

屏東縣第 66 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別： 物理科

組 別： 國中組

作品名稱：

停?不停! -探討停車單振動的現象

關 鍵 詞：振動頻率、風洞

編號：**B2003**

摘要

本研究旨在探討生活中觀察到的停車單振動，有一般振動及翻轉振動兩種現象。首先在車上進行風速量測，並在實驗室中建立風洞、製作汽車引擎蓋、導流板、前擋玻璃及雨刷縮小模型，並透過量測作用力、以煙霧觀察氣流，以及量測振動頻率來了解停車單振動情形。研究結果顯示，當只開排風扇時，在導流板上產生上升力，氣流多以平行流過，只開前風扇，導流板上產生下壓力，在導流板上形成向下順時針方向的氣流；紙張基重會影響是否能翻轉，研究後以秤量紙取代停車單重現翻轉振動；進行量測振動頻率，一般振動情形其振動頻率穩定，頻率隨風速增加，翻轉振動情形較不穩定，有低頻振動及高頻振動，高頻振動頻率與風速成線性關係，風速越快頻率越大。

壹、前言

一、研究動機

「噠、噠、噠、、、」有一次我坐在車子的副駕駛座，突然聽到一個細小的聲音，仔細觀察是一張停車單在振動，停車單就夾在車子前擋風玻璃的雨刷下，當車子開始行駛時，這張停車單就翻過來開始振動，當車子停紅燈時，停車單又翻回去，車子啟動又重複振動，後來我又持續觀察多次，發現不是每次停車單的振動都會這麼明顯，有時只是微微振動，每次停車單夾在雨刷的位置都不太一樣，這個現象引發我的好奇，為了更仔細觀察停車單的振動情形，我在家附近一個人車稀少的地方，請家人載著我，車速由靜止開始緩慢加速，觀察停車單振動時的車速以及振動情形，並進錄影，截圖紀錄如下。

(一) 一般振動情形：在擋風玻璃上輕微的振動



停車單在前擋玻璃夾住情形



停車單振動 1



停車單振動 2

(二) 翻轉振動情形：從導流板上整張翻過來，在擋風玻璃上振動，通常振動幅度較大



停車單在前擋玻璃夾住情形



停車單在前擋玻璃夾住情形



停車單翻轉振動 1



停車單翻轉振動 2



停車單翻轉振動 3



停車單翻轉振動 4

我發現停車單有兩種振動的形式，我定義為一般振動及翻轉振動。翻轉振動時的車速約在 30 km/hr，但每次車速不一定相同，另外，雖然是一樣的停車單，但在一般振動與翻轉振動時的振動幅度和頻率似乎不太一樣：一般振動只是微幅振動，但翻轉振動時振動幅度非常明顯，而一般振動的振動頻率似乎也比較小。

為什麼停車單會翻轉上來呢？有什麼因素會影響停車單的振動呢？停車單一般振動和翻轉振動的頻率是否相同？在上自然課程時，老師提到物體的自然頻率及共振現象，於是我搜尋資料，發現在關於研究口琴簧片振動的科展中，顯示簧片振動頻率和風吹速度及簧片形狀有關(陳泓文，2008)，我想也許停車單振動也有類似的關係，決定開啟了我的研究。

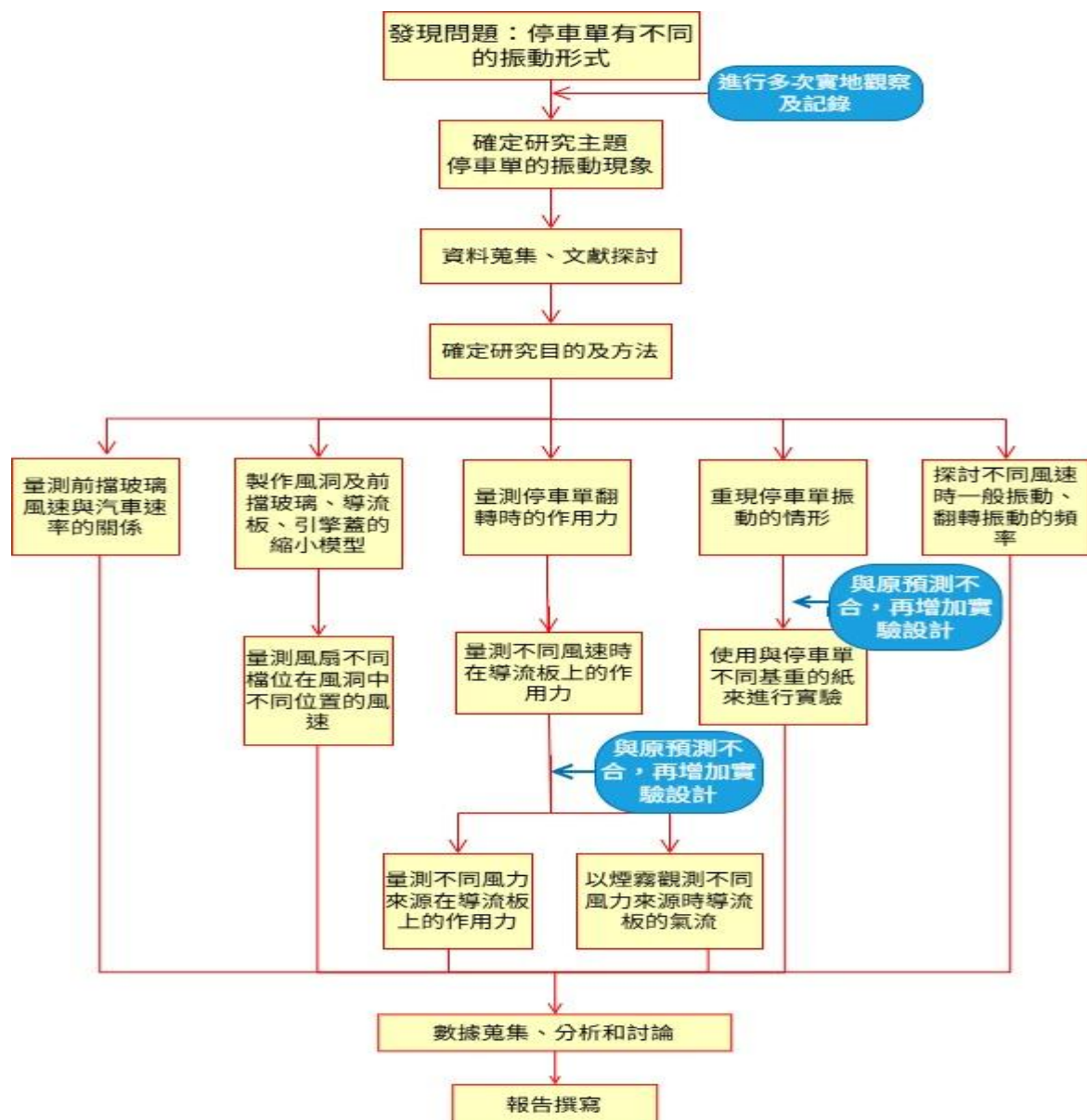
與課程相關性：國中八年級自然課程-波動

二、 研究目的

為進行停車單振動的研究，我想先設計一個小型低速風洞，再利用 3D 列印將汽車的引擎蓋、前擋風玻璃…等比例縮小尺寸進行實驗，重現停車單翻轉振動，量測停車單翻轉振動時導流板上有什麼作用力，並探討風速與振動頻率的關係。

- (一) 量測前擋玻璃風速與汽車速率的關係。
- (二) 製作風洞及前擋玻璃、導流板和引擎蓋的縮小模型。
- (三) 測量不同風速造成停車單翻轉時的作用力。
- (四) 觀察汽車表面氣流流動情形。
- (五) 重現停車單翻轉振動。
- (六) 探討停車單材質對停車單振動的影響。
- (七) 探討不同風速時一般振動、翻轉振動的頻率。

三、 研究流程



四、 文獻探討

(一) 雷諾數與層流、紊流

雷諾數 (Reynolds number, Re) 是**流體力學**中一個極重要的無因次參數，它代表了流體中慣性力與黏滯力的比值

$$\text{氣體雷諾數 } Re = \rho vL / \mu$$

- ρ 代表流體的密度。空氣的密度約為 1.2kg/m^3 。
- v 代表流體的平均速度。

- L 代表流動的特性長度（例如管徑或機翼弦長）。
- μ 代表流體的動力黏度係數。空氣的動力黏滯係數約為 $(1.5\sim 2)10^{-5}$ 。

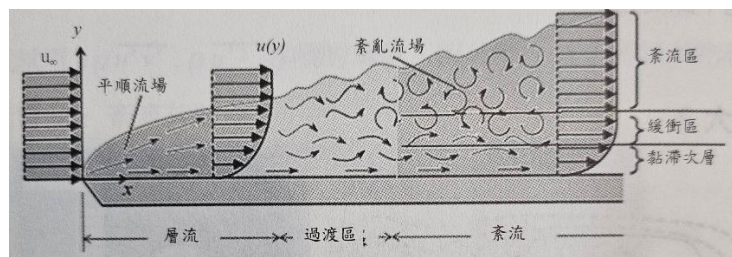
(二)層流與紊流

層流 (Laminar flow) 為流體的一種流動狀態，每一個流體粒子均沿著軸線方向等速前進，其速度只和徑向位置有關，為平滑整齊的流場。當速度增加時就轉變為有無數為小的震動或為小漩渦，稱為紊流 (turbulent flow)。

雷諾數 <2300 為層流

雷諾數 >4000 為紊流

當流體經過一段距離後形成的層流邊界層就形成紊流邊界層，大致分為三層：接連邊界之層流次流、緩衝層、紊流層，如下圖(王曉剛，2020)。



(三)風吹紙片振動的原因探討(只吹紙片一側)

當一張紙平放在桌上一端固定，風只由上方吹過，或是以手握著紙張一端，用口對著水平的紙張上方吹氣時，紙張能上下振動的原因如下：

1. 伯努力原理：流動的氣體或液體中，流速越快時，壓力會減小的現象。

伯努力方程式-流線上的能量守恆定律

$$pV + \frac{1}{2}mv^2 + mgz = \text{常數(沿著流線方向)}$$

風吹紙面上方會形成空氣快速流動，導致氣壓較小，紙面另一側為常壓(氣壓較大)，將紙片往上推(王曉剛，2020)。

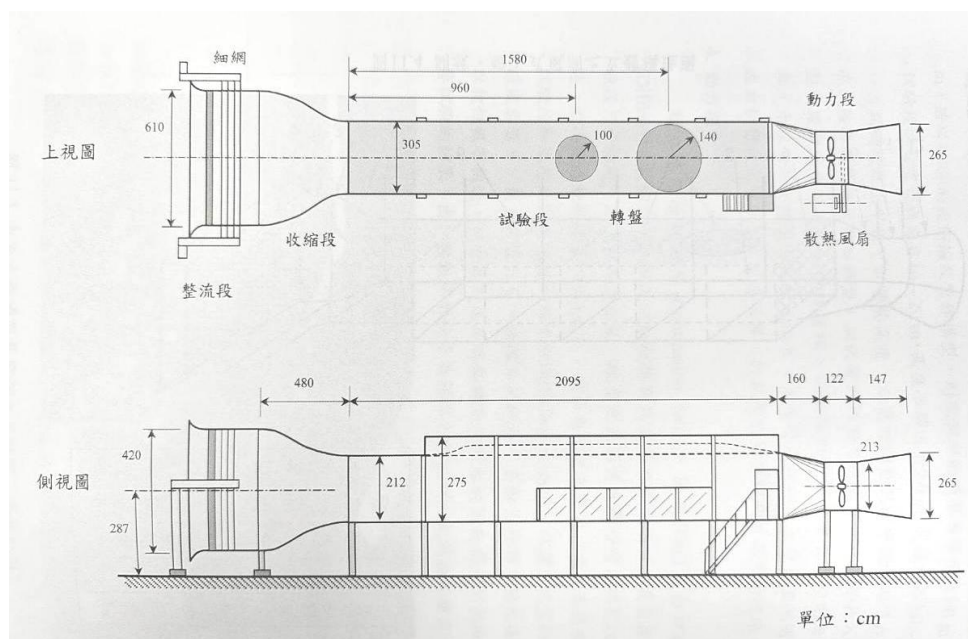
2. 紙張彈性恢復力：回拉的力量，紙張為固體想彈回原本平直的狀態。
3. 紙片末端可能形成紊流，影響紙片振動。

