

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	160011
參展科別	物理與天文學
作品名稱	探討輪胎的摩擦係數與各物理量間的交互關係

就讀學校	臺北市數位實驗高級中等學校
指導教師	張志康
作者姓名	林星佑 駱存厚 張以心

關鍵詞	<u>摩擦係數、單車輪胎、接觸擠壓面積</u>
-----	-------------------------

作者簡介



Student A: I have loved learning science and doing hands-on experiments since I was a child, so I participated in various science competitions and science camps. This opportunity also allowed me to participate in an international science fair for the first time.

Student B: I am curious about everyday phenomena and often wonder why they occur. Joining this science fair allows me to explore these questions, improve my research skills, and share my findings with others.

Student C: My teacher encouraged me to participate with my classmates in this international science fair. I have previously worked on a small-scale science fair project about leaf blowers, but this is my first experience in a global competition. I am eager to enhance my English and writing skills through this opportunity.

附件三

研究報告封面

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：

科別：物理與天文學科

作品名稱：探討輪胎的摩擦係數與各物理量間的交互關係

關鍵詞：摩擦係數、單車輪胎、接觸擠壓面積（最多三個）

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

探討輪胎的摩擦係數與各物理量間的交互關係

中文作品摘要：

本研究旨在探討單車輪胎摩擦係數與各物理量之間的交互關係。由於摩擦係數的公式在多年以來備受許多質疑，我們決定透過實驗深入探討影響摩擦係數的各種物理量(如：接觸面積、正向力...等)是否有實質關聯。研究方法採用實徵研究進行試驗，調整輪胎胎壓並測量各狀態下的摩擦力、正向力和接觸面積，對不同胎壓下的摩擦力變化量與胎溫上升量進行比較，藉此驗證摩擦係數與胎壓、接觸面積間的非線性關係，找出單車輪胎的摩擦圓(friction circle)，並將實驗值與理論值進行一系列的比對。研究結果發現：隨著胎壓增加，輪胎的接觸面積減小，摩擦力會隨之減少，輪胎升溫量也著減少。此外，透過數值模擬和自製轉動儀器實驗分析並比較側向、切向摩擦力與摩擦係數的各項關聯性。總的來說，做好適當胎壓的調整對行駛的穩定和安全性具有直接影響，據此提供更多生活應用的良方。

英文作品摘要：

This study aims to investigate the relationship between the friction coefficient of bicycle tires and various physical parameters. Given the ongoing debate regarding the factors influencing the friction coefficient over the past several decades, we sought to determine whether a significant correlation exists between the friction coefficient, contact area, and normal force through empirical experimentation. We conducted tests using U-bikes under conditions of pure rolling, abrupt braking, and uniform circular motion, systematically varying tire pressure while measuring friction force, normal force, and contact area across different scenarios. Furthermore, we analyzed the variations in friction force about tire temperature changes at different tire pressures to validate the nonlinear relationship between friction force and tire pressure. Our findings indicate that an increase in tire pressure results in a decrease in the contact area of the tire, which subsequently leads to a reduction in friction force. Additionally, through numerical simulations and rotational experiments, we assessed the relationship between lateral friction force and centripetal force, confirming that the friction force required for circular motion increases with speed. The outcomes of this study underscore the importance of appropriate tire pressure adjustments, which directly influence driving stability and safety, thereby providing practical recommendations for cornering in competitive racing and cycling activities.

壹、前言

一、研究動機

摩擦力跟接觸面積真的有關係(張瑋真等人, 2018), 此研究結果重重地打破了我們在國高中物理課所學摩擦係數的科學概念。從一維的「摩擦力公式 $f_s = \mu_s \cdot N$ 」可知: 「切向摩擦力(f_s)」等於「摩擦係數(μ_s)」乘以「法向正向力(N)」, 其中, μ_s 僅與接觸面材質粗糙程度有關, 並與「接觸面積(A)」無關, 此理論公式似乎在近 20 年間頗受質疑。陳衍廷等人(2006)指出: 「輪胎摩擦力」的探討是很複雜的, 若將有形變、無形變的輪胎做一個區分, 各種紋路的輪胎(含光頭胎)在粗糙的路面上, 由於接觸面造成形變, 所以摩擦力較大; 但若接觸面無形變, 同材質不同紋路的輪胎, 摩擦力並沒有顯著差異。因此, 影響「輪胎摩擦力」的關鍵因素竟是「有無形變」, 亦即「壓在地面的接觸面積(A)」。

基於前人的研究發現, 我們想更釐清「影響輪胎摩擦力的關鍵因素-胎痕面積(A)」, 透過實徵研究, 找出「 μ_s 」與「 A 」的關係。此外, 基於「向量的概念」, 也想知道「切向摩擦力(f_s)」為何能與「法向正向力(N)」呈正比關係? 兩者之間的相關係數(即 μ_s)到底蘊含了什麼轉換因子在其中? 不打滑(純滾動)的單車在一維直線運動上容易分析, 倘若讓單車做繞圈不打滑的圓周運動, 「側向摩擦力(f_s')」當成向心力, 其量值與「運動速度(v)」、「 A 」、「 N 」的關係又為何? 彼此之間又有何交互作用? 若再進一步考量汽車不打滑瞬間左轉狀況下, 四顆輪胎的「 A (或輪胎磨損)」有何差異? 持續左轉彎繞圈的賽車, 在輪胎不打滑的前提下, 車身會如何傾斜? 安全考量下優先需要換胎的會是哪顆輪子? 透過數值模擬, 期能釐清「賽車過彎」與「四顆輪胎磨耗」的正確關係, 導正非科學的迷思概念。

二、研究目的

(一)研究架構:

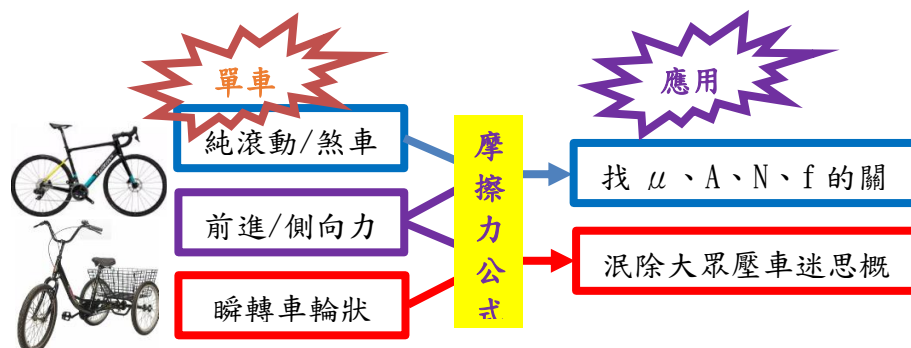


圖 1-2-1、研究架構圖

(二)研究目的:

1. 探討純滾動下前進的單車(受靜摩擦力 f_s)，胎壓(正向力 N)、 f_s 、壓痕面積(A)...等變因間的關係→求非線性 μ_s 實際值，與 N 、與 A 、與 f_s 之間的交互關係。

2. 探討輪胎從運動到煞死前進的單車(受動摩擦力 f_k)，胎壓(正向力 N)、 f_k 、壓痕面積(A)...等變因間的關係→求非線性 μ_k 實際值，與 N 、與 A 、與 f_k 之間的交互關係。
3. 探討物體作等速圓周運動時(受側向靜摩擦力 f_s')，胎壓(正向力 N)、 f_s' 、壓痕面積(A)、車速(v)...等變因間的關係→求不同車速下側向 μ_s 實際值與其他變因的交互關係。
4. 探討單車與多輪車在不同車速瞬轉下，車身傾斜狀況與車輪接面損耗的情形→透過思考實驗與數值模擬泯除大眾壓車迷思概念。

(三)文獻回顧：

1. 接觸面積(A)會/不會影響摩擦力(f_s)的解釋

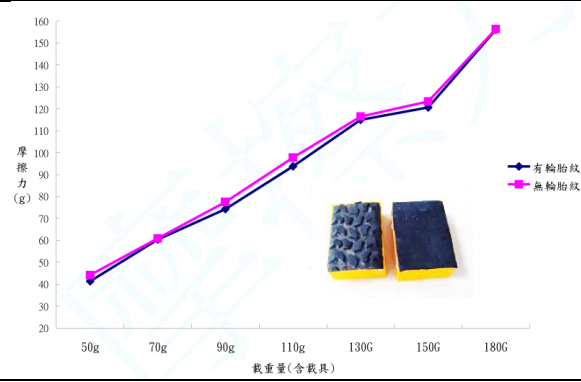
接觸面積(A)會影響摩擦力(f_s)	接觸面積(A)不會影響摩擦力(f_s)
 1. 粉塵像小圓球滾動。 2. 兩個面因粉塵接觸面積變小。 粉塵卡在兩個面縫隙中，因此接觸面積變小程度低	 實驗發現，有紋路的輪胎(接觸面積小)其摩擦力與光頭胎(接觸面積大)無差異
微觀來看，多了粉塵，減小了接觸面積，導致兩介面間錯動時摩擦力變小	
引自張瑋真等人(2018)	引自陳衍廷等人(2006)

