

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

030110

彰化縣立陽明國民中學

指導老師姓名

林義敦

林志青

作者姓名

林乃慧

林晉緯

鄭雅夫

胡志豪

百變魔球—球體變化原因的探討

壹、摘要

我們請教老師蒐集相關文獻資料，知道棒球在空氣中運動要產生各種變化，和「白努力定理」有關。

我們設計了一座球體發射器，以乒乓球來研究所要操作的變項，如：投射力量、投射角度、轉速、表面的粗糙等，對球運動產生變化的影響。結果發現，當投射力量固定，仰角為 45° 時，球的飛行距離可以最遠。當投球角度固定，投射力量越大，球體的飛行距離越遠。但我們發現球體受空氣阻力的影響很大，爲了克服空氣阻力對球體運動的影響，我們另設計了風洞裝置進行測試，研究球體轉速、風速、與球體表面貼條對球在空氣中運動所造成球兩側壓力的變化。結果發現，當球不轉動時，風洞中風速越強，在球兩側壓力低於風洞外的壓力越明顯。當風速固定時，球的轉速越快，在球體兩側所造成的壓力差變化量越明顯，且球體轉動之切線方向與風吹方向相同之一側，其壓力較低。當風速、轉速固定時，表面的貼條越多，表面越不均勻時，在球體兩側所造成的壓力差變化量越明顯，且球體轉動之切線方向與風吹方向相同之一側，其壓力也較低。

貳、研究動機

經歷了亞洲盃棒球賽的振奮，中華隊終於可以挺進雅典奧運的棒球賽，企盼可以勇奪金牌。也因為亞洲盃的振奮，國內的職棒也開始回春，連帶著校園內又開始興起棒球的熱潮，觀看職棒球賽也成爲我們家的團體休閒運動，能一家子和樂融融，隨著比賽的氣氛起起落落，好像是在坐雲霄飛車一般，心情也洗足了三溫暖。

看比賽最令我興奮的，莫過於看到救援投手使出變化球絕招將打者三振，成爲全場注目的焦點，讓我好生羨慕！所以總希望自己能夠有一天也能扮演這般的英雄角色，受人崇拜！不過要三振打者的投手都可以投出犀利的變化球。球爲什麼會產生變化？什麼因素能造成投球的變化呢？

爲了早日完成自己的棒球夢，我決定發揮科學研究的精神，揭穿變化球的迷思！於是我們一群好朋友開始進行研究，上網以及到圖書館搜尋資料，並認真研讀討論，發現棒球的變化球主要是和「白努力定律」有關，在我們針對不懂的地方，向我們的指導老師請教過後，便開始進行關於變化球的研究！

參、研究目的

一、探討棒球變化球形成原因

二、探討球在空氣中運動，影響球運動路徑產生變化的因素

(一) 當球體發射的力量固定時，不同投出角度對球飛行距離的影響

(二) 當投射角度固定時，不同彈射力量對球飛行距離的影響

(三) 當角度、力量固定時，不同旋轉速度對球產生偏移的影響

(四) 當球固定不轉動時，不同風速對球兩側產生壓力差的影響

(五) 當風速固定時，不同轉速對球兩側產生壓力差的影響

(六) 當風速、轉速固定時，不同表面紋路對球兩側產生壓力差的影響

肆、研究設備與器材

一、儀器設備

儀器名稱	數量	儀器名稱	數量
自製球體發射器 (照片一、二)	一座	直流電源供應器 (30V ; 20A)	1 台
乒乓球	30 顆	白蘿蔔	30 條
保力龍球	10 顆	泡棉貼條 (0.5 cm)	1 捲
彈簧秤 (5kgw)	3 個	砂紙 (各種不同係 數)	各 1 張
鑽孔器	1 組	鐵尺 (60 cm)	2 隻
DV 攝影機	1 台	皮尺	1 捲
馬達 (7.5A)	1 顆	牙籤	1 包
棒球	1 顆	自製風洞裝置 (照片三、四)	三座