(四)風洞研究

常見的風洞有吹送式風洞及吸入式風洞兩種，吸入式風洞將空氣吸入整流段，經過收縮段、進入試驗段，再由風扇口排出，風速的均勻性及穩定性較吹送式風扇

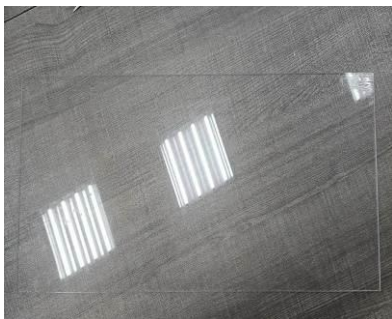
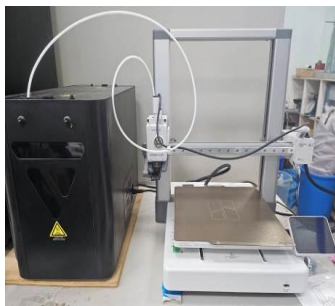
來的好。主要構造可分為整流段、收縮段、試驗段及動力段(朱佳仁, 2006)。

1. 整流段：包含蜂巢管及細網，蜂巢管可將通過的渦流切成小渦流，減小氣流在流動方向和橫向上的擾動和渦旋，整流細網降低流場的紊流強度，增進氣流的均勻性和穩定性。
2. 收縮段：藉通風斷面的縮小使得通過之氣流加速，影響氣流最重要的區域，可增加風速並抑制紊流的擾動。
3. 試驗段：為實驗模型置放區域。
4. 動力段：包括收縮管、風扇及擴散管，並有出口擴散管應為圓形之喇叭口。



我們參考此風洞設計原理，將風洞尺寸進行調整，為符合實際在汽車行駛時的現況，我們採用後排風扇為主，在加上前風扇，設計符合實驗設計的風洞。

貳、 研究設備及器材

		
風速計	大型風扇	排風扇
		
手機	調速計	電子秤(精準至 0.01g)
		
高亮度手電筒	壓克力板	煙餅
		
熱熔槍	封箱膠帶/雙面膠帶	3D 列印機

參、 研究過程或方法

一、 量測擋風玻璃風速及汽車速率的關係

- (一) 到人車稀少處，使用風速計量測風速，等待外界風速幾乎為 0 時開始實驗。
- (二) 將風速計的探頭放置在擋風玻璃下緣接近雨刷位置。
- (三) 先測量車子靜止時，風速計的讀數。
- (四) 量測車速 20 km/hr、30 km/hr、40 km/hr、50 km/hr、60 km/hr 時的風速，每個車速量測 10 次，並去除較大及較小的兩個極端值再求平均。
- (五) 並探討擋風玻璃風速與車速之間的關係。



圖 3-1 量測擋風玻璃風速

二、 製作風洞及前擋玻璃、導流板引擎蓋及雨刷的縮小模型

(一) 製作風洞

1. 為了能在穩定的氣流中觀察縮小紙片振動情形，選用粗吸管(直徑 1.6 公分)當作整流段中整流的工具。
2. 使用厚紙板及封箱膠帶、熱熔槍組成風洞，為了能有更好的穩定風速，風洞設計以吸入式風洞為主，後方配置排風扇及擴散管。
3. 在排風扇與收縮段之間以毛巾相接，以避免試驗段過度振動。
4. 為增加風速在風洞前方配置一個前風扇。
5. 設計圖及完成圖如下：

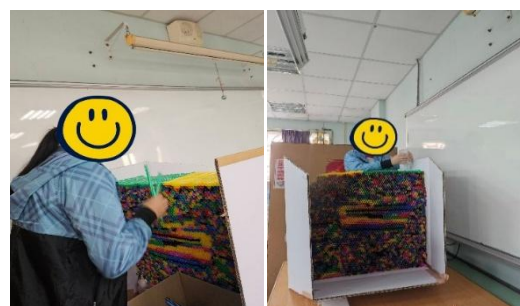


圖 3-2 製作風洞過程

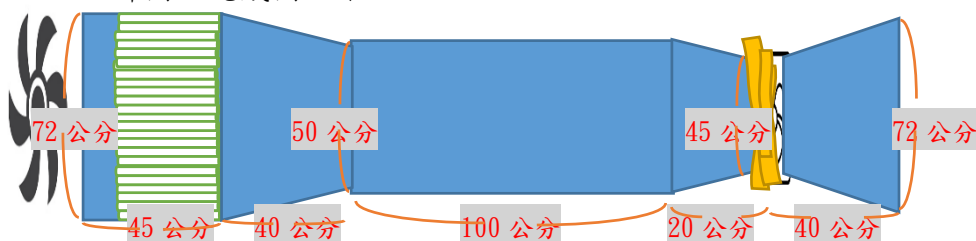
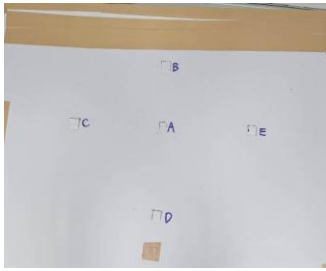
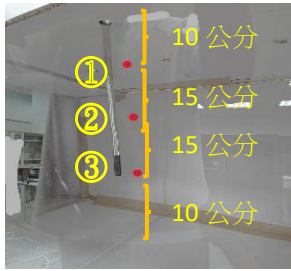


圖 3-3 風洞完成圖。為了使排風順暢，排風口處為實驗室的前門，實驗時會將前門打開。

6. 打開風扇，並測量風洞內各位置的風速：

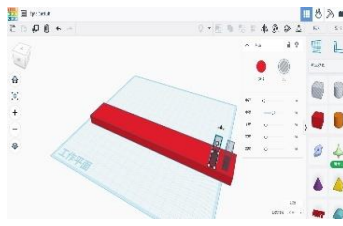
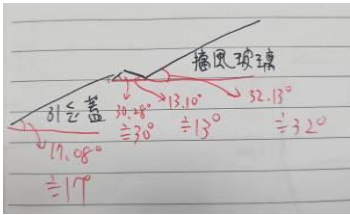
- (1) 如圖，將風洞試驗段上方開五個小孔，將風速計由上方小孔插入不同高度測量風速，如圖。共會有 15 個不同位置。
- (2) 改變不同風速，且每個位置讀取 5 個數值求平均。

		
圖 3-4 風洞試驗段上方五個測量孔洞	圖 3-5 同一個測量孔下方三個測量點位置	圖 3-6 測量風速

(二) 製作前擋玻璃、導流板、引擎蓋及雨刷的縮小模型

根據風洞大小，將汽車前擋玻璃、導流板、引擎蓋及雨刷以 3:1 比例縮小，以進行實驗模擬。

1. 量測汽車前擋玻璃、導流板和引擎蓋尺寸，以及雨刷的尺寸。
2. 縮小比例 3:1，使用 tinkercad 3D 繪圖，並用 3D 列印機印出。
3. 利用 phyphox 中的傾斜角功能量測汽車的前擋玻璃、導流板和引擎蓋的傾斜角度，將縮小模型以相同角度相接。

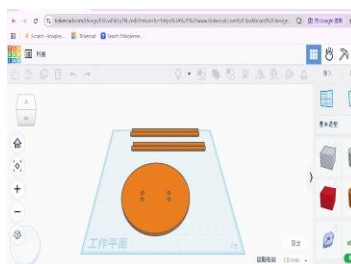
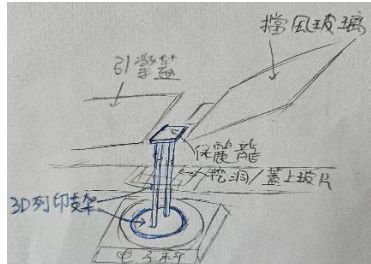
		
圖 3-7 量測汽車導流板的傾斜角度	圖 3-8 使用 tinkercad 3D 繪圖導流板	圖 3-9 3D 列印機列印
		
圖 3-10 汽車各部位的夾角	圖 3-11 組合完成圖	圖 3-12 雨刷的縮小模型改良

三、 測量造成停車單翻轉的作用力

我的預測：在查找資料時，歷屆科展中關於平面溝紋的後方作用力探討，顯示：垂直式溝紋扇葉表面渦流效應最佳，經適當比例組合，使渦流完整、曲流曲度較大，可得最佳升力效果(蔡旻岑、陳嘉馨，2018)，因此我假設在引擎蓋模型後方，也就是導流板處，應該是有升力產生，使得停車單可以翻轉。因此我設計以下實驗進行驗證。

(一) 不同風速的作用力

1. 使用 tinkercad 3D 繪製支架，並用 3D 列印機印出，如圖 3-13~3-14。
2. 將保麗龍板剪成 $1.8 \times 4.5\text{cm}$ 的大小，黏於支架上。
3. 電子秤歸零後，整個裝置組裝，如圖 3-15，放置於電子秤上，並扣掉籃重，此時電子秤顯示 0。
4. 改變風速，測量導流板前半段作用力，如圖 3-16~3-17。
5. 調整保麗龍板位置，如圖 3-18，重複步驟 3~4，測量導流板後半段作用力。
6. 將保麗龍板剪成 $3.6 \times 4.5\text{cm}$ 的大小，黏於支架上如圖 3-19，重複步驟 3~4，測量導流板的作用力並記錄。

			
圖 3-13 用 tinkercad 3D 繪製支架。	圖 3-14 3D 列印出的支架。	圖 3-15 測量導流板上作用力的裝置設計圖	
			
圖 3-16 裝上電子秤測量作用力。	圖 3-17 測量導流板前半段受到的作用力	圖 3-18 測量導流板後半段受到的作用力	圖 3-19 測量導流板整體受到的作用力

由步驟(一)的結果，因與我的預期不同，因此再設計步驟(二)。

(二) 不同風力來所造成的作用力(僅開啟前風扇或排風扇)

1. 量測風速：

- (1) 先量測僅打開風扇風速 1、風速 2、風速 3 之風速，比較僅開啟排風扇時風速。
 - (2) 使用調速器加在排風扇，調整電壓至 30V 使風速約為原來一半，紀錄風速。
 - (3) 使用調速器加在前風扇，風速調至與排風扇相近，此時電壓約為 80V。再調整電壓，約與排風扇+調速 30V 的風速相同，此時電壓約為 50V。
 - (4) 以上風速比較 C3 位置的風速為主。
2. 僅開啟前風扇風速 1、前風扇風速 2、前風扇風速 3，重複步驟(一)2~6。

