組都在 3m 距離內。進一步將飛行距離平均值畫為長條圖做比較（圖 5-4-2），可發現筒身前緣的貼紙條**配重越重，平均飛行距離越遠**。
- (2) 由統計表發現，各種筒身配重的飛行筒，飛行距離的變異係數差異約在 60-80%，其中無貼紙條和 8 層貼紙條的兩組，變異係數較小。

(三) 飛行軌跡與落點分析討論：

研究利用錄影方式記錄飛行軌跡，並以飛行筒落地的縱向、橫向位置，進行落點分析，以了解更詳細的飛行過程與狀況，如下頁表 5-4-3。

1.飛行軌跡：

- (1) 無條紙條飛行筒，飛行軌跡呈現沒有規則的近乎垂直落下，對照錄影結果，證實此組飛行筒沒有明顯的飛行狀態，而是在不規則的擺動、旋轉中落下。
- (2) 二層貼紙條飛行筒，出現的迴旋最多圈、迴旋半徑較小，但迴旋出現的狀況不一致（僅有藍線 I-1 組較明顯）。
- (3) 六層貼紙條飛行筒與對照組（四層貼紙條）迴旋狀況較類似，且旋轉狀況明顯。但六層貼紙條飛行筒的迴旋圈數僅有 1~2 圈，較對照組少，迴旋半徑則比對照組大。
- (4) 八層貼紙條飛行筒迴旋狀況更不明顯。

2.落點分析：

- (1) 無貼紙條及二層貼紙條的飛行筒，落點集中在原點附近，較接近自由落體向下的狀況。
- (2) 四層貼紙條以上的飛行筒，落點分布較廣，但彼此沒有明顯的分別。

表 5-4-3 「不同筒身配重的飛行筒」飛行軌跡與落點分析表

<p>H 無貼紙條飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>	<p>I 二層貼紙條飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>
<p>C-o 四層貼紙條飛行筒（對照組） 飛行軌跡與落點分析</p>	
<p>J 六層貼紙條飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>	<p>K 八層貼紙條飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>

(四) 綜合歸納：

1. 這一項實驗的結果非常特別，筒身配重越重，會有較短的平均飛行時間，卻有較長的平均飛行距離。顯示筒身配重對飛行時間與飛行距離有不同的影響。
2. 無筒身前緣配重（貼紙條）的飛行筒無法有穩定的飛行。
3. 筒身前緣配重（貼紙條）越多，迴旋飛行的效果較不明顯，飛行範圍則會加大，應該是造成飛行時間短（少迴旋），但飛行距離長的原因。
4. 若飛行效果需綜合考量飛行時間與飛行距離，對照組的四層貼紙條是最均衡的筒身配重，其配重（1.55 克重）約佔飛行筒總重量（4 克重）的 40% 比例。

五、筒身造型對飛行筒飛行效果影響的研究結果與討論

(一) 研究結果：以無尾造型（L 組）、長尾造型（M 組）、顛倒造型（N 組）、固定機翼造型（O 組）、筒身封口造型（P 組）五種形式，並以正常筒身造型（C-o 組）作為對照，研究筒身造型對飛行筒飛行效果之影響，研究結果如下頁表 5-5-1。

表 5-5-1 「不同筒身造型飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次				第二次				第三次			
	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)
C-o-1	3.04	0.45	11.10	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.60	3.09	3.88	4.73	13.2	5.71
L-1	2.92	-0.15	10.10	0.18	1.33	1.32	10.00	1.32	2.77	0.27	11.70	1.72
L-2	2.39	0.30	10.35	0.46	3.10	0.23	10.20	0.30	2.69	1.23	9.20	1.47
L-3	2.79	3.26	8.25	3.70	2.97	0.20	10.90	0.92	2.69	1.45	10.80	1.66
M-1	4.09	2.00	9.22	2.15	2.81	0.40	9.20	0.89	3.29	3.80	6.80	4.97
M-2	2.56	0.40	11.00	1.08	2.20	0.30	10.00	0.30	2.40	0.70	10.40	0.81
M-3	4.17	1.50	3.58	6.59	2.70	-0.35	8.00	2.03	3.71	0.85	9.60	0.94
N-1	3.43	0.80	10.15	0.81	3.38	0.11	10.70	0.71	3.14	0.00	9.20	0.80
N-2	2.91	0.20	10.50	0.54	2.71	-0.20	10.00	0.20	3.37	0.40	10.20	0.45
N-3	2.78	0.15	10.10	0.18	2.16	0.10	10.00	0.10	2.76	0.00	10.10	0.10
O-1	3.34	5.20	12.00	5.57	2.69	4.00	13.60	5.38	2.96	5.30	11.00	5.39
O-2	2.95	2.40	12.80	3.69	2.69	0.20	12.00	2.01	3.25	5.10	8.20	5.41
O-3	3.50	0.75	14.18	4.25	2.71	3.00	12.80	4.10	2.99	4.10	11.40	4.33
P-1	2.09	0.10	9.00	1.00	1.84	0.20	9.80	0.28	2.14	0.30	10.00	0.30
P-2	2.20	1.00	9.60	1.08	1.97	0.45	10.50	0.67	2.05	0.64	10.50	0.81
P-3	1.90	0.85	10.40	0.94	1.89	0.60	9.20	1.00	1.97	0.60	10.60	0.85

(二) 結果分析與討論：依據研究結果，彙整成各組飛行時間及飛行距離的「平均值」及「變異係數」統計表，進行比較與穩定性分析，如表 5-5-2。

表 5-5-2 「不同筒身造型飛行筒」飛行效果平均值與變異係數統計表

組別	機翼造型	飛行時間		飛行距離	
		平均值	變異係數	平均值	變異係數
C-o	正常造型	3.01	12%	2.04	74%
L	無尾造型	2.63	20%	1.30	82%
M	長尾造型	3.10	24%	2.20	98%
N	顛倒造型	2.96	14%	0.43	69%
O	固定機翼	3.01	10%	4.46	26%
P	筒身封口	2.01	6%	0.77	39%

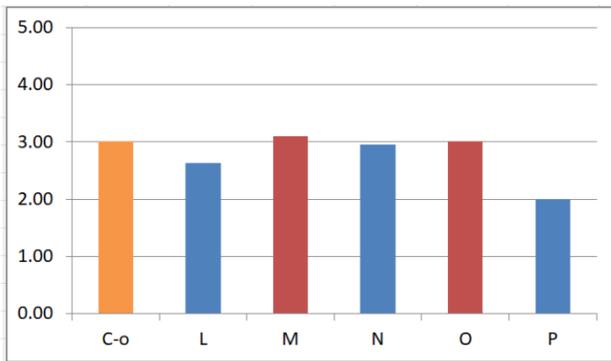


圖 5-5-1 不同筒身造型飛行筒
平均飛行時間比較圖

1.飛行時間討論：

- (1) 由統計表可發現，除了筒身封口 (P) 的飛行筒，平均飛行時間僅有 2.01 秒，其他造型的飛行筒，飛行時間都在 2.5-3 秒左右。進一步將飛行時間平均值畫為長條圖做比較 (圖 5-5-1)，則可發現除了筒身封口 (P) 的造型外，其他筒身造型對於飛行時間影響不大。
- (2) 由統計表發現各項變異係數多在 20% 內，其中長尾造型 (M) 變異係數為 24%，是所有飛行筒組別中，飛行時間變異狀況最明顯的。

2.飛行距離討論：

- (1) 由統計表可發現筒身造型對於距出發點直線距離有很大的影響，進一步將飛行距離平均值畫為長條圖做比較 (圖 5-5-2)，無尾造型 (L)、顛倒造型 (N)、筒身封口 (P) 三組飛行距離較短，尤其顛倒造型和筒身封口的飛行筒，飛行距離都不到 1m；固定機翼 (O) 飛行距離明顯較長，平均達 4.46m，也是有翼飛行筒中飛行距離最遠的組別；長尾造型 (M) 飛行距離則與對照組 (C-o) 相仿。
- (2) 由統計表發現，無尾或長尾造型變異係數較大，都超過 80%；固定機翼的變異係數只有 26%，是所有有翼飛行筒中最小的。

