

# 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國中組 物理科

第一名

030123

斷尾球「生」~探討羽球羽毛對飛行的影響

學校名稱：高雄市立明華國民中學

作者：  國二 陳品文  國二 邱健紘  國二 宋品孝	指導老師：  吳德儀  陳晏閔
---	-----------------------------

關鍵詞：羽球、風洞、飛行軌跡

# 得獎感言

## 科展的甜蜜與辛酸

對於今年的科展結果,我們有著滿滿的感謝。有著如此佳績的原由,我們相信指導老師是不可或缺的關鍵。他們在我們為實驗而迷茫時指點迷津,在陷入低潮時給予我們持續研究的熱情。也感謝隊友們,一起撐過痛苦、悲傷,一起分享喜悅,在無助時伸出援手,互相包容、體諒,同心協力完成這份報告。

在本次研究的過程中有許多很精彩的回憶,其中有歡笑也有苦悶。我們印象最深的是那時我們為了知道羽球運動狀態而必須去錄製軌跡的部分。

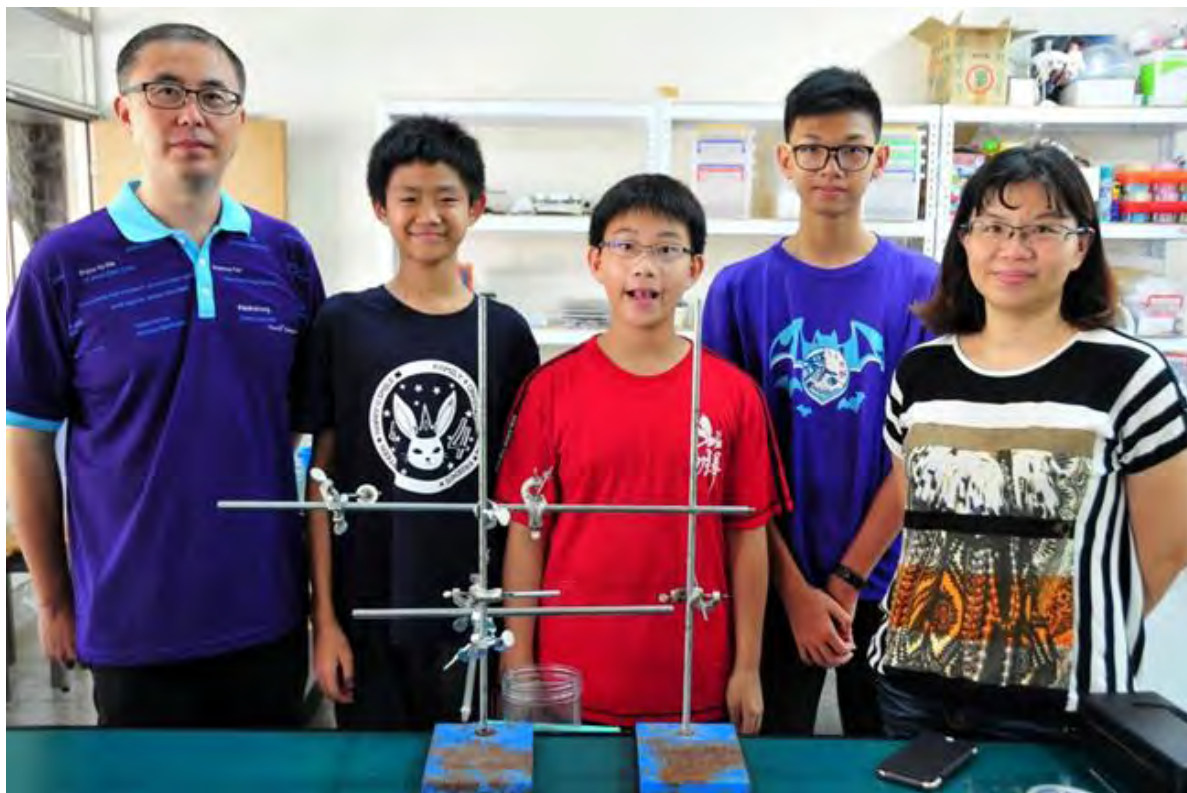
為了錄製軌跡,我們必須製作發射羽球的裝置,試了很多種方式後才找到用高壓氣體加推進器的方式。每個假日,我們都必須犧牲自己玩樂及讀書的時間,來到學校的地下活動中心進行噴射。因為要在無風狀態下進行,所以沒有冷氣,也沒有電風扇,再加上是炎炎夏日,每個人都汗流浹背。在這樣的環境下,每天都必須待上好幾個小時。

雖然非常辛苦,我們仍能夠苦中作樂。我們在錄製完兩百多組的軌跡後必須進行分析,每天蹲在電腦前,重複相同的動作,一個一個地把各項資料以及羽球的軌跡分析出來,再輸入、統整、繪圖。雖然有點煩,但我們一樣找到了解決方法:聽音樂。音樂一首一首的播,我們隨著旋律哼唱,讓分析軌跡不再是件無聊的事,做起來快樂,自然就不會厭倦。

本次於雲林舉辦的全國科展,令我們大開眼界,更認識了各地箇中好手的創作。五日的過程中,不知為了在講解時能使評審教授們能更完善理解我們的作品而更動過多少次,連發表前一晚都仍在修改內容,甚至忙到了凌晨三點只為了能跟評審分享。最後一天頒獎時,我們三人緊張不已,但我們仍然保有絕對的信心。當我們聽到司儀念出第一名時,看著自己長時的努力終於得到認可,一切都值得了!

最後,從這次的經驗中,我們也學到了團隊分工合作的精神:每個人都應該盡好自己的本分,也知道了每個人都有自己擅長與不擅長的地方,我們應該要讓每個人都能夠發揮自己的專長,並且幫助他人不擅長的部分,才能讓團隊合作更完美。還有,遇到問題時,我們應該要設法解決,而不是等答案。在解決問題的過程中,說不定會有有趣的新發現,或著是新產生的問題,等著我們繼續去解答呢!

而在這段日子裡，我們體會了許多人不會有的體驗，著實讓我們有了前所未有的成長，實在獲益良多！



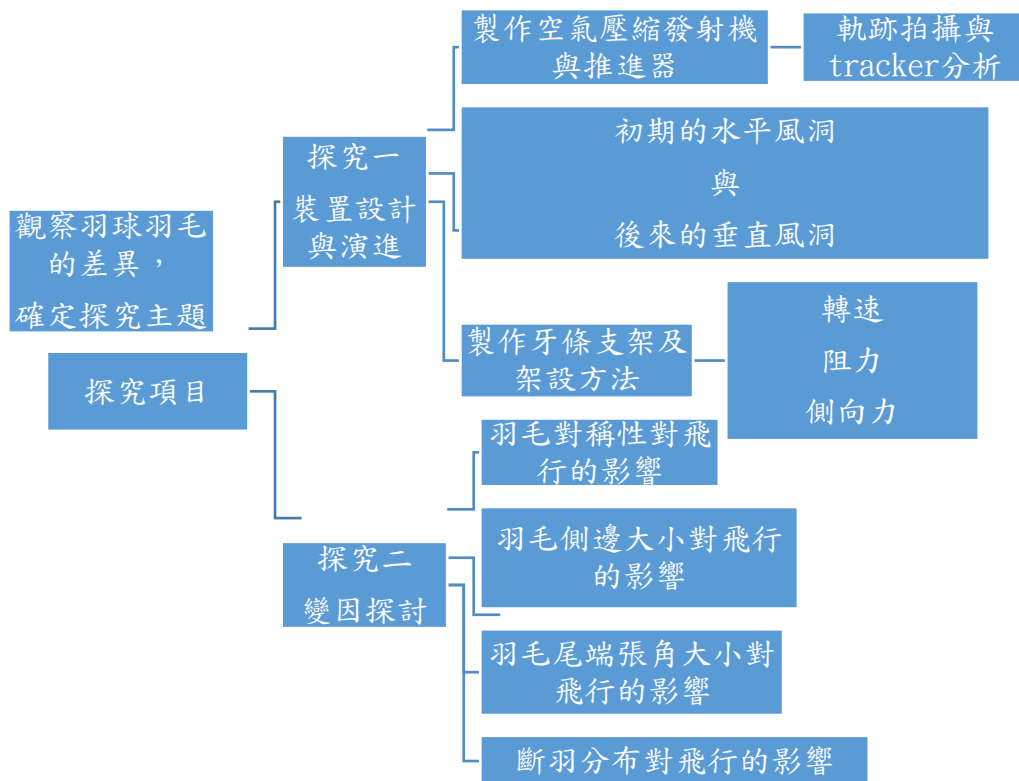
## 壹、摘要

從平時練習的羽球中，發現羽毛形狀及疊合方式存在明顯差異，於是著手設計空氣壓縮推進噴射的方式探討軌跡差異。利用四個排風扇並排製作垂直風洞，再將球頭鑽洞放入滾珠軸承及牙條作為支架，使穿過支架的羽球在垂直風洞中仍然能夠自由旋轉以利取得運動時的阻力、轉速及側向力。**實驗數據顯示，羽毛只要經過修剪，阻力多會下降；若修剪外側羽毛，高速下的轉速可大幅提升，但低速時則因受力面積減少導致轉速下降；但羽尾若破壞程度太大，如：剪成平頭狀，會使得轉動能力下降，甚至低速時無法轉動，飛行距離也明顯提升。最後，斷翅的實驗出現了一個有趣的結果：透過斷去第二根羽毛達到對稱的缺口，可挽救失控的側向力，提升破損羽球的練習價值。**

## 貳、動機

最近台灣選手在國際羽球比賽屢創佳績，看到每顆球完美的飛行路徑，與平時我們練習時判若雲泥，再加上觀察到羽球羽毛形狀與疊合方式存在明顯差異，於是展開了一系列的研究，探知羽球羽毛的秘密。

## 參、研究流程圖

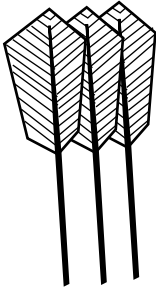
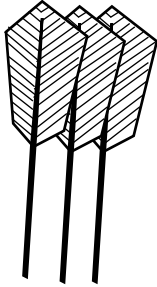
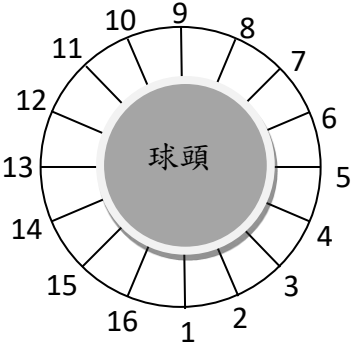


## 肆、研究目的

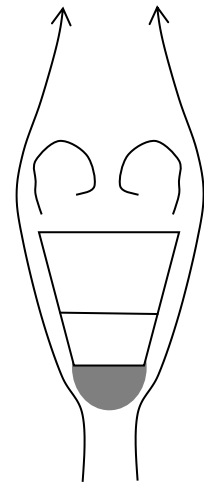
1. 製作垂直風洞，並確認風速穩定。
2. 製作羽球發射裝置。
3. 探討羽毛外翅對稱性對於飛行的影響。
4. 探討羽毛側邊大小對於飛行的影響。
5. 探討羽毛尾端張角大小對飛行的影響。
6. 探討羽毛斷羽分布對於飛行的影響。

## 伍、名詞定義

1. 羽毛疊合方式：毛梗兩側的羽毛大小是不同的，我們依據羽毛右側羽毛片大小定義出兩款羽球名稱。

<p>小翅在外： 毛梗右側為較小羽毛片</p>	<p>大翅在外： 毛梗右側為較大羽毛片</p>	<p>羽毛編號：羽毛球上的 16 根羽毛為逆時針方向疊合，故編號也為逆時針方向命名為 1、2、3、...、16。</p>
		

2. 斷羽分布：採斷去第 1 根、第(1+9)根、第(1+5+9)根及第(1+5+9+13)根，共四種斷羽分布。
3. 阻力：探討羽球在風洞中運動時的阻力。
4. 轉速：羽球旋轉時的轉速。
5. 側向力：羽球在風洞中運動時，在與風向垂直的方向上的受力。
6. 背景值：實驗支架裝上羽球後，無風狀態下的實驗數值。



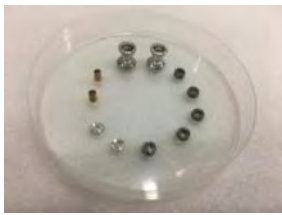

## 陸、探究與討論

### 探究一、裝置的探究與討論

#### 探究二 - 1 如何讓羽球順利旋轉以利取得需要的數據？

(一) 目的：選用合適的軸承及相關零件並安裝到羽球上，使羽球能在支架上順利旋轉。

(二) 器材：如下表所示：

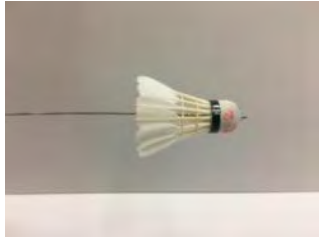


器材	1. 四驅車導輪(內有滾珠軸承) 2. 白鐵牙條 3. 墊片與螺帽、雙通螺柱 4. 電鑽 5. 轉速計、風速計		
----	---	--	---

(三) 步驟：

1. 羽球球頭中央鑽出符合滾珠軸承大小的洞口，並利用電鑽確認旋轉穩定無偏移。
2. 2mm 的白鐵牙條上裝上扯鈴導輪、滾珠軸承與雙通螺柱，再將鑽洞後的羽球套入。



3. 羽毛球頭貼上反光貼紙，測量風吹時的轉速是否達到 350rpm 的平均轉速標準。

		
羽球鑽洞套入牙條及滾珠軸承	原始羽球在風洞中穩定轉動的自然轉速達 356.5rpm	同一顆羽球鑽洞，裝上滾珠軸承放進風洞中，可達 340rpm

(四) 結果

1. 透過很多次的練習，提升鑽洞的技巧，可以使得裝上滾珠軸承的羽球能達到 350rpm 平均轉速標準，甚至超過 450rpm 的高轉速。

#### 探究二 - 2 製作何種風洞取得羽球運動時的相關數據？

(一) 目的：使羽球能在風洞中自由旋轉並取得相關數據。



(二) 步驟：

1. 將四個直流排風扇(12cm\*12cm\*4cm)鎖在挖洞的塑膠整理盒下方。



2. 內部透過熱熔膠黏上 PP 板作為收縮段，上端利用吸管作為整流段穩定氣流。
3. 對角的 2 台排風扇接上調光器調整轉速，並選定五種風速供實驗使用。

(三) 結果：

1. 原先，我們製作了大型的水平風洞，並利用樂高積木架設出羽球的支架，但因羽球在受風下的轉速不穩定且未達標準值 350rpm，故改為製作小型的垂直風洞。

		
利用樂高積木組合成支架，方便羽球在風洞中進行測試。	原本製作的水平風洞全貌。	羽球在風洞中測試轉動效果，但轉動不順也不穩定。

2. 因原本使用的風扇太重，架高不易，故將原來的風扇改由 4 台排風扇並排取代。
3. 未鑽洞的羽球在此垂直風洞中能穩定轉動，且置入滾珠軸承的羽球也能在此風洞中獲得達標準的良好轉速。

### 探究二 - 3 製作微型風速計取得轉速與風速的關係，測量風洞中的風速

- (一) 目的：確認垂直風洞中的風速穩定，並取得五種風速下的轉速。

(二) 步驟：

1. 拆卸網路上購買的風速計取出風扇，黏上長桿作為微型風速計並在葉片間貼上反光貼紙，以便測量受風下的轉速。
2. 利用風速計測量風扇前方不同距離處的 10 個風速後，再將微型風速計放在這 10 個位置上透過轉速計得到對應的轉速值。
3. 將排風扇接上調光器調整轉速，透過微型風速計測量不同風速下的



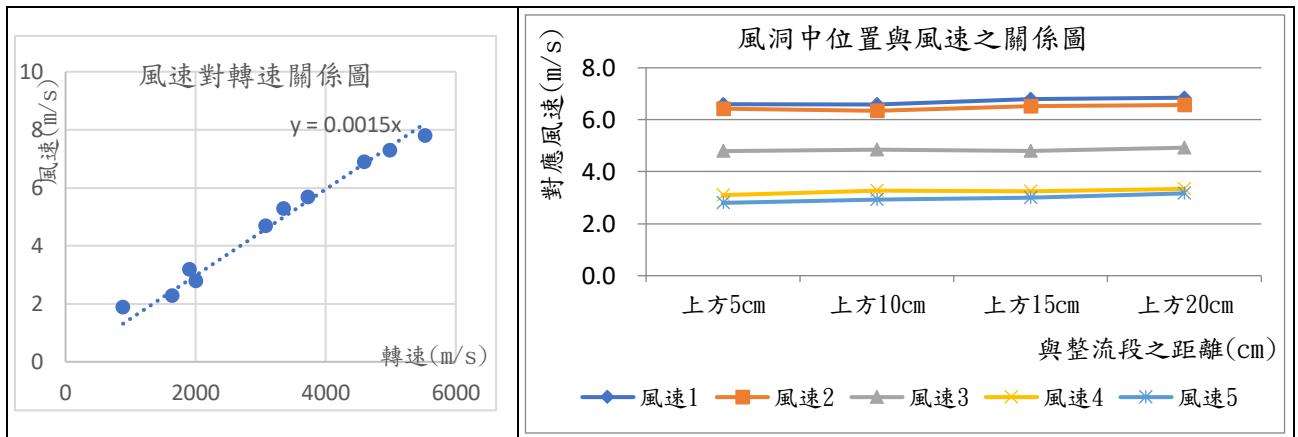
轉速，再透過關係圖形得知風洞內的風速。

(三) 結果：

1. 數據：

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7	位置 8	位置 9	位置 10
次數 1	902	1897	3068	4228	1596	5602	4903	3200	1988	3693
次數 2	911	1924	3107	4828	1645	5544	4954	3345	2033	3680
次數 3	935	1906	3094	4684	1698	5526	4926	3398	2064	3702
次數 4	940	1891	3092	4538	1603	5498	5050	3433	1976	3812
次數 5	896	1922	3043	4669	1652	5475	5123	3398	1941	3764
平均轉速(rpm)	884	1908	3080.8	4589.4	1638.8	5529	4991.2	3354.8	2000.4	3730.2
風速(m/s)	1.9	3.2	4.7	6.9	2.3	7.8	7.3	5.3	2.8	5.7

