

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作 品 名 稱：狂舞飛圈-簡單飛機的飛行動力研究

學校 / 作者：高雄市立高雄女子高級中學 葉芳君
 高雄市立高雄高級中學 蘇炫綱

作者簡介



我是葉芳君（左邊），目前就讀高雄女中三年級；我的興趣是畫圖和打羽球。我喜歡閱讀，也喜歡嘗試不同的新事物；文字可以帶我進入另一個開闊的世界天馬行空，也幫我拓展了視野，而不同的新體驗提供了我走下一步路的方向。

科展，是忙碌的高中生活中非常有意義的一次經驗；它不只僅僅是科學性質，更涵蓋的團員間互動的人文素養；雖然在實驗的過程中遇到不少挫折，但在老師的細心指導及同學的合作下都得以克服，也給予我獨立思考的機會。最後非常感謝在這段期間不斷給予我幫助及鼓勵的每一個人。



我是蘇炫綱，今年 18 歲，興趣廣泛，從音樂、篆刻書法到馬術與游泳！另外，自幼便因學科學的爸爸而接觸自然科學，對操作實驗也有濃厚的興趣與敏銳的直覺，求學的歷程中也一直摻雜著科展的元素！科展不但讓我學習到其中的知識，還有做事的堅持、負責的態度。研究的過程中，難免有阻礙、疑惑，但腦力激盪後的豁然，才是最後美麗的鑽石！

摘要

本實驗主要是探究雙圈圈簡單飛機的飛行原理，歸納圈圈結構對飛行距離、升力的影響，以及氣流流經機體時發生的作用。研究結果如下：

一、實際發射，歸納影響滑行距離的變因。

1. 前後圈直徑比值約為 0.8 時滑行距離為最大。
2. 前後圈寬度比值越接近 1 時，滑行距離越遠，但影響不大。
3. 圈圈間隔在 21cm 時，滑行距離最大。

二、設置風洞，模擬飛機飛行，測量升力

1. 圈圈寬度越大，升力越大。
2. 升力最大值出現在圈圈仰角 25 度左右，風速越快，升力越大。
3. 鋁片仰角在 20° 時升力最大，升力與角度的關係式為

$$F = 5 \times 10^{-7} \theta^4 + 4 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.0083 \theta^2 + 0.2615 \theta + 0.1374$$

4. 風速越快，升力越大，在仰角 20° 時升力與風速的關係大約為

$$F = 0.4579V^2 - 0.9231V + 1.4772。$$

5. 鋁片面寬每增加 1cm，升力也增加 0.1513gw。前後長每增加 1cm，升力即增加 0.1263gw。

三、設置蒸汽氣流，觀察簡單飛機的氣流場

1. 蒸汽流通過圈圈時，會發生附壁現象，而且簡單飛機使氣流往下偏折，飛機得到升力。

四、理論演繹：

1. 以康達效應的理論推算出升力，與實際測量得的升力約相等，驗證升力確實由康達理論造成。
2. 墊高簡單飛機前圈，使得軸線提高，確實影響了飛行距離，墊高 1cm 以內，飛行距離均增加了，以實際的改進證實升力確實是康達效應。

Abstract

This experiment mainly discusses the flying principle of the simple plane which is made up of a straw with two paper circles, one bigger than the other, stuck on both two ends of it. We first launched the simple plane actually and concluded the factors which influenced the sliding distance of the plane, including the distance between two circles, diameter and width of the two circles. Second, we set up a simple wind-tunnel and simulated the flight, in order to measure the strength of lift. Third, we set up the steam air flow and observed the change of the air current in the steam flow while flowing through the plane. The Phenomenon of Wall Enclosing happened and made the flows downward, and the plane gained the lift at the same time.

Finally, we deduced that there are two sources of lift and Benoulli's law is not suitable for it. The Coanda Effect can be applied to figure out 54 percent of lift. And the current, blocked by the plane, also offers some lift.

In order to prove that the Coanda Effect does effect, we padded the first circle to enlarge the angle of elevation of the axis of the two circles. It really affected the sliding distance of the plane. While the first circle is padded up within 1 cm, the sliding distance of the plane increases. Practical improvement proves that Coanda Effect accounts for the lift.

壹、研究動機

在一個非常熱鬧的街頭物理活動中，有一個研究主題，以一大一小的紙圈加上一支吸管構成的一架飛機吸引我們的注意，簡單的構造與不錯的穩定性讓我們非常好奇，尤其是兩個平凡的紙圈，手動發射後一定以小紙圈為機頭，平穩地滑行好長的距離；這刺激我們去想像、探討，是什麼因素造成滑翔所需的升力呢？

貳、研究目的

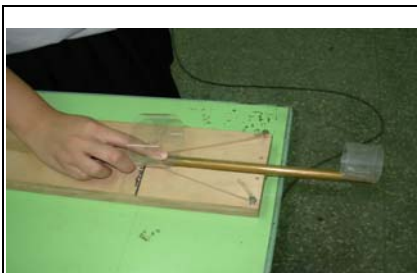
- 一、研究機體幾何結構與滑行距離的關係。
- 二、研究機體幾何結構與升力的關係（風洞中）。
- 三、觀察簡單飛機滑行時的氣流場。
- 四、探討簡單飛機滑行時的動力。

