

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國小組 物理科

第二名

080114

迴旋奇機~解開珍珠板飛機迴旋的終極密碼

學校名稱：臺北縣板橋市江翠國民小學

作者：  小六 蘇怡蘭  小六 吳靜婷  小六 林冠志  小六 陳奕儒  小六 邵柏歲	指導老師：  張萬居
---	------------------

關鍵詞：珍珠板飛機、風洞、迴旋直徑

## 摘要

有別於過去很多研究飛機的科展作品都在探討飛機如何飛得遠、飛得久，本實驗的目的，主要在尋找珍珠板飛機為什麼能迴旋的秘密及影響它的因素？剛開始我們利用「自製風洞」測試珍珠板飛機的主翼與水平尾翼之裝置角對飛機產生的迴旋力量，進一步來說明迴旋的原理。然後試射九種裝置角配對的飛機來測量迴旋直徑，並找出最適合的組合來進行下一步的實驗。接著，分別改變飛機及發射平台的各種變因，並找出這些變因對珍珠板飛機的迴旋直徑有什麼影響？最後我們設計各種迴旋飛機的創意造型和技術玩法，並且活用迴旋原理，創造出令人驚奇的迴旋奇機！建議可應用到教學、健身運動或趣味科學遊戲之用。

## 壹、研究動機

記得有一次在參觀展覽時，看到一個新奇的飛機，這種飛機竟然可以射出去又轉彎飛回來，當時我感到很新奇，但是又不知道什麼原理，於是就和大家提議做了這個實驗。

而在以前上課的時候，老師也說過「風箏」是因為有風的力量才會飛起來，那這種珍珠板飛機是不是也是運用同樣的原理呢？為了解答這些問題，於是在老師的指導下，經過了不斷的設計、切割珍珠板、實驗、修正、再實驗，並且做了無數架飛機之後，我們終於完成了這個「飛行夢想」。

## 貳、研究目的

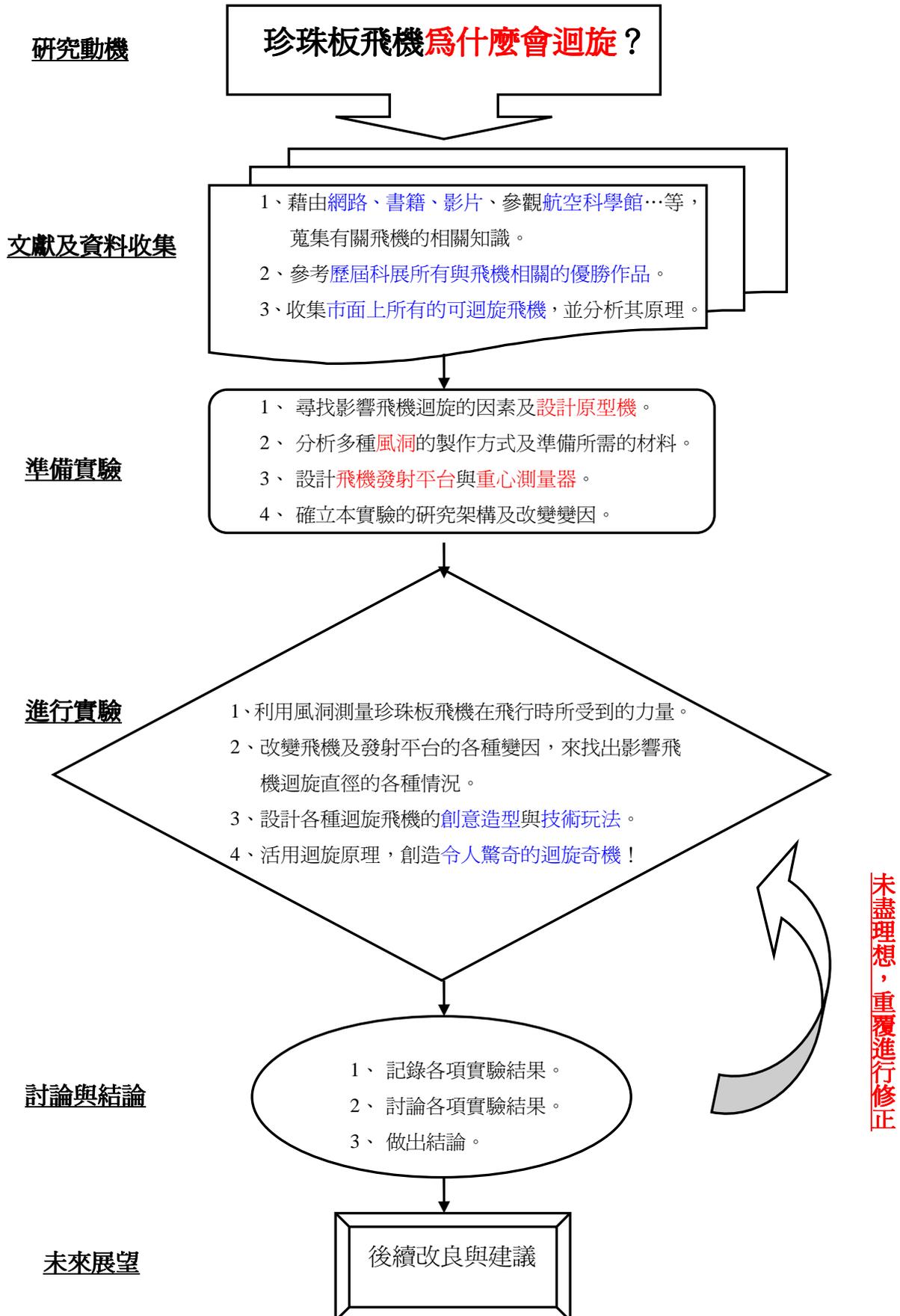
- 一、了解一般飛機的構造及飛行原理？
- 二、自製風洞及分析珍珠板飛機能夠迴旋的原理？
- 三、探討「主翼與水平尾翼的裝置角」對飛機迴旋的影響？
- 四、探討「發射力量」與「加上螺旋槳」對飛機迴旋的影響？
- 五、探討「機身傾斜角」與「發射仰角」對飛機迴旋的影響？
- 六、探討飛機的「重心位置」與「機首配重」對飛機迴旋的影響？
- 七、探討飛機的「機身高度」與「機身長度的影響？
- 八、探討飛機「主翼的各種條件」對飛機迴旋的影響？
- 九、設計迴旋飛機的各種創意造型與技術玩法。
- 十、如何活用迴旋原理，創造令人驚奇的迴旋奇機？

## 參、研究設備及器材

製作珍珠板飛機的材料、工具	0.2cm 珍珠板、軟磁鐵、(美工刀、尺)
自製風洞	塑膠瓦楞板、吸管、鐵紗網(20x20cm)、風速計、透明壓克力板、抽風扇
測量拉力器材	細管、鋼線、滑輪、棉線、支架、砝碼、電子秤
飛機發射平台	木板、木條、量角器、橡皮筋、鐵釘、彈簧秤
重心測量器	鐵尺、塑膠底座x2
其他器材	布尺、尼龍繩、攝影機、原子筆芯

## 肆、研究過程及結果

### ★實驗研究流程：



## ★探討一：了解一般飛機的構造及飛行原理？

### 一、一般飛機的構造

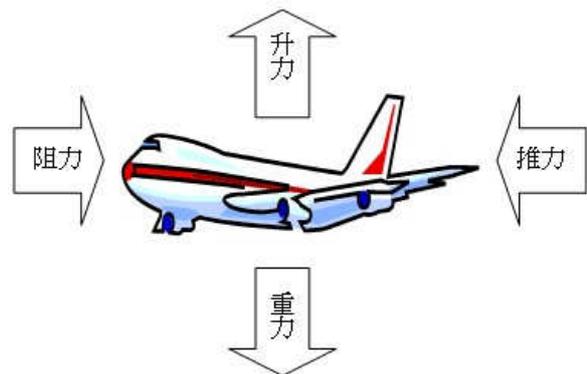
一架飛機的構造，我們主要可將它分成主翼、水平尾翼、垂直尾翼及機身，其功能如下表：



飛機的構造	功 能
1、主翼	產生升力，並給予飛機一定程度的穩定性。
2、尾翼	水平尾翼 保持俯仰方向穩定，因為可以提供一個力矩與主翼產生的力矩抵消，避免飛機出現頭上腳下或頭下腳上的情形。
	垂直尾翼 保持水平方向穩定和直線性。
3、機身	串起主翼與尾翼，並提供一個可供放置配重的地方。

### 二、飛機飛行的原理

飛機之所以能夠在天空飛行，是因為四種力量相互作用的結果，這四種力量是推力、升力、阻力及重力，飛機靠引擎的推力產生速度、促使空氣通過機翼產生升力、當推力大於阻力、升力大於重力時，就能起飛升高。

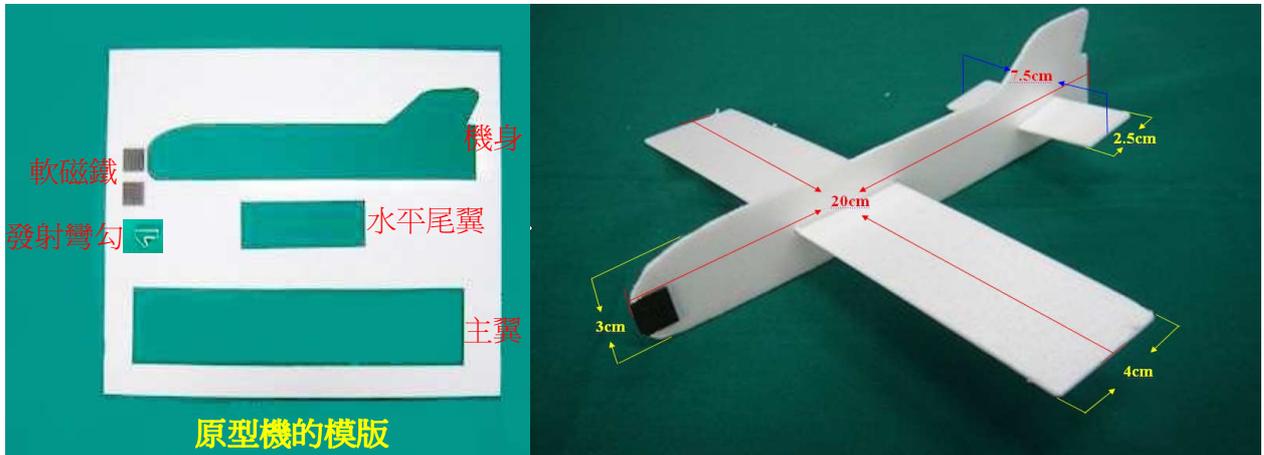


而飛機飛行時的升力來源，目前尚無單一定律可完美解釋所有情況，但若上下翼面的曲率不同，大致上可依據伯努力定律來解釋(因為有曲率的機翼上方，空氣流動的速度快，所以上方產生的壓力小，而下方的空氣速度慢，產生的壓力大，使得飛機產生向上的升力)。

但本實驗中的珍珠板飛機，機翼是平板狀沒有曲率，伯努力定律在這裡並不適用，所以我們採用氣體分子撞擊機翼的底部所產生的反作用力來解釋，就像風箏在空中飄浮的原理一樣。

### 三、本實驗珍珠板飛機的製作過程

首先我們蒐集市面上的各式可迴旋飛機，雖然有各種形狀但缺點是造型複雜、所需材料多且製作麻煩，而且有些可迴旋飛機無法改變機翼的裝置角(見附註 1)，故我們自製一架原型機，材料採用 0.2cm 的珍珠板，飛機的各構造儘量以最簡單比例組成，並「參考」一般設計飛機時各參數的推算法，即以機身長與主翼展長相同各為 20cm，主翼展弦比(見附註 2)為 5，水平尾翼展弦比為 3，在機首加上兩片軟磁鐵(共 1 克)做為配重，並將發射彎勾裝在飛機重心位置下面。