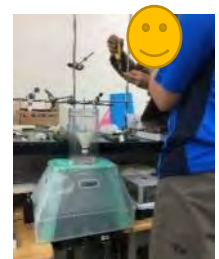
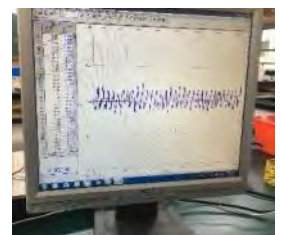
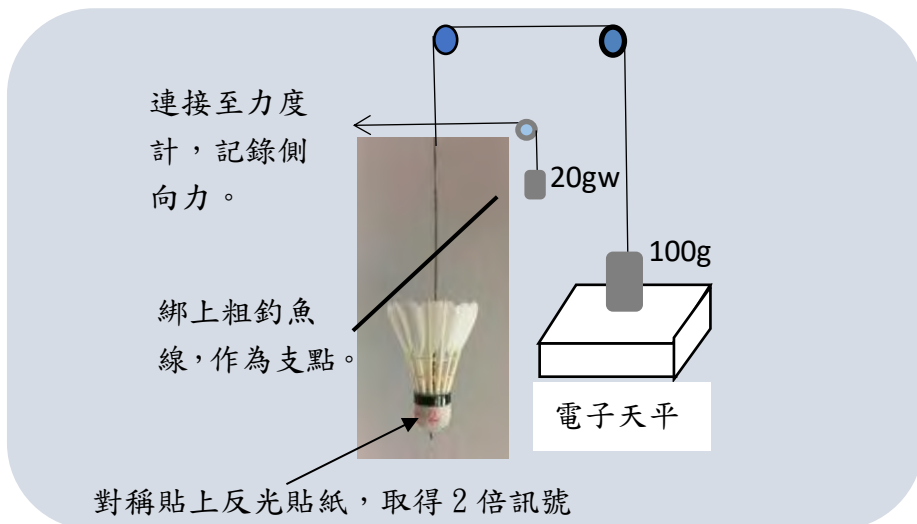
2. 風速及轉速關係作圖及實驗用的 5 種風速，並透過自製的微型風速計深入風洞中，取得轉速數據如下，確認垂直風洞內為穩定氣流。



探究二 - 4 決定架設方式，取得羽球運動時阻力、轉速以及側向力。

(一) 目的：測得羽球受風旋轉時的阻力、轉速以及側向力。

(二) 裝置示意圖：





1. 紀錄無風及有風時的電子天平讀數差值，作為該羽球運動時受到的空氣阻力。
2. 羽球球頭兩側對稱貼上反光貼紙，透過轉速計記錄轉速，再將測量值除以 2，即為轉速。
3. 距離牙條上端 15 公分，於前後方向用力綁上粗釣魚線，作為支點，距離牙條上端 5 公分，於水平方向上綁釣魚線，一端接 20gw 砝碼，另一端接上力度計，讀取側向力的變化。

### (三) 結果：

1. 我們使用了準確至 0.001 公克的電子天平，極為敏銳，實驗環境中的微小變動都會影響實驗數據，故實驗環境附近需保持無走動狀態。而電子天平在有風與無風時的讀數差值即為羽球運動時受到的阻力。
2. 我們為提高弱風下的轉速，於球頭兩側對稱貼上反光貼紙，使得轉速計得到兩倍的訊號，故真正轉速為測量值/2。
3. 原本，只有於牙條側邊綁上受力 20 公克重的釣魚線，透過力度計測量釣魚線的張力變化作為側向力的數值。但是，打開風扇後，出現以綁線處為支點的晃動情形，力度計數值無法反應出側向力。
4. 後來，在牙條上分別透過兩條分別為粗、細的釣魚線改善，才能測得側向力。用力綁上粗釣魚線的位置會於裝置受風時作為支點，支點上方的晃動便可透過細釣魚線的張力變化反應出來。
5. 確定架設方式後，將裝上軸承的牙條放進風洞中，在未裝上羽球的狀態下，測量支架受風時的阻力為 0.0029gw，作為空白值。

## 探究二 - 5 如何取得羽球運動時的軌跡？

(一) 目的：利用空氣壓縮機發射羽球，拍攝下軌跡進行分析。

(二) 步驟：

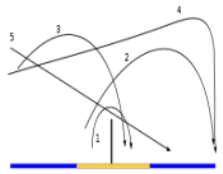
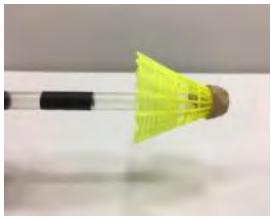


1. 準備規格為 2hp 的空壓機一台及長柄空氣槍一支。
2. 取一塑膠羽球將其球頭削整至可放入羽球內，再利用熱熔膠將塑膠羽球黏至粗吸管上作為發射時的推進器。再於粗吸管後端繞上 3 圈膠帶，利用縫衣針鑽洞綁上 20 公分的

粗棉線，作為推進器與羽球分離使用。

3. 將空氣槍架設於實驗用鐵架上，透過量角器確認發射仰角為 45 度。當為空壓機的氣壓為  $8\text{kgw/cm}^2$  時壓下空氣槍進行發射。
4. 透過攝影機拍攝下飛行軌跡，透過 tracker 分析實驗數據。

### (三)結果：

1. 若無吸管作為推進器，僅僅藉由高壓空氣噴射並無法得到穩定的飛行軌跡，且在發射的開始階段，羽球會發生嚴重晃動導致每次的發射結果不一。
2. 透過綁上粗棉線，作為推進器與羽球分離之用，確實能夠得到穩定發射的結果。而發球後的軌跡和挑球球路相似。

			
所得到的發球球路和 2 號挑球球路相似(圖片取自維基百科)	利用吸管黏上塑膠羽球做為推進器	利用重錘及量角器確認發射角度	空氣壓縮機

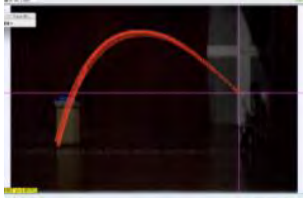


3. 發射前，空壓機需先壓縮空氣至 8 磅的最大氣壓，以第一次的洩壓進行噴射實驗。
4. 為避免風的流動影響軌跡，我們全程於地下室的活動中心進行軌跡的實驗。

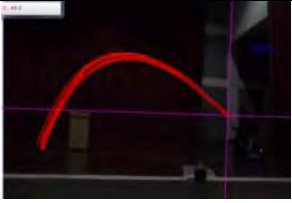
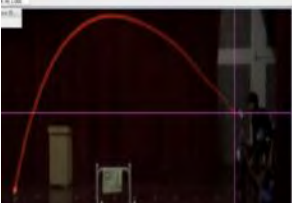

## 探究二、各項變因探討

### 探究二 - 1 確認研究主題

(一)步驟：我們挑選凱特蒂 k6、extthree、rsl no.4 以及 victor 雲雀級四種羽球進行初步實驗。





(二)數據：

K6 大翅在外	飛行軌跡仰角 45 度	如右圖	
	重量	4.98g	
	羽毛形狀	完整翅	
	轉速(rpm)	370	
K6 小翅在外	飛行軌跡仰角 45 度	如右圖	
	重量	4.97g	
	羽毛形狀	完整翅	
	轉速(rpm)	444	
Ex 大翅在外	飛行軌跡仰角 45 度	如右圖	

	重量	4.92g	
	羽毛形狀	削去內側部分羽毛	
	轉速(rpm)	468	
Ex 小翅在外	飛行軌跡仰角 45 度	如右圖	
	重量	4.95g	
	羽毛形狀	削去外側部分羽毛	
	轉速(rpm)	459	
Rsl no.4	飛行軌跡仰角 45 度	如右圖	
	重量	5.00g	
	羽毛形狀	完整翅	
	轉速(rpm)	383	
Victor 雲雀級	飛行軌跡仰角 30 度	如右圖	
	重量	5.03g	
	羽毛形狀	完整翅	
	轉速(rpm)	371	

### (三) 結果

1. 我們上網查詢羽毛球比賽規格如下：羽毛球由 16 根羽毛緊插在基座上組成，羽毛長度 62~70mm，頂端口徑 58~68mm，基座直徑 25~28mm 且底部成球形，重量 4.74~5.5g。
2. 我們觀察到羽毛形狀上有著顯著差異，大部分的羽球為完整羽毛，只是毛梗左右寬窄不同。但有的羽毛一側出現直切而下的形狀，如下圖 ex 小翅在外的羽球所示。
3. 同時也從新購買的羽球中每筒 12 顆羽球中存在 6 顆大翅在外，6 顆小翅在外兩種的混合情形，於是將探討主題鎖定在羽毛對稱性對飛行的影響，並選定 k6 和 ex 兩種廠牌來進行探討。
4. 探討羽球的羽毛差異

種類	ex 小翅在外	ex 大翅在外	k6 小翅在外	k6 大翅在外
羽毛				

## 探究二 - 2 羽球羽毛的對稱性對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

(一) 目的：研究羽毛的對稱性對於飛行的影響

(二) 步驟：準備 ex 和 k6 兩種廠牌的羽球，其中又依外側羽毛的大小分為下列四種情形探討。

(A)ex 小翅在外	(B)ex 大翅在外	(C)k6 小翅在外	(D)k6 大翅在外
------------	------------	------------	------------

(三) 軌跡拍攝與分析：

1. 四種羽球分別透過空氣壓縮機各自進行 10 次的 45 度仰角發射並進行運動模式錄影。
2. 再透過 tracker 分析影片取得發射仰角、發射初速、最大垂直高度、最大水平距離以及落地速度的數據，進行比較分析。

(四) 風洞數據測量與分析：

依序將四種羽球鑽洞套上滾珠軸承及牙條，放進風洞中，量取 5 種風速下的阻力、轉速及側向力，每組數據測量 5 次。

(五) 數據與討論：

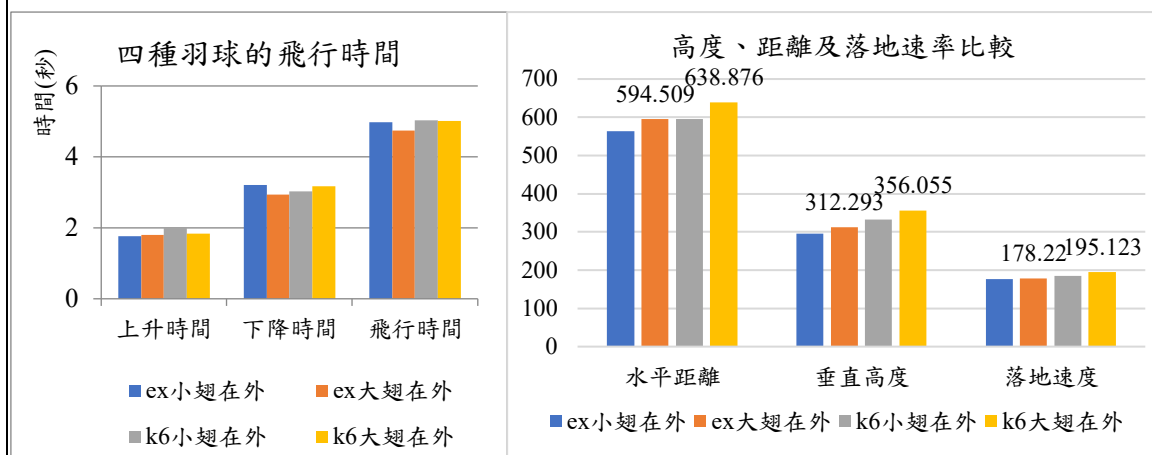
1. 飛行數據分析：以 k6 大翅在外為例，因版面有限，略去部分數據。數據顯示：
2. 上升：羽球經 0.067 秒加速至 409.087cm/s 後受到阻力逐漸減速，且於 1.869 秒時上升至最高點，水平速率減至 139.497cm/s，垂直速度接近於 0cm/s。
3. 下降：於 5.005 秒時落到地面，且由數據可以發現落地時達終端速度 195.123m/s。

k6 大翅在外完整球								
t	x	y	v	a	$v_{\{x\}}$	$v_{\{y\}}$	$a_{\{x\}}$	$a_{\{y\}}$
(s)	(cm)	(cm)	(cm/s)	(cm/s <sup>2</sup> )	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s <sup>2</sup> )	(cm/s <sup>2</sup> )
0	0.352	-0.352						
0.033	-2.463	2.815	261.458		-195.125	174.031		
0.067	-12.669	11.262	<b>409.087</b>	2,399.83	-301.264	276.754	-1,750.23	1,641.91
0.1	-22.568	21.284	407.921	536.118	-295.02	281.714	364.082	-393.532
0.133	-32.357	30.061	371.078	825.068	-279.187	244.446	197.531	-801.073
0.167	-41.199	37.597	356.791	325.307	-276.387	225.633	27.284	-324.161
0.2	-50.801	45.119	362.032	343.957	-283.292	225.416	112.952	-324.882
0.234	-60.104	52.64	338.064	566.242	-267.545	206.655	297.798	-481.609
略去								
4.905	-633.799	-134.171	195.123	360.326	-53.411	-187.67	169.782	317.819
4.938	-635.466	-140.429	175.179	183.099	-45.552	-187.776	92.369	158.092
4.972	-636.839	-145.459	<b>195.123</b>	1,297.81	-45.822	-187.67	98.977	1,294.03
5.005	-638.524	-151.723						

(六) A~D 四種羽球飛行數據比較

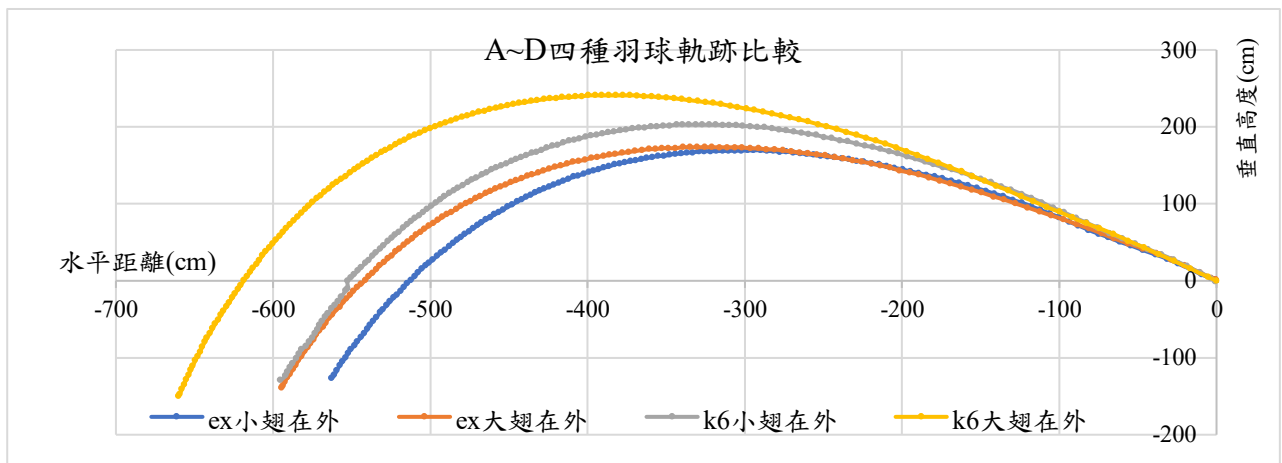
項目	A	B	C	D
----	---	---	---	---

	ex 小翅在外	ex 大翅在外	k6 小翅在外	k6 大翅在外
上升時間(s)	1.768	1.802	2.002	1.869
下降時間(s)	3.204	2.936	3.036	3.136
飛行時間(s)	4.972	4.738	5.038	5.005
水平距離(cm)	563.731	594.509	594.708	638.876
垂直高度(cm)	296.13	312.293	332.265	356.055
落地速度(cm/s)	177	178.22	184.306	195.123

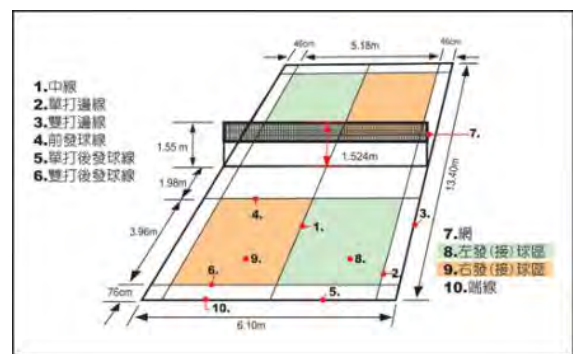
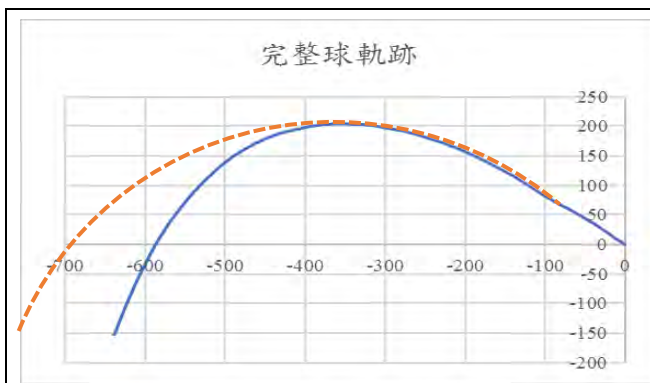


- (1) 每顆球均進行 10 次發射，可發現外翅為大翅羽球具有較高較遠的飛行軌跡，其中 k6 大翅在外的羽球同時展現最高的垂直距離、最遠的水平距離。
- (2) ex 小翅在外的羽球在高度及水平距離均較短。
- (3) 大翅款在水平及垂直方向上具有較大的平均速率。

### (七) A~D 四種羽球飛行軌跡比較



1. 討論：結果顯示出我們採用的空氣壓縮機噴射方式能夠提供羽球發球之用。羽球上升到最高點後，受阻力作用產生下墜的軌跡，和實際揮拍的挑球球路相似。
2. 配合風速 4.8m/s 時的阻力數據，k6 大翅擁有的最小阻力使其展現出最大的高度與最遠的軌跡。

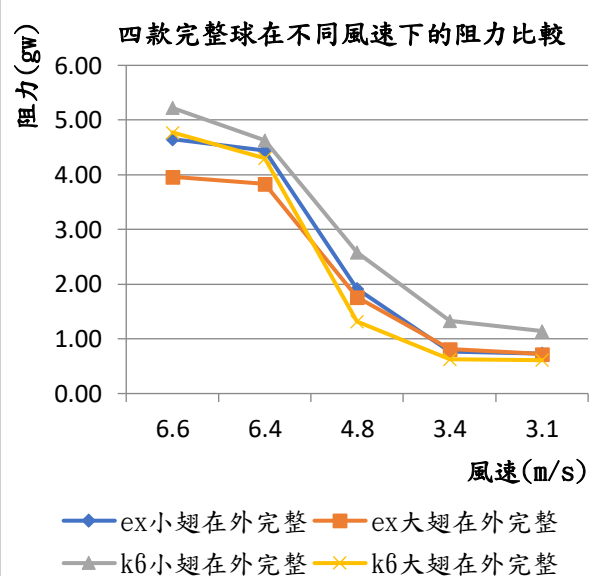
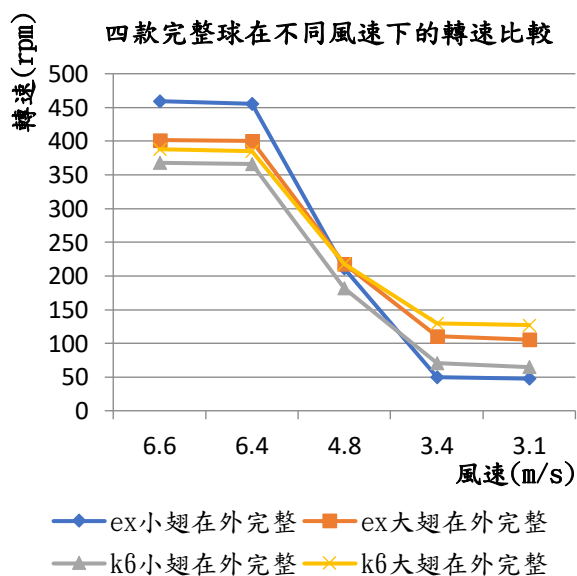