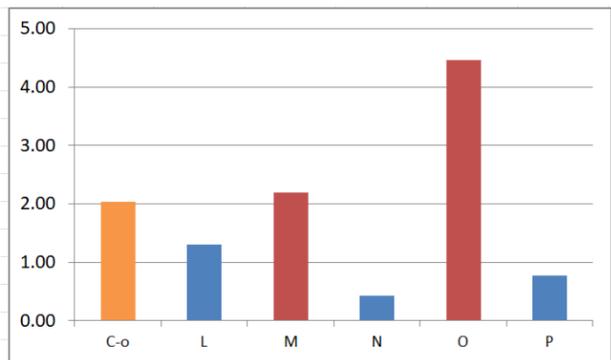


圖 5-5-2 不同筒造型飛行筒
平均飛行距離比較圖

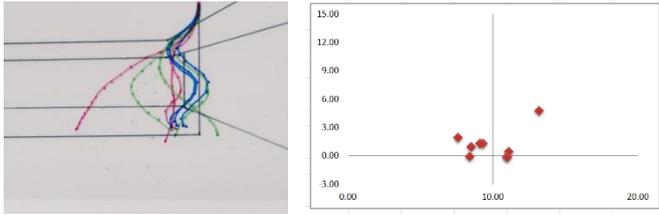
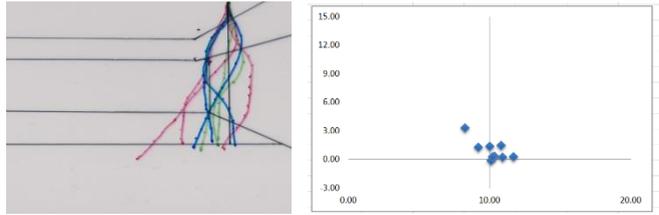
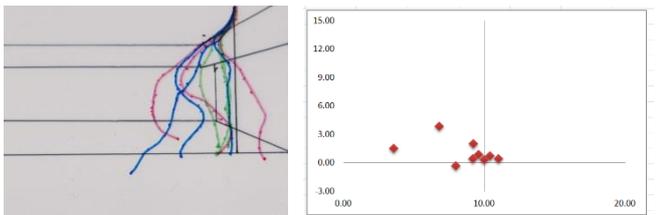
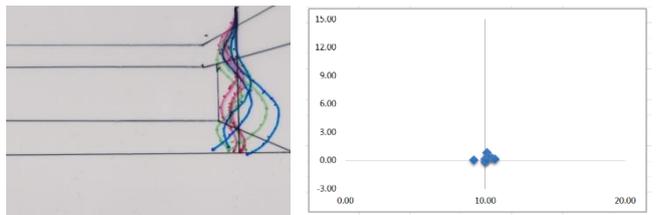
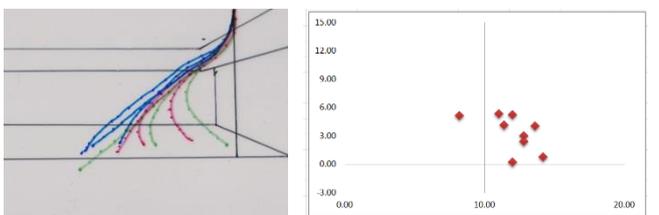
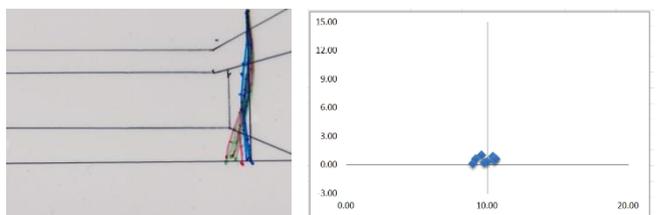
(三) 飛行軌跡與落點分析討論：

研究利用錄影方式記錄飛行軌跡，並以飛行筒落地的縱向、橫向位置，進行落點分析，以了解更詳細的飛行過程與狀況，如下頁表 5-5-3。

1.飛行軌跡：

- (1) 無尾造型飛行筒飛行軌跡較不規則，有向前後左右各種方向，且投放後無明顯抬頭、水平飛起的狀態
- (2) 長尾造型飛行筒的飛行軌跡不穩定，有幾次出現接近對照組飛行筒的迴旋飛行效果，但另外幾次則是不規則的落下。
- (3) 顛倒造型飛行軌跡和對照組類似，但投放後水平飛行的狀況較不明顯。
- (4) 固定機翼飛行軌跡很類似無翼飛行筒，但飛行距離明顯較無翼飛行筒短。
- (5) 筒身封口飛行軌跡幾乎是自由落體，沒有飛行效果。

表 5-5-3 「不同筒身造型的飛行筒」飛行軌跡與落點分析表

	
<p>C-o 正常造型飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>	<p>L 無尾造型飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>
	
<p>M 長尾造型飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>	<p>N 顛倒造型飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>
	
<p>O 固定機翼飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>	<p>P 筒身封口飛行筒飛行軌跡與落點分析</p>

2.落點分析：

- (1) 無尾造型、顛倒造型、筒身封口造型三種飛行筒，落點集中於原點附近。
- (2) 長尾造型飛行筒落點分布與對照組相似。
- (3) 固定機翼飛行筒落點分布較廣。

(四) 綜合歸納：

- 1.無尾造型飛行筒幾乎沒有飛行效果，長尾造型飛行筒則因為設計方式，導致尾部未如對照組飛行筒直挺，容易彎折或被吹動，也造成飛行效果變異性大。顯示**尾部構造是穩定飛行的重要構造**。
- 2.顛倒造型飛行筒飛行效果類似對照組，但經過檢視錄影，發現筒身前緣抬頭狀況不明顯，飛行軌跡中水平飛行也較對照組少，顯示**上短下長的飛行筒結構對水平抬升有影響**。
- 3.固定機翼飛行筒呈現類似無翼飛行筒的飛行效果，顯示機翼構造增加了**飛行的迴旋與不穩定性**，可能是由於原本的機翼設計容易隨機擺動、受氣流影響所致。
- 4.筒身封口飛行筒幾乎呈現自由落體墜落，顯示**環狀的飛行筒構造才能擁有飛行效果**，僅有上短下長的外型是無效的。

六、紙製有翼飛行筒於風洞測試之實驗結果與討論

(一) 實驗結果：研究將 7 組實驗組別放入風洞中，尾端繫住風洞管壁，手持 45 度斜下放置，啟動風扇後，錄影並擷取過程照片，實驗結果如下表 5-6-1。

表 5-6-1 風洞測試實驗結果

組別	A-x 組	C-x 組	H 組	L 組	N 組	P 組	C-o 組
飛行筒樣式	手摺無翼	長條貼紙無翼	無貼紙條配重	無尾造型	顛倒造型	筒身封口	長條貼紙有翼
實驗過程							
							
							

(二) 實驗討論：

1.	A-x 組 C-x 組	兩組正常的無翼飛行筒，都能穩定的懸浮在風洞口，作小幅度上下擺動；且具有向前的力量，將棉線緊緊拉扯，顯示本研究的飛行筒造型，確實能透過氣流造成「向上」及「向前」的飛行效果。
2.	H 組	無貼紙條配重，飛行筒被氣流吹起亂飄，最後掉出風洞外，顯示無法有穩定的飛行效果。
3.	L 組	無尾造型的飛行筒稍有向前和漂浮的狀態，但方向不固定，最後則向後下方停住，顯示出飛行筒的尾部對飛行效果的重要性。
4.	N 組	顛倒造型的飛行筒會在空中旋轉一圈，變回類似正常版的飛行筒型態，但由於配重變成在上方，因此飛行震盪較大，不穩定。
5.	P 組	筒身封口的飛行筒完全沒有向上及向前的飛行效果，直接往下並不再飄動，顯示飛行筒的環狀構造對飛行效果之影響甚大。
6.	C-o 組	有翼的正常版飛行筒，依然能維持漂浮在洞口的飛行狀態，但因為多了機翼，而呈現左右大幅搖擺的不穩定飛行狀態。