參、研究器材及裝置

一、實驗器材：

自製風洞	泡棉膠	電風扇	粗吸管	蒸餾水
變壓器	雙面膠	抽風機（50w）	沙子	美工刀
風速計	量角器	電子秤	投影片	尺
剪刀	鋁片	攝影機	黑布	迴紋針
膠帶	飛機木	照相機	黑紙	棉線
碼表	檯燈	蒸喉器	裁紙機	發射器
彈簧秤	粗橡皮筋	捲尺		

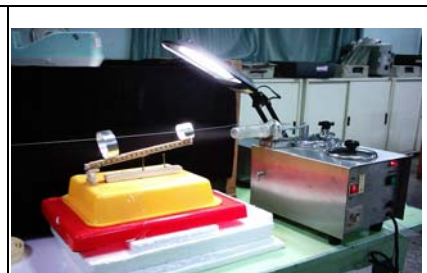
二、實驗裝置：



圖一：簡單飛機發射台



圖二：風洞中測量升力裝置



圖三：小型蒸汽機

肆、研究過程與結果：

※※研究過程一：探討機體幾何形狀與滑行距離的關係。

實驗設計：

操縱變因	測量變因	控制變因	備註
前後紙圈直徑	滑行距離	紙圈寬度、間隔	實驗一
前後紙圈寬度	滑行距離	紙圈直徑、間隔	實驗二
前後紙圈間隔	滑行距離	紙圈直徑、寬度	實驗三

一、實驗一：圈圈的直徑：

探討前後圈以不同直徑搭配，對飛機滑行距離的影響。

1. 實驗步驟：

- 將投影片裁成所需規格之長條狀，黏貼成圈圈。圈圈規格：寬度 2~5cm 以 0.5cm 遞增；直徑 2~6cm，以 1cm 遞增。
- 裝置如圖一。
- 以 21cm 長之吸管為飛行器之主軸，將所需之圈圈搭配黏貼於最前及最後端（後圓直徑 \geq 前圓），並在圈圈上黏貼迴紋針使總重皆相同。
- 以發射器發射簡單飛機（施力 280gw），另一人測量簡單飛機飛行距離，紀錄數據。

2. 實驗結果：(附件數據一)

- 由數據中發現，後圈的直徑趨大時，飛行距離呈現極小值。而滑行距離最大時，後圈直徑卻不是極小，因此再統合數據進行分析。

3. 進一步分析：為了找出滑行距離有最大值時的前後直徑比，於是將上面各數據的最大滑行距離時統計滑行距離與前後直徑比的關係。

5. 統計結果：(附件數據二)

- 各組數據分布趨勢幾乎相同，都存在相對極小值與相對極大值。
- 發現在各種寬度下前後直徑比值約為 0.8 時滑行距離為最大。

6. 討論：

- 一開始我們使用圖畫紙做圈圈，後來發現圖畫紙放久後會受潮，而且很容易變形，所以改成用塑膠片後發現效果還不錯！只是不同大小塑膠片重量差距太大，所以我們加迴紋針以保持總重。
- 測量距離時，原本我們在地上貼捲尺，然後目測飛機落地點再量取距離，後來我們在地上鋪沙子，飛機撞沙後會在沙地上撞出一個痕跡，測量距離很精確。
- 第一部分的數據顯示除了前圓直徑 6cm 的組別數值持續下降外，其餘都有出現最大值的波峰，這可能是因為前圓直徑 6cm 那組的圈圈太大，滑行時塑膠片會震動，造成滑行時的干擾，故氣流通過圈圈的升力無法對滑行距離造成明顯作用。

二、實驗二：圈圈的寬度

由實驗一的數據分析得知前後圓直徑比於 0.8 時為最佳，於是參考這個結果再設計實驗二，探討前後寬度不同搭配時與滑行距離之關係。

1. 實驗步驟：

- a. 前後圈圈直徑分別固定為 2cm 及 3cm，改變前後圈不同寬度搭配，且控制圈圈重量不變。由於考慮前後圓寬度直接影響兩圈間隔，可能也會對飛行間接造成的影響，故又分為三組實驗：
 - I. 固定圈圈外端間隔。
 - II. 固定圈圈中心間隔。
 - III. 固定圈圈內端間隔。
- b. 將投影片裁成所需規格之長條狀，黏貼成圈圈。圈圈規格：寬度 2~5cm（以 0.5cm 遞增），直徑固定為前後圓分別為 2cm 及 3cm。
- c. 裝置如圖一。
- d. 以 21cm 長之吸管為飛行器之主軸，將所需之圈圈搭配依外端、中心、內端三種控制距離之方法黏貼於吸管上的固定位子，並在圈圈上黏貼迴紋針控制總重。
- e. 將簡單飛機置發射器發射，測量滑行距離。

2. 實驗數據及分析：(附件數據一、二、三)

3. 實驗結果：

- a. 前後圈不同寬度，對滑行距離似乎看不出有明顯的影響。
- b. 本實驗已經控制簡單飛機的重量，未因減少圈圈寬度而使重量減少，假如不用迴紋針控制重量，減少圈圈寬度，會使得重量減輕而利於滑行的。

4. 進一步分析：統計飛行距離與圈圈前後寬度比值的關係。

5. 統計結果：(附件數據四)