羽球擊發後，若未受阻力作用會走橘色虛線的拋物線軌跡，但因在最高點之後，受羽毛和空氣作用產生的阻力出現下墜的軌跡，如圖中藍色軌跡所示。

標準的羽球場為長方形，長度 13.4 米，寬度 6.1 米，天花板的高度應大於 6.1 米。羽球場的網柱必須固定在地面上，有效高度為 1.55 米。球網頂部至地面的高度 1.524 米。  
[http://web.ntpu.edu.tw/~jasonchen/sports\\_classroom/badminton\\_classroom/court\\_and\\_shoes.htm](http://web.ntpu.edu.tw/~jasonchen/sports_classroom/badminton_classroom/court_and_shoes.htm)

### (八) 轉速與阻力比較

項目	平均阻力(gw)				平均轉速(rpm)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
風速 (m/s)	ex 小翅 在外	ex 大翅 在外	k6 小翅 在外	k6 大翅 在外	ex 小翅 在外	ex 大翅 在外	k6 小翅 在外	k6 大翅 在外
6.6	4.651	3.963	5.222	4.775	459	402	368	388
6.4	4.440	3.832	4.627	4.300	455	400	366	385
4.8	1.915	1.759	2.577	1.318	212	218	182	218
3.4	0.767	0.817	1.327	0.623	50	110	71	130
3.1	0.730	0.725	1.143	0.610	48	106	65	127





(1) 轉速部分：顯示羽球的轉速隨著風速增加而跟著增加。

① 高風速下的轉速：ex 小翅在外 > ex 大翅在外 > k6 大翅在外 > k6 小翅在外。

② 低風速下的轉速：k6 大翅在外 > ex 大翅在外 > k6 小翅在外 > ex 小翅在外。

③ 小翅在外的羽球在高速下具有較大的轉速，而在低速時，會因受風面積小導致轉速明顯降低，反而低於大翅在外的轉速。以(A)ex 小翅在外款為例，高速下的轉速為四者中最大，但低速時卻已降至最小。

④ 在風速 4.8m/s 時，四種球的轉速相當。

(2) 阻力部分：顯示羽球受到的阻力隨著風速增加而增加。

① 高速下的阻力：k6 小翅在外 > ex 小翅在外 > k6 大翅在外 > ex 大翅在外。推論原因為 (B)ex 款大翅在外款羽球，因為內側重疊處的縫隙有利於空氣的流通，具有最小阻力。

② 中低速時則是 k6 大翅在外款具有較小的阻力。

③ (C) k6 小翅在外款的阻力在所有測量的風速下均具有最大的阻力。

## (九) 側向力比較

1. 側向力數據處理說明：以 ex 小翅在外的完整羽球在風洞中的數據為例子

① 將數據取絕對值後加總，其總和可以視為羽球在 10 秒內的受力總和，並以 gw 為單位。

② 無風下的數據總和做為背景值。

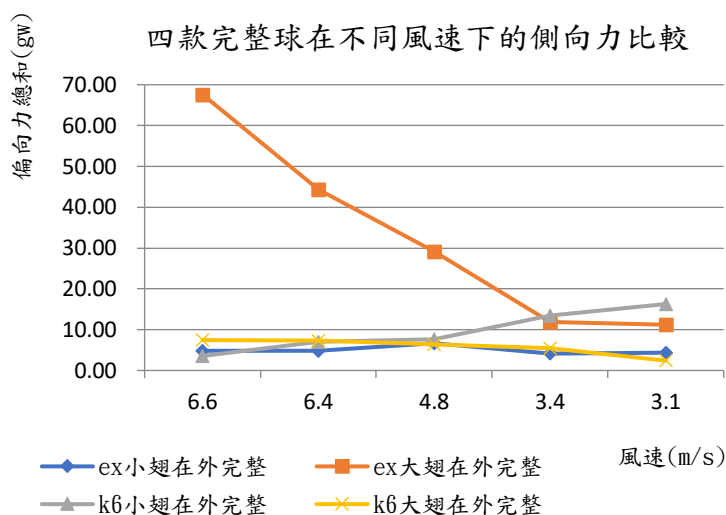
③ 開啟風扇後的數據總和與背景值的差值可以用來表示羽球於不同風速下的側向力大小。

原始數據，以牛頓為單位					總和 172.405	總和 171.658	總和 168.159	總和 168.08
時間	背景值	風速 5-1	風速 5-3	風速 5-5	背景值	風速 5-1	風速 5-3	風速 5-5
0	-0.00157	0.005111	-0.00157	-0.00157	0.157268	0.511121	0.157268	0.157268
0.02	0.005111	-0.00157	-0.00157	-0.00157	0.511121	0.157268	0.157268	0.157268
0.04	-0.00157	-0.00157	0.005111	-0.00157	0.157268	0.157268	0.511121	0.157268
0.06	-0.00157	-0.00786	-0.00157	-0.00157	0.157268	0.78634	0.157268	0.157268
0.08	-0.00157	-0.00157	-0.00157	-0.00157	0.157268	0.157268	0.157268	0.157268
0.1	-0.00157	0.005111	0.005111	0.005111	0.157268	0.511121	0.511121	0.511121
中間略過								
10	0.005111	-0.00157	0.005111	-0.00157	0.511121	0.157268	0.511121	0.157268

2. A~D 四種球在不同風速下的側向力總合作圖

項目	A	B	C	D
	ex 小翅在外完整	ex 大翅在外完整	k6 小翅在外完整	k6 大翅在外完整

風速	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和
6.6	459	4.65	4.88	402	3.96	67.63	368	5.22	3.55	388	4.78	7.43
6.4	455	4.44	4.76	400	3.83	44.40	366	4.63	6.96	385	4.30	7.34
4.8	212	1.91	6.67	218	1.76	29.07	182	2.58	7.67	218	1.32	6.45
3.4	50	0.77	4.13	110	0.82	11.87	71	1.33	13.49	130	0.62	5.52
3.1	48	0.73	4.32	106	0.72	11.21	65	1.14	16.28	127	0.61	2.41



- ①四款羽球中，除了(B)ex 大翅在外的羽球，各風速下的側向力變化不大，均在 20gw 以內。
- ②唯獨 ex 大翅在外的羽球具有很大的側向力。
- ③初步推測其他三種球，羽毛內側重疊處的密合性佳，唯獨 ex 大翅在外的羽球內側重疊處存在縫隙，造成運動時風會穿過縫隙，導致增加羽球側向受力。

### 探究二 - 3 羽球側邊羽毛修剪對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

(一) 目的：探討羽球外側羽毛大小對於飛行的影響。

(二) 修剪定義：

1. 小修剪：每根羽毛右側距離毛梗距離約 0.6 公分。
2. 大修剪：每根羽毛右側距離毛梗距離約 0.4 公分。

(三) 步驟：

1. 我們針對大翅在外的羽球進行探討，取(B)ex 大翅在外的羽球，依照定義完成 16 根羽毛的小修剪。
2. 將小修剪後的羽球透過空氣壓縮機進行 45 度仰角的發射，每次發射 6 次，拍攝飛行軌跡透過 tracker 分析取得相關數據。
3. 再依定義完成(B)ex 大翅在外的羽球的側邊羽毛大修剪，重複步驟 2。
4. 依序將小修剪及大修剪的羽球鑽洞放上滾珠軸承等裝置，進入風洞中進行五種風速下的轉速、阻力以及側向力紀錄，每項數據重複 6 次。
5. 將 ex 大翅在外的羽球改為 k6 大翅在外的羽球，重複 1~4 的步驟。

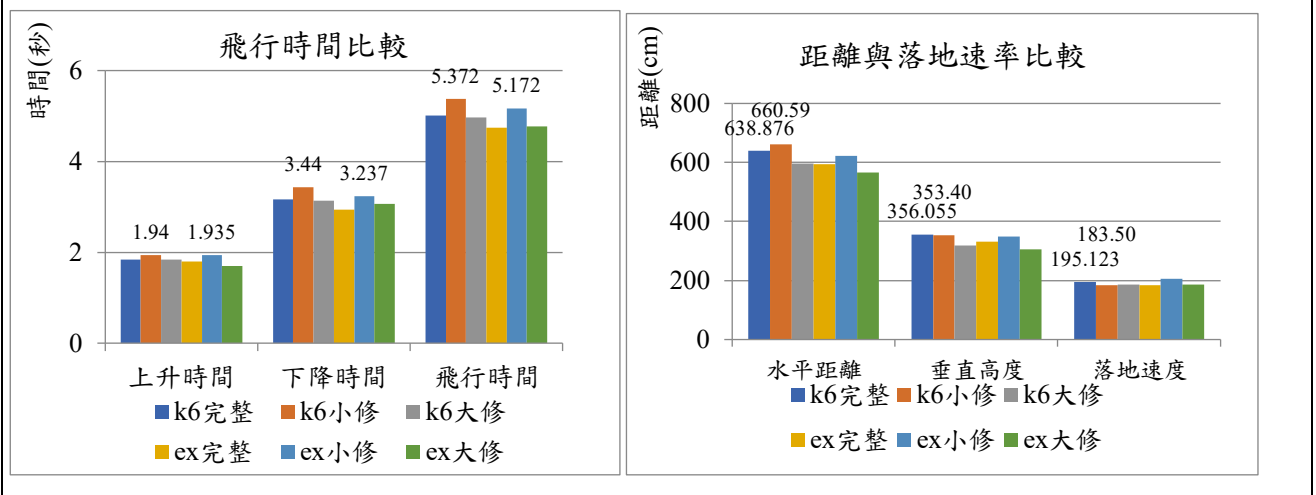


完成大修剪的 ex 大翅在外羽球

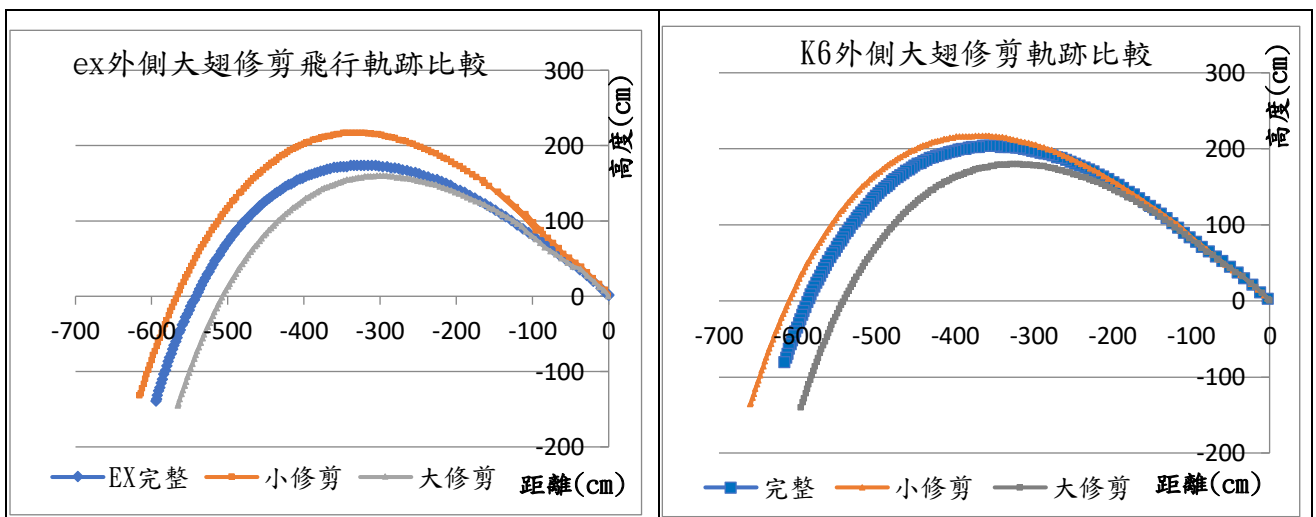
#### (四) 數據與討論

##### 1. 飛行數據比較

項目	B			項目	D		
	ex 大翅在外				k6 大翅在外		
	完整	小修剪	大修剪		完整	小修剪	大修剪
上升時間(s)	1.802	1.935	1.702	上升時間(s)	1.835	1.940	1.840
下降時間(s)	2.936	3.237	3.069	下降時間(s)	3.170	3.440	3.140
飛行時間(s)	4.738	5.172	4.771	飛行時間(s)	5.005	5.372	4.972
水平距離(cm)	594.509	621.96	565.11	水平距離(cm)	638.87	660.59	595.33
垂直高度(cm)	312.293	348.40	305.00	垂直高度(cm)	356.05	353.40	319.70
落地速度(cm/s)	178.22	206.80	185.30	落地速度(cm/s)	195.12	183.50	186.30



#### (五) 飛行軌跡比較



(1) 兩款羽球的側邊羽毛經修剪後，均呈現相同的變化趨勢。外側羽毛小修剪後的飛行軌跡更高也更遠，但大修剪後，飛行高度與距離反而均較未修剪球為低。

#### (六) 轉速、阻力與側向力總和比較

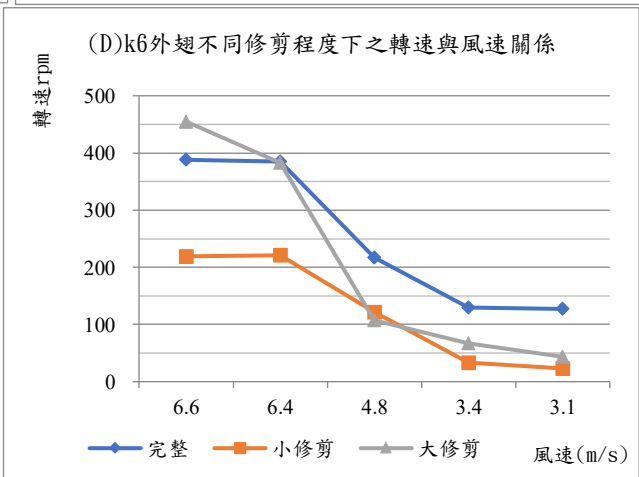
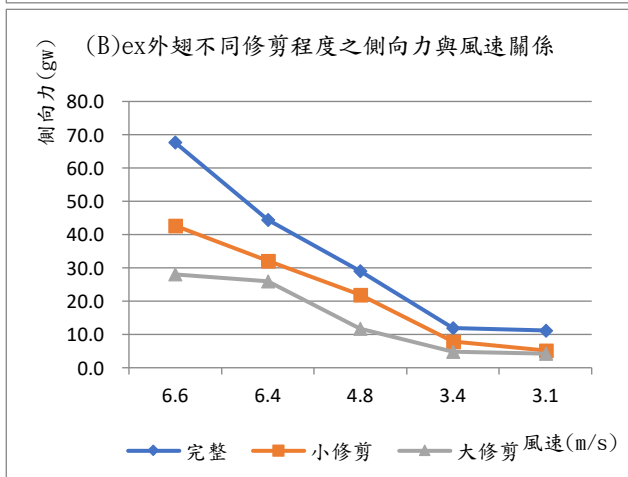
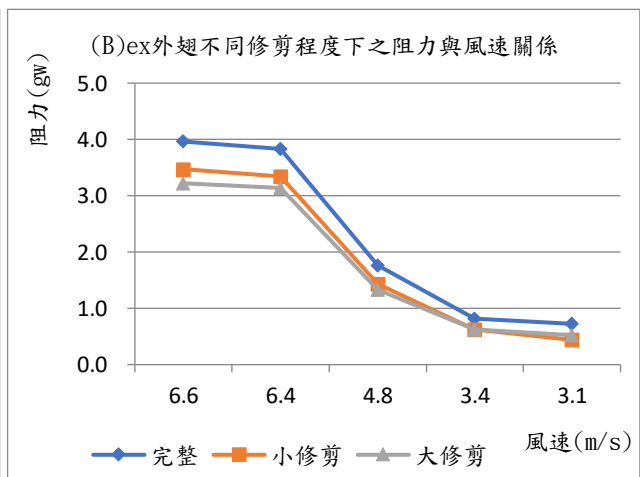
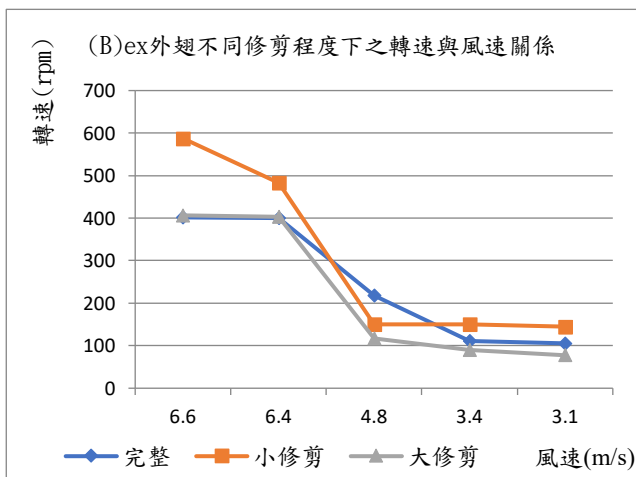
##### 1. ex 大翅在外數據

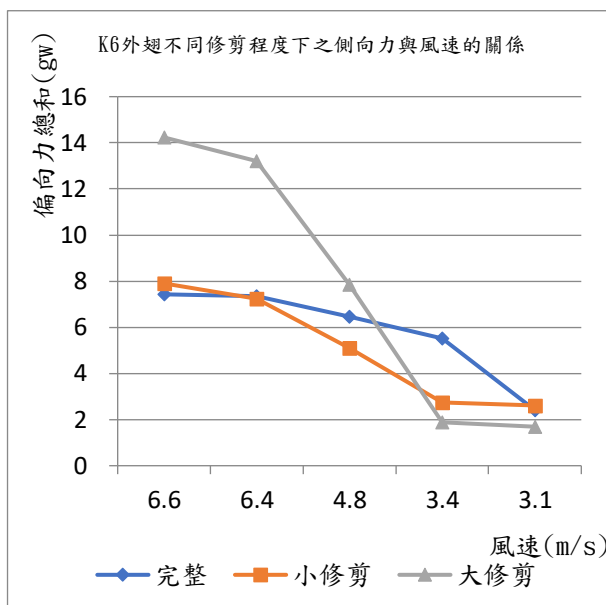
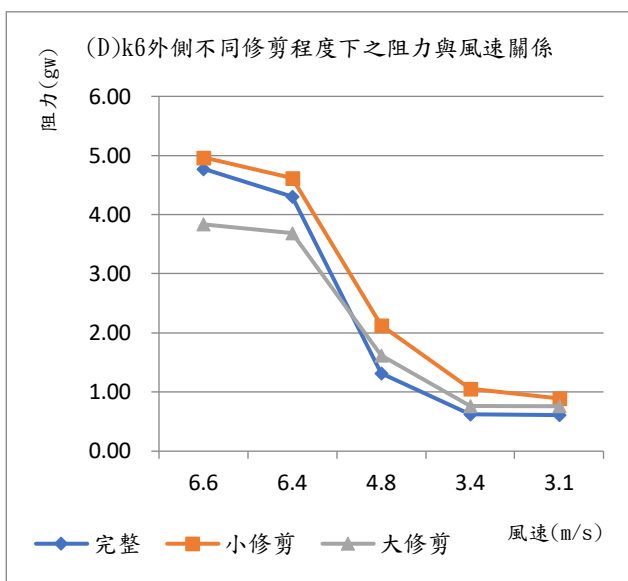
(B)ex 大翅在外	完整			小修剪			大修剪		
風速	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和
6.6	402	3.963	67.625	588	3.472	42.6589	407	3.221	28.033
6.4	400	3.832	44.402	483	3.344	32.0433	403	3.133	26.054
4.8	218	1.759	29.068	151	1.436	21.8996	117	1.329	11.808
3.4	110	0.817	11.874	151	0.619	7.9813	91	0.625	4.744
3.1	106	0.725	11.205	145	0.439	5.1898	78	0.524	4.246

