

2018 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160034

參展科別 物理與天文學

作品名稱 斷尾球「生」~探討羽球羽毛對飛行的影響

得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 高雄市立明華國民中學

指導教師 吳德儀、陳晏閔

作者姓名 邱健紘、陳品文

關鍵詞 羽球、風洞、飛行軌跡

作者簡介



我們是邱健紘和陳品文，目前就讀明華國中三年級。共同興趣是動手做實驗和玩程式設計，也愛羽球運動，雖技不如人，但看羽球賽事那快速移位與球技，真是過癮；尤其羽毛球的獨特造型，開啟了我們深入研究的興趣。很幸運能在數理研究社遇到很堅強的老師們，激發我們的實驗魂。科展之路，從校內初賽到市賽，從全國賽比到今日，感謝有大家的陪伴，讓我們堅持到最後。

摘要

我們製作獨特的垂直風洞，透過牙條及滾珠軸承使羽球能在其中自由轉動以利同步取得運動時的阻力、轉速及側向力，並透過空氣壓縮噴射方式探討軌跡差異。實驗數據顯示，羽毛只要經過修剪，阻力多會下降，雖然能飛的更高遠，但也降低了羽球獨有的飛行特性。若修剪外側羽毛，可大幅提升高速下的轉速，但低速時則因受力面積減少導致轉速下降且發現透過側羽的小修剪可同時提升飛行能力以及飛行特性，提升練習級羽球的價值；但羽尾若破壞程度太大，如：剪成平頭狀，飛行距離雖明顯提升，但轉動能力下降，甚至低速時無法轉動。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。

Abstract

A unique vertical wind tunnel is created, through the threaded rods and bearings so that the shuttlecocks can rotate freely for us to measure the resistance, rotating speed, and lateral force at the same time, and analyze the trajectory difference by high-pressure injection.

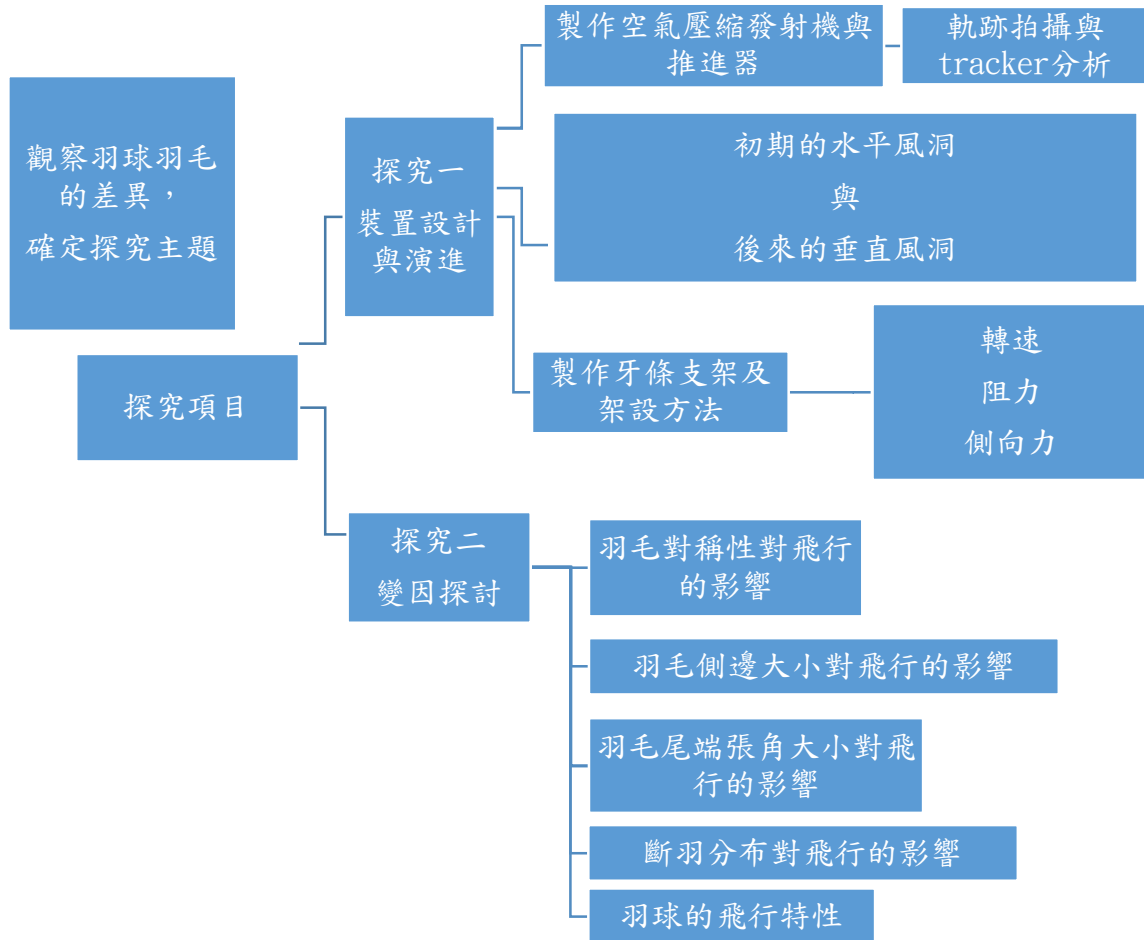
Experimental data showed that once the feathers were trimmed, the resistance would decline, and thus caused a higher trajectory at the expense of reducing the shuttlecocks' flying characteristics. After trimming the outer feathers, the rotating speed increases at high wind speed, but decrease due to the insufficient surface area at low wind speed. We also found that thorough a light trimming of the outer layer, both the flying ability and characteristic were improved, such adjustment would enhance the value of the training shuttlecocks. However, if the tail was severely damaged, though the flying distance was obviously improved, the rotating ability would be compromised; the rotation even stopped at low wind speed.

Interestingly enough by cutting off another feather to form a symmetrical gap, we are able to save the shuttlecock from being out of control, thus prolonging the lifespan of damaged ones.

壹、 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。

貳、 研究流程圖

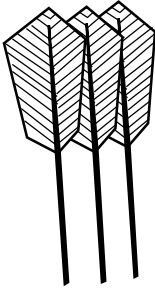
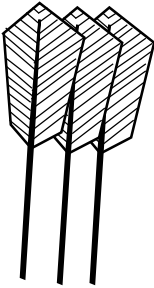
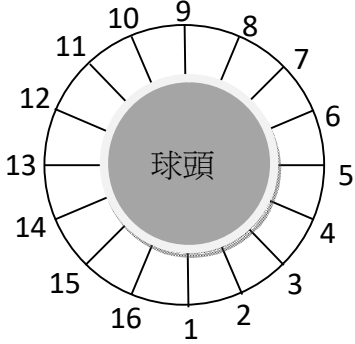


參、 研究目的

- 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於飛行的影響。
- 六、 探討羽毛斷羽分布對於飛行的影響。

肆、 名詞定義

一、 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> |
|  |  |  |

二、 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。

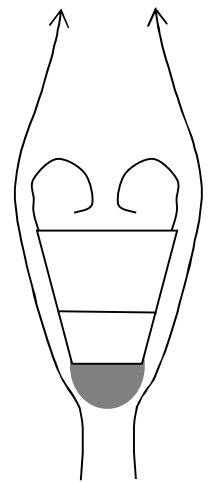
三、 阻力：探討羽球在風洞中運動時的阻力。

四、 轉速：羽球旋轉時的轉速。

五、 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。

六、 背景值：實驗支架裝上羽球後，無風狀態下的實驗數值。

七、 空白值：實驗支架未裝上羽球，受風狀態下的實驗數值。



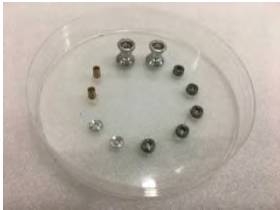

伍、 探究與討論

探究一、裝置的探究與討論

探究一 - 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：

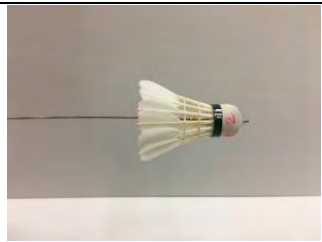

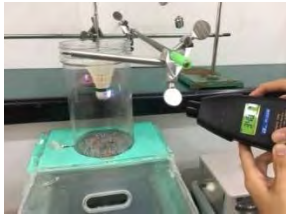
| | | | |
|----|---|--|---|
| 器材 | 1. 四驅車導輪(內有滾珠軸承) 2. 白鐵牙條 3. 墊片與螺帽、雙通螺柱 4. 電鑽 5. 轉速計、風速計 |  |  |
|----|---|--|---|

(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。

探究一 - 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。

探究一 - 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。
4. 選取了 6.6、6.4、4.8、3.4、3.1(m/s)等五種風速來進行實驗。

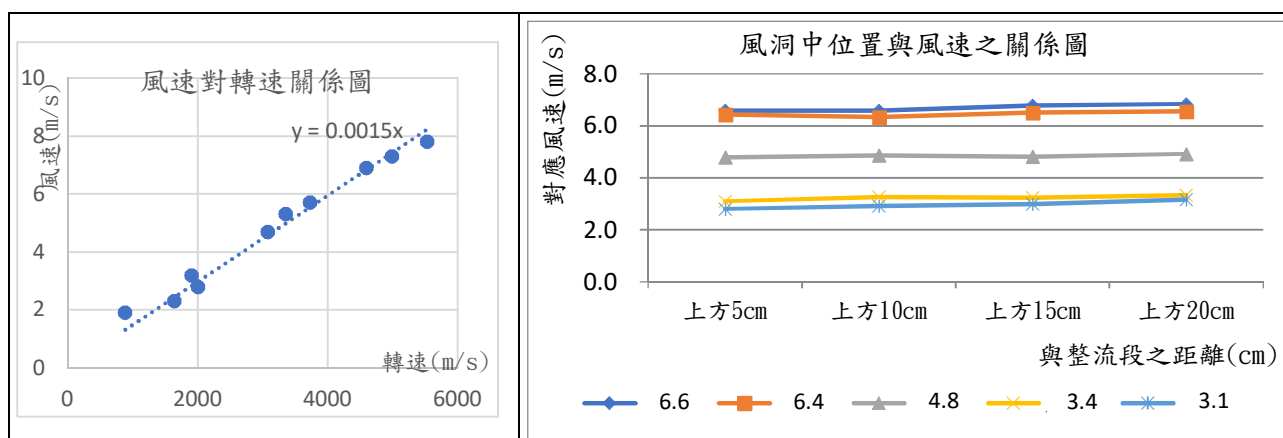


(三) 結果：

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 |

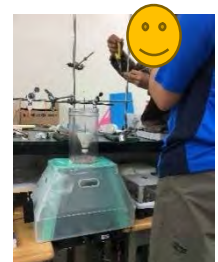
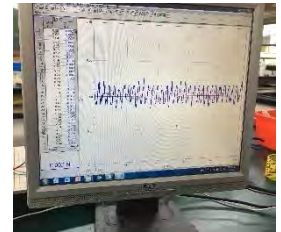
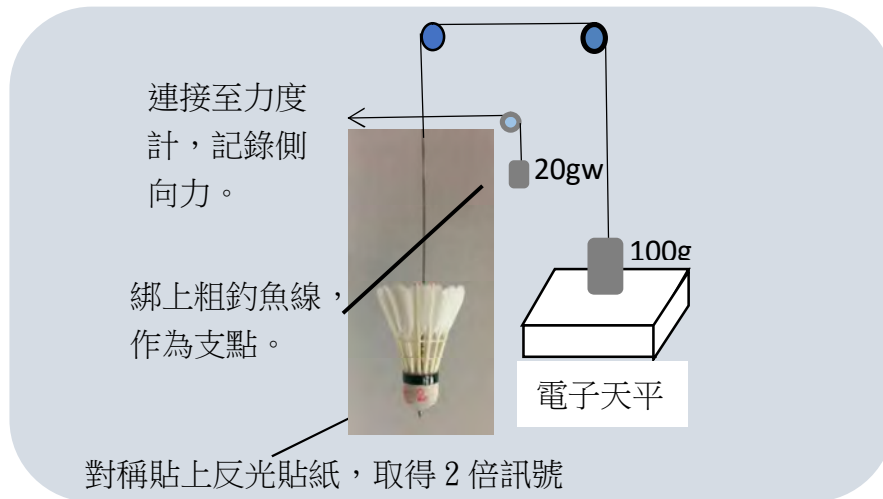
2. 風速及轉速關係作圖及實驗用的 5 種風速，並透過自製的微型風速計深入風洞中，取得轉速數據如下，確認垂直風洞內為穩定氣流。