- a. 前後寬度比值越接近 1 時，滑行距離越遠。
- b. 圈圈寬度似乎對簡單飛機滑行距離影響不大，只要圈圈可以維持穩定不晃動，可以減少它的寬度以減輕重量。

三、實驗三：圈圈的間隔

由數據分析後發現，前後寬度比值越接近 1 時，飛行距離越遠，且圈圈間間距不同時，對於飛行似乎會造成影響；於是取此結果及實驗一中前幾組較佳的前後圓直徑搭配組合，設計實驗三探討兩圓的間距改變，對於飛行距離之影響。

1. 實驗步驟：

- a. 將投影片裁成所需規格之長條狀，黏貼成圈圈。圈圈規格：前 2 後 3 寬 2、前 4 後 6 寬 4、前 3 後 4 寬 3、前 4 後 6 寬 2.5（單位 cm）。
- b. 裝置如圖一。
- c. 以 21cm 及 41cm 長之吸管為飛行器之主軸並於其畫上刻度，將所需之圈圈搭配黏貼於吸管之中央，並在圈圈上黏貼迴紋針控制使總重一樣，每次前後圈各往外移 0.5cm 使圈圈間距每次增加 1cm。
- d. 一人以發射器將飛行器發射（施力 280gw），另一人負責觀察飛行器於沙子上的降落點並紀錄數據。

2. 實驗數據及分析：(附件數據一)

3. 實驗結果：

- 兩圈間隔愈大，滑行距離數持續變長。
- 假如再增長間隔，滑行距離會怎麼改變呢？

4. 進一步分析：爲了更進一步的了解，簡單飛機的吸管增長爲兩倍，圈圈間距越大，滑行距離就越長？還是會有個最大值？

5. 實驗結果：(附件數據二)

- 由兩組數據可以看出，兩圈距離大約 21cm 時，飛行距離最遠。
- 吸管長度變長後，滑行距離都變小了，推測這可能是因爲吸管總重量變大的緣故。

四、研究過程一的研究結果：

- 圈圈的直徑比值大約在 0.8 時，滑行距離最大。
- 圈圈的寬度大致不影響滑行距離，但會影響總重量。
- 圈圈間隔在 21cm 時，滑行距離最大，但使簡單飛機重量增加，穩定性也變差。
- 以上結果均由數據歸納所得，至於其變化的細節，則設計簡易的風洞模擬簡單飛機的飛行，並測量其升力。

※※研究過程二：在風洞中模擬飛機飛行，探討機體幾何形狀與升力的關係。

一、實驗四：升力的觀察

由於簡單飛機在滑行時，既向前飛行，又會往下降，空氣流動方向相對於機體存在若干的角度，在風洞中以不同的風速模擬飛機速度，操縱飛機仰角，模擬氣流方向，以電子秤測量升力，簡單飛機在風洞中需要更穩定，因此使用薄鋁片裁製。

1. 實驗步驟：

- 將鋁片裁成所需規格之長條狀，黏貼成圈圈。鋁片圈圈規格：含直徑 2、6、10cm 及寬度 2、3、4、5cm 的圈圈。
- 見裝置圖二。
- 改變圈圈寬度及直徑，將單圈固定於電子秤上，啓動抽風機。
- 改變風扇供電電壓 130v、110v、90v、70v，風速改變，測量風速，觀察電子秤的重量變化，計算升力。

2. 實驗數據及分析：(附件數據一)

3. 實驗結果：(附件數據二)

- 圈圈仰角在 20~40 度之間的升力最大。
- 圈圈寬度愈大，升力越大。
- 空氣流速愈快，升力越大。
- 圈圈直徑越大，升力越大，而且成正比。
- 圈圈直徑小時，升力很小，仰角影響升力不顯著。
- 風速小時，升力的表現比較不規律。

4. 討論：

- 這是單一圈圈在風洞中的升力，但實際的飛機有兩個圈圈，因此下一個實驗我們會開始作雙圈的仰角與升力比較。

- b. 寬度愈大，升力越大；但由實際簡單飛機的觀察發現，圈圈寬度不影響射程，這一點值得關注。

二、實驗五：雙圈圈的升力

測量各仰角下氣流對雙圈所造成的升力，並和實驗四做比較，觀察相同角度時，氣流對單圈和雙圈組合所造成的升力有什麼差別。

1. 實驗步驟：

- a. 將鋁片裁成所需規格之長條狀，黏貼成圈圈。鋁片圈圈規格：含直徑 4、6cm 及寬度 2cm 的圈圈。
- b. 裝置如圖二。
- c. 改變圈圈形狀（寬度及直徑），將兩個圈圈固定於電子秤上，啟動抽風機。
- d. 於電壓 130v、110v、90v、70v 下測量升力。

2. 實驗數據及分析：(附件數據一)

3. 實驗結果：(附件數據二)

- a. 氣流通過兩個圈圈，一樣產生升力。
- b. 升力最大值出現在仰角 25 度左右，前 4cm，後 6cm 者最大升力的仰角角度比前後均 6cm 者稍小。
- c. 風速越快，升力越大。

4. 討論：

- a. 到底是什麼原因產生升力呢？氣體通過圈圈時，有什麼改變呢？
- b. 圈圈沒有機翼結構，只是簡單的塑膠片，厚度均勻，她如何改變氣流來產生升力呢？
- c. 爲了讓氣體看得見，所以找到了耳鼻喉科用的蒸喉器，它會以一定的速度噴出蒸汽(小水珠)，以它來代替氣流，通過時，觀察氣流的變化。