## 2. k6 大翅在外數據

(D)k6 大翅在外	完整			小修剪			大修剪		
風速	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和	轉速	阻力	側向力 總和
6.6	388	4.775	7.430	421	4.968	7.903	455	3.836	14.233
6.4	385	4.300	7.338	419	4.618	7.246	383	3.692	13.211
4.8	218	1.318	6.450	122	2.132	5.111	107	1.621	7.863
3.4	130	0.623	5.517	33	1.062	2.740	67	0.760	1.887
3.1	127	0.610	2.411	23	0.892	2.612	44	0.760	1.691

## 3. 各項關係圖





**討論：**兩款球在修剪後的表現多有不同

- (1) Ex 大翅在外款經小修剪後，高速下的轉速明顯增加，但大修剪後，便不利於旋轉，轉速下降。而阻力及側向力則是隨著修剪程度增加而逐漸減少。
- (2) k6 大翅在外款經小修剪後，高速下的轉速和阻力均增加，側向力略為下降。經大修剪後，高速下的轉速和側向力提升；慢速時的轉速和側向力急遽下降。

## 探究二 - 4 羽球羽毛尾端張角對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

(一)目的：探討羽毛尾端張角對於飛行的影響

(二)修剪定義：

1. 圓弧頭：每根羽毛上端修成圓弧狀。
2. 平頭：每根羽毛上端修成水平狀。

(三)步驟：

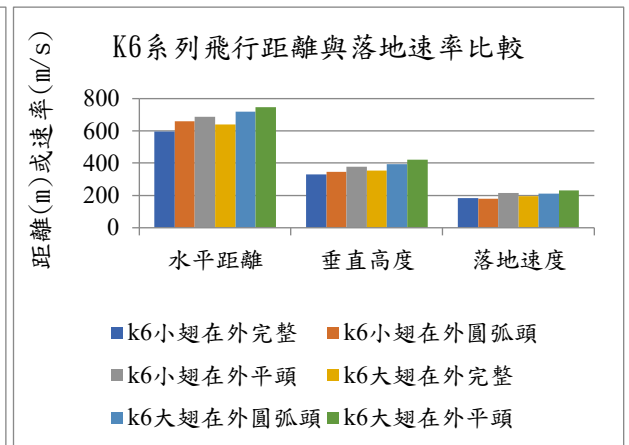
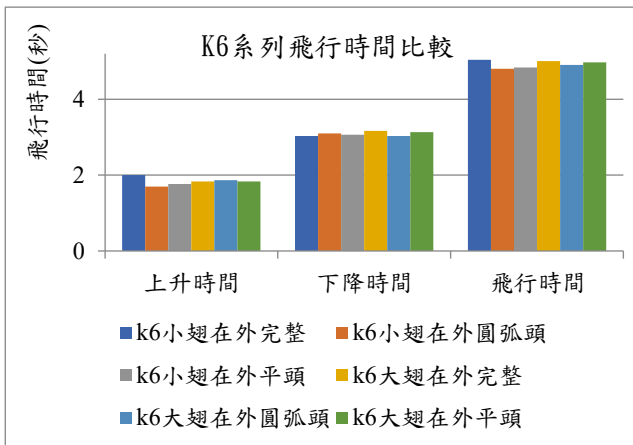
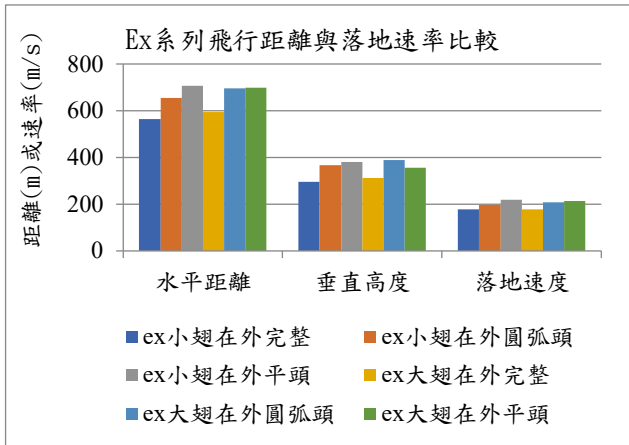
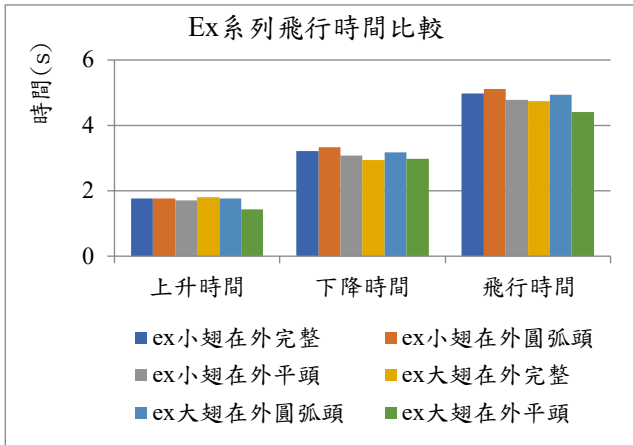
1. 取(A)ex 小翅在外的羽球，依照定義完成 16 根羽毛的圓弧頭修剪。
2. 將修剪後的 ex 小翅在外羽球透過空氣壓縮機進行 45 度仰角的發射，每次發射 6 次，拍攝飛行軌跡透過 tracker 分析取得相關數據。
3. 再取另一顆(A)ex 小翅在外的羽球依定義完成平頭的修剪，重複步驟 2。
4. 依序將圓弧頭及平頭羽球鑽洞放上滾珠軸承等裝置，進入風洞中進行五種風速下的轉速、阻力以及側向力紀錄，每項數據重複 6 次。
5. 將(A)ex 小翅在外的羽球依序更換為(B)ex 大翅在外(C)k6 小翅在外(D)k6 大翅在外，重複

1~4 的步驟。

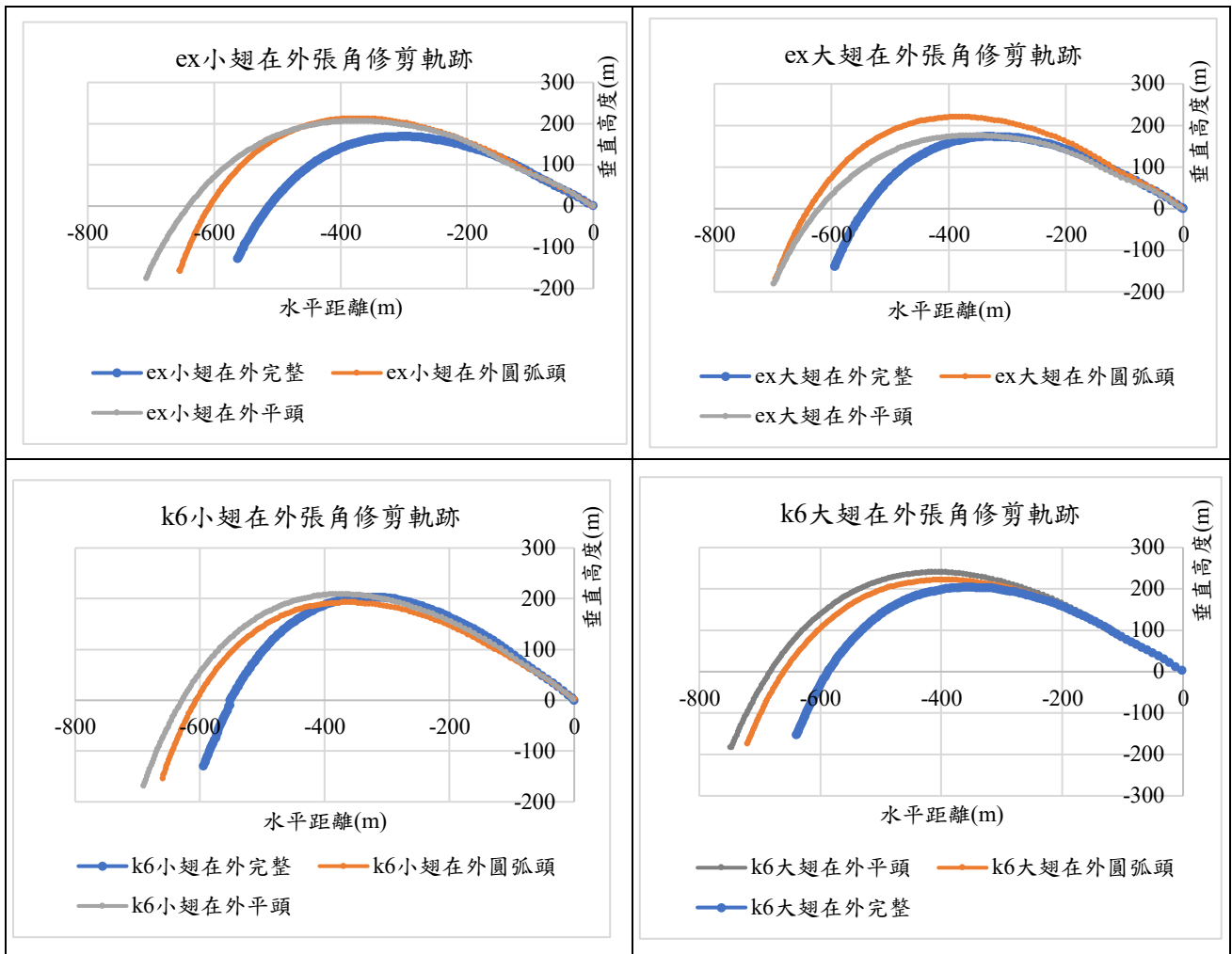
(四)羽球飛行軌跡與數據比較

項目	A			B		
	ex 小翅在外			ex 大翅在外		
	完整	圓弧頭	平頭	完整	圓弧頭	平頭
上升時間(s)	1.768	1.768	1.702	1.802	1.768	1.435
下降時間(s)	3.204	3.337	3.069	2.936	3.17	2.969
飛行時間(s)	4.972	5.105	4.771	4.738	4.938	4.404
水平距離(cm)	563.731	654.064	706.933	594.708	695.885	698.482
垂直高度(cm)	296.13	368.26	381.299	332.265	389.806	356.116
落地速度(cm/s)	177	196.832	219.945	184.123	206.852	214.632

項目	C			D		
	K6 小翅在外			K6 大翅在外		
	完整	圓弧頭	平頭	完整	圓弧頭	平頭
上升時間(s)	2.002	1.702	1.768	1.835	1.869	1.835
下降時間(s)	3.036	3.103	3.07	3.17	3.036	3.137
飛行時間(s)	5.038	4.805	4.838	5.005	4.905	4.972
水平距離(cm)	594.708	660.57	688.783	638.876	719.82	746.582
垂直高度(cm)	332.265	346.731	377.519	356.055	395.345	423.445
落地速度(cm/s)	184.306	180.318	213.714	195.123	211.633	231.313







### (五)轉速、阻力以及側向力比較

#### 1. 數據比較

##### (1)EX 小翅在外比較

風速 (m/s)	ex 小翅在外完整			ex 小翅在外圓弧頭			ex 小翅在外平頭		
	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)
6.6	459	4.651	4.875	447	4.178	4.626	377	4.691	40.667
6.4	455	4.440	4.757	441	4.637	5.963	372	4.666	40.667
4.8	212	1.915	6.671	195	2.261	5.963	131	2.168	4.849
3.4	50	0.767	4.128	42	0.832	5.963	18	1.096	3.276
3.1	48	0.730	4.325	34	0.863	4.954	9	1.049	4.168

##### (2)EX 大翅在外比較

風速 (m/s)	ex 大翅在外完整			ex 大翅在外圓弧頭			ex 大翅在外平頭		
	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)
6.6	402	3.963	67.625	450	4.002	35.661	395	4.308	32.646
6.4	400	3.832	44.402	448	4.044	22.411	380	4.454	25.831

4.8	218	1.759	29.068	188	1.910	13.014	166	2.207	11.323
3.4	110	0.817	11.874	67	0.799	1.769	43	0.955	2.044
3.1	106	0.725	11.205	68	0.752	1.769	40	1.045	2.084

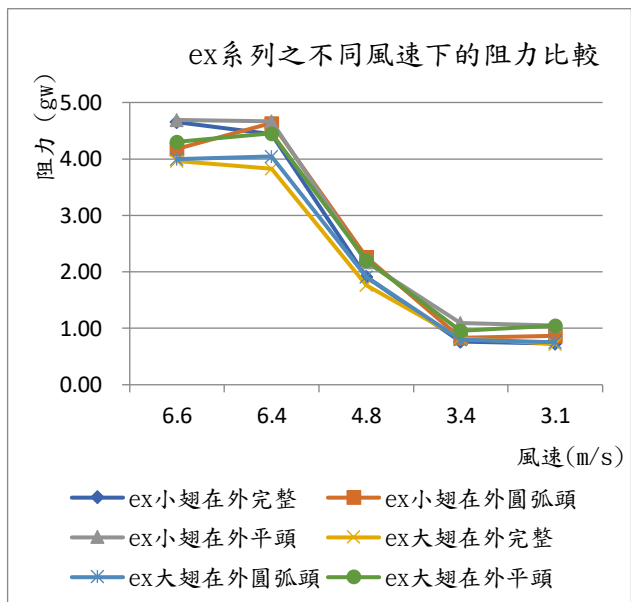
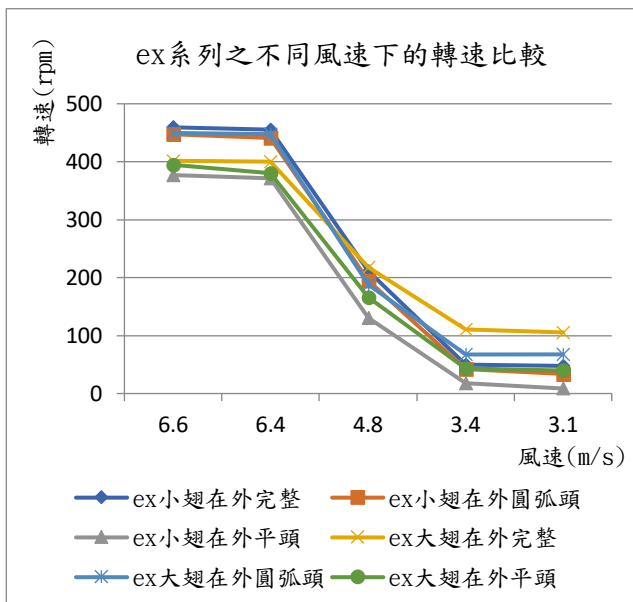
(3)K6 小翅在外比較

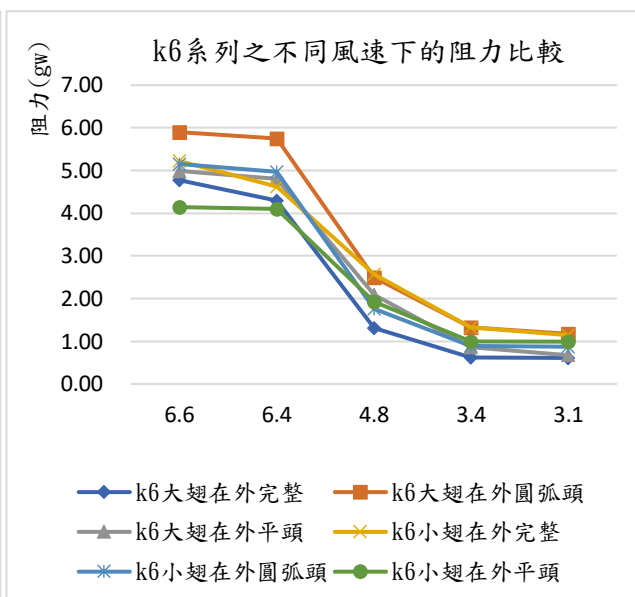
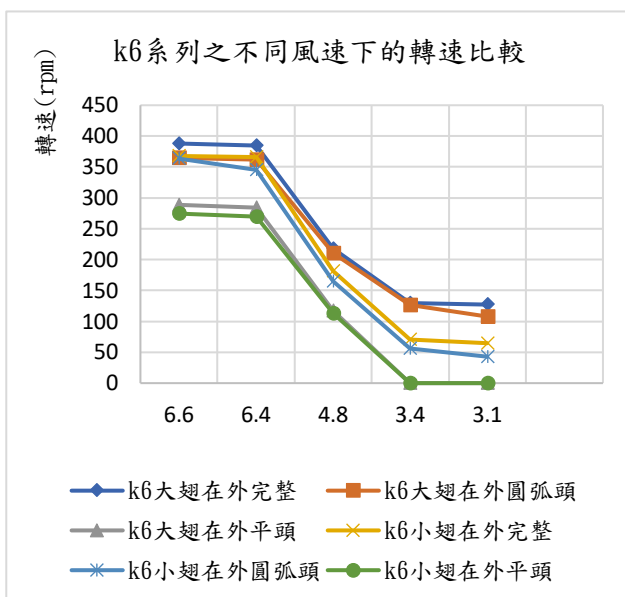
風速 (m/s)	K6 小翅在外完整			K6 小翅在外圓弧頭			K6 小翅在外平頭		
	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)
6.6	368	5.222	5.937	364	5.155	6.867	275	4.144	3.132
6.4	366	4.627	6.959	345	4.973	7.365	270	4.095	2.700
4.8	182	2.577	7.667	165	1.764	1.245	114	1.933	11.690
3.4	71	1.327	13.486	56	0.887	8.689	0	1.003	9.279
3.1	65	1.143	13.053	43	0.873	18.964	0	0.992	4.482

(4)K6 大翅在外比較

風速 (m/s)	K6 大翅在外完整			K6 大翅在外圓弧頭			K6 大翅在外平頭		
	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)	轉速 (rpm)	阻力 (gw)	側向力總和 (gw)
6.6	388	4.775	7.430	365	5.900	11.205	289	4.992	12.097
6.4	385	4.300	7.338	362	5.752	11.284	284	4.803	16.572
4.8	218	1.318	6.450	210	2.497	7.352	117	2.095	5.832
3.4	130	0.623	5.517	126	1.328	6.684	0	0.864	9.122
3.1	127	0.610	2.411	108	1.174	6.566	0	0.674	9.213