### ★探討二：自製風洞及分析珍珠板飛機能夠迴旋的原理？

#### 一、製作風洞的理由與過程說明

(一)想要知道珍珠板飛機能夠迴旋的原理，就要先了解它在飛行時所受到的力量？所以一開始我們先將珍珠板飛機用一條棉線綁在工業用電風扇前(如圖 2-1)，但是因為氣流強弱不同，所以飛機很不穩定，故須自行設計一個風洞來產生對機翼的相對風，以模擬飛機在飛行時的情況。



圖 2-1 用工業用電風扇吹珍珠板飛機

(二)根據收集的資訊，一般專業的風洞大都為開放的「吸入式風洞」，它的風速均勻性和穩定性都會較「吹送式風洞」來得好，故本實驗採用之。

首先，我們以塑膠瓦楞板來製作風洞的外部(如圖 2-2)，在動力段使用抽風扇來產生空氣流動，以模擬飛機在飛行的時所遇到的空氣。在側面使用透明壓克力板作為試驗段，以便於實驗觀察，並且使用風速計測量風洞內部九個方位的風速情況(如表 2-1)。

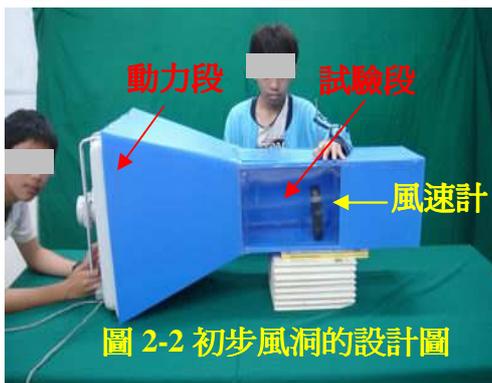


表 2-1 風洞測試的位置與測得風速

左上	中上	右上
6.4(m/s)	6.9(m/s)	5.1(m/s)
左中	中中	右中
5.4(m/s)	7.1(m/s)	6.5(m/s)
左下	中下	右下
6.0(m/s)	5.8(m/s)	5.4(m/s)

(三)結果發現風洞各位置的氣流相當不穩定(如表 2-1)，故在風洞內部加入整流段，包括以吸管堆積成的「蜂巢管」和二層紗網排成的「整流紗網」。(蜂巢管設計的目的在於減少外界氣流中之紊流，並將氣流切割成更小之渦流。整流紗網其功能是使氣流的紊流強度減至最小，並增進氣流的均勻性及穩定性)，並再次測試風速(如圖 2-3)。

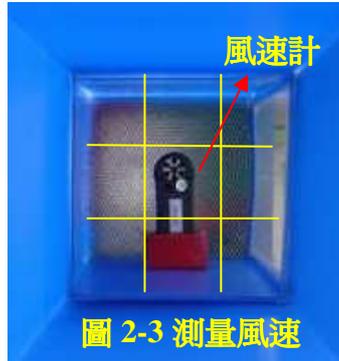


表 2-2 風洞測試的位置與測得風速

左上	中上	右上
3.1(m/s)	3.0(m/s)	3.1(m/s)
左中	中中	右中
3.1(m/s)	3.2(m/s)	3.0(m/s)
左下	中下	右下
3.0(m/s)	3.1(m/s)	3.2(m/s)

(四)雖然氣流變穩定了(如表 2-2)，但是因為加入蜂巢管和紗網的關係，所以風速變弱了，故在風洞右端製作收縮段，並參考文獻中連續方程式(Equation of continuity)的公式推算，將收縮段兩端的開口面積比定為 4 : 1(50cm×50cm : 25cm×25cm)，以得到氣流加速的最佳效果。

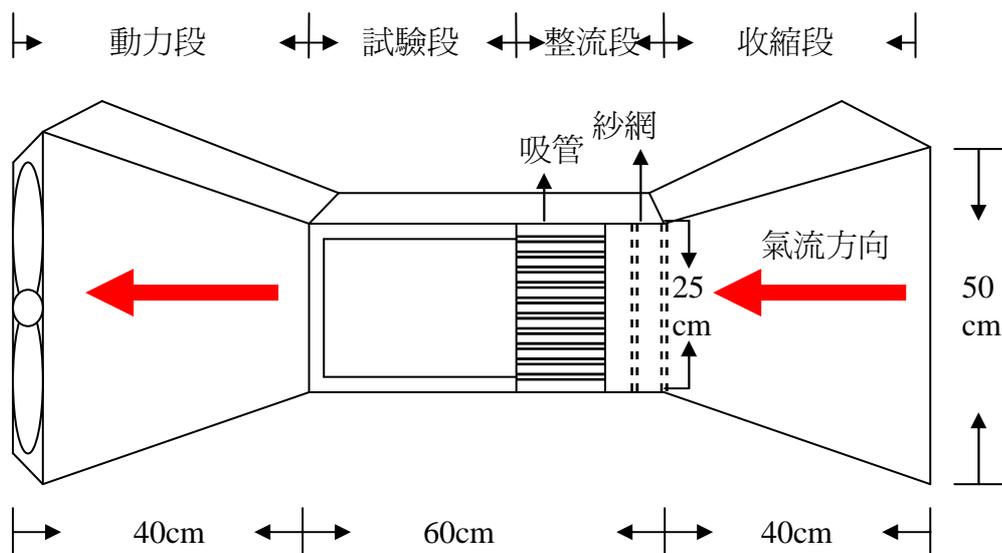
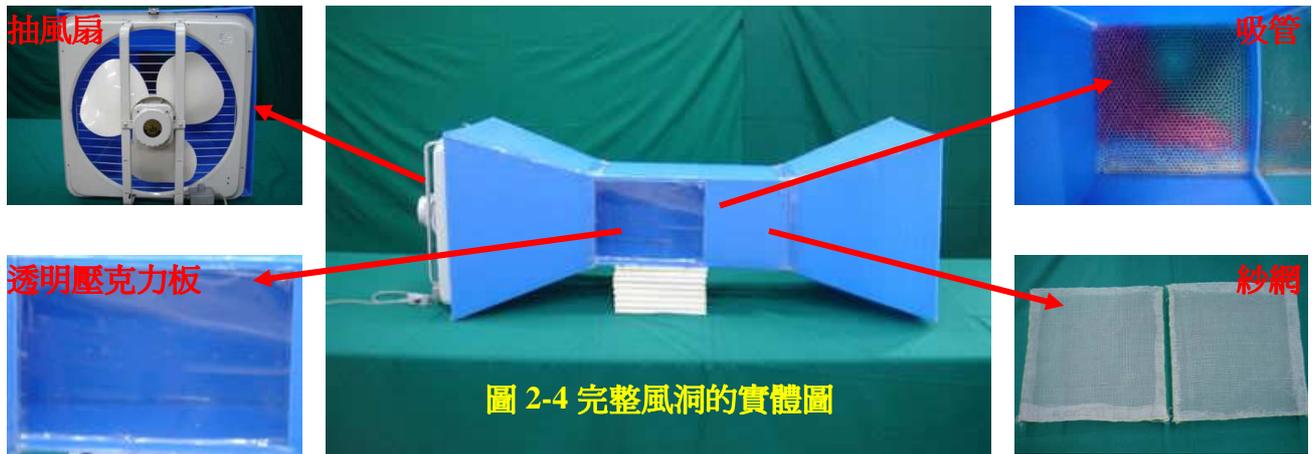


圖 2-5 完整風洞的結構圖

(五)測試結果如表 2-3：

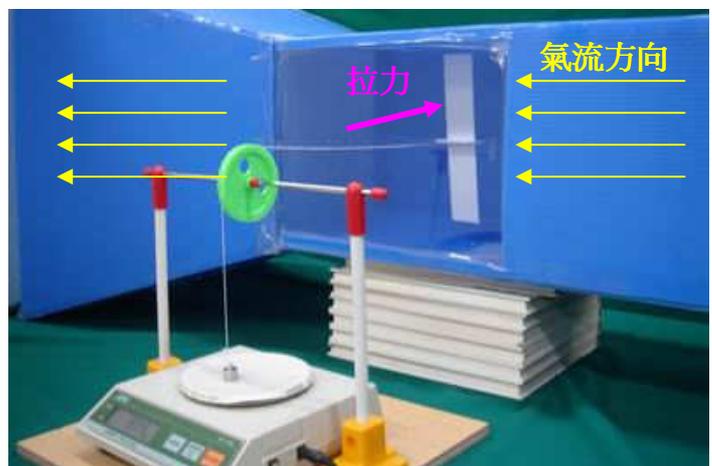
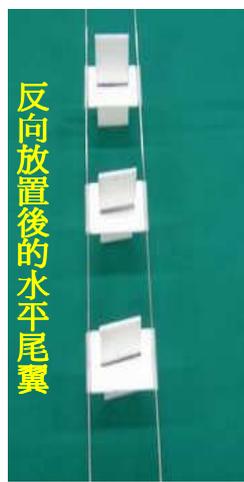
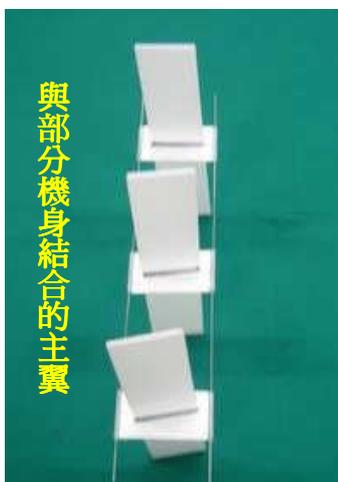
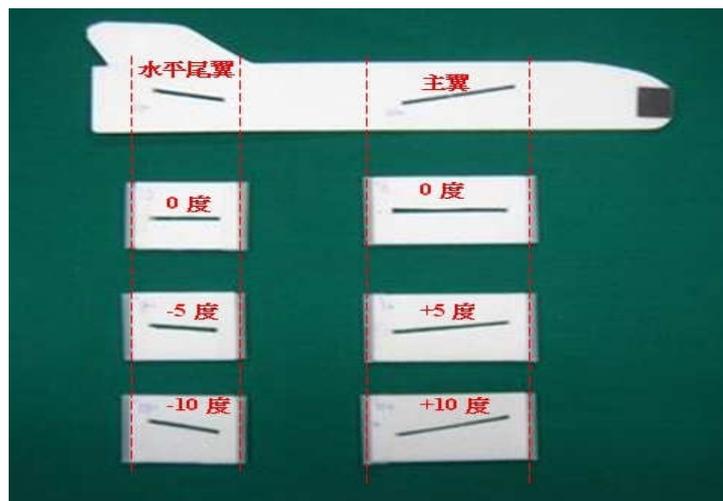
因為得到的數據都相當接近，所以可確保本實驗風洞的**精準度**。

左上	中上	右上
4.4(m/s)	4.5(m/s)	4.4(m/s)
左中	中中	右中
4.5(m/s)	4.5(m/s)	4.5(m/s)
左下	中下	右下
4.5(m/s)	4.4(m/s)	4.4(m/s)