3. 僅開啟排風扇，調整電壓至 30V，重複步驟(一)2~6。
4. 僅開啟前風扇，調整電壓至 80V 及 50V，重複步驟(一)2~6。

四、觀察汽車表面氣流流動情形

由研究三的結果，我想了解為什麼不同的風力來源(前風扇及排風扇)作用力不相同，以及如何影響停車單翻轉，因此設計以下實驗，利用煙餅來觀察空氣在引擎蓋及在引擎蓋上高約 5 公分處的流動情形，及到達導流板附近會出現什麼樣的情況。為拍攝較佳的影片效果，風洞內側貼上黑色壁報紙，並將引擎蓋顏色改換成黑色。點燃煙餅後，使用手機的超慢動作攝影功能，錄下氣流的流動情形。。

- (一) 將煙餅置於引擎蓋模型前緣，點燃煙餅後打開風扇，觀察煙霧在引擎蓋上的流動情形，如圖 3-20。



圖 3-20 煙餅置於引擎蓋模型前緣



圖 3-21 煙餅改置於引擎改前緣上約 5 公分處

- (二) 使用相機功能中的”超慢動作攝影功能”紀錄空氣流動。
說明：超慢動作攝影可錄製每秒 960 格的 HD 影片，具體拍攝長度 0.2 秒，自動轉換為約 6 秒的慢動作攝影。
- (三) 改變不同風速，重複步驟(二)。
- (四) 將煙餅改置於引擎改前緣上約 5 公分處，點燃煙餅後打開風扇，觀察煙霧在引擎蓋上方的流動情形，如圖 3-21。
- (五) 改變不同風速，重複步驟(二)

五、重現停車單翻轉振動

我的預測：除了前擋玻璃、導流板、引擎蓋及雨刷以 3:1 比例縮小，停車單也以 3:1 的比例縮小，由研究二中測量風洞中的風速，最高可達 4.19m/s，風速達到原翻轉振動風速(6.94m/s)的 1/3，應該也能看到翻轉振動現象。

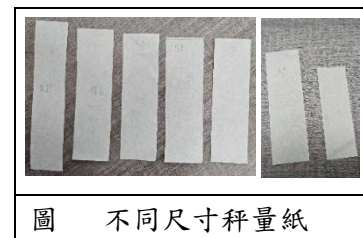
- (一) 原停車單縮小 3:1 比例
 1. 將收集到的停車單以縮小 3:1 的比例裁切，邊長 5.1cm × 1.7cm。
 2. 將停車單夾於雨刷下。
 3. 為了能方便的替換停車單，雨刷模型以強力磁鐵夾於擋風玻璃模型板上。
 4. 打開風扇，並逐漸調整風速，紀錄停車單一般振動與翻轉振動的情形。



(二) 探討停車單材質及長度對停車單振動的影響

在(二)結果顯示縮成 1/3 的停車單無法翻轉。根據實驗觀察，我推測是不是原來的停車單太重？因設備尺寸及風速減小，是否該用較輕的紙？而實驗室常見的秤量紙，正好是相當輕的紙，因此我決定使用秤量紙。因此我將實驗設計如下：

1. 量測原停車測量紙張的基重。
2. 使用基重較小的紙-秤量紙，量測其基重。
3. 計算秤量紙基重和停車單基重的比，並換算秤量紙應裁切的邊長。
4. 重複實驗(二)2~4。



(三) 再以不同長度的秤量紙進行實驗，觀察秤量紙振動的情形，並利用內插法求得能碰到擋風玻璃的實驗紙張的長度，如原來停車單的翻轉振動情形。

六、探討不同風速時停車單(秤量紙)一般振動、翻轉振動的頻率

雖然因為風速不能完全穩定，導致停車單的振動頻率可能不一定穩定，但是我仍想知道當停車單進行一般振動及翻轉振動時，其振動的頻率是否有什麼差別，因此我嘗試許多方法去測量頻率，如量測停車單的振動聲音來求得振動頻率，但操作時因為風扇聲音更大，因此不可行；再來我想用閃頻儀來測停車單振動頻率，但因為頻率似乎不固定，因此無法測量出；後來我決定使用 phyphox 中的 Camera-Brightness(Luminance)功能，利用檢測紙張振動時，該位置的亮度變化，來觀察其振動頻率。

- (一)將高亮度手電筒放置於風洞上方，增加風洞內的亮度。
- (二)為提高亮度，將秤量紙表面黏上極輕的鋁紙增加反光。
- (三)開啟手機 app phyphox 中的 Camera-Brightness(Luminance)功能。
- (四)將 app 中感測亮度的長方框對準秤量紙振動位置。

(五)開啟遠端存取功能，可在電腦上存取數據及觀測亮度變化。

(六)先測量僅打開風扇(前風扇+排風扇)，而未放置停車單時的亮度情形(此為空白實驗)。

(七)將秤量紙夾於雨刷，分別調整成一般振動及翻轉振動的夾住位置，並量測不同風速時(“前風扇風速 1+排風扇”、“前風扇風速 2+排風扇”、“前風扇風速 3+排風扇”)秤量紙的振動頻率。



圖 操作螢幕放大圖

圖 秤量紙貼上極輕鋁紙	圖 Camera-Brightness(Luminance)	圖 使用電腦遠端存取，並下載數據

肆、研究結果

一、汽車車速與擋風玻璃風速關係

(一)不同汽車車速與擋風玻璃風速的關係

車速 20 km/hr、30 km/hr、40 km/hr、50 km/hr、60 km/hr 時的風速，每個車速量測 10 次擋風玻璃風速，去除兩個極端值求平均。

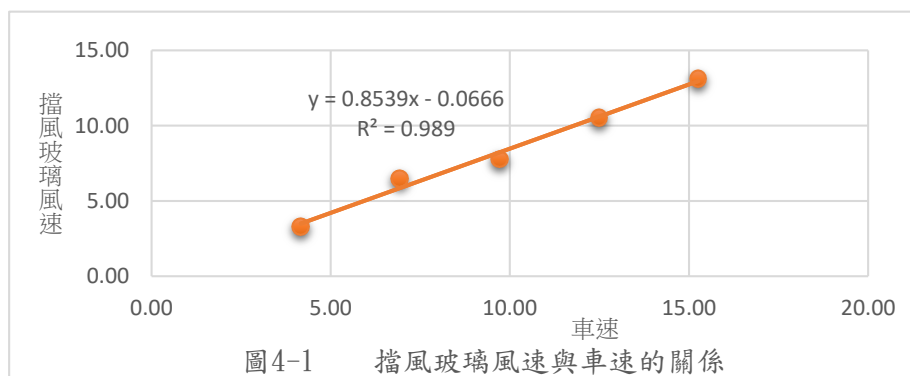
表 4-1 擋風玻璃風速與汽車車速的關係

汽車時速(km/h)	20	30	40	50	60
修正車速(km/h)	15	25	35	45	55
車速(m/s)	4.17	6.94	9.72	12.50	15.28
第 1 次	2.95	6.58	7.54	10.51	13.34
第 2 次	3.04	6.45	7.89	10.59	13.34
第 3 次	3.57	6.62	7.59	10.65	13.02
第 4 次	3.49	6.64	7.63	10.43	13.03
第 5 次	3.72	6.43	7.93	10.67	13.11
第 6 次	2.9	6.31	7.86	10.72	12.89
第 7 次	3.15	6.2	7.83	10.43	12.85
第 8 次	3.66	6.39	7.86	10.29	13.2
擋風玻璃風速(平均)	3.31	6.45	7.77	10.54	13.10
標準差	0.31	0.14	0.14	0.14	0.17
變異係數	0.0947	0.0225	0.0185	0.0131	0.0133
修正車速說明：以汽車時速 20km/hr 為例，儀錶板雖顯示 20km/hr，但我偶然在使用衛星導航時發現實際車速只有 15km/hr，也就是實際車速減 5 km/hr。					

將上表中的擋風玻璃風速與汽車車速作圖，結果如下，可得到關係式

$$y = 0.8539x - 0.0666 \quad R^2 = 0.989(\text{決定係數})$$

由 R^2 值可說明此關係式可代表擋風玻璃風速與汽車車速關係。



(二)分析：由關係式可看出擋風玻璃風速約為車速的 0.85，也就是擋風玻璃風速均較車速慢。我推測可能的原因為氣流在引擎蓋上流動時受到的摩擦力，導致在擋風玻璃時的速率變慢，以氣流撞擊到擋風玻璃時回彈造成的阻力。

二、製作風洞及前擋玻璃、導流板、引擎蓋及雨刷的縮小模型

(一) 風洞內部風速及穩定測試

由風洞上方開五個小孔 A、B、C、D、E，將風速計由上方插入不同高度

①、②、③測量風速(見圖 3-4、3-5)，每個位置讀取 5 個數值，結果如下：

表 4-2 僅開排風扇時風洞不同位置的風速								
位置	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均	標準差	變異係數
A1	1.56	1.56	1.56	1.56	1.58	1.56	0.01	0.005
A2	1.65	1.66	1.65	1.65	1.65	1.65	0.00	0.002
A3	1.72	1.71	1.7	1.71	1.7	1.71	0.01	0.004
B1	1.65	1.6	1.59	1.59	1.59	1.60	0.02	0.013
B2	1.69	1.71	1.71	1.7	1.7	1.70	0.01	0.004
B3	1.7	1.71	1.7	1.71	1.7	1.70	0.00	0.003
C1	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	0.00	0.000
C2	1.64	1.65	1.64	1.64	1.64	1.64	0.00	0.002
C3	1.67	1.69	1.69	1.69	1.68	1.68	0.01	0.004
D1	1.58	1.58	1.58	1.57	1.57	1.58	0.00	0.003
D2	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	0.00	0.000
D3	1.70	1.69	1.70	1.70	1.70	1.70	0.00	0.002
E1	1.55	1.54	1.54	1.55	1.58	1.55	0.01	0.009
E2	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	0.00	0.000
E3	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	0.00	0.000