圖 1-3-1、接觸面積與摩擦力關係示意圖

2. 為何粗糙程度(μ_s)會影響摩擦力大小的解釋

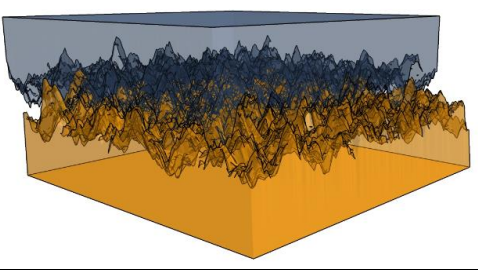
光滑面(左圖) VS 粗糙面(右圖)	粗糙度取決於兩個表面的[接點]與[材質]
 [左圖]硬的平底介面較光滑，較容易被拖動，摩擦力較小 [右圖]軟的平底介面產生卡榫效應時，摩擦力會變大	 [接觸面的粗糙度] 當兩個表面相互接觸時，粗糙的表面會在微觀尺度上有更多的「接觸點」產生。這些接觸點越多，表面間接觸的微觀面積越大，摩擦力就越大。
引自張瑋真等人(2018)	引自觀念物理教科書

圖 1-3-2、粗糙程度與摩擦力關係示意圖

3. 為何切線摩擦力(f)會與法向正向力(N)成正比的解釋

雖然切線摩擦力和法向正向力方向上互相垂直，但這兩個力在效果上並「不完全獨立」。法向正向力的大小決定了表面間「壓合程度」，而這會影響切線摩擦力的大小。具體來說，當法向正向力增大時，兩個表面之間的「黏合效應」增強，從而使得在切線方向上需要更大的力來克服這些接觸點的阻力，形成更大的摩擦力(Hewitt, 2020)。

4. 輪胎轉彎時，前進摩擦力(f_s)和側向摩擦力(f_s')的相關解釋

輪胎能夠提供的總摩擦力是由輪胎與地面間的接觸狀況決定的，當車輛在加速（前進摩擦力 f_s ）和轉彎（側向摩擦力 f_s' ）時，輪胎必須同時承受這兩種力，這會形成一個合成摩擦力。當車輛轉彎時，如果前進摩擦力過大(如加速過快)，側向摩擦力可能不夠抵抗離心力，導致輪胎無法保持足夠的抓地力而發生側滑。反之，如果車輛的側向摩擦力需求過大(如急速轉彎)，前進摩擦力就會減少，影響車輛的加速能力。根據觀念物理中的「摩擦圓(friction circle)」的概念，輪胎與地面的接觸面積和摩擦力的總和可以視為一個圓形。圓的半徑代表輪胎可以產生的最大摩擦力。當車輛轉彎並同時加速時， f_s 和 f_s' 會在這個圓內分配。超過這個總量，輪胎就會失去抓地力，導致打滑或失控。因此，前進摩擦力和側向摩擦力之間的平衡對車輛的操控至關重要。

貳、研究方法或過程

一、各項研究變因量測方式：

(一)前進靜摩擦力(f_s)之量測方式

確定單車為純滾動、前進力為靜摩擦力，紀錄前進靜摩擦力量值的方式：

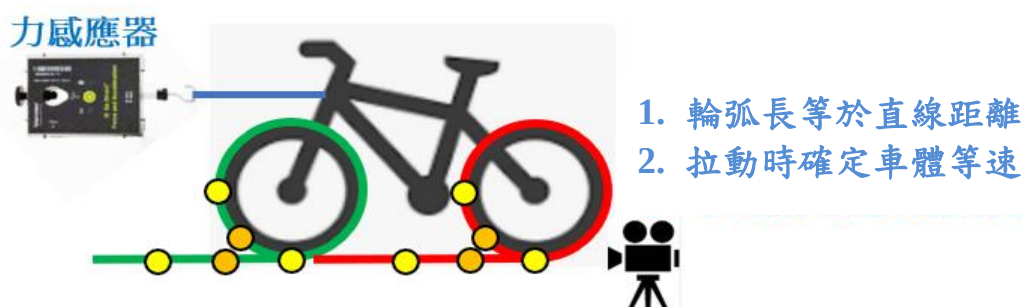


圖 2-1-1、靜摩擦力量測示意圖(圖片來源:作者自行繪製)

1. 當輪弧長等於直線距離時，可確定單車為純滾動。
2. 拉動時車體等速，可確定力感應器數值約等於前後輪靜摩擦力數值之總和。
3. 透過力感應器紀錄的 $F(\text{力})-t(\text{時間})$ 數值，可對應各輪痕點著地瞬間 2 倍靜摩擦力。

(二)煞車動摩擦力(f_k)之量測方式

類(一)量測 f_s 的方式，確定煞車夾咬死輪胎，輪胎底部恆為固定點與地面接觸，力感應器反勾車籃，透過力感應器紀錄的 $F(\text{力})-t(\text{時間})$ 數值，可找到運動過程的 f_k 值。

(三)胎壓轉換正向力(N)之計算方式

實驗前會將輪胎分別灌入 22、24、26、28、30 psi 的胎壓，透過正向力、壓力與面積的關係公式，將欲分析的某一瞬間之壓痕面積(A)乘上胎壓(P)，即可獲得正向力(N)。

(四)壓痕面積(A)之量測方式

透過輪胎壓過的痕跡，量測純滾動單車隨時間變化之壓痕面積(A)的方式：



圖 2-1-2、壓痕面積量測示意圖(圖片來源:作者自行繪製)

1. 讓單車前後輪輪胎沾滿墨汁，壓在地上的方格紙，透過方格紙計算痕點面積。
2. 當單車被拉動時，前後輪會在地面顯示出輾壓痕跡，紀錄各痕點的位置與寬度，推算前後輪上，不同痕點對應的 $A(\text{面積})-t(\text{時間})$ 數值，並與 $F-t$ 數值比對。

(五)側向靜摩擦力(f_s')之量測方式

1. 使用單車進行實驗：

進行側向靜摩擦力 (f_s') 的測量時，首先將單車設定固定胎壓(26 psi)，並控制實驗環境條件，確保穩定性。在場地中設定不同半徑的圓周軌跡(2、4、6 m)，並讓單車以 2、4、6 m/s 的速度進行等速圓周運動(如圖 2-1-3)。使用力感應器測量穩定繞圈狀態下的側向靜摩擦力(f_s')，並重複三次測量取平均值。過程中使用 Tracker 軟體記錄速度與軌跡，確保力感應器讀到的數據是在研究者設定的運動條件下所得到的 f_s' 值。

2. 使用自製轉動儀器進行實驗：

為了確保輪胎皮摩擦係數(μ_s)值的一致性，研究者自行製造了一具轉動儀器進行實驗(如圖 2-1-4)，將滑塊底部黏上輪胎皮，調整軸心馬達的轉速，讓滑塊以棉繩與固定的力感應器綁妥，透過馬達的轉動，讀取力感應器的向心力值，並推算 μ_s 與前述結果比對。

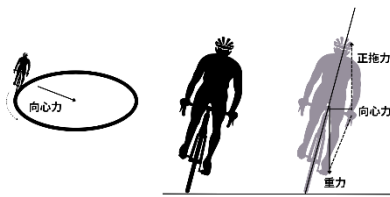


圖 2-1-3、練習讓單車繞圈做等速圓周運動
(圖片來源: 作者自行繪製)

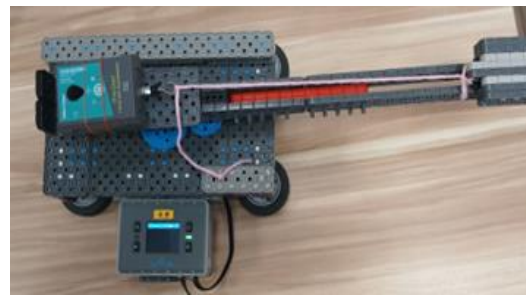


圖 2-1-4、自製轉動儀器
(圖片來源: 作者自行拍攝)

