

電動機車輪胎滾動阻力之研究

郭庭瑋、鄭榮和

國立台灣大學 機械工程學系

Email: r01522509@ntu.edu.tw

摘要

本研究利用有限元素軟體 Abaqus 對規格 3.50-10 電動機車胎建立有限元素模型，探討各因素對輪胎滾動阻力的影響，並在模型內加入黏彈性質，模擬穩態滾動同時考慮彈性與黏彈性，藉此計算滾動阻力，另外也使用傳統將橡膠的彈性與黏彈性分開計算滾動阻力的方法，並透過實驗驗證模型之準確性以及比較本研究與傳統方法在計算滾動阻力之優缺點，結果顯示本研究方法優於傳統方法。

利用所建立的模型探討輪胎在不同行駛工況以及各種結構設計參數對於滾動阻力的影響，如負載、胎壓、行駛速度、外傾角、簾布層設計參數、胎紋類型等。最後藉由分析結果提出更改簾布層角度、胎面曲率以及加入帶束層等方法，設計一款低滾動阻力輪胎。

關鍵字： 電動機車胎、滾動阻力、有限元素、黏彈力學

Abstract

This study uses finite element tire model to explore the influence of driving conditions and structural design parameters on rolling resistance. Based on the results, low rolling resistance tire designs are proposed. This study creates finite element model for the 3.50-10 electric motorcycle tire with the finite element software Abaqus. Viscoelasticity is added to the finite element model. Elasticity and viscoelasticity are taken into account simultaneously during simulation of steady state rolling. Rolling resistance can be calculated directly from the analysis results. Besides, this study also calculates rolling resistance by the traditional method which separates the rubber elasticity and viscoelasticity. Experiments are used to verify the accuracy of the model and compare the above methods, which clearly show that the present method is superior to the traditional approach. Then the tire model is used to explore the influence of driving conditions and structural design parameters on rolling resistance, such as load, inflation pressure, driving velocity, camber angle, ply design parameters, tread pattern, etc. Finally, from analysis results, this study proposes new designs for a low rolling resistance tire by changing parameter, included ply angle, tread geometry and steel belts.

Keywords: Electric motorcycle tire, Rolling resistance, Finite element, Viscoelasticity

一、前言

近年來因石油資源減少與對環保的重視，因此開始重視能源的使用效率，其中全球石油使用在車輛交通運輸上就佔一大部分，若以一台 60km/h 行駛的轎車來看，石油的化學能只有約 21.5% 能量用於推動汽車，而用於推動汽車的能量約 53.5% 用來克服滾動阻力[1]，由此可見滾動阻力對能耗的影響。

為了減少溫室氣體排放及改善運輸能源效率，歐盟、美國、日本與韓國等國家陸續要求輪胎的燃油效率，歐盟更在 2012 年對乘用車、輕型貨車、大客貨車等輪胎進行輪胎效率分級，若達不到要求將無法在歐洲販售，且預計在 2016 年將標準往上提高[2]，可見未來法規要求將會更嚴格。除了在輪胎上的要求，近年來國內積極推廣電動車輛，其中包含電動機車，以廣設

充電站與提供多項補助措施等方法增加市場接受度與使用率，希望能藉此減少交通運輸對石油的依賴，然而電動機車目前最大的問題在於鋰電池續航力低，若要提高續航力則需要更大顆的電池，但是因機車空間有限而有體積的限制。

目前國內外研究大多對轎車胎，結構通常為輻射層輪胎，鮮少對機車胎等斜交胎進行探討，且對於各種結構設計參數以及不同行駛狀況的影響並無明確地說明原因與統整，沒有將分析結果應用於設計上。本研究目的為降低滾動阻力來提升能源使用效率，因此須建立計算滾動阻力工具，藉由所建立之工具探討不同行駛工况下與各個結構設計參數對滾動阻力之影響，以量化方式說明原因，有效探討各參數之影響，最後由分析結果設計一款低滾動阻力輪胎，藉此增加電池之能源使用效率，使電動機車之續航力提升。

1.1 文獻回顧

1.1.1 輪胎模型建立

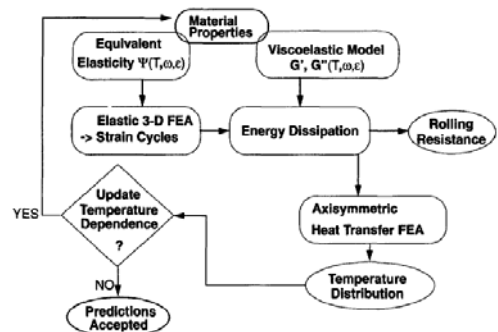
輪胎主要由橡膠、簾布層及鋼絲所組成，其中橡膠在大變形下仍保持彈性且為非線性，屬於超彈性材料(Hyperelastic)，可藉由應變能函數描述橡膠變形，如Marlow Model、Ogden Model、Yeoh Model等[3]；簾布層由橡膠與尼龍線所組成，為一種複合材料，可由古典基層板理論求得各個材料常數；鋼絲的部分，與橡膠相較起來硬非常多，通常以線彈性來描述。