## 二、測量珍珠板飛機在飛行時所受到的力量

(一)做法：

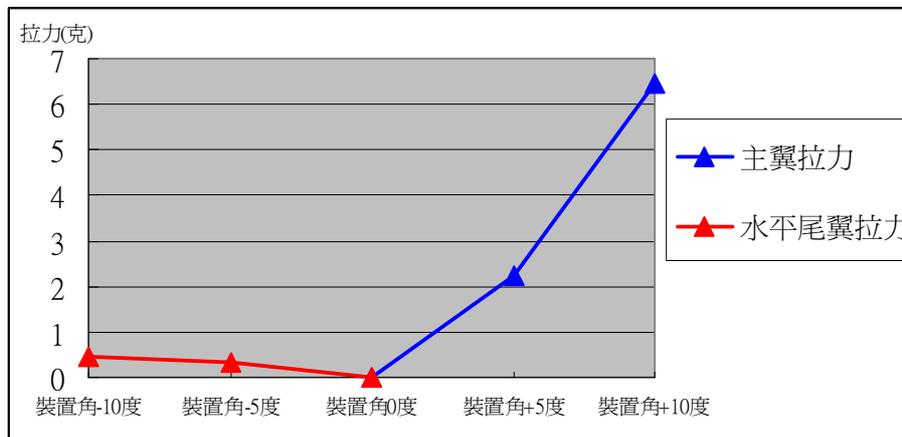
- 1、將裝置角為 0 度、+5 度、+10 度的**主翼**與**部分機身**結合放入自製風洞，在部分機身的兩邊黏上細管並用鋼線插入做為軌道，中央的部位連接細線通過滑輪，末端綁上 10 克砝碼，並在電子秤上測量重量。在此實驗中，我們測量風扇打開之前與之後砝碼的重量差，並將其差值定義為此條件下的**拉力**。
- 2、將裝置角為 0 度、-5 度、-10 度的**水平尾翼**與**部分機身**結合，實驗步驟同上，但為求實驗操作及觀察方便，故將水平尾翼 180 度反向放置，如此才能產生拉力讓砝碼減輕重量。



(二)實驗結果：

主翼的仰角	0 度	+5 度	+10 度
原始砝碼重	10.0	10.0	10.0
後來砝碼重	10.0	7.76	3.55
拉力	0.00	2.24	6.45

水平尾翼的俯角	0 度	-5 度 (反向為+5 度)	-10 度 (反向為+10 度)
原始砝碼重	10.0	10.0	10.0
後來砝碼重	10.0	9.67	9.54
拉力	0.00	0.33	0.46

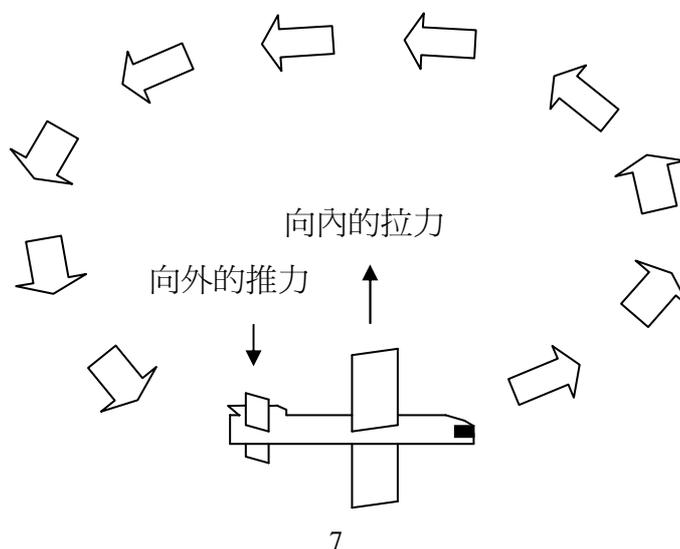


★發現與討論：

- 1、當主翼或水平尾翼的裝置角不為 0 度時，就會產生一個拉動砝碼的力量。
- 2、當裝置角越大時，所產生的拉力也越大。
- 3、以主翼裝置角+5 度和水平尾翼裝置角-5 度時，或是主翼裝置角+10 度和水平尾翼裝置角-10 度時來比較，因為面積大小的關係，所以主翼的拉力明顯比水平尾翼大。

三、分析珍珠板飛機迴旋的原理

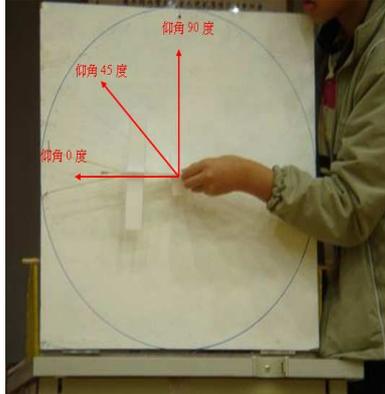
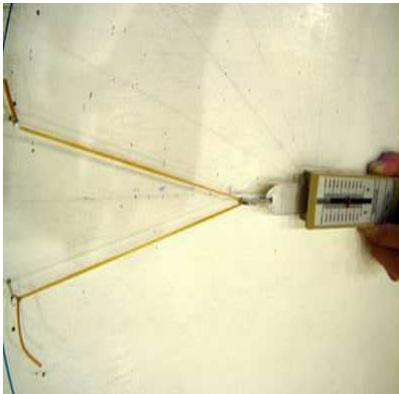
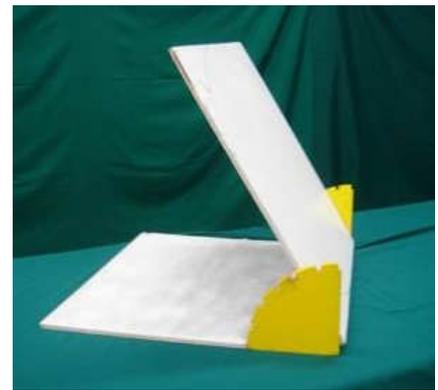
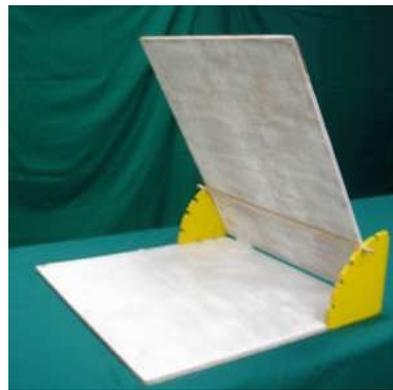
- 1、當珍珠板飛機的機身傾斜 90 度時，若主翼的裝置角為正，在此稱為仰角(例如：+5 度、+10 度)，前面實驗結果得到會產生一個拉力，這個力量會成為轉彎時所需的向心力，從整體來看就好像有一個向內的拉力，使飛機轉彎。
- 2、同樣的原理，若水平尾翼的裝置角為負，在此稱為俯角(例如：-5 度、-10 度)，就會產生一個向外的推力，這個力會產生力矩，使飛機轉彎。



★探討三：改變「主翼或水平尾翼的裝置角」對飛機迴旋的影響？

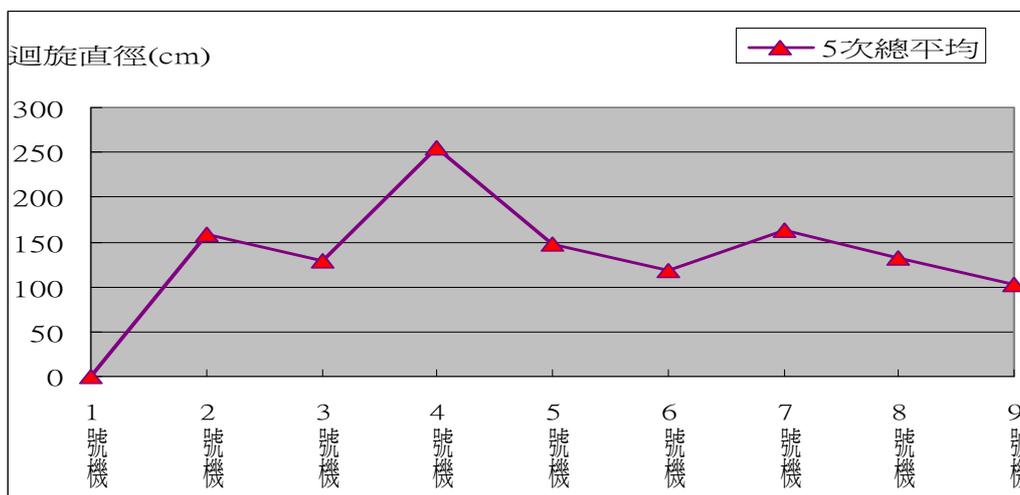
(一)做法：

- 1、由於人力發射飛機不能精準的控制角度，為了實驗需求，我們思考討論了很久，才製作出二維空間的飛機發射平台，並以木條協助做為卡榫來調整飛機機身的傾斜角(0 度~90 度)。以量角器畫出發射的仰角(0 度~90 度)、橡皮筋用鐵釘固定，並用彈簧秤設定發射的力量。
- 2、將飛機的機身傾斜角定為 90 度、發射仰角定為 0 度、發射力量定為 200 克。
- 3、將飛機主翼的仰角(0 度、+5 度、+10 度)及水平尾翼的俯角(0 度、-5 度、-10 度)配對成 9 組，以發射平台來發射飛機 5 次，並用布尺、尼龍繩測量迴旋直徑。



(二)實驗結果：

	1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機	6 號機	7 號機	8 號機	9 號機
主翼及水平尾翼的裝置角(度)	(0,0)	(+5,0)	(+10,0)	(0,-5)	(+5,-5)	(+10,-5)	(0,-10)	(+5,-10)	(+10,-10)
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	0	157.94	128.58	254.28	147.4	118.78	163.56	132.02	102.68



★發現與討論：

- 1、若主翼的仰角和水平尾翼的俯角都是 0 度(如 1 號機)就無法迴旋飛回來。
- 2、迴旋直徑最大的是 4 號機，而最小的是 9 號機。
- 3、因為主翼的仰角或水平尾翼的俯角越大，例如 9 號機(+10, -10)，所產生的拉力或推力就會越大，迴旋直徑就會越小。

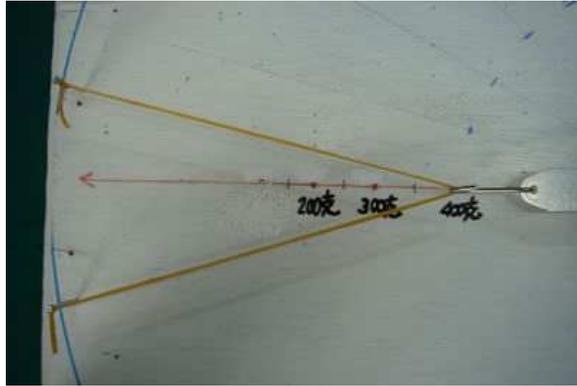
(Ps：因為 7 號機有比較穩定的迴旋飛行，而且設計單純，只有水平尾翼有俯角(-10 度)，故採用為以後各個實驗的原型機。)