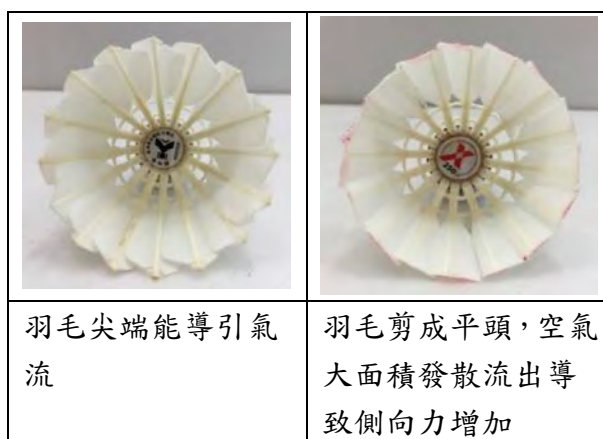
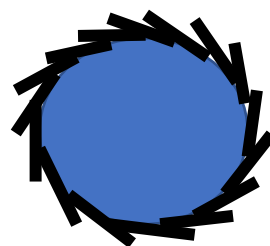
2. 作圖比較





## (六) 討論

1. 兩款的羽球頂端張角修剪後，無論是圓弧頭或是平頭，上升能力均明顯提升，擁有較遠的飛行高度、水平距離以及更快的落地速率。
2. 再細項分析，除了 ex 大翅在外的羽球經修剪成平頭後的飛行高度小於修剪成圓弧頭，其餘三種均是圓弧頭的飛行能力大於平頭。
3. 轉速部分，修剪成圓弧頭狀後，除 ex 大翅在外款，在高速時的轉速增加，其餘三款轉速均降低。而修剪成平頭狀，四款羽球轉速均下降，且於風速 3.1m/s 時的轉速已低至 1 秒轉不到 1 圈，甚至無法轉動。
4. Ex 款羽球在高速時的轉速於修剪前、後均優於 k6 款。於 6.6m/s 的風速下 ex 款較 k6 款每分鐘的轉速多出 100 圈。而在 3.4m/s 的風速下，修剪成平頭的 ex 款尚能轉動，k6 均無法轉動了。推論，應是修剪後的羽毛，縮短外側突出的部分使得 16 根羽毛的排列更佳平順，也減少空氣流動時和羽毛接觸的面積，不僅降低阻力也提升了轉速。
5. Ex 大翅在外的羽球，因為內側羽毛修短，使得重疊處出現縫隙，有利空氣通過，均展現出最小的阻力。但也因空氣通過進入羽球內側產生側推力，產生最大的側向力。
6. 羽毛尾端修剪成圓弧頭，對阻力的影響較小。但



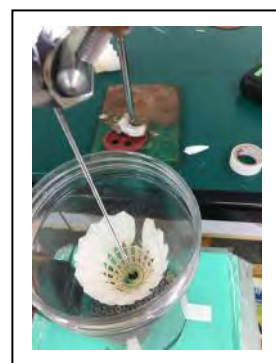
修剪成平頭後的阻力多大於未修剪的完整球。推論羽毛本身的形狀如同機翼一般，且頂端的形狀具有導流作用，能讓氣流快速通過尖端。所以，剪成平頭狀會破壞導流功能，空氣大面積發散流出導致阻力力增加。

## 探究二 - 5 羽球羽毛缺損對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

(一) 目的：探討羽毛缺損對於飛行的影響

(二) 步驟：

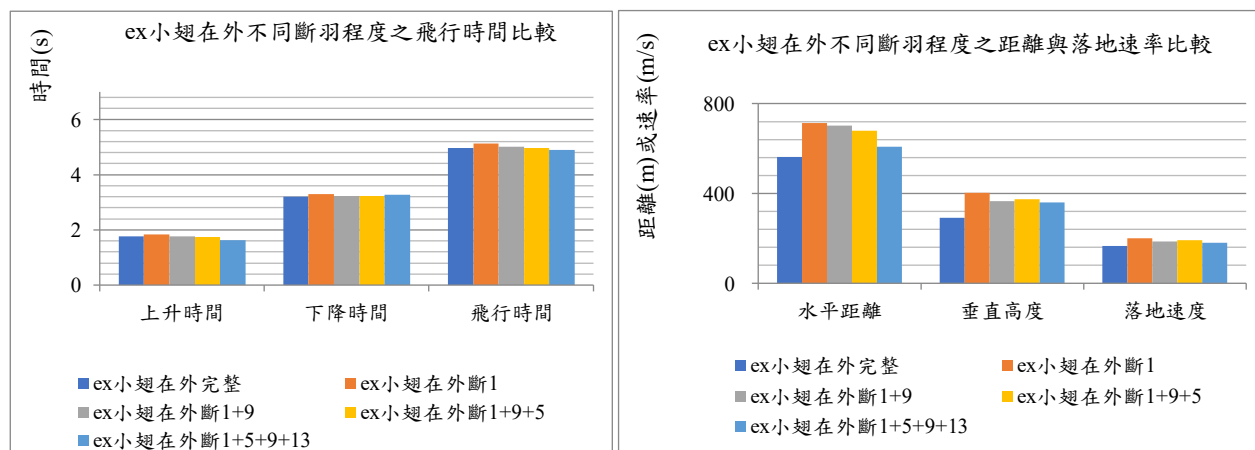
1. 取兩顆(A)ex 小翅在外的羽球，各從羽毛下端處剪去 1 根羽毛，此剪去的羽毛為第 1 號羽毛。
2. 一顆進行仰角 45 度空壓機發射，並錄影下飛行軌跡，進行 tracker 分析。另一顆鑽洞放進風洞中進行五種風速下的轉速、阻力以及側向力的記錄，並進行分析。
3. 將步驟 2 中剪去第 1 號羽毛的羽球再剪去第 9 號羽毛，形成對稱的缺口後，進行空壓機 45 度噴射以及風洞實驗。
4. 再將步驟 3 中的羽球依序剪去第 5 號羽毛、第 13 號羽毛，重複步驟 1。
5. 將羽球依序更換為(B)ex 大翅在外(C)k6 小翅在外(D)k6 大翅在外，重複步驟 1~4。



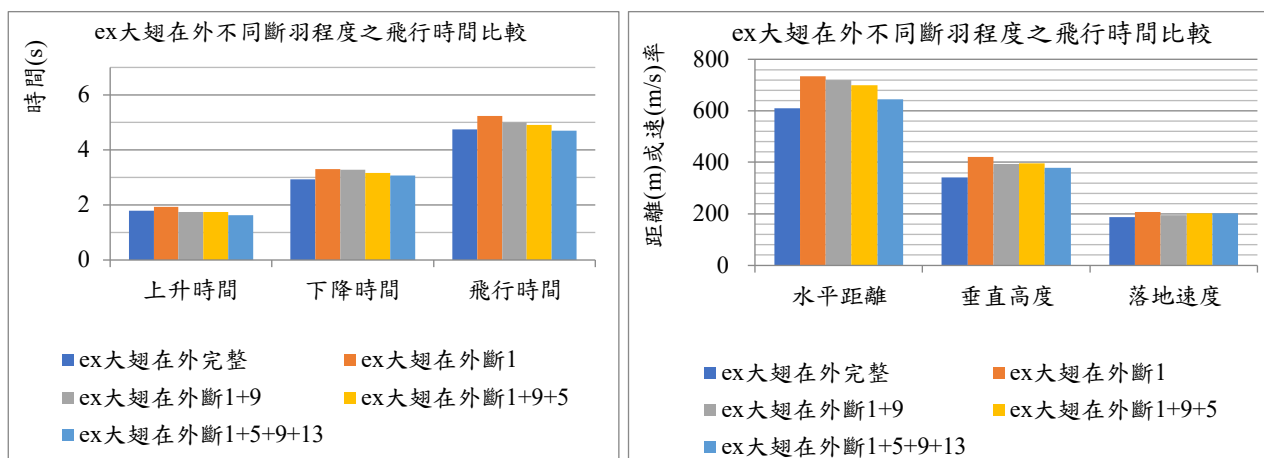
(三) 結果與討論：

1. 飛行數據比較與討論

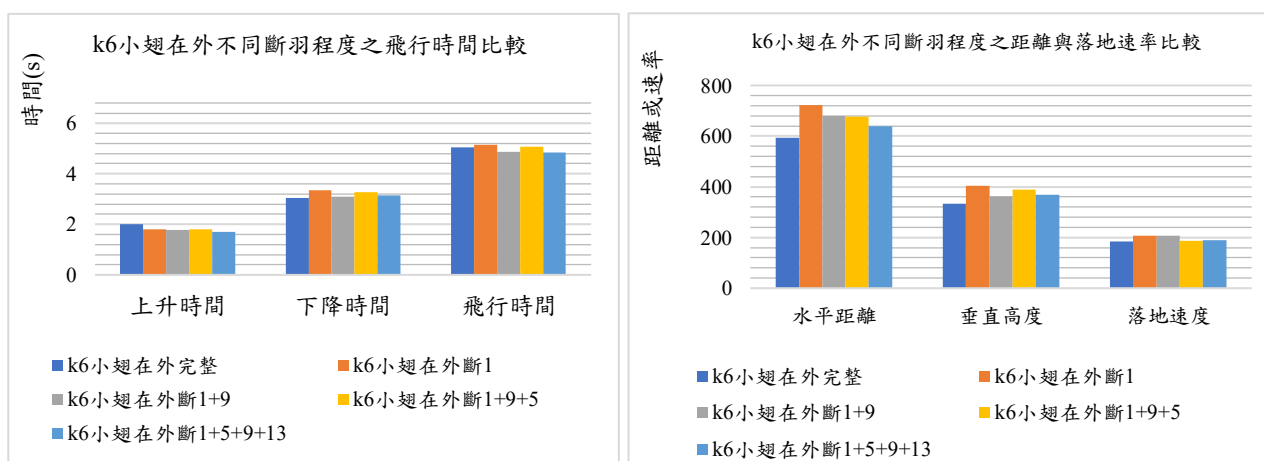
- (1) ex 小翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。



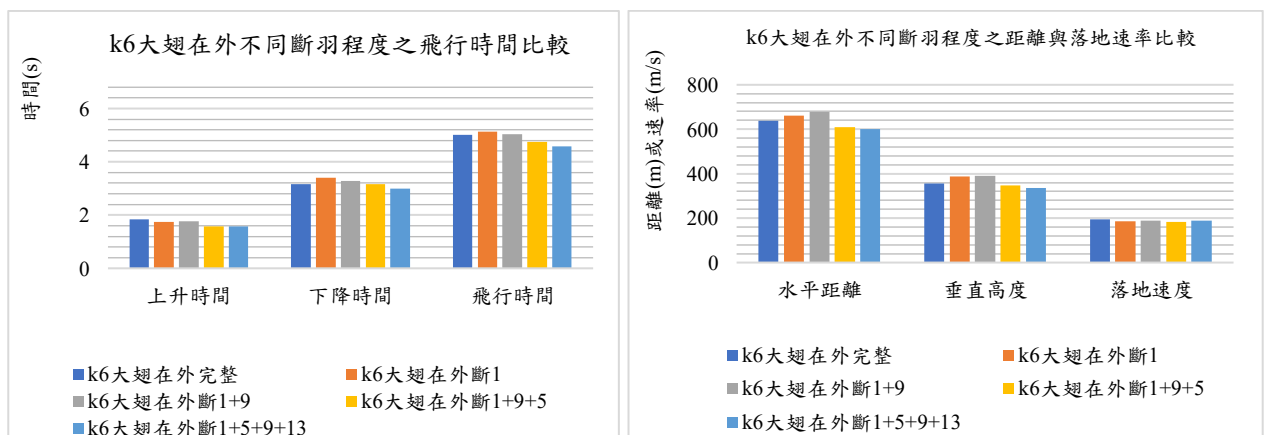
2. ex 大翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。



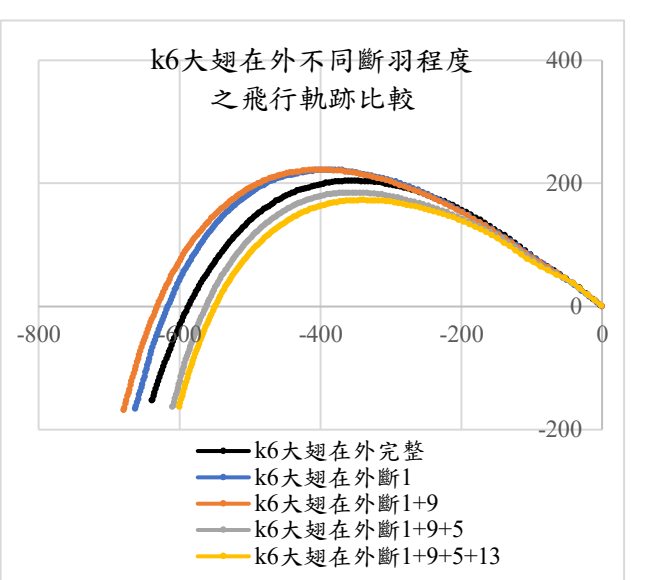
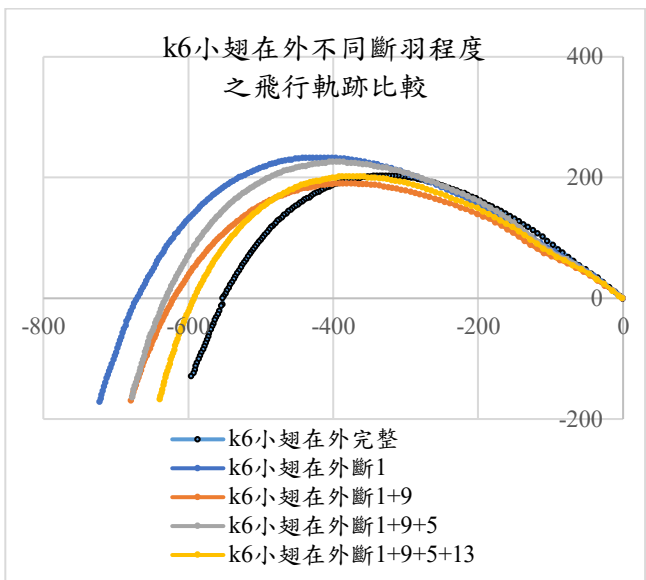
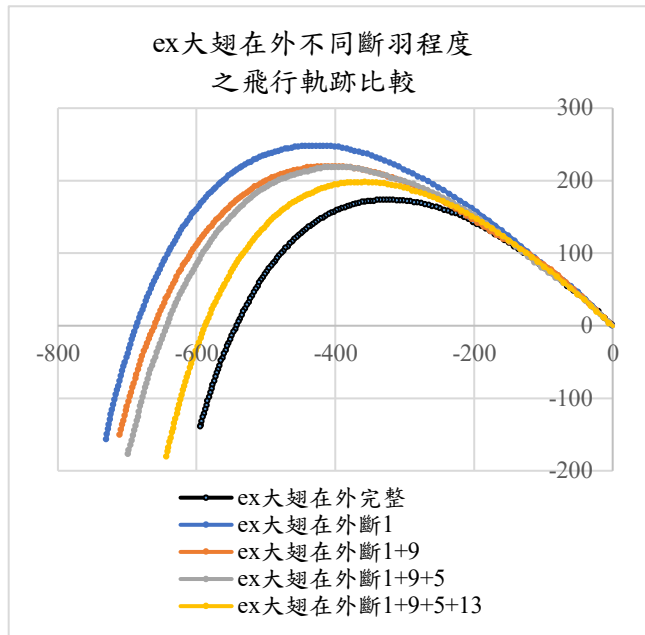
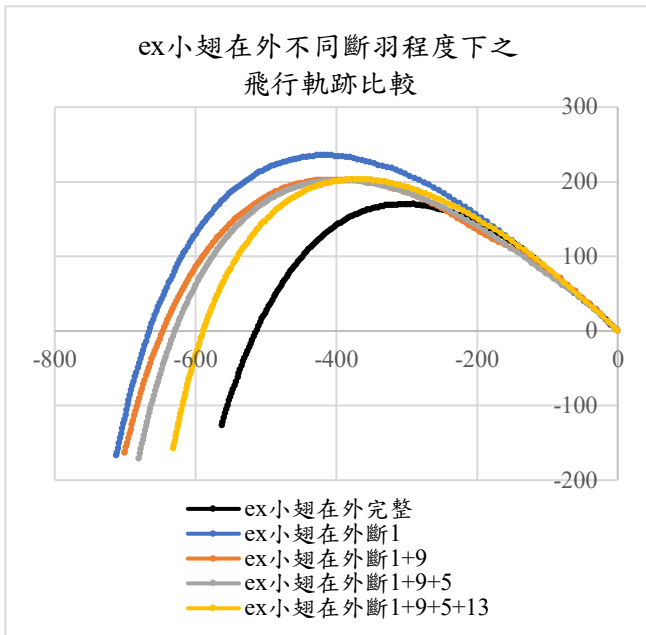
3. k6 小翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。



4. k6 大翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。

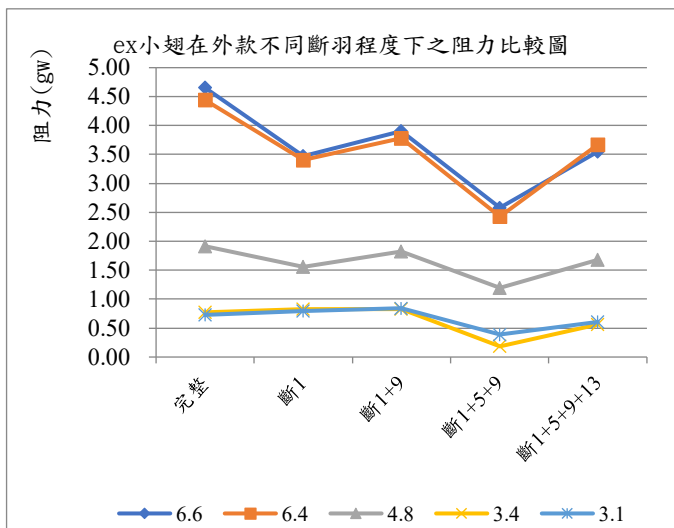
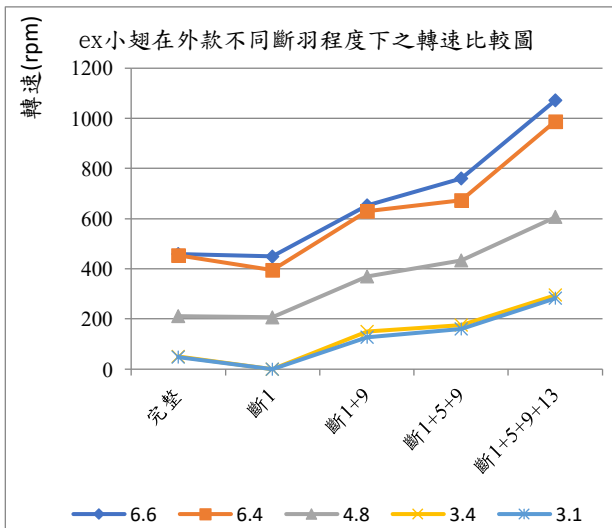