(三) 慢動作錄影結果：經過側面及正面慢動作錄影 C-x 型、C-o 型飛行筒，並以每秒（實際時間 1/8 秒）截圖與拼接，形成投放後飛行過程圖，如下頁圖 5-6-1、圖 5-6-2、圖 5-6-3、圖 5-6-4。

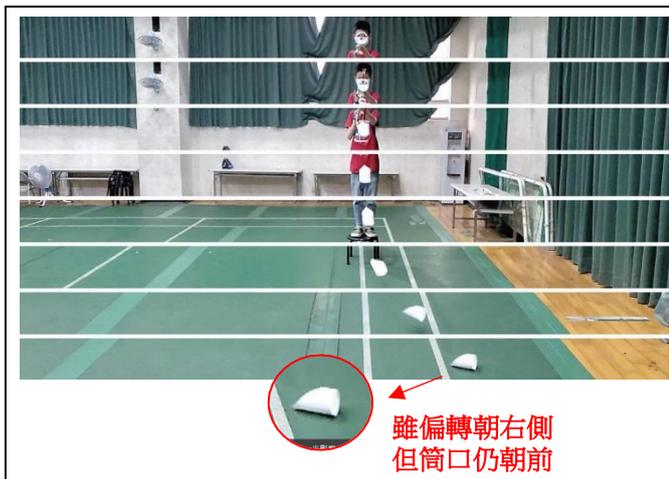


圖 5-6-1 C-x 型無翼飛行筒正面慢動作錄影

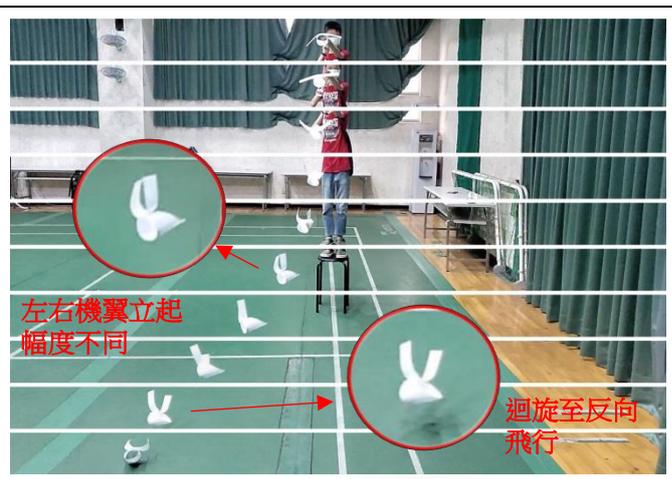


圖 5-6-2 C-o 型有翼飛行筒正面慢動作錄影

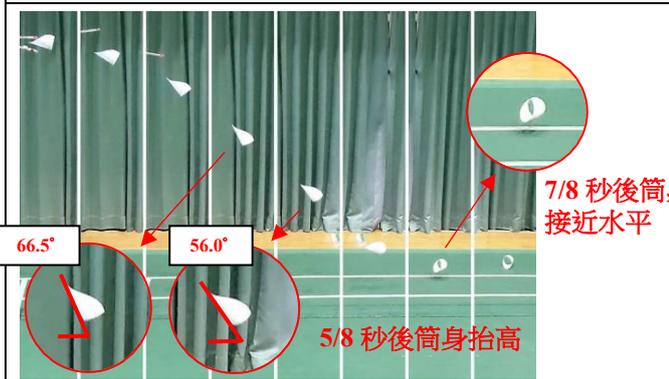


圖 5-6-3 C-x 型無翼飛行筒側面慢動作錄影

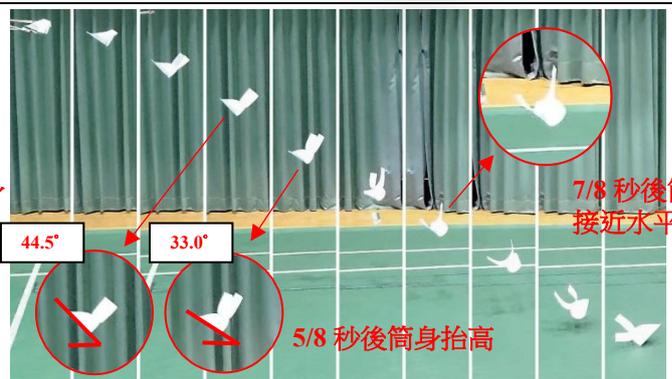


圖 5-6-4 C-o 型無翼飛行筒側面慢動作錄影

(四) 慢動作錄影結果討論：

1. 水平抬升狀況：有翼與無翼飛行筒都在 5/8 秒後出現筒身下傾角度變小的狀況，7/8 秒後都趨於水平飛行，呈現飛行軌跡中「抬頭」的狀況，顯示機翼並非飛行筒抬升的主因。但可發現無翼飛行筒一開始的下傾角度較大，達 66.5°，有翼飛行筒則為 44.5°，可能與無翼飛行筒重心更趨前緣及機翼提供浮力有關。
2. 迴旋狀況：有翼和無翼飛行筒都會朝某一側偏向，但無翼飛行筒會偏至整個飛行筒迴旋至反向飛行，觀察可能與左右機翼立起的幅度不同，致使偏轉較無翼飛行筒更大，而造成迴旋飛行效果。

(五) 太乙飛豬飛行筒飛行效果之討論：

經前述相關研究結果，推測太乙飛豬紙製有翼飛行筒自由投放時，前緣因配重導致自然斜下，讓空氣能經中空環狀且有長尾的筒身流過，因受筒身拘束使流速加快，依白努利原理作用使飛行筒具有向上的升力，而形成我們觀察到飛行筒會抬頭（水平飛行）的原因（如右圖 5-6-5）；而長條機翼可能因其受風不均，而會造成飛行筒變換方向，產生「迴旋」的飛行效果。

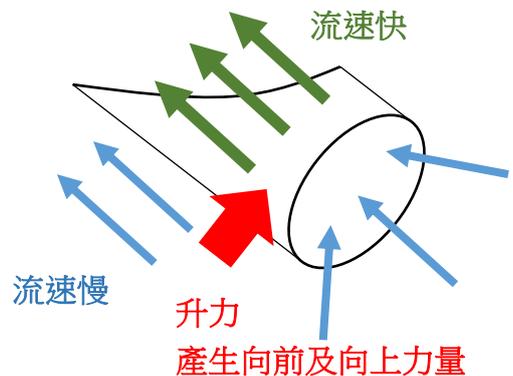


圖 5-6-5 筒身造型產生升力推測圖

陸、結論

- 一、紙製有翼飛行筒改良方式：可利用**標籤貼紙條取代手摺紙帶**，作為飛行筒的前緣配重的改良方式。本研究所製作的標準飛行筒樣式為：
 - 1.筒身與機翼：用 A4 影印紙裁出底長 29.8cm、高 14.9cm 的等腰直角三角形，捲成上短下長、口徑約 8.5cm 的飛行筒，並製作長 29.7cm、寬 4cm 的長條型機翼。
 - 2.前緣配重：長 21cm、寬 1.9cm 貼紙條 4 條，黏貼於飛行筒前緣底部作筒身之配重。
- 二、投放與測量方式：

利用**壓條、磁鐵、中國結繩製作可長距離伸出，避免飛行筒碰撞欄杆**的投放裝置，定量測量飛行筒飛行效果，包含：飛行時間、飛行距離（距原點直線距離）、飛行軌跡與落點分布，每項實驗都製作三個飛行筒，並各投放三次，減少誤差。
- 三、製作方式對飛行效果之影響：