二、自行設計球體發射器

(一) 球體發射器裝置照片

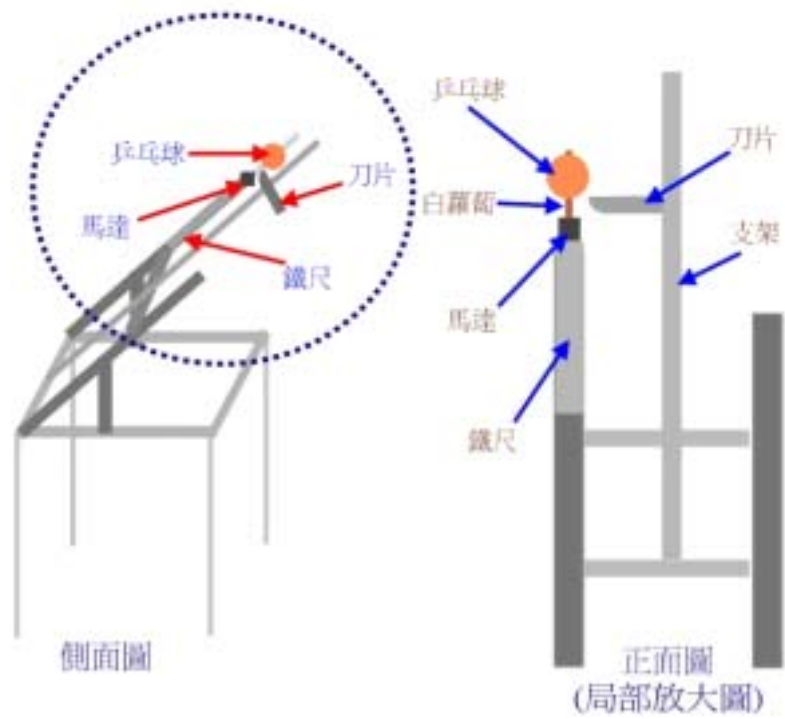


(照片一) 自製球體發射器



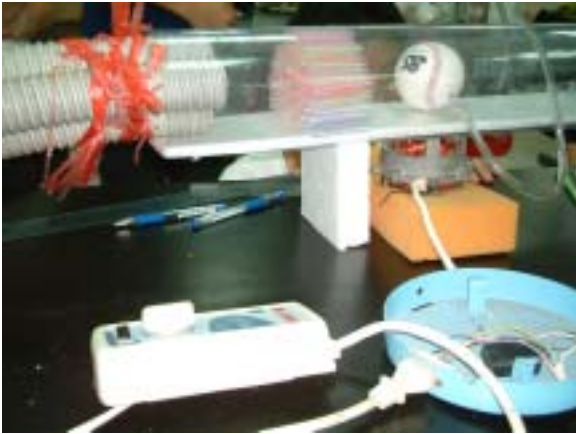
(照片二) 自製球體發射器接上球體

(二) 球體發射器裝置示意圖

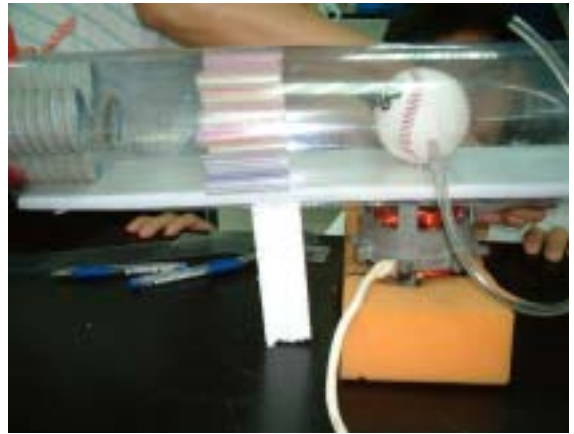


三、自行設計風洞裝置

(一) 風洞裝置照片

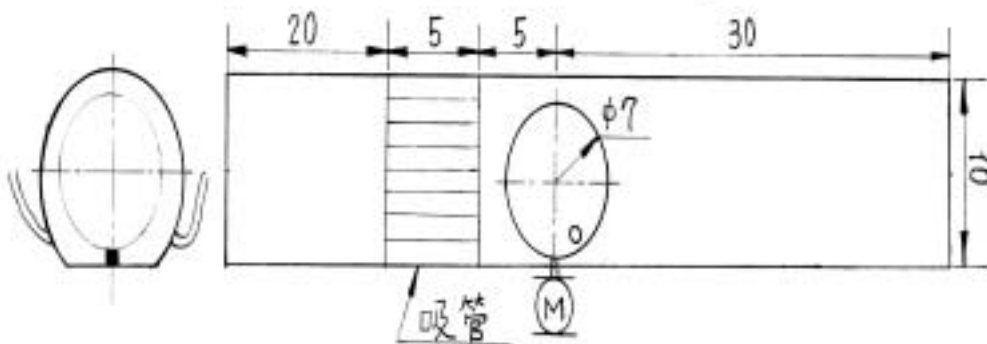


(照片三) 風洞裝置



(照片四) 風洞裝置

(二) 風洞裝置示意圖



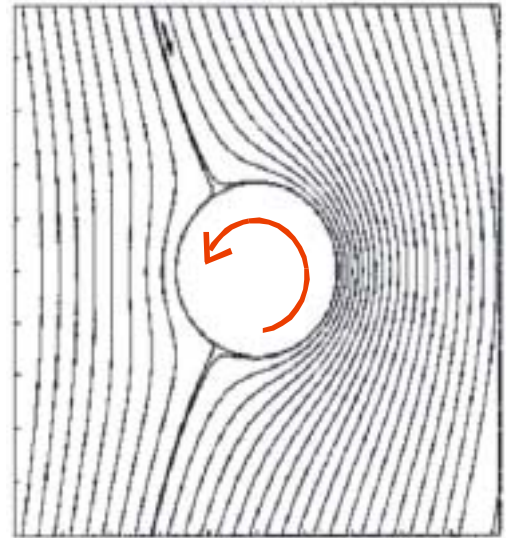
單位:cm

伍、研究過程與方法

一、探討變化球形成原因

(一) 白努力定律 (Bernoulli Theorem)

當變化球投出時，其中變化的曲線，往往令打者難以捉摸，這些奇妙的現象都回歸到棒球本身的構造，也就是球上的縫線，還有投手投出時的速度和轉動球體所造成。這些用來綁住球皮的縫線，突起於球表面，在球的行進過程中，會造成球體表面壓力不均的現象，根據白努力定律 (Bernoulli Theorem)：流速快的地方造成較小的壓力，那麼投出逆時針方向的球，

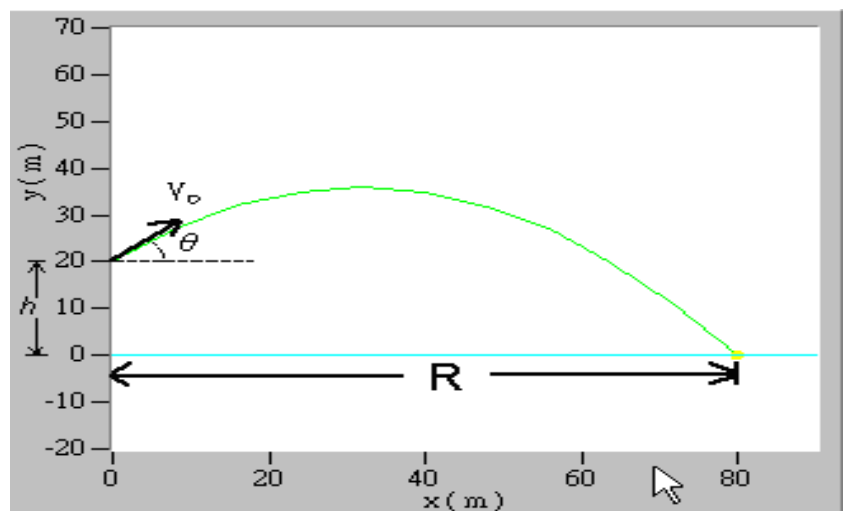


空氣在球的左方速率較快，球體右方速率較慢，造成球體左右的壓力不平衡，於是球便往壓力小的左方來移動。如附圖所示。所以我們便可以知道，變化球的產生，不外乎改變球體的表面顆粒分布、和球體轉速與風向的關係。

(二) 拋體運動的理論：

拋射體運動是斜向拋入空中之質點的二維運動 (如右圖)。

設空氣對運動的影響可忽略，則為向下等加速度之運動。



選參考系的原點為拋射體開始飛行之點，並設 v_0 為拋射體投出時的速度； θ 為拋射體運動方向與水平線所形成的投射角； (x, y) 為某點的座標； t 為時間； g 為重力加速度。則有如下的關係式：

$$(1) X = (V_0 \cos \theta) t$$

$$(2) Y = (V_0 \sin \theta) t + gt^2/2$$

由上述的關係式，我們可以瞭解球體飛行距離受到球體拋射的初速度以及角度兩個因素影響，所以我們要讓球體的飛行距離越遠，不僅要找出適當的角度彈射，使用的彈力也要越大。

二、探討影響球運動路徑產生變化的因素

(一) 當球體發射的力量固定時，不同投出角度對球飛行距離的影響

1. 利用球體發射器以相同力量（3.0kgw）調整不同仰角（30°、45°、60°、90°）將球彈出，每個相同條件重複操作四次。（仰角的測量是從鐵尺支架水平線到鐵尺支架基點交叉處拉直線到切割轉軸刀片的切口處，測量拉線與水平線的夾角）
2. 記錄球體飛行距離（距離的測量：在切割轉軸刀片的切口處繫上一顆鉛錘垂到地面，得到一個鉛垂點，以此鉛垂點為座標的原點做出鐵尺支架在地面的投射線訂為中心軸，以捲尺測量，原點到球體落地點的距離為飛行距離。

(二) 當角度固定時，不同彈射力量對球飛行距離的影響

1. 利用球體發射器以仰角 45°，調整不同力量（1kgw、2kgw、3kgw、4kgw、5kgw）將球彈出，每個相同條件重複操作四次
2. 記錄球體飛行距離

(三) 當角度、力量固定時，不同旋轉速度對球產生偏移的影響

1. 利用球體發射器以相同力量（5kgw）以及相同仰角（45°）調整不同轉速（1000、1500、2000、2500，單位：圈/分）將球投出，每個相同條件重複操作四次
2. 記錄球體飛行距離以及偏移距離（落地點到中心軸的垂直距離為偏移距離，面對球投出方向中心軸的右側為正；左側為負）

(四) 當球固定不轉動時，不同風速對球兩側產生壓力差的影響

1. 利用風洞裝置，將球置於風洞中不轉動，調整不同風速（第一級：3.52 m/s；第二級：6.33 m/s；第三級：8.03 m/s；第四級：8.83 m/s）進行測試，每種風速重複操作十次。（風速的測量：我們使用風速計，將風速計放置於風洞出口，待風速計轉動穩定後，測量風速計轉動 100 公尺所需的時間，再計算

出風速大小)

2.記錄球體兩側 ($P_{左}$ 與 $p_{右}$) 與風洞外大氣的壓力差。

(五) 當風速固定時，不同轉速對球兩側產生壓力差的影響

1.利用風洞裝置，使用第四級風速 (8.83 m/s)，調整不同轉速 (強：約 2350 轉/分；中：約 2150 轉/分；弱：約 1950 轉/分) 進行測試，每種轉速重複操作十次。(轉速的測量我們以棉線纏繞中心轉軸，測量每五秒纏繞的長度，重複測量五次取平均值，再除以轉軸圓周長度，便可以換算出每分鐘轉速大小)