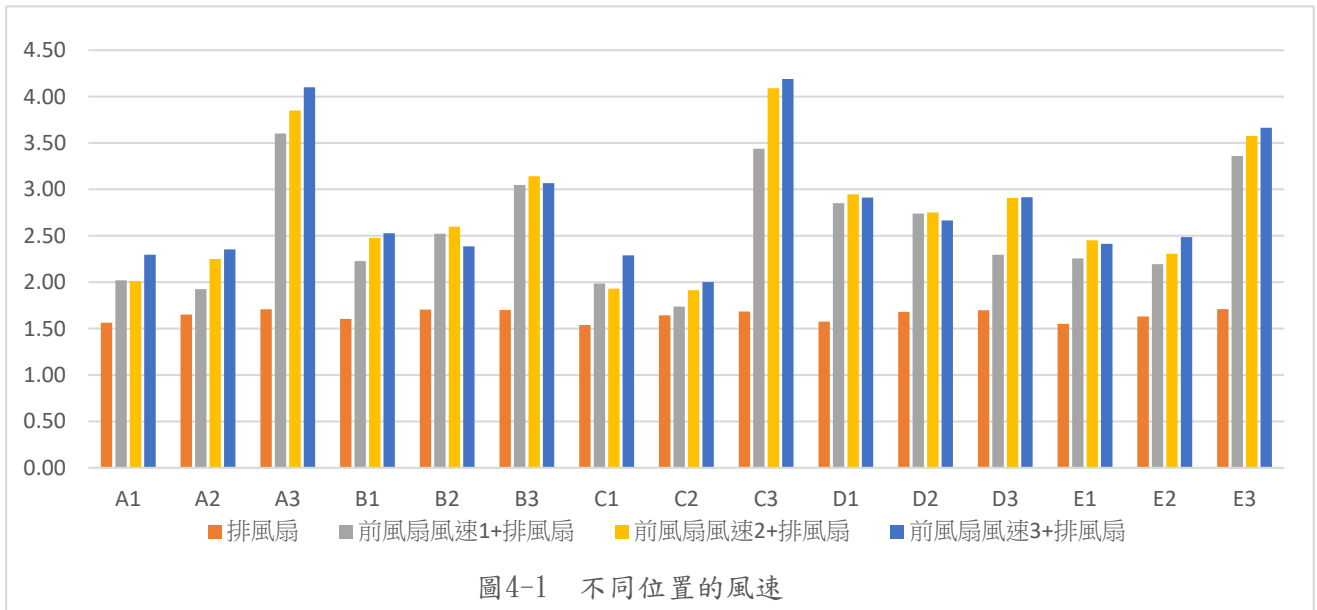
表 4-3 開”前風扇風速 1+排風扇”時不同位置的風速								
位置	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均	標準差	變異係數
A1	1.88	2	2.14	2.01	2.07	2.02	0.08	0.039
A2	1.87	1.9	1.89	1.99	1.98	1.93	0.04	0.023
A3	3.7	3.82	3.57	3.49	3.43	3.60	0.13	0.036
B1	2.36	2.21	2.31	2.12	2.14	2.23	0.09	0.038
B2	2.61	2.41	2.52	2.55	2.52	2.52	0.06	0.024
B3	3.21	3.05	2.98	2.99	3.01	3.05	0.08	0.025
C1	1.92	1.95	2.02	2.1	1.94	1.99	0.06	0.030
C2	1.77	1.77	1.75	1.71	1.69	1.74	0.03	0.017
C3	3.65	3.4	3.36	3.41	3.37	3.44	0.10	0.029
D1	2.78	2.79	2.94	2.98	2.77	2.85	0.08	0.029
D2	2.73	2.74	2.76	2.77	2.7	2.74	0.02	0.008
D3	2.1	2.09	2.4	2.45	2.44	2.30	0.15	0.066
E1	2.2	2.26	2.28	2.27	2.27	2.26	0.03	0.012
E2	2.14	2.27	2.22	2.17	2.17	2.19	0.04	0.019
E3	3.39	3.35	3.38	3.35	3.33	3.36	0.02	0.006

表 4-4 開”前風扇風速 2+排風扇”時不同位置的風速								
位置	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均	標準差	變異係數
A1	2.03	2.03	2.04	2.13	1.83	2.01	0.10	0.049
A2	2.2	2.24	2.43	2.21	2.17	2.25	0.09	0.041
A3	3.72	3.84	3.97	3.67	4.05	3.85	0.14	0.037
B1	2.49	2.48	2.5	2.39	2.53	2.48	0.05	0.019
B2	2.68	2.62	2.56	2.56	2.57	2.60	0.05	0.018
B3	2.99	3.06	3.25	3.19	3.22	3.14	0.10	0.032
C1	1.84	1.95	2.04	2.05	1.76	1.93	0.11	0.059
C2	1.89	1.9	1.96	1.97	1.85	1.91	0.04	0.024
C3	3.99	4.18	4.25	4.2	4.18	4.16	0.09	0.021
D1	2.58	2.93	2.9	2.96	3.36	2.95	0.25	0.084
D2	2.67	2.8	2.72	2.77	2.8	2.75	0.05	0.018
D3	2.89	3.03	2.97	2.83	2.82	2.91	0.08	0.028
E1	2.51	2.45	2.45	2.43	2.42	2.45	0.03	0.013
E2	2.32	2.4	2.3	2.36	2.15	2.31	0.09	0.037
E3	3.62	3.61	3.55	3.52	3.58	3.58	0.04	0.010

表 4-4 開”前風扇風速 1+排風扇”時不同位置的風速								
位置	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均	標準差	變異係數
A1	2.42	2.6	2.09	2.17	2.2	2.30	0.19	0.082
A2	2.38	2.4	2.33	2.34	2.32	2.35	0.03	0.013
A3	4.05	4.1	4.15	4.09	4.11	4.10	0.03	0.008
B1	2.49	2.48	2.61	2.6	2.46	2.53	0.06	0.025
B2	2.32	2.49	2.31	2.41	2.4	2.39	0.07	0.028
B3	3.15	3.06	3.04	3.04	3.05	3.07	0.04	0.014
C1	2.22	2.29	1.95	2.5	2.47	2.29	0.20	0.087
C2	1.96	1.97	2.03	1.99	2.06	2.00	0.04	0.019
C3	3.98	4.26	4.35	4.42	3.92	4.11	0.25	0.060
D1	2.92	2.85	2.96	2.93	2.9	2.91	0.04	0.013
D2	2.51	2.56	2.66	2.63	2.97	2.67	0.16	0.060
D3	2.97	2.96	3	2.91	2.74	2.92	0.09	0.032
E1	2.18	2.42	2.39	2.63	2.45	2.41	0.14	0.060
E2	2.56	2.47	2.46	2.45	2.49	2.49	0.04	0.016
E3	3.56	3.57	3.6	3.7	3.89	3.66	0.12	0.034

表 4-6 不同位置的風速

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
排風扇	1.56	1.65	1.71	1.60	1.70	1.70	1.54	1.64	1.68	1.58	1.68	1.70	1.55	1.63	1.71
前風扇風速 1+排風扇	2.02	1.93	3.60	2.23	2.52	3.05	1.99	1.74	3.44	2.85	2.74	2.30	2.26	2.19	3.36
前風扇風速 2+排風扇	2.01	2.25	3.85	2.48	2.60	3.14	1.93	1.91	4.09	2.95	2.75	2.91	2.45	2.31	3.58
前風扇風速 3+排風扇	2.30	2.35	4.10	2.53	2.39	3.07	2.29	2.00	4.19	2.91	2.67	2.92	2.41	2.49	3.66



(二) 分析：

1. 由表 4-2~4-5 可知無論多大的風速及不同位置，其測量風速變異係數皆小於 0.10，超過 0.05 的數據僅 8 個，顯示風洞內風速的穩定度佳。
2. 比較表 4-2~4-5 的標準差及變異係數，可知僅使用排風扇時，風速穩定度最佳，變異係數皆小於 0.01，而使用”前風扇風速 3+排風扇”時，風速穩定度較差，但其變異係數仍小於 0.09。
3. 由圖 4-1 可知若要有較大的風速，應選擇 A3 或 C3 的位置。本研究為重現重現停車單振動的實驗以 C3 為實驗位置。

三、 測量停車單翻轉振動時表面的作用力

(一) 不同風速的作用力

表 4-7 導流板前半段的作用力

不同風力 來源	前風扇風 速 1+排 風扇	前風扇風 速 2+排風 扇	前風扇風 速 3+排 風扇	排風扇
風速	3.44	4.09	4.19	1.68
第 1 次	0.41	0.44	0.51	-0.09
第 2 次	0.39	0.46	0.51	-0.09
第 3 次	0.39	0.45	0.49	-0.08
第 4 次	0.4	0.43	0.5	-0.08
第 5 次	0.39	0.45	0.5	-0.09
第 6 次	0.38	0.45	0.51	-0.09
第 7 次	0.39	0.45	0.48	-0.09
第 8 次	0.41	0.46	0.49	-0.09
平均	0.40	0.45	0.50	-0.09
標準差	0.01	0.01	0.01	0.00
變異係數	0.0253	0.0207	0.0211	-0.0495

表 4-8 導流板後半段的作用力

不同風力 來源	前風扇風 速 1+排風 扇	前風扇風 速 2+排 風扇	前風扇風 速 3+排 風扇	排風扇
風速	3.44	4.09	4.19	1.68
第 1 次	0.57	0.61	0.71	-0.13
第 2 次	0.59	0.64	0.74	-0.13
第 3 次	0.55	0.69	0.73	-0.14
第 4 次	0.57	0.59	0.7	-0.14
第 5 次	0.55	0.65	0.72	-0.14
第 6 次	0.58	0.65	0.7	-0.14
第 7 次	0.57	0.64	0.69	-0.14
第 8 次	0.57	0.66	0.69	-0.14
平均	0.57	0.64	0.71	-0.14
標準差	0.01	0.03	0.02	0.00
變異係數	0.0223	0.0444	0.0244	-0.0315

表 4-9 導流板全段的作用力

不同風力 來源	前風扇風 速 1+排風 扇	前風扇風 速 2+排風 扇	前風扇風 速 3+排風 扇	排風扇
風速	3.44	4.09	4.19	1.68
第 1 次	0.59	0.63	0.7	-0.08
第 2 次	0.6	0.63	0.68	-0.08
第 3 次	0.59	0.65	0.73	-0.08
第 4 次	0.57	0.62	0.68	-0.09
第 5 次	0.61	0.65	0.7	-0.08
第 6 次	0.57	0.63	0.7	-0.08
第 7 次	0.57	0.62	0.65	-0.08
第 8 次	0.58	0.63	0.72	-0.08
平均	0.59	0.63	0.70	-0.08
標準差	0.01	0.01	0.02	0.00
變異係數	0.02417	0.01723	0.03374	-0.0407

表 4-9 導流板全段的作用力

不同風力 來源	前風扇風 速 1+排風 扇	前風扇風 速 2+排風 扇	前風扇風 速 3+排風 扇	排風扇
------------	---------------------	---------------------	---------------------	-----

(二) 分析：

1. 由表 4-7~4-9，可以看到只有排風扇測得的作用力是負值，顯示僅排風扇時的作用力為減輕，也就是上升力，而其餘作用力皆為下壓力。
2. 表 4-7~4-9 中，”前風扇+排風扇”三種風速，可以發現風速越快，造成的下壓力越大。
3. 比較表 4-7、4-8，”前風扇+排風扇”三種風速，可以看到導流板前半段所受的下壓力較小，後半段所受的下壓力較大，也就是下壓力呈現”前小後大”。
4. 比較表 4-7、4-8，僅開啟排風扇時，可以看到導流板前半段所受的上升力較小，後半段所受的上升力較大，也就是上升力呈現”前小後大”。

(三) 不同風力來源的作用力(僅開啟前風扇或排風扇)

為了確定究竟是否因風速快慢而造成上升力或下壓力不同，我再進行僅前風扇開啟的實驗，與僅排風扇開啟的實驗做比較，並使用調速器改變風速，調出前風扇與排風扇相近的風速，也就是。

表 4-10 導流板前半段的作用力

不同風力 來源	前風扇+調 速 50V	前風扇+調 速 80V	前風扇風 速 1	前風扇風 速 2	前風扇風 速 3	排風扇	排風扇+調 速 30v
風速	0.79	1.85	2.52	2.88	2.99	1.68	0.75
第 1 次	0.07	0.28	0.56	0.58	0.59	-0.09	-0.04
第 2 次	0.07	0.27	0.55	0.55	0.59	-0.09	-0.03
第 3 次	0.06	0.27	0.54	0.57	0.61	-0.08	-0.03
第 4 次	0.06	0.26	0.55	0.57	0.6	-0.08	-0.03
第 5 次	0.06	0.26	0.53	0.6	0.59	-0.09	-0.03
第 6 次	0.07	0.27	0.54	0.57	0.61	-0.09	-0.03
第 7 次	0.07	0.27	0.54	0.58	0.6	-0.09	-0.03
第 8 次	0.06	0.27	0.54	0.57	0.6	-0.09	-0.03
平均	0.07	0.27	0.54	0.57	0.60	-0.09	-0.03
標準差	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
變異係數	0.0769	0.0223	0.0158	0.0230	0.0130	-0.0495	-0.1058