標籤貼紙條取代手摺紙帶的改良方式，僅稍微減少平均飛行時間與平均飛行距離，對飛行效果影響與手摺紙帶相似，且可彈性調整實驗因素，是**可行的改良替代方式**。
- 四、機翼構造對飛行效果之影響：
 - 1.機翼未如預期提昇飛行時間或距離，反而**減少飛行時間與距離、提高飛行的變異性**。
 - 2.機翼構造可**增加「迴旋」的飛行效果**，使落點較集中。
- 五、機翼造型對飛行效果之影響：
 - 1.機翼大小與平均飛行時間、平均飛行距離有**負向關聯**。
 - 2.較窄、較短的機翼構造會有較好的飛行效果；較長的機翼會造成飛行不穩定。
- 六、筒身配重對飛行效果之影響：

筒身配重**對平均飛行時間有負向關聯，對平均飛行距離卻有正向關聯**（如配重越重，平均飛行時間較短、平均飛行距離卻較長），推論與筒身配重會減少迴旋飛行有關。
- 七、筒身造型對飛行效果之影響：
 - 1.**尾部構造**是穩定飛行的重要構造；**上短下長**的飛行筒結構對水平抬升有影響。
 - 2.**中空環狀**的飛行筒構造才能擁有飛行效果，僅有上短下長的外型是無效的。
- 八、風洞及慢動作錄影驗證與推測「太乙飛豬」紙製有翼飛行筒的飛行效果：
 - 1.證實本研究中「**尾部構造、中空環狀、前緣配重**」的太乙飛豬飛行筒造型，能在垂直向上的氣流中，造成「**向前**」及「**向上**」的飛行效果。
 - 2.推測太乙飛豬飛行筒因其特殊造型，依據**白努利定理**於空氣流經飛行筒時產生**升力**，並透過立起受風的**機翼造成迴旋**，形成獨特的飛行效果。

柒、參考資料

- YOUTUBE 影片-BIRD SHAPED PAPER AIRPLANE GOES VIRAL IN CHINA!**。(無日期)。
民 109 年 12 月 2 日。取自：<https://www.youtube.com/watch?v=eIT8sdpwXUw>
- 陳植謙、林立璿、游欣紘、黃楹喬（民 106）。**這樣飛太遠！—探討飛行筒的飛行現象**。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會作品。
- 佚名（民 105）。**天使的華爾茲-斷毛羽球在鉛直下落時的晃動**。金門地區第 57 屆中小學科學展覽會作品。

【評語】 080109

本作品探討紙製有翼飛行筒，以自由落體投放時的飛行狀況。配合簡易風洞及慢動作錄影，確認各項因素影響飛行效果的結果。這類主題常見於網路影片，與過往科展作品，需要有實質創新研究，或再進一步討論實驗結果，看看有無新的發現。

作品簡報

中華民國第61屆中小學科學展覽會

國小組 物理科

太乙飛豬的祕密

紙製有翼飛行筒探究



I. 研究動機與研究目的



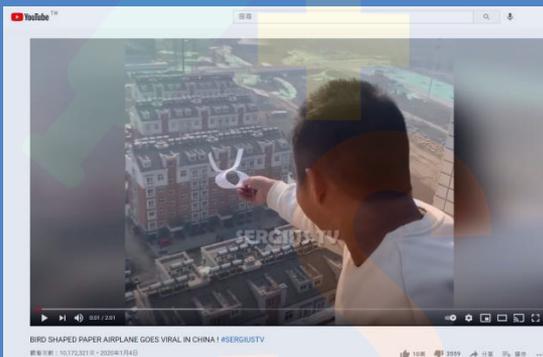
與一般飛行筒相異處：

1. 長條狀的機翼構造
2. 不需丟擲，高處投放



外型神似動畫電影中太乙真人的飛天豬而得名

什麼是「太乙飛豬」？



一種曾經在youtube網站紅極一時的紙製飛行筒。

《BIRD SHAPED PAPER AIRPLANE GOES VIRAL IN CHINA !》
<https://www.youtube.com/watch?v=eIT8sdpwXUw>

研究目的：

1. 探討製作與投放紙製有翼飛行筒的最佳方式
2. 探討定量測量有翼飛行筒飛行效果的方式
3. 製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果之影響
4. 機翼造型對有翼飛行筒飛行效果之影響
5. 筒身配重對有翼飛行筒飛行效果之影響
6. 筒身造型對有翼飛行筒飛行效果之影響
7. 紙製有翼飛行筒於風洞測試及慢動作錄影之研究

II. 初探實驗 ~ 太乙飛豬製作與投放測試

太乙飛豬紙摺方式製作

			
步驟 1. 將 A4 影印紙裁切成正方形。	步驟 2. 將正方形紙對摺。	步驟 3. 將其中半面的三角形再對摺。	步驟 4. 重複步驟 3，共摺三次成 1/8 寬。
			
步驟 5. 將對摺後的紙帶摺入另一邊三角形底部。	步驟 6. 將三角形捲成筒狀，兩底角黏合。	步驟 7. 裁切適當大小的長方形紙作為機翼。	步驟 8. 將機翼黏貼於三角形底角連接處。

太乙飛豬手握投放測試

投放地點	A. 走廊上， 高舉手。	B. 走廊上， 架設鋁梯。	C. 二樓教室， 走廊。	D. 四樓教室， 走廊。	E. 活動中心， 二樓通道。
高度	150cm.	220cm.	550cm.	1350cm.	480cm.
實驗結果	有小幅度的向前滑翔，或迴旋半圈降下，但落地時間太快，無法觀察完整飛行狀況。	有明顯的滑翔或是迴旋狀況，尤其在四樓投放更明顯，過程中飛行筒會有出現幾次前緣浮起的「抬頭」現象。但高樓投放受風的影響很大。	能觀察明顯的滑翔或旋轉降下的效果，關閉門窗避免風的影響。		

初探研究問題分析：

1. 紙摺方式不易調整機身樣式、紙帶配重，不利於後續實驗。
2. 紙帶摺疊多層，造成許多稜角，使飛行筒存在造型上差異。
3. 依投放高度不足，飛行效果不明顯，建議需在一層樓以上。
4. 紙製重量很輕，於室外易受風的影響，需於無風室內場地實驗。
5. 採用手持投放，投放動作不一致，應有統一的投放工具。
6. 有翼飛行筒常形成盤旋向下的狀況，容易投放後碰撞柵欄或牆面。

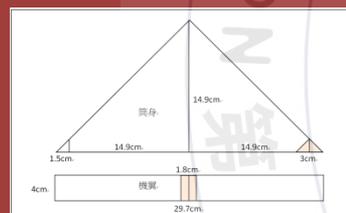


III. 飛行筒製作方式改良 & 投放裝置設計

飛行筒製作方式改良



1. 用標籤貼紙條取代手摺紙帶。



2. 固定飛行筒開口直徑、機翼寬度、筒身長、黏貼面積等。

改良的紙製有翼飛行筒



飛行筒開口圓周 26.8cm
飛行筒開口直徑約 8.5cm
飛行筒底部長度 14.9cm

貼紙條長 21cm、寬 1.9cm*4

機翼長 29.7cm、寬 4cm

黏接處寬 1.8cm

投放裝置設計



優點

1. 飛行筒可伸出欄杆外1m，不易碰觸
2. 壓條開啟角度90度，不易干擾飛行筒
3. 用拉繩方式固定投放動作

IV.測量方式設計

飛行時間測量

用同步口令的方式，測量飛行筒從投放到落地的時間。

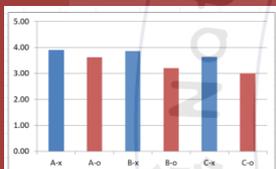
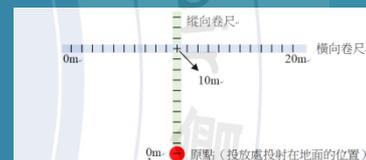