探究一 - 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測量值，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。

- 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。
- 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 0.029gw，作為空白值。

探究一 - 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：

- 準備規格為 2hp 的空壓機一台及長柄空氣槍一支。
- 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。
- 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 8kgw/cm²時壓下空氣槍進行發射。
- 透過攝影機拍攝下飛行軌跡，透過 tracker 分析實驗數據。

(三)結果：

- 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。
- 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 |

- 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。

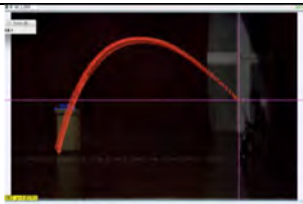
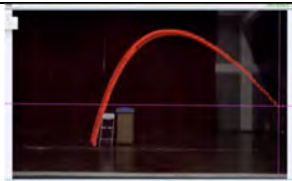
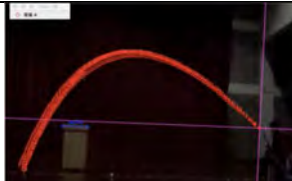
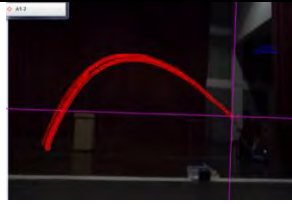
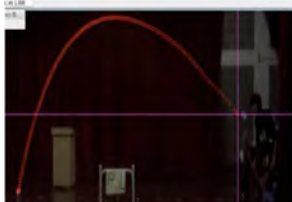

4. 為避免風的流動影響軌跡，我們全程於地下室的活動中心進行軌跡的實驗。

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、exthree、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 顆羽球中存在大翅在外、小翅在外兩種混合的情形，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：

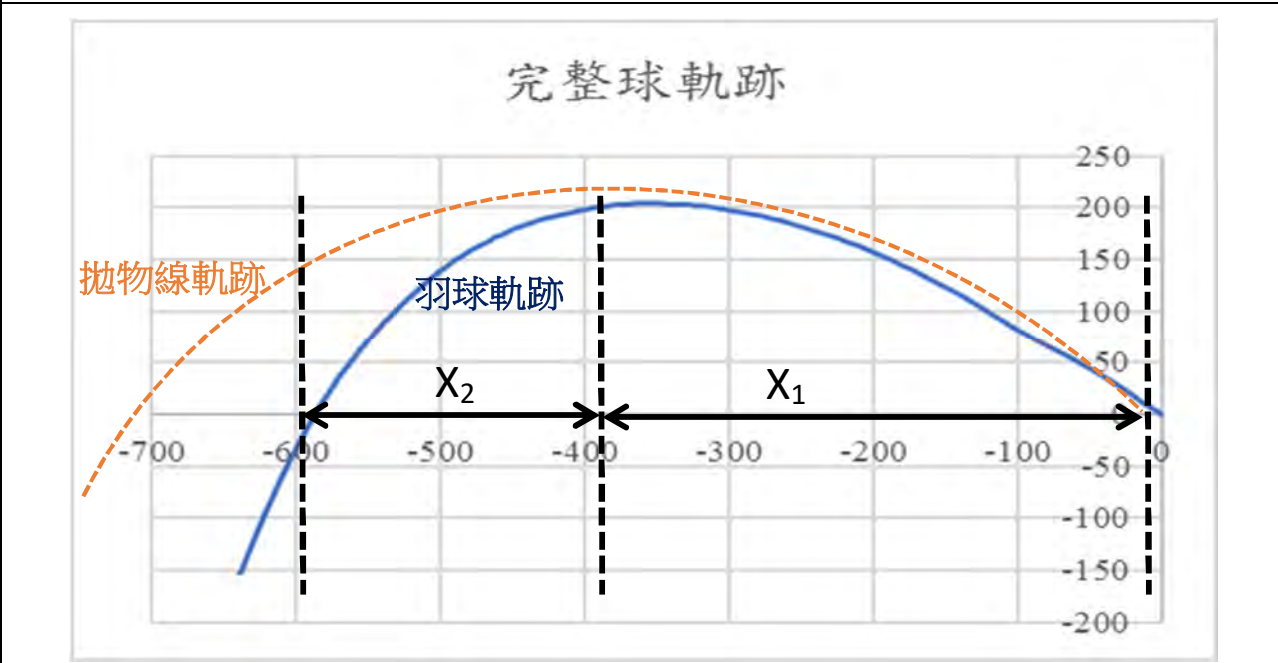
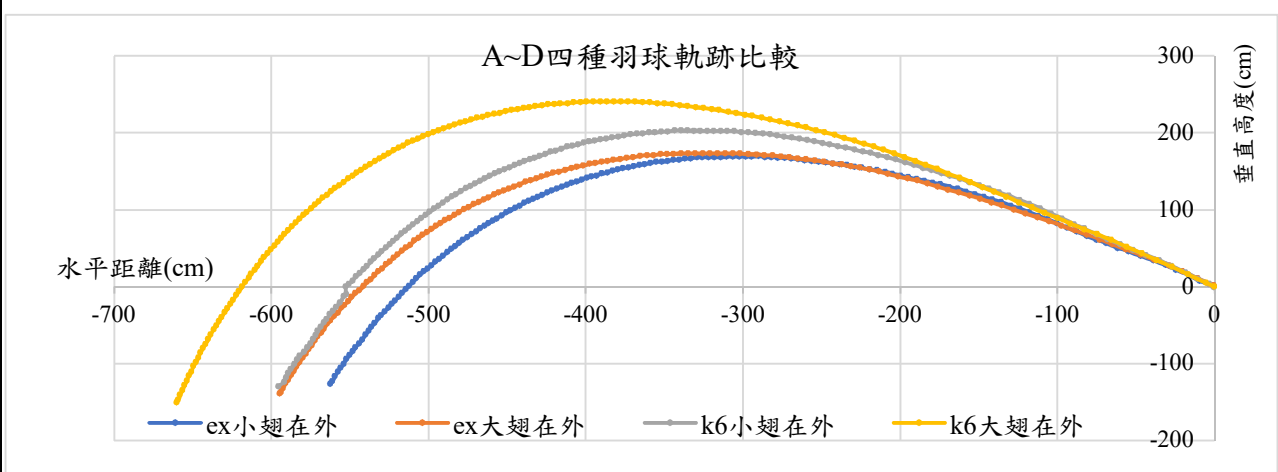
1. 四種羽球分別透過空氣壓縮機各自進行 10 次的 45 度仰角發射並進行運動模式錄影。
2. 再透過 tracker 分析影片取得發射仰角、發射初速、最大垂直高度、最大水平距離以及落地速度的數據，進行比較分析。

(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) 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 |
| 特徵值 | 0.76 | 0.60 | 0.61 | 0.65 |

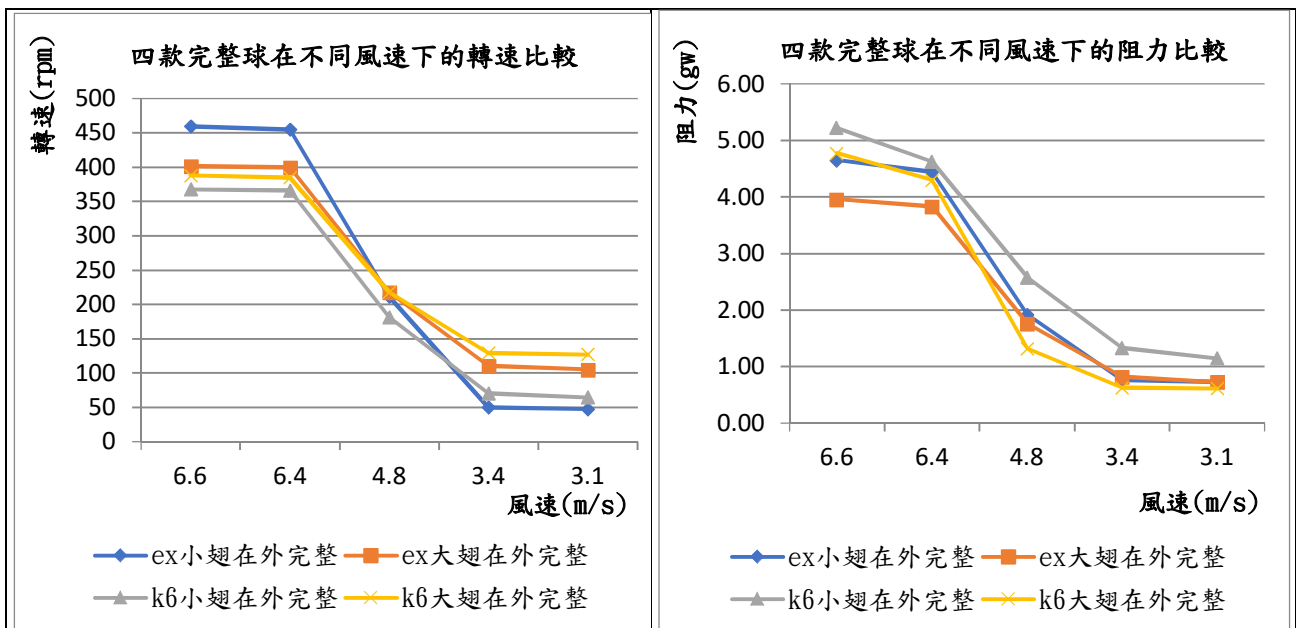


1. 我們採用的空氣壓縮機噴射方式能夠提供羽球發球之用。羽球上升到最高點後，受阻力作用產生下墜的軌跡，和實際揮拍的挑球球路相似
2. 每顆球均進行 10 次發射，可發現外翅為大翅羽球具有較高較遠的飛行軌跡，其中(D)款的 k6 大翅在外羽球同時展現最高的垂直距離、最遠的水平距離。而 ex 小翅在外的羽球在高度及水平距離均較短。
3. 我們定義為 $\frac{x_2}{x_1}$ = 飛行的特徵值，用以顯示羽球飛行時因為阻力導致的下墜現象。其中， x_1 為上升時的水平距離， x_2 為下墜時水平距離。得到下表：比賽級的 CD 兩款特徵值為 0.61 及 0.65，以 A 款的 0.76 最大。

| 羽球 | A | B | C | D |
|-----|------|------|------|------|
| 特徵值 | 0.76 | 0.60 | 0.61 | 0.65 |

(六) 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：(A)ex 小翅在外>(B)ex 大翅在外>(C)k6 大翅在外>(D)k6 小翅在外。

② 低風速下的轉速：(C)k6 大翅在外>(B)ex 大翅在外>(D)k6 小翅在外>(A)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：(C)k6 小翅在外> (A)ex 小翅在外>(D) k6 大翅在外>(B)ex 大翅在外。推論原因為(B)ex 大翅在外款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。