表 4-11 導流板後半段的作用力

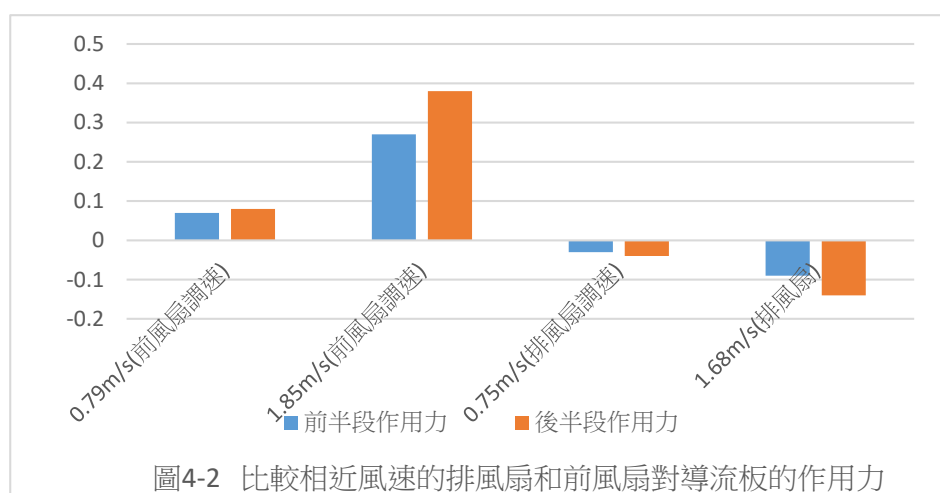
不同風力 來源	前風扇+ 調速 50V	前風扇+調 速 80V	前風扇風 速 1	前風扇風 速 2	前風扇風 速 3	排風扇	排風扇+調 速 30v
風速	0.79	1.85	2.52	2.88	2.99	1.68	0.75
第 1 次	0.08	0.37	0.81	0.9	0.92	-0.13	-0.04
第 2 次	0.08	0.37	0.83	0.9	0.9	-0.13	-0.04
第 3 次	0.08	0.37	0.83	0.88	0.94	-0.14	-0.03
第 4 次	0.08	0.38	0.8	0.88	0.95	-0.14	-0.03
第 5 次	0.08	0.38	0.79	0.92	0.91	-0.14	-0.04
第 6 次	0.08	0.37	0.82	0.89	0.92	-0.14	-0.04
第 7 次	0.08	0.38	0.8	0.89	0.92	-0.14	-0.05
第 8 次	0.08	0.38	0.82	0.89	0.92	-0.14	-0.05
平均	0.08	0.38	0.81	0.89	0.92	-0.14	-0.04
標準差	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
變異係數	0.0000	0.0133	0.0171	0.0136	0.0160	-0.0315	-0.1768

表 4-12 導流板全段的作用力

不同風力 來源	前風扇+調 速 50V	前風扇+調 速 80V	前風扇風 速 1	前風扇風 速 2	前風扇風 速 3	排風扇	排風扇+調 速 30v
風速	0.79	1.85	2.52	2.88	2.99	1.68	0.75
第 1 次	0.05	0.32	0.76	0.86	0.91	-0.08	-0.07
第 2 次	0.05	0.33	0.78	0.84	0.83	-0.08	-0.07
第 3 次	0.05	0.33	0.78	0.86	0.88	-0.08	-0.08
第 4 次	0.05	0.33	0.78	0.86	0.91	-0.09	-0.09
第 5 次	0.06	0.32	0.78	0.85	0.9	-0.08	-0.09
第 6 次	0.05	0.32	0.77	0.84	0.91	-0.08	-0.09
第 7 次	0.05	0.32	0.81	0.86	0.85	-0.08	-0.1
第 8 次	0.05	0.32	0.79	0.84	0.85	-0.08	-0.1
平均	0.05	0.32	0.78	0.85	0.88	-0.08	-0.09
標準差	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01
變異係數	0.0645	0.0150	0.0175	0.0109	0.0346	-0.0407	-0.128814

(四) 分析

1. 由表 4-10~4-12，可知無論前風扇的風速如何，在導流板的作用力接為下壓力。
2. 由表 4-10~4-12 中，前風扇風速越快，下壓力越大，排風扇風速越快，上升力越大。
3. 比較表格中的相近風速的排風扇和前風扇，與其造成的作用力，如下圖：



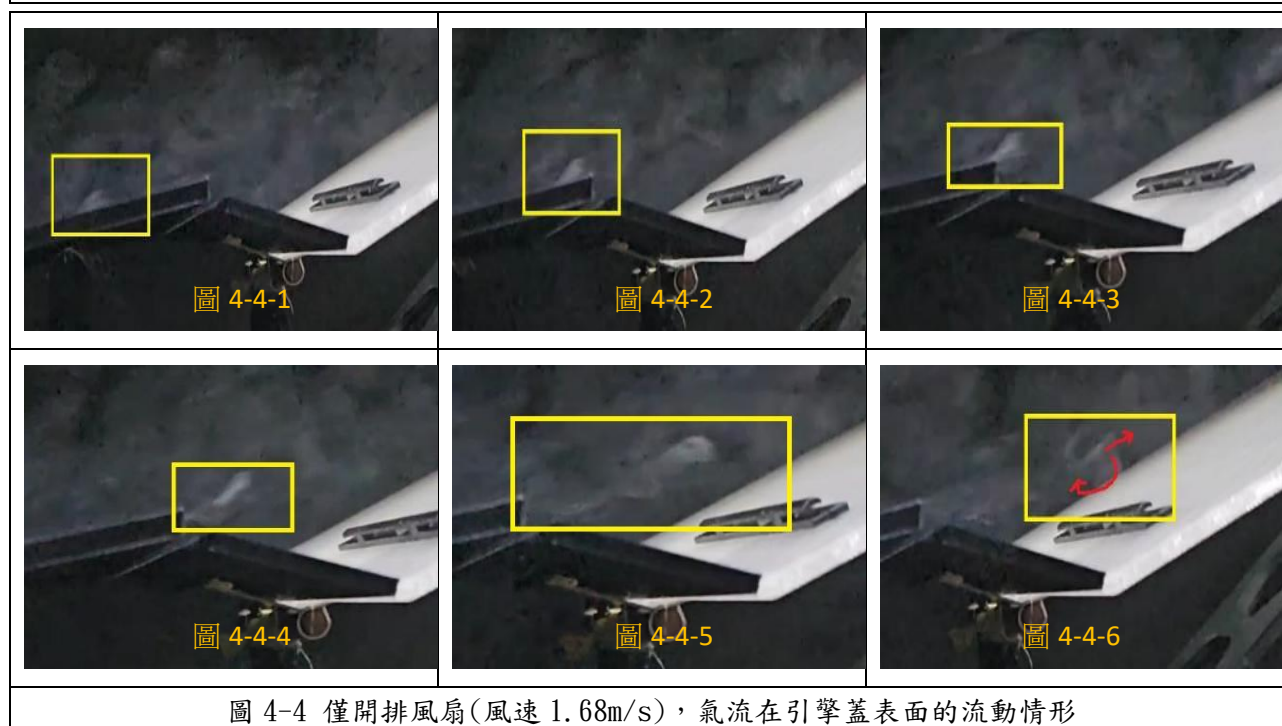
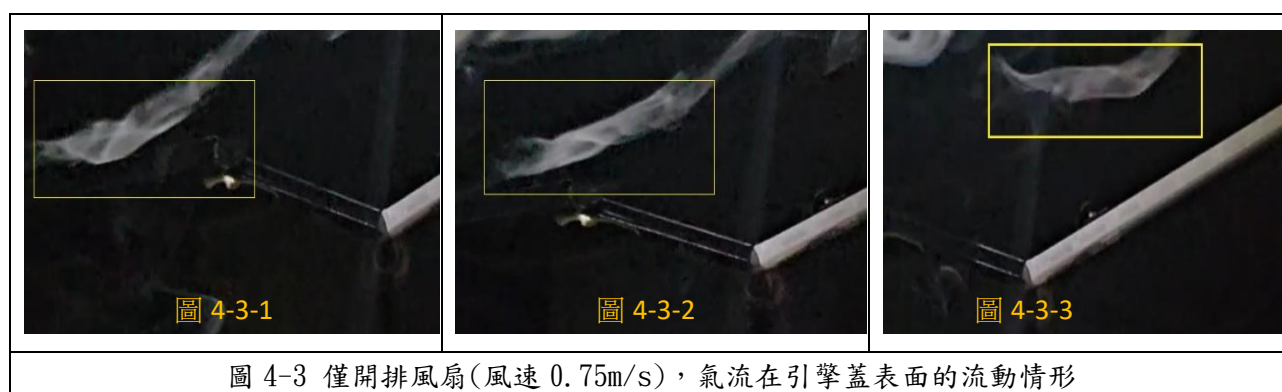
可看出風速相近時前風扇的下壓力大於排風扇的上升力。

四、觀察汽車表面氣流流動情形

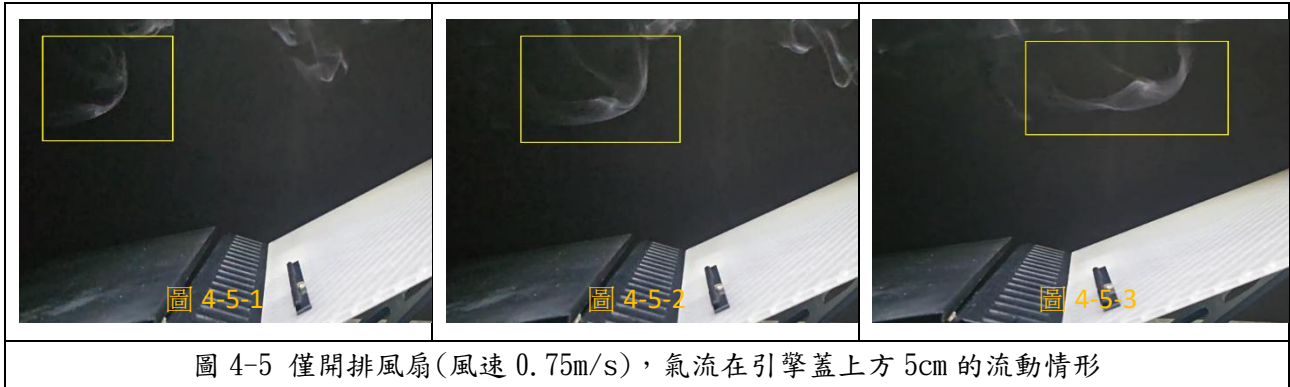
因書面報告無法放入影片，故將影片截圖後呈現。

(一) 僅開排風扇

1. 煙餅置於引擎蓋模型前端(如圖 3-20)：



2. 煙餅置於引擎蓋模型前端上方 5cm(圖 3-21)