★探討四：改變「發射力量」或「加上螺旋槳」對飛機迴旋的影響？

一、改變飛機的發射力量

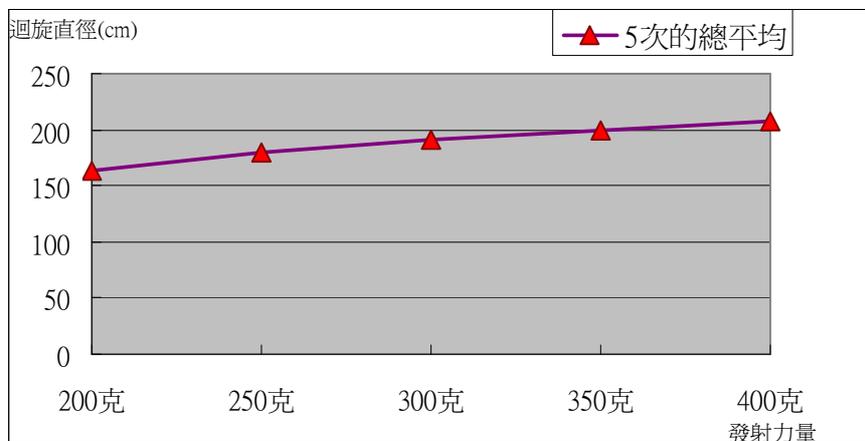
(一)做法：

- 1、將橡皮筋用鐵釘固定兩端，並用彈簧秤測出彈力分別為 200~400 克的位置。
- 2、使用原型機、傾斜角固定為 90 度、發射仰角固定為 0 度，改變不同的發射力量進行實驗，並將結果記錄在表格中。
- 3、在每 2~3 次的發射後，均使用彈簧秤再檢查一次橡皮筋的力量，避免橡皮筋的彈性疲乏而造成實驗的誤差。



(二)實驗結果：

發射力量	200 克	250 克	300 克	350 克	400 克
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	163.56	179.64	191.04	199.02	206.66



★發現與討論：

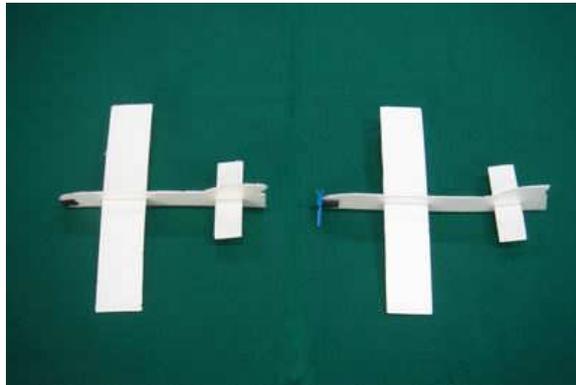
- 1、發射力量越大，飛機的迴旋直徑越大；反之越小。
  - 2、因為發射力量越大，飛機的飛行慣性就越大，水平尾翼的力矩就越不容易改變飛機的直線路徑，來讓飛機轉彎，但飛機最後還是會迴旋回來，只是迴旋直徑會變大。
- (ps：因為 400 克的發射力量，飛機迴旋的穩定度和效果很好，故之後的各個實驗都以 400 克的力量發射。)

## 二、飛機加上螺旋槳

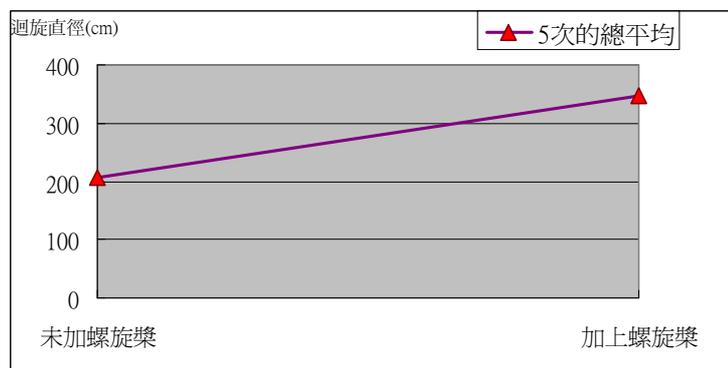
(一)做法：

- 1、使用未加螺旋槳的原型機做為對照組，加上螺旋槳的原型機做為實驗組。
- 2、兩組同時以機身傾斜角 90 度、發射仰角 0 度、發射力量 400 克，進行試射，並將結果記錄在表格中。

(二)實驗結果：



有無螺旋槳	未加螺旋槳	加上螺旋槳
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	206.66	347.2



★發現與討論：

- 1、加上螺旋槳的原型機，迴旋直徑有明顯的增大，而且飛行的時間變久，也更穩定。
- 2、因為加上螺旋槳之後，飛機多了一個飛行動力，飛行的慣性也越大，水平尾翼的力矩就越不容易改變飛機的直線路徑，來讓飛機轉彎，所以迴旋直徑會變大。

## ★探討五：改變「機身傾斜角」或「發射仰角」對飛機迴旋的影響？

### 一、改變飛機的機身傾斜角

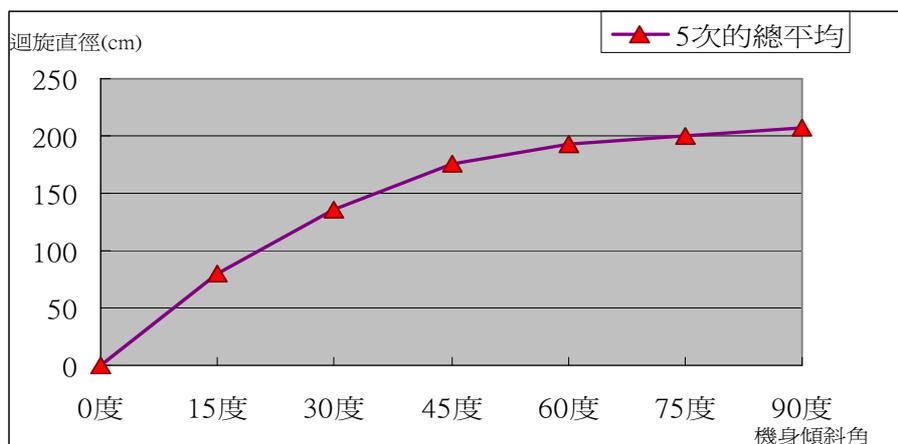
(一)做法：

- 1、將飛機發射平台的傾斜角，設定為 0~90 度。
- 2、使用原型機、發射仰角固定為 0 度、發射力量固定為 400 克，進行試射，並將結果記錄在表格中。



(二)實驗結果：

機身傾斜角	0 度	15 度	30 度	45 度	60 度	75 度	90 度
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	0	80.48	135.72	176.1	192.44	200.62	206.66



### ★發現與討論：

- 1、當機身傾斜角為 90 度時，飛機會有最大的水平迴旋直徑。
- 2、當機身傾斜角為 0 度時，飛機為向上飛行，雖然也能飛回原處，但以水平的方向來看，水平的迴旋直徑是 0。
- 3、因為原型機很輕(全重只有 2.63 克，含配重和發射彎勾)，所以飛機本身的重量影響很小。而每次的發射力量相同(400 克)，所以原型機的水平尾翼每次產生的推力都一樣，形成的圓圈大小也一樣。但機身傾斜角越大(如 90 度)，迴旋形成的圓圈從水平的方向來看，迴旋直徑會越大。

## 二、改變飛機的發射仰角

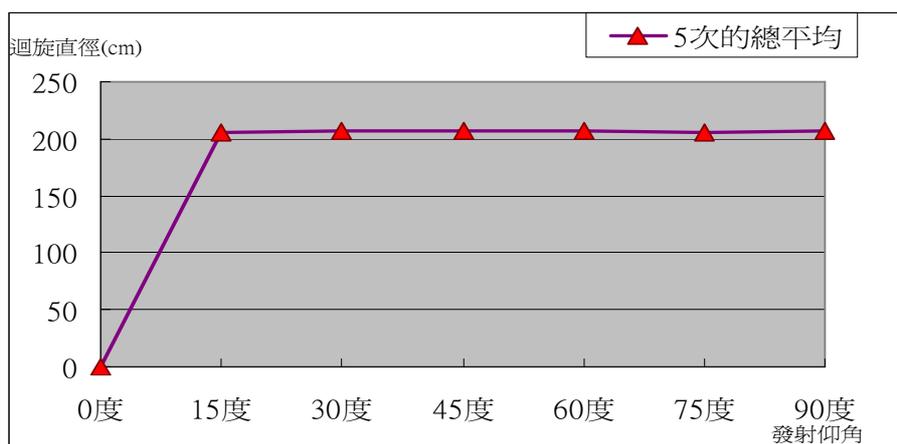
(一)做法：

- 1、將飛機發射平台的發射仰角，設定為 0~90 度。
- 2、使用原型機、傾斜角固定為 90 度、發射力量固定為 400 克，進行試射，並將結果記錄在表格中。



(二)實驗結果：

發射仰角	0 度	15 度	30 度	45 度	60 度	75 度	90 度
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	0	205.28	206.48	207.06	206.42	204.82	206.66



★發現與討論：

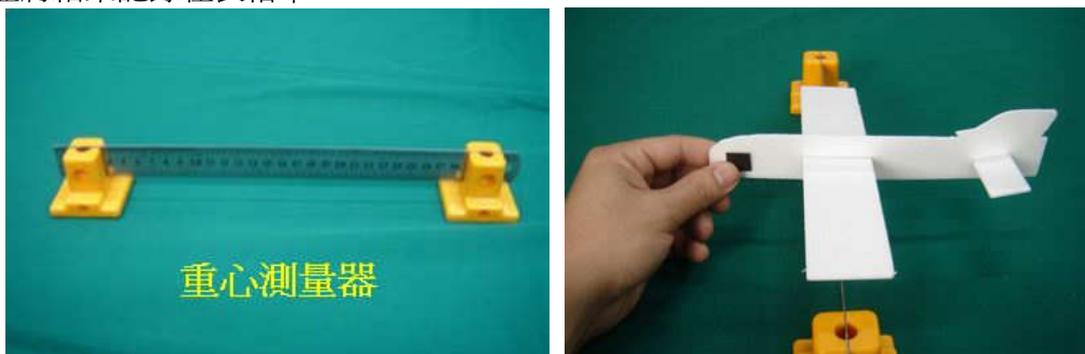
- 1、發射仰角不管是幾度，迴旋直徑都沒有顯著差異。
- 2、因為發射力量相同，原型機的水平尾翼推力形成的圓圈大小相同，所以發射仰角不管是幾度，從水平的方向來看，迴旋直徑都接近相同。

★探討六：改變飛機的「重心位置」或「機首配重」對飛機迴旋的影響？

一、改變飛機的重心位置

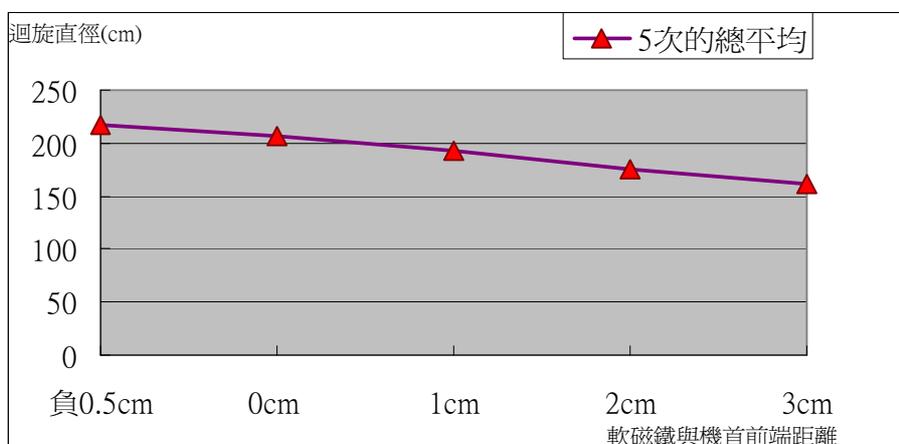
(一)做法：

- 1、將原型機放在自製的重心測量器上，當飛機達到平衡時，支點的位置可以看成是重心的位置。
- 2、改變軟磁鐵(兩片各 0.5 克)與機首前端的距離，分別定為負 0.5cm~3cm，則飛機的重心位置也隨之改變。
- 3、將飛機的傾斜角固定為 90 度、發射仰角固定為 0 度、發射力量固定為 400 克，進行試射，並將結果記錄在表格中。