(四) 飛行軌跡比較：ex 球款及 k6 小翅在外球的飛行距離及高度隨著斷羽數量增加而減少。

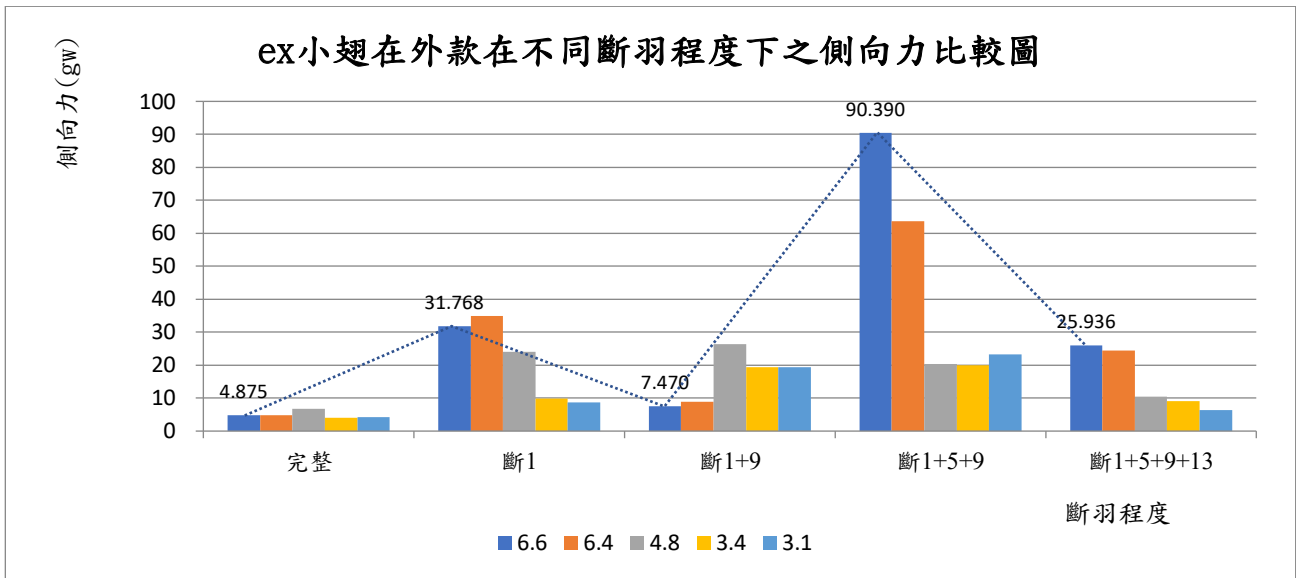


### (五) 轉速、阻力與側向力比較

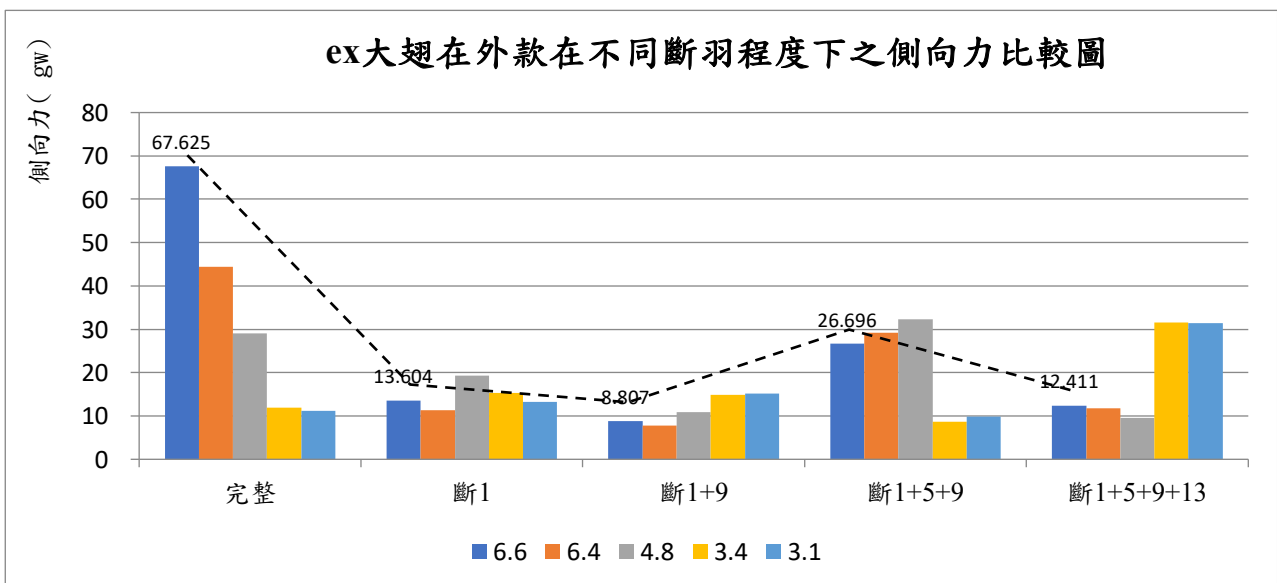
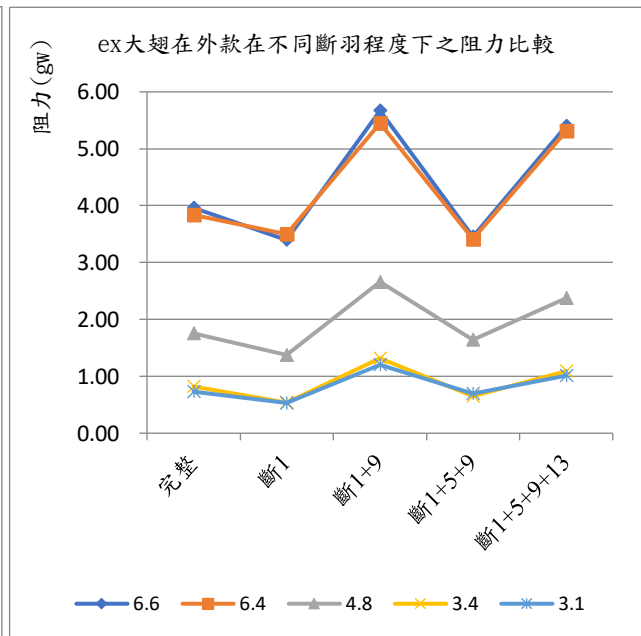
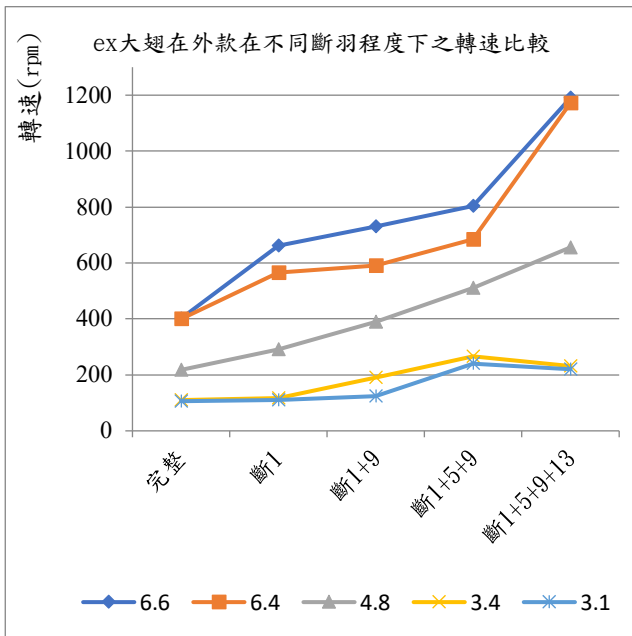
#### 1. Ex 小翅在外：



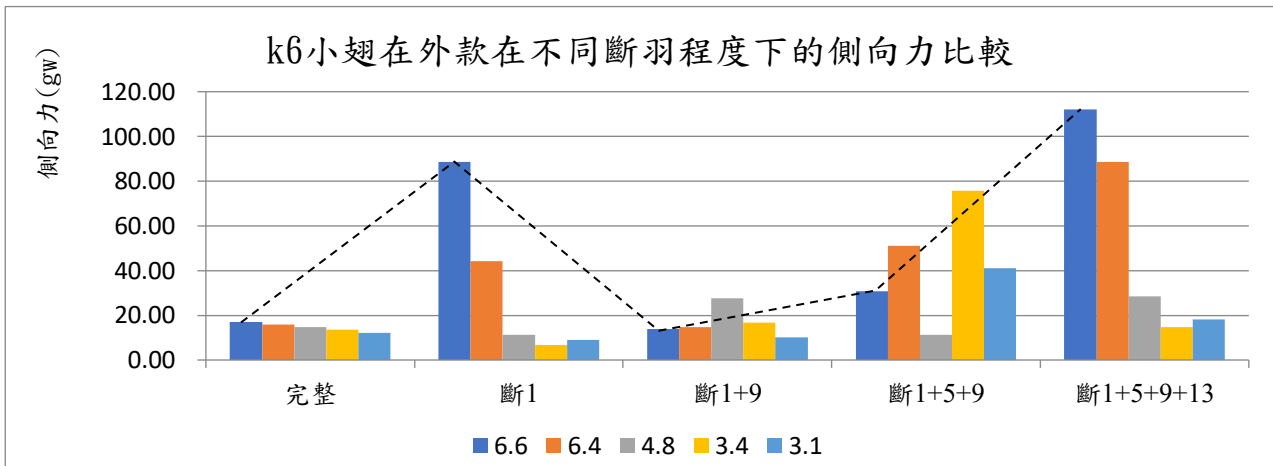
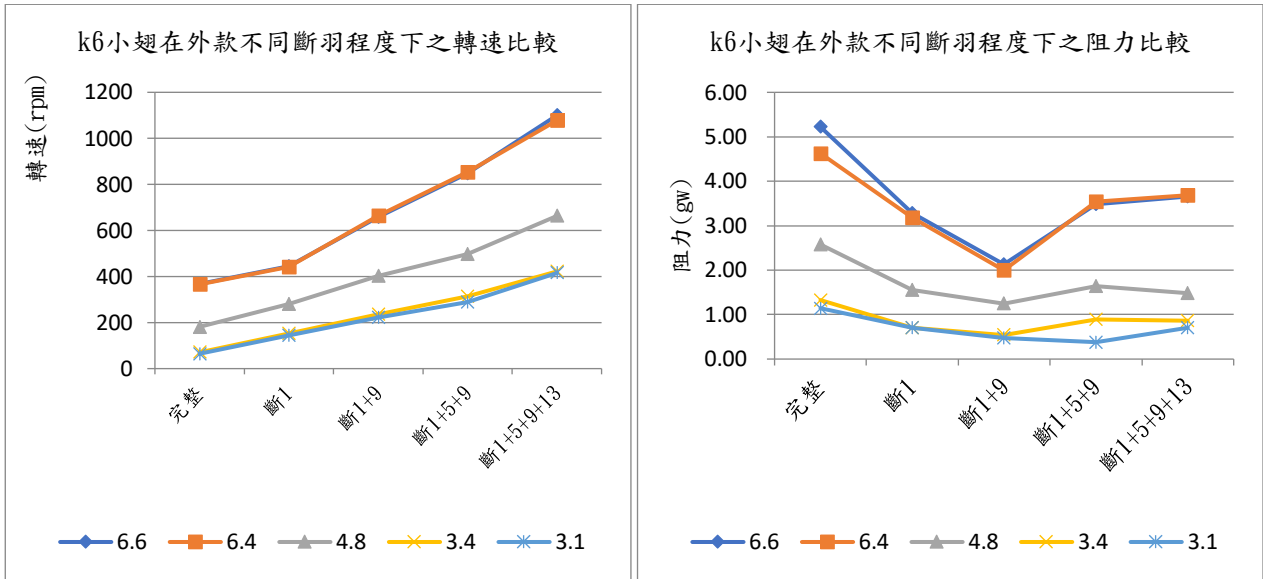




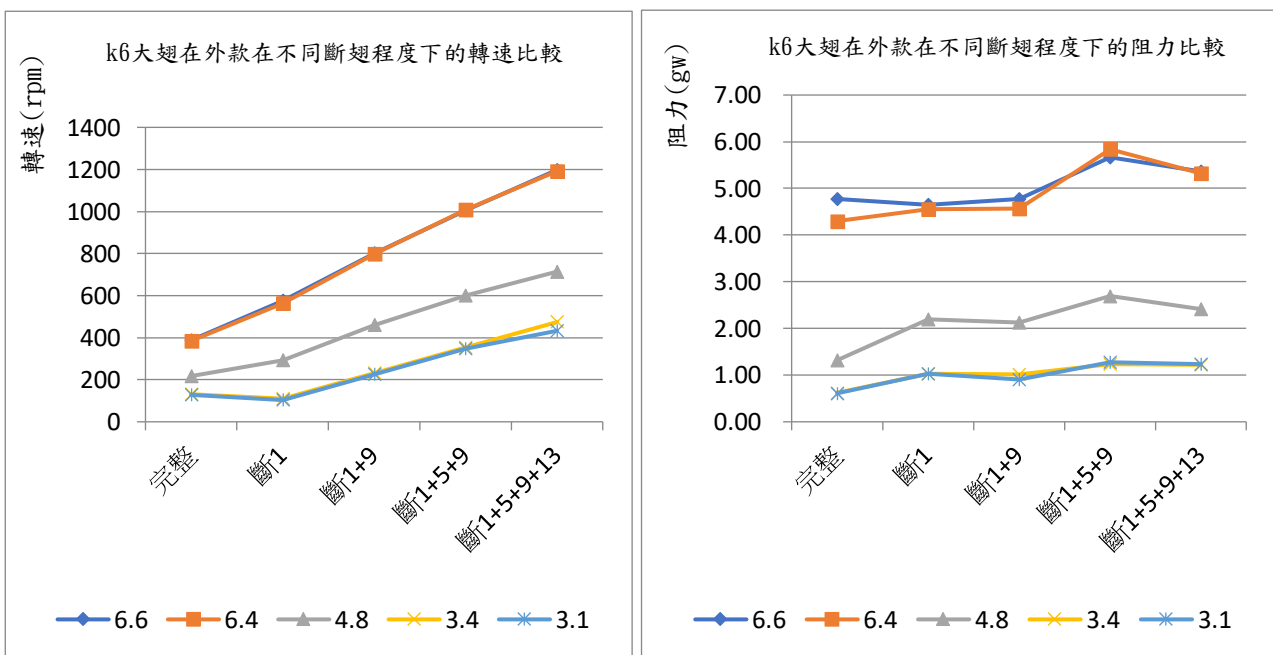
## 2. Ex 大翅在外：

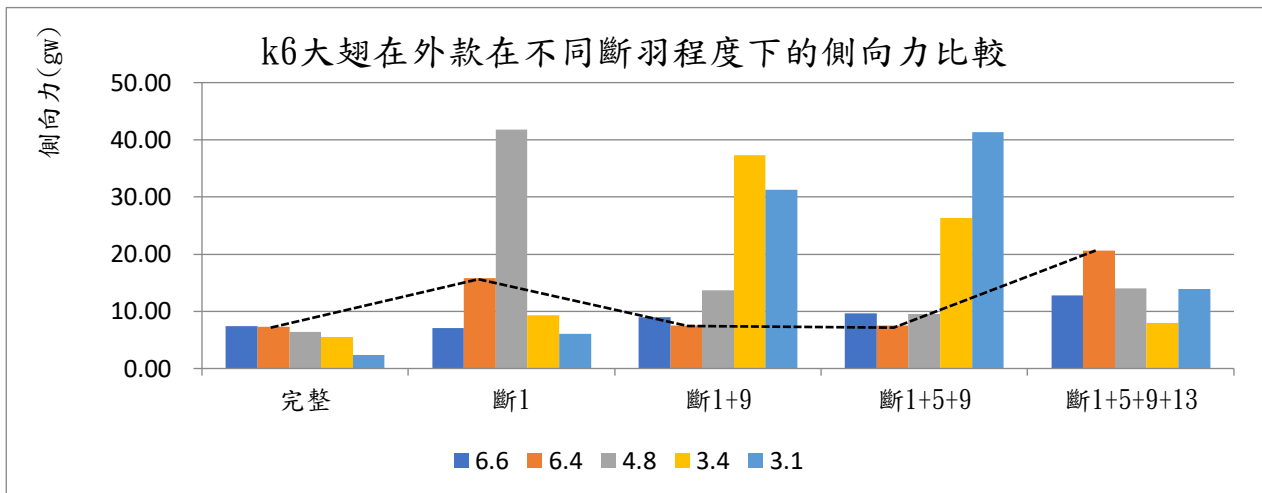


### 3. K6 小翅在外



### 4. K6 大翅在外





#### (六) 討論：

1. 四款球的轉速均隨著斷羽數量增加也跟著增加，且在斷 1+5+9+13 的情況中更具有超過 1000rpm 的高轉速，已超過比賽轉速規格的 2 倍。
2. 斷羽後產生更高遠的軌跡。另外，**ex 款的羽球**展現出較為一致的阻力變化，可發現**斷(1+9) > 斷(1)、斷(1+5+9+13) > 斷(1+5+9)**的趨勢。其推論為對稱的缺口，造成空氣流入球內的紊亂度，導致阻力上升。但也因此造成容易出界的狀況。
3. 側向力部分，出現斷羽後的羽球所受側向力增加，會增加飛行時晃動情形。但是，**對稱的斷羽**卻能有效降低側向力，也是個有趣的結果。所以，**初學者**平時練習的破損羽球，可透過對稱修剪，降低側向力獲得較為穩定的飛行軌跡。

#### 柒、討論

1. 我們為了探討羽球軌跡及運動時的受力，先後製作了水平風洞以及垂直風洞。但因重力作用，羽球在水平風洞中轉動不順暢，無法達到標準值，所以後來改為垂直風洞進行一系列探究。
2. 我們利用四個小型直流抽氣風扇並排作為風源，再經壓縮整流後，成功讓羽球在風洞中穩定轉動。
3. 為了測量風洞中的風速及確認氣流穩定性，我們拆下微型風速計的小風扇，分別測量出相同位置下的轉速與風速，找出關轉換關係，便能獲得風洞中的風速，也確認了氣流的穩定。
4. 將四驅車的導輪置入羽球的球頭中，再穿過白鐵牙條作為支架，能夠使羽球在垂直風洞

中自由轉動，且達 350rpm 的標準值。

5. 完整未鑽洞的羽球在垂直風洞中，能有 350 ~ 450rpm 的轉速。而穿過導輪及牙條支架後，在風洞中仍有相近的轉速。
6. 在支架頂端與側方分別透過電子天平與力度計，記錄運動時的阻力和側向力。
7. 我們採用空氣壓縮噴射的方式來進行 45 度角發球，透過粗吸管黏上塑膠羽球作為推進器模擬實際揮拍時的作用時間，再綁上棉線控制施力時間，超過棉線長度後，推進器便與羽球分離。實驗結果證明，可產生穩定的發球軌跡。
8. 空氣壓縮機噴射發球全程在地下室的活動中心進行，避免戶外空氣流動造成的影響。且以充氣後達  $8\text{kgw}/\text{cm}^2$  氣壓時第一次發射進行實驗。
9. 此次研究，我們選擇了羽毛一側修剪以及完整兩種款式的羽球進行一系列的探討。且羽球的轉速隨著風速增加而增加，而羽毛只要經過修剪後的阻力大多會下降。