2.記錄球體兩側 ($P_{左}$ 與 $p_{右}$) 與風洞外大氣的壓力差變化量。

(六) 當風速、轉速固定，不同表面紋路對球兩側產生壓力差的影響

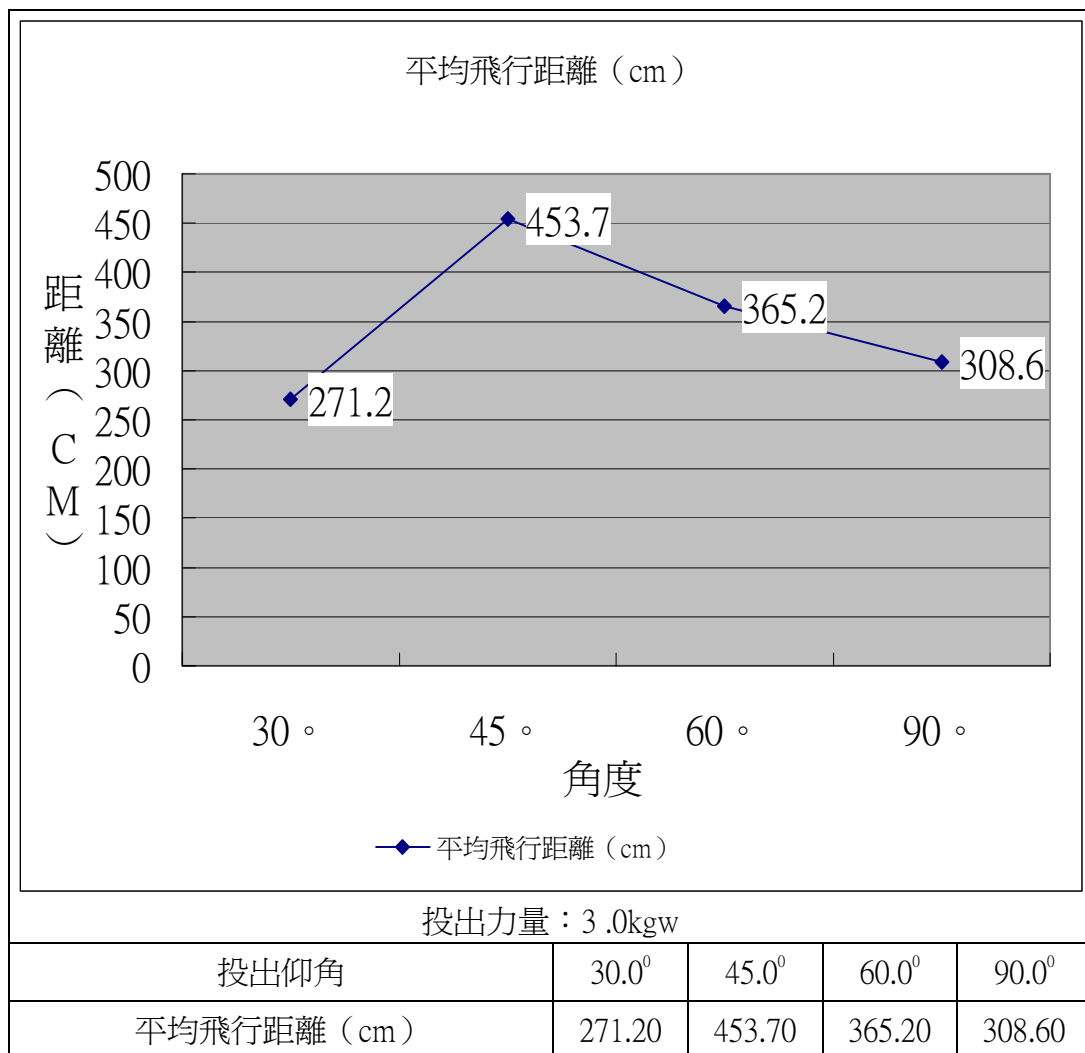
1.利用風洞裝置，將球表面貼上不同數目魔鬼氈 (1 條、2 條、3 條、4 條，每條寬 0.5 cm；長 5 cm)，以固定風速 (第四級：8.83 m/s)，以及固定轉速 (強：約 2350 轉/分)。進行測試 (黏貼時，以長的中點對準球的轉動時離轉動軸最遠處，且長邊與球轉方向垂直)，每個相同條件重複測量十次。

2.記錄球體兩側 ($P_{左}$ 與 $p_{右}$) 與風洞外大氣的壓力差變化量。

陸、研究結果

一、探討影響球產生變化的因素

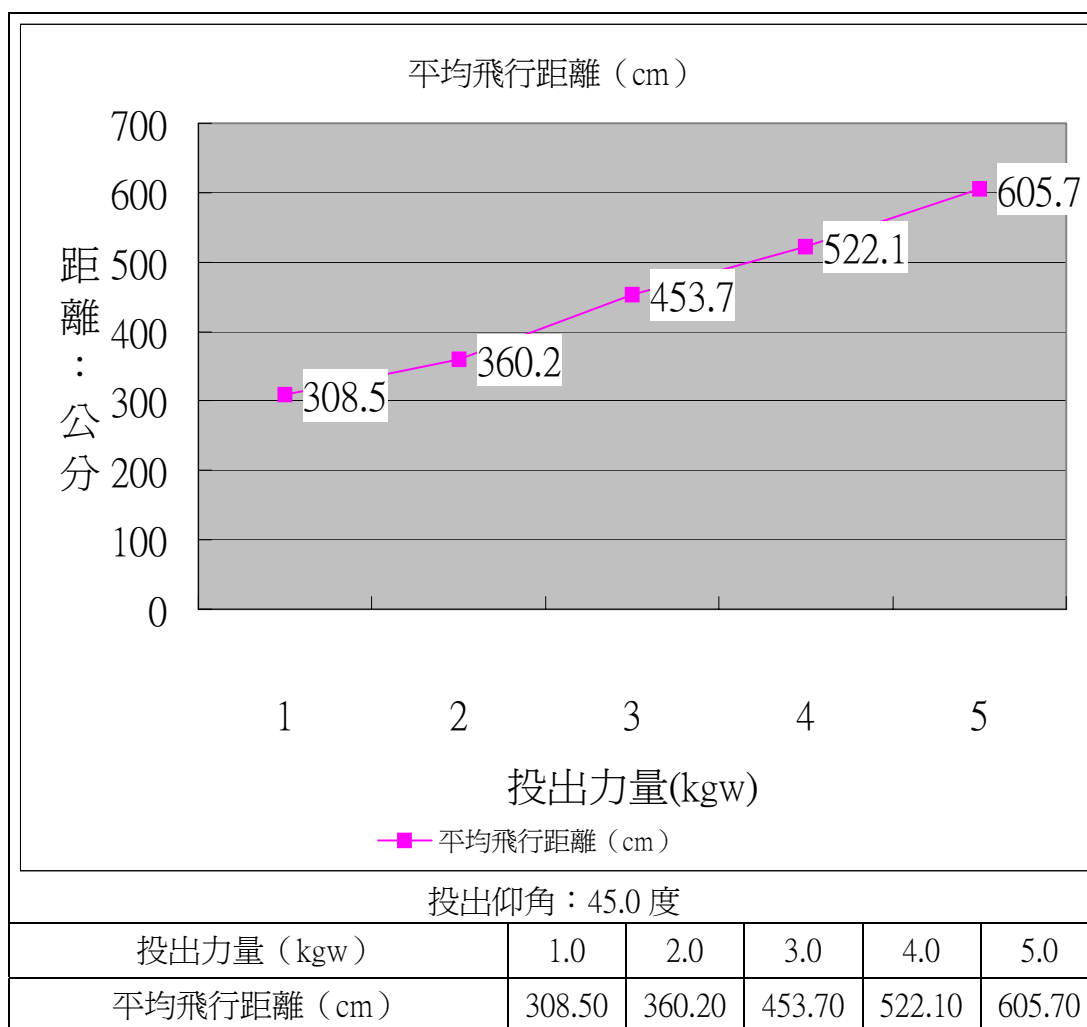
(一) 當力量固定時，不同投出角度對球飛行距離的影響



圖一：投射角度對飛行距離的關係圖

結論：由圖一我們可以發現當以 3 公斤重的力，投射角度為 45° 時將球投出，球體可以飛行的平均距離最遠 (453.7 cm)，飛行距離越遠，所以我們決定以投射角度 45° 來進行下列各種變項的操作。

