

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080107

F1 賽車的魅力-Double D 空氣力學套件開發研究

學校名稱：國立臺中教育大學附設實驗國民小學

作者： 小五 曾彥博	指導老師： 謝昆芳 蔡名峯
-------------------	-----------------------------

關鍵詞：F1 賽車、空氣力學套件、總下壓的力變化
量/阻力變化量

摘要

模擬高風速對模型遙控車產生之 Double D (Downforce 下壓的力與 Drag 阻力) 比值切入空氣力學套件角度研究。下壓的力增輪胎抓地力，轉彎速度增快，縮短單圈時間 (lap time) 贏得比賽。我們選取 Nissan GTR 與 F1 Ferrari SF21 遙控車，以巴沙木自製單層、雙層(主副翼不同角度組合)、三層共 17 組尾翼，自製風洞模型、掃葉機風力、2 個電子秤同測前後輪下壓的力、拉力計測阻力，發煙機及 LED 燈拍攝氣流。結果發現尾翼寬度增寬與尾翼攻角越大，可增加下壓的力。阻力與風速平方成正比，相關係數 0.94。對雙層尾翼，增加副翼角度比主翼角度更可增車子下壓的力。主翼 0° - 副翼 75° 造成「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值 0.78 為最大，乃增加穩定度之最佳尾翼選擇。再以 3D 列印技術製作出最佳主翼 0° - 副翼 75° 尾翼。

壹、前言

一、研究動機

從小我們就對車子很著迷，玩遍大大小小遙控車，對速度有極大熱情！有一次在電視看到 F1 賽車（一級方程式賽車 Formula 1，以下簡稱 F1 賽車）轉播，Mercedes 車隊 Lewis Hamilton 對戰 Red Bull 車隊 Max Verstappen，賽況緊張激烈，全場歡聲雷動。我心裡想：「為何 F1 賽車可以跑的這麼快？」「我們玩遙控車都會失控撞到，F1 車速這麼快，車手怎麼有辦法控制車子穩定性呢？」，加上看到 Max 車子居然抬起壓到 Lewis 車上，造成兩人都被迫退賽的結果（圖1），引起我想知道影響 F1 賽車車速與穩定性的因素。



圖1. 2021年競爭最激烈的兩位F1賽車手。左圖左方是Mercedes車隊Lewis Hamilton，右方是Red Bull車隊Max Verstappen；右圖是義大利站比賽中兩車碰撞情形。

五年級自然課「力與運動」單元告訴我們：力可改變物體運動速度快慢，也教我們彈簧秤(拉力計)可以測量力的大小。從維基百科得知，F1賽車比賽最高速度達350 km/h。空氣力學套件產生大量下壓的力，使車子過彎可以150-200 km/h高速且穩定的速度前進（參考資料1）。引發我們想由下壓的力的觀點研究，模擬車速快時，測量下壓的力變化，並試圖開發空氣力學套件來改變下壓的力，希望能了解F1賽車跑得快的奧秘（見圖2研究流程圖）。



圖2. 研究流程圖 (箭頭過程像賽道一般有彎道、有直道、進維修站)

二、研究目的

- (一) 建立風洞模型並觀察車子的氣體流動變化。
- (二) 觀察風速與下壓的力及阻力的關係。
- (三) 探討市售遙控車原有空力套件組合的下壓的力及阻力變化。
- (四) 比較自製空力套件的下壓的力及阻力變化，找出最佳尾翼。
- (五) 驗證裝有自製尾翼車子的車速與下壓的力關係。

※ 作品與教材相關性：

- 1. 五年級自然課「力與運動」單元
- 2. 資優班科學課的「紙飛機擲遠實驗」

三、文獻回顧

(一) F1賽車運動介紹

上網找尋相關文獻資料，發現國內探討汽車空氣力學套件對賽車下壓的力影響的研究很少。從 F1 官網得知國際汽車協會（Federation International de l'Automobile，以下簡稱 FIA）舉辦場地賽車系列中，F1 方程式賽車比賽級別最高。名稱中「方程式」指所有參賽車輛都必須遵守一組規則。自 1950 年英國銀石賽道 (Silverstone) 首次舉辦世界錦標賽以來，2010 年賽季全球收視觀眾達 5.27 億人次，2019 年賽季到場觀眾達到 419 萬人次。而先進技術研發出的賽車套件，經過賽道嚴格考驗後，也會移轉至市售車上運用，所以 F1 技術值得我們注意 (參考資料 2)。

F1 先進的研究技術包含引擎 (現在是油電混合的動力單元 Power Unit)、底盤與空氣力學套件。花在引擎的費用昂貴且複雜，超過我們研究能力，使我們有興趣研究空氣力學套件。F1 空氣力學工程師必須根據不同的賽道、不同的賽車甚至不同的賽車手來配置空氣力學套件，以求最佳表現。任何一小塊車身表面翼片的調整都足以影響賽車的性能，因此，空氣力學研發對於 F1 賽車來說，有著舉足輕重的地位 (參考資料 3)。

2014 年 CNBC International 國際新聞專訪空氣力學專家 Mark (圖 3) 談到：氣流穿過翼面時會產生力量並把車壓到地上，使輪胎盡可能的隨時保持與賽道路面直接接觸，有

更大抓地力，更快過彎，取得更快的單圈成績 (lap time)，贏得比賽 (參考資料 4)。



圖 3. 氣流穿過 F1 賽車翼面時會產生如大象重的 2500 公斤力量把車壓到地面。

(二) Double D：下壓的力 (Downforce) 及阻力 (Drag) 的影響

F1 賽車決勝點在車子轉彎能力；轉彎能力取決於空氣力學；而空氣力學主要目的在產生下壓的力，將車輪緊貼路面，輪胎有更多抓地力。較快加速性與剎車力導致較快轉彎速度，得到較少的單圈時間。(參考資料 5)。另外，下壓車子的力增加，可使車子的重心降低，可使轉彎時所受力矩變小，可增加車子穩定度，較不易翻覆。戴昭瑛、陳俊宏、徐茂 (2011) 也指出：現今 F1 車隊一致認為決勝的重要關鍵在於空氣力學的下壓的力 (Downforce) 和空氣阻力 (Drag) 之間的調整，讓賽車可以得到最大的抓地力並將阻力減至最小 (參考資料 6)。下壓的力是指由垂直方向使單位面積車子壓下的所有總合，這些力量是由空氣力學套件的前鼻翼和後尾翼而來 (圖 4)。



圖 4. 下壓的力 (Downforce) 及阻力 (Drag) (自繪圖)

下壓的力主要來自兩部分，一是流過車子表面速度差導致的壓力差，這個我們在資優班科學課的「紙飛機擲遠實驗」中，學過「白努利定律 (Bernoulli's principle)」告訴我們：尾翼上方流速慢，產生的壓力大；尾翼下方流速快，產生的壓力小，淨加總產生了下壓的力 (圖 5)。另一個則是迎面而來氣流撞到尾翼向上，尾翼則獲得空氣向下的反作用力。

尾翼產生下壓的力

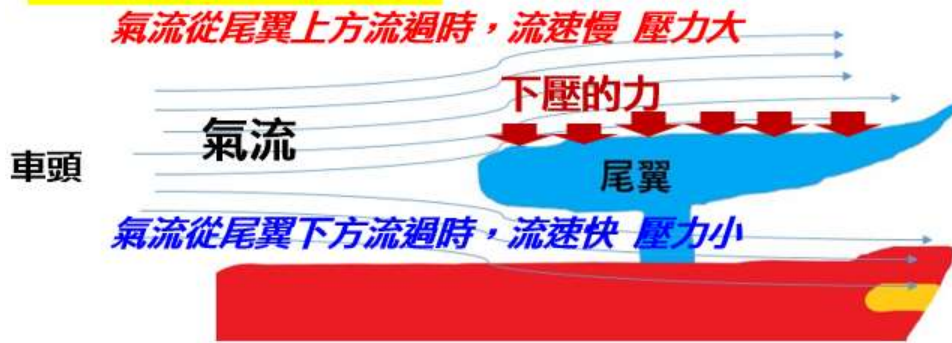


圖 5. 以「白努利定律」來解釋後尾翼上下壓力的差造成下壓的力 (自繪圖)

採取低下壓的力的前輪設定，會造成進彎時車頭不好控制而滑向外側，這個現象就是轉向不足 (understeer)(見圖 6 左)。相反來說，一旦車尾下壓的力過低時，將造成轉向過度 (oversteer) 的反應，這時車尾就會開始向外滑移 (見圖 6 右)。所以得知，下壓的力將影響過彎操控穩定度，若能提供持續下壓的力，就能贏得比賽。這是 F1 賽車的研發部門最耗費心思的部分 (參考資料 7)。

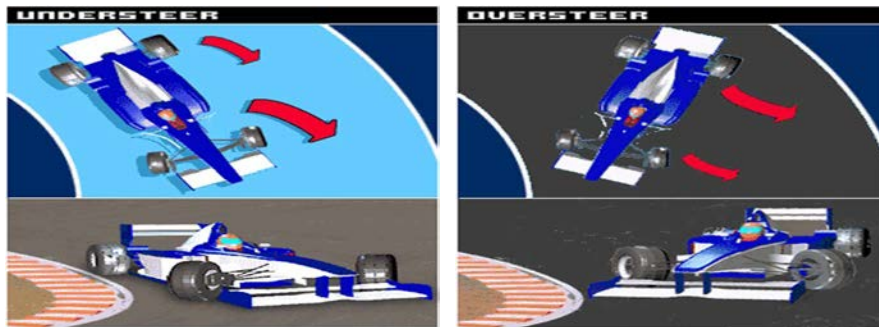


圖 6. 左圖：前輪下壓的力過低會造成轉向不足 (understeer)，車頭滑向外側；右圖：後輪下壓的力過低會造成轉向過度 (oversteer)，車尾滑向外側。

五年級自然課「力與運動」單元告訴我們：移動中物體和接觸面會互相摩擦而產生一種阻力——摩擦力，摩擦力會使物體的移動速度變慢。相同道理，空氣阻力也會使 F1 賽車速度變慢。車輛在行駛中，需要盡可能的減少阻力才能更快更省油。加裝空力套件不僅使出入彎時更加穩定，同時還能破壞前方的空氣阻力使整體速度更為提升。但是增加下壓的力同時，也會使阻力增加，找出最佳化這兩個力，就變成了設計空氣力學套件的重點。因此，我們最先採用改變「總下壓的力/阻力」比值 (定義 Downforce/ Drag) 來探討增加車子穩定度的方法。

(三) 風洞實驗 (Wind tunnel)

雖然可以使用「計算流體動力學」計算軟體（Computational Fluid Dynamics, 以下簡稱 CFD）來進行空氣力學套件的研發（圖 7），但整體來說，CFD 目前仍無法完全取代風洞測試。F1 車隊都運用數億造價的風洞實驗室，以穩定的氣流來實際測試賽車空氣力學套件的效能。因此我們也打算建立風洞箱來測試下壓的力及阻力，並試圖開發空氣力學套件，以求獲得更好的效能。

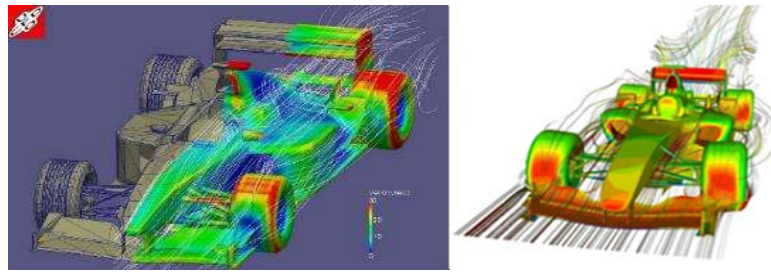


圖 7. 用「計算流體動力學」CFD 的研究來進行空氣力學套件的研發

(四) 前(鼻)翼 (Front wing)

增加下壓的力最常見的方法是改變車身的流線和前後尾翼（本研究中將驗證）。前翼主要提供前輪下壓的力，而後尾翼提供後輪下壓的力（本研究中將驗證）。F1車隊會根據每一條賽道的特性去計算及設定前後翼的角度。每一個賽季FIA都會對尾翼的大小、方向明文規定，各車隊都要為此投入巨大成本去開發新的尾翼。

前翼的主要作用之一就是產生擾流 (turbulence, 或稱渦流)。以單獨的一個翼片為例：翼片的上方為高壓氣體，下方為低壓氣體，在翼的尖端，上方的氣體會繞到下方形成螺旋狀的擾流。擾流不僅會減少氣流分離而增加下壓的力，而且會避免輪胎產生的亂流 (dirty flow) 影響後部氣流的控制（圖8）。前翼受損除了直接影響速度外，最重要的就是過彎失去了平衡的抓地力，車子就失控了（參考資料7）。但車隊都備有前翼，可進維修站更換，所以前翼不是我們的研究重點。

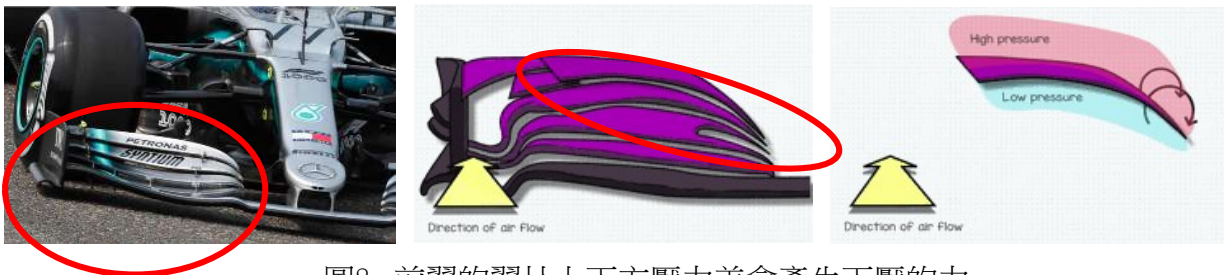


圖8. 前翼的翼片上下方壓力差會產生下壓的力

(五) 後尾翼 (Rear wing)

有兩種方法增加後尾翼下壓的力，一是增大尾翼攻角（迎風角，angle of attack）；另一則是增加尾翼的左右寬度（wingspan）。科學家們必須使氣流貼著翼面流動。如果氣流分離了翼面造成分流，產生的下壓的力會減少，阻力也會明顯增加，將會產生失速現象（stall）（見圖9）（參考資料8）。值得注意的是後尾翼受損將導致直接退賽，所以我們更想將研究重點放在後尾翼。