1.1.2 滾動阻力產生原因與計算方法

滾動阻力的來源有三個，分別為遲滯性應、胎面與地面的摩擦以及輪胎運轉時的空氣阻力，其中遲滯效應佔90~95%[4]，而遲滯效應來自於橡膠的黏彈性質(Viscoelastic)，在受壓與卸載後分子間因摩擦產生延遲以及能量損失，受壓與卸載路徑所圍起來的面積即為所散失的能量。

在有限元素或數值分析計算滾動阻力方面，H. C. Park[5]、T. G. Ebbott[6]、Shida[7]等人將橡膠的彈性與粘彈性分開進行計算，流程如圖一，一開始模擬輪胎滾動時僅考慮橡膠的彈性，接著從模擬結

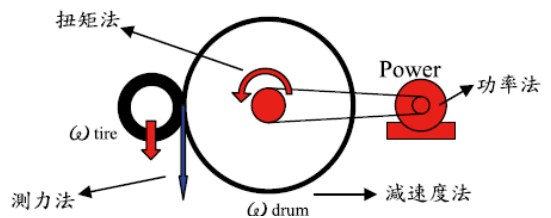
果輸出輪胎各部分的應力應變數據，將黏彈性質代入計算橡膠的遲滯損失，利用所計算出來的遲滯損失預估滾動阻力或用為輪胎各部分之熱源來預估溫度分布，之後對於滾動阻力相關研究，倉定國[8]、馬改陵[9]、晉琦[10]、田旭東[11]、邱章程[12]等人皆以此概念對滾動阻力進行計算與探討。



圖一：遲滯損失與滾動阻力計算[6]

1.1.3 規範與測試

滾動阻力量測相關規範以 ISO 28580(2009)來進行，歐盟、美國、日本、韓國皆以此規範所量測到的滾動阻力為輪胎燃油效率進行分級[2]。測試第一步驟為熱平衡，將輪胎放置試驗室內直到輪胎溫度與試驗室相同，此時試驗室溫度控制在25°C，接著第二步驟為對輪胎進行充氣與調整胎壓，放置一段時間後查看是否改變並調整，第三步驟將輪胎安裝置機台上進行運轉，使輪胎溫度升溫至穩定，最後即可開始測量，量測滾動阻力的方法有四種，分別為測力法、扭矩法、功率法、減速度法[13]，依機台與需求擇一進行即可，示意圖如圖二所示。



圖二：滾動阻力量測方式[2]

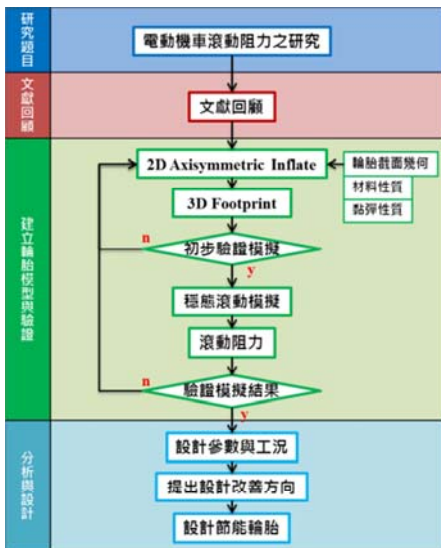
1.2 研究方法

本研究之流程如圖三，可分為三大部分。

第一部分文獻回顧，針對輪胎相關基礎知識以及滾動阻力分析相關文獻進行整理與探討，並歸納出如何建立輪胎模型及滾動阻力計算方法，瞭解輪胎研究進展，作為本研究在建立模型與分析時的參考。

第二部分建立輪胎模型與驗證，使用有限元素分析軟體 Abaqus 建立 3.50-10 電動機車胎之輪胎模型，給予適當之邊界條件模擬輪胎充氣壓地與穩態滾動，輪胎各部分之材料性質由實驗量測取得。輪胎模型之準確性先由充氣壓地及橫向剛性等模擬結果與實驗做初步驗證，接著進行滾動阻力量測實驗來驗證所計算滾動阻力之準確性，並且在此部分比較以不同方法計算滾動阻力的結果與優缺點。