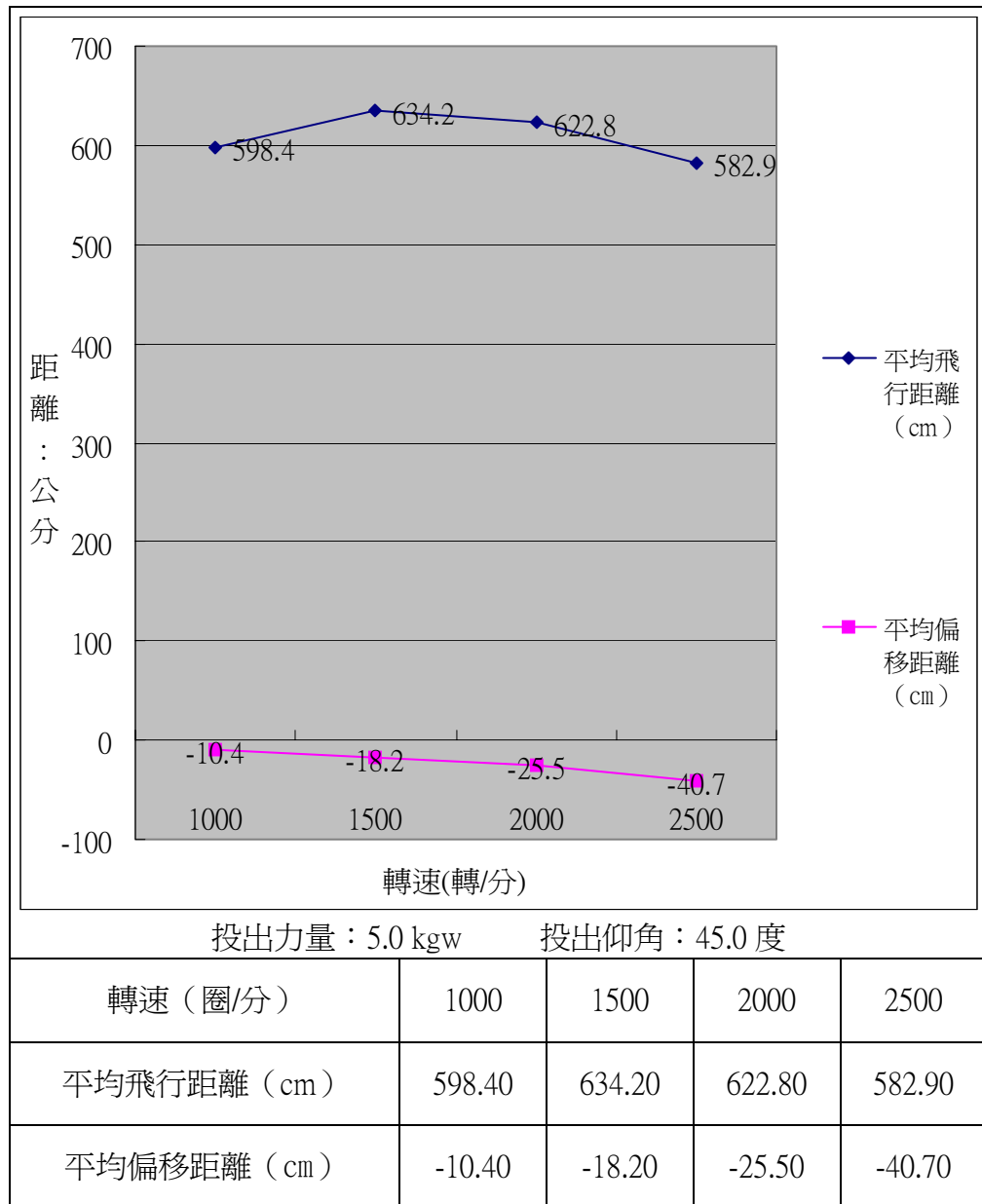
(二) 當角度固定時 (45°)，不同彈射力量對球飛行距離的影響



圖二：投射力量對飛行距離的關係圖

結論：由圖二我們可以發現球體的飛行距離會隨投射力量大小而改變，力量越大飛行越遠。當我們以 45° 投射，投射力量為 5 公斤重時，球體飛行的平均距離最遠 (605.7 cm)。所以我們決定以投射力量 5 公斤重來進行下列各種變項的操作。