(七) 側向力比較

1. 側向力數據處理說明

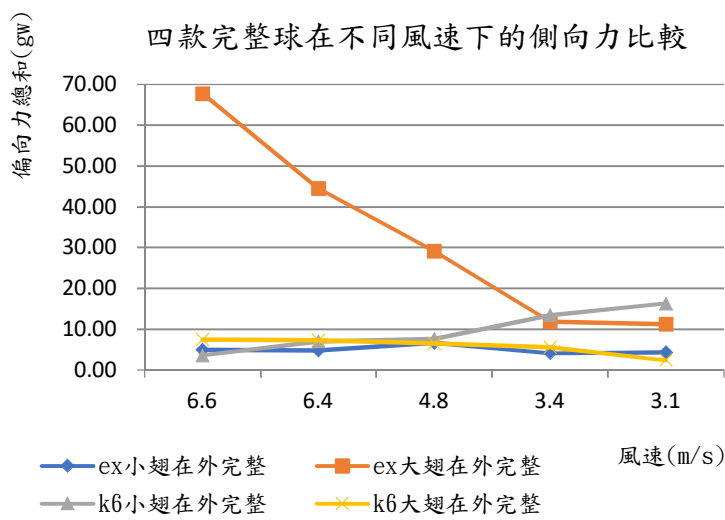
(1) 將數據取絕對值後加總，其總和可以視為羽球在 10 秒內的受力總和，並以 gw 為單位。

(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表示羽球於不同風速下的側向力大小。

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 大翅在外的款外，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，每顆發射 6



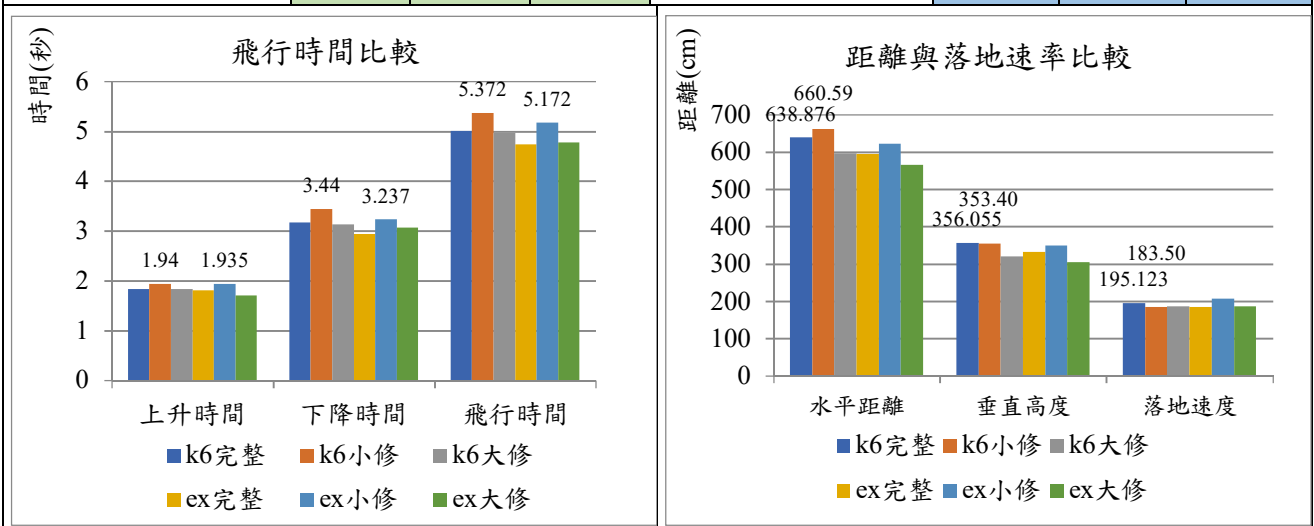
次，拍攝飛行軌跡透過 tracker 分析取得相關數據。

- 再依定義完成(B)ex 大翅在外羽球的側邊羽毛大修剪，重複步驟 2。
- 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。
- 將 ex 大翅在外羽球改為 k6 大翅在外羽球，重複 1~4 的步驟。

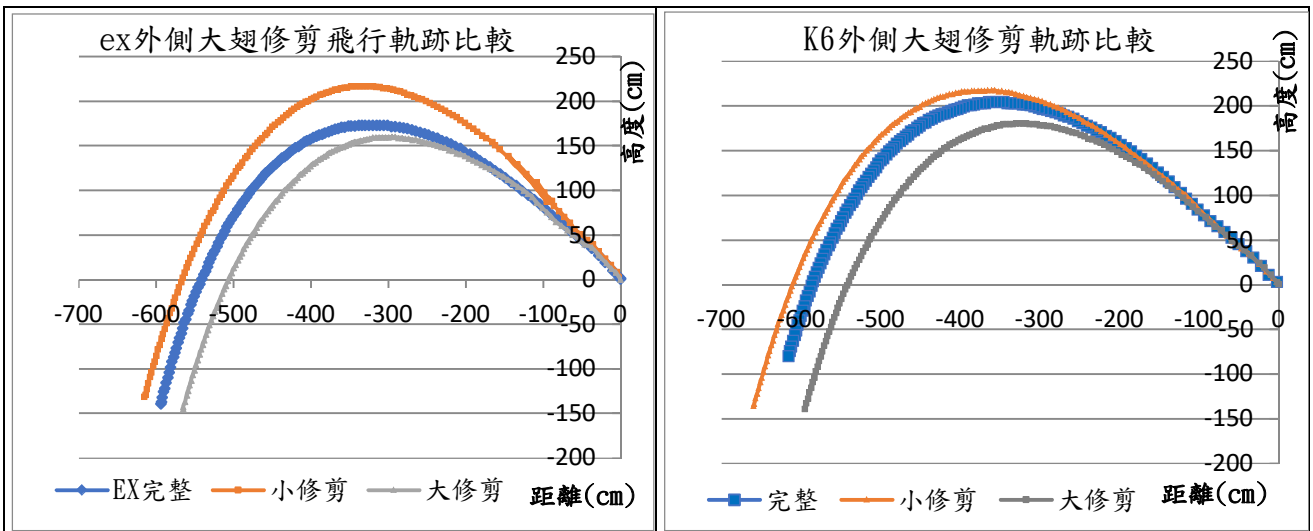
(四) 數據與討論

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 |

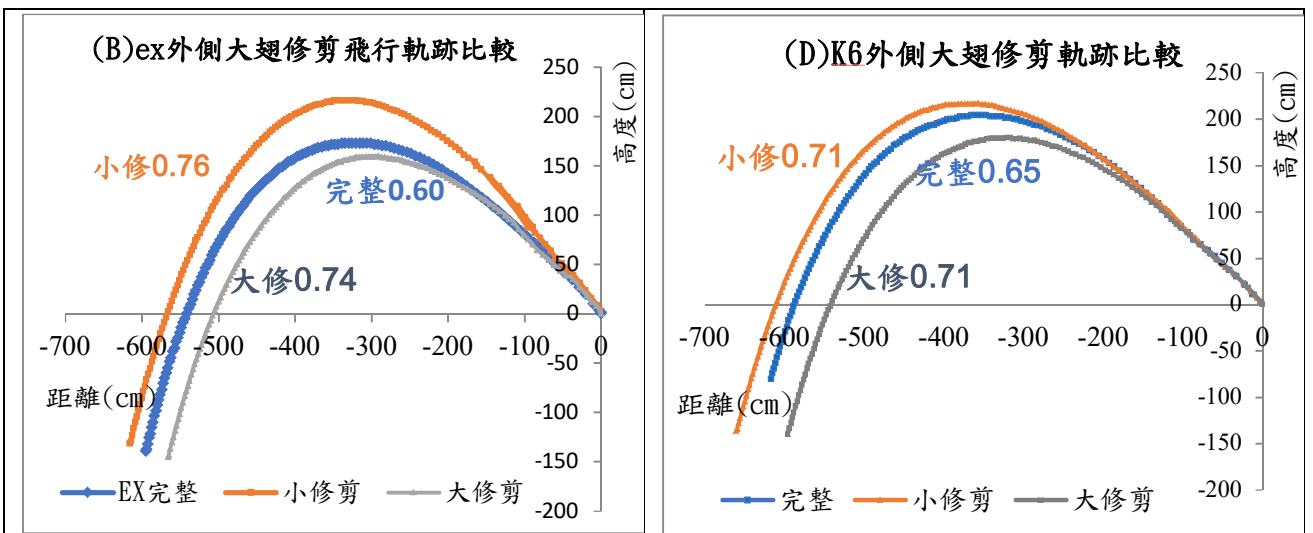


(五) 飛行軌跡比較



討論：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) 側羽修剪的特徵值變化



討論：(B)和(D)兩款羽球的側邊羽毛無論大修或小修後的特徵值均大幅增加，顯示阻力的影響減少，不利展現羽球特有的飛行軌跡。

(七) 轉速、阻力與側向力總和比較

1. ex 大翅在外數據

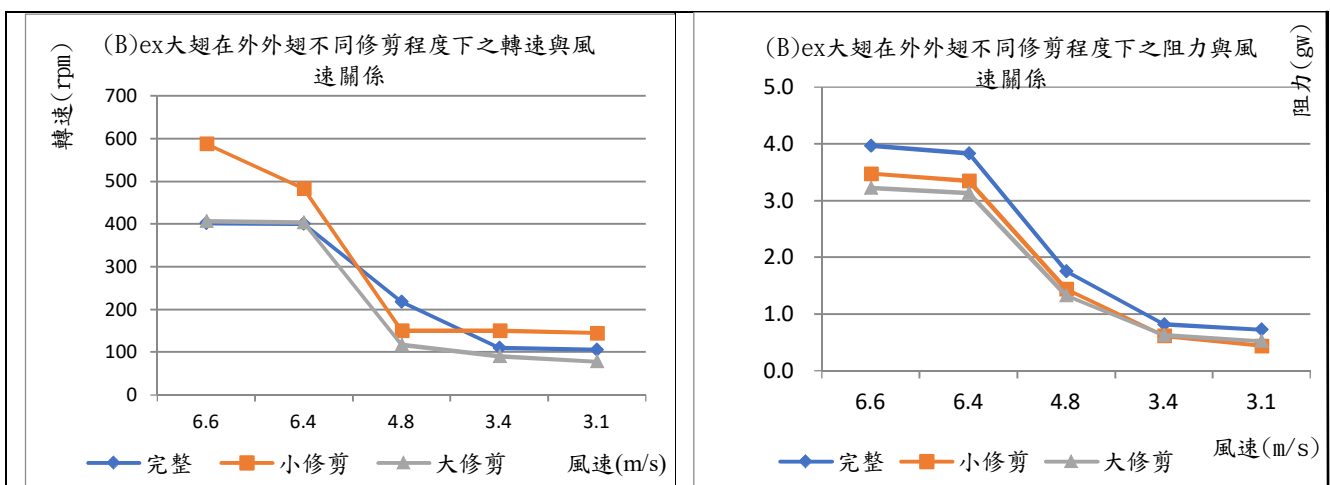
| (B)ex 大翅在外 | 完整 | | | 小修剪 | | | 大修剪 | | |
|---------------|-----|-------|-----------|-----|-------|-----------|-----|-------|-----------|
| | 轉速 | 阻力 | 側向力 總和 | 轉速 | 阻力 | 側向力 總和 | 轉速 | 阻力 | 側向力 總和 |
| 6.6 | 402 | 3.963 | 67.625 | 588 | 3.472 | 42.6589 | 407 | 3.221 | 28.033 |