尾翼有兩片組成，水平的翼片是主翼，傾斜帶有攻角的翼片是副翼。對大多數賽道而言，車隊會把副翼的攻角儘可能調成與水平成70-80度大角度（參考資料9），使得氣流沿著尾翼而向上升，造成「上洗效應」。而在高速直道上才會把攻角調小，開啟DRS (Drag Reduction System, 降低阻力系統)，減少上洗效應而降低下壓的力，降低阻力來超車（圖10）（參考資料10）。可見不同角度尾翼造成下壓的力的重要性，這引起我們想比較不同主翼與副翼角度所造成的下壓的力，找出最佳穩定度的尾翼。



圖9. 左圖為氣流分離了翼面造成分流，下壓的力減少；中圖為車子失速現象，騰空飛起；右圖為上下兩片尾翼，前下為主翼，後上為副翼。

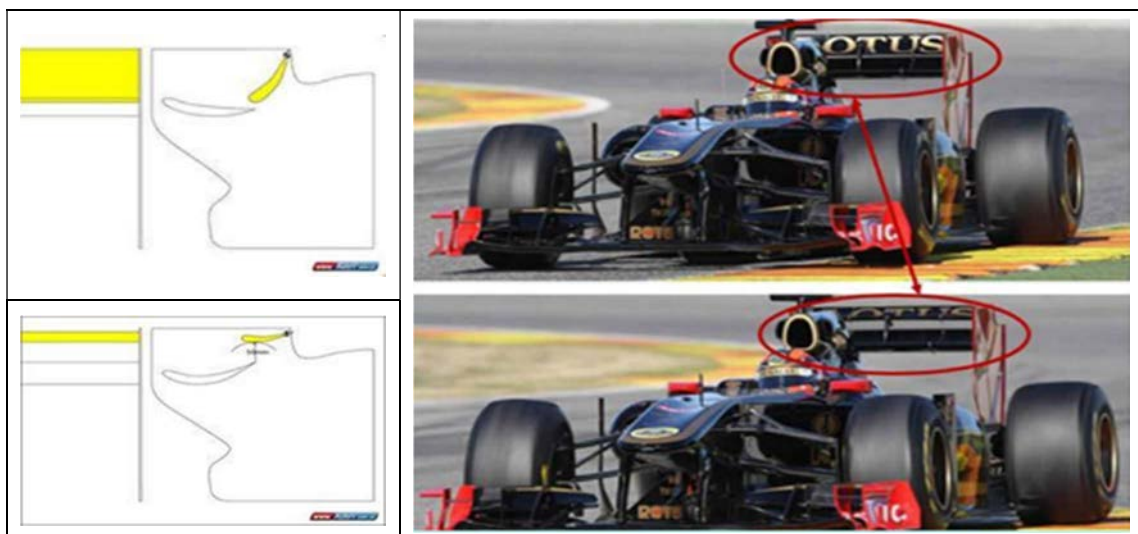


圖10. 上圖：DRS關閉；下圖：DRS開啟。

貳、研究設備及器材

一、實驗工具

			
棉手套	鋸子、鋸片	美工刀	剪刀
			
螺絲起子	鉛筆、簽字筆	水平尺	捲尺
			
鐵鎚	木蓋板	角木(墊高拉力計)	

圖 11. 實驗工具

二、實驗耗材









			
廢棄拆除裝潢木料	巴沙木(飛機木)	免洗筷	吸管(整流用)
			
鐵釘(固定用)	膠帶	耳塞(保護耳朵)	保利龍膠

圖 12. 實驗耗材

三、實驗儀器

			
電子秤 2 個	電子拉力計	風速計	12V 抽風扇
			
發煙機(具 LED 燈)	掃葉機含管	掃葉機去管	傳統拉力計
			
3D 設計軟體 TinkerCAD	3D 列印機 CR2020	1:16 遙控車 (Nissan GTR) W30*D11.5*H8 (cm)	1:16 組裝模型遙控車 (F1 Ferrari SF21) W35*D13*H7 (cm)

圖 13. 實驗儀器

四、實驗設備製作

(一) 風洞箱製作

			
拾得廢棄拆除裝潢格柵木料	用鋸子鋸取所需長度	用砂紙磨邊角	用鐵鎚和釘子固定骨架

			
釘成風洞箱基本骨架	加上底板並固定	剪吸管成 3.5cm 長度	用保利龍膠黏好吸管
			
吸管黏成氣流整流牆 W30*H12(cm)	用雙面膠帶將四面透明片固定 W94*D33*H35(cm)	放入車子、電子秤、拉力計、右側掃葉機、左側 12V 抽風風扇，蓋上木板	試放 F1 Ferrari SF 21，確認車長可置入。後方深色衣服背景，右方 LED 燈與發煙機便於攝影氣流

圖 14. 風洞箱製作過程

(二) 尾翼製作

			
用直尺測塑膠尾翼尺寸	將巴沙木(飛機木)畫好長度用美工刀割取	用保麗龍膠固定做尾翼	割取竹筴成小圓柱，固定尾翼用
			
黏成尾翼 單層: 11.5*2.6 cm 雙層: 11.5*1.3 cm*2 片 三層: 11.5*1.3 cm*3 片	將尾翼用螺絲固定在車上	完成各種角度尾翼製作	完成自製尾翼固定於車身

圖 15. 尾翼製作過程

(三) 自行設計製作的尾翼

			
1. 單層大平 0°	2. 單層大斜 45°	3. 單層垂直 90°	4. 雙層主翼 0°- 副翼 0°
			
5. 雙層主翼 0°- 副翼 45°	6. 雙層主翼 0°- 副翼 90°	7. 雙層主翼 45°- 副翼 0°	8. 雙層主翼 45°- 副翼 45°
			
9. 雙層主翼 45°- 副翼 90°	10. 雙層主翼 90°- 副翼 0°	11. 雙層主翼 90°- 副翼 45°	12. 雙層主翼 90°- 副翼 90°
			
13. 三層 0°- 0°- 0°	14. 雙層主翼 0°- 副翼 60°	15. 雙層主翼 0°- 副翼 70°	16. 雙層主翼 0°- 副翼 75°
	共計 17 組，含單層 3 組; 雙層 13 組; 三層 1 組		
17. 雙層主翼 0°- 副翼 80°			

圖 16. 自行設計製作的 17 組尾翼

參、研究方法與步驟

預試驗一、風力種類選擇

操作變因：不同風力種類

控制變因：相同風速計、相同距離、相同環境

分別以家用電扇、頭髮吹風機、掃葉機、掃葉機去管的不同段速為風力來源，測試 Nissan GTR 車頭與風力來源不同距離 10-50cm 風速大小 (km/h) (圖 17)。風力各有 1 段、2 段、3 段，其中 3 段為風力最大。本研究全部數據重複至少 3 次以上取平均值。

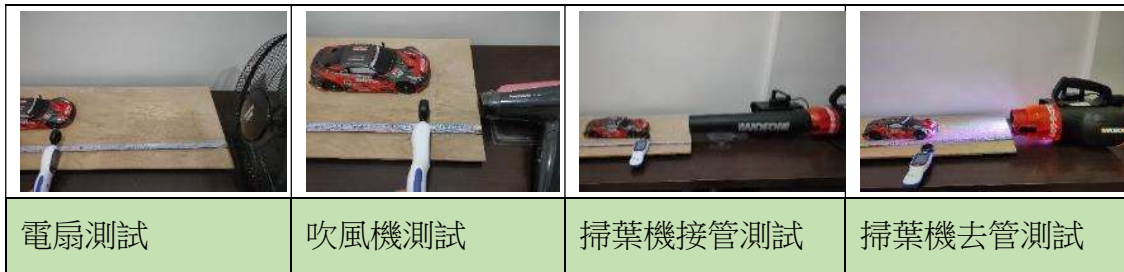


圖 17. 以電扇、吹風機、掃葉機測試車頭風速大小。

預試驗二、實驗環境的預測試

操作變因：有無開啟掃葉機

控制變因：掃葉機去管、距離 30cm、2 段風力

室內測試避免風的干擾。掃葉機去管，距離 30cm，開啟 2 段風力，Nissan GTR 車子沒有裝前翼或後尾翼，同時測試前後輪下壓的力變化，以開啟掃葉機測得重量減去開啟前重量可得下壓的力變化量 (downforce) 數值，單位為克重 (gw)；同時以傳統拉力計歸零，開啟掃葉機測得傳統拉力計克重 (gw) 為阻力變化量 (drag) 數值 (圖 18)。

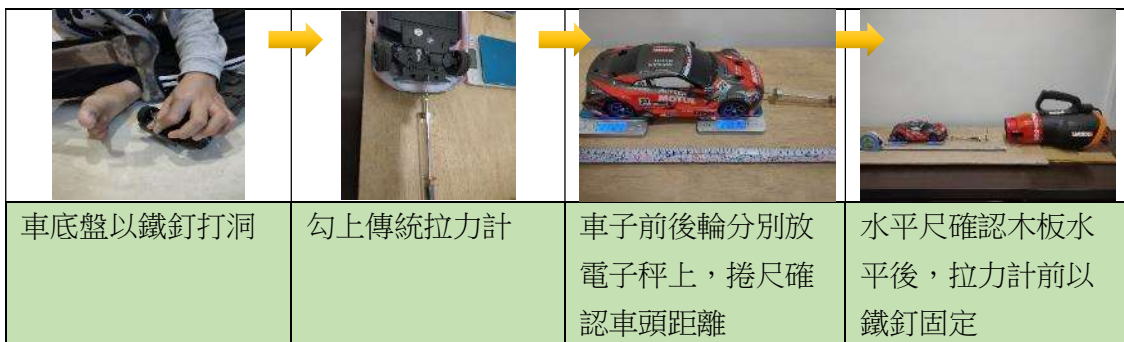


圖 18. 以傳統拉力計測試下壓的力及阻力大小。

實驗一、建立風洞模型並觀察車子的氣體流動變化

依圖 14 過程，完成風洞箱製作。車子放在水平木板或在風洞箱內，配上發煙機產生的煙霧，觀察掃葉機吹出氣流，找出搭配較明顯的 LED 光源 RGB 顏色 (紅、綠、藍、白)，攝影紀錄氣體流動方式，並取得相片。

實驗二、觀察測試風速與下壓的力及阻力的關係

操作變因：有無開啟掃葉機

控制變因：掃葉機去管、距離 30cm、2 段風力、風洞箱內

以下實驗車子都在風洞箱內（圖 19），步驟如下：

- (一) 風洞箱右側置放掃葉機去管（或接管），以捲尺確認距離車頭 30cm，水平尺確認水平。
 - (二) 風洞箱左側置放 12V 抽風扇。
 - (三) 風洞箱內置放車子，前後輪下方各有一個電子秤，讀取前後秤克重（gw）。
 - (四) 車身後方接觸電子數位顯示型拉力計的頂針，拉力計歸零，蓋上木板。
 - (五) 開抽風扇、開掃葉機 2 段風力，讀取前後秤（下壓的力）及拉力計（阻力）克重（gw）。
- 模擬車速越高，風力越大的觀念，測試不同風力大小對下壓的力及阻力造成的影響。



圖 19. 風洞箱內測試下壓的力及阻力變化的配置。

實驗三、探討市售遙控車原有空力套件組合的下壓的力及阻力變化

操作變因：裝上不同空氣力學套件

控制變因：掃葉機去管、距離 30cm、2 段風力、風洞箱內

風洞箱內，掃葉機去管，距離 30cm，開啟 2 段風力。分別裝上 Nissan GTR 遙控車套裝原有塑膠前翼、小尾翼、大尾翼、前翼+大尾翼，測試下壓的力及阻力變化（圖 21）。



圖 20. 裝上 Nissan GTR 遙控車原有塑膠空力套件，測試下壓的力及阻力變化。

實驗四、比較自製空力套件的下壓的力及阻力變化，找出最佳尾翼

操作變因：不同自製尾翼

控制變因：掃葉機去管、距離 30cm、2 段風力、風洞箱內

分別裝上以巴沙木自製單層、雙層、三層尾翼：單層 0°、單層 45°、單層 90°、雙層 0°-0°、雙層 0°-45°、雙層 0°-90°、雙層 45°-0°、雙層 45°-45°、雙層 45°-90°、雙層 90°-0°、雙層 90°-45°、雙層 90°-90°、三層 0°-0°-0°、雙層 0°-60°、雙層 0°-70°、雙層 0°-75°、雙層 0°-80° 共 17 組尾翼，測試下壓的力及阻力變化情形 (圖 21)。

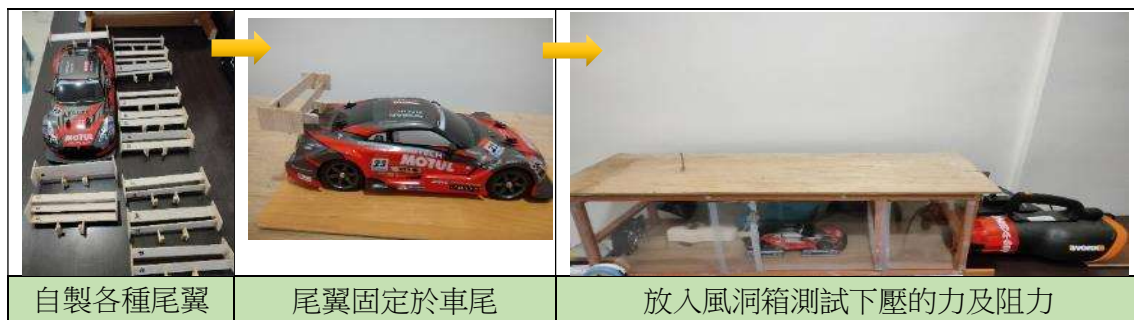


圖 21. 裝上自製單層、雙層、三層各組尾翼，測試下壓的力及阻力變化。

實驗五、探討 F1 車型的下壓的力及阻力變化

操作變因：F1 車型

控制變因：掃葉機去管、距離 30cm、2 段風力、風洞箱內

以上實驗都是市售遙控車 Nissan GTR 的數據，進一步為了解更具空氣力學特性的 F1 賽車差異，我們新購 F1 Ferrari SF21 組裝模型遙控車。剪下各部零件、組裝車體、裝上馬達、貼上車身貼紙、裝車身電池與遙控器電池，完成 F1 車型組裝。觀察 F1 賽車在風洞箱內氣流流動情形，也測試下壓的力及阻力變化，計算是否與 Nissan GTR 車型有相類似結果 (圖 22)。