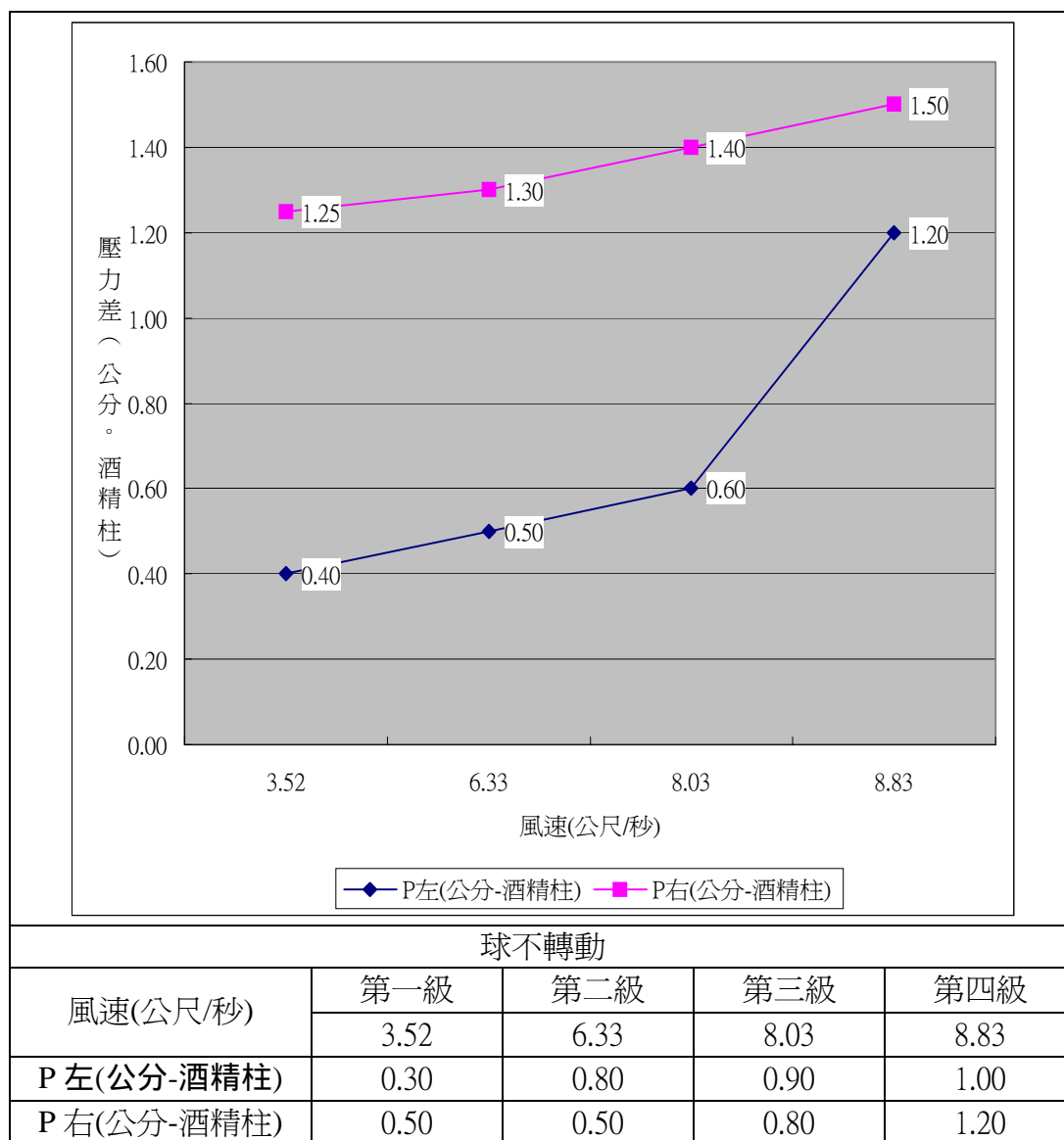
(三) 當角度、力量固定時，不同旋轉速度對球產生偏移的影響



圖三：球體轉速對飛行及偏移距離的關係圖

結論：由圖三我們可以發現球體的飛行距離與轉速沒有明顯的相關性，但是會影響偏移的距離。當球體旋轉的速度越來越快的時候，球體偏移的距離就越來越大，而且偏移方向相同。

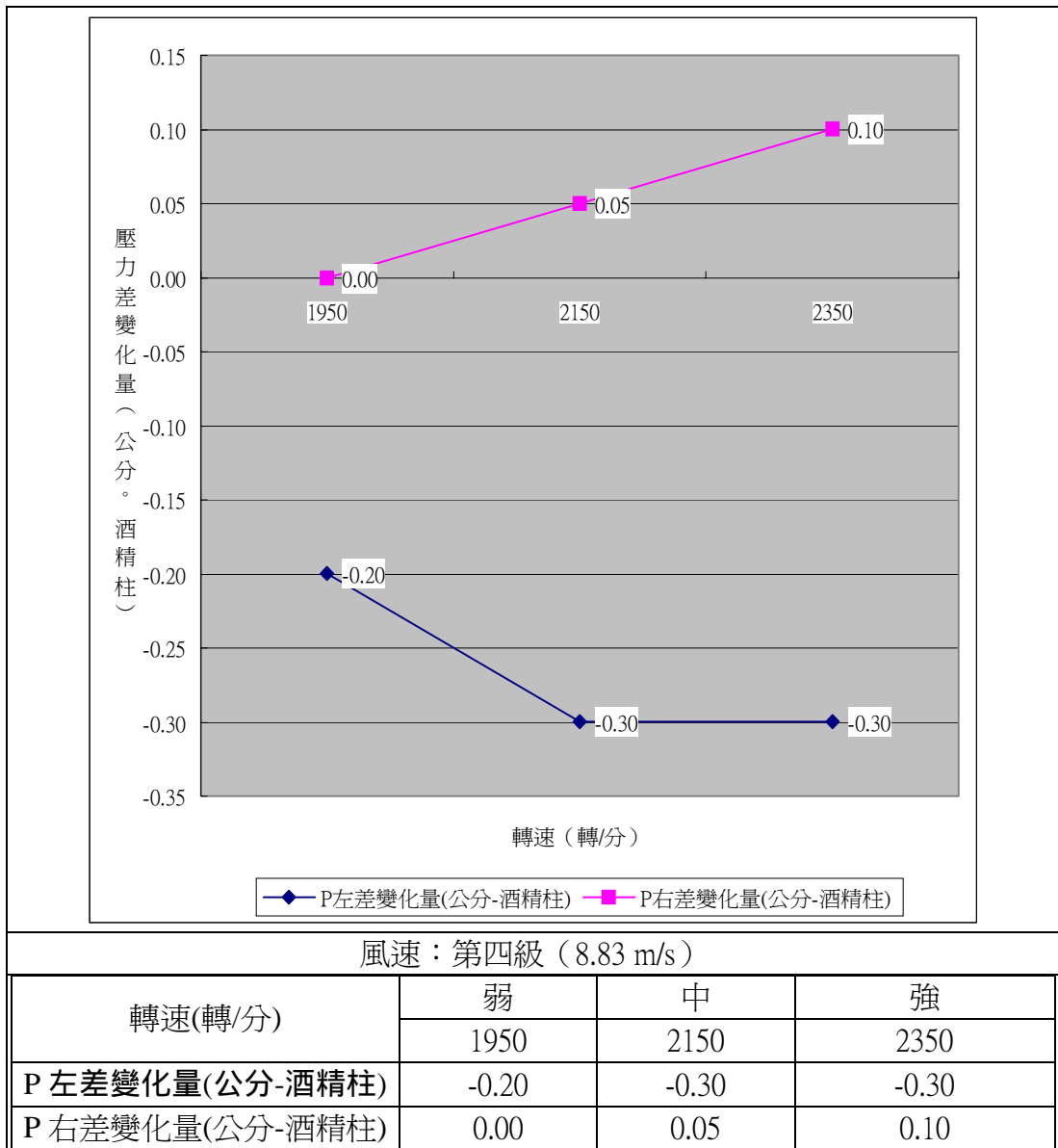
(四) 當球固定不轉動時，不同風速對球兩側產生壓力差的影響



圖四：不同風速對球兩側壓力的影響

推論：由圖四我們發現當球不轉動時，風洞中的流體流動速度越快，可以產生的壓力差便越大。當風速為第四級的時候（8.83m/s），球體左側的管柱較外界大氣壓小，相差 1.20 公分-酒精柱。而右側管柱較外界大氣小，壓相差 1.50 公分-酒精柱。