第三部份分析與設計，驗證模型能夠預估滾動阻力之準確性後，使用此模型分析輪胎各部分滾動阻力所佔的比例，並探討在不同行駛工況與不同結構設計參數下對滾動阻力的影響，最後由分析結果提出改善方法，設計一款低滾動阻力輪胎。



圖三：研究流程圖

二、輪胎模型建立與驗證

本研究分析的輪胎規格為 3.50-10 電動機車胎，研究目的在於探討各結構設計

參數與不同行駛工況對滾動阻力之影響，為了降低問題複雜性與節省電腦計算時間，對模型做以下假設：

- (1) 成品尺寸與設計圖尺寸相同。
- (2) 橡膠為等向、均質、不可壓縮體，並呈超彈性與黏彈性。
- (3) 簾布層之尼龍為等向、均質、線彈性，成品簾布層角度與原設計角度相同。
- (4) 地面與胎面之摩擦係數為 0.7。
- (5) 鋼圈與胎唇緊密貼合，不產生滑動。
- (6) 地面、轉鼓與鋼圈為剛體。
- (7) 輪胎穩態滾動時，胎體溫度均勻分布。
- (8) 計算滾動阻力僅考慮橡膠之遲滯效應與變形，不考慮空氣阻力。

2.1 材料性質

輪胎是由橡膠、簾布層與鋼絲圈所組成，而簾布層包含橡膠與尼龍。本節將說明如何進行實驗量測，並藉由實驗結果計算輪胎各個部分之材料常數。

2.1.1 超彈性 Hyperelastic

橡膠試片之尺寸與規範參照 ASTM D41214，藉由 MTS 810 進行拉伸實驗取得數據。本研究只進行單軸拉伸實驗求取橡膠彈性變形行為，無雙軸拉伸及平面拉伸之數據，不適合使用 Ogden、Arruda-Boyce、Yeoh 等應變能函數，因此選擇 Marlow Model 來描述胎面膠 T101 的變形。

2.1.2 黏彈性 Viscoelastic

橡膠之黏彈性測量使用儀器為 RPA 2000，其量測原理為對試片給予一個固定周期的負載，此以應變來做控制，試片會回應一個固定周期的應力，由於橡膠為黏彈性材料，兩條曲線之間會有一個相位角 δ ，藉由測量到的相位角和應力應變振幅，經過計算可以得到儲存模數 G' 、損失模數 G'' 以及損失正切 $\tan \delta$ ，若材料的損失正切越大，代表材料越接近黏性。

利用 RPA 對輪胎各部分之橡膠在測試條件為溫度 30°C~70°C 內進行掃頻實驗，振幅為 1% Strain。

然而輪胎在滾動過程，滾動半徑隨著速度不同而變化，在此定義滾動半徑為未充氣之輪胎半徑 216.8mm，若行駛速度是在 20~100km/h，相對應之頻率為 4.08~20.4Hz，實驗取頻率 3~20.4Hz 對不同膠料進行量測，最後得到膠料 T101 在不同溫度以及頻率下所量測之損失正切 $\tan \delta$ 。

由於模擬時要同時考慮黏彈，因此需要一個模型來描述橡膠的黏彈，在此使用 Prony Series 來描述黏彈材料的 shear modulus 隨時間的變化，如式(1)：

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i^P (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

一般輪胎行駛至穩定，溫度約在 50°C~70°C，在此選擇 60°C 之實驗數據，並以傅立葉轉換將實驗數據由頻域轉換為時域與最小平方法進行擬合，求取膠料 T101 的 g_i^P 、 τ_i 、 N 等 Prony series 常數。

2.1.3 簾布層 Ply

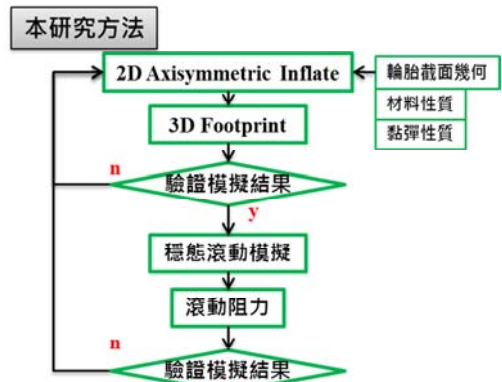
簾布層為輪胎的骨架，由橡膠與尼龍纖維所組成，輪胎充氣後之定形主要是靠簾布層支撐，斜交胎之各層簾布層與滾動行駛方向夾 θ 角，藉此方式使輪胎各方向具有強度。

本研究之 3.50-10 電動機車胎由兩層所構成，厚度為 0.85mm，與滾動行駛方向夾角為 40°，簾布層尼龍纖維之密度為 45 根/cm，以 Membrane element 來建立簾布層橡膠部分，簾布層中的尼龍纖維以 Rebar layer 來定義，定義 Rebar layer 之參數有四種，分別為尼龍線截面積、每兩根尼龍線之距離、與元素局部座標的夾角、與元素中心面距離。