圖 22. 觀察 F1 車型的氣流與測試下壓的力及阻力變化。

實驗六、驗證裝有自製尾翼車子的車速與下壓的力關係

操作變因：不同自製尾翼

控制變因：相同場地、相同車子、相同操作者、相同距離

模擬賽道路面為柏油材質，我們選取設鋪設柏油路面的停車場地，實地測試車速（圖

23），步驟如下：

(一) 以捲尺量測 15 公尺直道距離。

(二) 將車子更換各組尾翼。

(三) 待無風時，以遙控器操縱車子全力衝刺，計時完成 15 公尺衝過終點線之秒數。

依自然課本所學，相同 15 公尺距離情形下，完成秒數越少表示車速越快。



圖 23. 選取停車場地，實地測試遙控車完成 15 公尺秒數。

肆、研究結果

預試驗一、風力種類選擇測試結果

由圖 24 可知，除家用電扇外，其他風力段速越高，造成的風速越快；車頭距離風力來源越遠的風速越弱。掃葉機接管造成風速較大，其次為掃葉機去管（表 1）（圖 24）。

表 1. 不同風力種類與段速所造成不同距離之風速 (Km/h)

風力種類	風力強弱	距離 10cm	距離 20cm	距離 30cm	距離 40cm	距離 50cm
電扇	1 段	9.0	8.5	8.3	8.2	8.0
	2 段	9.4	10.5	10.0	9.6	9.8
	3 段	11.5	11.1	11.5	10.8	10.8
吹風機	1 段	25.0	19.4	17.0	13.0	14.0
	2 段	29.7	20.7	16.0	13.8	11.4
	3 段	42.5	24.8	24.2	20.1	18.7
掃葉機接管	1 段	72.0	76.3	69.4	67.9	56.2
	2 段	117.1	117.8	105.5	106.4	74.2
	3 段	139.6	136.0	131.2	129.2	93.3
掃葉機去管	1 段	56.2	46.0	53.1	56.4	51.6
	2 段	74.2	69.0	71.8	83.1	81.8
	3 段	93.3	88.0	89.1	99.2	96.0

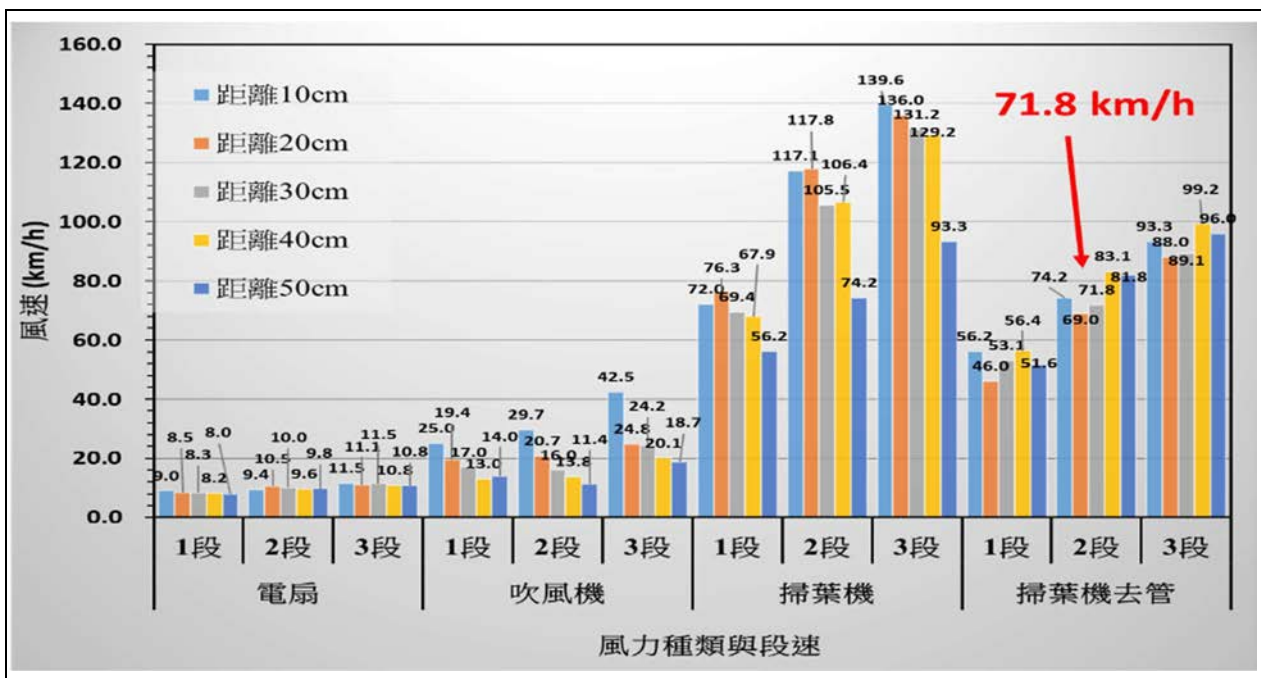


圖 24.不同風力種類與段速所產生不同距離之風速 (Km/h)

掃葉機接管風力較集中，3 段風力造成風速最強。掃葉機去管造成風場範圍較大，即使距離遠仍有相近風力，跟真實賽車場上有其他車子氣流干擾狀況較相似。而 3 段風力過強，尾翼會吹歪，風力計讀數不穩定。考量空氣力學套件影響在高速下較易顯現，故選用「掃葉機去管，2 段風力，距離 30cm」的控制變因當成後續實驗的風力來源。

預試驗二、實驗環境的預測試測試結果

車子在沒有裝空力套件情況下，測三次取平均結果，得到下壓的力減少，阻力增加(表 2)。表示空力套件確實能幫助增加下壓的力。開啟風力，代表車子高速下，產生阻力。

表 2.以傳統拉力計測下壓的力變化量及阻力變化量

實驗次數	後輪前測 (gw)	後輪後測 (gw)	前輪前測 (gw)	前輪後測 (gw)	阻力變化量 (gw)	後輪下壓的力變化量(gw)	前輪下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)/阻力變化量(gw)
1	217.25	188.51	250.71	250.48	10	-28.74	-0.23	-28.97	-2.90
2	215.25	186.80	250.91	250.51	11	-28.45	-0.40	-28.85	-2.62
3	211.27	185.98	251.01	250.80	11	-25.29	-0.21	-25.50	-2.32
平均	214.59	187.10	250.88	250.60	10.67	-27.49	-0.28	-27.77	-2.60

傳統刻度型拉力計的刻度最大只有 250gw，每一刻度 10gw，判讀誤差過大，因此後續實驗改用電子數字型拉力計。水平木板環境下，氣流變化過大，電子秤數值不易穩定，讀取數值困難。因此開始建立上述風洞箱模型，放入電子秤進行後續實驗。

實驗一、建立風洞模型並觀察車子的氣體流動變化

由圖 25 可見，賽車氣流流經車頭後分為上下方的層流 (Laminar flow) 與車後方的擾流 (Turbulent flow)，實際測試觀察發現：以 2 段風力在水平木板吹風後，氣流易散去，不利觀察 (圖 25-2;25-8; 25-9)。車子在風洞箱內以綠光及白光較易看出氣流 (圖 25-10;25-11)；白光下明顯看出車子上方片狀氣體層流，尾翼後方有擾流 (渦流) (圖 25-12)。證實本風洞模型與車隊用風洞設備之氣流走向相似，實驗數據效率高。



圖 25-1. 賽車的氣流變化示意圖

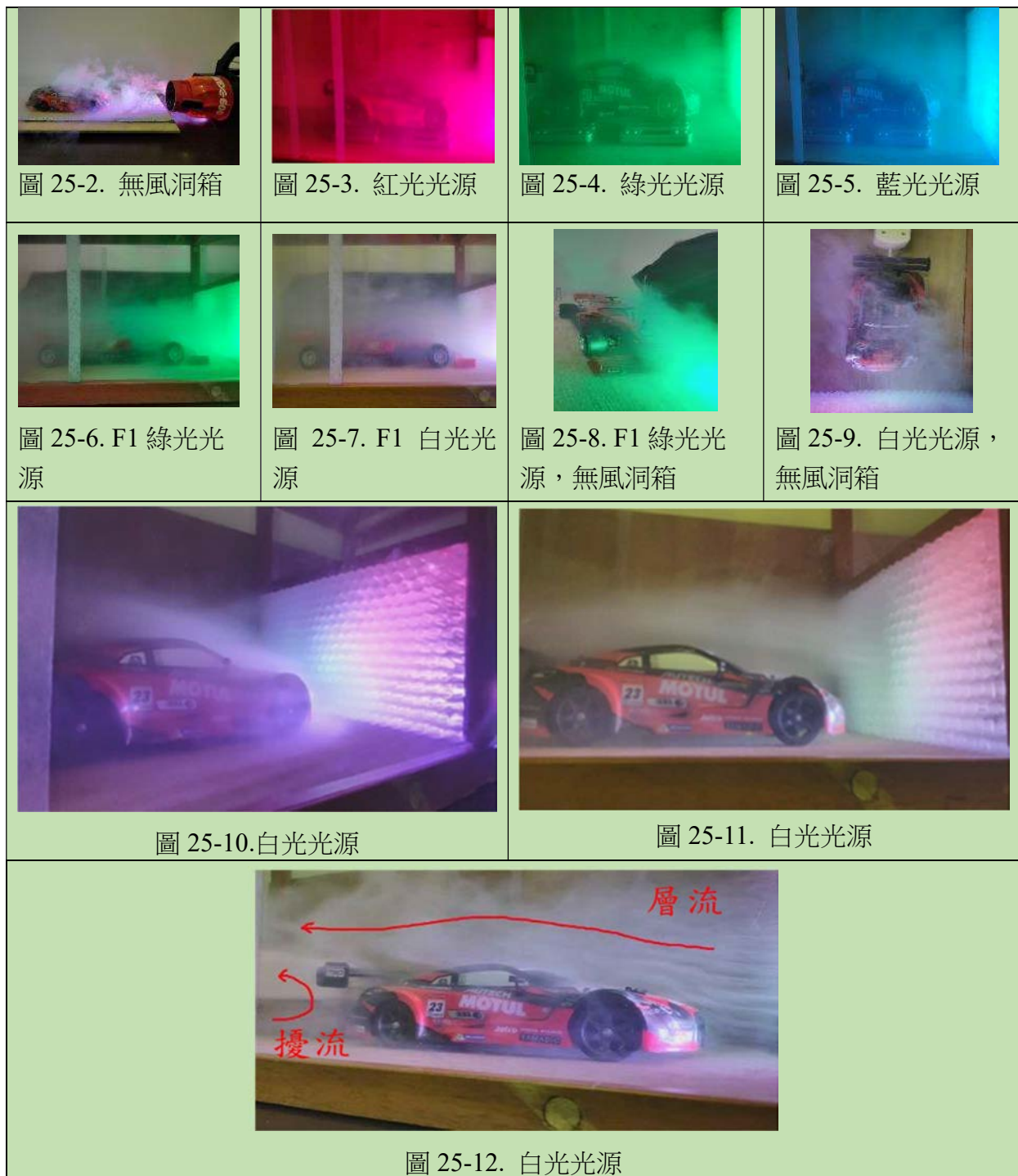


圖 25. 不同顏色 LED 光源下觀察賽車的氣流變化

實驗二、觀察測試風速與下壓的力及阻力的關係測試結果

由圖 26 可知，風力增加，確認風速有增加 (圖 26-1，圖 26-2)，前輪下壓的力加上後輪下壓的力之總下壓的力也增加 (圖 26-3，圖 26-4 黃線)；阻力 (淺藍線)也同時增加，增幅更大。去管情況較接管變化穩定，因此後面實驗設定掃葉機去管為風力來源較正確 (表 3)(圖 26)。

表 3.去管風力與接管風力造成下壓的力及阻力變化量

風力強弱	阻力 (gw)	後輪下壓的力變化量 (gw)	前輪下壓的力變化量 (gw)	總下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)/阻力變化量(gw)	風速 (Km/h)
去管 1 段	46.94	26.24	-6.55	19.69	0.42	49.10
去管 2 段	90.82	50.23	-6.50	43.74	0.48	73.10
去管 3 段	128.91	62.60	4.16	66.76	0.52	93.67
接管 1 段	53.74	24.24	5.22	29.45	0.55	66.83
接管 2 段	154.76	41.22	10.27	51.49	0.33	99.53
接管 3 段	222.70	63.22	35.43	98.65	0.44	115.70