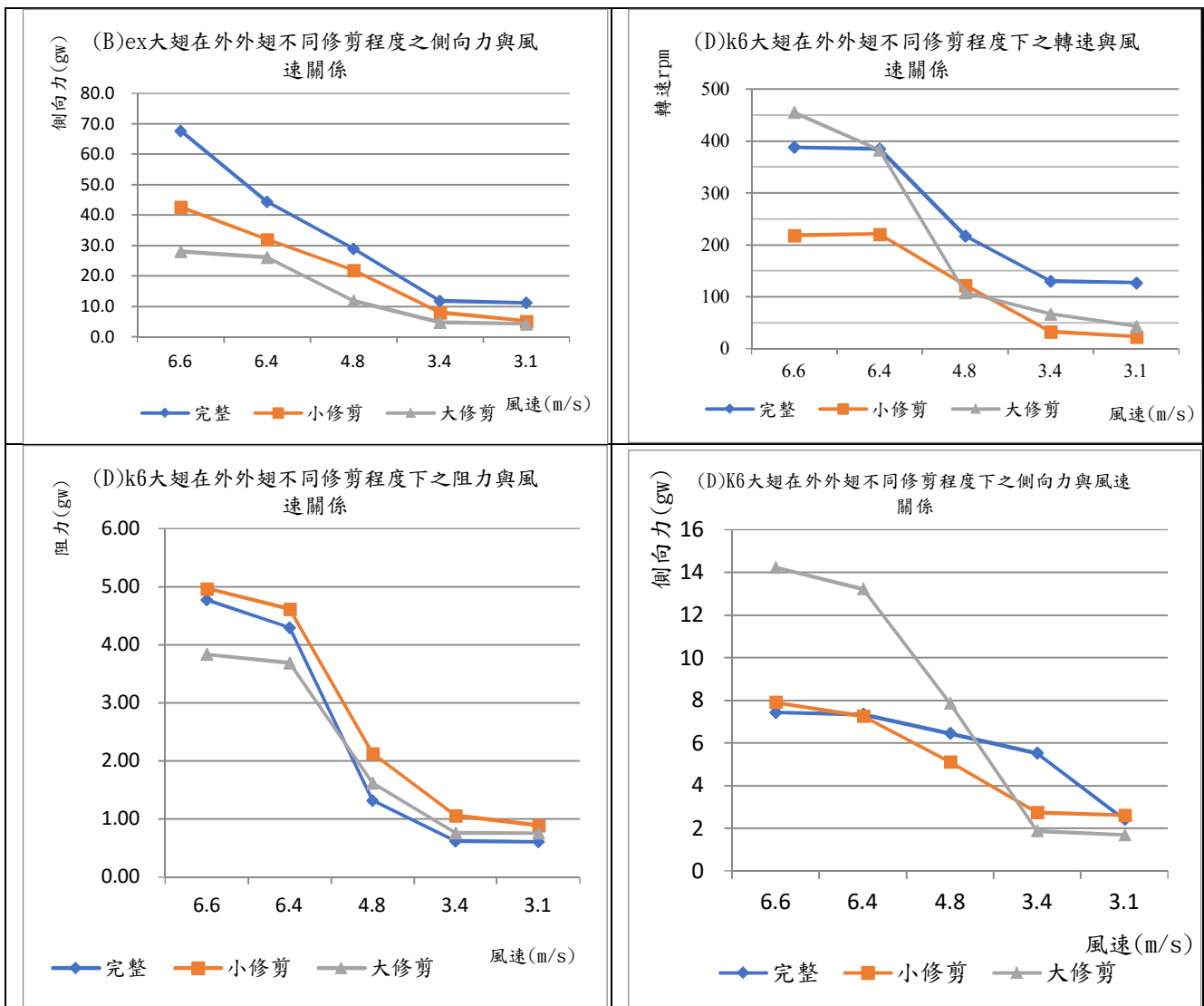
| (B)ex 大翅在外 | 完整 | | | 小修剪 | | | 大修剪 | | |
|---------------|-----|-------|-----------|-----|-------|-----------|-----|-------|-----------|
| 風速 | 轉速 | 阻力 | 側向力 總和 | 轉速 | 阻力 | 側向力 總和 | 轉速 | 阻力 | 側向力 總和 |
| 6.4 | 400 | 3.832 | 44.402 | 483 | 3.344 | 32.0433 | 403 | 3.133 | 26.054 |
| 4.8 | 218 | 1.759 | 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，高速下的側向力和阻力均增加，轉速下降。經大修剪後，高速下的轉速和側向力提升而阻力下降；慢速時的轉速和側向力急遽下降但阻力回升，較接近完整球。

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。

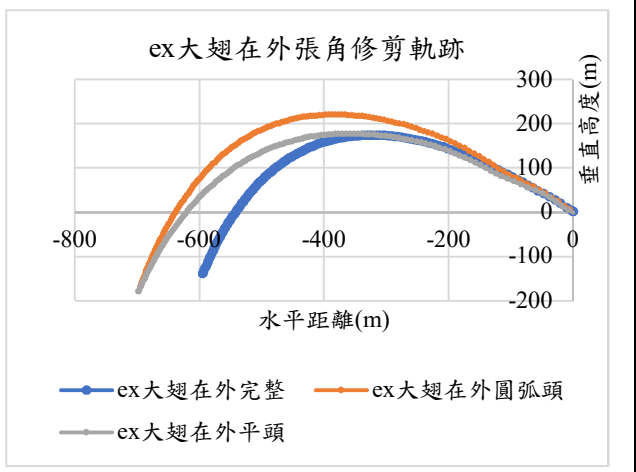
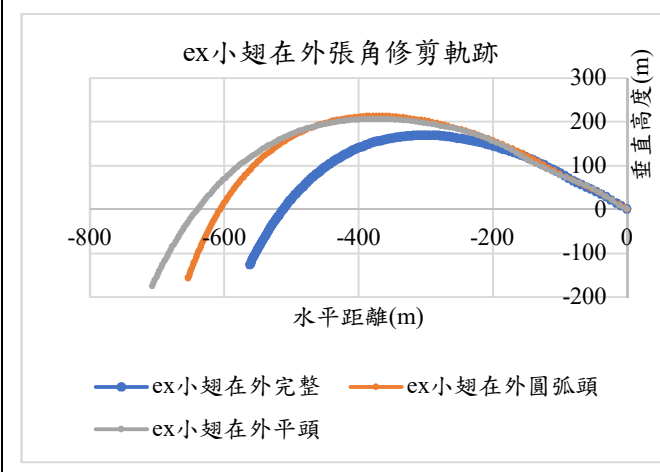
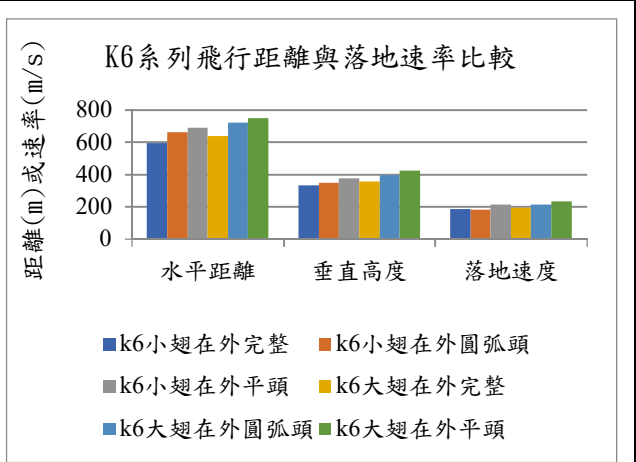
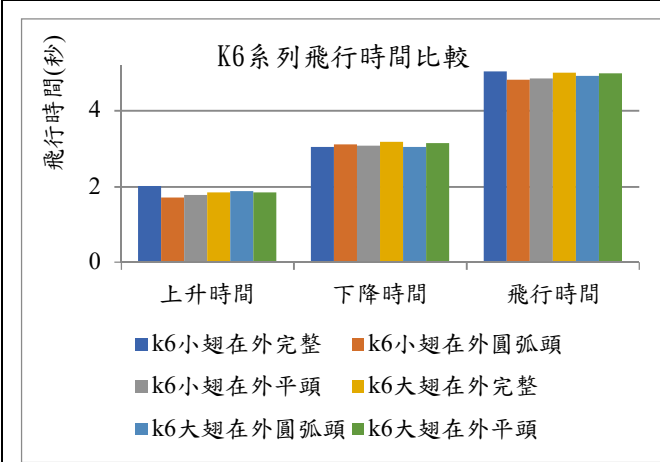
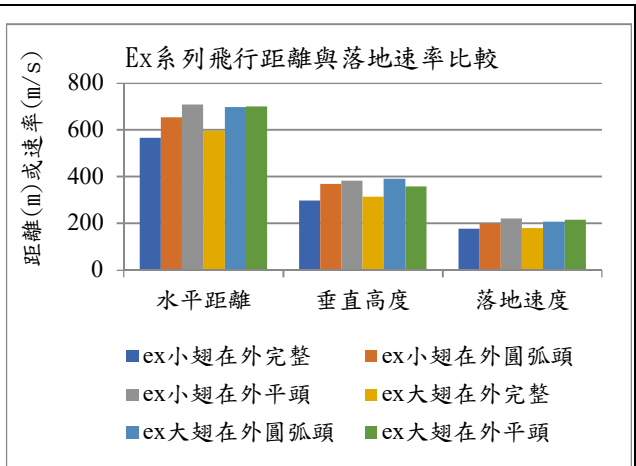
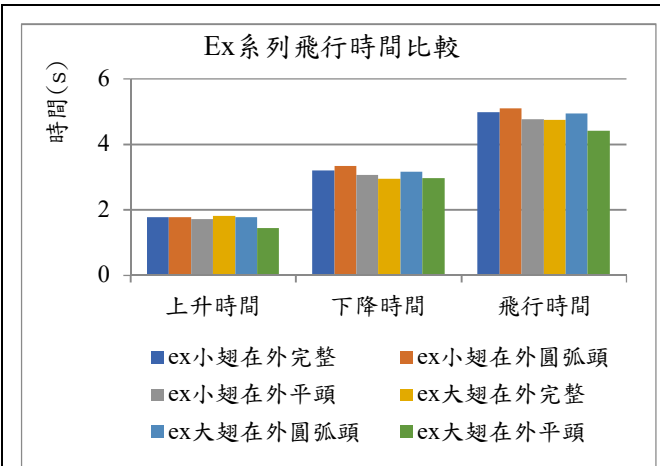
(三) 步驟：

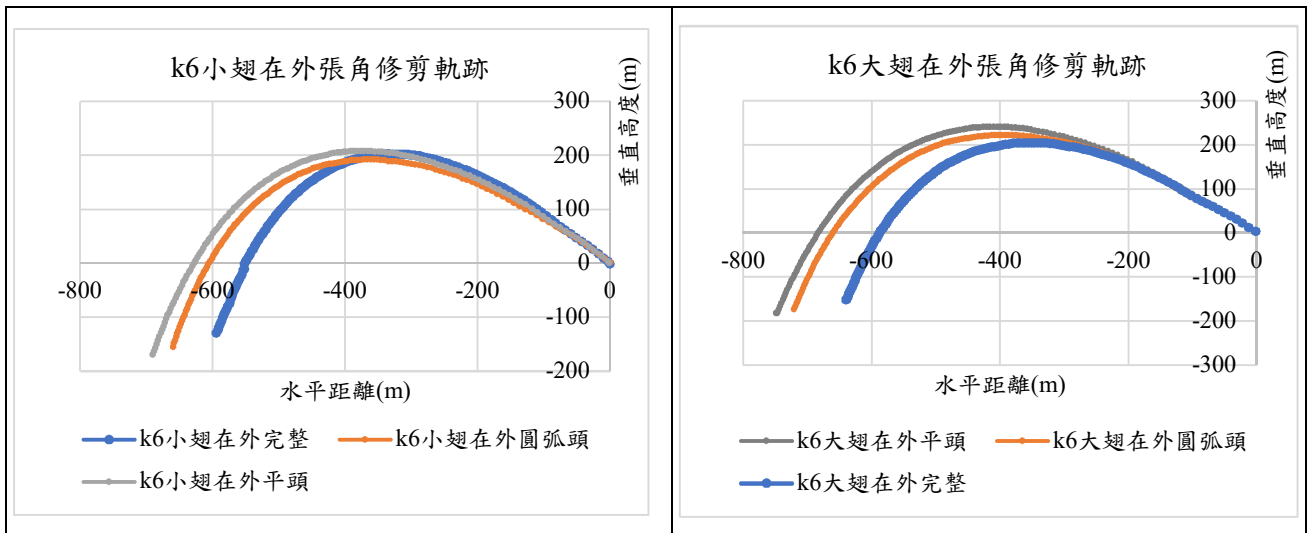
1. 取(A)ex 小翅在外的羽球，依照定義完成 16 根羽毛的圓弧頭修剪。
2. 將修剪後的 ex 小翅在外羽球透過空氣壓縮機進行 45 度仰角的發射，每次發射 6 次，拍攝飛行軌跡透過 tracker 分析取得相關數據。
3. 再取另一顆(A)ex 小翅在外的羽球依定義完成平頭的修剪，重複步驟 2。
4. 依序將圓弧頭及平頭羽球鑽洞放上滾珠軸承等裝置，進入風洞中進行五種風速下的轉速、阻力以及側向力紀錄，每項數據重複 6 次。
5. 將(A)ex 小翅在外的羽球依序更換為(B)ex 大翅在外(C)k6 小翅在外(D)k6 大翅在外，重複 1~4 的步驟。