※※研究過程三：氣流看得見

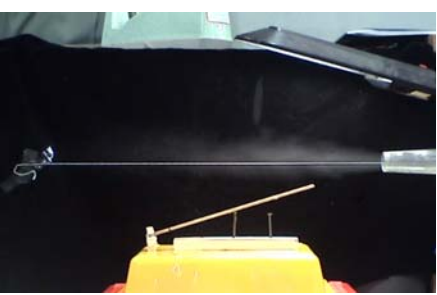
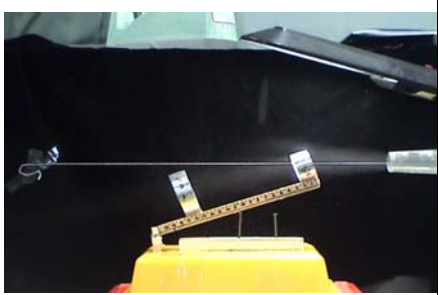
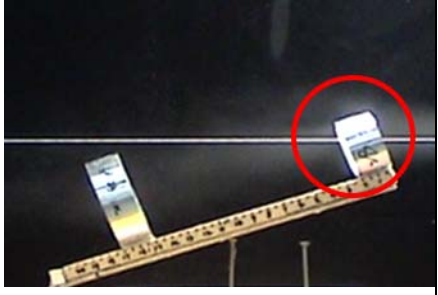
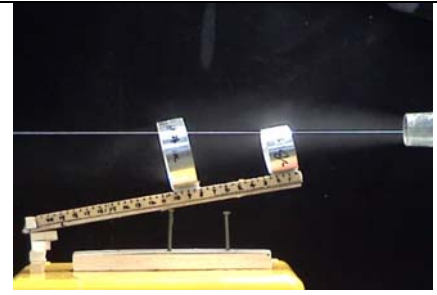

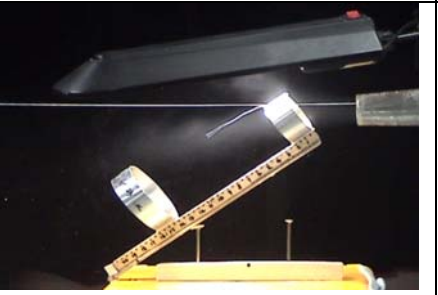
一、實驗六：簡單飛機飛行時的氣流

使用蒸喉器噴出的蒸汽(steam)來模擬氣流，既有速度，又看得見，蒸汽噴向簡單飛機，觀察蒸汽流的流動變化。

1. 實驗步驟：

- a. 以薄鋁片裁成所需規格之長條狀，黏貼成圈圈。鋁片圈圈規格：含直徑 2、6、10cm 及寬度 2、3、4、5cm 的圈圈。
- b. 簡單飛機模型放置在蒸汽前，裝置如圖三。
- c. 讓蒸汽從簡單飛機的上方，正中、下方觀察記錄蒸汽流的改變。
- d. 改變簡單飛機的仰角，重複步驟(3)，再觀察記錄蒸汽流的改變。

2. 實驗數據及結果：

		
蒸汽噴出時，與後方參考線對齊。	蒸汽噴向圈圈時，氣流的方向改變了，氣流彎向下方，通過第二個圈圈。	更進一些看，圈圈上方的蒸汽，附著圈面流動，偏離原來的方向，所以圈圈外圍集合顯著的蒸汽，流過後的蒸汽，奔向大圈圈。
		
簡易飛機仰角 10° 時，蒸汽很順利的通過後圈圈內部	簡易飛機仰角 20° 時，蒸汽也大部份通過後圈圈內部。	簡易飛機仰角 40° 時，蒸汽就無法順利的通過後圈圈內部。因此蒸汽偏折角度不是很大。

3. 結論：

- 蒸汽流通過圈圈時，附著圈圈的圈壁，方向往下偏折，蒸汽的動量向下改變，應該受向下的力作用，施力物就是圈圈(別無他物)，這個同時，圈圈也受到向上的反作用力。
- 這作用力真的存在嗎？再設計實驗測量。