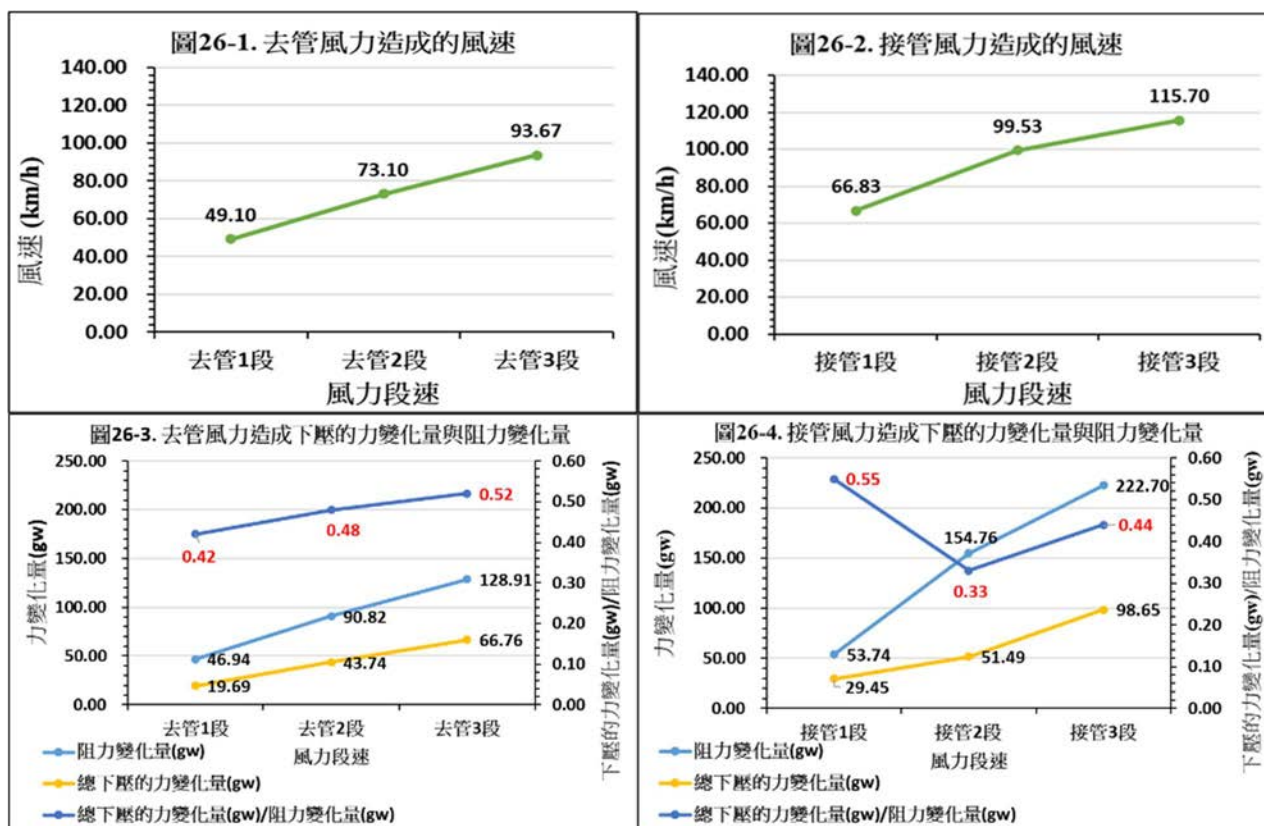


圖 26.去管風力與接管風力造成的風速 (圖 26-1, 26-2)下壓的力及阻力變化量 (圖 26-3, 26-4)。

由圖 26-4 可見，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值在掃葉機接管風力 2 段情形下比起風力 1 段反而降低，乃因總下壓的力變化量雖增加，但阻力變化量增加更多，使比值下降。所以比較比值較能看出對車子穩定度影響。

實驗三、探討市售遙控車原有空力套件組合的下壓的力及阻力變化測試結果

1. 前述表 2 沒有尾翼情形下，總下壓的力都是負數，表示車子有受到上升力 (Lift)。

2. 由圖 27-1 可見，車子加裝流線殼使總下壓的力增加（但仍為負數），阻力稍微增加，表示市售房車車身流線可降低上升力，高速時操控較穩定。

表 4. 市售遙控車原有空力套件組合的下壓的力及阻力變化量

空力套件	阻力變化量(gw)	後輪下壓的力變化量(gw)	前輪下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量/阻力變化量(gw)	後輪下壓的力變化量%	前輪下壓的力變化量%	車速測秒(秒)
(1)車去殼	78.91	-21.65	-29.5	-51.16	-0.65	-10.44	-15.26	4.01
(2)車+殼	90.14	-24.39	0.44	-23.95	-0.27	-11.05	0.21	4.13
(3)車+殼+前翼	56.80	-27.65	9.32	-18.33	-0.32	-12.24	4.32	3.92
(4)車+殼+小塑膠尾翼	66.67	57.81	-23.06	34.75	0.52	24.81	-11.05	4.19
(5)車+殼+大塑膠尾翼	82.31	76.21	-24.81	51.40	0.62	31.99	-12.02	4.00
(6)車+殼+前翼+大塑膠尾翼	58.50	81.63	-21.24	60.39	1.03	34.26	-10.00	4.09

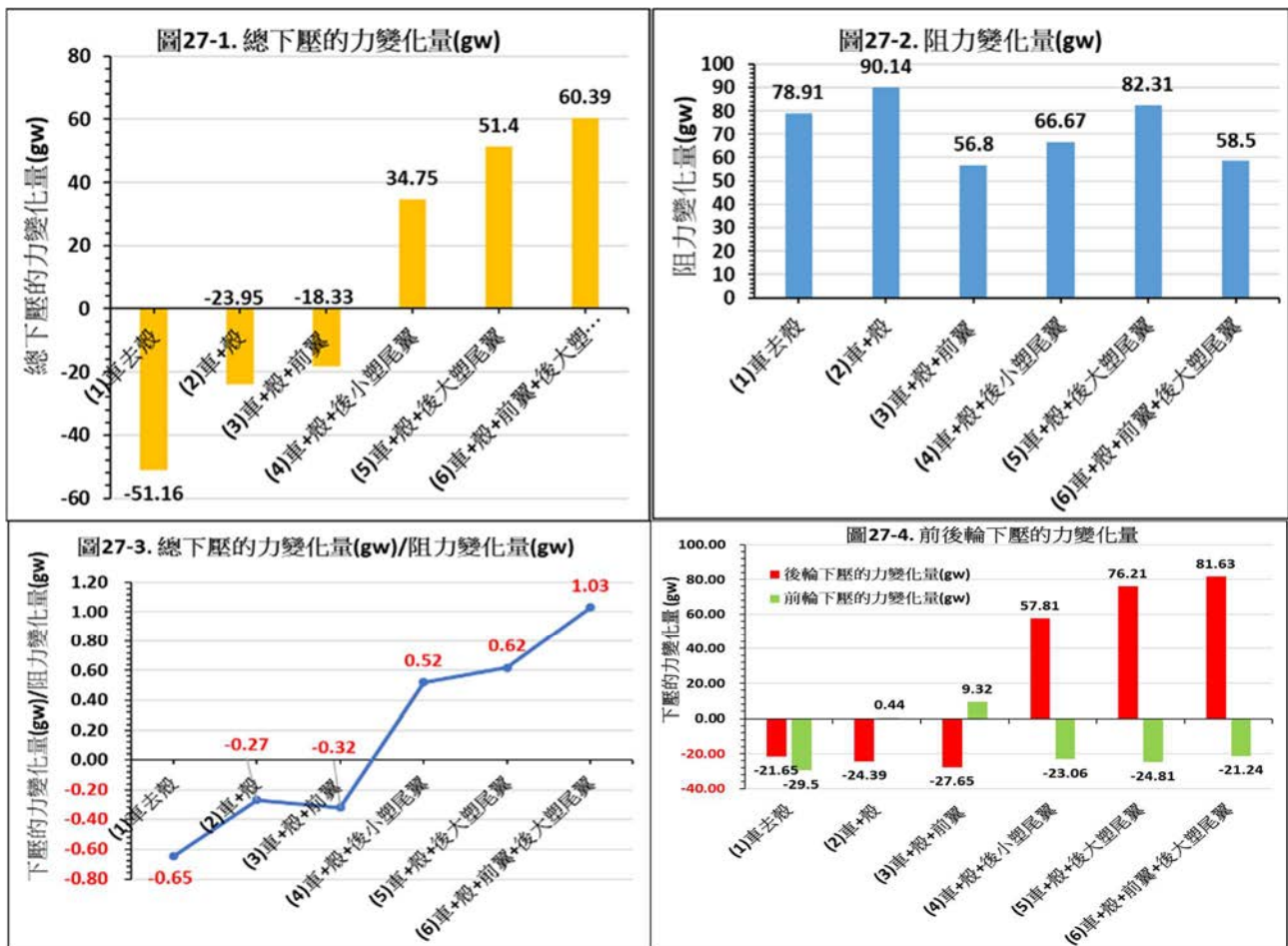


圖 27. 市售遙控車原有空力套件組合的下壓的力變化量(圖 27-1)，阻力變化量(圖 27-2)，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值(圖 27-3)，前後輪下壓的力變化量(圖 27-4)。

- 由圖 27-4 知，前翼增加前輪下壓的力 (為正數)有利於操控，對後輪下壓的力改變不大，但可降低阻力，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值不變。
- 隨車子加上小尾翼、大尾翼、前翼+大尾翼，總下壓的力明顯增加，其中前輪下壓的力不變 (仍為負數)，後輪下壓的力明顯增加 (圖 27-4)。表示尾翼主要是影響後輪下壓的力作用，大小尾翼後半部都有向上翹起的攻角 (F1 Ferrari SF21 攻角度更大)，可將氣流導引向上，使空氣產生反作用力，將車子壓在地面。差異在於大尾翼左右寬度(11.5cm)較小(9cm)寬，影響氣流範圍較多；大尾翼高低雙層，兩窄片加總前後寬度(1.3+1.3cm)等於小尾翼寬度(2.6cm)。大尾翼特殊設計造成後輪下壓的力較小尾翼大，若再加上前翼，則增加總下壓的力更大，加前翼雖對前輪下壓的力作用不大，但卻有效降低阻力 (圖 27-2)，因此「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值增加很多(圖 27-3)。
- 大尾翼特殊設計對下壓的力增加最大，引發我們自行設計尾翼來測試。控制一樣大小 11.5cm*1.3cm 條件下，改變兩層尾翼的角度的組合來測試可否找到更大增加下壓的力並且減少阻力的尾翼套件；另外也想比較單層、雙層、三層尾翼是否有不同影響？

實驗四、比較自製空力套件的下壓的力及阻力變化，找出最佳尾翼測試結果

表 5. 自製不同層數尾翼的下壓的力及阻力變化

水平尾翼	阻力 (g)	後輪下 壓力(g)	前輪下 壓力 (g)	總下壓 力(g)	總下壓力 (g)/阻力(g)	後輪下 壓力%	前輪下 壓力%	車速 測秒 (秒)
(1)單層 0°	63.27	-25.16	9.27	-15.89	-0.25	-10.78	4.35	4.12
(4)雙層:主翼 0°- 副翼 0°	63.61	-26.18	4.29	-21.89	-0.34	-11.34	1.99	4.10
(14)三層 0°- 0°- 0°	92.86	13.82	-1.42	12.40	0.13	6.03	-0.65	3.92

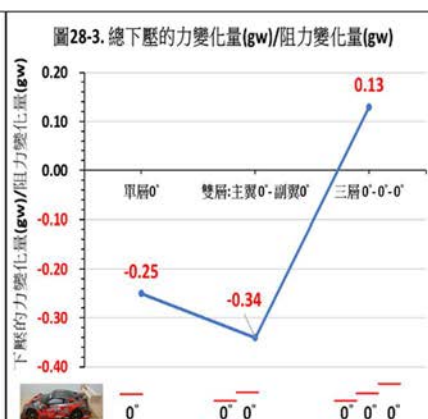
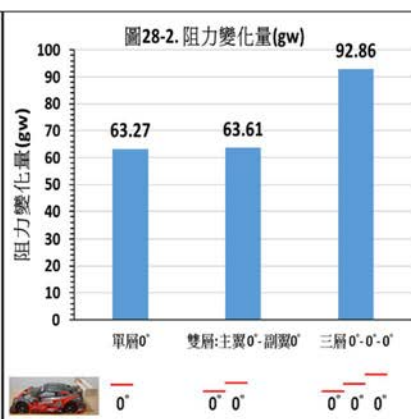
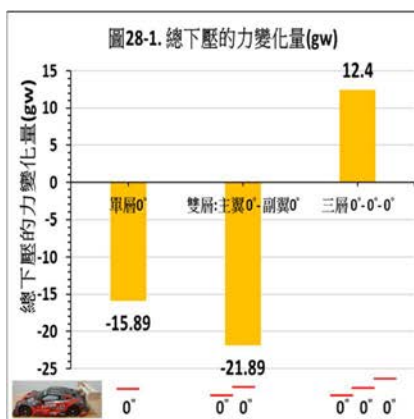


圖 28. 自製不同層數尾翼的下壓的力變化量(圖 28-1)，阻力變化量(圖 28-2)，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值(圖 28-3)。

1. 由圖 28 可見，尾翼都是 0°情形下，單層與雙層尾翼的總下壓的力都負數 (為上升力)，0°三層尾翼才有下壓的力。雖然三層尾翼阻力也最大，但「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值最大，最有利車子穩定度 (表 5)(圖 28)。不過，水平尾翼穩定度不大。

表 6. 自製不同角度單層尾翼的下壓的力及阻力變化

單層尾翼	阻力變化量(gw)	後輪下壓的力變化量(gw)	前輪下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)/阻力變化量(gw)	後輪下壓的力變化量%	前輪下壓的力變化量%	車速測秒(秒)
(1)單層 0°	63.27	-25.16	9.27	-15.89	-0.25	-10.78	4.35	4.12
(2)單層 45°	147.62	65.78	-11.17	54.61	0.37	28.79	-5.15	4.09
(3)單層 90°	125.85	72.18	-43.20	29.98	0.23	31.32	-19.89	4.18

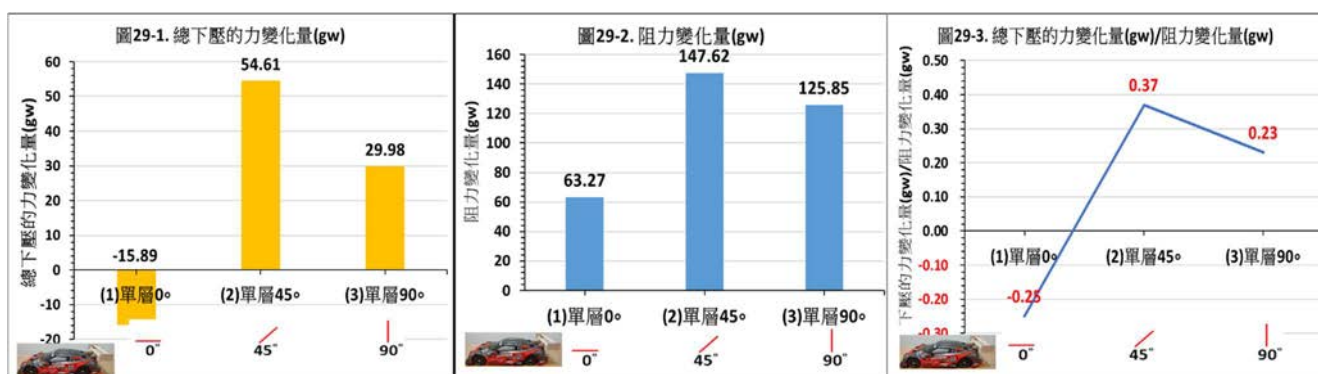


圖 29. 自製不同角度單層尾翼的下壓的力變化量(圖 29-1)，阻力變化量(圖 29-2)，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值(圖 29-3)。