(四) 羽球飛行軌跡與數據比較

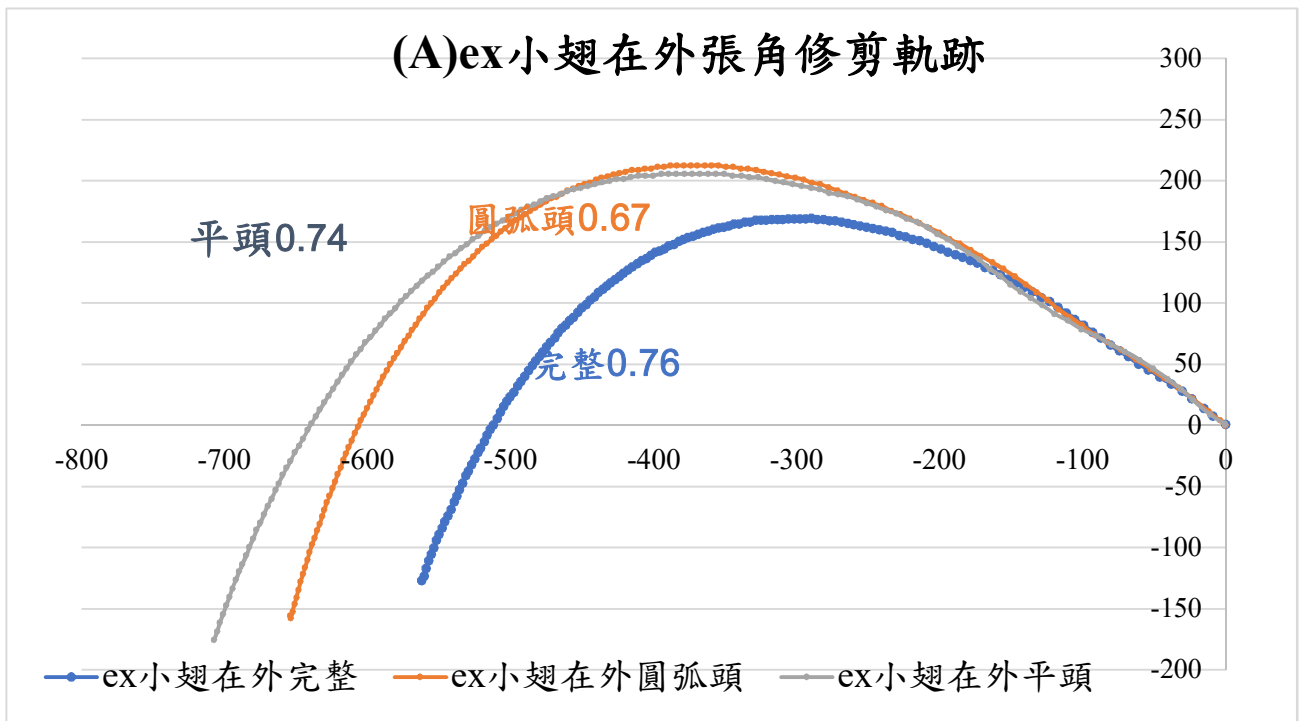
| 項目 | A | | | B | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | ex 小翅在外 | | | ex 大翅在外 | | |
| | 完整 | 圓弧頭 | 平頭 | 完整 | 圓弧頭 | 平頭 |
| 上升時間(s) | 1.768 | 1.768 | 1.702 | 1.802 | 1.768 | 1.435 |
| 下降時間(s) | 3.204 | 3.337 | 3.069 | 2.936 | 3.17 | 2.969 |
| 飛行時間(s) | 4.972 | 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) A 款張角修剪的特徵值變化



1. (A)款的練習級羽球尾端張角修剪成圓弧頭後的飛行特徵值下降，接近(D)款比賽級的特徵值，但修剪成平頭後的特徵值無法有效改善。
2. 初步判斷，可透過羽尾剪成圓弧頭改善練習級羽球的飛行軌跡。

(六) 轉速、阻力以及側向力比較

1. 數據比較

(1)EX 小翅在外比較

| | ex 小翅在外完整 | | | ex 小翅在外圓弧頭 | | | ex 小翅在外平頭 | | |
|-------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|
| 風速 (m/s) | 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

| | ex 大翅在外完整 | | | ex 大翅在外圓弧頭 | | | ex 大翅在外平頭 | | |
|-------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|
| 風速 (m/s) | 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 |

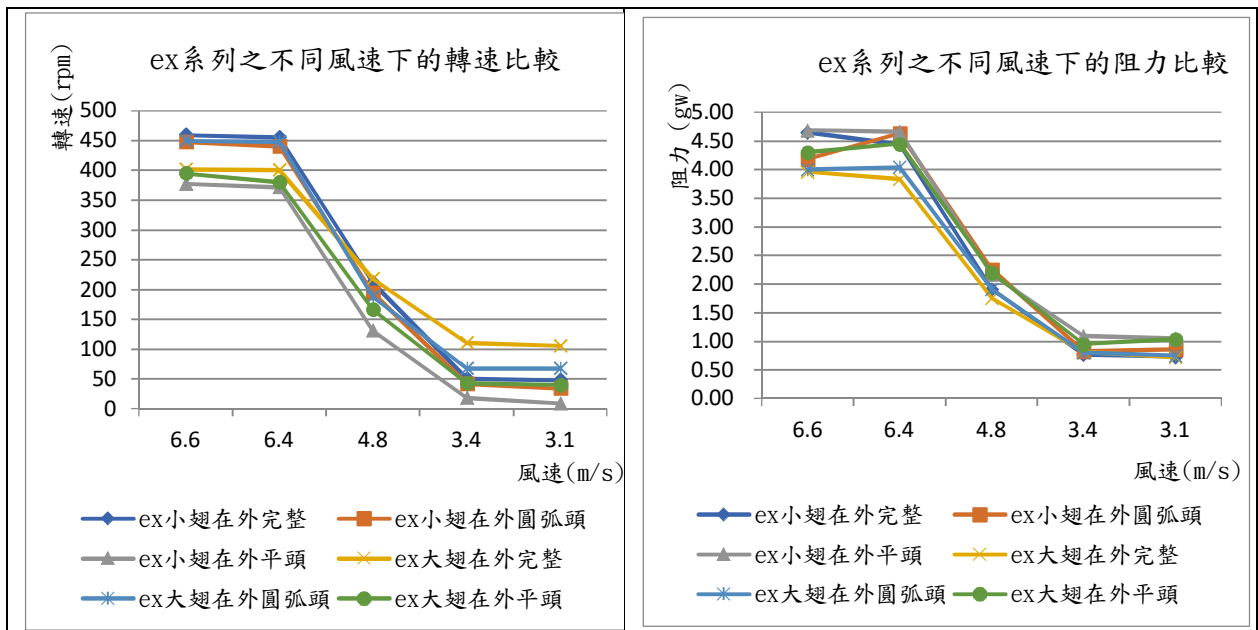
(3)K6 小翅在外比較

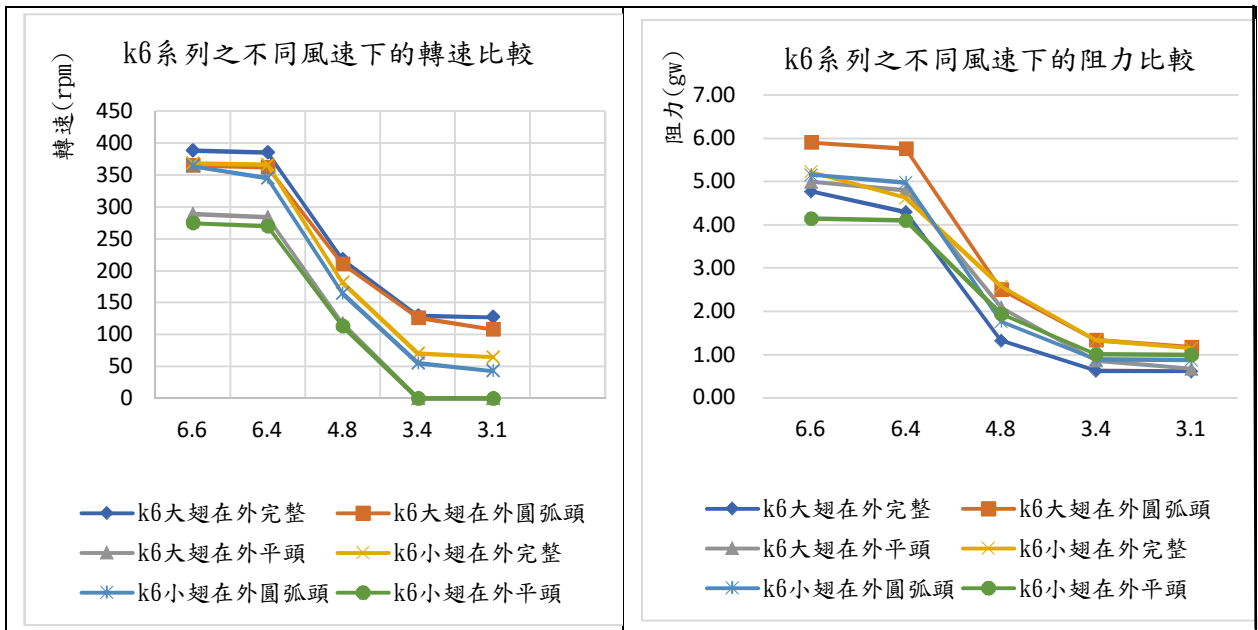
| | K6 小翅在外完整 | | | K6 小翅在外圓弧頭 | | | K6 小翅在外平頭 | | |
|-------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|---------------|
| 風速 (m/s) | 轉速 (rpm) | 阻力 (gw) | 側向力總和 (gw) | 轉速 (rpm) | 阻力 (gw) | 側向力總和 (gw) | 轉速 (rpm) | 阻力 (gw) | 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 |

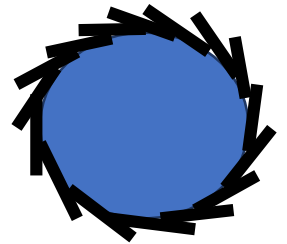
2. 作圖比較





(七) 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，其餘三種均是平頭的飛行能力大於圓弧頭。
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。