二、實驗七：測量氣體附壁所產生的升力

氣體附著物體表面改變流動方向的偏折角度有極限嗎？

測量氣體流經物體表面，改變流動方向所產生的升力，並找出它和風速、角度的關係。

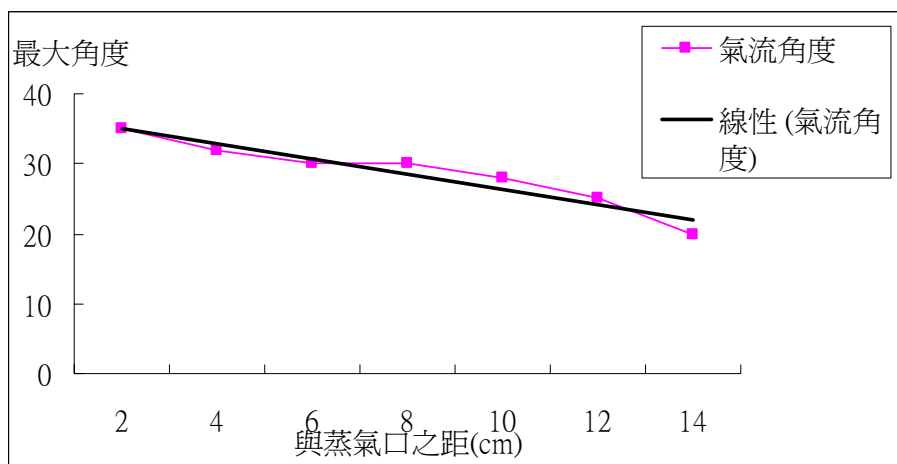
1. 實驗步驟：

- 以蒸汽吹向平板(薄鋁片)，轉動鋁片角度，使它面對蒸汽上仰，當蒸汽通過鋁片上方時，測量鋁片改變蒸汽方向的最大角度。
- 將一長方形鋁片(50cm^2)架設在電子秤上(如圖)，置入風洞中，以電壓控制風速，調整鋁片面向風向的仰角，測量升力。並比較升力與仰角、風速的關係。
- 控制風扇風速、鋁板仰角(20°)、長度，觀察升力與鋁板的面寬的關係。
- 控制風扇風速、鋁板仰角(20°)、面寬，觀察升力與鋁板的長度的關係。