2.2 模型驗證與滾動阻力計算方法比較

本研究計算滾動阻力之流程如圖四，一開始利用二維軸對稱模型進行輪胎充氣模擬，使用 Abaqus 的指令將二維模型轉換為三維模型，並進行壓地模擬，接著使用 *STEADY STATE TRANSPORT 指令進行輪胎穩態滾動模擬，取得自由滾動 (Free Rolling) 下的結果。在建立有限元素

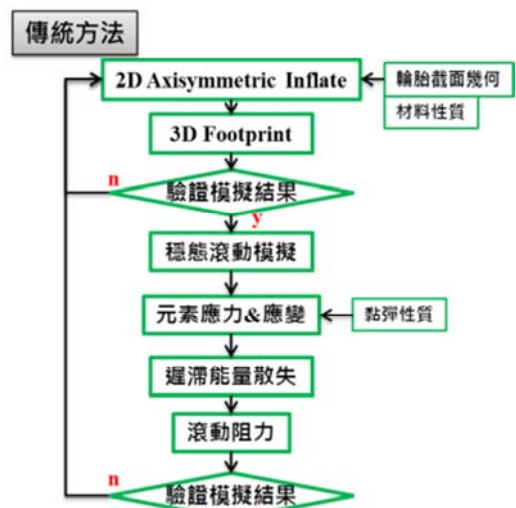
模型時，除了將橡膠彈性性質考慮外，同時將橡膠之黏彈性質納入，以 Prony Series 描述橡膠黏彈，之後由模擬所得到的結果以測力法或式扭矩法計算滾動阻力。



圖四：本研究方法之模型建立與滾阻計算

傳統方法為使用 Shida[7]等學者的方法進行，流程如圖五，在建立輪胎模型這部分差異並不大，差別在於模擬時，僅考慮橡膠的彈性，接下來從模擬結果輸出模型上各元素滾動一圈之應力應變，使用 Matlab

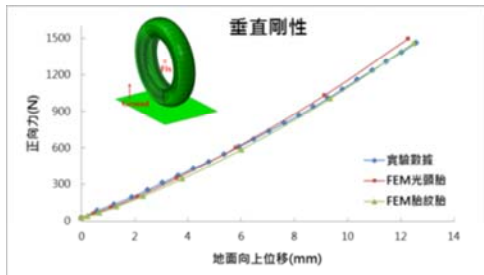
編寫傅立葉級數擬合應力應變曲線的程式，將黏彈性質代入計算滾動時因黏彈性質所產生的遲滯損失，最後將遲滯損失除以滾動距離，即可得滾動阻力。



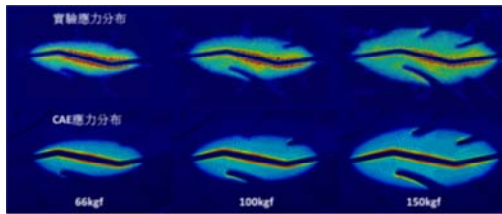
圖五：傳統方法之模型建立與滾阻計算

模型之準確性以充氣壓地、橫向剛性與滾動阻力量測等實驗進行驗證，使用機台為輪胎綜合試驗機與走行試驗機。

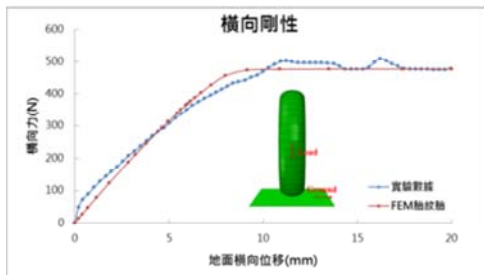
充氣壓地為對輪胎施以固定充氣壓後，地面以位移方式對輪胎進行施載，此過程擷取地面向上之位移量與地面所受之反作用力，此數據稱為垂直剛性，同時也擷取胎面與地面接觸之壓地應力分布，實驗與模擬結果比對如圖六、圖七；橫向剛性為輪胎進行充氣壓地後，給予輪圈向下66kgf 負載，地面開始橫向移動，紀錄地面橫向位移量以及地面所受之橫向力，直到胎面與地面之間產生滑動而停止，實驗與模擬結果比對如圖八。橫向剛性的部分因地面所使用的金屬板為粗糙凹凸不平，因此有較不穩定之情形，但是差異並不大，由實驗數據與模擬相當吻合，表示模型在模擬充氣壓地有一定的準確性。