(二)實驗結果：

軟磁鐵與機首前端的距離	負 0.5cm	0cm (原型機)	1cm	2cm	3cm
飛機的重心位置距機首前端的距離	5.8cm	6.1cm	6.6cm	7.1cm	7.7cm
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	216.94	206.66	193.1	175.12	161.08



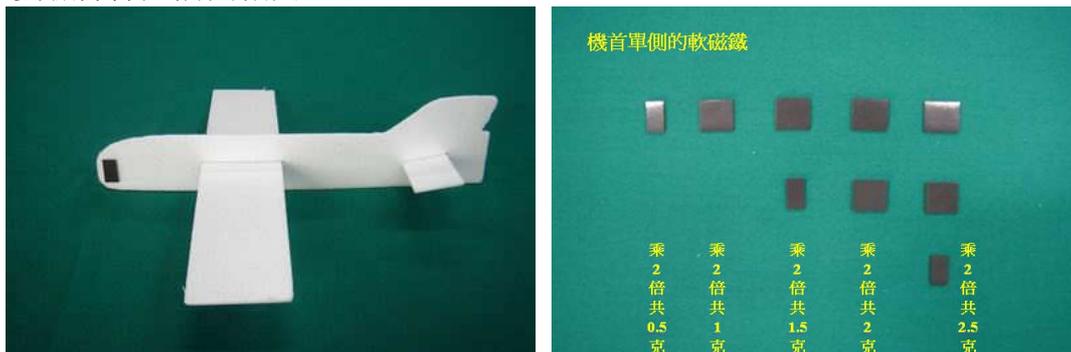
★發現與討論：

- 1、軟磁鐵與機首前端的距離越遠，即重心位置越往後，飛機的迴旋直徑就會越小；反之越大。
- 2、因為飛機的重心位置越往後，此時水平尾翼的力矩就越容易讓飛機轉彎，所以飛機的迴旋直徑會變大。

二、改變飛機的機首配重

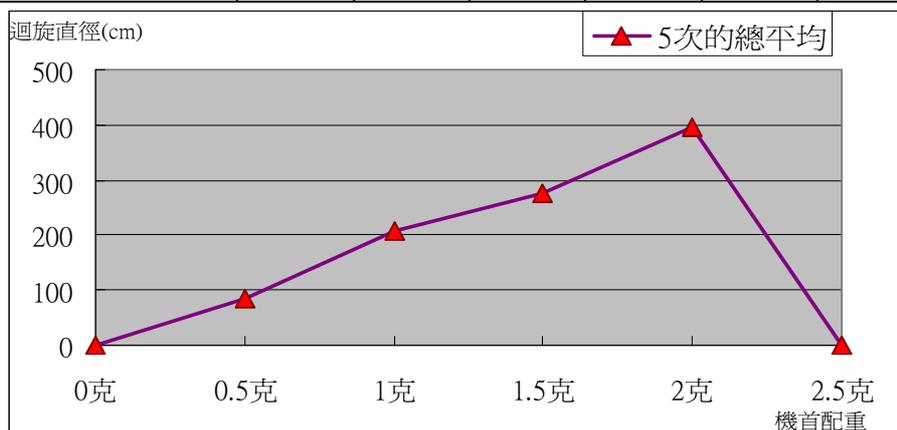
(一)做法：

- 1、改變原型機機首上的軟磁鐵重量，分別為 0 克~2.5 克。
- 2、其他實驗條件與前面相同。



(二)實驗結果：

機首配重	0 克	0.5 克	1 克 (原型機)	1.5 克	2 克	2.5 克
飛機的重心位置距機首前端的距離	10.1cm	6.8cm	6.1cm	5.4cm	4.2cm	3.7cm
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	0	84.78	206.66	274.6	394.94	0



★發現與討論：

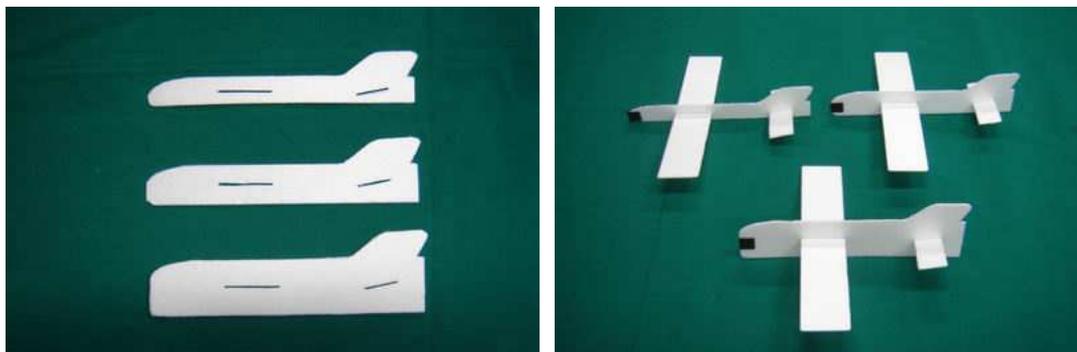
- 1、機首配重越重，飛機的迴旋直徑越大。
- 2、當機首配重為 2.5 克時，飛機無法飛回；而當機首配重為 0 克時，飛機會在空中翻滾，無法正常飛行。
- 3、機首配重越重，一方面飛機的重心位置往前，另一方面，飛機的重量增加，飛行慣性也隨之增加，所以水平尾翼的力矩就越不容易讓飛機轉彎，迴旋直徑就會變大。

★探討七：改變飛機的「機身高度」或「機身長度的」對飛機迴旋的影響？

一、改變飛機的機身高度

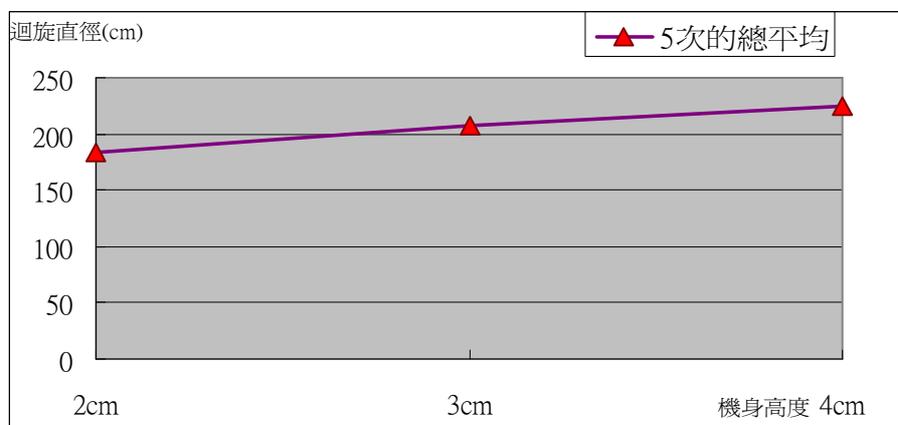
(一)做法：

- 1、改變飛機機身的高度，分別定為 2cm、3cm、4cm。
- 2、將飛機的傾斜角固定為 90 度、發射仰角固定為 0 度、發射力量固定為 400 克，進行試射，並將結果記錄在表格中。



(二)實驗結果：

機身高度	2cm	3cm (原型機)	4cm
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	183.34	206.66	225.08



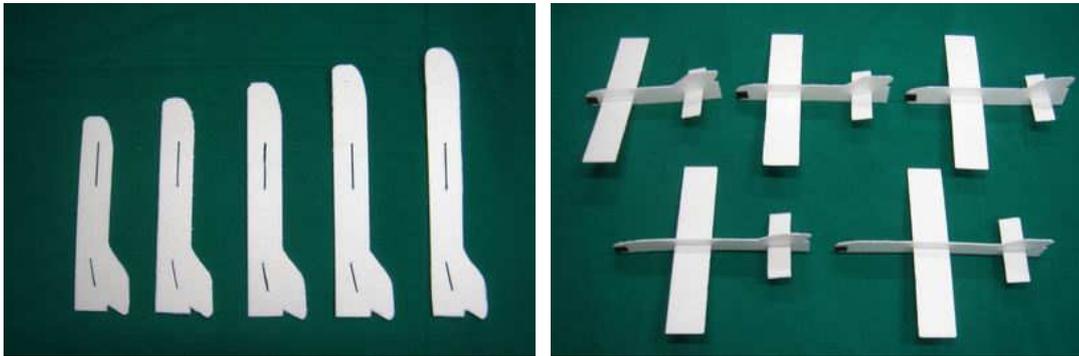
★發現與討論：

- 1、飛機的機身高度越大，飛機的迴旋直徑越大；反之越小。
- 2、因為機身高度越大，會增加飛機的重量，飛行慣性也會增加，所以迴旋直徑會變大。

## 二、改變飛機的機身長度

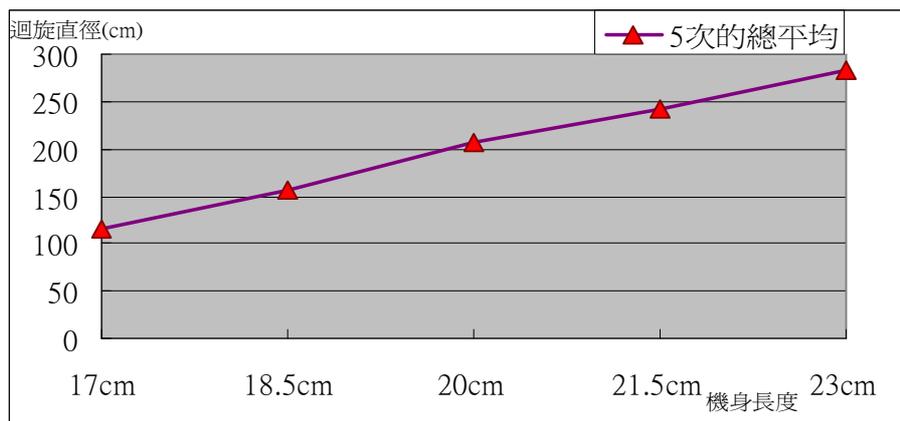
(一)做法：

- 1、改變飛機的機身長度，分別定為 17cm~23cm。
- 2、其他實驗條件與前面相同。



(二)實驗結果：

機身長度	17cm	18.5cm	20cm (原型機)	21.5cm	23cm
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	115.26	157.3	206.66	243.04	282.36



★發現與討論：

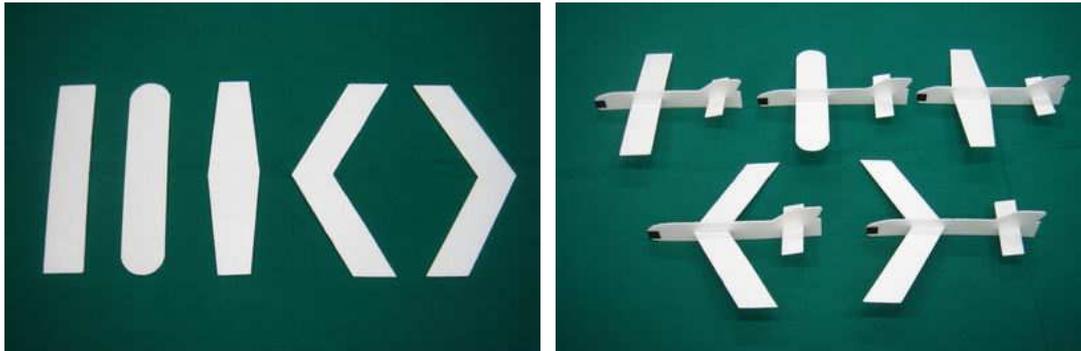
- 1、飛機的機身長度越長，飛機的迴旋直徑越大；反之越小。
- 2、因為機身長度越長，會增加飛機的重量，飛行慣性也會增加，所以迴旋直徑會變大。