(六) 賽車過彎車身傾斜度與輪胎耗損量的數值模擬分析方式

本研究的數值模擬分析方式採用極度擬真的「賽車模擬器」在左轉彎較多的跑道上進行實驗。我們利用轉彎幅度最大的彎道，並在每圈通過該彎道時，詳細紀錄車輛的「時速、車身傾斜角度、胎溫變化和輪胎耗損程度」。

二、研究設備與器材：

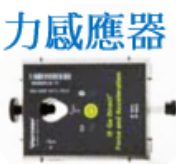
		
U-bike 腳踏車 (輪胎的摩擦力實驗)	紅外線溫度計 (測輪胎溫度變化量)	顏料水與方格紙 (換算壓痕面積)
		
電子打氣機 (紀錄胎壓)	力感應器 (測摩擦力值)	tracker (讓輪胎純滾動) (分析車速、傾斜角度)

圖 2-2-1、各式實驗器材(圖片來源: 作者自行拍攝)

三、研究方法與步驟：

(一) 實驗 1：純滾動單車(靜摩擦力 f_s) 各種變因之間的關係

1. 研究方法：實徵研究法。

2. 研究步驟：

(1) 使用電子打氣機將 U-bike 前後輪胎均打到指定胎壓 (22~30 psi)。

(2) 將前後輪胎各貼上 5 個標記點，每個標記點的間距為 10 公分；再將 U-bike 底下墊方格紙，並於前後輪的標記點區域塗上墨汁，最後由一位同學將 U-bike 舉起、另一位

同學協助將前後輪的標記接地點對準輕觸於紙上，藉此紀錄前後胎第 1 對標記點、第 2 對標記點、.....第 5 對標記點與地面的接觸面積。

(3)將力感應器的鉤子勾在 U-bike 籃上，練習透過力感應器將 U-bike 向前拉動 40 公分，並於過程中確保腳踏車的平衡、務必讓前後輪均以純滾動的方式前進。

(4)先以紅外線溫度計測量前後輪胎接地點的啟動溫度，再使用力感應器拉動 U-bike，透過每 10 公分所設置的各個標記點，下載感應器中 CSV 檔確定各標記點所對應的拉力(約 2 倍 f_s)。當車體被拉動 40 公分後立即停下，再量測前後輪的終止溫度。

(5)使用 Tracker 軟體分析車體拉動過程的 x-t、v-t 圖，並推算前後輪胎的接觸面積與 μ_s

(二)實驗 2：運動中煞停的單車(動摩擦力 f_k)各種變因之間的關係

1.研究方法：實徵研究法。

2.研究步驟：

(1)使用電子打氣機將腳踏車輪胎打到指定胎壓(22~30 psi)。

(2)在車籃上反掛力感測器，騎行一段距離後立即煞車(確保車體是受動摩擦力作用)，紀錄煞車前後的胎溫變化量，並以力感測器中的 CSV 檔紀錄煞停過程的 f_k 值。

(3)使用 Tracker 分析煞停前的瞬間速度(v-t 圖)和煞停過程走的距離(x-t 圖)，推算 μ_k 。

(三)實驗 3：探討物體作等速圓周運動時(受側向靜摩擦力 f_s')各種變因之間的關係

1.研究方法：實徵研究法。

(1)使用單車進行等速圓周運動，分析各種變因之間的關係。

(2)使用自製轉動儀器進行實驗，分析各種變因之間的關係。

2.研究步驟：

(1)單車實驗：

A. 變因分析：設定車速(2、4、6 m/s)與圓周運動半徑(2、4、6 m)為操縱變因，控制地面材質、車體重量、車身傾斜角度和外在環境條件。利用力感應器測量側向靜摩擦力(f_s')、電子打氣機確定胎壓值(26 psi)、騎行時需確定傾斜角(約 15 度)與壓痕面積推算正向力，並用 tracker 軟體分析車速、推算向心力理論值與實際值比對。

B. 騎乘者練習讓 U-bike 在不同車速下繞行(2、4、6 m/s)，並使其進行等速圓周運動。在保持等速運動的情況下，將力感應器同樣勾在車籃上，確定力感應器的方向與切線方向垂直，紀錄力感應器的 CSV 檔讀取穩定的數值，此值即為「側向靜摩擦力(f_s')」的實際值，並與前述物理公式中得到的向心力理論值做比對。

C. 使用 excel 計算不同速率下的摩擦係數 μ_s ，並製作圖表進行數據分析。

- D. 使用 Tracker 軟體分析車體運動的 v-t 圖，並推算輪胎對地的接觸面積與正向力。
- E. 重複實驗三次，確保數據的穩定性，並對實際值與理論值進行比對分析。

(2)自製轉動儀器實驗：

- A. 變因分析：設定滑塊轉速為縱變因 (0.8m/s、1.0m/s、1.2m/s)，控制圓周運動半徑(0.2m)、摩擦材質與滑塊質量，實驗裝置如右圖 2-3-1 所示。

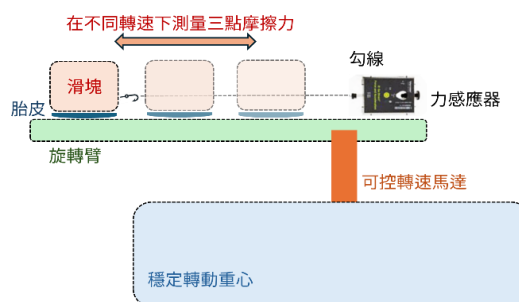


圖 2-3-1、自製轉動實驗儀器示意圖
(圖片來源:作者自行繪製)

- B. 將物塊底部黏上輪胎橡膠皮，在不同的轉速下運行，並使其以固定半徑(20 cm)進行等速圓周運動。在保持等速率情況下，使用力感應器紀錄側向靜摩擦力(f_s')，推算輪胎橡膠皮的 μ_s 值，並與單車實驗的結果進行比對。

(四)實驗 4：探討單車與多輪車在不同車速瞬轉下的車身傾斜狀況與車輪接面損耗

1.研究方法：實徵研究法+數值模擬法。

2.研究步驟：

(1)單車實驗(實徵研究法)：

- A. 在不同車速下(2、4、6 m/s)瞬間左轉，使用影像設備記錄車輛傾斜角度。
- B. 使用紅外線溫度計測量轉彎前後胎面的溫度變化，記錄胎面溫度的上升量。
- C. 使用 tracker 軟體分析影像並記錄車輪與地面的接觸面積，觀察輪胎的損耗情況。
- D. 重複實驗三次，確保數據穩定性，並以 excel 繪製數據圖進行推論分析。

(2)賽車模擬器(數值模擬法)：

- A. 選用賽車模擬器中最多彎道的賽道，也是最多左彎的賽道(Jeddah Street Circuit)，總計 11 個右彎、16 個左彎，高達 27 個彎道。
- B. 利用模擬器內建的模擬數值，探討「胎溫、輪胎磨損程度、賽車速度」等數據。
- C. 透過五圈不同賽車速度的模擬，計算出胎溫變化與輪胎磨損程度值，並針對畫面截圖分析視覺效果(車身傾斜狀況)，探討數值模擬數據的合理性。

參、研究結果與討論

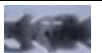
一、實驗 1：純滾動單車(靜摩擦力)各種變因之間的關係

(一)實驗數據與圖表：

1.使用力感應器計算純滾動單車各痕點的靜摩擦力 f_s ：[地面材質：雨天加油站水泥地]

(1)實驗數據：拉動過程確定純滾動；平均速度 $v=1.5(m/s)$ ；痕點間距離 $S=10(cm)$

表 3-1-1、純滾動單車各痕點的靜摩擦力

胎壓 (psi)	前輪 (力感應器數值=2f _s)				後輪 (力感應器數值=2f _s)			
	痕點 1 f _s (N)	痕點 2 f _s (N)	痕點 3 f _s (N)	痕點 4 f _s (N)	痕點 1 f _s (N)	痕點 2 f _s (N)	痕點 3 f _s (N)	痕點 4 f _s (N)
22	38.03	32.61	31.29	40.48	38.03	32.61	31.29	40.48
24	29.84	37.72	31.39	32.69	41.51	37.72	31.39	32.69
26	25.86	25.87	27.97	24.37	25.86	25.87	27.97	24.37
28	27.24	25.19	21.77	21.56	27.72	25.19	21.77	21.56
30	22.89	23.82	22.17	25.83	23.82	23.82	22.17	25.83
照片	痕點 1 的 接觸面積	痕點 2 的 接觸面積	痕點 3 的 接觸面積	痕點 4 的 接觸面積	痕點 1 的 接觸面積	痕點 2 的 接觸面積	痕點 3 的 接觸面積	痕點 4 的 接觸面積
(cm ²)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)	 (5.8~5.9)