2. 由圖 29 可知，都單層情形下，45°較 0°單層尾翼總下壓的力增加很多，但到了 90°卻減少。後輪下壓的力及阻力也有類似情形，前輪下壓的力在 90°更明顯呈現大上升力的趨勢。「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值則因總下壓的力增加，阻力減少，90°較 45°尾翼比值減少。似乎後尾翼角度越大，有利於車子穩定度，但增加到某個角度又會降低穩定度 (表 6) (圖 29)。
3. 由下頁圖 30 可知，都是雙層尾翼情形下，不管改變前主翼或後副翼角度，都與單層尾翼情況類似：角度越增加，總下壓的力越大，到了 90°卻又下降；角度越大阻力則越大，90°最大。值得注意的是，每 3 組一看，比較增加主翼角度 0°-0°、45°-0°、90°-0°，使阻力增加變化較大；而增加副翼角度，不管是 0°-0°、0°-45°、0°-90°或 90°-0°、90°-

45°、90°-90°，副翼角度增加使阻力增加變化較緩慢（表 7）。以求阻力增加較少情況下，似乎增加副翼角度是比增加主翼角度對車子穩定度是較好的選擇。

表 7. 自製尾翼不同角度主副翼的下壓的力及阻力變化

雙層尾翼	阻力(g)	後輪下 壓力(g)	前輪下 壓力(g)	總下壓 力(g)	總下壓力 (g)/阻力(g)	後輪下 壓力%	前輪下 壓力%	車速測 秒(秒)
(4)雙層:主翼 0°- 副翼 0°	63.61	-26.18	4.29	-21.89	-0.34	-11.34	1.99	4.10
(5)雙層:主翼 0°- 副翼 45°	70.75	74.75	-24.58	50.17	0.71	32.08	-11.50	4.25
(6)雙層:主翼 0°- 副翼 90°	81.97	38.17	-22.29	15.87	0.19	16.56	-10.34	4.05
(7)雙層:主翼 45°- 副翼 0°	140.48	26.46	3.23	26.69	0.21	11.54	1.49	3.92
(8)雙層:主翼 45°- 副翼 45°	101.70	91.76	-26.45	65.32	0.64	28.42	-12.23	4.01
(9)雙層:主翼 45°- 副翼 90°	114.97	93.60	-44.32	49.28	0.43	40.95	-20.40	4.18
(10)雙層:主翼 90°- 副翼 0°	141.50	-14.36	6.12	-8.24	-0.06	-6.27	2.82	3.91
(11)雙層:主翼 90°- 副翼 45°	145.58	48.91	-11.84	37.07	0.25	21.37	-5.43	3.82
(12)雙層:主翼 90°- 副翼 90°	171.77	54.72	-35.72	19.00	0.11	23.65	-16.42	3.87



圖 30. 自製雙層尾翼的不同角度主副翼下壓的力變化量(圖 30-1)，阻力變化量(圖 30-2)，「總

下壓的力變化量/阻力變化量」比值(圖 30-3)，前後輪下壓的力變化量(圖 31-4)。

4. 由圖 30-4 可知，總下壓的力增加主要來自後輪下壓的力增加，後輪下壓的力增加： $45^{\circ}-90^{\circ} > 45^{\circ}-45^{\circ} > 0^{\circ}-45^{\circ}$ 。
5. 由「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值來看，增加主翼角度 $0^{\circ}-0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}-0^{\circ}$ 、 $90^{\circ}-0^{\circ}$ 也是逐漸增加比值。不管增加主翼或副翼角度到 45° 都會增加比值， $0^{\circ}-45^{\circ}$ 比值最大，其次為 $45^{\circ}-45^{\circ}$ ，第三為 $45^{\circ}-90^{\circ}$ (表 7)(圖 30)。比起尾翼 $0^{\circ}-0^{\circ}$ ，改變主翼與副翼角度都對增加車子穩定度有幫助。副翼角度由 45° 至 90° 漸增，後輪下壓的力漸增，但阻力也漸增，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值到 90° 因阻力太大而下降，推測副翼最佳角度落在 $45^{\circ}-90^{\circ}$ 範圍之間。
6. 我們繼續縮小副翼範圍在 $45^{\circ}-90^{\circ}$ 之間，再進一步製作出 60° 及 75° 之間隔每 15° 副翼，因先前車隊提及可能最佳角度落在 $70^{\circ}-80^{\circ}$ 間 (但沒人證實過)！我們再加入 70° 及 80° ，總計有 $0^{\circ}-45^{\circ}$ ， $0^{\circ}-60^{\circ}$ ， $0^{\circ}-70^{\circ}$ ， $0^{\circ}-75^{\circ}$ ， $0^{\circ}-80^{\circ}$ ， $0^{\circ}-90^{\circ}$ 六組雙層尾翼，測試下壓的力及阻力變化量，並算出「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值，以求得最佳副翼角度。結果如表 8 與下頁圖 31。
7. 圖 31-2 可知，隨著副翼角度由 45° 至 90° 漸增，阻力漸減， 90° 又變大。圖 31-3 可知， $0^{\circ}-75^{\circ}$ 之「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值 0.78 為最大。因此，求得最佳雙層尾翼角度為 $0^{\circ}-75^{\circ}$ 。

表 8. 縮小角度範圍自製尾翼不同角度主副翼的下壓的力及阻力變化

雙層尾翼	阻力(g)	後輪下 壓力(g)	前輪下 壓力(g)	總下壓 力(g)	總下壓力 (g)/阻力(g)	後輪下 壓力%	前輪下 壓力%
(1)雙層:主翼 0° - 副翼 45°	77.21	30.35	0.33	30.68	0.40	13.18	0.15
(2)雙層:主翼 0° - 副翼 60°	123.47	34.25	3.22	37.47	0.30	15.19	1.47
(3)雙層:主翼 0° - 副翼 70°	86.05	30.13	-6.08	24.05	0.28	13.1	-2.81
(4)雙層:主翼 0° - 副翼 75°	38.01	38.01	-8.49	29.52	0.78	16.59	-3.91
(5)雙層:主翼 0° - 副翼 80°	20.07	20.07	-4.88	15.19	0.76	8.05	-2.24
(6)雙層:主翼 0° - 副翼 90°	125.85	23.33	2.2	25.52	0.20	9.24	1.01

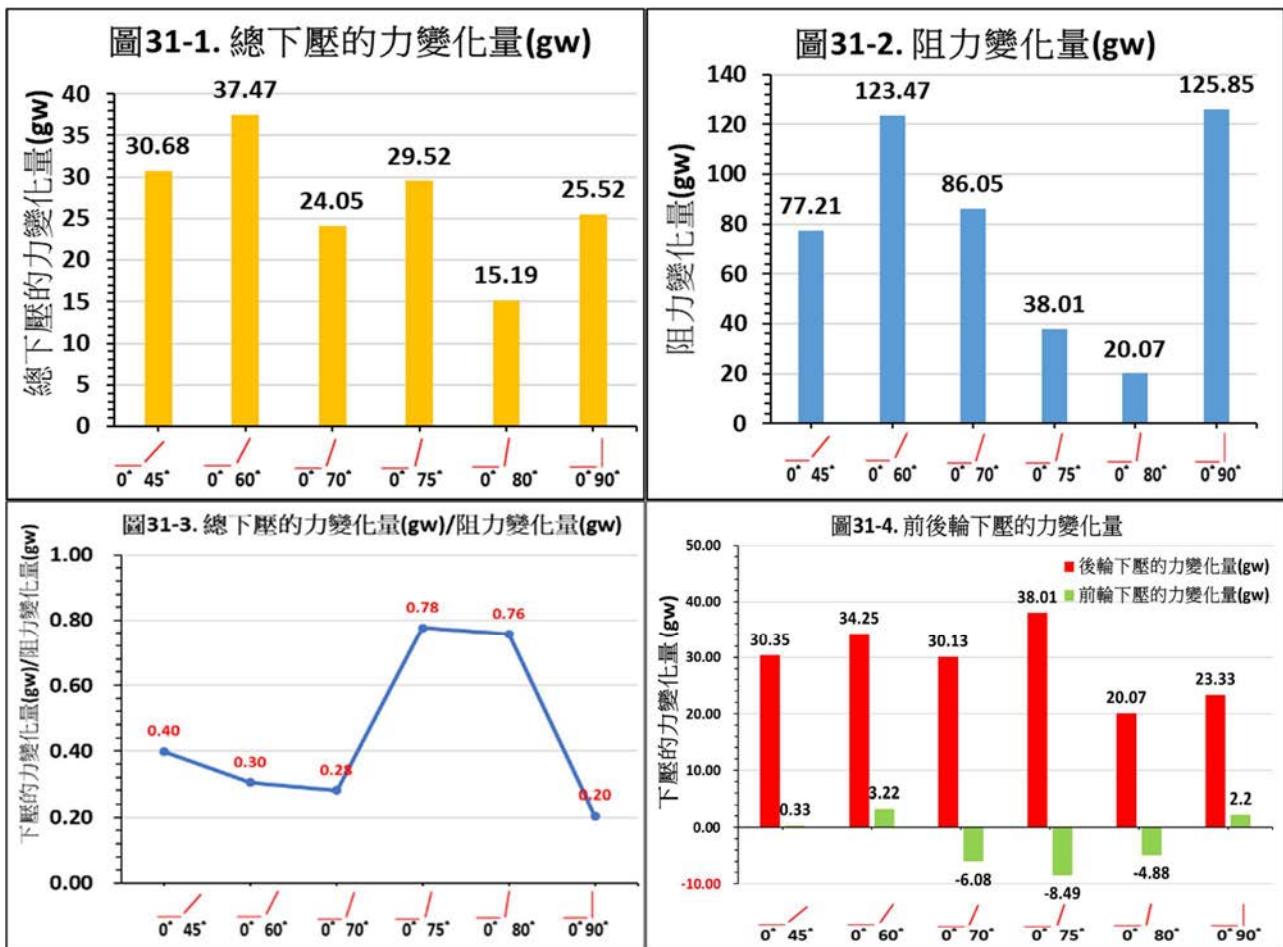


圖 31. 縮小角度範圍自製尾翼的主副翼下壓的力變化量(圖 31-1)，阻力變化量(圖 31-2)，「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值(圖 31-3)，前後輪下壓的力變化量(圖 31-4)。

實驗五、探討 F1 車型的下壓的力及阻力變化測試結果

表 9. 去管風力與接管風力造成 F1 Ferrari SF21 下壓的力及阻力變化

風力強弱	阻力變化量(gw)	後輪下壓的力變化量(gw)	前輪下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)	總下壓的力變化量(gw)/阻力變化量(gw)
去管 1 段	53.4	9.27	0.08	9.35	0.18
去管 2 段	148.64	21.62	1.37	22.99	0.15
去管 3 段	188.78	50.86	-8.89	41.98	0.22
接管 1 段	62.76	25.47	2.54	28.01	0.45
接管 2 段	200.68	50.84	14.54	65.38	0.33
接管 3 段	240.82	64.57	-1.18	63.38	0.26

F1 賽車總下壓的力 (下頁圖 32 黃色線)隨風力增強而增加；同時阻力 (圖 32 淺藍色線)也增加，增幅更大。與 GTR 情形相同，去管情況較接管變化穩定，驗證了 F1 賽車也

與房車有類似的車速越快，總下壓的力增強，阻力也增加 (表 9)(圖 32-1, 32-2)。

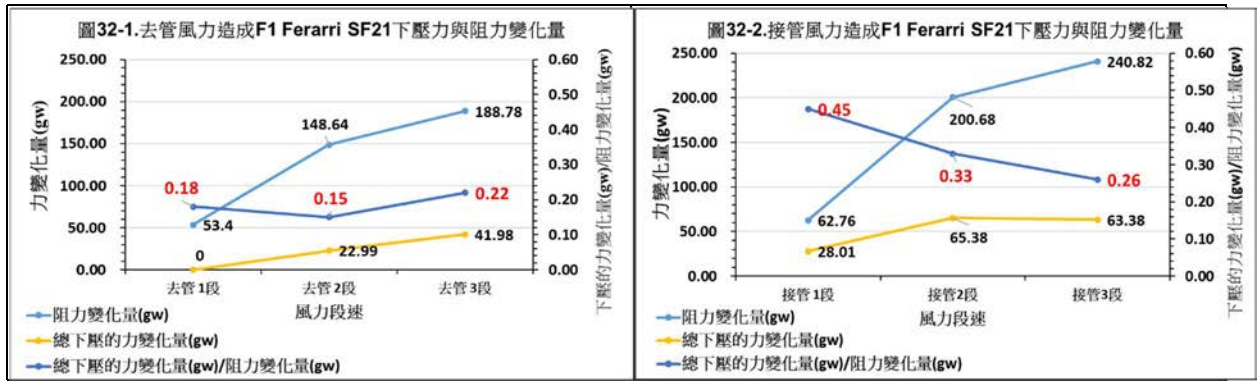


圖 32. 去管風力 (圖 32-1)與接管風力 (圖 32-2)造成 F1 Ferrari SF21 下壓的力及阻力變化。

由於 F1 Ferrari SF21 模型車體結構不易拆解尾翼，無法以適合的自製巴沙木尾翼固定，故未能重複與 GTR 一樣的自製尾翼改變下壓的力及阻力的實驗。

實驗六、驗證裝有自製尾翼車子的車速與下壓的力關係

1. 由表 4 車速可知，加上原有大尾翼 (4.0 秒)比沒空力套件的車速 (4.13 秒)稍快。
2. 由表 5 車速可知，加上自製三層尾翼 (3.92 秒)比單層尾翼的車速 (4.12 秒)稍快。
3. 由表 6 車速可知，加上單層 45°尾翼 (4.09 秒)比單層 0°尾翼的車速 (4.12 秒)稍快，但單層 90°尾翼(4.18 秒) 又變慢，與總下壓的力/阻力比值情形相似。
4. 空力套件需在高速下才能顯現效應，本實驗直線距離 15 公尺太短，秒數只約 4 秒左右，時間太短不易操作至最高速度；操作增加尾翼角度本想在操場跑道的彎道或模擬 F1 賽道單圈計時 (lap time) 概念測試，才能顯現增加車子穩定度，而增加車速。但考量遙控器操控精準度受限，無法實測彎道過彎車速。