★探討八：改變飛機主翼的各種條件對飛機迴旋的影響？

一、改變飛機的主翼翼型

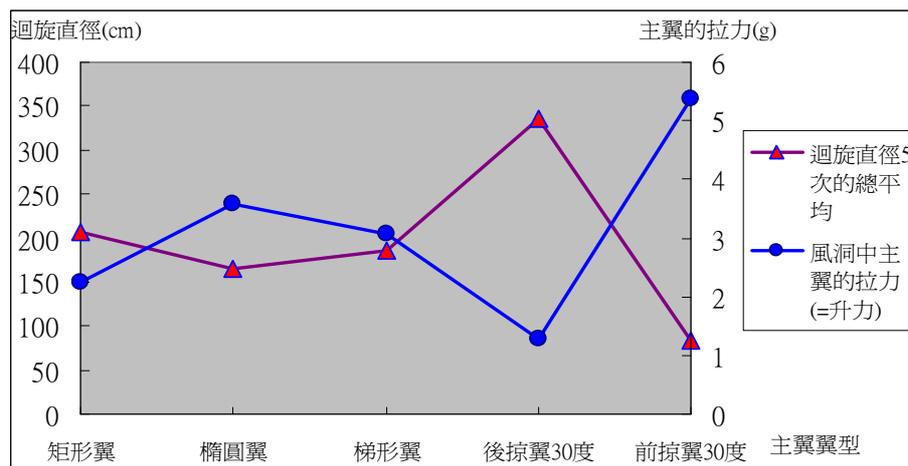
(一)做法：

- 1、為避免改變主翼翼型後，會改變主翼的面積及重量，而增加變因的複雜性。故經過計算後，**固定所有飛機的主翼面積均為 80 cm<sup>2</sup>**，並將珍珠板形狀裁切成下列的翼型。
- 2、將原型機的傾斜角固定為 90 度、發射仰角固定為 0 度、發射力量固定為 400 克，以不同的主翼翼型進行試射。
- 3、將各種主翼翼型與部分機身，以+5 度的裝置角放入風洞中測量拉力(=升力)，以模擬主翼在飛行改變角度時，在相同的條件下所會受到的力量。



(二)實驗結果：

主翼翼型	矩形翼 (原型機)	橢圓翼	梯形翼	後掠翼 30度	前掠翼 30度
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	206.66	164.8	186.3	336.32	83.76
主翼在風洞中測得的拉力(=升力) (g)	2.24	3.58	3.07	1.27	5.38



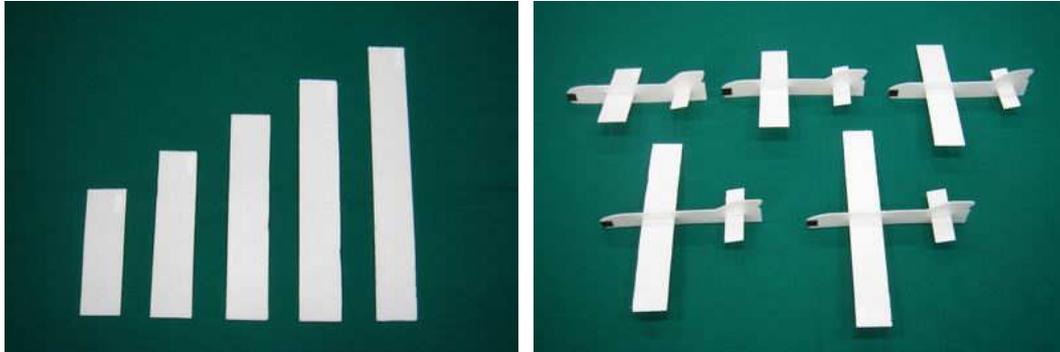
★發現與討論：

- 1、後掠翼 30 度的迴旋直徑最大，前掠翼 30 度的迴旋直徑最小。
- 2、在矩形翼、橢圓翼和梯形翼三者中，以矩形翼的迴旋直徑最大，梯形翼次之，橢圓翼最小。
- 3、主翼在風洞中測得的**拉力大小**分別為：**前掠翼 30 度**>橢圓翼>梯形翼>矩形翼>**後掠翼 30 度**；所以**迴旋直徑**以**前掠翼 30 度**最小，**後掠翼 30 度**的最大。

## 二、改變飛機的主翼展長

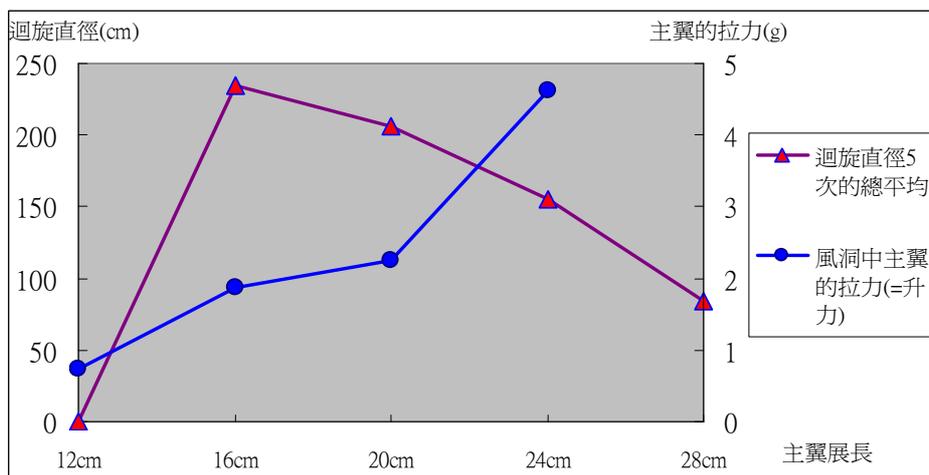
(一)做法：

為探討只改變「主翼展長」對迴旋直徑的影響。故固定所有飛機的主翼弦長均為 4cm，將主翼的展長定為 12cm~28cm，其他實驗條件與前面相同。(但因展長為 28cm 的主翼，超過風洞的高度，故未測量其拉力)。



(二)實驗結果：

主翼展長	12cm	16cm	20cm (原型機)	24cm	28cm
主翼展弦比	3	4	5	6	7
主翼面積	48	64	80	96	112
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	0	234.64	206.66	155.66	84.02
主翼在風洞中測得的拉力(=升力)(g)	0.73	1.87	2.24	4.62	未測量



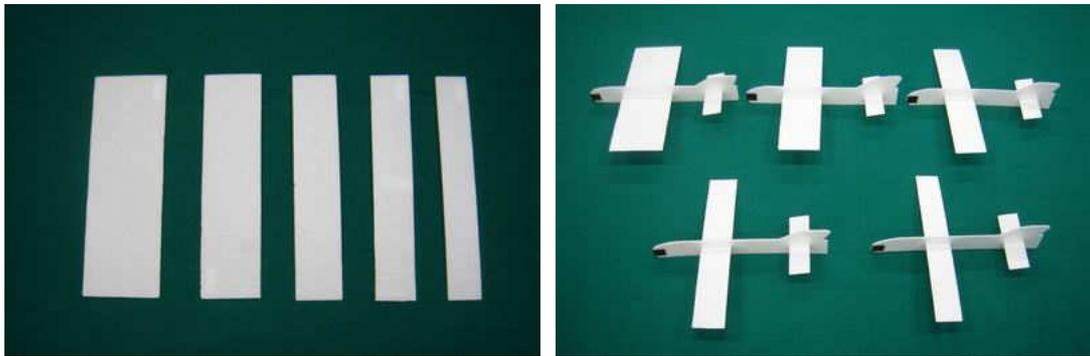
★發現與討論：

- 1、主翼的展長越長，則迴旋直徑越小；反之越大。
- 2、主翼的展長為 12cm 時，無法飛回，迴旋直徑為 0。
- 3、因為主翼展長變長時，會使主翼面積變大，拉力(升力)也會變大，故迴旋直徑會變小。

### 三、改變飛機的主翼弦長

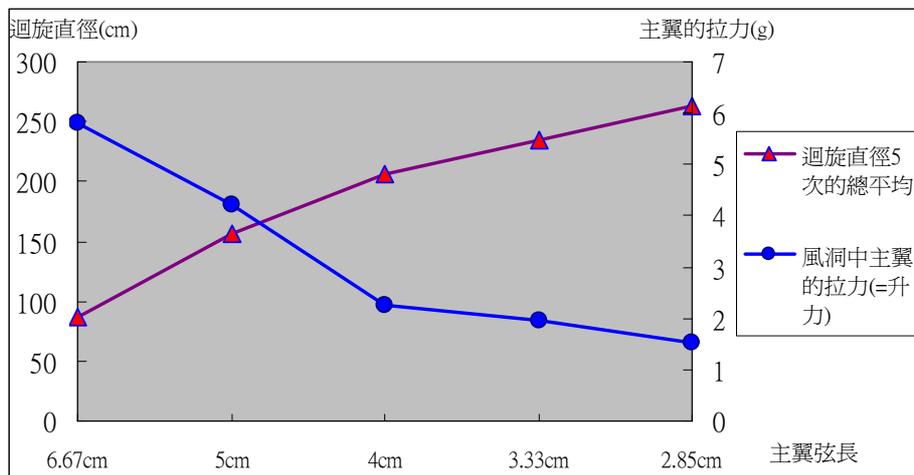
(一)做法：

為探討只改變「主翼弦長」對迴旋直徑的影響。故固定所有飛機的主翼展長均為 20cm，將主翼的弦長定為 2.85cm~6.67cm，其他實驗條件與前面相同。



(二)實驗結果：

主翼弦長	6.67cm	5cm	4cm (原型機)	3.33cm	2.85cm
主翼展弦比	3	4	5	6	7
主翼面積	133.4	100	80	66.6	57
迴旋直徑 5 次的總平均(cm)	86.06	156.42	206.66	234.84	263.24
主翼在風洞中測得的拉力(=升力)(g)	5.79	4.21	2.24	1.96	1.52