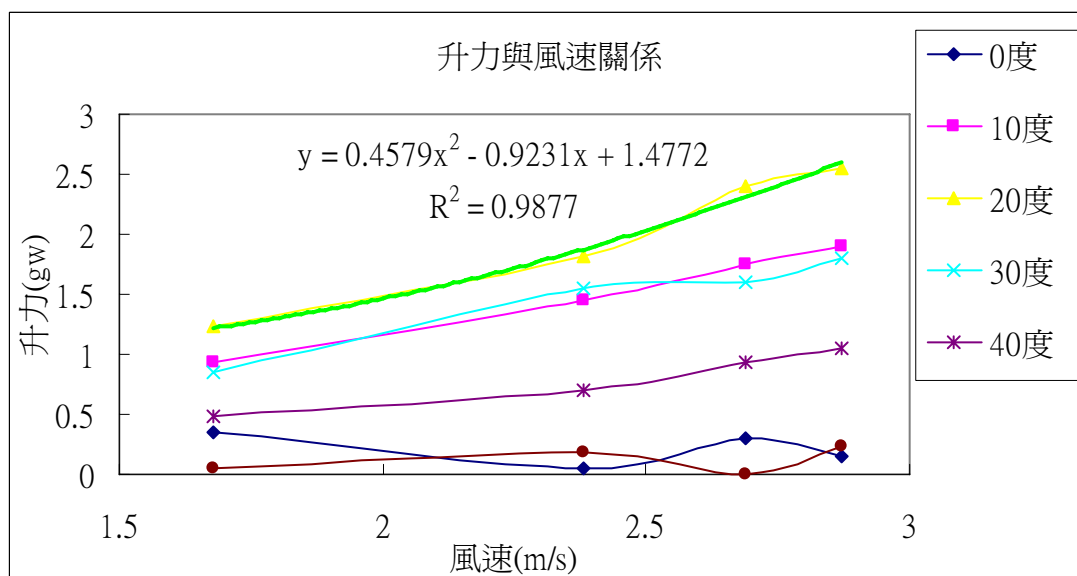
		
<p>鋁片架設在電子秤上，角度可以調整。</p>	<p>電子秤上方以薄木板隔絕氣流。</p>	<p>電子秤置入風洞中測量升力。</p>

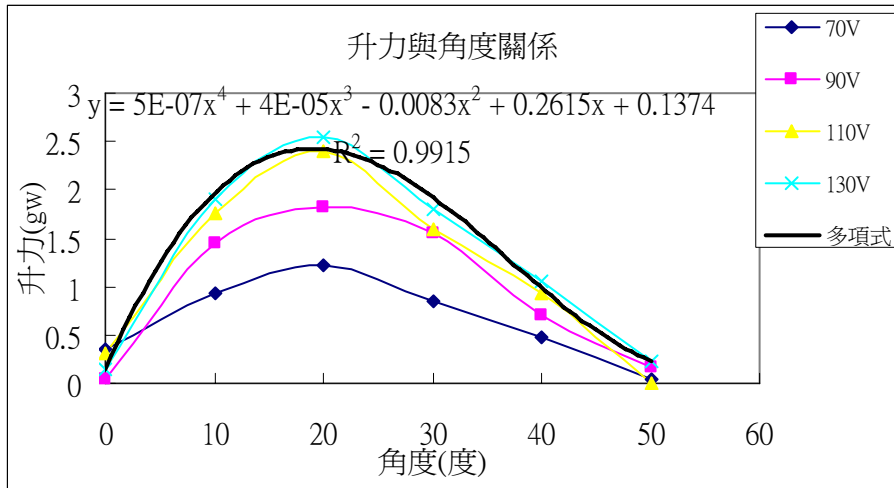
2. 數據與分析：

a. 在不同位置的最大蒸汽偏向角。

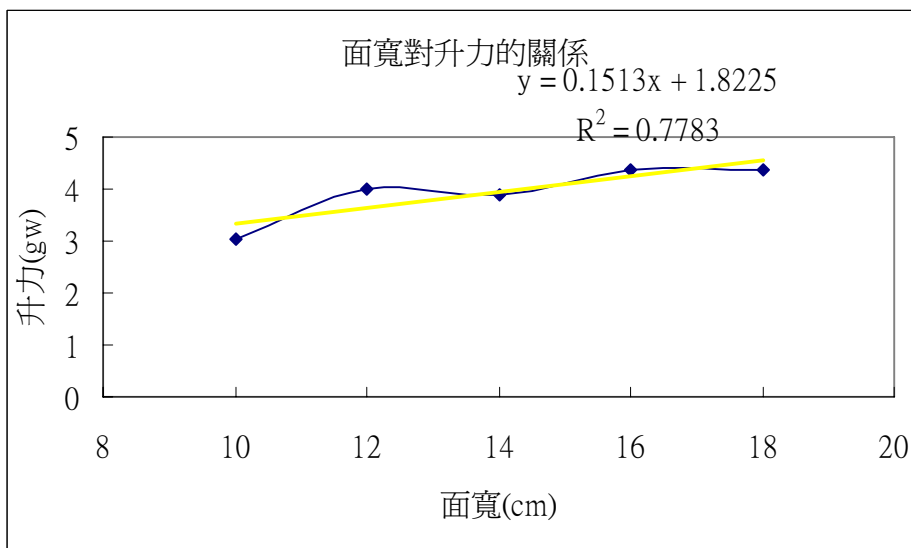


b. 風洞中的升力：

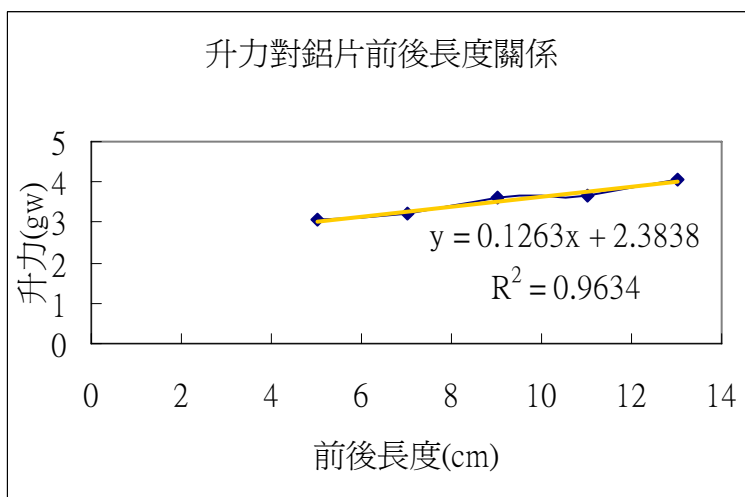




c. 面寬影響升力



d. 前後長度影響升力



3. 結論：

- 離蒸汽口越近，蒸汽速度越快，也越集中，而使附壁作用越強，最大可得 35° 偏折角度，當離開蒸汽口較遠時(最遠 14cm)，最大偏折角度大約為 25°。
- 風速愈快，升力越大，當鋁片仰角為 20° 時，升力是 0°~50° 範圍中升力的極大值，此時升力與風速的關係大約為

$$F=0.4579V^2-0.9231V+1.4772$$

數據和這函數的相關值 R， $R^2=0.9877$ 。

- 操作鋁片仰角，發現在 20° 角時升力最大，升力與角度的關係式為

$$F=5 \times 10^{-7} \theta^4 + 4 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.00830 \theta^2 + 0.2615 \theta + 0.1374 \quad \text{相關值 R，} R^2=0.9915$$

- 鋁片面寬增加，升力也增加，平均每增加 1cm，升力增加 0.1513gw。
- 鋁片前後長每增加 1cm，升力即增加 0.1263gw。

4. 討論：

- 實驗四中，我們測量了單一圈圈的升力，升力隨風速、仰角、直徑、寬度改變。
- 本實驗七中，升力亦與風速、仰角、前後長度、面寬有關。
- 為什麼升力和這些因素有關呢？就以附壁作用(又稱康達效應)為基礎作個推理吧！

三、理論演繹：

- 氣流以速度 v 流過鋁片時，設有厚度 y 米的氣體因附壁作用而改變方向 θ 角，鋁片面寬 x 米，前後長度 a 米，氣體密度 ρ ，如圖示。

- 因附壁作用而改變方向的氣體，質量為

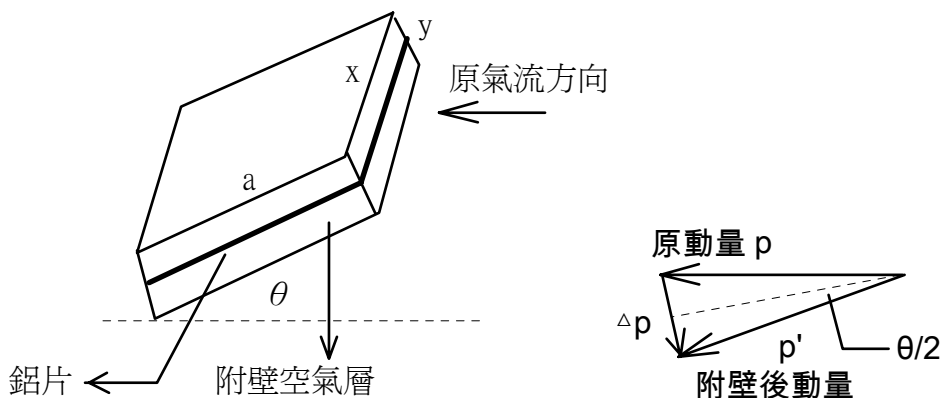
$$\Delta m = \rho(xya) \quad \text{動量 } p = \rho xyav$$