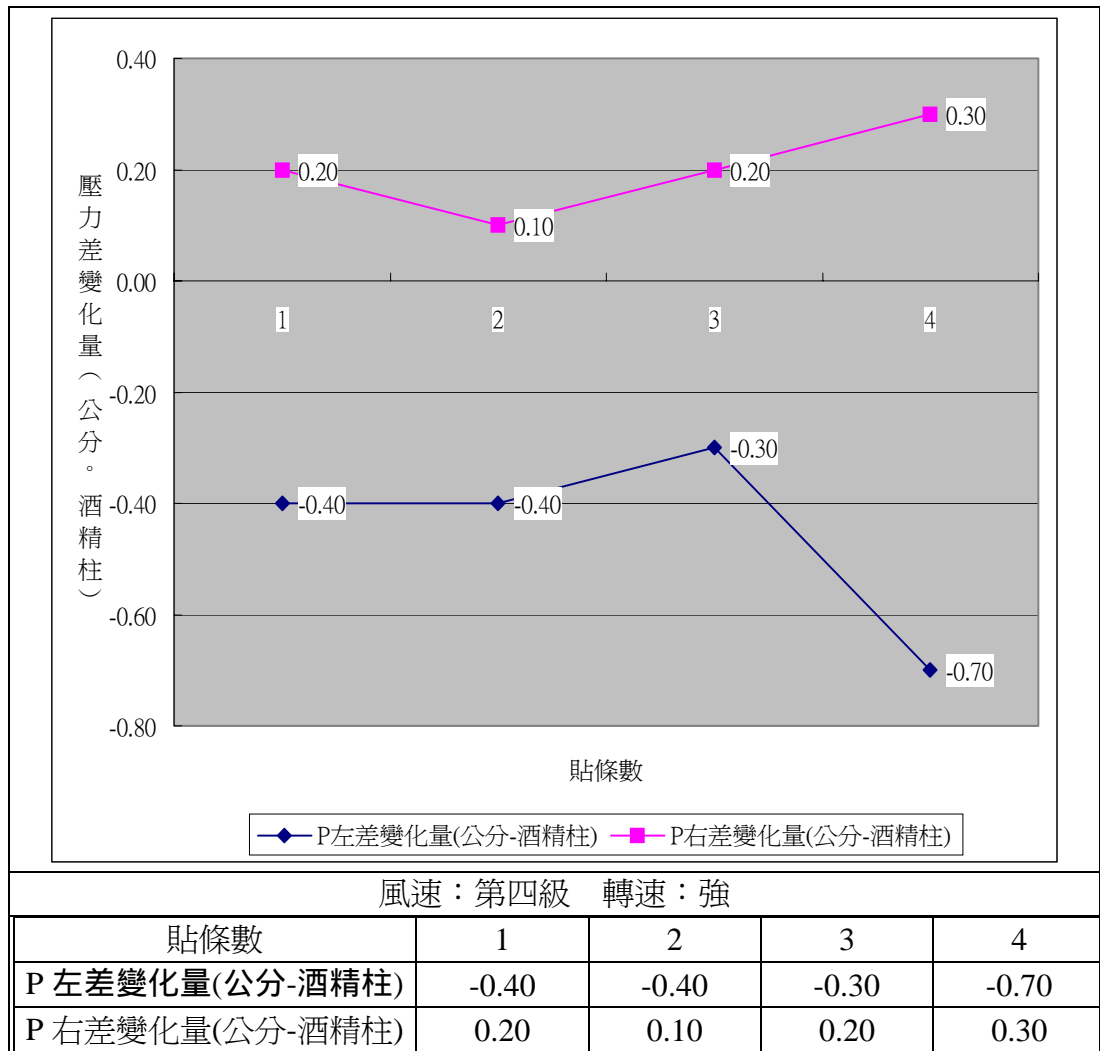
(五) 當風速固定時，不同轉速對球兩側產生壓力差變化量的影響



圖五：不同轉速速對球兩側壓力差變化量的影響

推論：上表中壓力變化量是和球不轉動時做比較，為正值時，表示比不轉動時壓力差更大，代表風洞中管內壓力更小，而負值則代表風洞中管內壓力差變小，代表風洞中管內壓力比不轉動時大。P 右管口處球轉動的切線方向和風流向相同，由數據證明，風速流動越快則壓力越小。P 左管口處球轉動的切線方向和風流向相反，由數據證明，風速流動減慢則壓力越大。由圖五我們可以觀察到當風速保持在第四級時 (8.83 m/s)，球轉速越大，管柱產生的壓力差變化量也就越大。當轉速達到強 (2350 轉/分) 時，右側管柱壓力差變化量達最大為 0.10 公分-酒精柱，而左側管柱壓力差變化量達最大為 -0.30 公分-酒精柱。

(六) 當風速、轉速固定，不同表面紋路對球兩側產生壓力差變化量的影響



圖六：不同表面紋路對球兩側產生壓力差的影響

推論：由圖六的數據我們看見，在風速和轉速相同時，貼條越多，表面越不均勻，對壓力差變化量影響越大。當風速為第四級（8.83 m/s），轉速為(2350 轉/分)，球貼條數為四條時，管柱壓力差變化量最大，右側管柱壓力差變化量為 0.30 公分-酒精柱，左側管柱壓力差變化量為-0.70 公分-酒精柱。

柒、討論

一、實驗分析結果的討論

(一) 投射過程數據分析結果誤差的討論

在投射實驗操作的過程中，除了操作時因為切除的蘿蔔量會有差異外，我們無法克服空氣阻力所造成的誤差。我們分成以下幾點討論：

1. 當球要彈射出去時，切割蘿蔔處的點不同，球體上的蘿蔔殘留量不一樣，殘留量越多時，這些重量會造成飛行距離縮短。
2. 實驗操作時我們選擇的是乒乓球作為球體，因為球體的質量很輕時，空氣阻力的影響就不可以被忽略(我們觀察以相同力量和相同角度投出乒乓球與實心的高爾夫球，乒乓球的軌跡因為受空氣阻力影響，飛行的末段以接近直線方式落下，而高爾夫球的飛行路徑比較接近拋體運動的路徑)，所以我們為了克服這項誤差，設計風洞來改良我們的實驗。

(二) 風洞實驗數據分析結果誤差的討論

在風洞的實驗中，因為經費的關係，我們的裝置無法製作的相當的精密，所以在經過我們不斷努力的修正，我們做下列修正：

1. 製作時風洞的口徑要越小越好，所以一開始我們製作的風洞口徑寬為 20 cm；高為 15 cm，後來我們把口徑縮小到寬為 10 cm，高為 10 cm。
2. 橡皮管的液體我們測試過水、酒精、沙拉油、潤滑油，比較過後，酒精的密度小，顏色明顯(我們使用變性酒精)，所以最後以酒精當作填充液。雖然酒精容易揮發，但是我們利用每次測試前作校正，將誤差克服。

二、實驗方法設計的討論

(一) 發射器的設計

研究這個題目時，在實驗操作的設計上我們遭遇了許多困難，首先我們必須要能精確的控制投球力量的大小，所以無法用一般練球用的發球機來進行試驗。另外我們要研究球體旋轉的速度對球產生偏移的影響，所以也要能夠使球能有可以測量的旋轉速度，所以要能同時控制力量以及轉速將球投射出去，發球機的設計便是一項難題。

經過許多嘗試以及接連的失敗，一度讓我們相當灰心，我們將此反應給指導

老師，也無法一時的到回應。經過了將近兩個月的時間，指導老師給了我們一個方向，告訴我們幾個可以嘗試的方法後，我們採取類似古代攻城器具中的投石車，以剛性較佳的角鐵來作支架，再用螺絲把鐵尺鎖上，藉由鐵尺的彈性將球投出，在力量的控制方面，我們使用釣魚線綁住鐵尺的固定位置，然後使用彈簧秤來鉤住釣魚線，當彈簧秤顯現我們所設定的力量時，將線剪斷使球投出。

在球體的旋轉方面，爲了能夠讓球體產生高速的轉動，我們想到可以利用馬達，選取適當大小的馬達，用防水膠布將馬達固定在鐵尺上方，再連接電源供應組（電池組），提供電力。另外我們在老師的建議下，在電路中接了一個可變電阻，藉由改變電阻調整電流大小來調整轉速。而鐵尺是用來做彈射的工具，並且可以調整鐵尺，改變發射的角度來模擬高壓投球法或是四分之三側投。此設計的優點是我們可以調整力量的大小以及轉速的快慢進行實驗，也可以模擬實際投球的情況。

（二）球體的選擇

在原本的實驗設計中我們選擇體積較接近棒球大小的保利龍球，優點是保利龍球重量輕，可以適用於我們的小馬達，而且可以比較方便在球體表面做出各種變化，例如刻痕的凹紋或凸紋，甚至模擬各種球類的表面紋路，但缺點是我們沒辦法精準的鑽到保利龍的轉動中心軸，這樣導致轉動時會重心不穩而嚴重的晃動。因此後來我們使用乒乓球來作為研究的球體，優點是輕，而且我們可以使用車床來鑽洞，可以精準的找到球的轉動中心軸，解決了球體轉動中心不穩的問題，但是由實驗的結果可知，使用乒乓球的缺點是表面不容易處理，且易受空氣阻力影響，效果也沒有預期的明顯，所以我們除了努力尋找更適當的球體外，並改良成自製風洞的設計，來克服這些缺點。

（三）連接軸材料的選擇

當以上兩點困難克服之後，進行實驗操作時，要將球藉由何種方式使球體離開發射器也是困擾我們許久的問題。要憑藉甩動的力量將其投出，就無法掌控投出的角度，指導老師告訴我們可以利用切斷的方式來控制球的投出點，所以我們著手設計了切割裝置。

尋找能符合我們需求的切割物並不容易，這個連接馬達和球體的連接軸必

須能穩定轉動，還要能夠輕易的被切斷，這個物質的特性是要硬且脆，爲了因應這樣的需求我們找了許多的蔬果(例如：芹菜、蘆筍、甘蔗、韭菜花、蓮花梗、紅蘿蔔)，經過多次的測試，最後決定使用白蘿蔔。將白蘿蔔使用實驗室中橡皮塞的鑽孔器來切割出圓柱的形狀，並切取適當長度來當作連接軸使用。使用這種方式將球體投出的優點是能夠符合我們實驗的需求；我們努力減少每次切割完後殘留在球體上的白蘿蔔，這些殘留的蘿蔔會造成球體重量的誤差而影響實驗的結果。