(2)實驗圖表：

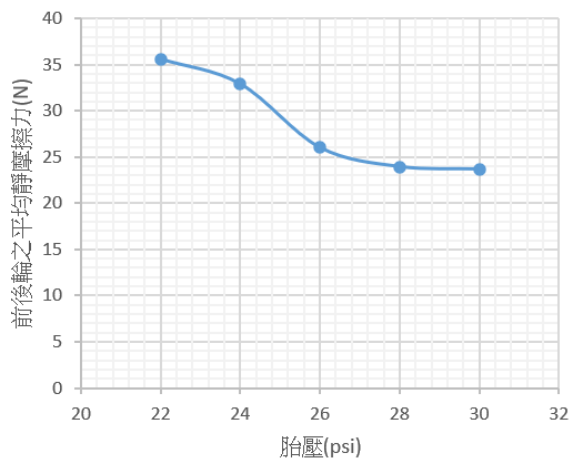


圖 3-1-1、胎壓與前後輪平均靜摩擦力之關係圖

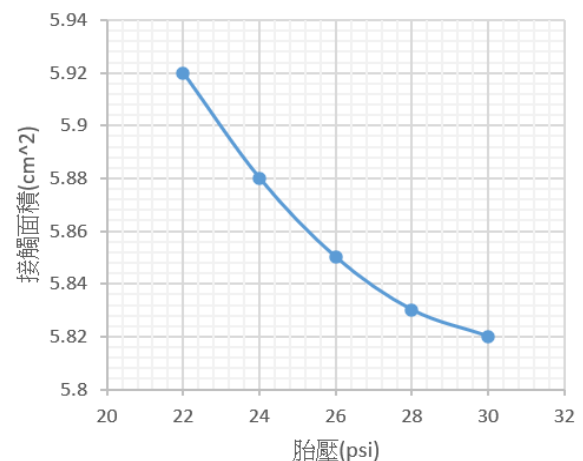


圖 3-1-2、胎壓與前後輪平均接觸面積之關係圖

(3)實驗值推算出的摩擦係數 μ_s (P 為胎壓，A 為痕點面積)

表 3-1-2、純滾動單車不同胎壓與前後輪的摩擦係數

胎壓 (psi)	前輪 ($\mu_s = f_s/PA$)				後輪 ($\mu_s = f_s/PA$)			
	痕點 1 μ_s	痕點 2 μ_s	痕點 3 μ_s	痕點 4 μ_s	痕點 1 μ_s	痕點 2 μ_s	痕點 3 μ_s	痕點 4 μ_s
22	0.424	0.363	0.349	0.451	0.424	0.363	0.349	0.451
	實驗值 $\mu_s = 0.3 \sim 0.5$				實驗值 $\mu_s = 0.3 \sim 0.5$			
24	0.307	0.388	0.323	0.336	0.427	0.388	0.323	0.336
	實驗值 $\mu_s = 0.3 \sim 0.4$				實驗值 $\mu_s = 0.3 \sim 0.4$			
26	0.247	0.247	0.267	0.233	0.247	0.247	0.267	0.233
	實驗值 $\mu_s = 0.2 \sim 0.3$				實驗值 $\mu_s = 0.2 \sim 0.3$			

28	0.242	0.224	0.194	0.192	0.247	0.224	0.194	0.192
	實驗值 $\mu_s = 0.2$ 左右				實驗值 $\mu_s = 0.2$ 左右			
30	0.190	0.198	0.184	0.215	0.198	0.198	0.184	0.215
	實驗值 $\mu_s = 0.2$ 左右				實驗值 $\mu_s = 0.2$ 左右			

2.使用紅外線感應式溫度計計算胎溫上升量：

表 3-1-3、純滾動單車不同胎壓的胎溫上升量

胎壓 (psi)	痕點面積(cm ²)			胎溫 上升 (K)	前進 距離 (cm)	摩擦力(f _s = μ _s N)、正向力(N=PA)								摩擦 係數 (μ _s) 理論 範圍
	前輪	後輪	平均			前輪痕寬 3.2cm				後輪痕寬 3.2cm				
						痕 長 1	痕 長 2	痕 長 3	痕 長 4	痕 長 1	痕 長 2	痕 長 3	痕 長 4	
22	5.92	5.92	5.92	0.4	40	1.85	1.84	1.85	1.86	1.85	1.85	1.84	1.86	0.3 0.5 雨天 濕滑
擠壓正向力 = 89.80(N)			痕點面積 = 5.888~5.952 (cm ²) 約 5.92 (cm ²)											
24	5.88	5.87	5.88	0.38	40	1.84	1.84	1.84	1.85	1.83	1.84	1.84	1.84	
擠壓正向力 = 97.30(N)			痕點面積 = 5.856~5.920 (cm ²) 約 5.88 (cm ²)											
26	5.85	5.85	5.85	0.3	40	1.83	1.82	1.83	1.83	1.83	1.83	1.84	1.83	0.6 0.7 晴天 乾燥
擠壓正向力 = 104.87(N)			痕點面積 = 5.824~5.888 (cm ²) 約 5.85 (cm ²)											
28	5.82	5.84	5.83	0.22	40	1.82	1.82	1.83	1.81	1.82	1.82	1.81	1.82	
擠壓正向力 = 112.55(N)			痕點面積 = 5.792~5.856 (cm ²) 約 5.83 (cm ²)											
30	5.82	5.82	5.82	0.2	40	1.82	1.81	1.81	1.80	1.82	1.81	1.82	1.82	
擠壓正向力 = 120.38(N)			痕點面積 = 5.760~5.824 (cm ²) 約 5.82 (cm ²)											

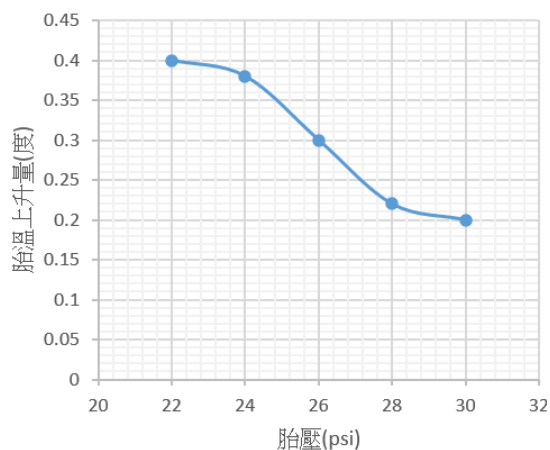


圖 3-1-3、胎壓與胎溫上升量之關係

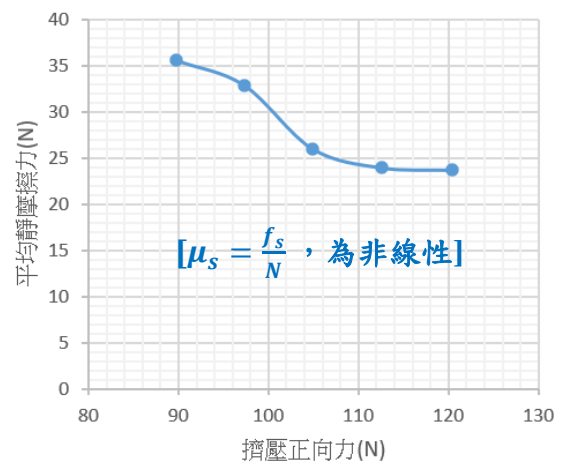


圖 3-1-4、擠壓正向力與靜摩擦力之關係

(二)實驗結果與推論：

實驗 1 針對不同胎壓(22~30 psi)的情況下，以純滾動作一維直線運動的 U-bike 進行靜摩擦力(f_s)實驗的測試，並記錄了各種變因間的關係。

1. 從圖 3-1-1 與圖 3-1-2 的實驗結果可知：隨著胎壓從 22 psi 增加至 30 psi 的過程中，「前後輪的平均靜摩擦力(f_s)」與「接觸面積(A)」均有漸小的趨勢。其中， f_s 在 22-24 psi 時的量值顯著大於 26-30 psi；而 A 會隨著胎壓的變大而下降量越來越不明顯。若從理論觀點來詮釋，當胎壓較低時，輪胎接觸面積(A)較大，因而增強了摩擦力(f_s)；而隨著胎壓的增加，接觸面積(A)隨之減小，致使摩擦力(f_s)亦隨之下降。
2. 從圖 3-1-3 與圖 3-1-4 的實驗結果可知：隨著胎壓從 22 psi 增加至 30 psi 的過程中，胎溫上升量有逐漸變小的趨勢；隨著正向擠壓力(即胎壓乘上接觸面積)增大的過程中，輪胎的平均靜摩擦力也有逐漸變小的趨勢。值得一提的是，兩圖曲線的變化趨勢竟發生了良好的一致性。若從理論觀點來詮釋，輪胎的升溫源自於接觸面間靜摩擦力作功而來，因為 U-bike 的前進距離固定(40 cm)，所以靜摩擦力的大小會與作功值成正比；亦即低胎壓時、靜摩擦力較大、作功產生熱能的量較多、輪胎升溫量也較大。
3. 從力感應器測得的數據中顯示：前後輪靜摩擦力在相同胎壓下仍有不穩定的數值，此結果可能源於車體運動過程中的重心偏移或車輪各痕點的形變程度不同所致。本實驗結果證實了「胎壓量值(P)」對「接觸面積(A)」與「靜摩擦力(f_s)」具有明顯非線性的影響；其中， $\mu_s = \frac{f_s}{N} = \frac{f_s}{PA} \neq constant$ ，且 μ_s 為非線性的一個常數(落在 0.2~0.5 間)。總之，適當調整胎壓(P)能有效改變接觸面積(A)的大小，對摩擦係數(μ_s)有間接影響。