- 因為方向改變了 θ 角後設速率改變不多，則動量差為 $\Delta p = 2\rho xyav \sin \frac{\theta}{2}$

- 氣體通過鋁片時間 $\Delta t = a/v$

- 依牛頓運動定律，氣體受力 $F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2\rho xyav \sin \frac{\theta}{2}}{\frac{a}{v}} = 2\rho xyv^2 \sin \frac{\theta}{2}$

- 右圖中 Δp 的方向為氣流受力的方向，鋁片受反作用力，方向相反。



1. 按照以上推理，鋁片會因康達效應而受到氣流所給的力 $F=2\rho xyv^2 \sin \frac{\theta}{2}$ ，確實包含有氣流速率 v ，鋁片正面寬度 x ，鋁片仰角 θ 等變因。茲以下面表格對照說明

	理論式	數據歸納結果
速率 v	$F \propto v^2$	$F=0.4579V^2-0.9231V+1.4772$
面寬 x	$F \propto x$	$F=0.1513x+1.8225$
仰角 θ	$F \propto \sin \frac{\theta}{2}$ ，但未考慮最大附壁角度。	$F=5 \times 10^{-7} \theta^4 + 4 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.0083 \theta^2 + 0.2615 \theta + 0.1374$
前後長度 a	理論式中 a 因素被消去	$F=0.1263a+2.3838$
附壁空氣層 y	$F \propto y$	無法觀察，但猜測它和前後長度有關。

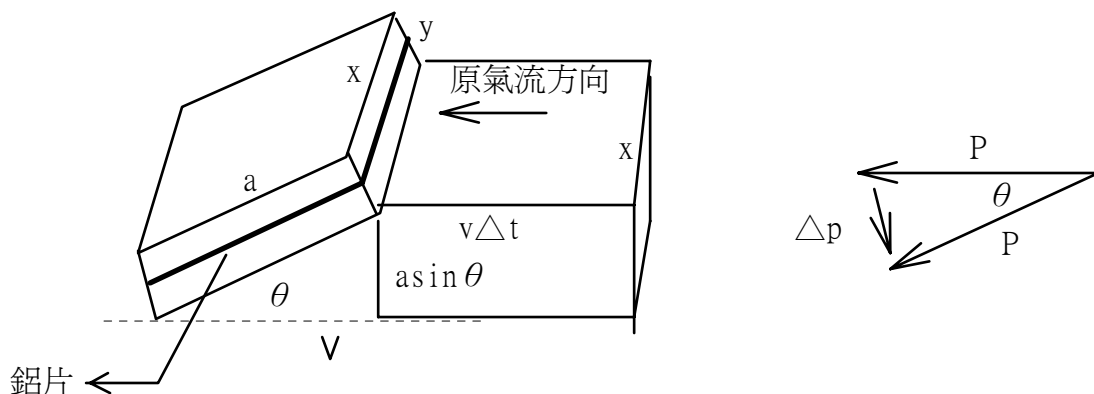
2. 實驗七中，在風洞中測量鋁片所受的升力，數據如下：風速 $v=2.87\text{m/s}$ ，鋁片面寬 $x=0.1$ 米，前後長度 5cm ，仰角 $\theta=20^\circ$ ，測出升力為 $F=2.55\text{gw}$ 。
 空氣密度約為 $\rho=1.18\text{kg/m}^3$ ，估計空氣附壁厚度 $y=4\text{cm}$ ，(依實驗六的蒸汽分佈)
 則理論升力 $F'=2\rho xyv^2 \sin \frac{\theta}{2}=0.013502246\text{N}=0.00138\text{kgw}=1.38\text{gw}$
 理論升力約為實際升力的 54%。

4. 若鋁片下方所攔截到的空氣都會依附著下表面而改變動量，則也受到力的作用。
 在 Δt 秒期間，會有質量 $\Delta m = x(v\Delta t)(a \sin \theta)\rho$ 的氣體被攔截，

$$P = x(v\Delta t)(a \sin \theta)\rho v = \rho x a v^2 \sin \theta \Delta t$$

$$\Delta p = 2\rho x a v^2 \sin \theta \sin \frac{\theta}{2} \Delta t$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = 2\rho x a v^2 \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}$$



若將上述鋁板的測量數據代入，得升力 $F=0.00577\text{N}=0.59\text{gw}$

※※研究過程四：現象驗證

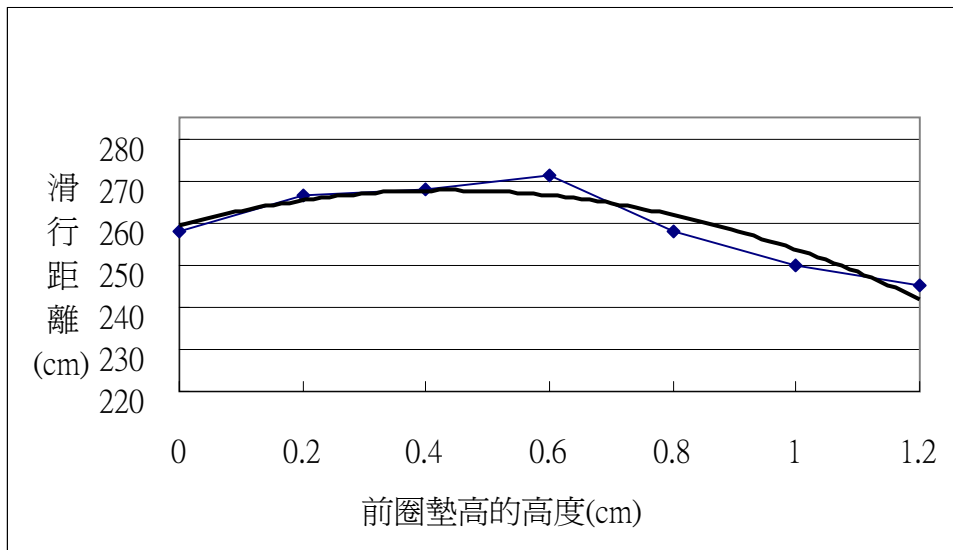
一、既然簡單飛機升力的來源是空氣的附壁效應，理論升力又與仰角 θ 有關；發射時，氣流速度和簡單飛機兩個圈圈中心軸的夾角就是 θ ，假如將前面小圈圈墊高，就是使得中心軸上仰，和氣流的夾角 θ 就增加了，這個改變應該會改變實際簡單飛機的飛行距離。