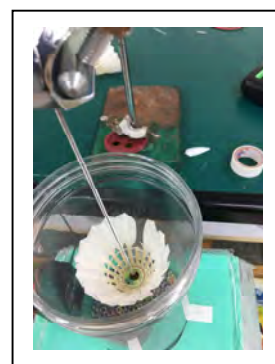
5. Ex 大翅在外的羽球，因為內側羽毛修短，使得重疊處出現縫隙，有利空氣通過，均展現出最小的阻力。但也因空氣通過進入羽球內側產生側推力，產生最大的側向力。
6. 羽毛尾端修剪成圓弧頭，對阻力的影響較小。但修剪成平頭後的阻力多大於未修剪的完整球。推論羽毛本身的形狀如同機翼一般，且頂端的形狀具有導流作用，能讓氣流快速通過尖端。所以，剪成平頭狀會破壞導流功能，空氣大面積發散流出導致阻力增加。

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：

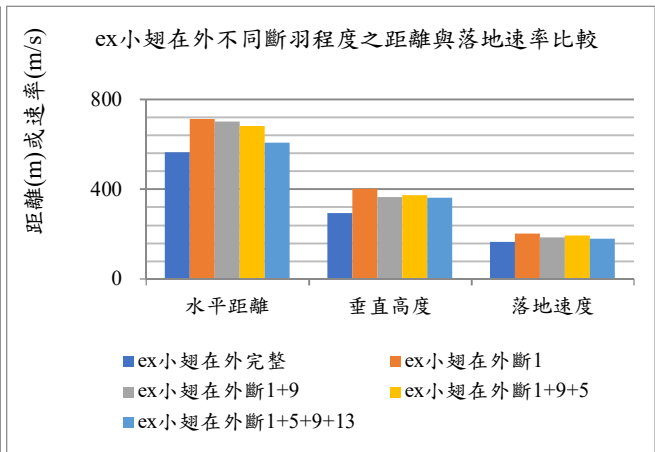
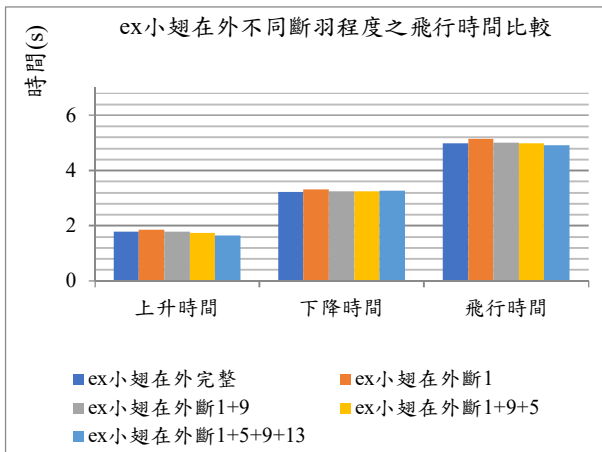
1. 取兩顆(A)ex 小翅在外的羽球，各從羽毛下端處剪去 1 根羽毛，此剪去的羽毛為第 1 號羽毛。
2. 一顆進行仰角 45 度空壓機發射，並錄影下飛行軌跡，進行 tracker 分析。另一顆鑽洞放進風洞中進行五種風速下的轉速、阻力以及側向力的記錄，並進行分析。
3. 將步驟 2 中剪去第 1 號羽毛的羽球再剪去第 9 號羽毛，形成對稱的缺口後，進行空壓機 45 度噴射以及風洞實驗。
4. 再將步驟 3 中的羽球依序剪去第 5 號羽毛、第 13 號羽毛，重複步驟 1。
5. 將羽球依序更換為(B)ex 大翅在外(C)k6 小翅在外(D)k6 大翅在外，重複步驟 1~4。



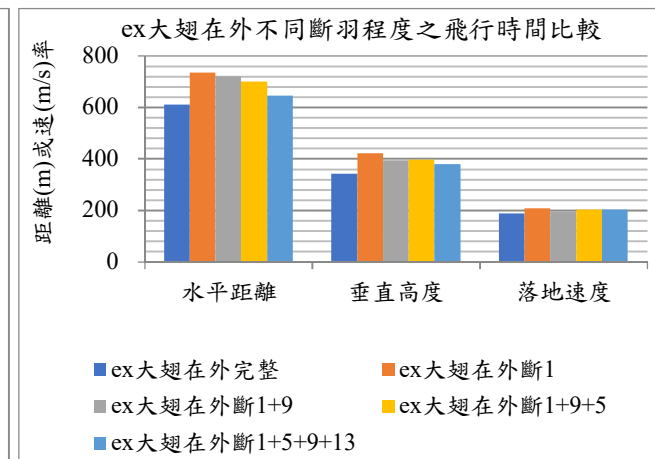
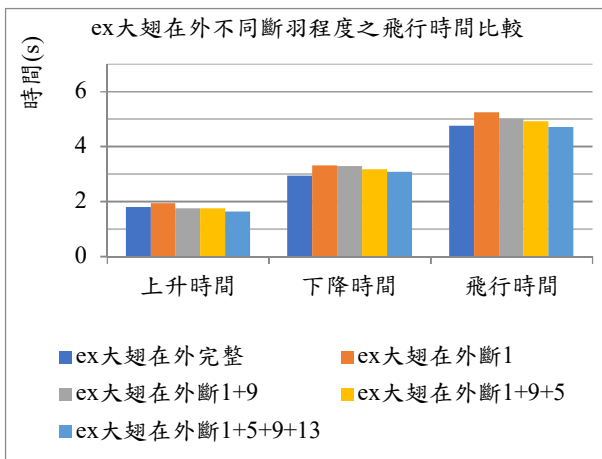
(三) 結果與討論：

1. 飛行數據比較與討論

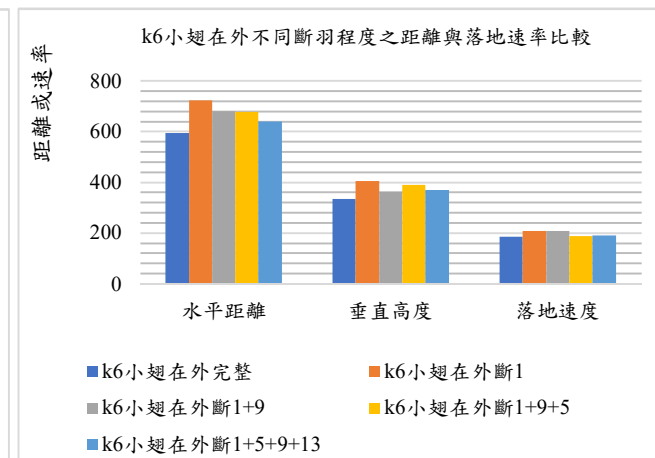
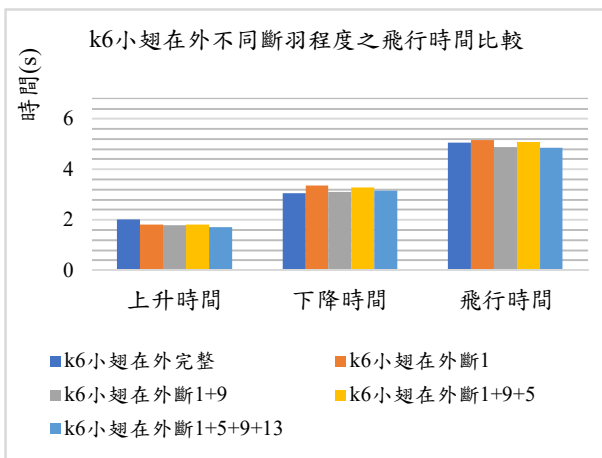
- (1) ex 小翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。



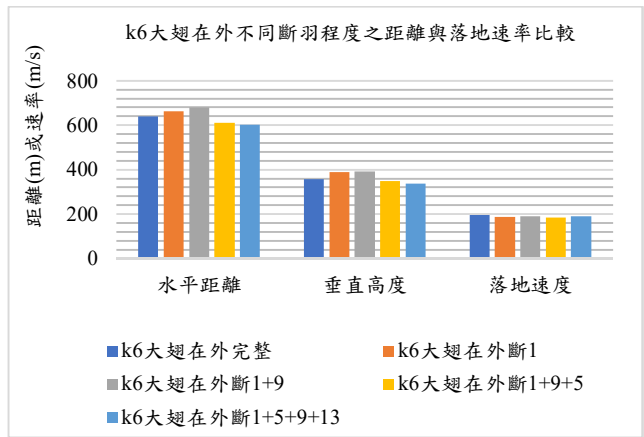
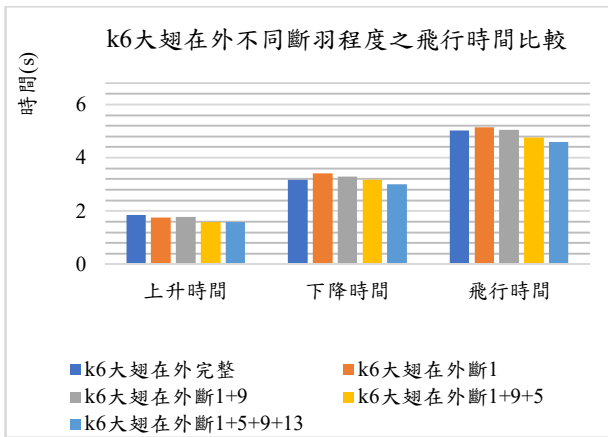
2. ex 大翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。