圖六：垂直剛性

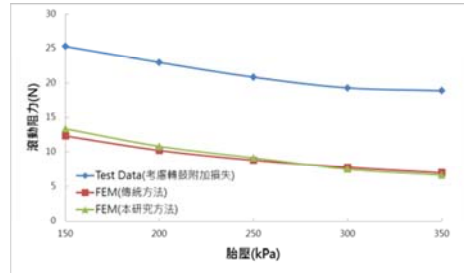


圖七：不同負載下之接地壓力分佈

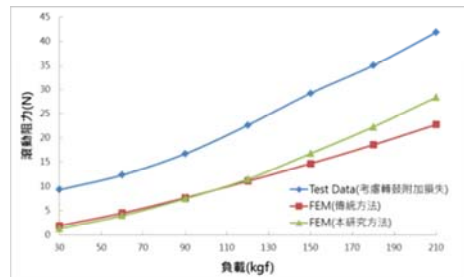


圖八：橫向剛性

滾動阻力量測參考 ISO 28580 規範進行，採用功率法量測不同負載與胎壓下之轉鼓直流馬達轉子之電壓與電流計算滾動阻力，由於走行試驗機並不是專門量測滾動阻力的機台，無法在給予低負載情況下使輪胎胎面貼於轉鼓面，因此只能量測轉鼓的附加損失，圖九、圖十為不同工況下所測得之滾動阻力以及不同滾動阻力計算方法結果。



圖九：不同胎壓之實驗與模擬比較

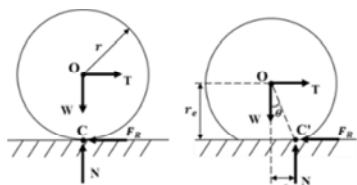


圖十：不同負載之實驗與模擬比較

可看到雖已考慮轉鼓的附加損失，實驗數據與模擬結果間仍有一個差距且為定值，其原因為沒有扣除掉輪圈的附加損失，然而因機台因素無法量測輪圈的附加損失，故將輪胎在不同胎壓與負載下量測到的實驗數據與模擬結果比對，觀察趨勢變化是否一致。

結果可見本研究方法與實驗數據的趨勢非常接近，在高負載或低胎壓時傳統方法所計算的滾動阻力比本研究方法來的低，其原因為傳統方法只考慮遲滯效應，並沒有考慮變形所產生的阻力，以圖十一說明變形所產生之阻力，左圖之地面與輪胎皆為剛體，由靜力平衡可以得到推力T和滾動阻力 F_R 為0，代表輪胎在等速滾動時不需要任何推力；右圖之輪胎為彈性體，由

於受負載變形的關係，使正向力由 C 點移動至 C' 點，因此產生滾動阻力，若輪胎所受到的負載越大或胎壓越低，輪胎的變形就會越大，正向力距輪心的水平距離 f 會增加，滾動半徑 r_e 會減少，使變形所產生的阻力更大，故變形產生的阻力對於滾阻有一定的影響，本研究使用的方法因同時考慮遲滯損失與變形產生的阻力，預估滾阻的變化趨勢會比傳統方法來的準確。



圖十一：剛體與非剛體滾動

表一為兩種方法之優缺點比較，若邊界條件以及元素量相同，本研究方法會比傳統方法在電腦計算時間上快一些，傳統方法除了模擬輪胎穩態滾動，須從模擬結果輸出各元素滾動一圈的應力應變數據與整理，之後再匯入 Matlab 計算遲滯損失與滾動阻力，整個過程需要花較多的時間，然而在模擬輪胎穩態滾動時較容易收斂，能夠直接用量測到的黏彈數據計算遲滯損失；本研究方法能夠直接由模擬結果觀察遲滯損失分布及黏彈造成的力學行為，且不須將結果做二次處理即可得到遲滯損失與滾動阻力，但模擬時除了要考慮橡膠的超彈性，同時也要考慮黏彈性質，須要由模型來描述黏彈行為，如 Prony Series，因此需要計算材料常數來擬合實驗數據，且有限元素計算上收斂較困難。綜合比較兩者之優缺點，本研究使用的方法在預估滾阻的變化以及後處理的方便性皆比傳統方法好。

表一：滾動阻力計算方法之時間與優缺點

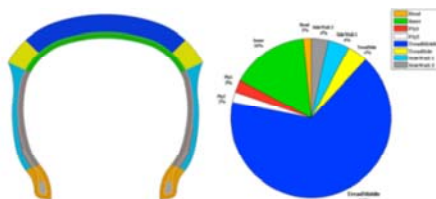
	傳統方法		本研究方法
計算時間	Abaqus	31m	Abaqus: 1hr 21m
	Matlab	71m	
	總計	1hr 42m (不含數據輸出與處理)	
優點	<ul style="list-style-type: none"> FEM收斂容易 不需取黏彈材料常數 		<ul style="list-style-type: none"> 同時考慮遲滯與變形造成之滾阻 數據不須做二次處理
缺點	<ul style="list-style-type: none"> 數據須二次處理 編寫程式計算遲滯損失 僅考慮遲滯損失之滾阻 數據處理費時 		<ul style="list-style-type: none"> FEM收斂較困難 須取黏彈材料常數