## 捌、結論

我們從羽球場中練習的破損球中，發現羽毛型態及排列方式多有差異，於是進行了相關的探討，以下是我們的結論：

1. 首先，完整羽球的實驗中顯示：
  - (1) 羽毛一側經過修剪的(A)(B)款羽球在高速時的轉速高於的完整羽毛的(C)(D)款羽球。但於低速時，(A)(B)款羽球轉速變不如(C)(D)款羽球。
  - (2) (B)款羽球因羽毛重疊處經修剪多有縫隙存在，運動時的阻力最小。
2. 側羽修剪的結果顯示：側羽小修剪後明顯提升上升能力，軌跡也更高更遠；但大修剪後，便不利飛行，距離和高度均不如完整球。
3. 羽毛尾端張角修剪的結果顯示：修剪羽毛尾端會破壞導流功能，導致運動時的阻力增加，尤以修剪成平翅後，增加的阻力導致上升時間下降，飛行能力降低。
4. 斷羽實驗結果顯示
  - (1) 四款球的轉速均隨著斷羽數量增加也跟著增加，甚至出現超過 1000rpm 的高轉速。
  - (2) 阻力方面，斷羽後的羽球因阻力下降而產生更高遠的軌跡。另外，阻力變化出現斷(1+9) > 斷(1)、斷(1+5+9+13) > 斷(1+5+9)的趨勢。其推論為對稱的缺口，造成空氣流入球內的紊

亂度，導致阻力上升。

(3)側向力部分，出現斷羽後的羽球所受側向力增加，會增加飛行時晃動情形。但是，對稱的斷羽卻能有效降低側向力，這有趣的結果讓我們想到可將平時練習的破損羽球，透過對稱修剪來降低側向力，獲得較為穩定的飛行軌跡，提升破損球的利用價值。

5. 我們於實驗後，請託了高雄中學體育班的羽球選手幫忙試打羽尾修成平頭的球以及斷羽的羽球，始著了解在實際是對打時的狀況，得到：

(1) 羽尾修剪成平頭的羽球不太會旋轉但很會飛，對打時也穩定。

(2) 對稱的斷羽對於修正軌跡是有效的。

(3) 太會轉的羽球其實是飛不遠的。我們初步推測為揮拍時對羽球作的功，若大部份轉換為轉動動能，則移動動能自然較小，不利於飛行。

6. 我們也拜訪了羽球廠商，得知：較早長出的熟齡羽毛末端會有萎縮現象，所以需要削去，才有了各種不同的羽毛樣貌。但比賽級的羽球多採用完整的羽毛製成。

7. 我們也再次比較了風洞中的風速在羽球放進去之前與之後的變化，得知了羽球放進風洞中就如同第二個壓縮段，大幅升了風速，若以後有機會，可製作較大面積的風洞降低影響。

情形	風洞上端風速	風洞下端風速
羽球放進前，風洞中的風速	6.4m/s~6.6m/s	6.0m/s~6.2m/s
羽球放進後，風洞中的風速	8.1m/s~8.4m/s	6.6m/s~6.9m/s

8. 我們發現將修成平頭的未鑽洞羽球放進風洞中，羽球會有下沉後再穩定旋轉的現象，依

據參考文獻 6.中提到羽球運動時的阻力為 the air drag  $F_D = \frac{\rho S C_D U^2}{2}$ ，其中

$\rho$  為空氣密度， $S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$  為羽球的截面積， $U$  為羽球的運動速度， $C_D$  為  $1 \times 10^4 \sim 2 \times$

$10^5$  的常數，可知羽球受到的阻力和截面積成正比，而羽尾修剪成平頭的羽球截面積明顯下降，造成阻力下降，故會往下沉降。

9. 我們所取的風洞最大風速為 6.6m/s 左右，和參考文獻 4.中提到羽球的終端速度落在 6.51m/s~6.87m/s 的範圍是相符的。

## 玖、未來展望

研究過程中，我們曾經使用煙霧嘗試觀察氣流通過不同羽毛時的樣貌，但因在垂直風洞中操作不易，期望未來能有機會克服此問題繼續探討，且結合球場中的實際揮拍測試，提升此份研究的參考價值。

## 壹拾、參考文獻

1. 2013年台灣國際科展1/2秒的偏移—棒球之變化球軌跡模式的建立
2. 中華民國第50屆中小學科展花飛蝶舞—探討蝴蝶拍翅渦流與升力之關係
3. 中華民國第53屆中小學科展羽置今拾—應用羽球重心斜面力學整列與拋物線的省力收集器
4. Lung-Ming Chen, Yi-Hsiang Pan and Yung-Jen Chen. (2009)A study of shuttlecock's trajectory in badminton . *Journal of Sports Science and Medicine***8**, 657-662
5. Caroline Cohen<sup>1</sup>, Baptiste Darbois Texier<sup>1</sup>, David Quéré<sup>2</sup> and Christophe Clanet<sup>1</sup>.(2015) The physics of badminton . *New J. Phys.* **17** 063001
6. Ho Kai Lun, Derrick Teo Hao Ying and Wang . Physics of Shuttlecocks. 取自:  
[http://ircset.org/anand/2015papers/IRC-SET-2015\\_submission\\_10.pdf](http://ircset.org/anand/2015papers/IRC-SET-2015_submission_10.pdf)

## 謝誌

此份研究承蒙鄰近高中體育班的簡毓瑾教練大力幫忙，請球員試打實驗用的各種羽球，透過豐富的經驗值讓我們了解到這些球在球場中的表現，更肯定了對稱斷羽的效用。接著要感謝超力牌的羽球老闆贊助一筒羽球，讓我們的實驗更加順利，也對於羽球的羽毛種類有了進一步的認識。最後，由衷感恩高雄師範大學環教所的林明良教授的指導，提供理論上的支持，讓我們的作品更為完善。



## 【評語】 030123

本作品探討羽毛球經過外表修改，例如修剪羽毛，或者拔除部分羽毛，對飛行之距離、空氣阻力、羽球旋轉的影響。作者發現修剪過的羽毛球其速度獲得提升。而且羽毛的去除必須對稱才能提高飛行穩定。作者設計一個獨特的風洞來協助實驗進行。作品的儀器設計完善，實驗方法合理，結果對羽毛球的運動有進一步之了解，而且具實用性，為一件優良科展作品。

作品海報

## ◎摘要

從平時練習的羽球中，發現羽毛形狀及疊合方式存在明顯差異，於是著手設計空氣壓縮推進噴射的方式探討軌跡差異。利用四個排風扇並排製作垂直風洞，再將球頭鑽洞放入滾珠軸承及牙條作為支架，使穿過支架的羽球在垂直風洞中仍然能夠自由旋轉以利取得運動時的阻力、轉速及側向力。**實驗數據顯示，羽毛只要經過修剪，阻力多會下降；若修剪外側羽毛，高速下的轉速可大幅提升，但低速時則因受力面積減少導致轉速下降；但羽尾若破壞程度太大，如：剪成平頭狀，會使得轉動能力下降，甚至低速時無法轉動，飛行距離也明顯降低。最後，斷翅的實驗出現了一個有趣的結果：透過斷去第二根羽毛達到對稱的缺口，可挽救失控的側向力，提升破損羽球的練習價值。**

## 壹、研究動機

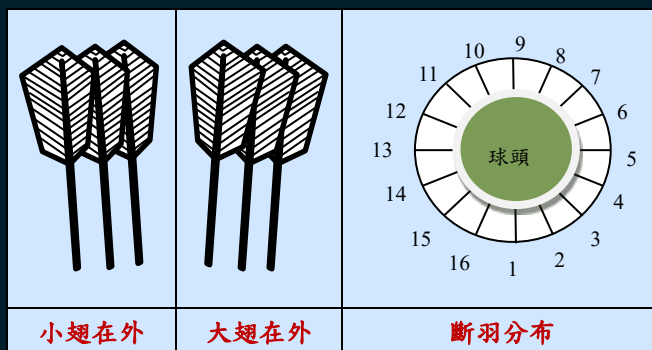
在平時練習羽球的時候，我們注意到羽毛的側邊有破損的情形，原本以為是打壞了，但是再去拿一桶新球卻發現每一顆球的羽毛都是被刻意修剪的，但是在另一個廠牌則沒有此一現象。我們很好奇這樣的修剪對於羽球的飛行是否有影響，於是展開了一連串的實驗來探討。

## 貳、研究目的

一、實驗裝置製作	二、變因探討
(一) 製作垂直風洞，並確認風速穩定。 (二) 製作羽球發射裝置。	(三) 探討羽毛外翅對稱性對於飛行的影響。 (四) 探討羽毛側邊大小對於飛行的影響。 (五) 探討羽毛尾端張角大小對飛行的影響。 (六) 探討羽毛斷羽分布對於飛行的影響。

## 參、名詞定義

1. 羽毛疊合方式
  - (1) 小翅在外：毛梗右側為較小羽毛片。
  - (2) 大翅在外：毛梗右側為較大羽毛片。
2. 斷羽分布：採斷去第 1 根、第(1+9)根、第(1+5+9)根及第(1+5+9+13)根，共四種斷羽分布。
3. 阻力：探討羽球在風洞中運動時的阻力
4. 轉速：羽球旋轉時的轉速。
5. 側向力：羽球在風洞中運動時，在與風向垂直方向上的受力。



## 肆、研究與結果

### 探討一、裝置的探究與討論

#### 探討一-1 如何讓羽球順利旋轉以利取得需要的數據？

(一) 器材與步驟：

1. 球頭中央鑽洞，並利用電鑽確認旋轉穩定無偏移。白鐵牙條裝上扯鈴導輪、滾珠軸承與雙通螺柱，再將鑽洞後的羽球套入，完成轉動支架裝置。
2. 分別測量未鑽洞羽球與鑽洞羽球在垂直風洞中的轉速，確認轉速相當。

(二) 結果：我們透過非常多次的練習，提升了鑽洞技巧，使得裝上牙條裝置的羽球在風洞中也能展現出近似完整羽球的平均轉速，達 350rpm。

#### 探討一-2 製作何種風洞取得羽球運動的相關數據？

(一) 步驟與結果：

1. 羽球轉速在原先的水平風洞中未達值 350rpm，故改為製作小型的垂直風洞。
2. 整理盒下方鎖上四個排風扇，內部黏上 PP 板作為收縮段，上端透過吸管達到整流，並接上調光器調整轉速。
3. 在此垂直風洞中，羽球能穩定轉動，得到 350rpm 左右的標準轉速。

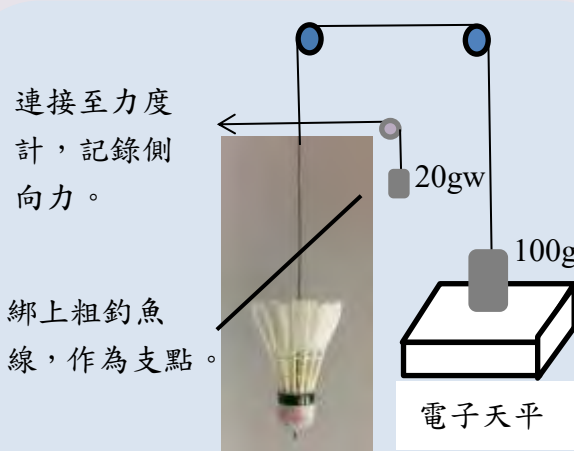
#### 探討一-3 製作微型風速計測量風洞中的風速

(一) 數據與結果：

1. 透過自製的微型風速計，確認垂直風洞內為穩定氣流且選取 5 種風速：6.6m/s、6.4m/s、4.8m/s、3.4m/s 及 3.1m/s。

#### 探討一-4 決定架設方式，取得運動阻力、轉速及側向力

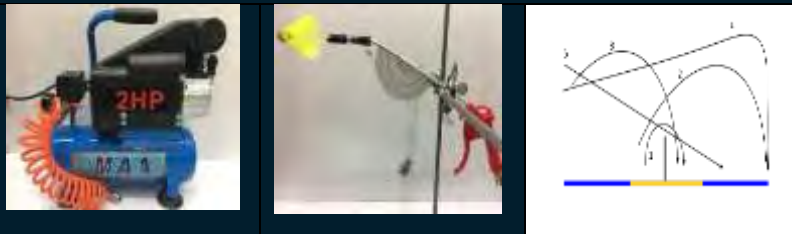
(一) 裝置示意圖：



(二) 結果：

1. 我們使用了準確至 0.001 公克的電子天平，極為敏銳，實驗環境中的微小變動都會影響實驗數據，故實驗環境附近需保持無走動狀態。
2. 紀錄無風及有風時的電子天平讀數差值，即為羽球運動時的阻力。
3. 在球頭兩側對稱貼上反光貼紙可得到兩倍的訊號，有利於取得弱風下的慢轉速，且轉速為測量值/2。
4. 在牙條側邊綁上受力 20gw 的釣魚線，透過力度計記錄釣魚線的張力變化作為側向力數值。但是，打開風扇後，出現以綁線處為支點的晃動情形，力度計數值無法反應出側向力。
5. 後來，在牙條上加綁上一條粗釣魚線作為支點，其上方的晃動便可透過細釣魚線的張力變化反應出來。
6. 在未裝上羽球的狀態下，測量支架本身受風時的阻力為 0.029gw，影響甚小。

#### 探討一-5 設計發球裝置，取得羽球運動軌跡

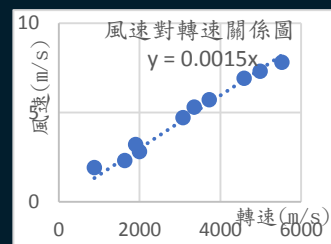
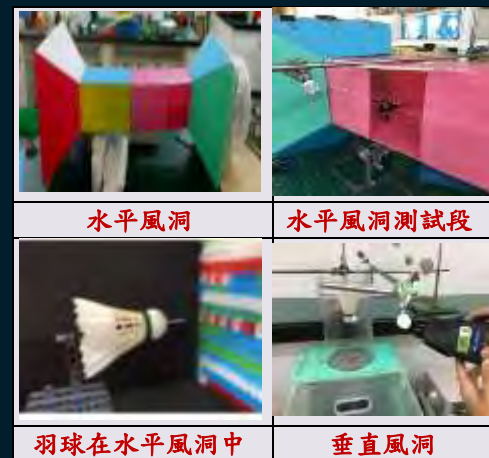
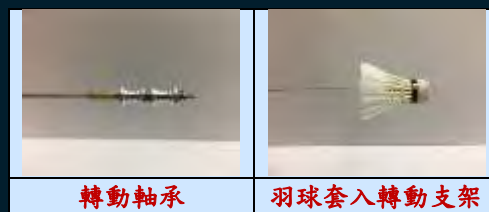


1. 若無推進器，僅藉由高壓空氣噴射並無法得到穩定的飛行軌跡，且在發射的開始階段，羽球會發生嚴重晃動導致每次的發射結果不一。
2. 透過綁上粗棉線，作為推進器與羽球分離之用，確實能夠得到穩定發射的結果。而發球後的軌跡和挑球球路相似

## 探討二、各項變因探討

### 探討二-1 確認實驗的羽球廠牌

1. 在四種廠牌的羽球中，ex 羽球的側邊羽毛採一刀直切而下的形式，極為特別，與其他三種廠牌的羽球不同。
2. 發現新購羽球裡存在著大翅在外與小翅在外兩款的混合情形，於是選定 k6 和 ex 兩種廠牌來進行探討。

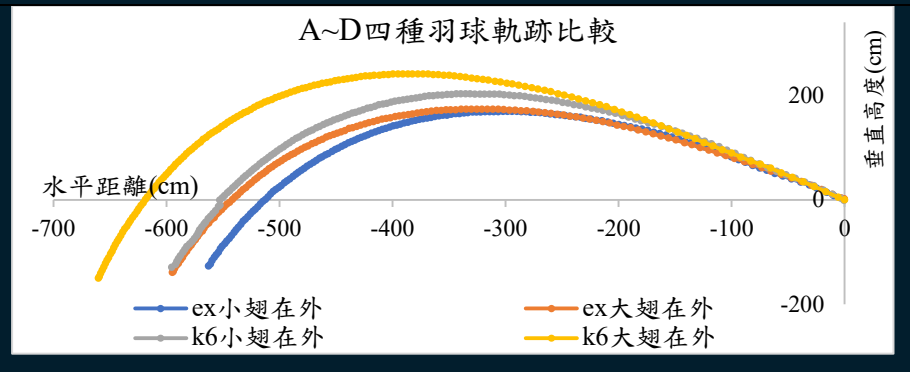




## 探討二-2 羽球羽毛的對稱性對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

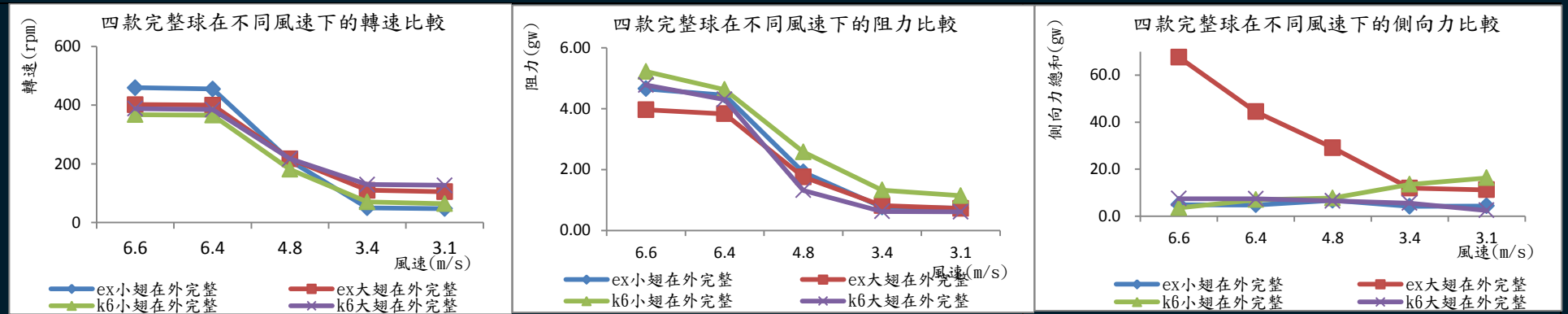
### 1. A~D 四種羽球飛行數據比較

項目	A	B	C	D
	ex 小翅在外	ex 大翅在外	k6 小翅在外	k6 大翅在外
上升 t(s)	1.768	1.802	2.002	1.869
下降 t(s)	3.204	2.936	3.036	3.136
飛行 t(s)	4.972	4.738	5.038	5.005
水平 D(cm)	563.731	594.509	594.708	638.876
垂直 H(cm)	296.13	312.293	332.265	356.055
落地(cm/s)	177	178.22	184.306	195.123