二、實驗 2：運動中煞停的單車(動摩擦力)各種變因之間的關係

(一)實驗數據與圖表：

1. 使用力感應器與 Tracker 分別計算 U-bike 煞停時的動摩擦力並記錄胎溫上升量：

表 3-2-1、運動中煞停的單車與胎溫上升量

胎壓 (psi)	前輪初始胎溫：24.4℃，地磚長度：30 公分(校正尺)				
	煞停距離 (m)	溫度變化量 (℃)	煞停前速度 (m/s)	時間 (s)	影像
22	0.600	0.4	0.835	2.2	
24	0.620	0.35	0.808	2.3	
26	0.635	0.3	0.787	2.4	
28	0.680	0.3	0.784	2.5	
30	0.700	0.25	0.767	2.6	

[照片來源:作者自行拍攝]

2. 實驗圖表：

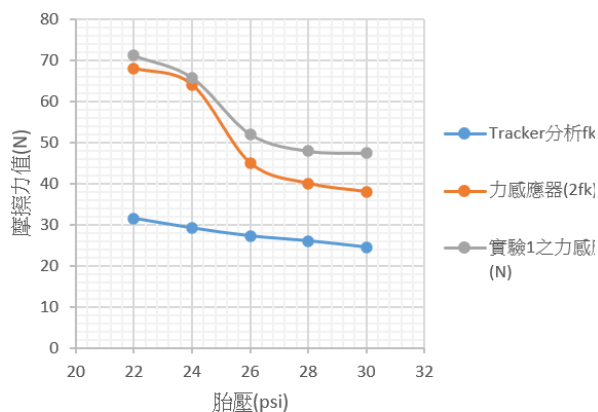


圖 3-2-1、胎壓與摩擦力值之關係

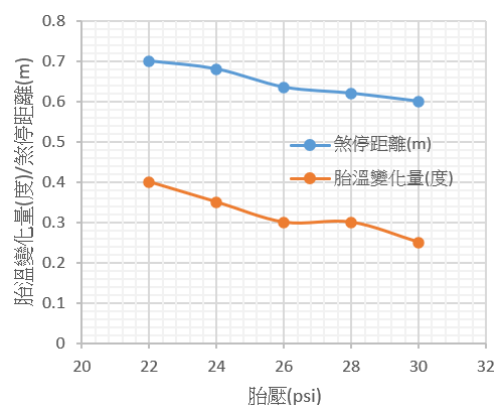


圖 3-2-2、胎壓對胎溫變化與煞停距離關係

(二)實驗結果與推論：

實驗 2 針對不同胎壓(22~30 psi)的情況下，以一維直線運動的 U-bike 進行急煞動摩擦力(f_k)實驗的測試，並記錄了各種變因間的關係。

- 從圖 3-2-1 的實驗結果可知：隨著胎壓的增加，U-bike 的摩擦力值仍有逐漸變小的趨勢。其中，(1)動摩擦力值依然小於靜摩擦力值，此結果與理論物理的觀點一致。(2)以 Tracker 分析的數據結果，其動摩擦值似乎不受胎壓大小而影響(f_k 均落在 30N 上下)，而以力感應器分析的實驗結果，其動摩擦值在胎壓為 22-24psi 時顯著大於 26-30psi。
- 從圖 3-2-2 的實驗結果可知：(1)隨著胎壓的增加，U-bike 的煞停距離逐漸減長，此結果說明較高的胎壓能提高輪胎的剛性，從而減少了與地面的接觸面積，拉長了煞停的時間。(2)胎溫變化量在不同胎壓下顯示出一定程度的差異，但整體變化量不大，此結果可能與輪胎材料的熱傳導性及陰雨環境有關。在胎壓較高的情況下，輪胎的接地面積減少，摩擦熱亦相對降低，而整段煞車過程中仍有動摩擦力作負功而產生溫度變化。
- 從圖 3-2-1 中力感應器測得的數值可知：前後輪的動摩擦力在不同胎壓時均不同。同時，本實驗結果也證實了「胎壓量值(P)」對「動摩擦力(f_k)」亦有明顯非線性的影響；其中， $\mu_k = \frac{f_k}{N} = \frac{f_k}{PA} \neq \text{constant}$ ，且 μ_k 為非線性的一個小於 μ_s 的常數(落在 0.1~0.4 間)。總之，適當調整胎壓(P)也會對動摩擦係數(μ_k)有間接的影響。

三、實驗 3：等速圓周運動單車(側向靜摩擦力 f_s')各種變因之間的關係

(一)實驗數據與圖表：

- 人車做等速圓周運動 [人+車的總質量=63+20=83 kg & 人車鉛錘線傾角約 15 度]

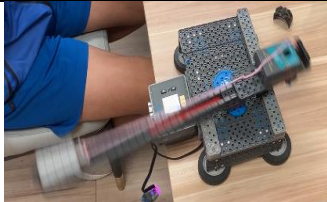
表 3-3-1 人車做等速圓周運動量測數據

車速 v (m/s)	實驗照片	旋轉 半徑 (m)	力感 應器 (N)	向心力(N) $[f_s' = m \frac{v^2}{R}]$	正向力(N) $[N = PA]$	摩擦係數 $[\mu_s = \frac{f_s'}{N}]$
2		2	188	166.0	503.0	0.37/0.33
		4	94.8	83.0	237.1	0.40/0.35
		6	62.8	55.3	149.5	0.42/0.37
4		2	X	664.0	[無法穩定作圓運動]	
		4	339	332.0	737.8	0.46/0.45
		6	231	221.3	481.1	0.48/0.46
6		2	X	1494.0	[無法穩定作圓運動]	
		4	X	747.0	[無法穩定作圓運動]	
		6	X	498.0	[無法穩定作圓運動]	

[照片來源:作者自行拍攝]

2.使用自製研發儀器量測實驗[滑塊質量= 5 kg]

表 3-3-2 自製研發儀器量測數據

轉速 (m/s)	實驗照片	旋轉 半徑 (m)	力感 應器 (N)	向心力 $[f_s' = m \frac{v^2}{R}]$	正向力 $[N = mg]$	摩擦係數 $[\mu_s = \frac{f_s'}{N}]$
0.8		0.2	18	16	49	0.37/0.33
		0.2	19	16	49	0.39/0.33
		0.2	18	16	49	0.37/0.33
1.0		0.2	24	25	49	0.49/0.51
		0.2	25	25	49	0.51/0.51
		0.2	26	25	49	0.53/0.51
1.2		0.2	36	36	49	0.73/0.73
		0.2	38	36	49	0.78/0.73
		0.2	37	36	49	0.76/0.73

[照片來源:作者自行拍攝]