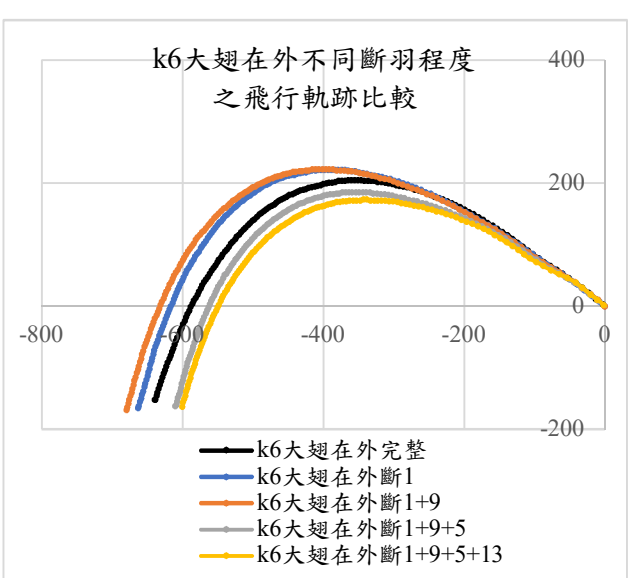
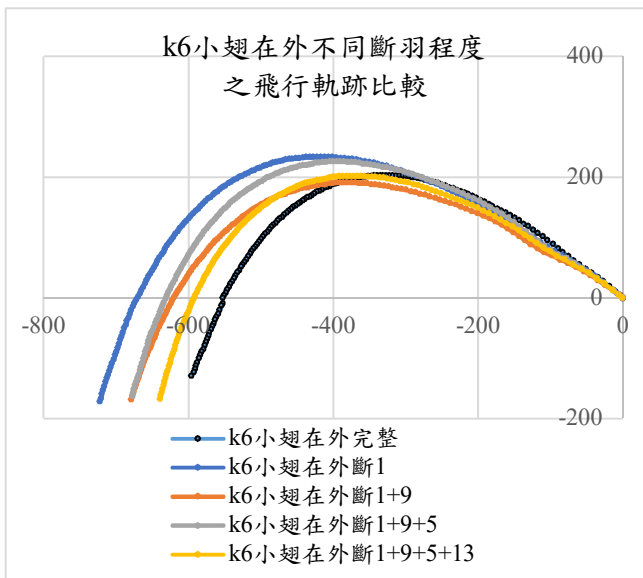
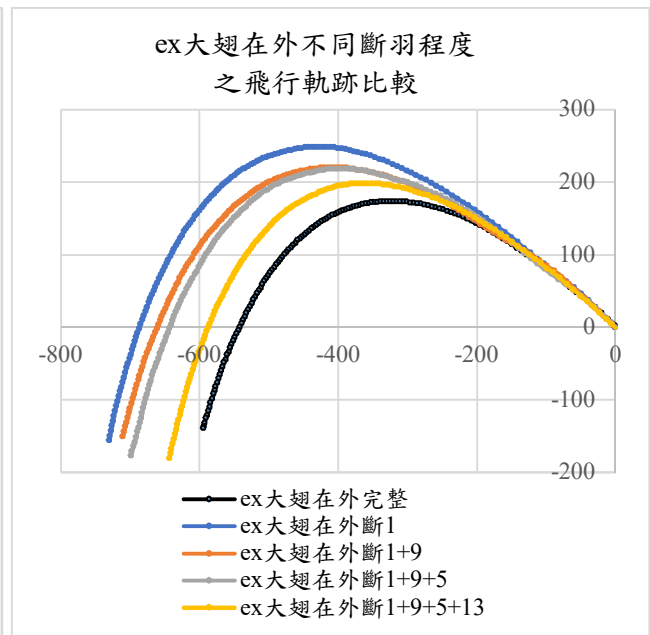
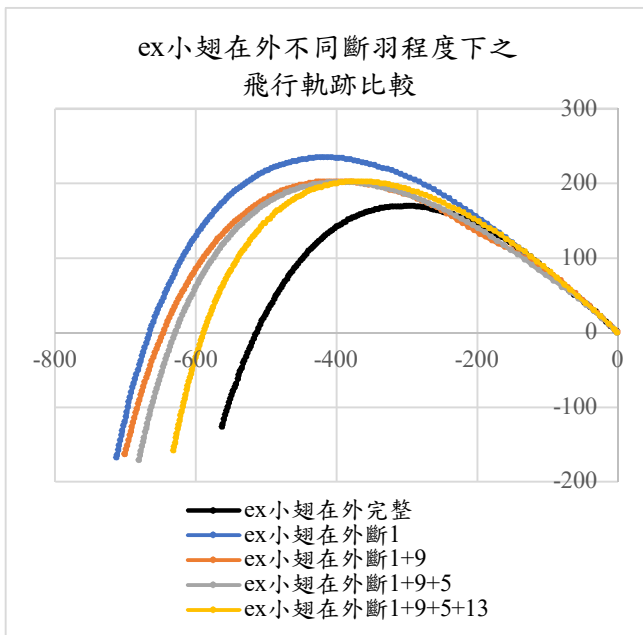
3. k6 小翅在外：斷翅後的上升時間多為減少，下降時間增加，總飛行時間增加，也具有更快的落地速率。其中，斷 1 根羽毛的球，飛行軌跡變化最明顯。



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。

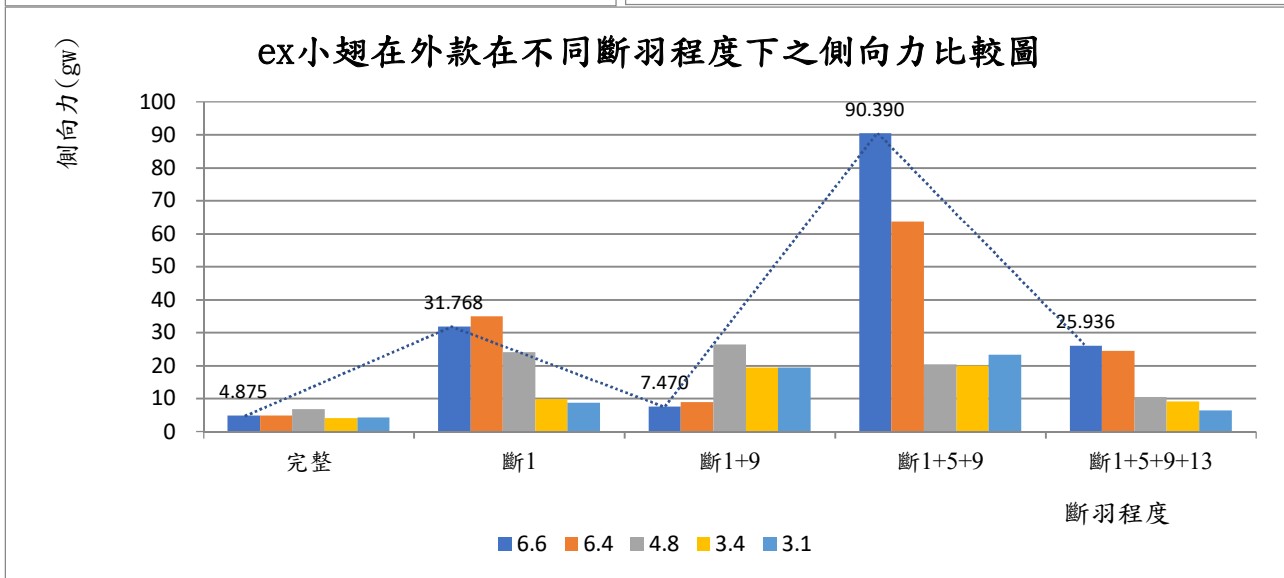
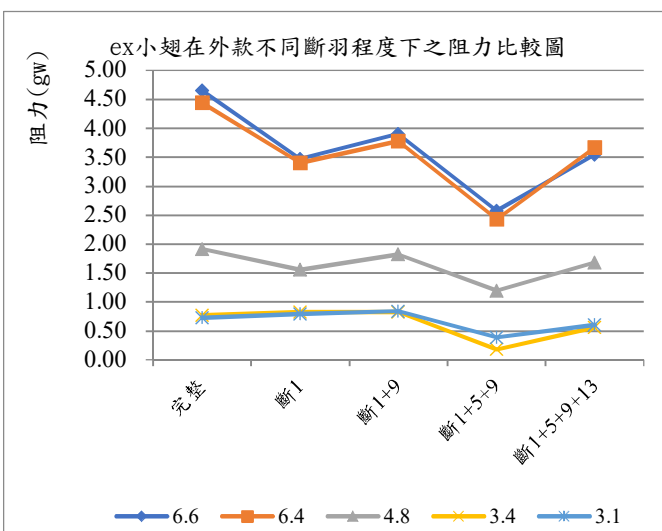
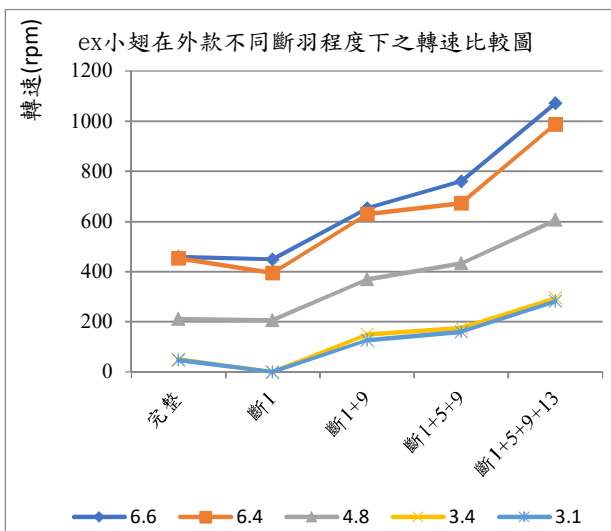


(四) 飛行軌跡比較：ex 球款及 k6 小翅在外球的飛行距離及高度隨著斷羽數量增加而減少。

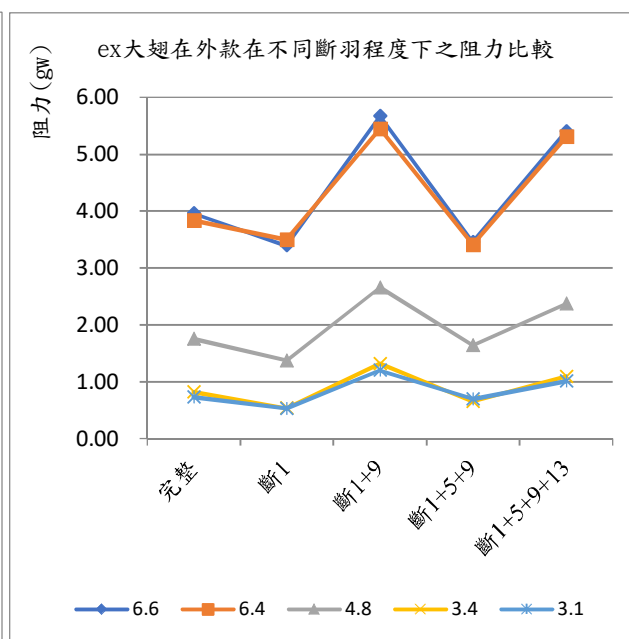
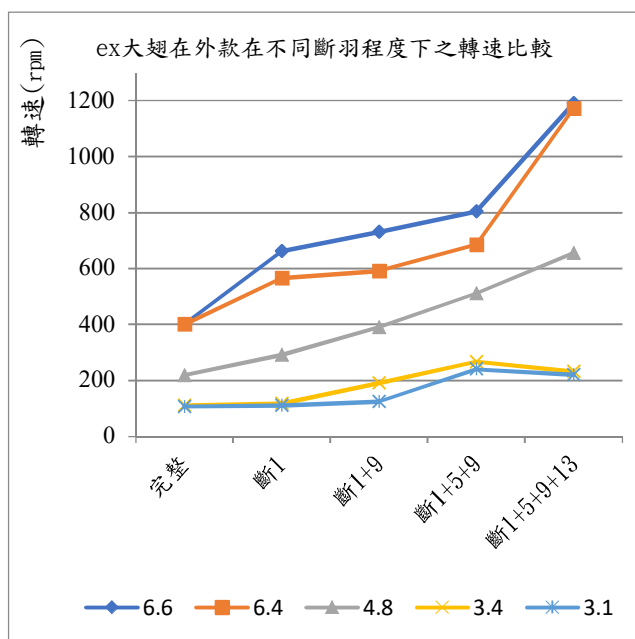