(四) 風洞裝置設計

在進行實驗的過程中發現，乒乓球本身的質量很輕，所以在飛行的過程中球飛行的路徑並不是一個完整的拋物線，在飛行的末段時，球會以接近垂直的方式落到地面，這樣的誤差是因爲空氣阻力所造成，是無法克服的系統誤差，所以如果不變更實驗設計，將無法研究「白努力定律」對球飛行時產生變化的影響。

要觀察「白努力定律」對球飛行時產生變化的影響，必須符合兩項條件：(1)球體的轉速要夠快；(2)風速要夠大。球的轉速要快可以藉由馬達來控制，風速的部分我們則利用風洞的裝置來控制。

原本我們以不同力量大小進行投射的方式來控制球飛行的速度，以調整馬達電流的大小來控制球體轉速。而在風洞的裝置中，我們將球的位置固定不動，同樣的方式來調整轉速，而使用不同的風速大小來模擬球飛行的速度。以相對運動的觀點來看，球飛行越快時，球體和空氣的相對速度較大，如果球不動，而風速越大時，空氣和球的相對速度也是較大的，所以利用風速的控制可以模擬當作球飛行速度的快慢。

當以上兩個條件都可以操作時，我們只需要測量球體表面兩側的壓力差，再由壓力差的比較瞭解球的偏移情形。在風洞中，我們就可以藉由觀察壓力的變化瞭解不同的操作變因（風速、轉速、表面粗糙）下，對球體產生變化的影響。然而製作與測試風洞的過程中，我們也學習到以下幾點心得：

1. 風洞的口徑大小對風速的影響很大：在製作風洞進行測試時，發現相同的送風裝置在不同的風洞中造成的風速大小不相同，所以我們盡可能去控制風洞

口徑，越小越好。

2. 風必須先經過整流：如果直接以吸塵器的馬達當作送風的裝置去吹送，在風洞的形成的氣流擾動會比較亂（我們可以觀察線香的煙霧在風洞中流動的情形），所以我們必須使用整流的裝置。於是我們將吸管裁成五公分的長度，併排在風洞之中，由觀察線香煙霧的流動情形便可以看到，經過吸管後，氣體的擾動可以被減少。
3. 壓力的測量：由於我們要觀察的是球體兩側的壓力差，而一般的氣壓計靈敏度不夠無法用來記錄，後來我們改用托里切利實驗的原理來測量。我們在風洞兩側相對位置鑽孔，然後放入一段橡皮管，一端在風洞內與球保持的距離越近越好（在測試的過程我們發現，橡皮管口與球體表面越接近，壓力變化的現象越明顯），而另一端則保持在外面的大氣環境，橡皮管中的液體使用密度較小的酒精，因為在相同的液體壓力（ $P=h\rho d$ ）下，密度越小則高度越高，我們可以觀察的也就越明顯。
4. 另外我們也發現在相同的條件下，管口的角度與風的流向垂直時，壓力差最明顯，所以為了使軟橡皮管能保持與風流動的方向垂直，我們在插入風洞的一端外層包覆上比較硬的吸管，來控制管口的角度。

這樣的實驗設計有下列的優點：(1)利用風洞裝置我們就可以將空氣阻力所造成的系統誤差排除；(2)使用風洞裝置因為球不需要投射出去，所以我們可以選擇較重的球進行實驗，甚至我們可以使用真正的棒球進行測試。不過因為我們所製作的風洞並非相當精密，所以測量所得到的數據只能看出變化趨勢，無法精確的進行更精密的計算與推論。

捌、結論

本實驗最大的特點在透過自製的球體發射器與設計小型風洞來探討影響棒球在運動過程中產生變化球的原因，並且經由線香煙霧的使用，可以讓我們觀察到氣流經球體的擾動後的情形，可當作教具使用。研究結果歸納如下：

- 一、當力量固定為 3kgw，仰角為 45° 時，使用投使用球體發射器將球投出的飛行距離可以最遠。
- 二、當投球角度固定時，投球的力量越大，球體的飛行距離越遠。
- 三、當球固定不轉時，風洞中風速越強，在球兩側產生對外壓力差越明顯。
- 四、當風速固定時，球的轉速越快，在球體兩側所造成的壓力差變化量越明顯，其中轉動切線與風流動方向相同的一邊，流速加快，壓力變的更小，轉動切線與風流動方向相反的一邊，流速變慢，壓力則比不轉動時增加。
- 五、當風速、轉速固定時，表面的貼條越多，表面越不均勻時，在球體兩側所造成的壓力差變化量越明顯。

玖、參考資料及其他

- 一、國立編譯館（90）：國民中學理化第四冊。台北市：國立編譯館
- 二、國立台灣科學教育館彙編（1993），第三十三屆中小學科學展覽優勝作品專輯國中組
- 三、Horst Kuchling.盧喜瑞譯（1992）最新物理手冊，徐氏基金會，台北
- 四、Robert K.Adair 編，李靜宜譯（1993），牛頓打棒球，牛頓出版社，台北。
- 五、李志揚 博士：旋，或是不旋？這是個好問題（To Spin or Not to Spin, That' s the Question?- For all Teammates）<http://www.sciscape.org/articles/baseball/>

附錄一、 實驗研究數據

(一) 不同投出角度對球飛行距離的影響

投出力量：3.0 kgw，30.0 度					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	264.6	255.7	291.4	273.1	271.2

投出力量：3.0 kgw，45.0 度					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	427.8	466.9	463.1	457.0	453.7

投出力量：3.0 kgw，60.0 度					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	362.1	385.7	349.6	363.4	365.2

投出力量：3.0kgw，90.0 度					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	296.5	317.3	305.2	315.4	308.6

投出力量：3.0 kgw					
投出仰角	30 °	45 °	60 °	90 °	
平均飛行距離 (cm)	271.2	453.7	365.2	308.6	

(二) 不同彈射力量對球飛行距離的影響

投出角度：45.0 度，力量 1.0kgw					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	303.1	301.2	316.7	313	308.5

投出角度：45.0 度，力量 2.0kgw					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	346.7	382.3	364.5	347.3	360.2

投出角度：45.0 度，力量 3.0kgw					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	451.7	462.3	456.9	443.9	453.7

投出角度：45.0 度 ，力量 4.0kgw					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	511.3	532.6	541.1	503.4	522.1

投出角度：45.0 度 ，力量 5.0kgw					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	597.6	606.2	608.4	610.6	605.7

投出仰角：45.0 度					
投出力量 (kgw)	1	2	3	4	5
平均飛行距離 (cm)	308.5	360.2	453.7	522.1	605.7

(三) 角度、力量固定時，不同旋轉速度對球產生偏移的影響

投出力量：5.0kgw，投出仰角：45.0 度，轉速：1000 圈/分					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	601.2	595.3	586.4	610.7	598.4
偏移距離 (cm)	-10.1	-11.2	-10.1	-10.2	-10.4

投出力量：5.0kgw，投出仰角：45.0 度，轉速：1500 圈/分					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	611.3	645.7	638.1	641.7	634.2
偏移距離 (cm)	-17.9	-18.1	-18.6	-18.2	-18.2

投出力量：5.0kgw，投出仰角：45.0 度，轉速：2000 圈/分					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	612.3	607.3	641.8	629.8	622.8
偏移距離 (cm)	-24.9	-25.1	-25.9	-26.1	-25.5

投出力量：5.0kgw，投出仰角：45.0 度，轉速：2500 圈/分					
次數	1 次	2 次	3 次	4 次	平均
飛行距離 (cm)	593.6	584.1	564.5	589.4	582.9
偏移距離 (cm)	-39.9	-40.3	-41.6	-41	-40.7

投出力量：5.0kgw 投出仰角：45.0 度				
轉速 (圈/分)	1000	1500	2000	2500
平均飛行距離 (cm)	598.4	634.2	622.8	582.9
平均偏移距離 (cm)	-10.4	-18.2	-25.5	-40.7