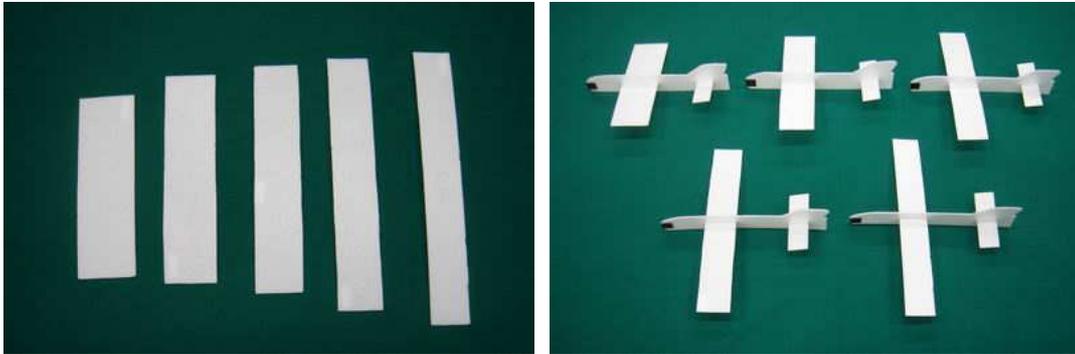
#### ★發現與討論：

- 1、主翼的弦長越短，則迴旋直徑越大；反之越小。
- 2、因為主翼弦長變短時，會使主翼面積變小，拉力(升力)也會變小，故迴旋直徑會變大。

#### 四、在固定的主翼面積下，改變飛機的主翼展弦比

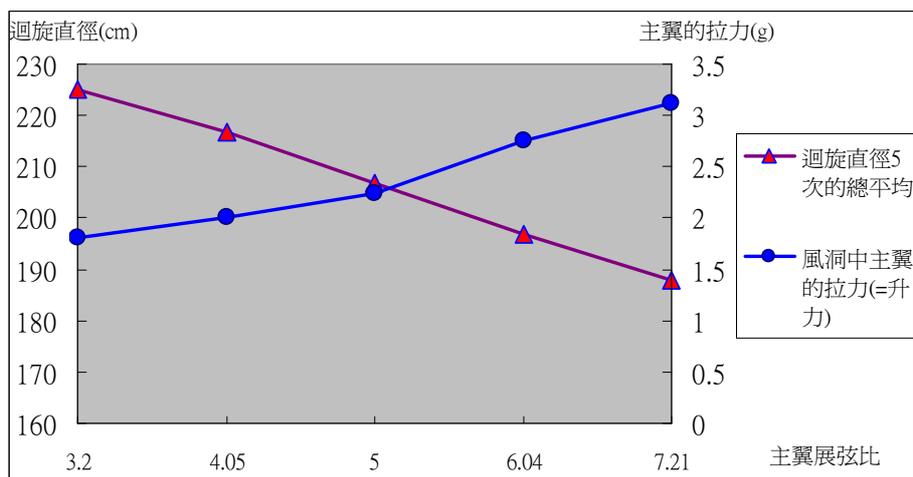
(一)做法：

- 1、為排除只改變主翼展長或弦長，同時也會改變主翼的面積及重量，而增加變因的複雜性。故經過計算後，固定所有飛機的主翼面積均為 80 cm<sup>2</sup>，並將主翼的展弦比定為 3.2~7.21，則可找出同樣條件下，展弦比對飛機迴旋直徑的影響。
- 2、其他實驗條件與前面相同。



(二)實驗結果：

主翼面積	80	80	80	80	80
主翼長× 主翼寬(cm <sup>2</sup> )	16×5	18×4.44	20×4 (原型機)	22×3.64	24×3.33
主翼展弦比	3.2	4.05	5	6.04	7.21
迴旋直徑 5 次 的總平均(cm)	224.94	216.7	206.66	196.98	187.9
主翼在風洞中測得 的拉力(=升力) (g)	1.80	2.01	2.24	2.76	3.12



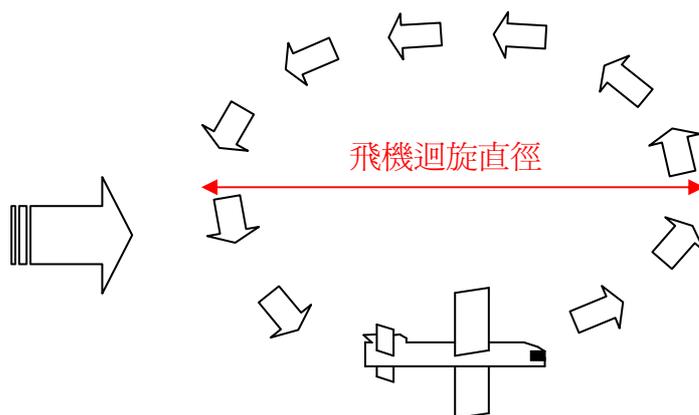
★發現與討論：

- 1、主翼的展弦比越大，則迴旋直徑越小；反之越大。
- 2、主翼在風洞中測得的拉力以展弦比 3.2 的主翼最小，故其迴旋直徑最大；展弦比 7.21 的主翼拉力最大，故其迴旋直徑最小。

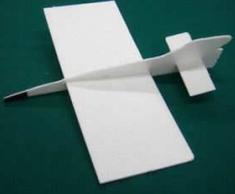
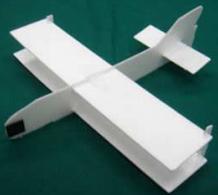
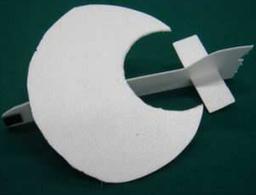
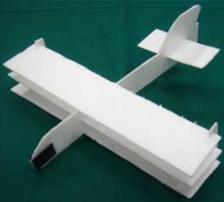
### ★探討九：設計迴旋飛機各種創意造型及技術玩法

前面探討三到探討八，都是以「飛機發射平台」來做定量實驗，但以實用及方便性來考量，應以「徒手」來擲射珍珠板飛機為佳。而為了增加創意性、趣味性及挑戰性，我們依據珍珠板飛機的迴旋原理及前面得到的數據結果，來增減飛機外型的各種參數條件，並研發出各種迴旋飛機的創意造型及徒手技術玩法：

代號	飛機外型的各種參數	原型機的參數條件
F1	主翼或水平尾翼的裝置角	(0, -10)
F2	有無加上螺旋槳	無
F3	重心位置	距機首 6.1cm
F4	機首配重	1 克
F5	機身高度	3cm
F6	機身長度的	20cm
F7	主翼的翼型	矩形翼
F8	主翼的展長	20cm
F9	主翼的弦長	4cm
F10	主翼的展弦比	5
F11	其他(如改變水平尾翼)	*



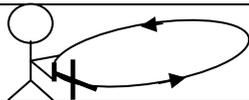
一、各種創意造型的可迴旋飛機

			
G1 號飛機：改變參數 F5、F11	G2 號飛機：改變參數 F2、F7	G3 號飛機：改變參數 F4、F6、F7、F11	G4 號飛機：改變參數 F4、F5、F9
			
G5 號飛機：改變參數 F7	G6 號飛機：改變參數 F7	G7 號飛機：改變參數 F7	G8 號飛機：改變參數 F4、F5、F8、F9、F11
			
G9 號飛機：改變參數 F1、F7、F11	G10 號飛機：改變參數 F1、F5、F7、F11	G11 號飛機：改變參數 F1、F5、F6、F7、F11	G12 號飛機：改變參數 F1、F3、F5、F6
			
G13 號飛機：改變參數 F1、F4、F5、F7	G14 號飛機：改變參數 F1、F3、F5、F6、F7	G15 號飛機：改變參數 F4、F7	G16 號飛機：改變參數 F8、F10