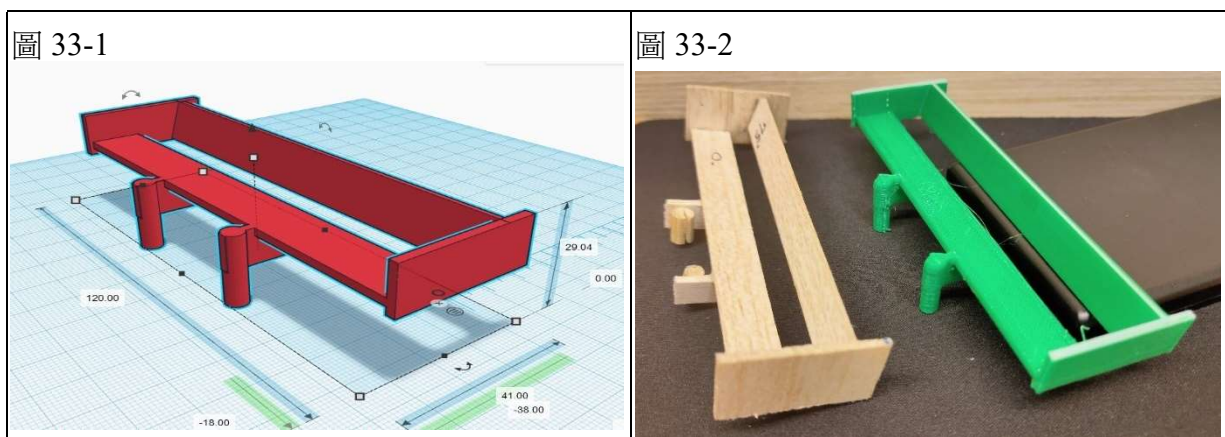


圖 33. TinkerCAD 3D 設計畫(圖 33-1)與 3D 列印製作出 0°-75°之最佳尾翼 (圖 33-2 右)。

※綜上所述：

- (1) 最佳雙層尾翼角度為 0° - 75° 。因此，我們以 TinkerCAD 3D 設計軟體畫出角度為 0° - 75° 雙層尾翼(圖 33-1)，並以 3D 列印機 (CR2020) 製作出 0° - 75° 之最佳尾翼 (圖 33-2)。
- (2) 將最佳雙層 0° - 75° 尾翼測得之下壓的力 (gw) 與阻力 (gw) 分別與風速平方 (km/h)²，用 Excel 軟體計算迴歸曲線分析，測得相關係數分別為 0.8313 與 0.9383 (圖 34)。

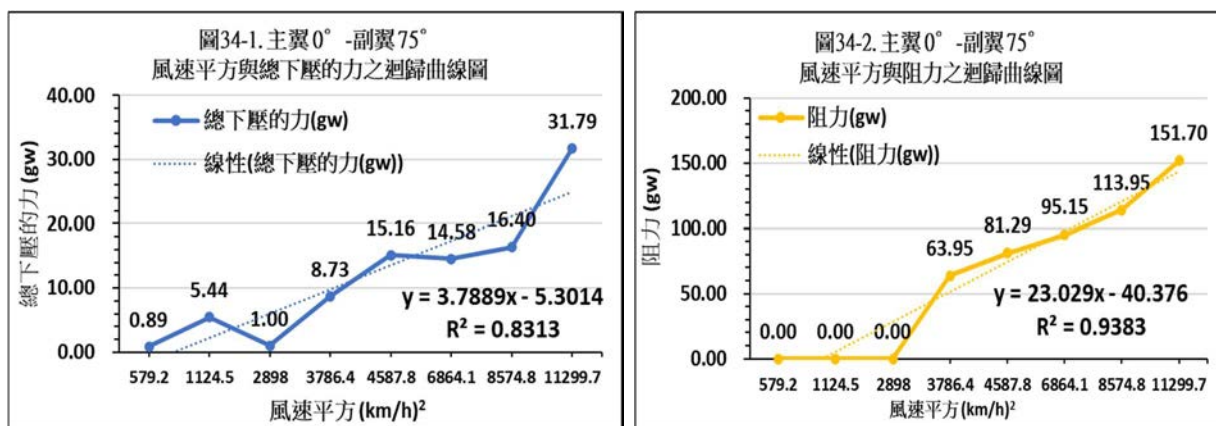


圖 34. 風速平方與下壓的力迴歸曲線分析 (圖 34-1) 及阻力迴歸曲線分析 (圖 34-2)

伍、討論

國內探討汽車空氣力學套件對賽車下壓的力影響研究很少見，我們是最先以自製尾翼角度變化，探討增加下壓的力方法，並以 3D 列印製作出最佳角度尾翼。具體貢獻如下：

一、風洞實驗的重要性

實驗不在風洞箱內測試時，氣流干擾嚴重，電子秤讀數無法穩定，無法呈現空氣力學套件造成下壓的力的效果。而風洞箱若未經吸管整流，仍有不穩定擾流產生。因此具備整流效果的風洞箱才能穩定測得下壓的力，決定空力套件對過彎穩定度的影響。難怪 F1 車隊都不惜投入資金來更新風洞設施，運用風洞實驗來改進空氣力學套件的效能。

二、尾翼角度的重要性

(一) 有尾翼則下壓的力增加：車子加上小尾翼、大尾翼、前翼+大尾翼，總下壓的力明顯增加，尾翼主要是影響後輪下壓的力作用 (前翼增加前輪下壓的力)。大小尾翼前後

寬度加總(2.6cm)相同，差異在於大尾翼左右寬度較寬(11.5cm)，影響氣流範圍較多，造成後輪下壓的力較小尾翼(9cm)大。因此，尾翼左右寬度增寬可以增加總下壓的力更大。

(二) 由我們的實驗得知，後尾翼角度越大，越有利於車子穩定度，但增加到某個角度又會降低穩定度。攻角在增大到一定值時，會產生氣流分離。當發生氣流分離時，黏滯性降低，所以產生的下壓的力減少，阻力也會明顯增加。我們實驗推測副翼最佳角度落在 45°-90°範圍之間，現行尾翼角度後方攻角都往上翹 (圖 20, 22)，車隊提出雙層尾翼後半部的副翼是往上翹 70-80°的翼片，我們更進一步找出 75°為最佳角度，80°次佳。副翼上翹使得氣流沿著尾翼的形狀向上，也就是「上洗效應」。氣流受尾翼向上的力使其上升，賽車尾翼則獲得空氣向下的反作用力而產生下壓的力。因此 F1 賽車尾翼產生的下壓的力來自於前半部的主翼上下表面產生的壓力差以及後半部的副翼的上洗效應產生的反作用力 (參考資料 9)。在摩納哥的蒙地卡羅賽道 (最短的 F1 賽道) 轉彎多 (圖 35-1)，F1 車隊工程師為了賽車獲取下壓的力，所以，副翼的攻角就儘可能調大；如果在義大利的蒙扎賽道 (全年賽程中最快的賽道之一) 直道多 (圖 35-2)，就會使用小攻角、低阻力的尾翼調校而獲得直道的極速 (參考資料 6)。

為了增加下壓的力，一是增大尾翼攻角；另一則是尾翼的左右寬度增長。此二原則與我們實驗結果吻合。

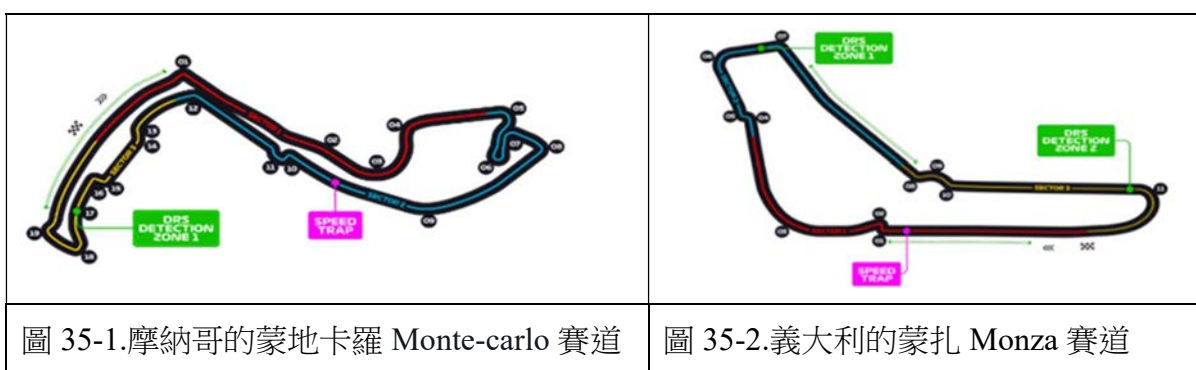


圖 35. F1 賽道路線

(三) 比起水平尾翼，雙層尾翼改變主翼與副翼角度都對增加車子穩定度有幫助。增加副翼角度是比增加主翼角度對下壓的力增加更大，對車子穩定度是較好的選擇。所以可以看出，下頁圖 36 中 Nissan GTR 固定雙層尾翼與 F1 賽車雙層尾翼都是

副翼角度增加，DRS 關閉時增加過彎操控性。而**主翼 0°-副翼 75°**的「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值 **0.78** 為最大，為**增加車子穩定度之最佳選擇**。

(四) 比起水平尾翼，雙層尾翼後輪下壓的力增加最多 **4.5** 倍，總下壓的力增加最多**將近 4 倍** (表 7)。而圖 3 所說氣流穿過 F1 賽車翼面時會產生如大象 2500 公斤重的力量把車壓到地上，F1 賽車的最低重量限制為 691 公斤。所以增加下壓的力約為車重 3.62 倍，相當驚人。



圖 36. 現行賽車的尾翼角度

※總之，選擇**主翼 0°-副翼 75°**的**雙層尾翼**為增加車子穩定度之最佳尾翼選擇。

三、開發出最佳角度尾翼

本實驗所用遙控車都是實車 1:16 縮小版，外型模擬真實車子，除 F1 實車前鼻翼有 4 層空隙 (圖 8)，F1 模型遙控車合在一起無空隙，其餘外型都相同。不過，前鼻翼非本研究最重點，我們成功以風洞模式測試，紀錄出氣流流動情形與真實風洞試驗相似，因此，本實驗結果**最佳雙層尾翼角度為 0°-75°**，並以 **3D 列印**製作出**最佳尾翼**，建議應用於真實賽車情境可能性高。未來可進一步研究左邊或右邊可調式尾翼，以因應左彎與右彎不同下壓的力需求。

陸、結論

- 一、由實驗一觀察到**風洞箱內車子風速大時呈現層流與擾流現象**，驗證自製風洞模型成效。
- 二、由實驗二得知：**車速越快，總下壓的力增強，阻力也增加**。
- 三、由實驗三得知：**前翼增加前輪下壓力；後尾翼增加後輪下壓力**。
- 四、由實驗三與四知：**尾翼左右寬度增寬或後尾翼角度越大，下壓的力越大，易贏得比賽**。
- 五、由實驗四得知：對雙層尾翼，**增加副翼角度較增加主翼角度對車子穩定度是較好的選**

擇。推測副翼最佳角度落在 45°-90°範圍之間。

六、由實驗四得知：主翼 0°-副翼 75°的「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值 0.78 為最大，為增加車子穩定度之最佳尾翼選擇。

柒、參考文獻資料

1. 維基百科網頁 (2021 年 7 月 2 日)。「一級方程式賽車」。取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/一級方程式賽車>。
2. F1 賽車官方網頁 (2021 年 7 月 2 日)。取自 <http://www.formula1.com/default.html>
3. F1 賽車為什麼需要空氣動力學？(2022 年 1 月 12 日)。取自 <https://kknews.cc/sports/686jnlq.html>
4. CNBC International 國際新聞的專訪 (2014)。取自 <https://www.youtube.com/watch?v=oyh0HV38AAc&t=0s>
5. The Secret Aerodynamicist. (15 Mar, 2019) Formula 1: The secret aerodynamicist reveals design concepts. *BBC Sport*. 取自 <https://www.bbc.com/sport/formula1/47527705>
6. 戴昭瑛、陳俊宏、徐茂 (2011)。F-1 一級方程式賽車運動之探討。《休閒運動健康評論》，3(1)，15-27。
7. 轉向不足與轉向過度 (2021 年 8 月 20 日)。取自 <http://www.formula1-dictionary.net/understeer.html> 及 <http://www.formula1-dictionary.net/oversteer.html>
8. F1 空氣動力學小知識 (2021 年 8 月 21 日)。《AutoAero 201901 期》。取自 <https://read01.com/8azQMed.html>
9. 感受到尾翼的學問多，能詳細介紹 F1 賽車的尾翼嗎？(2022 年 1 月 25 日)。取自 <https://kknews.cc/sports/gzyz3y.html>
10. 可調尾翼。(2022 年 1 月 25 日)。取自 <https://www.easyatm.com.tw/wiki/可調尾翼>

【評語】 080107

模擬高風速對車產生 Double D (Downforce 下壓的力與 Drag 阻力) 比值最大化。以巴沙木製單、雙三層尾翼，自製風洞、掃葉機風力、發煙機及 LED 燈拍攝氣流。研究並 3D 列印製作出最佳主、副、尾翼。在高速直道上才會把攻角調小，開啟 DRS (Drag Reduction System, 降低阻力系統)，減少上洗效應而降低下壓的力，降低阻力來超車。這個工作同學利用不同的風速，尾翼大小及角度來改變氣流的流動進而學習氣流產生的下壓力大小。運用風洞實驗來改進空氣力學套件的效能，發現尾翼主要是影響後輪下壓的力作用，並且得出最佳角度的尾翼。風洞實驗的準確度並不是很容易控制，造成實驗上的困難度。本作品優點為控制變因、操作變因及應變變因討論詳細，但是本作品此類研究已經相當的多，很多的結果可以預先得知，所以並不算是非常有原創性的作品。

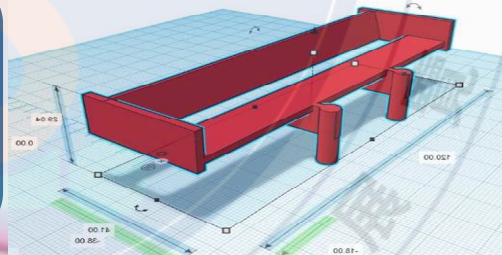
非關主題的文字似占用太多不必要的篇幅。

作品簡報

F1賽車的魅力



Double D空氣力學套件開發研究



科別：物理科
組別：國小組

研究動機與問題



為何
可以跑的
這麼快?