圖 5-2-1 不同製作方式與機翼構造飛行筒平均飛行時間比較圖。

組別	第一次			第		
	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	縱向位置 x
A-x-1	4.40	5.76	1.5	10.27	3.88	6.50
A-x-2	3.86	-1.50	1.31	8.82	3.79	-2.00
A-x-3	4.00	0.00	18.42	8.42	3.09	6.30
A-o-1	3.04	5.78	9.78	5.78	2.43	0.20
A-o-2	3.71	0.74	8.84	1.38	3.46	-1.40
A-o-3	4.48	5.86	12.43	6.34	3.69	-1.40
B-x-1	3.77	6.16	15.33	8.07	3.31	8.50

飛行距離測量

以投放點投射在地面上的位置作為「原點」，測量平面上縱向和橫向兩種落地位置，利用畢氏定理計算距原點的直線距離。



分析
飛行效果
飛行型態

飛行軌跡測量

錄影→回放→描圖→背景→記錄



圖 4-2-2 於平板上回放飛行過程。



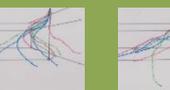
圖 4-2-3 用奇異筆將飛行軌跡描點連線。



圖 4-2-4 繪製活動中心背景框架。

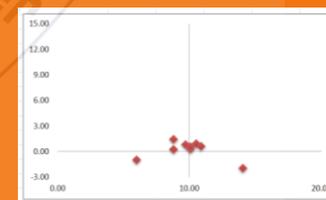
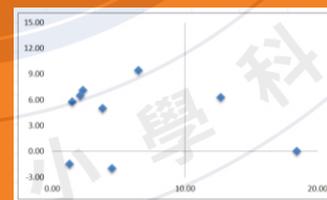


圖 4-2-5 將飛行軌跡與背景進行掃描。



落點分布測量

以飛行筒縱向和橫向兩種落地位置，畫出距「原點」的落點分布圖。



V.製作方式與機翼有無對飛行效果之影響

組別

表 4-3-1 製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	製作方式	機翼	飛行筒照片
A-x-1	3.21	摺紙帶 8 層	無	
A-x-2	3.19			
A-x-3	3.22			
A-o-1	4.14			
A-o-2	4.13			
A-o-3	4.14	有		
B-x-1	3.23			
B-x-2	3.26			
B-x-3	3.27			
B-o-1	4.16			
B-o-2	4.10	有		
B-o-3	4.08			
C-x-1	3.06			
C-x-2	3.10			
C-x-3	3.08			
C-o-1	4.03	長條貼紙條 4 層	無	
C-o-2	4.07			
C-o-3	4.05			
			有機翼	

實驗數據

表 5-2-1 不同製作方式與機翼構造飛行筒 飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次			第二次			第三次					
	飛行時間 (s)	橫向位置 x	縱向位置 y	飛行時間 (s)	橫向位置 x	縱向位置 y	飛行時間 (s)	橫向位置 x	縱向位置 y			
A-x-1	4.40	5.76	1.5	10.27	3.88	6.50	2.10	10.23	4.09	7.10	2.29	10.48
A-x-2	3.86	-1.50	1.31	8.82	3.79	-2.00	4.51	5.84	4.40	9.47	6.48	10.06
A-x-3	4.00	0.00	18.42	8.42	3.09	6.30	12.70	6.85	3.56	5.00	3.80	7.96
A-o-1	3.04	5.78	9.78	5.78	2.43	0.20	7.90	2.11	3.31	2.45	6.40	4.35
A-o-2	3.71	0.74	8.84	1.38	3.46	-1.40	4.10	6.06	4.61	-1.80	15.47	5.76
A-o-3	4.48	5.86	12.43	6.34	3.69	-1.40	11.00	1.72	3.92	-2.00	11.45	2.47
B-x-1	3.72	6.16	15.22	8.07	3.31	8.50	11.43	8.62	3.65	-1.00	1.00	9.06
B-x-2	3.96	4.80	2.82	8.64	4.10	-2.00	4.30	6.04	3.71	6.19	16.36	8.88
B-x-3	4.20	8.56	11.79	8.75	4.21	6.00	8.10	6.29	3.90	6.48	13.40	7.32
B-o-1	2.49	0.80	9.7	0.85	3.71	-1.00	6.00	4.12	2.83	-2.00	14.06	4.53
B-o-2	2.53	0.20	8.8	1.22	3.25	1.40	8.80	1.84	3.82	0.53	10.08	0.54
B-o-3	3.6	0.26	10.1	0.28	3.36	0.60	10.90	1.08	3.19	0.90	10.54	1.05
C-x-1	3.48	6.73	15.32	8.58	3.31	-2.00	16.20	6.51	3.61	0.00	1.35	8.65
C-x-2	3.49	8.86	11.38	8.97	3.65	3.60	18.40	9.14	3.91	-1.00	17.92	7.98
C-x-3	4.12	-1.10	16.95	7.04	3.53	-1.70	16.50	6.72	3.57	4.55	13.00	5.45
C-o-1	3.04	0.45	11.1	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.6	3.09	3.88	4.73	13.2	5.71

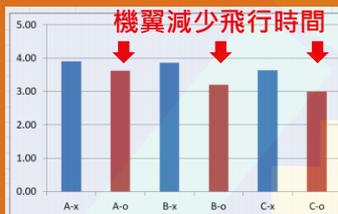


圖 5-2-1 不同製作方式與機翼構造飛行筒 平均飛行時間比較圖

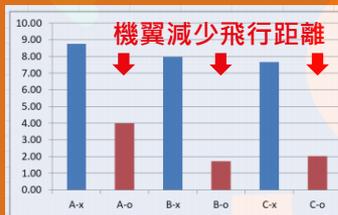
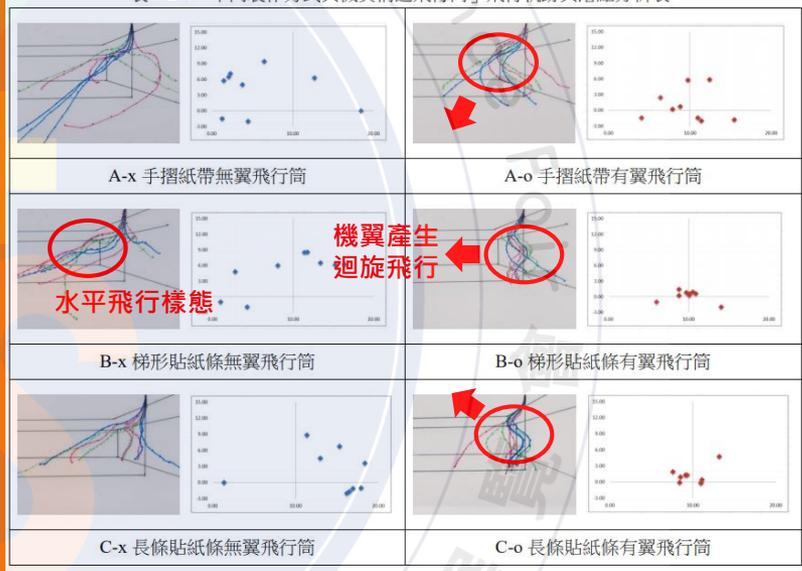


圖 5-2-2 不同製作方式與機翼構造飛行筒 平均飛行距離比較圖

表 5-2-3 「不同製作方式與機翼構造飛行筒」飛行軌跡與落點分析表



- 1.改良的製作方式稍減少飛行時間與距離，但影響不大。
- 2.增加機翼反而減少飛行時間與飛行距離，變異性增加。
- 3.增加機翼會增加「迴旋」的飛行效果，落點較為集中。
- 4.六種飛行筒都出現筒身前緣「抬頭」造成水平飛行的效果。