(四) 當球固定不轉動時，不同風速對球兩側產生壓力差的影響

第一級風：風速=3.52(公尺/秒)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.26	1.33	1.31	1.24	1.17	1.19	1.23	1.22	1.27	1.28	1.25
p _左	0.41	0.32	0.33	0.31	0.46	0.49	0.43	0.44	0.42	0.39	0.4
第二級風：風速=6.33(公尺/秒)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.27	1.3	1.25	1.31	1.3	1.36	1.34	1.32	1.33	1.22	1.3
p _左	0.53	0.54	0.56	0.48	0.47	0.49	0.47	0.46	0.44	0.56	0.5
第三級風：風速=8.03(公尺/秒)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.32	1.39	1.42	1.43	1.42	1.4	1.42	1.42	1.42	1.36	1.4
p _左	0.63	0.62	0.61	0.54	0.61	0.6	0.61	0.57	0.61	0.6	0.6
第四級風：風速=8.83(公尺/秒)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.47	1.46	1.53	1.51	1.51	1.5	1.52	1.53	1.49	1.48	1.5
p _左	1.21	1.26	1.23	1.22	1.24	1.21	1.16	1.15	1.17	1.15	1.2

當球固定時，不同風速對球兩側產生壓力差的影響(管口離球 0.3mm)				
風速(公尺/秒)	第一級	第二級	第三級	第四級
		3.52	6.33	8.03
P 左(公分-酒精柱)	0.40	0.50	0.60	1.20
P 右(公分-酒精柱)	1.25	1.30	1.40	1.50

(五) 當風速固定時，不同轉速對球兩側產生壓力差的影響

第四級風：風速=8.83(公尺/秒)											
轉速：不轉=0(轉/分)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.39	1.4	1.42	1.31	1.32	1.47	1.45	1.44	1.43	1.37	1.4
p _左	1.33	1.27	1.26	1.28	1.3	1.35	1.31	1.34	1.29	1.27	1.3

轉速：弱=1950(轉/分)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.37	1.36	1.42	1.48	1.32	1.39	1.43	1.44	1.39	1.4	1.4
p _左	1.08	1.07	1.12	1.14	1.12	1.11	1.07	1.09	1.12	1.08	1.1

轉速：中=2150(轉/分)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.43	1.48	1.52	1.37	1.39	1.48	1.49	1.47	1.49	1.38	1.45
p _左	1.03	1.04	0.96	0.99	0.99	1	1.02	0.96	0.98	1.03	1

轉速：強=2350(轉/分)											
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.47	1.52	1.54	1.61	1.45	1.46	1.46	1.47	1.46	1.56	1.5
p _左	1.02	1.02	1.05	0.94	0.99	0.97	0.95	0.96	0.97	1.13	1

當風速固定時(第四級)，不同轉速對球兩側產生壓力差的影響(管口離球 0.3mm)				
轉速(轉/分)	不轉	弱	中	強
		0	1950	2150
P 左(公分-酒精柱)	1.30	1.10	1.00	1.00
P 右(公分-酒精柱)	1.40	1.40	1.45	1.50

(六) 當風速、轉速固定時，不同表面紋路對球兩側產生壓力差的影響

貼條數：1 條

轉數：不轉

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	0.76	0.78	0.81	0.83	0.85	0.82	0.8	0.77	0.79	0.79	0.8
p _左	1.74	1.83	1.82	1.85	1.81	1.82	1.77	1.79	1.83	1.74	1.8

轉速：強

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.07	1.01	0.87	0.93	0.97	1.04	1.03	1.04	1.01	1.03	1
p _左	1.42	1.43	1.37	1.39	1.38	1.37	1.44	1.36	1.39	1.45	1.4

貼條數：2 條

轉數：不轉

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	0.95	0.97	0.96	1.04	1.02	1.01	1.03	1.07	0.97	0.98	1
p _左	1.92	1.83	2.01	1.94	1.9	1.87	1.95	1.85	1.86	1.87	1.9

轉速：強

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.08	1.07	1.11	1.17	1.12	1.11	1.1	1.07	1.09	1.08	1.1
p _左	1.52	1.51	1.41	1.43	1.54	1.52	1.53	1.5	1.53	1.51	1.5

貼條數：3 條

轉數：不轉

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	0.78	0.77	0.81	0.8	0.84	0.81	0.78	0.78	0.76	0.87	0.8
p _左	1.31	1.35	1.28	1.29	1.33	1.27	1.28	1.27	1.32	1.3	1.3

轉速：強

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	0.97	0.98	0.96	1.01	1.01	1.02	0.99	1	1.03	1.03	1
p _左	1.07	1.08	1.04	1	0.94	0.96	0.95	0.94	0.99	1.03	1

貼條數：4 條

轉數：不轉

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.67	1.68	1.71	1.74	1.77	1.67	1.66	1.71	1.68	1.71	1.7
p _左	1.12	1.1	1.11	1.08	1.04	1.12	1.11	1.13	1.14	1.05	1.1

轉速：強

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次	平均
p _右	1.27	1.31	1.33	1.32	1.26	1.32	1.31	1.34	1.29	1.25	1.3
p _左	1.09	0.93	0.95	0.98	0.97	1.04	1.06	0.97	0.98	1.03	1

壓力差變化量（相同風速下，不同貼條數，轉速最強時壓力差－不轉時壓力差）

貼條數	1	2	3	4
P 左差變化量(公分-酒精柱)	-0.40	-0.40	-0.30	-0.70
P 右差變化量(公分-酒精柱)	0.20	0.10	0.20	0.30

附錄二、實驗過程照片



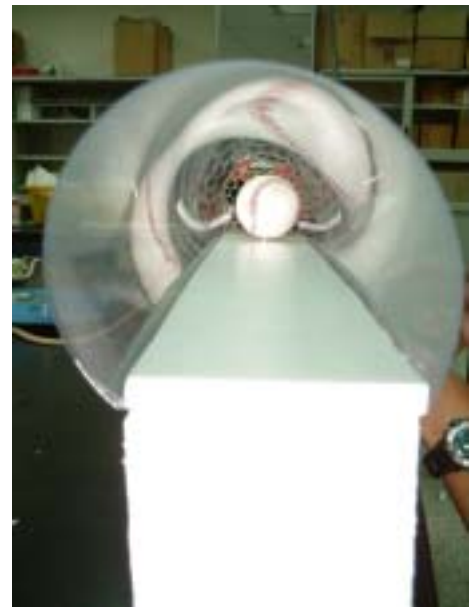
照片五：裝置乒乓球



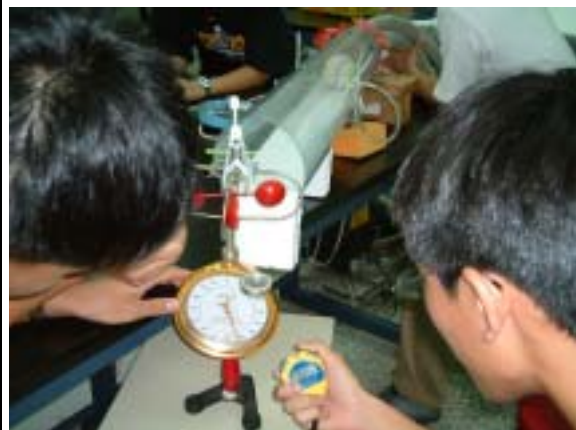
照片六：裝置切割器



照片七：投射乒乓球



照片八：風洞裝置



照片九：風速的測量



照片十：轉速的測量



照片十一：球體表面貼條（三條）



照片十二：球體表面貼條（四條）



照片十三：壓力差的測量



照片十四：壓力差的測量

評語

030110 國中組物理科

百變魔球—球體變化原因的探討

本作品之乒乓球及棒球之質量及體積差距頗大，不宜互為連接討論空氣阻力對球體運動之影響。本作品之題目亦大部分為舊作，創新性不足，且數據之量測因控制變因不易控制而顯得準確度不夠。

風洞之設計亦嫌過於簡單，對實驗之證實無多大幫助。理論之探討亦宜再深入以解釋數據！