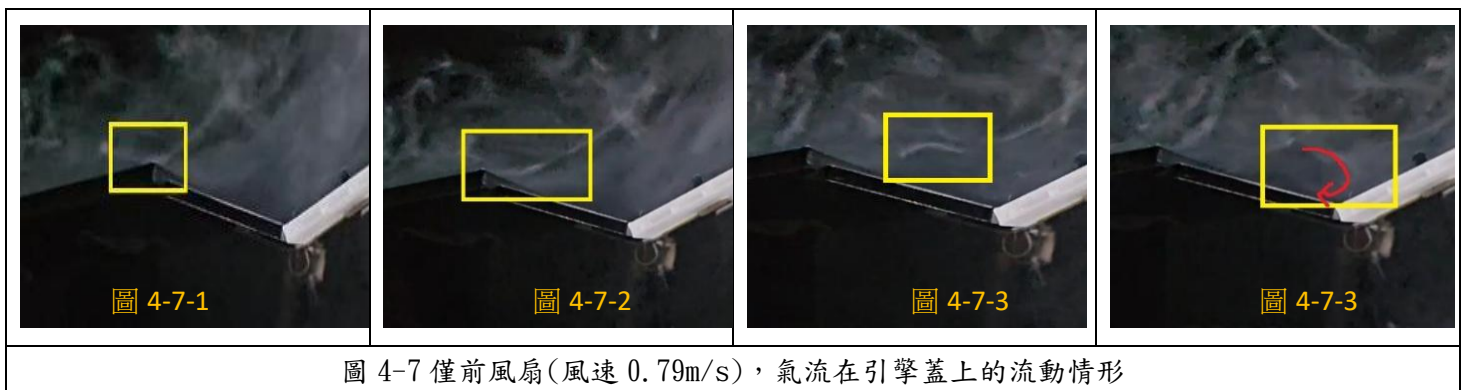


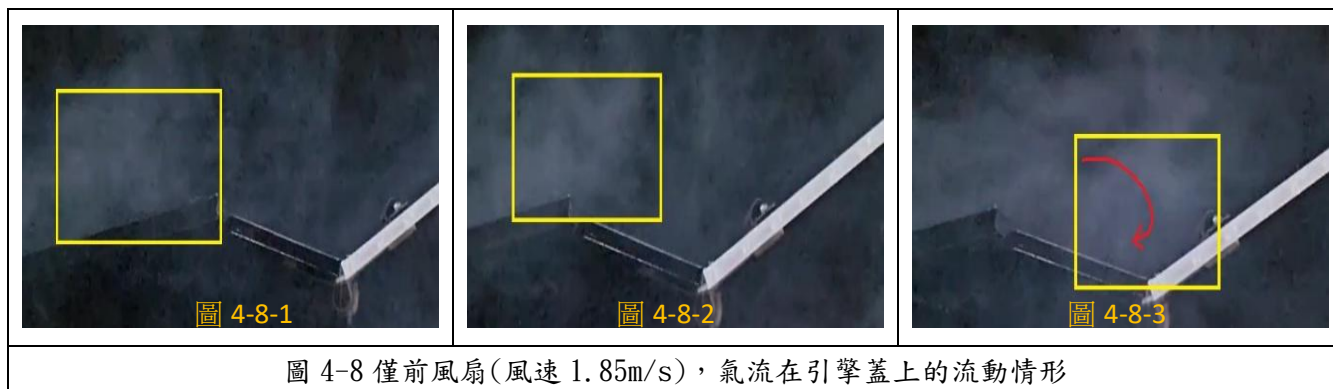
3. 分析：

- (1) 在僅開排風扇，觀察氣流在引擎蓋表面的情形，從超慢動作攝影中可以觀察到煙霧幾乎都是沿著引擎蓋表面平行流出，如圖 4-3。
- (2) 也有氣流在導流板上方飛過，直到接近擋風玻璃時，開始散開，如圖 4-4-5，而在擋風玻璃上分裂成兩股，少部分向下流回導流板，大部分繼續沿著擋風玻璃向上，如圖 4-4-6。
- (3) 在氣流在引擎蓋上方 5cm 的流動，我發現氣流幾乎都是平移向前，如圖 4-5、4-6。

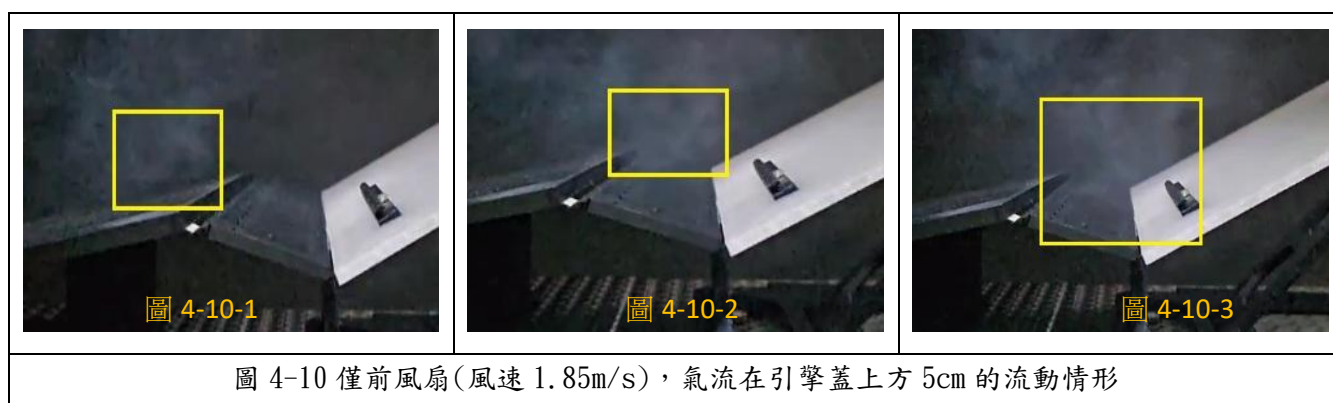
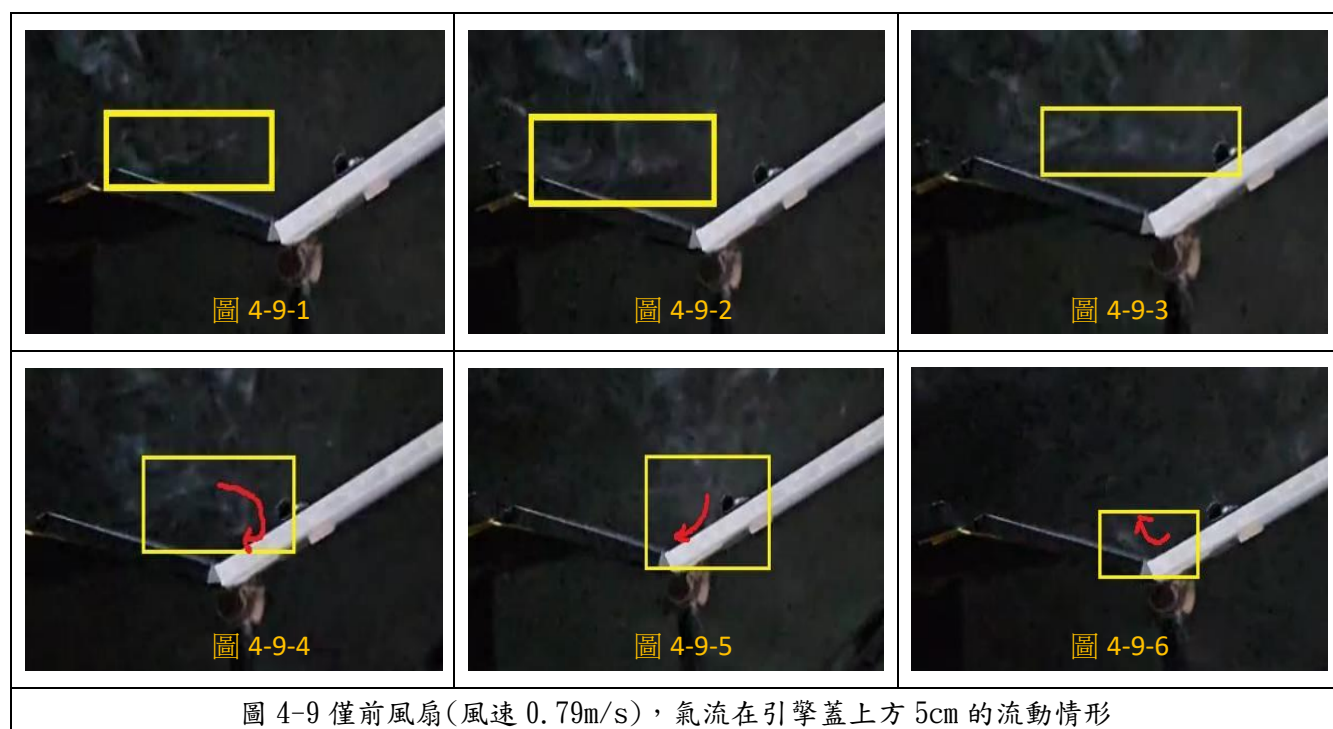
(二) 僅開前風扇：

1. 煙餅置於引擎蓋模型前端(如圖 3-20)：





2. 煙餅置於引擎蓋模型前端上方 5cm(圖 3-21)



3. 分析：

- (1) 在圖 4-4 與圖 4-5 中可以看出，在引擎蓋附近的氣流到達導流板上方時皆可形成一個明顯向下順時鐘旋轉的氣流，風速較慢時更明顯，此旋轉的氣流應為在。
- (2) 觀察高於引擎蓋上方 5cm 附近的氣流時，多數的錄影像顯示氣流多是

平行飛過上方，但也有部分氣流(偏下方，通常是較靠近引擎蓋的氣流)沿著導流板向下移動，稍微旋轉，如圖 4-7。

- (3) 在高於引擎蓋上方 5cm 附近的氣流部分，偶爾會有如圖 4-6 這樣明顯向下旋的氣流，且在圖 4-6-6 中可看到氣流再往上旋，影片中也可見氣流再旋轉一圈，但因截圖後不明顯而未放入。
- (4) 研究中也有使用較快風速，如單用前風扇風速 1(風速 2.52m/s)，但在風扇一打開時煙餅很快熄滅，因此用調速器調整較慢風速來觀察現象。
- (5) 前風扇氣流呈現較為混亂、不規則的現象。

五、重現停車單翻轉振動的情形

(一) 原停車單邊長縮小 3:1 進行實驗

- 1. 一般振動：小幅度振動。
- 2. 翻轉振動：使用原來停車單剪成縮小比例 1/3，即使用”前風扇風速 3+排風扇”(風速最大 4.19m/s)，停車單僅小幅振動，無法翻轉，。原本我預測風速及所有裝置縮成 1/3，原停車單也裁切成 1/3，應該可以看到停車單的翻轉振動，結果顯示無法翻轉。我又嘗試好幾種停車單的尺寸，如 1/2，原尺寸，皆無法翻轉。
- 3. 仔細觀察停車單的微幅振動情形，我推測可能是在這風速下停車單紙質太厚。

(二) 探討紙張材質及長度對停車單翻轉振動的影響

- 1. 量測紙張的基重
 - (1) 停車單：將 3 張停車單疊加，放在電子秤上總重 1.43 克，並量測每張停車單面積(其長度為 15.3 公分，寬度 5.1 公分)，
計算停車單的基重： $\frac{1.43}{3} \div (0.153 \times 0.051) \cong 61gsm$
 - (2) 秤量紙：取用 15 張秤量紙(較輕的紙)，放在電子秤上總重 4.25 克，並量測每張秤量紙面積(其長寬皆為 10.6cm)，
計算秤量紙的基重： $\frac{4.25}{15} \div (0.106 \times 0.106) \cong 25gsm$

2. 計算秤量紙的邊長

停車單基重：秤量紙基重=61:25 $\cong$ 12:5，與 3:1 接近，以停車單基重與秤量紙基重換算適合的秤量紙長寬，可得出本實驗用的秤量紙長寬定為 6.4cm 與 2.1cm，依據此數字進行裁切，並進行實驗。