3.分析二維等速圓周運動單車，胎壓(26psi)與壓痕面積固定下，車速(v)與 f_s' (μ_s)的關係

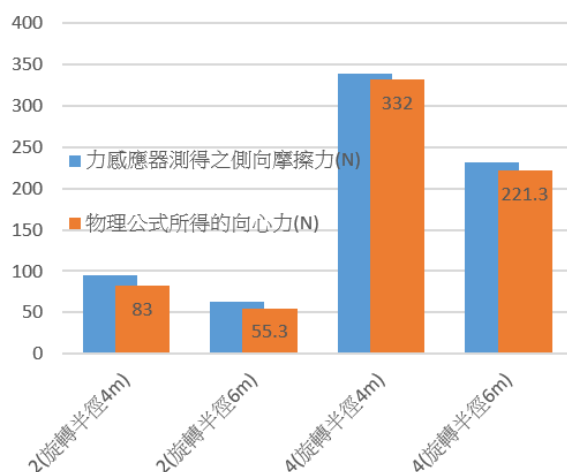


圖 3-3-1、單車車速與側向摩擦力之關係

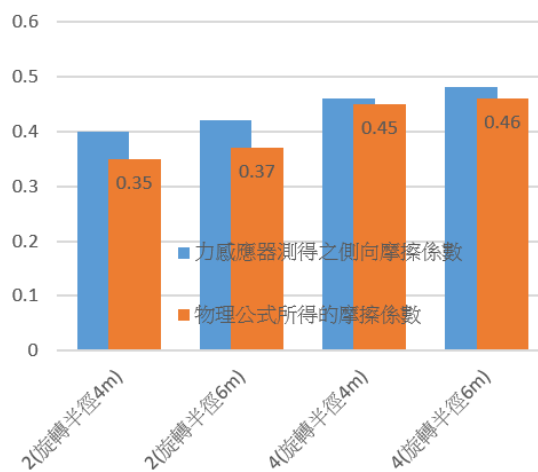


圖 3-3-2、單車車速與側向摩擦係數之關係

4.分析二維等速圓周運動滑塊，質量與旋轉半徑(0.2m)固定下，速度(v)與 $f_s'(\mu_s)$ 的關係

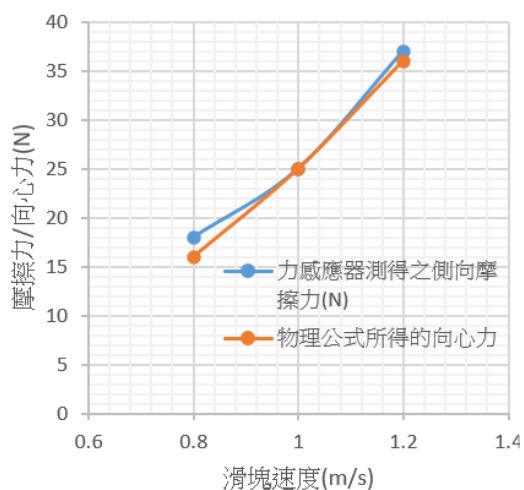


圖 3-3-3、滑塊速度與側向摩擦力之關係

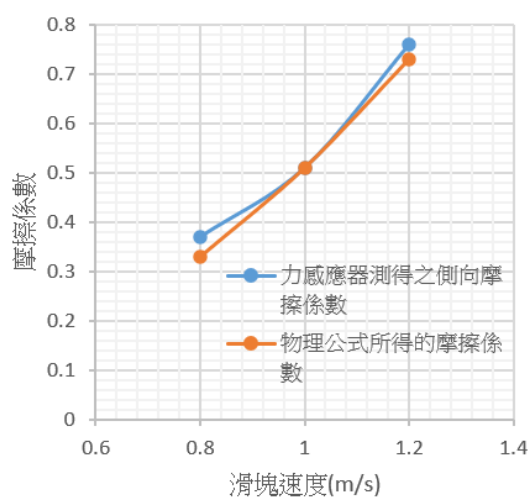


圖 3-3-4、滑塊速度與側向摩擦係數之關係

5.分析輪胎橡膠皮在切線與向心方向的摩擦圓(friction circle)

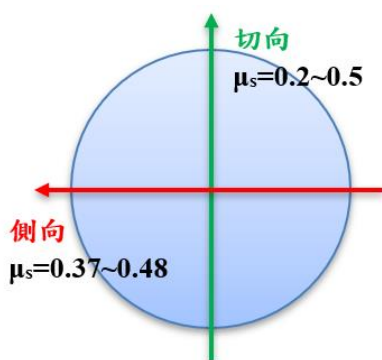


圖 3-3-5、單車實驗值的摩擦圓

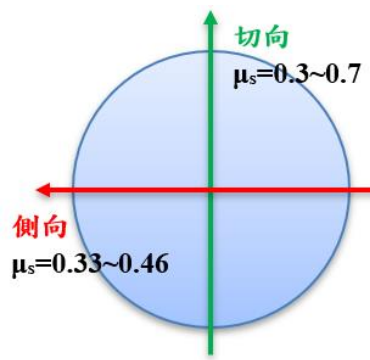


圖 3-3-6、單車理論值的摩擦圓

(二)實驗結果與推論：

實驗 3 針對不同車速與實驗裝置的情況下，以二維等速圓周運動的物體進行多樣態實驗的測試，並記錄了各種變因間的關係。

1. 從圖 3-3-1、圖 3-3-2 的實驗結果可知：在相同的繞轉半徑下，車速越大時，側向靜摩擦力就越大，同時，側向摩擦係數也跟著變大。此外，若進一步比較「力感應器的量值(實驗值)」與「物理公式的向心力(理論值)」可知，在相同的車速下，兩者靜摩擦力的數值相去不遠，唯實驗值的摩擦係數略比理論值稍大一些，但並不顯著。
2. 從圖 3-3-3、圖 3-3-4 的實驗結果可知：(1)隨著滑塊速度的增加，受到的側向靜摩擦力(向心力)逐漸增加，同時，「力感應器的量值(實驗值)」與「物理公式的向心力(理論值)」的數據間，彼此有良好的一致性。(2)輪胎的側向摩擦係數可達 0.3~0.8 的範圍區間，垂直切線方向產生的側向摩擦力(向心力)可比切向摩擦力的量值稍大一些。
3. 從圖 3-3-5、圖 3-3-6 中的摩擦圓(friction circle)可知：在輪胎的二維摩擦係數中，(1)切向摩擦係數實驗值的數據可達 0.2~0.5 的範圍區間(略小)，而理論值的數據可達 0.3~0.7 的區間。(2)側向摩擦係數實驗值的數據可達 0.37~0.48 的範圍區間(略大)，而理論值的數據可達 0.33~0.46 的區間。同時，從本實驗的數據結果可知，實驗值與理論值之間有良好的一致性，實作的數據結果無論是單車或是自製研發儀器的效果都相當有可信度。

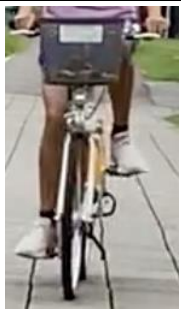
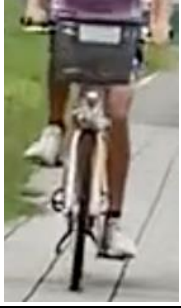
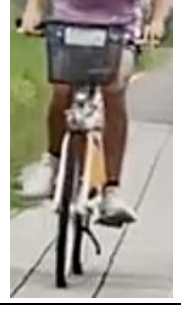
四、實驗 4：探討單車與多輪車在不同車速瞬轉下，車身傾斜狀況與車輪接面損耗的情形

(一)實驗數據與圖表：

1. 實驗探討單車在不同車速”瞬間左轉”時，車身傾斜狀況與車輪接面損耗

表 3-4-1 車身傾斜狀況與車輪接面損耗

車速 (m/s)	保持等速的 車身照片	車身傾斜後 照片	微觀傾斜 胎面圖	接觸面積 (cm ²)	胎溫上升 (K)
1.64			 傾 5 度	42.56	0.6
1.68				42.56	0.6
1.72				42.56	0.6
1.76			 傾 10 度	43.32	0.9
1.80				43.32	0.9
1.84				43.32	0.9

1.92				46.74	1.5
1.96			傾 15 度	46.74	1.5
2.00				46.74	1.5
2.04				49.40	2.2
2.08			傾 20 度	49.40	2.2
2.12				49.40	2.2
2.16				50.16	3.6
2.20			傾 25 度	50.16	3.6
2.24				50.16	3.6
2.28				52.06	5.1
2.32			傾 30 度	52.06	5.1
2.36				52.06	5.1

[照片來源:作者自行拍攝]