三、各參數滾動阻力分析

影響輪胎滾動阻力之因素非常多，以行駛工況來說，有負載、胎壓、行駛速度、外傾角、溫度等，結構設計參數則有簾布層高度、簾布層密度、簾布層角度、胎面曲率、胎紋類型等，在此說明輪胎各部分遲滯損失貢獻以及簾布層角度、胎面曲率對滾動阻力之影響。

3.1 遲滯損失貢獻

圖十二為輪胎各個部分膠料遲滯損失所佔之圓餅圖，各個部位以及不同膠類以顏色做區別，由圖可看到主要與地面接觸的胎面滾動阻力佔的比例高達 66%，其原因為輪胎滾動壓地時，原本圓弧的胎面往內彎曲變形，且一直重複這樣的動作，所以產生的遲滯損失會很高，若要降低滾動阻力，胎面為主要改善目標，例如降低胎面膠料的 $\tan \delta$ 以及降低輪胎滾動過程胎面的變形。



圖十二：輪胎各部分之遲滯損失比例

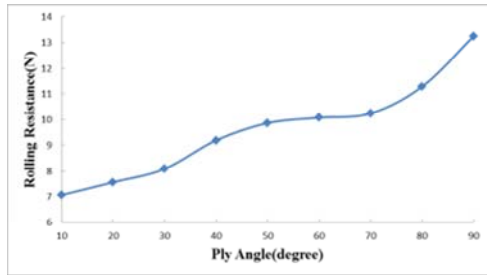
3.2 簾布層角度

斜交胎的簾布層是多層且以互相交錯方式推疊，本研究探討 3.50-10 電動機車胎之簾布層即以此方式推疊，一共 2 層，其中一層與胎冠中心夾角為 40° ，另一層為 -40° 。分析的邊界條件為胎壓 36psi、負載 100kgf、行駛速度 60km/h，探討不同簾布層角度對滾動阻力之影響，取 10° ~ 90° 進行分析。結果如圖十三，滾動阻力隨簾布層角度減少而降低，會有此現象原因為改變角度時，對輪胎能承受的負載方向及外形有很大的影響。

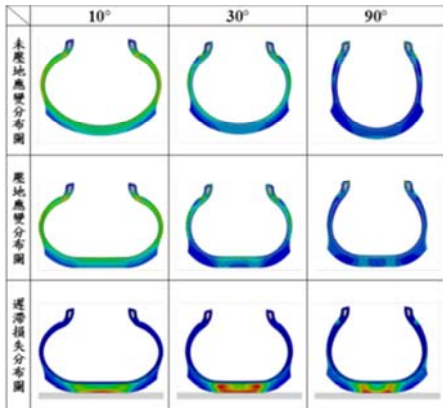
圖十四為不同角度下之截面變形圖，角度為 10° 時尼龍纖維方向接近圓周方向，無法承受軸向之負載而往側邊膨脹，同時因擴張過大的關係，使輪胎各部分在未壓地時已為高應力應變之狀態，且胎面較為

平坦，因此滾動時的變形量少，故所產生的遲滯損失較少；角度為 90°時尼龍纖維為軸向方向，能夠受軸向之負載，故其變形為往徑向方向擴張，使胎面曲率更大，輪胎在壓地過程圓弧胎面往內彎曲之變形量增加。

以上分析結果可以看到角度對輪胎的滾阻以及外形有明顯的影響，滾阻會隨著角度越低而減少，但是輪胎簾布層角度並不會設計到這麼低，一般是設計在 30~40 幾度左右，原設計是 40 度，每層簾布層會以不同角度堆疊的目的是使輪胎具有不同方向的強度，若設計太低，則只能承受單向的負載。