結果發現秤量紙可以翻轉，但因原來規格 6.4*2.1cm 翻轉後雖能振動，但無法碰到擋風玻璃，因此我裁切了更長的秤量紙，如 8.1*2.1cm、7.6*2.1cm 等，在使用內插法，最後得到在長為 7.1cm 時為可以翻轉又能碰到擋風玻璃的最小長度。

3. 以秤量紙重現停車單振動，錄影後截圖如下



六、探討不同風速時停車單(秤量紙)一般振動、翻轉振動的頻率

將 phyphox 中的 Camera-Brightness(Luminance)功能中的感測亮度的長方框對準秤量紙振動位置，因本實驗為每 1/30 秒量測 1 次亮度，量測 10 秒，共有 300 個數據點，每種實驗情況皆量測 3 次，數據量相當龐大，因此不將數值放入研究結果，而是將數據作圖後，放入圖形。

(一)量測只開風扇，未放紙張時偵測的頻率(空白實驗)

1. 得到的圖形如下圖，實驗 3 次後求平均頻率如表。

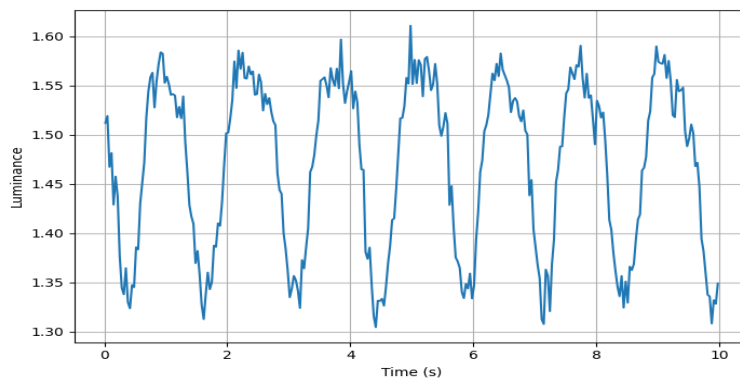


表 4-13 空白實驗

	頻率(Hz)
第 1 次	0.799
第 2 次	0.701
第 3 次	0.821
平均	0.774

圖 4-12 空白實驗，量測未放紙張時偵測的頻率

2. 分析：

(1) 由圖 4-11 可看出在沒有任何紙張振動時，就有亮度週期變化，我推測可能為強光手電筒本身亮度變化的頻率，因為實驗時周遭燈源已關閉，且使用不同風速下偵測出來的頻率皆相同，顯見不是由風扇轉動所引起。

(2) 若量測秤量紙振動頻率時有量測到頻率 0.774，可能為手電筒燈光造成。

(二)量測”前風扇風速 1+排風扇(風速 3.44m/s)”時的一般振動頻率及翻轉振動頻率

1. 一般振動頻率：共量測 3 次頻率，每次測 10 秒鐘，結果如下圖，並將 3 次的數據計算頻率後整理如表。

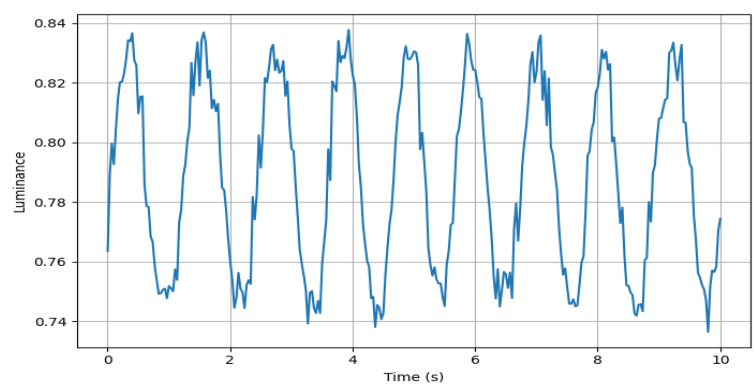


圖 4-13 ”前風扇風速 1+排風扇(風速 3.44m/s)”時一般振動的亮度變化

表 4-14 ”前風扇風速 1+排風扇(風速 3.44m/s)”一般振動情形

	一般振動頻率(Hz)
第 1 次	0.902
第 2 次	0.849
第 3 次	0.956
平均	0.902

2. 翻轉振動情形：

見圖 4-13，使用 FFT(快速傅立葉分析)，得到主頻率及次頻率，如下表 4-15，若不分主次頻率，再將頻率分成頻率 1(低頻)與頻率 2(低頻)兩類，可得表 4-16。

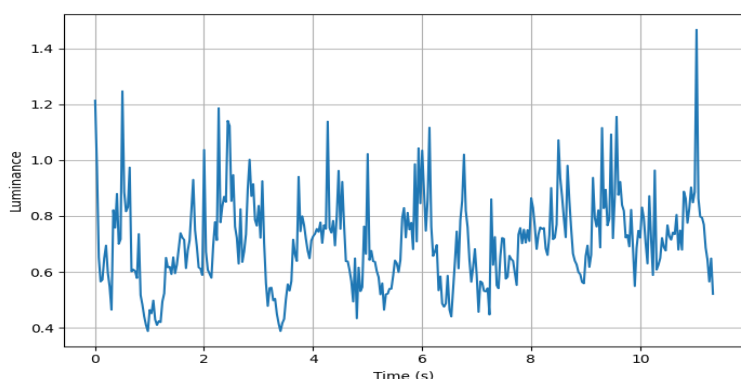


圖 4-14 ”前風扇風速 1+排風扇(風速 3.44m/s)”時翻轉振動的亮度變化

表 4-15 ”前風扇風速 1+排風扇(風速 3.44m/s)”時翻轉振動頻率

	主要頻率	次要頻率
第 1 次	1.001	0.455
第 2 次	0.53	1.147
第 3 次	0.338	1.182

表 4-16 將表 4-15 中頻率分成兩類

	低頻率	高頻率
第 1 次	0.455	1.001
第 2 次	0.53	1.147
第 3 次	0.338	1.182
平均	0.441	1.11

3. 分析：

(1) 比較圖 4-12 和圖 4-13，可看出一般振動亮度變化明顯有規律，而翻轉振動的亮度變化相當雜亂。

(2) 比較表 4-14 和表 4-15，一般振動和翻轉振動的頻率明顯不同。

(3) 表 4-16 中有二個頻率，一個是較慢速的振動 0.441Hz，一個是較快速的振動 1.11Hz，但有時慢速的是主要頻率，有時是快速的為主要頻率。

(三)量測”前風扇風速 2+排風扇(風速 4.09m/s)”時的一般振動頻率及翻轉振動頻率

1. 一般振動頻率：共量測 3 次頻率，每次測 10 秒鐘，結果如下圖 4-14，並將 3 次的數據計算頻率後整理如表 4-17。

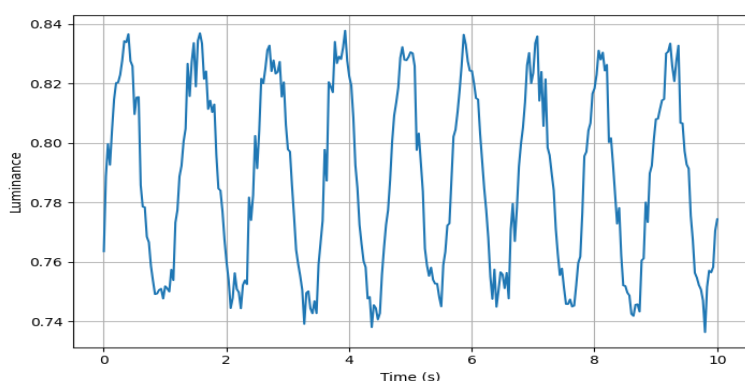


圖 4-15 ”前風扇風速 2+排風扇(風速 4.09m/s)”時一般振動的亮度變化

表 4-17 ”前風扇風速 2+排風扇(風速 4.09m/s)”一般振動情形	
	一般振動頻率(Hz)
第 1 次	0.871
第 2 次	0.905
第 3 次	0.985
平均	0.920

2. 翻轉振動情形：

見圖 4-15，使用 FFT(快速傅立葉分析)，得到主頻率及次頻率，如下表 4-18，若不分主次頻率，再將頻率分成頻率 1(低頻)與頻率 2(低頻)兩類，可得表 4-18。

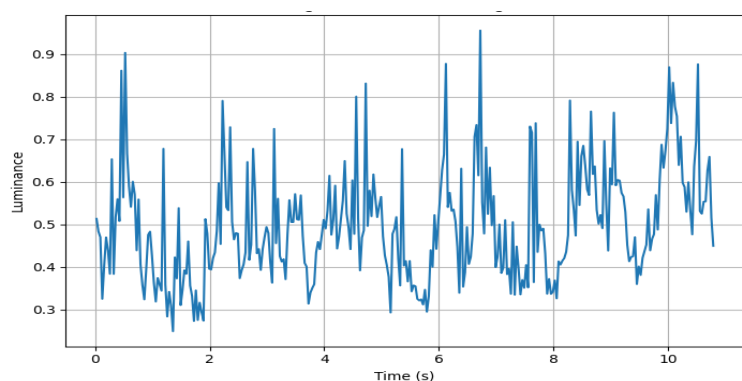


圖 4-16 ”前風扇風速 2+排風扇(風速 4.09m/s)”時翻轉振動的亮度變化

表 4-18 ”前風扇風速 2+排風扇(風速 4.09m/s)”時翻轉振動頻率		
	主要頻率	次要頻率
第 1 次	0.277	1.387
第 2 次	0.748	1.746
第 3 次	0.464	1.297

3. 分析：

- (1) 由圖 4-14 和圖 4-15，一般振動比較穩定。
- (2) 由表 4-19 翻轉振動的頻率可為兩類，0.496Hz 和 1.477Hz。

表 4-19 將表 4-18 中頻率分成兩類		
	低頻率	高頻率
第 1 次	0.277	1.387
第 2 次	0.748	1.746
第 3 次	0.464	1.297
平均	0.496	1.477

(四)量測”前風扇風速 3+排風扇(風速 4.19m/s)”時的一般振動頻率及翻轉振動頻率

1. 一般振動頻率：共量測 3 次頻率，每次測 10 秒鐘，結果如下圖，並將 3 次的數據計算頻率後整理如表。

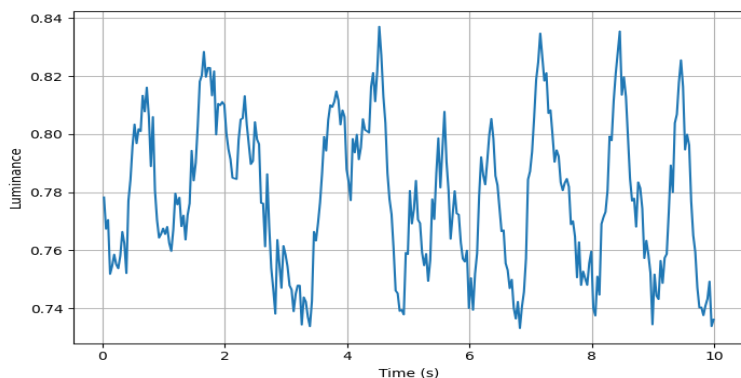


圖 4-17 ”前風扇風速 2+排風扇(風速 4.19m/s)”時一般振動的亮度變化

表 4-20 ”前風扇風速 3+排風扇 (風速 4.19m/s)”一般振動情形	
	一般振動頻率(Hz)
第 1 次	1.006
第 2 次	0.973
第 3 次	0.996
平均	0.992