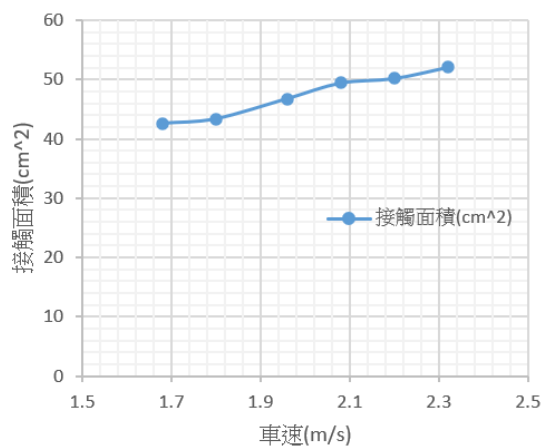


圖 3-4-1、不同車速時瞬間左轉之接面面積

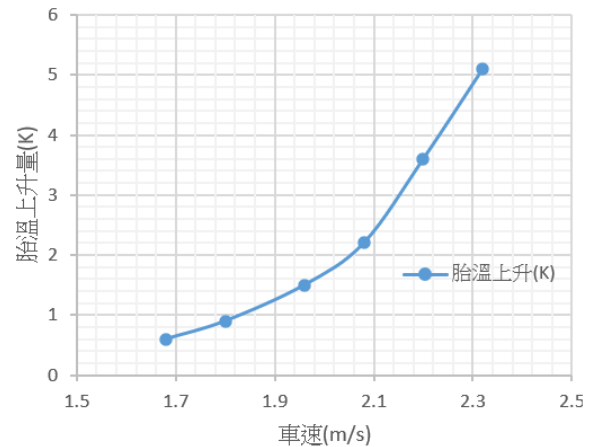


圖 3-4-2、不同車速時瞬間左轉之胎溫上升

2.模擬探討多輪車在不同車速”瞬間左轉”時，車身傾斜狀況與車輪接面損耗

(1)進入賽車模擬器的程式介面

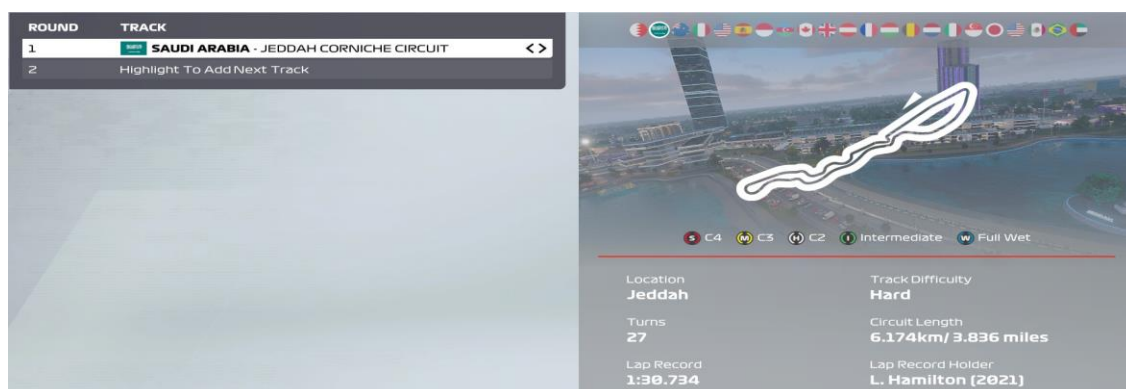
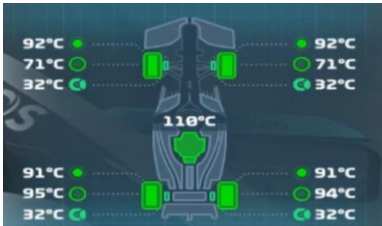
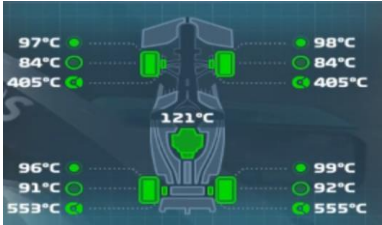
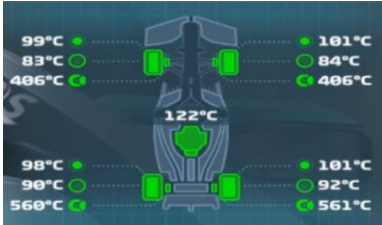
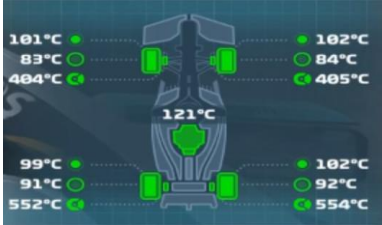


圖 3-4-3 賽道選用：Jeddah Street Circuit (圖片來源:作者自行拍攝)

(2)紀錄自駕模式時賽車繞行 5 圈時的輪胎耗損程度與胎溫變化

表 3-4-2 賽車輪胎耗損程度與胎溫變化

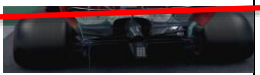
圈數	輪胎耗損程度	胎溫變化
開始		
1		
2		
3		

4		
5		

[圖片來源:作者自行拍攝]

3.模擬探討賽車在不同車速”瞬間左轉”時，車身傾斜狀況與車輪接面損耗

表 3-4-3 賽車輪胎耗損程度與胎溫變化

車速 (km/hr)	保持等速的 車身照片	車身傾斜後 影像照片	微觀傾斜胎面圖	胎溫上升(K)
	[初始胎溫(°C)：左前/右前/左後/右後：90/ 90/ 89/ 89]			
162				10/10/10/13
163				11/12/11/14
165				11/11/11/13
168				11/12/10/13
169				7/7/9/10

[圖片來源:作者自行拍攝]



圖 3-4-4、平地左轉的汽車應左輪翹起
(圖片來源:作者自行繪製)

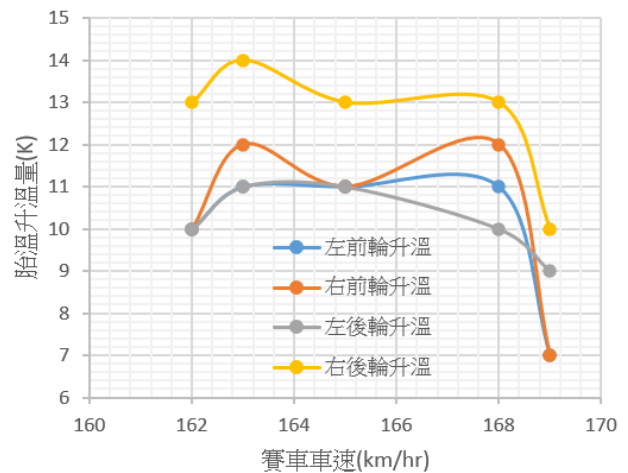


圖 3-4-5、不同車速時瞬間左轉之胎溫上升

(二)實驗結果與推論：

實驗 4 針對單車實徵研究與賽車數值模擬的情況下，以相互比對的方式，探討車體在不同車速”瞬間左轉”時，車身傾斜狀況與車胎溫度變化等各變因間的關係。

1. 從圖 3-4-1、圖 3-4-2 的實驗結果可知：隨著車速逐漸增大時，(1)車胎與地面的接觸面積會因為左轉壓車的緣故而隨之增大，從微觀傾斜胎面圖可以清楚看到轉彎方向與壓車方向是一致的；(2)胎溫上升量會因為摩擦力作負功而隨著速度的增加而增大，且速度越大時，胎溫上升量越明顯。
2. 從圖 3-4-4、圖 3-4-5 的分析結果可知：(1)四輪的賽車在平地上左彎時，因受到離心力的影響，導致車體向外(右)傾斜，左輪有可能因而離地空轉、右輪受到較大的擠壓正向力而容易發燙而磨損。但從賽車模擬器當中卻顯示車體在平地左彎時，整台車將向左傾斜，此模擬現象與實際的物理現象不符，容易衍生迷思概念。(2)由模擬器中的胎溫升溫量可知：右後輪>右前輪>左前輪>左後輪，此數值模擬符合真正物理概念的結果(因右輪擠壓正向力大輪胎易發熱磨損)；而在最高速 169(km/hr)的行駛下，胎溫的上升量居然比其他車速的還來的少，此數值模擬的結果仍需再進一步考證與確認。

肆、結論與應用

一、實驗 1：純滾動單車(靜摩擦力)各種變因之間的關係

- (一)隨著胎壓增加的過程中，「前後輪的平均靜摩擦力(f_s)」與「接觸面積(A)」均有漸小的趨勢。若從理論觀點來詮釋，當胎壓較低時，輪胎接觸面積(A)較大，因而增強了摩擦力(f_s)；而隨著胎壓的增加，接觸面積(A)隨之減小，致使摩擦力(f_s)亦隨之下降。