圖十三：簾布層角度 v.s. 滾動阻力

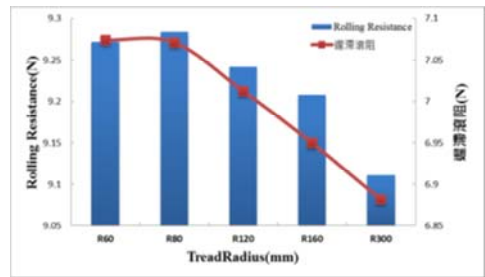


圖十四：不同簾布層角度下之截面變形圖

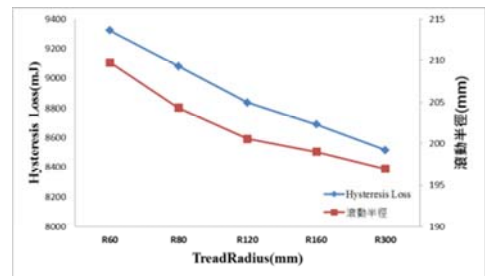
3.3 胎面曲率

機車胎之胎面是由不同圓弧所繪製，為了減少分析變因，探討不同胎面曲率影響時，只改變胎面的幾何且以單一圓弧繪製，同時簾布層的曲率隨胎面跟著更改，其他部分之幾何則不更動。分析結果如圖

十六、圖十七，圖十六含不同胎面曲率下的滾動阻力以及由遲滯損失所計算的滾動阻力，以遲滯損失所計算的滾動阻力在圖中稱為遲滯滾阻，可看到當胎面圓弧半徑從 60mm 增加至 80mm 時滾動阻力有些許上升，80mm 之後胎面越平坦滾動阻力越低，而由遲滯損失計算的滾動阻力趨勢是一樣的，代表胎面曲率對於滾動阻力的影響主要來自於輪胎滾動時產生的遲滯損失，若觀察圖十七，可看到遲滯損失隨胎面越平坦而下降，滾動半徑亦隨胎面越平坦而減少，而遲滯滾阻與損失趨勢為何不同，是因為滾動阻力除了與遲滯損失有關係外，滾動半徑也為影響因素，因此輪胎幾何對滾動阻力有一定的影響，最後總體趨勢上胎面設計越平坦，是有助於降低遲滯損失與滾動阻力。



圖十六：胎面曲率 v.s. 滾動阻力



圖十七：不同胎面曲率之遲滯損失與滾動半徑

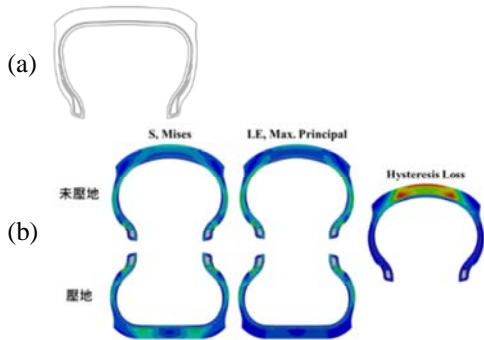
四、低滾阻輪胎設計

藉由對輪胎各參數對於滾動阻力影響之分析結果，提出兩個設計方案：

(1) 設計方案一

更改簾布層角度與胎面曲率，簾布層的角度雖然設計越低滾動阻力能夠減少，

但是若設計過低會使輪胎充氣後往側邊變形過大，因此角度由原設計的40°降低至30°；胎面曲率採用圖十五中R300的胎面幾何，並對胎肩的部分做修飾，設計方案一之截面如圖十八(a)，並進行邊界條件為36psi、負載100kgf、行駛速度60km/h下之穩態滾動模擬，分析結果之截面變形與遲滯損失分布如圖十八(b)，原設計之滾動阻力為9.19N，設計方案一之滾動阻力為7.35N，下降約19.9%，採取這樣設計的效果非常好，但是由圖十八(b)可看到原本設計較為平坦的胎面因胎內充氣而膨脹，使胎面往徑向方向擴張，輪胎在滾動壓地時仍有胎面往內彎曲變形的情况，因此接下來目標為改善充氣後胎面往徑向方向之變形以及胎面遲滯損失集中。