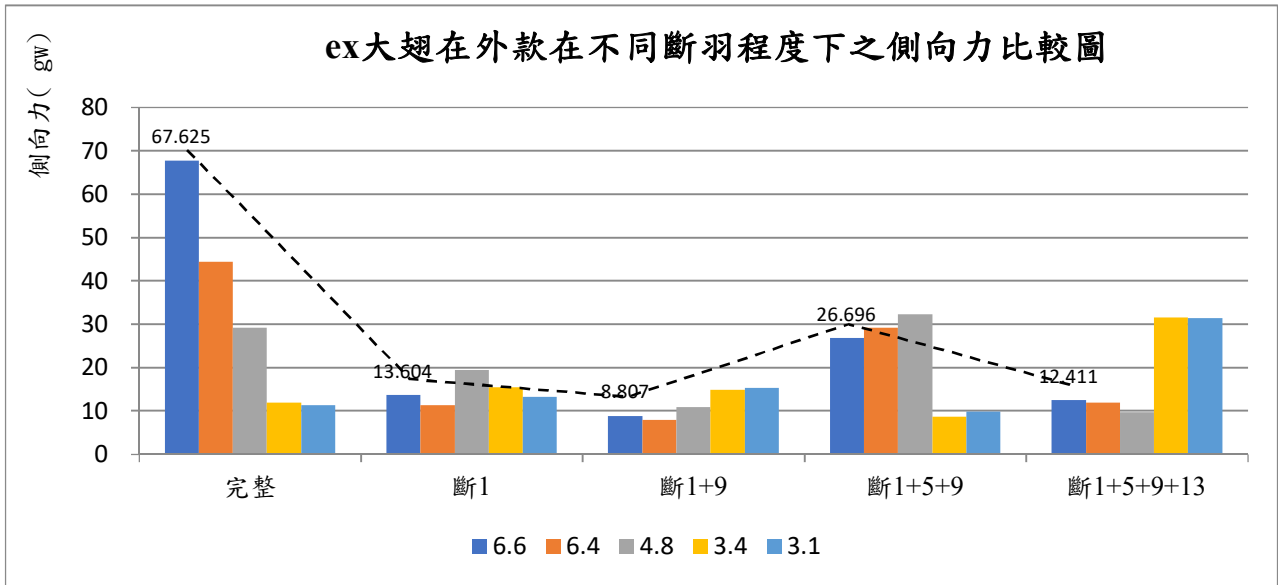
(五) 轉速、阻力與側向力比較

1. Ex 小翅在外：

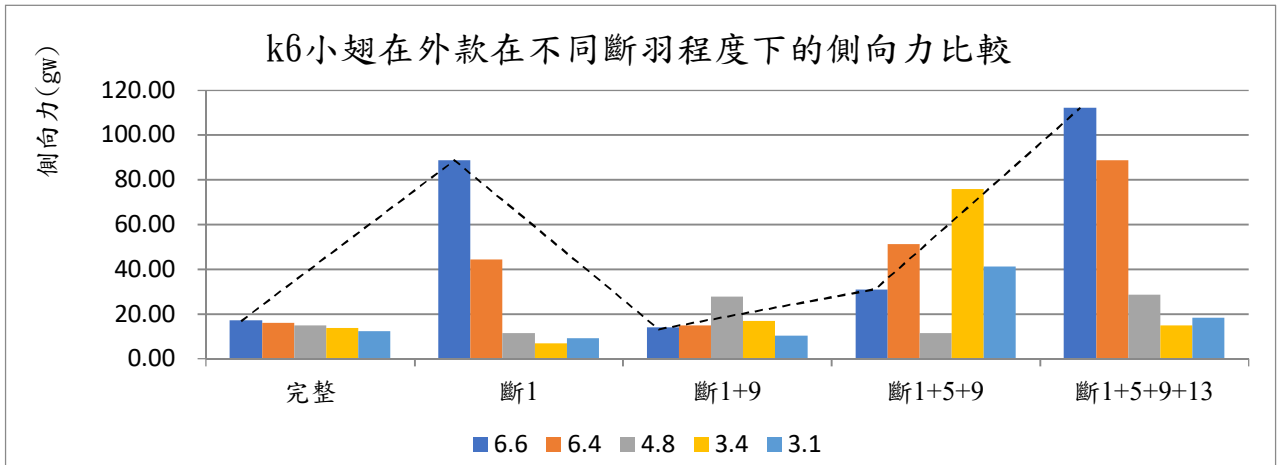
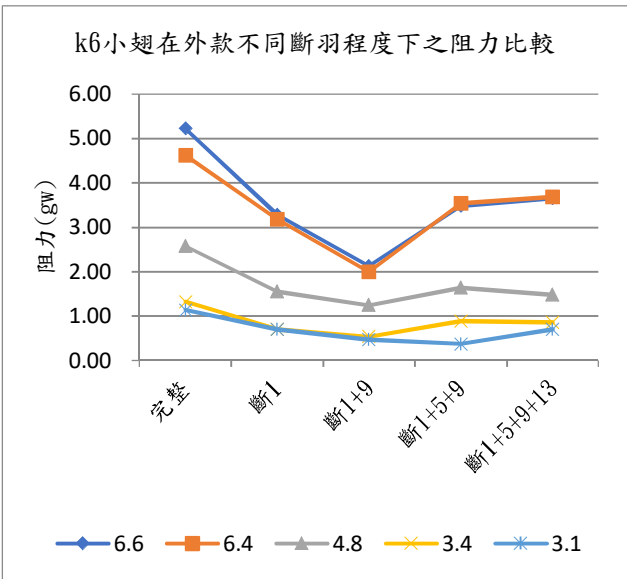
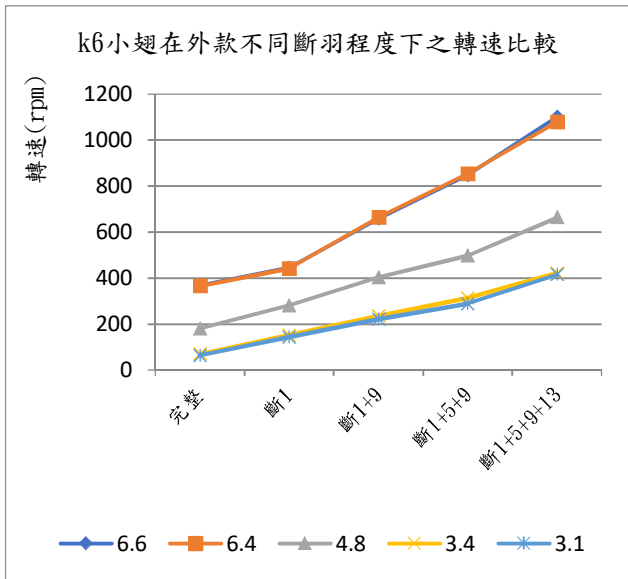


2. Ex 大翅在外：

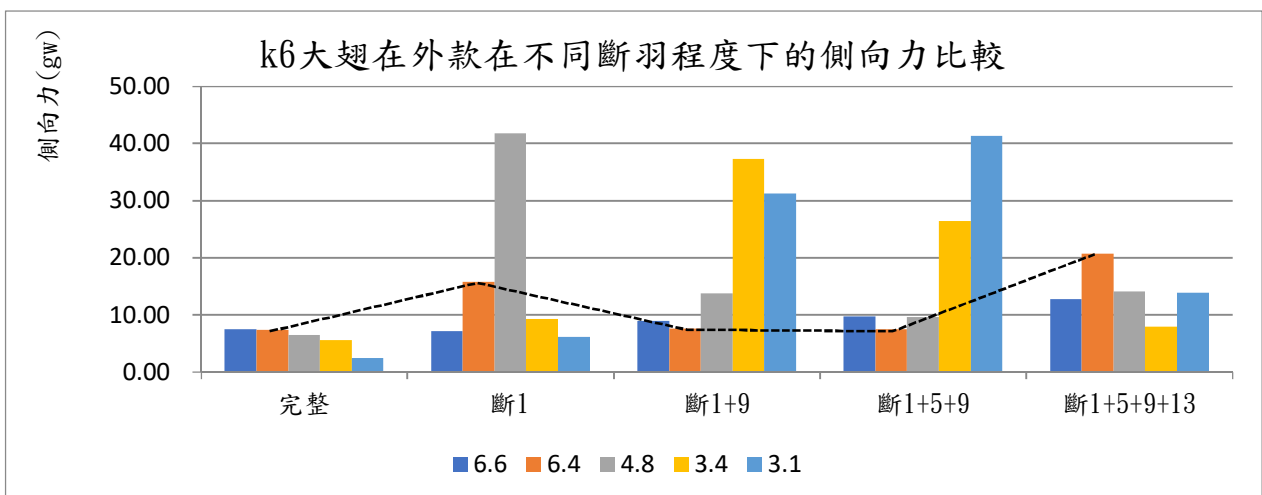
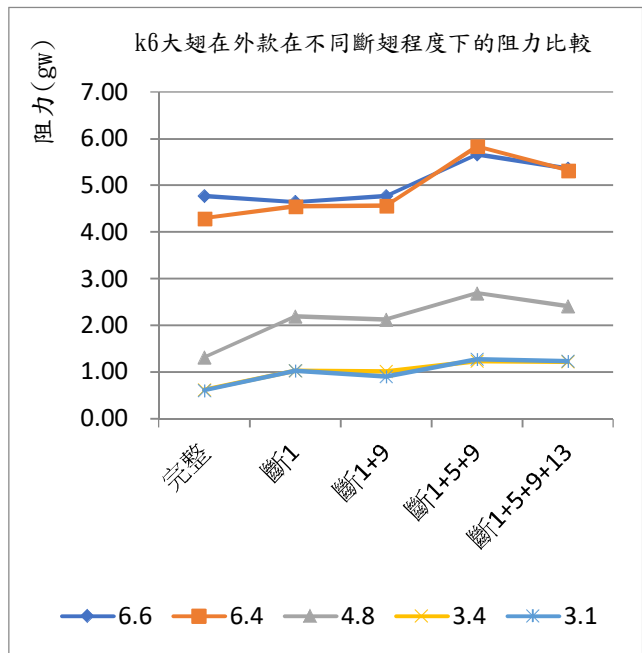
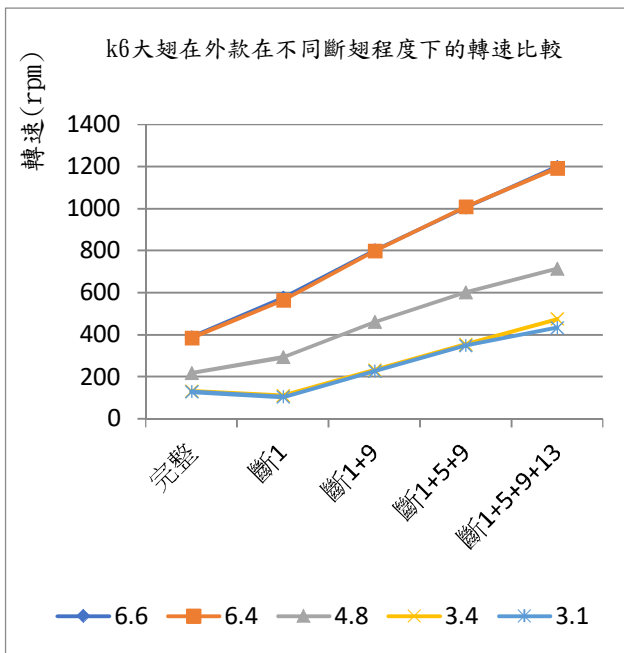




3. K6 小翅在外



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，但也因此較接近完整球的情形。
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。

陸、 討論

- 一、 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。
- 二、 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。
- 三、 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，找出轉換關係，便能獲得風洞中的風速，也確認了氣流的穩定。
- 四、 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。
- 五、 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。
- 六、 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。
- 七、 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。
- 八、 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 8kgw/cm² 氣壓時第一次發射進行實驗。
- 九、 此次研究，我們選擇了羽毛一側修剪(ex)以及完整(k6)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。

柒、 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)款羽球轉速便不如(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. 在我們實驗的羽球中，比賽級羽球的飛行特徵值為 0.65 左右，練習級羽球則不穩定，最高可達 0.74，羽毛阻力的影響明顯減少。

(1) 初步推論側羽小修剪雖可讓羽球更高更遠，但卻喪失了飛行特性(特徵值增加)，故不推薦。

(2) 建議可將比賽級羽球的羽尾張角修剪成圓弧頭，可同時提升飛行能力和飛行特性。

6. 我們於實驗後，請託了 ██████████ 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。

7. 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。
8. 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 |

9. 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 5.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 ρ 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。
10. 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。

捌、 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。

玖、 參考文獻

- 一、 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
- 二、 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

- 三、 中華民國第53屆中小學科展羽置今拾一應用羽球重心斜面力學整列與拋物線的省力收集器
- 四、 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
- 五、 Caroline Cohen¹, Baptiste Darbois Texier¹, David Quéré² and Christophe Clanet¹. (2015) The physics of badminton . *New J. Phys.* **17** 063001
- 六、 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

【評語】 160034

本作品探討對羽毛球進行修剪，改變其飛行狀態。發現修剪羽毛外側可增加轉速，又如將羽尾剪短，可增加飛行距離，最後發現對斷翅的羽毛球如果剪除對稱的羽毛，可以挽救失控力，提升破損羽球的價值。

本作品對羽球的修復有實用價值，降低運動開支，值得稱許。