VI. 機翼造型對飛行效果之影響

組別

表 4-4-1 機翼造型對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	機翼造型	飛行筒照片	
C-o-1	4.03	正常翼 長 29.7cm 寬 4cm		
C-o-2	4.07			
C-o-3	4.05			
D-1	4.98	寬翼 長 29.7cm 寬 8cm		
D-2	4.98			
D-3	4.95			
E-1	3.62	窄翼 長 29.7cm 寬 2cm		
E-2	3.58			
E-3	3.62			
F-1	4.35	長翼 長 39.6cm 寬 4cm		
F-2	4.40			
F-3	4.34			
G-1	3.76	短翼 長 19.8cm 寬 4cm		
G-2	3.86			
G-3	3.83			

實驗數據

表 5-3-1 「不同機翼造型飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次			第二次			第三次					
	飛行時間 (s)	偏向位置 x	偏向位置 y	飛行時間 (s)	偏向位置 x	偏向位置 y	飛行時間 (s)	偏向位置 x	偏向位置 y			
C-o-1	3.04	0.45	11.10	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.60	3.09	3.88	4.23	13.2	5.71
D-1	3.35	-0.82	10.10	0.83	3.20	0.35	9.86	0.38	3.68	0.00	10.10	0.10
D-2	3.46	-1.99	10.25	2.01	3.70	1.28	10.63	1.43	4.06	0.45	10.10	0.46
D-3	3.15	2.54	11.63	3.02	2.96	3.15	10.20	3.16	3.40	1.46	9.80	1.47
E-1	3.89	-2.00	15.35	5.71	3.69	6.17	14.10	7.41	3.81	7.42	10.5	7.44
E-2	3.70	0.83	9.30	1.09	4.20	1.18	9.90	1.18	4.17	1.05	9.40	1.21
E-3	3.08	1.04	10.59	1.20	3.80	0.70	10.16	0.72	3.97	-1.40	13.80	4.05
F-1	3.20	0.50	10.10	0.51	2.80	-0.20	9.40	0.63	3.46	2.09	10.70	2.20
F-2	2.26	0.90	10.68	1.13	2.42	2.10	10.00	2.10	2.81	1.58	9.29	1.73
F-3	3.59	0.77	9.51	0.91	2.97	1.23	8.96	1.61	2.91	1.90	10.80	2.06
G-1	4.85	-0.50	5.41	4.62	4.07	-1.00	9.67	1.05	5.08	-0.50	8.85	1.25
G-2	4.89	-2.10	4.55	5.84	5.00	6.85	7.50	7.29	4.98	2.06	4.70	5.69
G-3	3.18	0.00	11.00	1.00	3.18	0.90	10.57	1.07	3.46	0.17	11.05	1.06

機翼寬、長 = 時間短



圖 5-3-1 不同機翼造型飛行筒

平均飛行時間比較圖

短翼：最長飛行時間

機翼寬、長 = 距離短

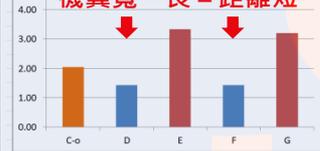
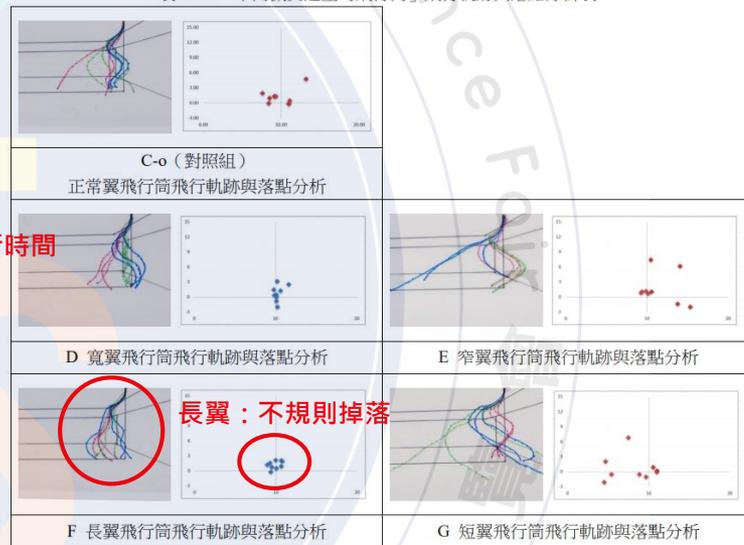


圖 5-3-2 不同機翼造型飛行筒

平均飛行距離比較圖

表 5-3-3 「不同機翼造型的飛行筒」飛行軌跡與落點分析表



1. 機翼大小 (寬度或長度) 與飛行時間、距離均為負向關聯。
2. 過長的機翼將會明顯減弱飛行效果，呈現不規則墜落。
3. 本研究中，短翼飛行筒有最長的平均飛行時間 (4.3 秒)，若要製作滯空時間長的紙製飛行筒，可考慮此造型與比例。

VII.筒身配重對飛行效果之影響

組別

表 4-5-1 筒身配重對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	貼紙條層數/配重	飛行筒照片
H-1	2.55	無	
H-2	2.53	0g	
H-3	2.54	配重佔 0%	
I-1	3.35	2 層	
I-2	3.33	0.8±0.05g	
I-3	3.35	配重佔 23.9%	
C-o-1	4.03	4 層	
C-o-2	4.07	1.55±0.05g	
C-o-3	4.05	配重佔 38.3%	
J-1	4.9	6 層	
J-2	4.94	2.4±0.05g	
J-3	4.92	配重佔 48.8%	
K-1	5.61	8 層	
K-2	5.62	3.1±0.05g	
K-3	5.59	配重佔 55.3%	

實驗數據

表 5-4-1 「不同筒身配重飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次			第二次			第三次					
	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y	飛行時間 (s)	縱向位置 x	橫向位置 y			
H-1	3.83	0.40	9.95	0.40	3.80	0.98	9.50	1.10	3.81	0.80	10.00	0.80
H-2	3.82	-0.10	8.22	1.78	3.40	-0.64	9.79	0.67	3.82	1.21	8.70	1.78
H-3	3.70	0.80	9.35	1.03	3.90	0.24	10.00	0.24	4.11	0.40	9.67	0.52
I-1	4.38	0.70	9.29	1.00	3.84	0.50	10.00	0.50	3.86	0.64	10.60	0.88
I-2	3.88	2.20	9.99	2.20	3.91	0.30	9.79	0.37	3.99	0.60	7.10	2.96
I-3	3.71	0.35	10.03	0.35	3.91	0.75	9.50	0.90	3.96	2.00	11.84	2.72
C-o-1	3.04	0.45	11.10	1.19	2.67	-0.15	11.00	1.01	3.00	0.92	8.50	1.76
C-o-2	3.05	1.30	9.32	1.47	3.05	-0.10	8.41	1.59	3.00	1.30	9.10	1.58
C-o-3	2.69	-0.15	10.95	0.96	2.73	1.94	7.60	3.09	3.88	4.73	13.20	5.71
J-1	2.37	1.10	10.01	1.10	2.60	1.00	6.85	3.30	2.48	0.62	10.00	0.62
J-2	2.52	0.80	10.60	1.00	2.49	0.80	10.90	1.20	2.71	1.08	10.26	1.11
J-3	2.99	0.40	6.98	3.05	2.71	5.60	9.30	5.64	2.69	5.40	10.85	5.47
K-1	2.01	1.80	9.30	1.93	1.83	1.40	9.00	1.72	1.87	1.79	9.30	1.92
K-2	2.41	0.50	5.00	5.02	2.51	-1.02	14.08	4.21	2.76	5.70	9.62	5.71
K-3	1.64	0.70	8.46	1.69	1.66	-0.50	8.64	1.45	1.73	1.40	8.80	1.84