怎麼有辦法
控制車子穩
定性呢?

下壓的力
(Downforce)



圖示. 氣流穿過F1翼面產生如大象2500公斤重的力量把車壓到地上。



搜尋文
獻發現

F1先進
研究技術

引擎 (油電混
合的動力單元
Power Unit)

費用昂貴
複雜

底盤

空氣力學套件

前(鼻)翼:
可更換

後尾翼:
直接退賽

研究
重點

1. 下壓的力使輪胎保持與路面直接接觸，產生更大抓地力，穩定過彎，取得更快的單圈成績 (lap time)，贏得比賽。
2. 下壓的力，使車子重心降低，轉彎所受力矩變小，增加車子穩定度，較不易翻覆。

F1賽車決
勝點在彎道

彎道決勝點
在下壓的力

下壓的力
(Downforce)

所以確定 下壓的力 是我們研究的主角

產生下壓的力原因與重要性

下壓的力原因

氣流流過車子表面速度差導致的壓力差：
白努利定律
(Bernoulli's principle)

氣流流經尾翼向上而產生向下的反作用力



尾翼產生下壓的力

氣流從尾翼上方流過時，流速慢 壓力大

下壓的力

氣流

尾翼

氣流從尾翼下方流過時，流速快 壓力小

想贏得比賽

F1車隊一致認為決勝關鍵在空氣力學的下壓的力 (Downforce) 和空氣阻力 (Drag)，因此我們自行定義 (Double D) 比值

Drag

Downforce



下壓的力

阻力



改變尾翼大小、層數、角度排列
看 Downforce/ Drag 比值

找出最佳比值的尾翼

研究目的

- (一) 建立風洞模型並觀察車子的氣體流動變化。
- (二) 測試風速與下壓的力及阻力的關係。
- (三) 探討市售遙控車原有空力套件下壓的力及阻力變化。
- (四) 比較自製尾翼的下壓的力及阻力變化，找出最佳尾翼。








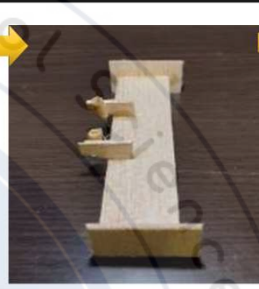


研究流程圖



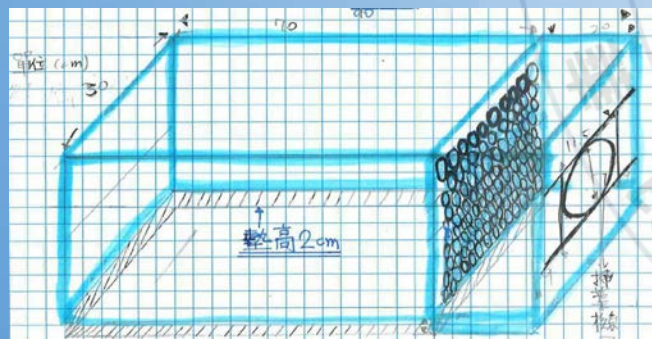
大尾翼(上層 11.5*1.3 cm, 下層 11.5*1.3 cm)	前翼 (11.5*3.8cm)
小尾翼 (9*2.6cm)	



研究方法&實驗設備製作

							
用鋸子鋸裝潢格柵木料取所需長度	用鐵鎚和釘子釘風洞箱基本骨架	砂紙磨邊角，吸管黏成整流牆 W30*H12(cm)	放入車子、電子秤、拉力計、右側掃葉機、左側12V抽風扇，蓋上木板	將巴沙木(飛機木)畫好長度用美工刀割取	割取竹筷成小圓柱，固定尾翼用 單層: 11.5*2.6 cm 雙層: 11.5*1.3 cm*2片 三層: 11.5*1.3 cm*3片	黏成尾翼，將尾翼用螺絲固定在車上	完成 17 組各種角度尾翼製作

風洞箱製作



風洞箱手繪草稿圖

尾翼製作

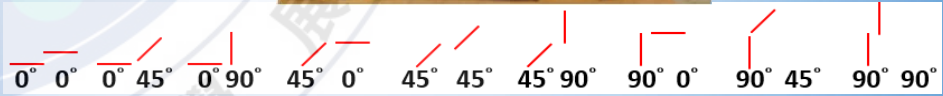
共計17組，含單層3組;雙層13組;三層1組

主翼&副翼(側視)角度組合

單層 11.5*2.6 cm :



雙層 11.5*1.3 cm*2片 :



三層 11.5*1.3 cm*3片 :



研究結果與討論

預試驗一、 風力種類選擇

家用電扇

頭髮吹風機

掃葉機接管

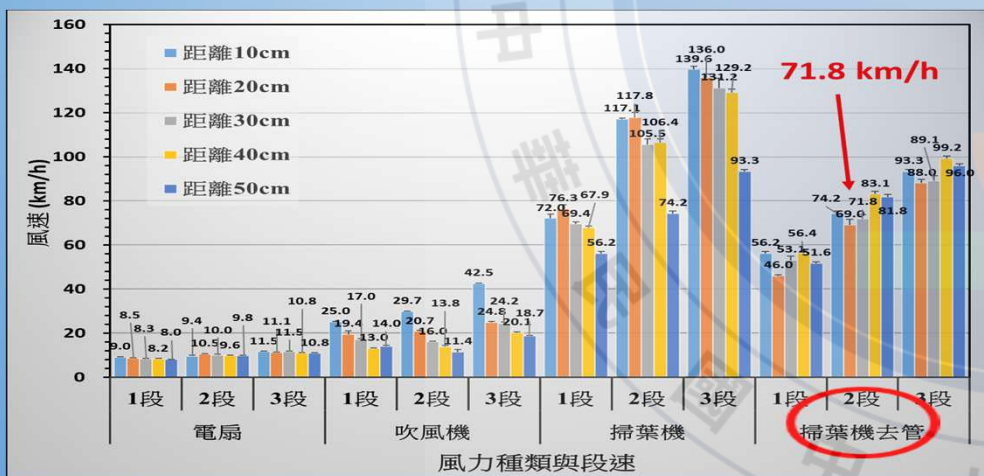
掃葉機去管



佳

預試驗二、 實驗環境的預測試

- 開啟掃葉機後重量 - 開啟前重量
= 下壓的力變化量 (downforce) 數值 (gw)
- 同時以傳統拉力計歸零，開啟掃葉機測得
阻力變化量 (drag) 數值 (gw)



- 傳統刻度型拉力計的刻度(10gw)判讀誤差過大
→ 改以電子數字型拉力計。
- 水平木板上氣流變化過大，數值不穩定讀取困難
→ 開始建立風洞箱模型。

「掃葉機去管2段風力，距離30cm」為後續的控制變因

研究結果與討論

實驗一、風洞模型觀察 氣流變化



風洞實驗配置圖



RGB不同光源觀察:

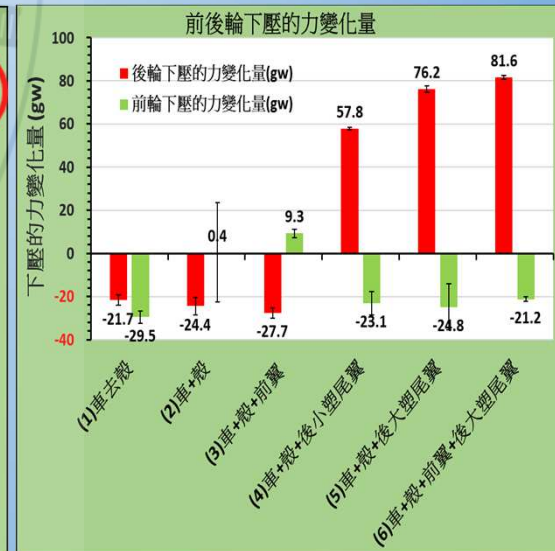
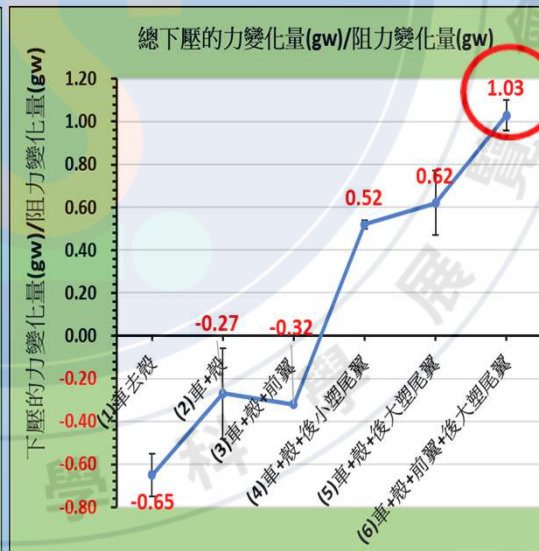
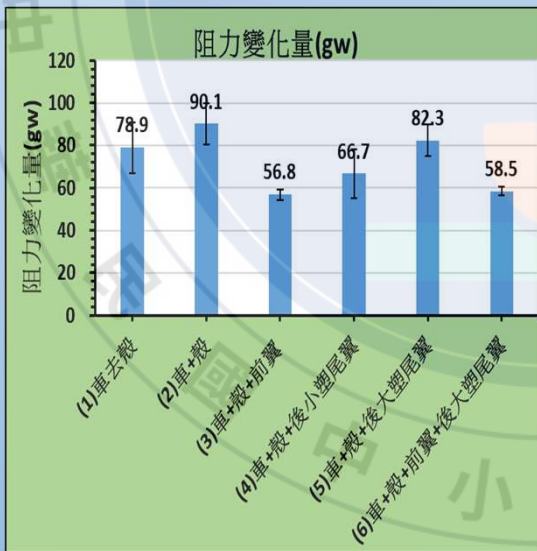
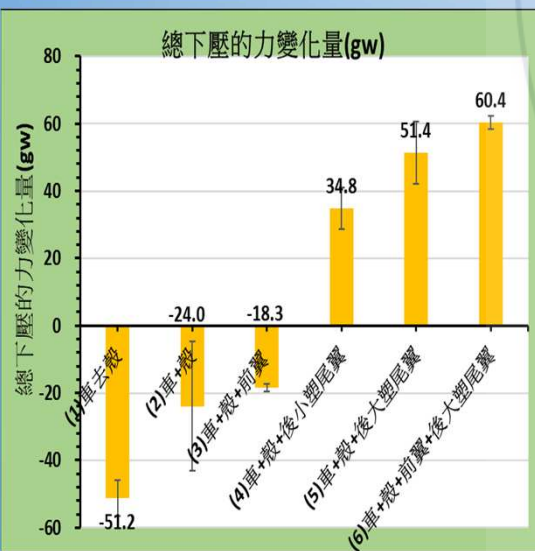
綠光及白光較易看出氣流, 白光下明顯看出車子
上方片狀氣體層流, 尾翼後方有擾流(渦流)。

研究結果與討論

實驗三、市售遙控車空力套件的下壓的力及阻力變化

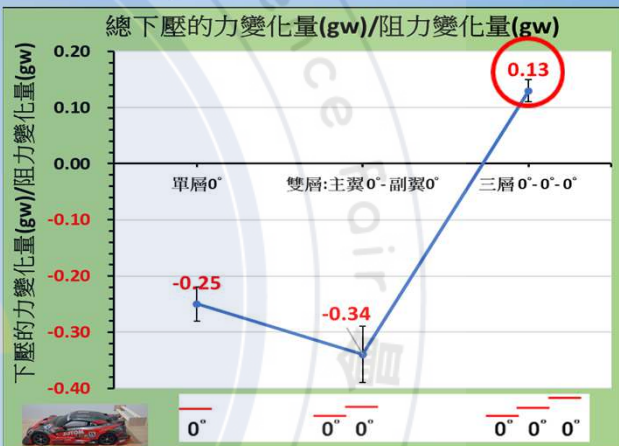
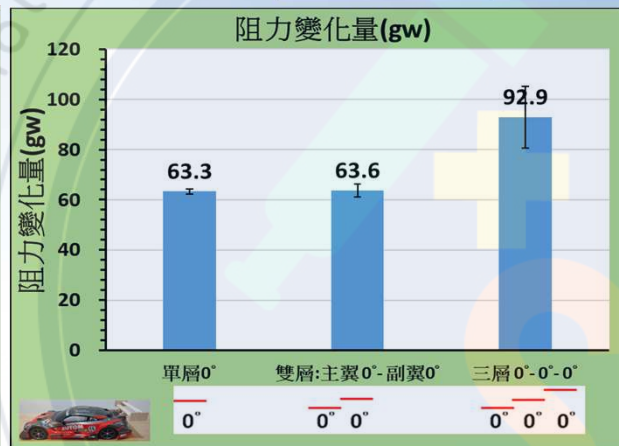
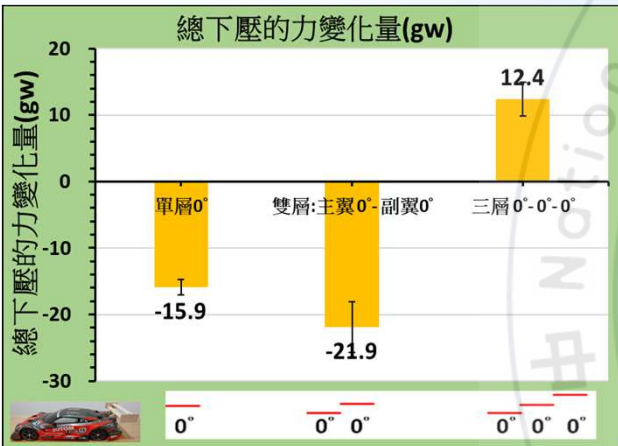