- (1) 大翅在外款的羽球具有較高速的飛行軌跡及落地速率，尤以 k6 大翅在外款為佳，而 ex 小翅在外的羽球在高度及水平距離均較短。
- (2) 噴射後羽球上升到最高點後，受阻力作用產生下墜的軌跡，和實際揮拍的挑球球路相似。
- (3) 配合風速 4.8m/s 時的阻力數據，k6 大翅擁有的最小阻力使其展現出最大的高度與最遠的軌跡。

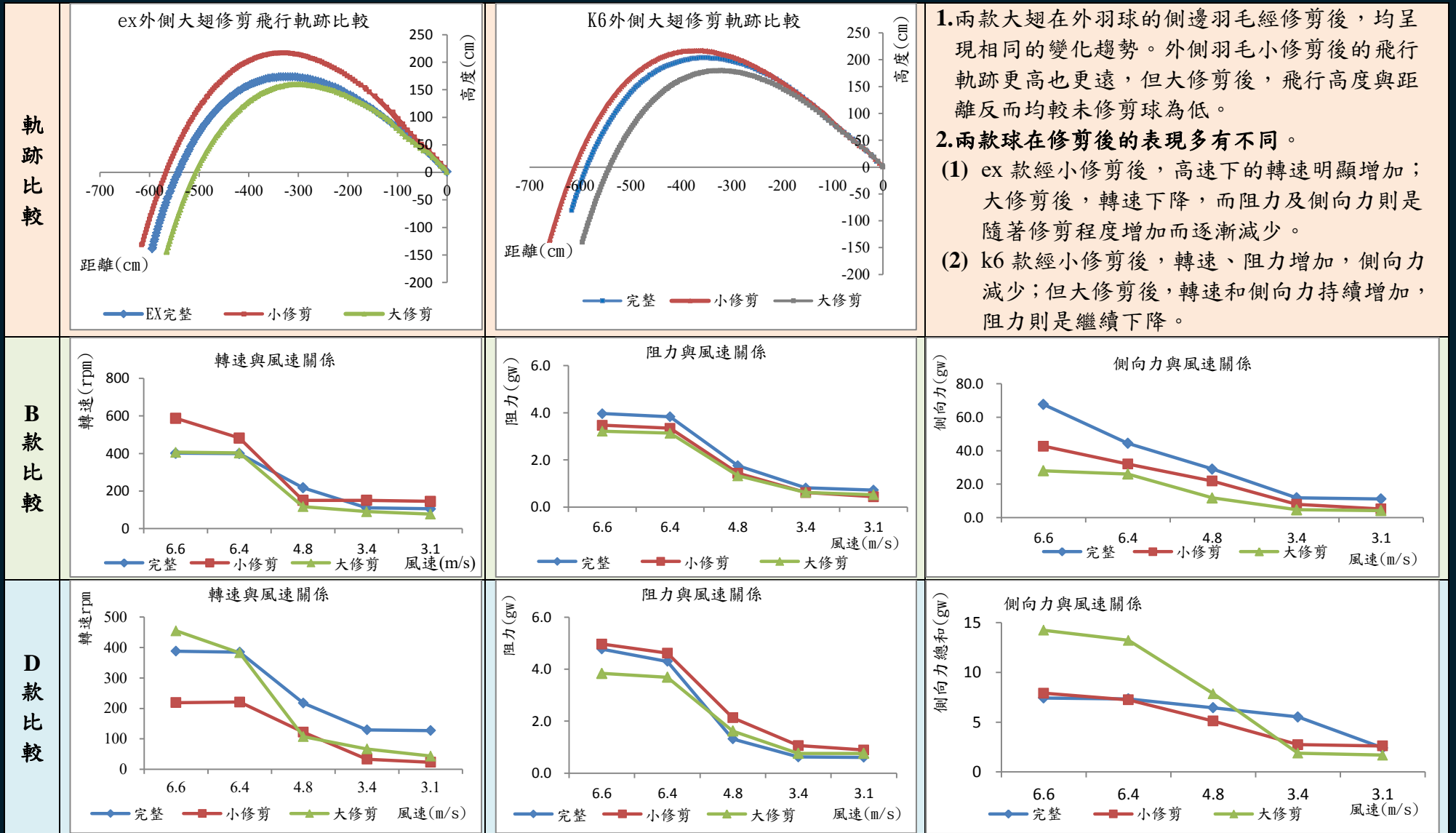
### 2. 轉速、阻力及側向力比較



- (1) 將側向力數據取絕對值後加總做為羽球在 10 秒內的側向力總和。
- (2) 阻力和轉速均隨著風速增加而增加。且小翅在外款高速時的轉速較快，而在低速時，因受風面積小導致轉速明顯降低，反而低於大翅在外的轉速。
- (3) ex 大翅在外款，因內側的縫隙有利於空氣流通，展現出最小的阻力和最大的側向力。而中低速時則是 k6 大翅在外款具有較小的阻力。

## 探討二-3 羽球側邊羽毛修剪對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

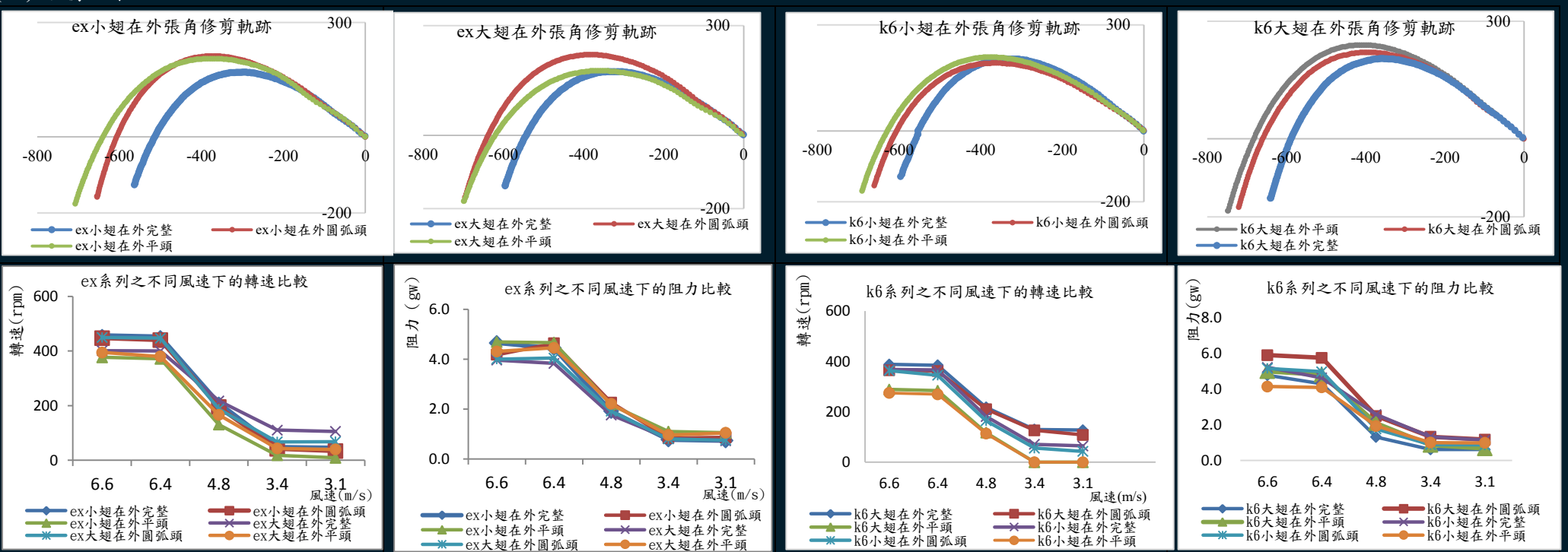
1. 修剪定義：外側羽毛至毛梗間距 0.6 公分為小修剪；外側羽毛至毛梗間距 0.4 公分為大修剪。
2. 作圖與分析



1. 兩款大翅在外羽球的側邊羽毛經修剪後，均呈現相同的變化趨勢。外側羽毛小修剪後的飛行軌跡更高也更遠，但大修剪後，飛行高度與距離反而均較未修剪球為低。
2. 兩款球在修剪後的表現多有不同。
  - (1) ex 款經小修剪後，高速下的轉速明顯增加；大修剪後，轉速下降，而阻力及側向力則是隨著修剪程度增加而逐漸減少。
  - (2) k6 款經小修剪後，轉速、阻力增加，側向力減少；但大修剪後，轉速和側向力持續增加，阻力則是繼續下降。

## 探討二-4 羽球羽毛尾端張角對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

- (一) 修剪定義：圓弧頭：羽尾修成圓弧狀；平頭：羽尾修成水平狀。
- (二) 數據比較



### (三) 結果

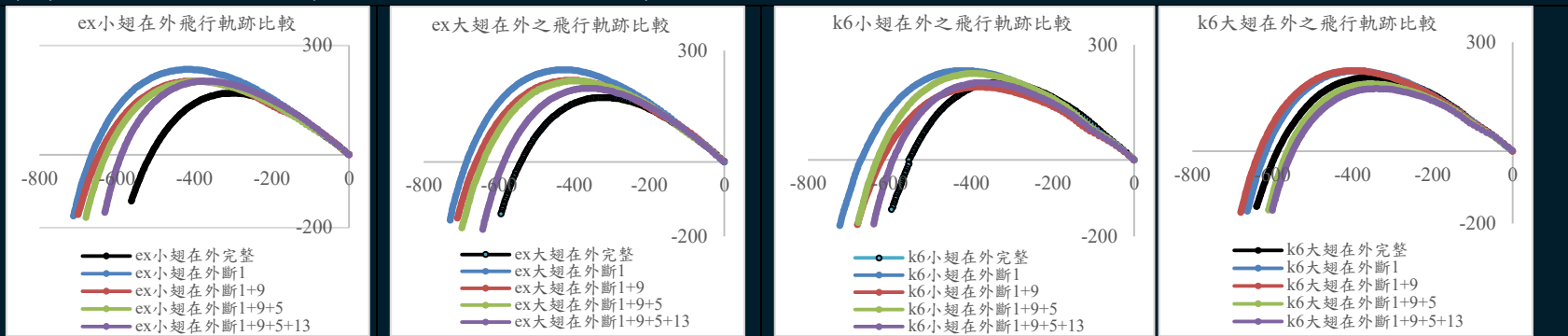
1. 羽尾張角修剪後，上升能力明顯提升，具有更遠的飛行高度、水平距離以及更快的落地速率。



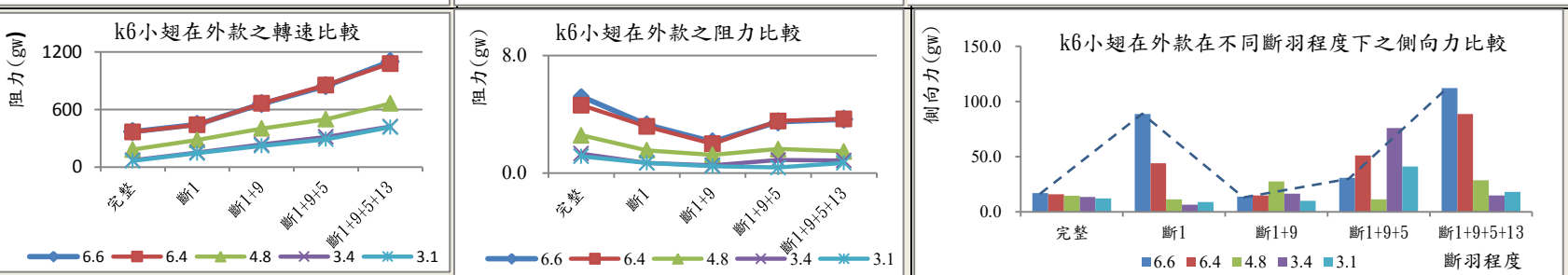
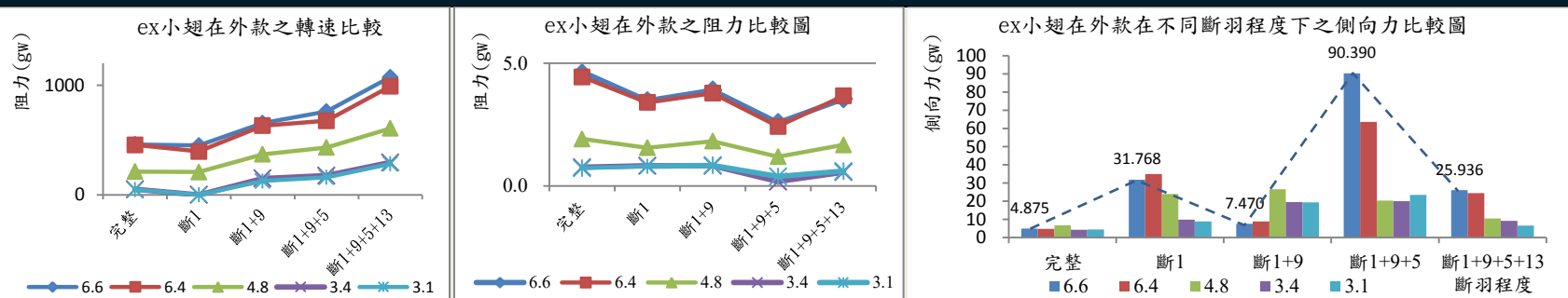
- 羽尾修剪成圓弧頭，對阻力的影響較小。但修剪成平頭後的阻力卻又增加。推論羽毛本身的形狀如同機翼一般，尾端具有導流作用，讓氣流快速通過。而剪成平頭狀會破壞導流功能，空氣大面積發散流出導致阻力增加。
- 修剪後的轉速均為 Ex 款 > k6 款，其中又以大翅在外款 > 小翅在外款。6.6m/s 的風速下 ex 款較 k6 款每分鐘的轉速多出 100 圈；3.4m/s 的風速下，修剪成平頭的 ex 款尚能轉動，而 k6 已無法轉動。推論，應是修剪後的羽毛，縮短外側突出的部分使得 16 根羽毛的排列更佳平順，也減少空氣流動時和羽毛接觸的面積，不僅降低阻力也提升了轉速。

## 探究二-5 羽毛斷羽分布對阻力、轉速、側向力以及軌跡的影響

(一) 數據比較與討論：(距離及高度單位：公尺 m)



- 四款羽球斷翅後的上升時間大多減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。
- 飛行軌跡比較：ex 球款及 k6 小翅在外球的飛行距離及高度隨著斷羽數量增加而增加。



- 阻力變化出現斷(1+9) > 斷(1)、斷(1+9+5+13) > 斷(1+9+5)的趨勢。其推論為對稱的缺口，造成空氣流入球內的紊亂度，導致阻力上升。
- 我們發現，對稱的斷羽能有效降低側向力。所以，初學者平時練習的破損羽球，可透過對稱修剪，降低側向力獲得較為穩定的飛行軌跡，提高破損羽球的利用價值。

## 肆、結論

我們從羽球場中練習的破損球中，發現羽毛型態及排列方式多有差異，於是進行了相關的探討，以下是我們的結論：

- 我們的風洞最大風速為 6.6m/s 左右，和參考文獻中提到羽球的終端速度落在 6.51m/s~6.87m/s 的範圍是相符的。
- 首先，完整羽球的實驗中顯示：
  - (A)(B)款在高速下的轉速高於完整羽毛的(C)(D)款羽球。但於低速時，(A)(B)款羽球轉速變不如(C)(D)款羽球。
  - Ex 大翅在外款羽球因羽毛重疊處經修剪多有縫隙存在，運動時具有最小的阻力和最大的側向力。
- 側羽小修剪後明顯提升上升能力，軌跡也更高更遠；但大修剪後，便不利飛行，距離和高度均不如完整球。
- 羽尾張角修剪的結果顯示：修剪羽毛尾端會破壞導流功能，導致運動時的阻力增加，尤以修剪成平頭後，轉速大幅減少，而增加的阻力導致上升時間下降，飛行能力降低。
- 斷羽實驗結果顯示
  - 四款球的轉速均隨著斷羽數量增加而增加，甚至出現超過 1000rpm 的高轉速。
  - 阻力方面，斷羽後的羽球因阻力下降而產生更高遠的軌跡。另外，阻力變化出現斷(1+9) > 斷(1)、斷(1+9+5+13) > 斷(1+9+5)的趨勢。其推論為對稱的缺口，造成提升空氣流入球內的紊亂度，導致阻力上升。
  - 側向力部分，出現斷羽後的羽球所受側向力增加，會增加飛行時晃動情形。但是，對稱的斷羽卻能有效降低側向力，這有趣的結果讓我們想到可將平時練習的破損羽球，透過對稱修剪來降低側向力，獲得較為穩定的飛行軌跡，提升破損球的利用價值。
- 請託鄰近高中體育班的羽球選手進行修剪羽球的實際對打，得到(1)羽尾修剪成平頭狀的羽球不太會旋轉但能穩定飛行(2)對稱的斷羽對於修正軌跡是有效的。
- 我們也拜訪了羽球廠商，得知：較早長出的熟齡羽毛末端會有萎縮現象，所以需要削去，才有了各種不同的羽毛樣貌。但比賽級的羽球多採用完整的羽毛製成。
- 太會轉的羽球其實是飛不遠的。我們初步推測為揮拍時對羽球作的功，若大部份轉換為轉動動能，則移動動能自然較小，不利於飛行。

## 伍、未來展望

- 我們再次比較了風洞中的風速在羽球放進去之前與之後的變化，得知了羽球放進風洞中就如同第二個壓縮段，大幅升了風速，若以後有機會，可製作較大面積的風洞降低影響。

情形	風洞上端風速	風洞下端風速
羽球放進前，風洞中的風速	6.4m/s~6.6m/s	6.0m/s~6.2m/s
羽球放進後，風洞中的風速	8.1m/s~8.4m/s	6.6m/s~6.9m/s

- 我們發現修成平頭的未鑽洞羽球放進風洞中，羽球會有下沉後再穩定旋轉的現象，依據文獻中提到羽球運動時的阻力為  $F_D = \frac{\rho S C_D U^2}{2}$ ，其中  $\rho$  為空氣密度， $S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$  為羽球的截面積， $U$  為羽球的運動速度， $C_D$  為  $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$  的常數，可知羽球受到的阻力和截面積成正比，而羽尾修剪成平頭的羽球截面積明顯下降，造成阻力下降，故會往下沉降。
- 研究過程中，我們曾經使用煙霧嘗試觀察氣流通過不同羽毛時的樣貌，但因在垂直風洞中操作不易，期望未來能有機會克服此問題繼續探討，且結合球場中的實際揮拍測試，提升此份研究的參考價值。

## 陸、參考文獻

- 2013年台灣國際科展 1/2秒的偏移—棒球之變化球軌跡模式的建立
- 中華民國第50屆中小學科展 花飛蝶舞—探討蝴蝶拍翅渦流與升力之關係
- 中華民國第53屆中小學科展 羽置今拾—應用羽球重心斜面力學整列與拋物線的省力收集器
- Lung-Ming Chen, Yi-Hsiang Pan and Yung-Jen Chen. (2009) A study of shuttlecock's trajectory in badminton. *Journal of Sports Science and Medicine* 8, 657-662
- Caroline Cohen<sup>1</sup>, Baptiste Darbois Texier<sup>1</sup>, David Quéré<sup>2</sup> and Christophe Clanet<sup>1</sup>. (2015) The physics of badminton. *New J. Phys.* 17 063001