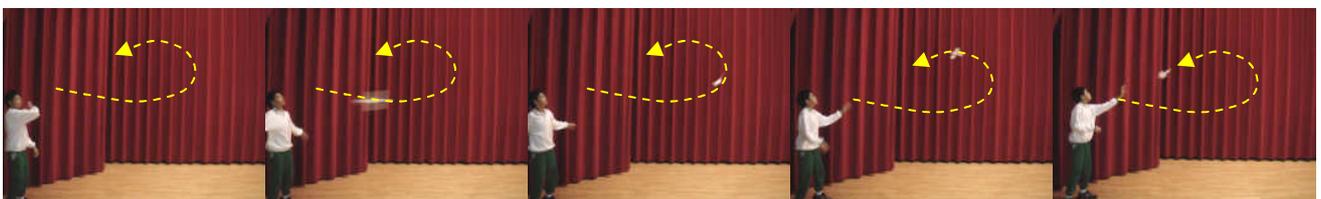
二、迴旋飛機的技術玩法

1、水平迴旋

【詳如視訊檔】

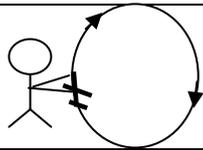


最基本的玩法，即手持飛機的重心下面，讓機身傾斜 90 度，由左至右擲，即可迴旋回來。

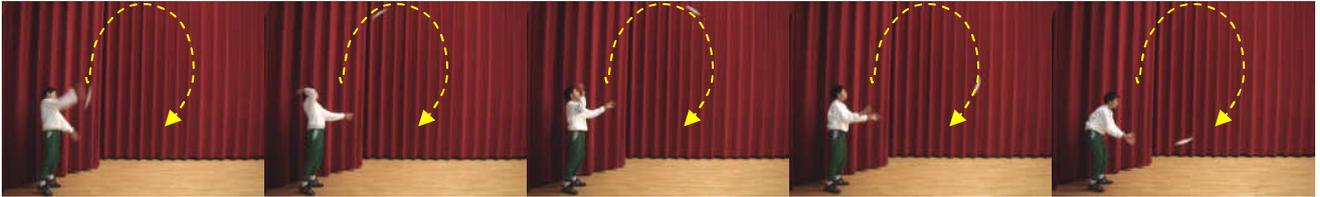


## 2、垂直迴旋

【詳如視訊檔】

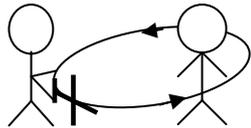


將飛機的機首向上，手持飛機的重心下面，讓機身的底部靠近投擲者的身體，並由下往上擲，即可垂直的迴旋回來。



## 3、繞人迴旋

【詳如視訊檔】

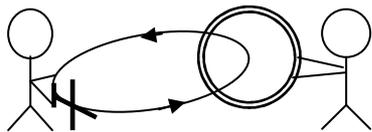


在前方 1.5 公尺處請一個人站立(或設立障礙物)，用水平迴旋的擲射方法，繞過人(或障礙物)又飛回手上，即為成功。

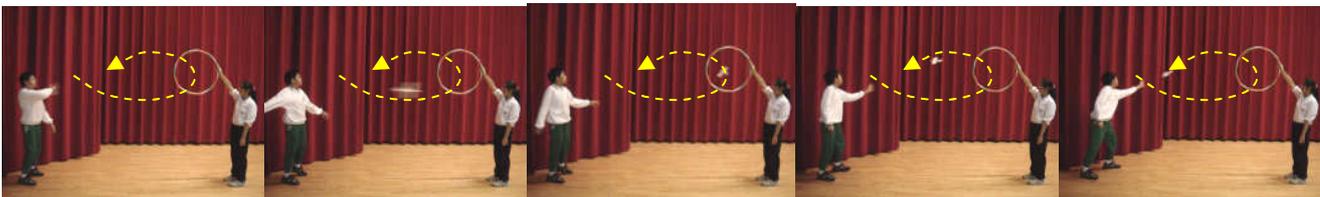


## 4、穿圈迴旋

【詳如視訊檔】

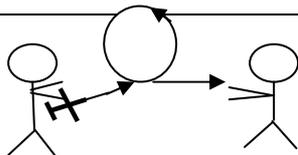


在前方 3 公尺處，垂直放置一個呼拉圈，用水平迴旋的擲射方法，繞過呼拉圈的中心，又飛回手上，即為成功。

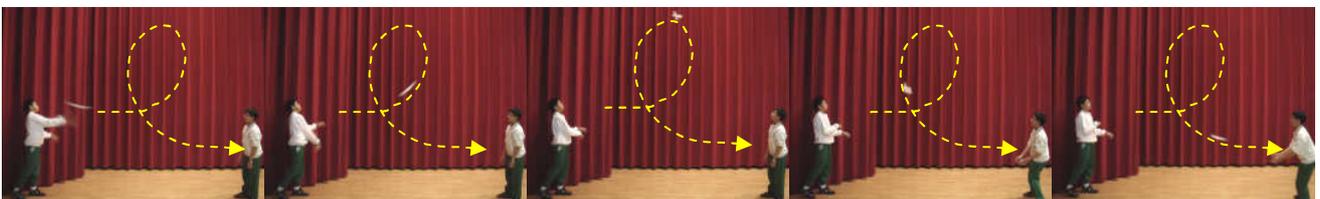


## 5、迴旋傳機

【詳如視訊檔】

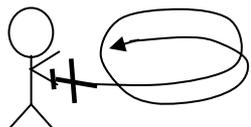


兩人站在相距 3 公尺處，手持飛機的重心下面，以一般射「紙飛機」的方式向前平射，飛機會在空中迴旋一圈後，到達對方手中。



## 6、雙圈迴旋

【詳如視訊檔】



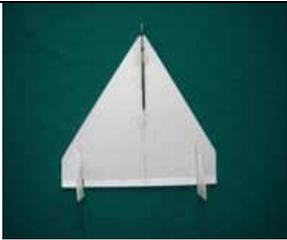
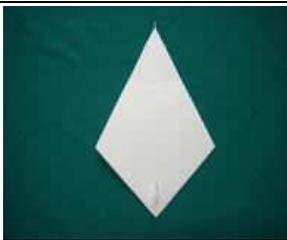
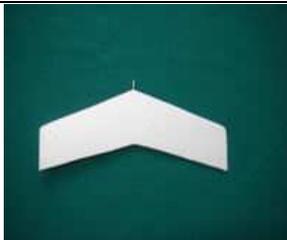
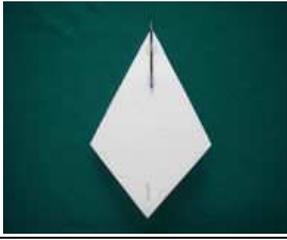
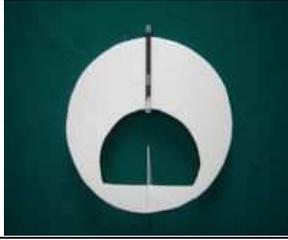
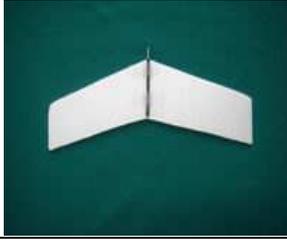
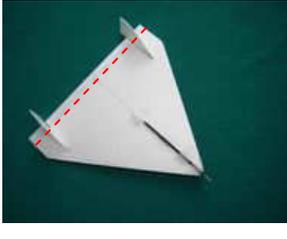
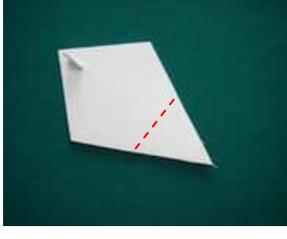
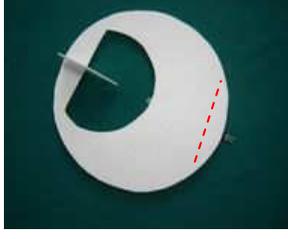
使用探討九之一所設計的 **G4 號創意造型飛機**，以水平迴旋的方式擲射，就能迴旋兩圈，再回到手中。



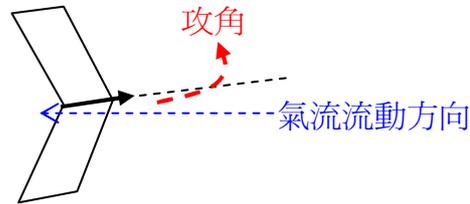
★ 探討十：如何活用迴旋原理，創造令人驚奇的迴旋奇機？

根據探討一和探討二，我們知道珍珠板飛機會迴旋的原理，是因為飛機的主翼或尾翼有角度，在飛行時會使空氣分子撞擊到機翼而產生升力，又因為機身傾斜，這個升力會轉換成向心力，而使飛機迴旋回來。

但是我們很好奇只有傳統機型的飛機(有主翼+水平尾翼+垂直尾翼+機身)才能迴旋回來嗎？所以我們又參考一些在空中能飛行的物體，而創造了其他四種完全不同的特殊機型：

機型	一、三角翼機	二、鳶形機	三、圓形機	四、飛翼機
參考物體	飛行傘的外型	風箏的外型	飛盤的外型	迴力鏢的外型
正面圖				
背面圖				
迴旋原理	 因為尾端有往上摺。 【詳如視訊檔】	 因為前端有往上摺。 【詳如視訊檔】	 因為前端有往上摺。 【詳如視訊檔】	 因為用手擲射時，機翼有攻角(見附註 4)。 【詳如視訊檔】
★發現與討論：	<p>1、三角翼機、鳶形機和圓形機，都是因為機翼有往上摺，使得空氣分子撞擊到機翼尾端的上面或前端的下面，而產生一個推力或升力轉換成向心力而迴轉。</p> <p>2、理論上，對任何飛機來說只有機翼是必需的，所以去掉了機身和尾翼也是可行的；而飛翼機(或稱全翼機)是效率極高的飛機佈局形式，才能在沒有傳統機身、垂直尾翼、水平尾翼的條件下，還能迴旋回來。</p>			

3、根據探討八，得知當機翼隨著不同角度的變化，在空氣中運動時也會產生升力轉換成轉彎時的向心力。而飛翼機「簡潔」到只剩下主翼(沒有垂直尾翼、水平尾翼和傳統的機身)，它的重量減輕、阻力降低，並且加上其慣性小，還增加了飛行的機動性，所以當用手擲射飛機時，只要有一點點的攻角就能產生向心力，而且快速的迴轉回來。



★  
心得  
感想

原來只要一片 V 形的珍珠板，加上一小段原子筆芯，就能玩「迴旋奇機」的遊戲，這真的太令人驚奇了！這個結果是我們當初做這個題目時所想像不到的，而經過無數次的實驗和思考，我們終於解開「珍珠板飛機迴旋的密碼」了！！

## 伍、討論

- 一、本研究經過多次的修正，終於找到最適合實驗的**原型機**及**發射條件**，並**自製發射平台**讓飛機彈射出去，避免人為出力無法精準量化，而造成實驗誤差。
- 二、在**風洞實驗**中，我們讓飛機的部分機身傾斜 90 度，**模擬**迴旋飛機飛行時，當**主翼有仰角**或**水平尾翼有俯角**的情況下，會產生拉力或推力而產生轉彎的力量，讓飛機迴旋。
- 三、主翼的各種條件對飛機迴旋的影響，進一步的相關討論如下：
  - (一)**探討八之一**的飛機依機翼的平面形狀不同，可分為**平直翼**(矩形翼、橢圓翼、梯形翼)、**後掠翼**、**前掠翼**、**三角翼**四種，但因三角翼的翼型會改變整個飛機構造，使實驗產生新的變因，故不在**探討八之一**的實驗範圍內。
  - (二)雖然**主翼的仰角是 0 度**，但在迴旋過程中卻也扮演重要的角色，因為當機翼隨著不同角度度的變化，在空氣中運動時也會產生拉力(=升力)轉換成轉彎時所需的向心力，所以會影響飛機的迴旋直徑。
  - (三)根據理論計算翼展方向的壓力分布時可以發現，形狀越接近橢圓翼越可以減少**誘導阻力**(見附註 3)、梯形翼次之，而矩形翼誘導阻力最大(引自參考文獻 1，第 194 頁)。故**升力(拉力)比較**：橢圓翼>梯形翼>矩形翼；**迴旋直徑比較**：矩形翼>梯形翼>橢圓翼。
  - (四)與平直翼型的機翼相比，後掠翼的升力(拉力)較小，所以迴旋直徑最大。前掠翼的升力(拉力)最大，所以迴旋直徑最小。
  - (五)主翼面積減少(如**探討八之二**的**展長變短**或**探討八之三**的**弦長變短**)，升力(拉力)也會減小，故迴旋直徑會變大。
  - (六)**探討八之四**在同樣主翼面積下，**展弦比**越小，誘導阻力就越大(引自參考文獻 1，第 193 頁)，主翼產生的升力(拉力)越小，所以迴旋直徑越大。
- 四、在**探討九之一**的創意造型飛機中，我們意外的發現**G4 號飛機**能夠做「**雙圈迴旋**」的飛行，這是因為它的**機首配重減輕**(參數 F4)、**機身高度變小**(參數 F5)、**主翼弦長變大**(參數 F9)，造成飛機的**迴旋直徑**大幅減小，才能做如此的迴旋，再次印證了前面的實驗結果。
- 五、因為**飛翼機**是效率極高的飛機佈局形式，所以在用手擲射時，只要有一點點**攻角**，就能產生迴旋的力量使飛機迴旋，這是其他機型飛機在相同的攻角下所無法做到的。

- ※ 附註 1：**裝置角**(setting angle)：為機翼與飛機機身的夾角，若機翼**前緣向上**，我們在此定義為**正的角度(仰角)**，機翼**前緣向下**為**負的角度(俯角)**。
- ※ 附註 2：**展弦比**：展長為機翼的長度，弦長為機翼的寬度，則展弦比即為展長與弦長之比。
- ※ 附註 3：**誘導阻力**：機翼兩端的渦流產生的阻力，會減低機翼的升力。
- ※ 附註 4：**攻角**：機翼之翼弦與氣流流動方向的夾角。

## 陸、結論

### 一、如何讓珍珠板飛機迴旋？

- 1、在本研究中，如果要讓珍珠板傳統機型飛機(有主翼、水平尾翼、垂直尾翼、機身)做水平迴旋，發射時必須機身要有傾斜角，同時主翼要有仰角或水平尾翼有俯角，才能產生迴旋。
- 2、如果是特殊機型飛機(如三角翼機、鳶形機、圓形機)則要將機翼的尾端或前端往上摺，而且發射時必須機身要有傾斜角，才能迴旋。
- 3、如果是飛翼機，發射時機身也要有傾斜角，同時在手擲射時若有一點點攻角就會產生迴旋的力量，而讓飛機轉彎飛回來。

### 二、如何增加珍珠板傳統機型飛機的水平迴旋直徑？

- 1、讓主翼的仰角或水平尾翼的俯角變小。
- 2、增加發射力量或機首加上螺旋槳。
- 3、機身傾斜角加大，如 90 度。
- 4、重心位置移到前面或增加機首配重。
- 5、增加機身高度或長度。
- 6、主翼採用升力小的翼型，如後掠翼或矩形翼。
- 7、減小主翼的面積，如縮短展長或弦長。
- 8、若主翼面積相同，可採用展弦比較小的主翼。

### 三、本研究的特色：

- 1、題材新奇有趣，可引起遊戲者對科學原理的好奇心，而且擲射出去的飛機不用跑很遠去撿回來。
- 2、材料簡單、成本便宜(只要 1 片珍珠板、2 塊小軟磁鐵或 1 小段原子筆芯)，而且不用任何黏著劑，就能夠快速製作好一架迴旋飛機。
- 3、本研究以理論為基礎、以實作為根據，再加以風洞來模擬驗證。在三方的對照下，大大的增加了我們的信心和決心。
- 4、建議可應用在教學上，在教室內也可操作給學生看，來學習飛機飛行的原理；或是當成室內的健身遊戲來促進遊戲者的手眼協調和肌肉訓練，在下雨天的時候也可以在客廳裡玩；另外，它充滿創意和挑戰性，也可以當做舉辦科學競賽或科學營的遊戲項目之一。

### 四、未來展望：

本研究尚有許多變因未列入實驗，如副翼、升降舵、方向舵、上反角、飛機材質…等，是否會對飛機的迴旋有影響，這些問題有待以後再來繼續研究，以期發展出更精確、更完善的結果。

## 柒、參考文獻

- 1、小林昭夫(2003)。圖解飛機的構造與原理。世茂出版社。
- 2、王懷柱(2008)。揭開飛行的奧秘。全華出版社。
- 3、蕭舜鴻等(1996)。談紙神功-紙飛機的滑翔研究。中華民國第四十七屆中小學科展國中組理化科。

## **【評語】 080114**

1. 傳達能力頗佳，研究內涵能引發興趣。
2. 題材新穎有趣，實驗精神佳。
3. 建議增加各種發射面向的探討。
4. 建議研究樣本可再增加些。