1. 車子加裝流線殼使總下壓的力增加。
2. 前翼增加前輪下壓的力，尾翼增加後輪下壓的力。
3. 隨著車子加上小尾翼、大尾翼、前翼與大尾翼，總下壓的力明顯增加，以前翼+大尾翼比值最高。尾翼左右寬度增寬可以增加總下壓的力更大。

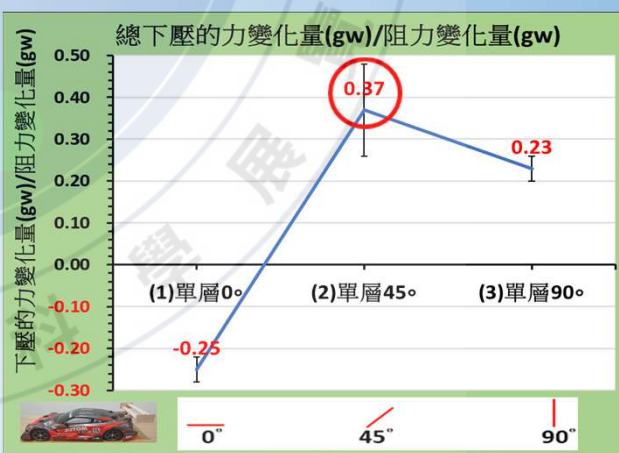
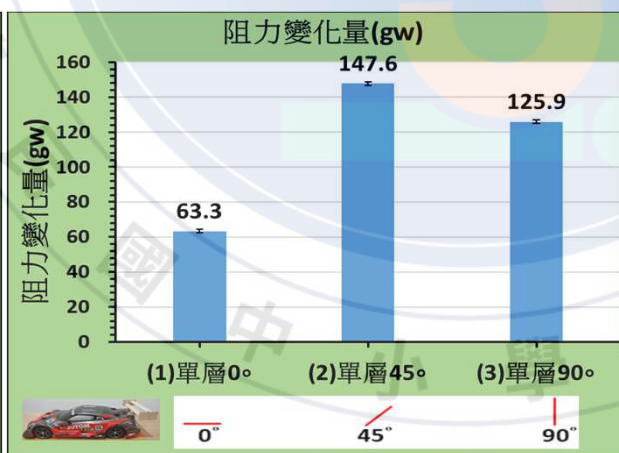
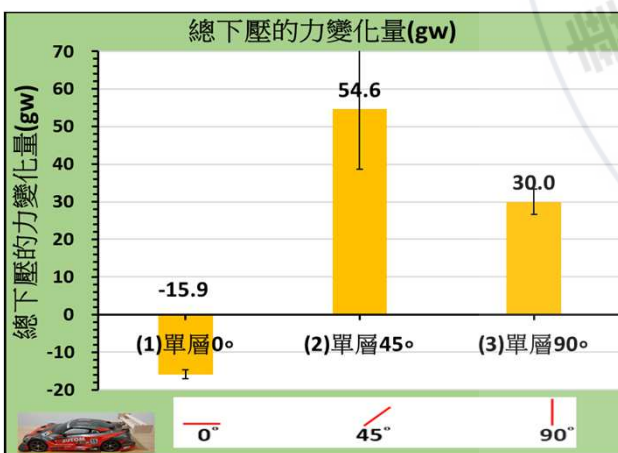


研究結果與討論

實驗四、自製空力套件的下壓的力及阻力變化，找出最佳尾翼



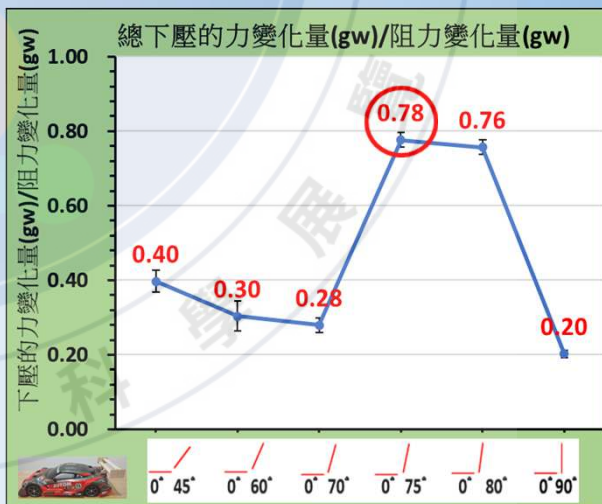
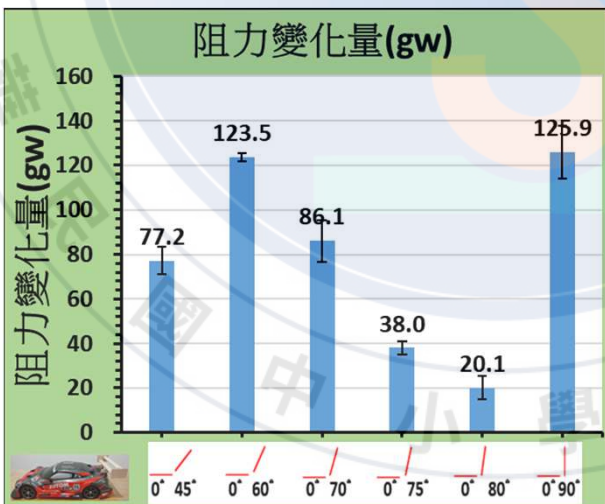
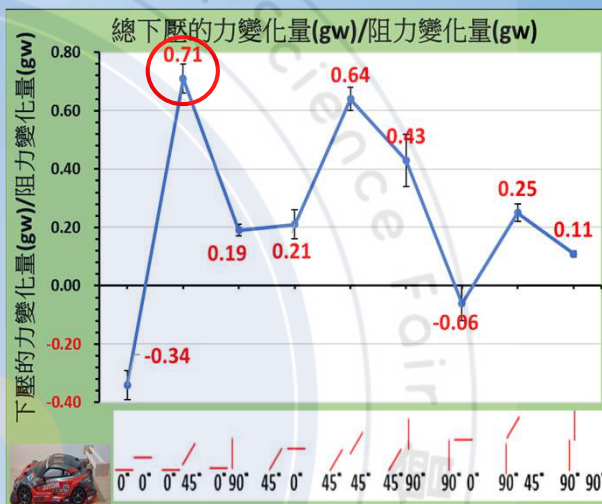
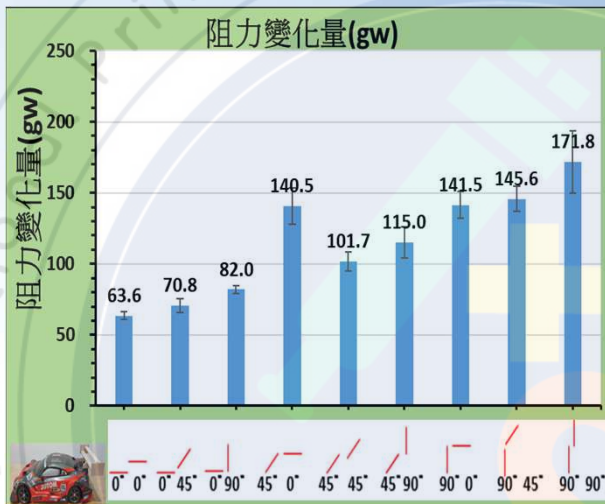
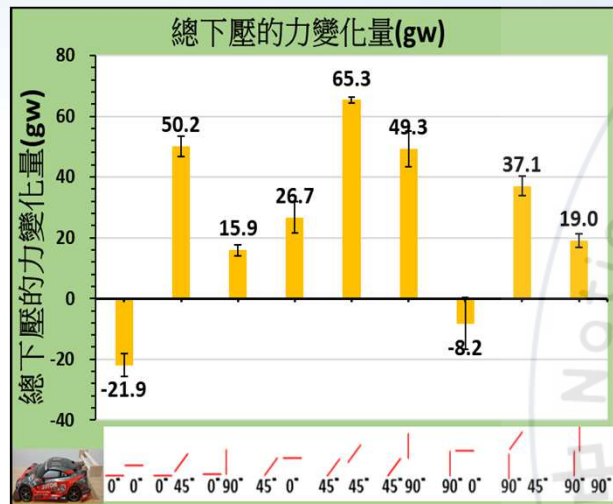
三層尾翼比值較大，不過因水平角度0°，比值仍不夠大。



後尾翼角度越大，有利於車子穩定度，90°比值卻又降低。

研究結果與討論

找到雙層尾翼最佳角度 主翼0°-副翼75°



1. 增加副翼角度是比增加主翼角度對車子穩定度較好。
2. 副翼45°至90°間為增加車子穩定度之較佳選擇。

再細分副翼45°-90°間角度，主翼0°-副翼75°的比值0.78為最大，為增加車子穩定度之最佳選擇。

結論

未來展望

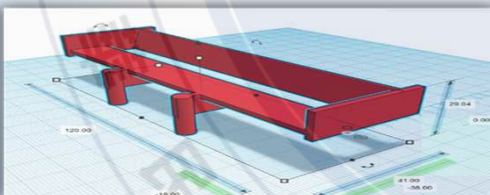
- 一、風洞模型可觀察到層流與擾流現象。
- 二、車速越快，總下壓的力增強，阻力也增加。
- 三、**前翼增加前輪下壓力；後尾翼增加後輪下壓力。**
- 四、尾翼左右寬度增寬或後尾翼角度越大，下壓的力越大，較易贏得比賽。
- 五、對雙層尾翼，**增加副翼角度**較增加主翼角度是較好的選擇。推測副翼最佳角度落在45° -90° 範圍之間。
- 六、**主翼0° -副翼75°**的「總下壓的力變化量/阻力變化量」比值0.78最大，以**3D列印**製作出最佳尾翼。



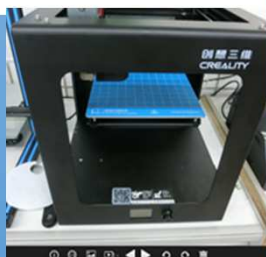
1. 本實驗所用遙控車都是實車1:16縮小版，外型模擬真實車子，實驗結果應用於真實賽車情境可能性高。
2. 未來可進一步研究左邊或右邊可調式尾翼，以因應左彎與右彎不同下壓力需求。



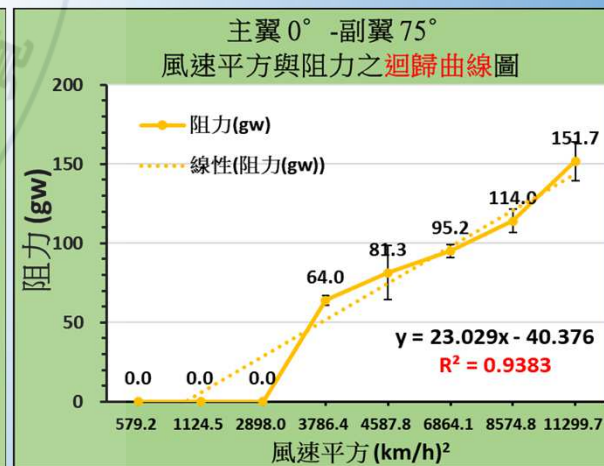
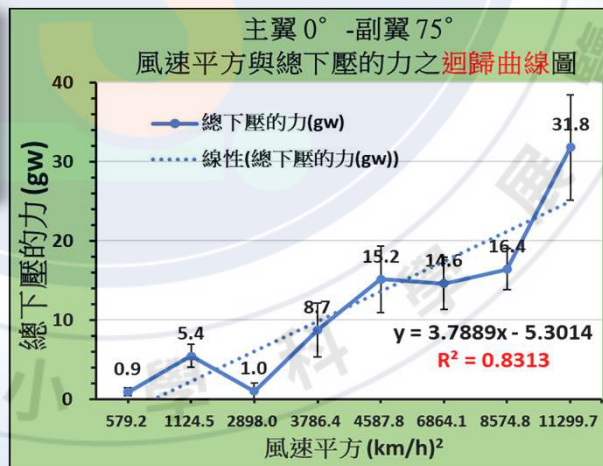
TinkerCAD
3D設計軟體



雙層11.5*1.3 cm*2片一體式



CR2020
3D列印機



與相似科展結果比較表

題目	模型跑車水平阻力與抬升阻力的探討	F1賽車的Double D空氣力學套件開發研究
屆別	55屆的全國科展	62屆全國科展
車型	台車	1:16遙控車Nissan GTR 1:16組裝遙控車F1 Ferrari SF21 勝
車子材料	用6.8公克的保力龍	約450公克塑膠模型車 勝
尾翼材質	珍珠板	巴沙木 勝
風力時速 (km/hr)	鼓風機20-30 km/hr 太弱	掃葉機70-80 km/hr
測試氣流	無	層流、擾流 勝
測試力量	水平阻力、抬升阻力	下壓力、阻力
測量方式	定滑輪一端掛砝碼	直接電子秤接觸輪胎 勝
研究觀念	1. 阻力低則抵銷抬升力，觀念錯誤方向不同 2. 變化僅0.0幾克非常少	1. 下壓力大，阻力也大 2. 下壓力增加達80-90克重，阻力增加高達170克重 勝

與相似研究論文結果比較表

題目	Experimental Investigation of a Spoiler's Impact on the Flow Pattern of a High-Speed Sport Car 擾流板對高速跑車流動模式之實驗研究	F1賽車的Double D空氣力學套件開發研究
文章來源	2020交通大學研究論文	62屆全國科展
車型	1/24 BMW模型車	1:16遙控車Nissan GTR 勝 1:16組裝遙控車F1 Ferrari SF21
尾翼材質	0°,5°,10°,12°,15°單層3D列印尾翼	巴沙木自製單、雙、三層多角度17種組合尾翼 勝
風力時速 (km/hr)	16.56 km/hr	70-80 km/hr 勝
測試氣流	僅噴染料觀察風場	發煙機紀錄層流、擾流現象 勝
測試力量	下壓力、阻力、尾翼上下點風速差	下壓力、阻力、比值
測量方式	等臂天平一端有重量感應器，尾翼固定於橫桿上，不在車上	直接電子秤接觸輪胎，尾翼固定於車身 勝
研究觀念	比起5°尾翼，12°單層尾翼增加下壓力233%，阻力只增15%	比起0°-0°雙層尾翼，主翼0°-副翼75°增加下壓力398.40%，主翼0°-副翼75°比值增加29.3倍最大 勝