2. 翻轉振動情形：

見圖 4-17，使用 FFT(快速傅立葉分析)，得到主頻率及次頻率，如下表 4-21，若不分主次頻率，再將頻率分成頻率 1(低頻)與頻率 2(低頻)兩類，可得表 4-22。

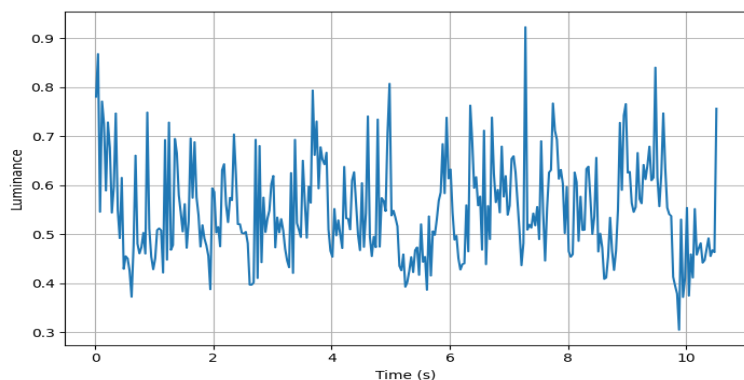


圖 4-18 ”前風扇風速 3+排風扇(風速 4.19m/s)”時翻轉振動的亮度變化

表 4-21 ”前風扇風速 3+排風扇 (風速 4.19m/s)”時翻轉振動頻率		
	主要頻率	次要頻率
第 1 次	1.466	0.092
第 2 次	1.290	0.369
第 3 次	0.859	1.718

表 4-22 將表 4-21 頻率分成兩類		
	低頻率	高頻率
第 1 次	0.092	1.466
第 2 次	0.369	1.290
第 3 次	0.859	1.718
平均	0.440	1.491

3. 分析：

- (1) 由圖 4-16 和圖 4-17，一般振動比較穩定，但較風速小時更不平穩。
- (2) 由表 4-22 翻轉振動的頻率可為兩類：0.440Hz 和 1.491Hz。

伍、 討論

一、 汽車上擋風玻璃風速與車速關係

圖 4-1 中，擋風玻璃風速約為車速的 0.85，也就是擋風玻璃風速均較車速慢。我推測可能的原因為氣流在引擎蓋上流動時受到的摩擦力，導致在擋風玻璃時的速率變慢，以及氣流撞擊到擋風玻璃時回彈造成的阻力，可在圖 4-3-6 中看到氣流撞到擋風玻璃後的回彈驗證。

二、 風洞內部風速穩定性

由表 4-2~4-4 可知，風洞中的每個點穩定性都相當好，但由表 4-6 知各位置的風速，圖 4-1 可知風洞中中間偏下方及前面偏下方的風速最快。

三、 在導流板處的作用力

1. 將導流板分成前半段及後半段，及全段量測作用力，當使用排風扇時，導流板處產生上升力，前半上升力較小、後半上升力較大，全段皆為上升力。這點與看到的文獻是相同的，這類溝紋會產生上升力(蔡旻岑、陳嘉馨，2018)。但在使用前風扇時，導流板處產生下壓力，前半段下壓力較小、後半段下壓力較大，全段皆為下壓力。我推測可能因導流板上方前半段與後半段的作用力不同，導致停車單在導流板產生劇烈的振動，因而有機會翻轉。
2. 風速越快作用力皆越大，但在排風扇與前風扇風速相近時，前風扇的下壓力較大。
3. 若同時開啟前風扇及排風扇效果會互相抵銷。
4. 生活中若無外界風速，只有汽車移動造成的氣流，應該較接近只開排風扇的情形，但平常汽車行駛時，也有來自前後左右不同的風，因此較接近前風扇及排風扇同時開啟的情形。

四、 汽車表面氣流流動

1. 由圖 4-3~4-6，僅開啟排風扇時，在引擎蓋及導流板處看到的氣流為平行流過，而在高空處亦維持平行流過，因此我推論為何僅開啟排風扇時，導流板上會產生上升力，可能原因為氣流平行流過後，因與下方空氣有黏滯力，從而帶走部分導流板上方空氣，再加上伯努力原理，可在導流板處產生上升力。如圖 5-1。
2. 僅開排風扇時，將空氣密度(1.2)、風速(1.68)、特徵長度(0.2)及空氣動力黏度係數(1.8×10^{-5})代入雷諾數的公式，可得到

$$Re = \frac{1.2 \times 1.68 \times 0.2}{1.8 \times 10^{-5}} = 2234 \quad < 2400 \text{ 為層流的狀態}$$

3. 在實驗過程中，可看到僅開啟前風扇時，氣流顯得相當混亂，推測可能是因為前風扇為吹入式，氣流在進入風

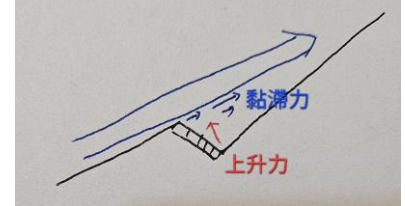


圖 5-1 由氣流觀察推論僅開啟排風扇時，產生上升力的原因的示意圖。

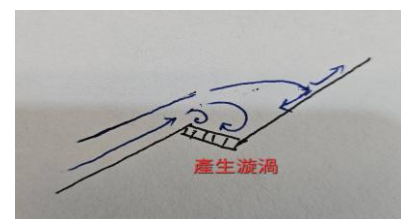


圖 5-2 由氣流觀察推論僅開啟前風扇時，產生下壓力的原因的示意圖。

洞前已經帶有不同的初速。

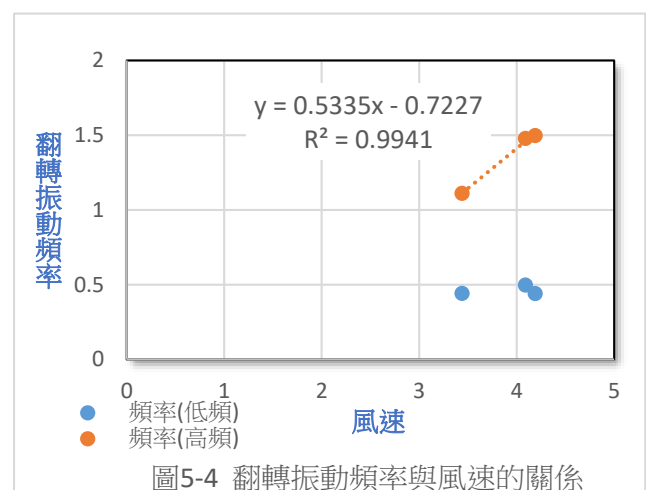
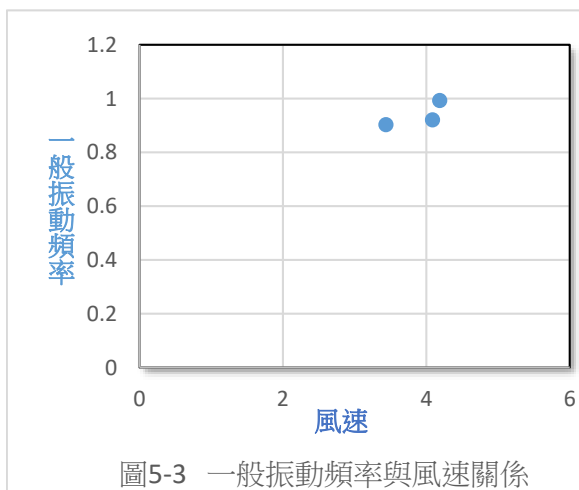
4. 由圖 4-7~4-10，氣流在導流板上產生向下順時針轉的漩渦，此漩渦在導流板前段像是氣流向壓，如圖 4-9-1，在導流板後半段，則是整個氣流向壓，如圖 4-7-3、4-8-3、4-9-5。因此我推測僅開啟前風扇時會產生下壓力的原因，可能是因為有向下順時針旋轉的氣流造成的下壓力。如圖 5-2。

五、重現停車單翻轉振動

1. 紙張的材質也是影響能否翻轉的原因，因為一開始的實驗設計只是將原停車單縮小，在風洞中並不能向上翻起，改用較輕薄的紙張-秤量紙替代停車單，再依比例計算紙張長寬，就能看到翻轉振動的現象。我對紙張進行對折測試，較厚的紙，也會有較大的硬度，推測紙張能否翻轉除了紙張的重量影響外，可能也與紙張彈性恢復力有關。

六、探討不同風速時，停車單一般振動與翻轉振動的頻率

1. 由圖 4-13~4-18，一般振動較為規律，翻轉振動較混亂。
2. 若將一般振動頻率與風速做圖，可得圖 5-3，顯示風速越快，振動頻率較大。
3. 在表 4-15、表 4-18 及表 4-21 中，我發現翻轉振動的主要頻率及次要頻率，恰好一個較高頻，一個較低頻，有時主要頻率是高頻，有時是低頻。低頻應可看成整張紙的緩慢移動，而高頻應該是紙張前端較快速的上下振動，我進行研究五重現停車單翻轉振動時，進行多次振動的錄影，可觀察到秤量紙的整張及前端振動有合併出現的情形。每一次風吹動的情況下有些不同，但這些基本頻率都會出現。



4. 若將翻轉振動頻率(高頻)與翻轉振動頻率(低頻)對風速做圖，如圖 5-4，會發現低頻部分與風速的關係不大，但高頻部分則隨著風速越快，高頻振動頻率越高，呈現線性關係。這與我在汽車上的感受類似，當車速越快時，確實聽到停車單拍打擋風玻璃的頻率就越密集。
5. 相同風速下，翻轉振動的高頻率會大於一般振動的頻率，與我在車上實際觀察到的現象相同。

陸、 結論

- 一、汽車擋風玻璃風速小於汽車實際速度，但兩者有線性關係，實際車速越快擋風玻璃風速也越快。
- 二、風洞中風速最快的位置在風洞中央及稍微前方偏下方位置。
- 三、當僅開啟排風扇(吸入式)，在導流板處產生上升力，以煙霧觀測可看到煙霧為平行引擎蓋移動，僅開啟前風扇(吹入式)，在導流板處產生下壓力，煙霧在導流板上形成向下順時鐘方向漩渦。
- 四、風速及紙張的基重會影響是否能翻轉，本研究因使用縮小模型且將風速減小，研究結果需將停車單換成秤量紙才能看到翻轉振動的現象。
- 五、停車單一般振動時有規律的振動頻率，其頻率隨風速增加，在翻轉振動時，為較為雜亂的振動形式，經由 FFT 分析，可得到主要頻率與次要頻率，其中一個為低頻、一個為高頻，低頻與風速變化關係不大，而高頻隨風速增加而增加，與風速呈現線性關係。

柒、 參考資料及其他

朱佳仁 (2006)。風工程概論。科技圖書。

王曉剛 (2020)。流體力學究竟在說什麼？。樂果文化。

張凱琪、張貽祥 (2023)。亂中有序—鈍體撞擊流場之渦流與亂流交互作用機制探討。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會 (高級中等學校組物理與天文學科)。

陳泓文 (2008)。口琴簧片振動與氣流的影響。

蔣昀佑 (2011)。小型低速風洞模擬大氣邊界層形成之研究-以朝陽科技大學風洞為例 [碩士論文，朝陽科技大學]。

蔡旻岑、陳嘉馨 (2018)。流動「生」力—平面溝紋對氣流升力及渦流形成探討。

雷諾數。載於維基百科。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%9B%B7%E8%AF%BA%E6%95%B0>