二、實驗步驟：

1. 取直徑為 4cm、5cm，寬度 2cm 的兩個塑膠圈黏在吸管的兩端，置於發射器上發射，測量落地時的水平射程。
2. 將前圈與吸管間以泡綿膠墊高，重複上述步驟。

三、實驗數據與分析

墊高(cm)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
射程(cm)	258	267	268	271	258	250	245



四、實驗結果：

1. 墊高前圈，確實改變了飛行距離，但當墊高達 1cm 時，飛行距離反而減少，這可能是重量增加，以及重心改變的影響。
2. 由此證明，簡單飛機飛行的升力，確實是康達效應造成的。

伍、結論

一、研究過程一：實際發射簡單飛機，檢視了圈圈的直徑、寬度、間隔對簡單飛機滑行距離的影響，結果發現

1. 圈圈的直徑前後比值大約在 0.8 時，滑行距離最大。
2. 圈圈的寬度大致不影響滑行距離，但會影響總重量。
3. 圈圈間隔在 21cm 時，滑行距離最大，但使簡單飛機重量增加，穩定性也變差。

二、研究過程二：在風洞中測量圈圈以不同的仰角面對氣流時產生的升力。

1. 單一圈圈：
 - a. 圈圈仰角在 20~40 度之間的升力最大。
 - b. 圈圈寬度愈大，升力越大。

- c. 空氣流速愈快，升力越大。
 - d. 圈圈直徑越大，升力越大，而且成正比。
 - e. 圈圈直徑小時，升力很小，仰角影響升力不顯著。
 - f. 風速小時，升力的表現比較不規律。
2. 雙圈圈簡單飛機：
- a. 氣流通過兩個圈圈，一樣產生升力。
 - b. 升力最大值出現在仰角 25 度左右，前 4cm，後 6cm 者最大升力的仰角角度比前後均 6cm 者稍小。
 - c. 風速越快，升力越大。

三、研究過程三：以蒸汽模擬氣流，觀察氣流。並測量附壁效應的升力。

1. 蒸汽流通過圈圈時，附著圈圈的圈壁，方向往下偏折，蒸汽的動量向下改變，應該受向下的力作用，施力物就是圈圈(別無他物)，這個同時，圈圈也受到向上的反作用力。
2. 離蒸汽口越近，蒸汽速度越快，也越集中，而使附壁作用越強，最大可得 35°偏折角度，當離開蒸汽口較遠時(最大為 14cm)，最大偏折角度大約為 25°。
3. 風速愈快，升力越大，當鋁片仰角為 20°時，升力是 0°~50°範圍中升力的極大值，此時升力與風速的關係大約為

$$F=0.4579V^2-0.9231V+1.4772$$

數據和這函數的相關值 R， $R^2=0.9877$ 。

4. 操作鋁片仰角，發現在 20°角時升力最大，升力與角度的關係式為

$$F=5 \times 10^{-7} \theta^4 + 4 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.0083 \theta^2 + 0.2615 \theta + 0.1374 \quad \text{相關值 R，} R^2=0.9915$$

5. 鋁片面寬增加，升力也增加，平均每增加 1cm，升力增加 0.1513gw。
6. 鋁片前後長每增加 1cm，升力即增加 0.1263gw。
7. 以附壁作用的理論為基礎，理論推算升力，結果與實際測量的升力大致相同。

四、墊高簡單飛機前圈，確實改變了飛行距離，由此證明，簡單飛機飛行的升力，確實是康達效應造成的

陸、參考資料

- 一、Science Explorer：Hoopster，Owl Books，Henry Holt & Company，1996&1997
http://www.exploratorium.edu/science_explorer/hoopster.html
- 二、發現科學－應用科學，Susan V. Bosak。遠哲科學教育基金會。
- 三、酷發明，Chris Woodford。時報出版。
- 四、玉山航空討論區－康達效應與白努力效應
[http://www.jadeair.com.tw/modules/ipboard/index.php?showtopic=5276\](http://www.jadeair.com.tw/modules/ipboard/index.php?showtopic=5276)
- 五、亞太科學教育論壇，第五期，第一冊，文章八(2004.4)「飛行」和「紙飛機」的教學活動
－吳本韓、蘇若望
http://www.ied.edu.hk/apfslt/v5_issue1/ngph/index.htm#contents

評語

優：實驗結果很清楚，完整。

缺：未有新意！