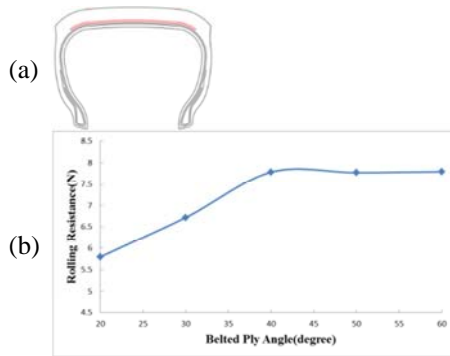


圖十八：(a)設計方案一之截面 (b)設計方案一之截面變形與遲滯損失分布圖

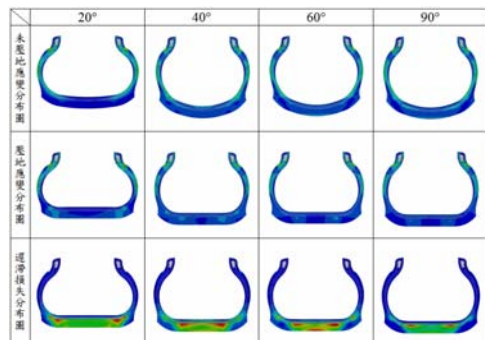
(2) 設計方案二

接續設計方案一之結果，參考輻射胎與帶束斜交胎的帶束層結構，在胎面加入兩層帶束層來抑制胎面的變形，如圖十九(a)。帶束層由鋼絲和橡膠所組成，且與簾布層一樣由兩層所交疊，並與胎冠中心夾一個角度，不同帶束層角度對於滾動阻力的影響皆不同，故對帶束層角度20~60°進行分析，而帶束層中的鋼絲截面積、每兩根鋼絲之距離、與元素局部座標的夾角、與元素中心面距離等皆與簾布層設計參數相同。分析結果如圖十九(b)，角度在40度以上並沒有降低滾阻的效果，而角度40度以下的時候滾阻則有減少的趨勢，從圖二十可以看到帶束層角度40度以上時，對於抑制胎面的變形並沒有幫助，因此帶束

層的角度設計選擇20度，此設計之滾動阻力為5.8N，與原設計相比降低約36.9%，可見加入帶束層對於降低滾阻的改善效果有進一步的提升。



圖十九：(a)設計方案二之加入帶束層設計 (b)帶束層角度 v.s. 滾動阻力



圖二十：不同帶束層角度下之應變、遲滯損失分布圖

五、結論

本研究有別於傳統計算滾動阻力的方法，於模型內加入黏彈，模擬時能夠考慮黏彈的力學行為，本研究方法優點為計算滾阻時不需要與傳統方法一樣要將數據做二次處理，且得到的滾動阻力為同時考慮遲滯損失與變形產生的阻力。

利用所建立之模型探討輪胎各參數對滾動阻力的影響，將分析結果應用於低滾阻輪胎設計，新設計與原設計相比，設計方案一降低約19.9%，設計方案二約36.9%，可見由結構進行設計可以有很大的改善效果。

六、誌謝

感謝騰森輪胎的從杰先生、崔曉小姐在膠料材料性質量測以及滾動阻力量測實驗上提供許多的建議與幫助。在輪胎充氣壓地實驗上，感謝張明基先生在與廠商聯絡以及實驗過程的協助與指導。感謝宜蘭大學賴森茂教授在膠料如何量測以及配方對於膠料性質影響上的指導。

七、參考文獻

1. K. Holmberg, P. Andersson, and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars," *Tribology International*, vol. 47, pp. 221-234, Mar 2012.
2. 廖慶復，黃敏祥，蘇皋群，國外輪胎標籤發展現況與檢測方法，車輛研測資訊，vol. 090 期，pp. 14-20, 2012。
3. A. Ali, M. Hosseini, and B. B. Sahari, "A Review of Constitutive Models for Rubber-Like Materials," 2010.
4. J. D. Walter and F. S. Conant, "Energy Losses in Tires," *Tire Science and Technology*, vol. 2, pp. 235-260, 1974.
5. H. C. Park, S. K. Youn, T. S. Song, and N. J. Kim, "Analysis of Temperature Distribution in a Rolling Tire Due to Strain Energy Dissipation," *Tire Science and Technology*, vol. 25, pp. 214-228, 1997.
6. T. G. Ebbott, R. L. Hohman, J. P. Jeusette, and V. Kerchman, "Tire Temperature and Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis," *Tire Science and Technology*, vol. 27, pp. 2-21, 1999.
7. Z. Shida, M. Koishi, T. Kogure, and K. Kabe, "A Rolling Resistance Simulation of Tires Using Static Finite Element Analysis," *Tire Science and Technology*, vol. 27, pp. 84-105, 1999.
8. 倉定國，充氣輪胎之遲滯現象之研究，碩士論文，國立成功大學工程科學所，台南，2003。
9. 馬改陵，載重子午線輪胎橡膠材料時滯特性引起的滾動阻力分析，博士論文，北京化工大學化工過程機械，北京，2005。
10. 晉琦，輪胎滾動阻力及穩態滾動溫度場的研究，華南理工大學材料科學與工程學院碩士論文，2010。
11. 田旭東，印海建，石太平，張弛，全鋼載重子午線輪胎滾動阻力計算，輪胎工業，pp. 463-466, 2011。
12. 邱韋程，輻射層輪胎滾動阻力之數值模擬分析，碩士論文，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學所，基隆，2012。
13. 李紅偉，淺析 ISO 28580：2009 輪胎滾動阻力測試，輪胎工業，vol. 30，pp. 259-264，2010。
14. ASTM Standard D412-06a, "Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension," ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.