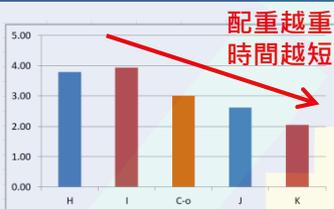


圖 5-4-1 不同筒身配重飛行筒平均飛行時間比較圖

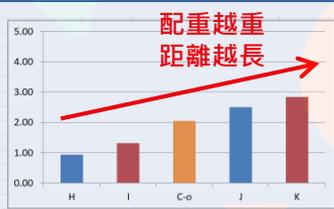
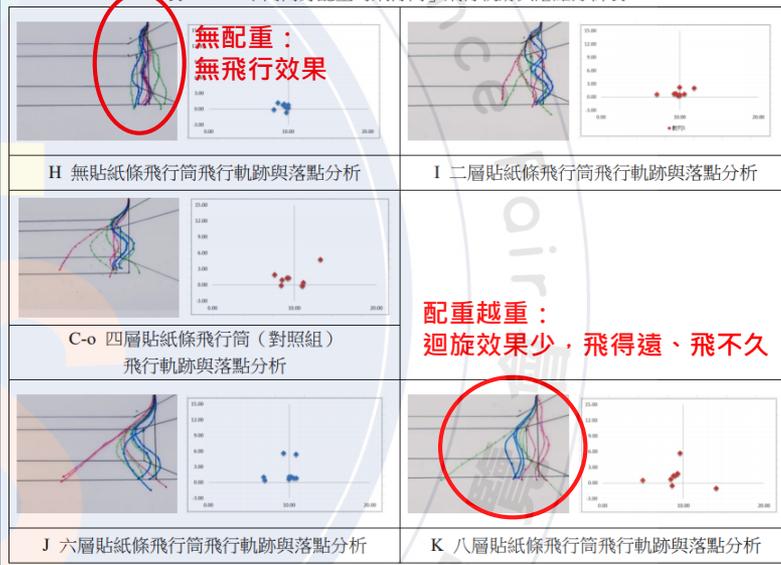


圖 5-4-2 不同筒身配重平均飛行距離比較圖

表 5-4-3 「不同筒身配重的飛行筒」飛行軌跡與落點分析表



- 筒身配重越重，飛行時間較短，飛行距離卻較長。
- 無前緣配重的飛行筒無法有穩定的飛行。
- 前緣配重越多，迴旋飛行的效果較不明顯，飛行範圍加大，應該是造成飛行時間短（少迴旋），但飛行距離長的原因。
- 綜合考量飛行時間與飛行距離，四層貼紙條是最均衡的，其配重（1.55克重）約佔總重量（4克重）的40%比例。

VIII.筒身造型對飛行效果之影響

組別

表 4-6-1 筒身造型對飛行筒飛行效果影響之實驗分組

組別	重量 (g)	筒身造型	飛行筒照片
C-0-1~	4.03~	正常造型	
C-0-2~	4.07~		
C-0-3~	4.05~		
L-1~	4.16~	無尾造型	
L-2~	4.1~		
L-3~	4.14~		
M-1~	4.2~	長尾造型	
M-2~	4.27~		
M-3~	4.24~		
N-1~	4.2~	顛倒造型	
N-2~	4.2~		
N-3~	4.19~		
O-1~	4.17~	固定機翼	
O-2~	4.2~		
O-3~	4.2~		
P-1~	4.75~	筒身封口	
P-2~	4.76~		
P-3~	4.78~		

實驗數據

表 5-5-1 「不同筒身造型飛行筒」飛行效果實驗結果統計表

組別	第一次			第二次			第三次		
	飛行時間 (s)	飛向位置 (x, y)	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	飛向位置 (x, y)	飛行距離 (m)	飛行時間 (s)	飛向位置 (x, y)	飛行距離 (m)
C-0-1	3.04	0.45 11.10	1.19	2.67	-0.15 11.00	1.01	3.06	0.92 8.50	1.76
C-0-2	3.65	1.30 9.32	1.47	3.05	-0.10 8.41	1.59	3.06	1.30 9.10	1.58
C-0-3	2.69	-0.15 10.95	0.96	2.73	1.94 7.80	3.09	3.88	4.71 13.2	5.71
L-1	2.92	-0.15 10.10	0.18	1.33	1.32 10.00	1.32	2.77	0.27 11.70	1.72
L-2	2.39	0.30 10.35	0.46	3.10	0.23 10.20	0.30	2.69	1.23 9.20	1.47
L-3	2.79	3.26 8.25	3.70	2.97	0.20 10.90	0.92	2.69	1.45 10.80	1.66
M-1	4.09	2.00 9.22	2.15	2.81	0.40 9.20	0.89	3.29	3.80 6.80	4.97
M-2	2.56	0.40 11.00	1.08	2.20	0.30 10.00	0.30	2.40	0.70 10.40	0.81
M-3	4.17	1.50 3.58	6.59	2.70	-0.35 8.00	2.03	3.71	0.85 9.60	0.94
N-1	3.43	0.80 10.15	0.81	3.38	0.11 10.70	0.71	3.14	0.00 9.20	0.80
N-2	2.91	0.20 10.50	0.54	2.71	-0.20 10.00	0.20	3.37	0.40 10.20	0.45
N-3	2.78	0.15 10.10	0.18	2.16	0.10 10.00	0.10	2.76	0.00 10.10	0.10
O-1	3.34	5.20 12.00	5.57	2.69	4.00 13.60	5.38	2.96	5.30 11.00	5.39
O-2	2.95	2.40 12.80	3.69	2.69	0.20 12.00	2.01	3.25	5.10 8.20	5.41
O-3	3.50	0.75 14.18	4.25	2.71	3.00 12.80	4.10	2.99	4.10 11.40	4.33
P-1	2.09	1.00 9.00	1.00	1.84	0.20 9.80	0.28	2.14	0.30 10.00	0.30
P-2	2.20	1.00 9.60	1.08	1.97	0.45 10.50	0.67	2.05	0.64 10.50	0.81
P-3	1.90	0.85 10.40	0.94	1.89	0.60 9.20	1.00	1.97	0.60 10.60	0.85



圖 5-5-1 不同筒身造型飛行筒平均飛行時間比較圖

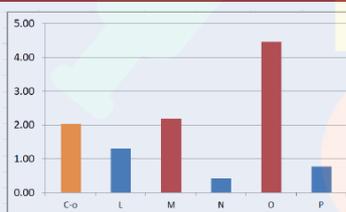
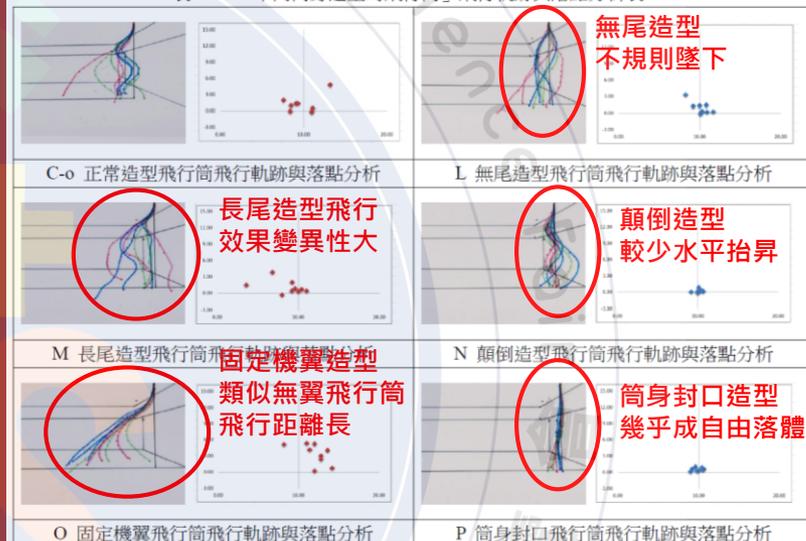