- (二)隨著胎壓增加的過程中，胎溫上升量有逐漸變小的趨勢，而隨著正向擠壓力(即胎壓乘上接觸面積)增大的過程中，輪胎的平均靜摩擦力也有逐漸變小的趨勢。若從理論觀點來詮釋，輪胎的升溫源自於接觸面間靜摩擦力作功而來，因為 U-bike 的前進距離固定(40 cm)，所以靜摩擦力的大小會與作功值成正比；亦即低胎壓時、靜摩擦力較大、作功產生熱能的量較多、輪胎升溫量也較大。
- (三)實驗 1 證實了「胎壓量值(P)」對「接觸面積(A)」與「靜摩擦力(f_s)」具有明顯非線性的影響；其中， $\mu_s = \frac{f_s}{N} = \frac{f_s}{PA} \neq constant$ ，且 μ_s 為非線性的一個常數(落在 0.2~0.5 間)。總之，適當調整胎壓(P)能有效改變接觸面積(A)的大小，對摩擦係數(μ_s)有間接影響。
- (四)生活應用：騎乘者若對腳踏車的胎壓進行調整，會影響到輪胎的靜摩擦力與騎乘的安全性，由實驗結果得知：胎壓在 30 psi 的靜摩擦力(摩擦係數)是最小的，所以在對腳踏車灌風時不是灌得越飽就越好，而應控制在 26~28 psi 較佳。

二、實驗 2：運動中煞停的單車(動摩擦力)各種變因之間的關係

- (一)隨著胎壓的增加，U-bike 的摩擦力值仍有逐漸變小的趨勢。其中，(1)動摩擦力值依然小於靜摩擦力值，此結果與理論物理的觀點一致。(2)以 Tracker 分析的數據結果，其動摩擦值似乎不受胎壓大小而影響(f_k 均落在 30N 上下)，而以力感應器分析的實驗結果，其動摩擦值在胎壓為 22-24psi 時顯著大於 26-30psi。
- (二)隨著胎壓的增加，U-bike 的煞停距離逐漸減長，此結果說明較高的胎壓能提高輪胎的剛性，從而減少了與地面的接觸面積，拉長了煞停的時間。此外，胎溫變化量在不同胎壓下顯示出一定程度的差異，但整體變化量不大，此結果可能與輪胎材料的熱傳導性及陰雨環境有關。在胎壓較高的情況下，輪胎的接地面積減少，摩擦熱亦相對降低，而整段煞車過程中仍有動摩擦力作負功而產生溫度變化。
- (三)U-bike 前後輪的動摩擦力在不同胎壓時均不同。同時，實驗 2 證實了「胎壓量值(P)」對「動摩擦力(f_k)」亦有明顯非線性的影響；其中， $\mu_k = \frac{f_k}{N} = \frac{f_k}{PA} \neq constant$ ，且 μ_k 為非線性的一個小於 μ_s 的常數(落在 0.1~0.4 間)。總之，適當調整胎壓(P)也會對動摩擦係數(μ_k)有間接的影響。
- (四)生活應用：定期檢查和維護輪胎狀況，包括胎壓值與輪胎磨損情況，均可能影響煞車的性能和行駛穩定性。特別是在現今天氣多變化的環境下，讓腳踏車維持在良好的胎壓狀態，格外重要。

三、實驗 3：等速圓周運動單車(側向靜摩擦力)各種變因之間的關係

- (一)在相同的繞轉半徑下，車速越大時，側向靜摩擦力就越大，同時，側向摩擦係數也跟著變大。此外，若進一步比較「力感應器的量值(實驗值)」與「物理公式的向心力(理論值)」可知，在相同的車速下，兩者靜摩擦力的數值相去不遠，唯實驗值的摩擦係數略比理論值稍大一些，但並不顯著。
- (二)隨著滑塊速度的增加，受到的側向靜摩擦力(向心力)逐漸增加，同時，「力感應器的量值(實驗值)」與「物理公式的向心力(理論值)」的數據間，彼此有良好的一致性。此外，輪胎的側向摩擦係數可達 0.3~0.8 的範圍區間，垂直切線方向產生的側向摩擦力(向心力)可比切向摩擦力的量值稍大一些。
- (三)從實驗 3 的摩擦圓(friction circle)可知：在輪胎的二維摩擦係數中，(1)切向摩擦係數實驗值的數據可達 0.2~0.5 的範圍區間(略小)，而理論值的數據可達 0.3~0.7 的區間。(2)側向摩擦係數實驗值的數據可達 0.37~0.48 的範圍區間(略大)，而理論值的數據可達 0.33~0.46 的區間。
- (四)生活應用：當騎士在高速行駛瞬間駕駛不慎受驚嚇拐彎時，地面提供的側向靜摩擦力會變大而造成翻車的危險。所以腳踏車騎士在進行訓練時，可以學習如何利用不同的旋轉半徑來調整速度，豐富騎行經驗與策略，提高自身在不同緊急狀況下的操控能力。

四、實驗 4：探討單車與多輪車在不同車速瞬轉下，車身傾斜狀況與車輪接面損耗的情形

(一)單車實驗與生活應用：

1. 隨著車速逐漸增大時，車胎與地面的接觸面積會因為左轉壓車的緣故而隨之增大，從微觀傾斜胎面圖可以清楚看到轉彎方向與壓車方向是一致的。
2. 隨著車速逐漸增大時，胎溫上升量會因為摩擦力作負功而隨著速度的增加而增大，且速度越大時，胎溫上升量越明顯。
3. 從單車實驗的實徵結果可知，騎乘腳踏車在轉彎時應學會靠壓車來增大輪胎與地面的接觸面積、增加轉彎時的向心力，讓車身可以安全過彎順轉。

(二)賽車模擬分析與教育應用：

1. 四輪賽車在平地上左彎時，因受到離心力的影響，導致車體向外(右)傾斜，左輪有可能因而離地空轉、右輪受到較大的擠壓正向力而容易發燙而磨損。但從賽車模擬器當中卻顯示車體在平地左彎時，整台車將向左傾斜，此模擬現象與實際的物理現象不符，應小心設計與審視。

- 2.由模擬器中的胎溫升溫量可知：右後輪>右前輪>左前輪>左後輪，此數值模擬符合真正物理概念的結果(因右輪擠壓正向力大輪胎易發熱磨損)；而在最高速 169(km/hr)的行駛下，胎溫的上升量居然比其他車速的還來的少，此數值模擬的結果仍需再進一步考證與確認。
- 3.在轉彎時，車輛的行為通常被認為是外側輪翹起，這一觀點是許多人的迷思概念。根據物理學原理，當車輛進行左轉時，離心力會使車輛的重心向外側偏移，這將導致外側輪承受更大的向下擠壓力，從而出現內側輪(左輪)翹起的情況。

伍、參考文獻(依作者姓氏排序)

林秀豪（2020）。高一基礎物理、高二選修物理 I&II。龍騰出版社。

張瑋真、鄭郁錡、陳韋如、鄭琬誼、葉姿妤（2018）。修正教科書的「摩」力觀點-摩擦力跟接觸面積真的有關係。中華民國第 58 屆中小學科學展覽會。

陳衍廷、陳奕婷、陳怡茜、童雯蘭、程瑞琦、洪文婕（2006）。它抓得住我？—紋路對摩擦力的影響。中華民國第 46 屆中小學科學展覽會。

摩擦力介紹：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/class/demolab/modules/摩擦力/摩擦力.html>

Automotive Research & Testing Center. (2018, November 30 - December 1)。輪胎分級標示制度與綠色輪胎研發. In 中華民國第二十三屆車輛工程學術研討會, 國立聯合大學能源工程學系。Retrieved from <https://energy.artc.org.tw/UpFile/KnowledgeBaseFiles/7f3a773c-0396-4261-b73d-3bed8175da0b.pdf>

Chang, T.-K. (2019)。濕地摩擦性質與接觸壓力、滑動速度的研究 (J.-H. Cheng, Advisor)。National Taiwan University. Retrieved from <https://tdr.lib.ntu.edu.tw/handle/123456789/74280?mode=full>

CyclingTime. (n.d.)。探討輪胎摩擦力與接面正向力的交互作用. Retrieved from <https://cyclingtime.com/tw/documents/6433.html>

Fullspeedahead. (2017, November 24)。MTB 胎壓秘笈 Retrieved from <https://www.fullspeedahead.com/zht/fsa-world/mtb%E8%83%8E%E5%A3%93%E7%A7%98%E7%AC%88>

Hewitt, P. G. (著)。常雲惠、蔡坤憲、師明睿、陳可崗(譯)（2018）。觀念物理(第 1-6 冊)。天下文化。

Popova, E., & Popov, V. L. (2015). **The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction.** *Friction*, 3(2), 183–190. <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0074-4>

【評語】 160011

1. 本研究旨在探討單車輪胎摩擦係數與各物理量之間的交互關係。
2. 題目很簡單，很有意義。
3. 實驗誤差要加進數據中呈現。