圖 5-5-2 不同筒身造型飛行筒平均飛行距離比較圖

表 5-5-3 「不同筒身造型的飛行筒」飛行軌跡與落點分析表



1. 無尾造型沒有飛行效果，長尾造型則因尾部容易彎折，造成變異性大。顯示尾部構造是穩定飛行的重要構造。
2. 顛倒造型水平飛行軌跡中較少，顯示上短下長的飛行筒結構對水平抬升有影響。
3. 固定機翼造型類似無翼飛行筒的飛行效果，較少迴旋發生，顯示原本容易隨機擺動的機翼是造成迴旋的主要原因。
4. 筒身封口飛行筒呈現自由落體墜落，顯示中空環狀構造才能擁有飛行效果，僅有上短下長的外型是無效的。

IX. 紙製飛行筒以風洞測試之研究

風洞裝置設計

本研究飛行筒並未承受很強的風，因此捨棄「收縮段」設計。

1. 出風段：排風扇。
2. 整流段：中央黏貼約1000支吸管。
3. 實驗段：透明桌墊做成風洞管，上方即為實驗區域。

風洞實驗方式：

實驗段

整流段

出風段



風洞測試實驗結果與討論

表 5-6-1 風洞測試實驗結果

組別	A-x 組	C-x 組	H 組	L 組	N 組	P 組	C-o 組
飛行筒樣式	手摺無翼	長條貼紙無翼	無貼紙條配重	無尾造型	顛倒造型	筒身封口	長條貼紙有翼
實驗過程							

1. 兩組無翼飛行筒都能穩定懸浮，且具有**向前**力量。
2. **無配重**飛行筒被氣流吹出風洞外，無法穩定飛行。
3. **無尾**造型漂浮一下就向下停住，驗證**尾部**重要性。
4. **顛倒**造型在空中轉圈，變回標準版上短下長型態。
5. **筒身封口**造型完全沒有飛行效果，直接往下不飄動，驗證**環狀**構造重要性。
6. 有翼飛行筒能維持漂浮，但呈現左右搖擺的狀態，驗證**機翼**構造會造成左右擺動，進而造成**迴旋**。

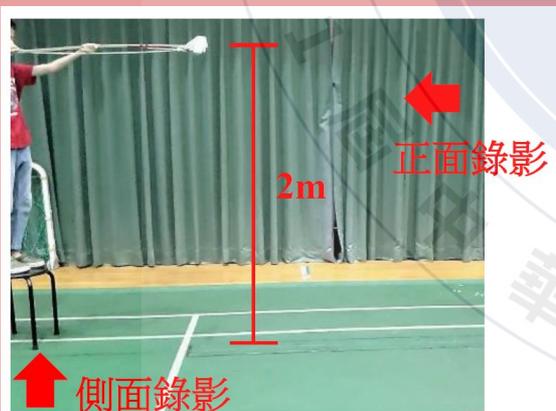
X. 紙製飛行筒以慢動作攝影之研究

慢動作攝影研究方式

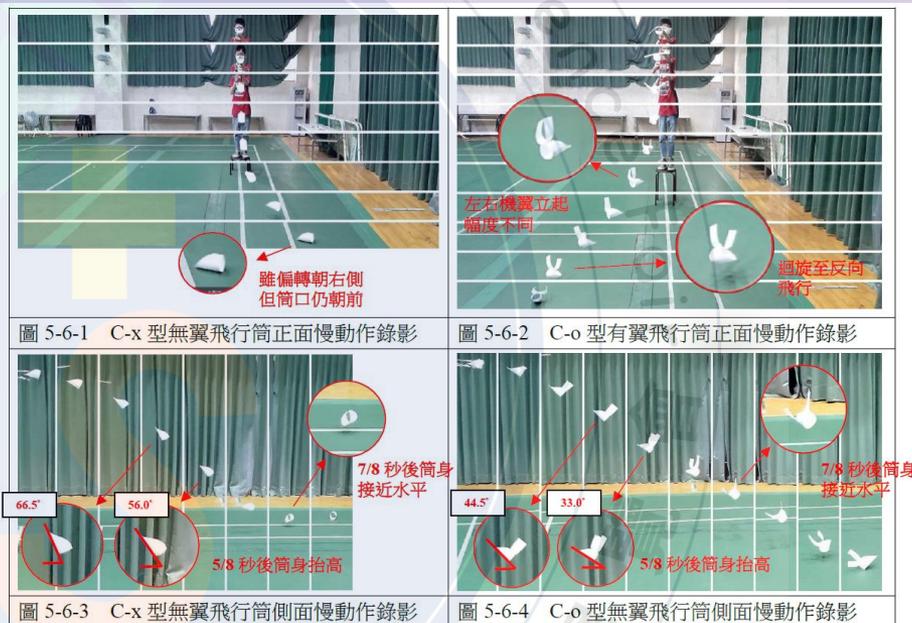
1. 組別：有翼&無翼標準型

2. 測量方式：

- (1) 每秒240格慢動作錄影，被攝物體速度變慢8倍。
- (2) 同時錄影飛行筒的側面及正面。
- (3) 電腦上回放每秒（實際時間1/8秒）截圖一張照片，拼接為飛行過程。



研究結果



1. 水平抬升狀況：有無機翼都在5/8秒後趨於水平飛行，顯示機翼並非抬升的主因。但無翼飛行筒開始的下傾角度較大，可能與無翼飛行筒重心更趨前緣及機翼提供浮力有關。
2. 迴旋狀況：有翼和無翼飛行筒都會朝某一側偏向，但有翼飛行筒可能因左右機翼立起幅度不同，致使偏轉較大，而造成迴旋飛行效果。

XI. 研究結論與參考資料

研究結論《一》

探討製作與投放紙製有翼飛行筒的最佳方式

- 1.製作：
用**標籤貼紙條**取代手摺紙帶。
- 2.投放：
用**壓條、磁鐵、結繩**製作長距離投放裝置。

研究結論《二》

探討定量測量有翼飛行筒飛行效果的方式

- 利用**飛行時間、飛行距離、飛行軌跡、落點分布**等四種項目量測，定量測量飛行效果。

研究結論《三》

製作方式與機翼構造對飛行筒飛行效果之影響

- 1.**標籤貼紙條**的製作方式對飛行影響不大，且可調整實驗因素。
- 2.**機翼構造**減少飛行時間與距離，但增加「迴旋」飛行效果。

研究結論《四》

機翼造型對有翼飛行筒飛行效果之影響

- 1.機翼大小與平均飛行時間、平均飛行距離有**負向關聯**。
- 2.**較窄、較短**的機翼構造會有較好的飛行效果。

研究結論《五》

筒身配重對有翼飛行筒飛行效果之影響

- 筒身配重對飛行時間有**負向關聯**，對飛行距離卻有**正向關聯**，推論與筒身配重會**減少迴旋**飛行有關。

研究結論《六》

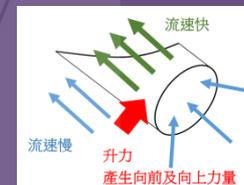
筒身造型對有翼飛行筒飛行效果之影響

- 1.**尾部構造**可穩定飛行。
- 2.**上短下長**的結構對水平抬升有影響。
- 3.**中空環狀**的飛行筒構造才能擁有飛行效果。

研究結論《七》

紙製有翼飛行筒於風洞測試及慢動作錄影研究

- 1.驗證太乙飛豬飛行筒**筒身**造型，能造成**向前及向上**的飛行效果。
- 2.驗證太乙飛豬飛行筒**機翼**，會造成**偏向的迴旋**飛行效果。



參考資料：

YOUTUBE影片-BIRD SHAPED PAPER AIRPLANE GOES VIRAL IN CHINA ! 。

(無日期)。民109年12月2日。取自：<https://www.youtube.com/watch?v=eIT8sdpwXUw>

陳植謙、林立璿、游欣紘、黃楹喬(民106)。這樣飛太遠！—探討飛行筒的飛行現象
中華民國第57屆中小學科學展覽會作品。

佚名(民105)。天使的華爾茲-斷毛羽球在鉛直下落時的晃動。金門地區第57屆中小學科學展覽會作品。