

# 輪胎滾動模擬

邱進東\* 董彥臣\*\*

壹、前言  
貳、輪胎滾動阻力計算理論  
參、實例  
肆、結論  
伍、參考文獻

## 摘 要

本文是透過複雜接觸邊界條件以有限元素法模擬輪胎充氣、接地及滾動過程，並計算輪胎滾動阻力。由模擬過程可計算以下結果 1. 三維充氣形狀及應力分佈 2. 接地壓力及形狀 3. 滾動阻力、煞車力與力矩。有關材料模型部分，線層是以正交異方性材料模型近似，橡膠部分以 Mooney-Rivlin 材料模型近似。最後以一 PCR 轎車胎為例進行滾動過程模擬。所應用之有限元素程式為 MARC。

**關鍵詞：**輪胎、滾動阻力、充氣

---

\* 邱進東：機械工程科助理教授

\*\* 董彥臣：機械工程科助教

## 壹、前言

輪胎滾動阻力大小會影響輪胎的磨損及汽車性能，滾動阻力大的輪胎較耗油及容易產生高溫，因此，控制輪胎滾動阻力大小為輪胎性能重要的一部分。關於輪胎滾動阻力主要為輪胎滾動時因輪胎內部橡膠及簾布層的內磨擦所引起的能量損失[1]，其餘損失如輪胎與地面滑動約佔總損失的 5-10%，空氣阻力約佔總損失的 1-3%，剩餘損失為路面情況。滾動阻力大多以實驗方法求得，但較浪費時間且無法事先預測，而以有限元素法模擬輪胎內部磨擦所引起的能量損失為不錯方法。

關於分析輪胎內部結構問題，有限元素法一直是相當有效的工具，而且應用範圍也相當廣，[2]對輪胎二維充氣模擬並對爆胎進行改善，[3]使用複合材料模型分析輪胎二維充氣過程，[4]模擬輪胎煞車與轉彎時輪胎與鋼圈的相互作用，[5]使用有限元素法模擬輪胎在地面前進、轉彎與煞車過程及計算卡車胎煞車力與力矩，[6]利用材料的遲滯特性，以有限元素法計算輪胎滾動阻力。

本文是以 MARC 程式模擬輪胎滾動過程，計算過程如下，1. 輪胎充氣與鋼圈接觸，2. 讓地面受力上移與輪胎接觸，3. 滾動鋼圈同時移動地面模擬輪胎滾動過程。橡膠與鋼圈接觸邊界條件為粘接(glue)，與地面邊界條件滾動接觸(rolling contact)，以跟隨力(follower force)模擬胎內充氣壓力。

## 貳、輪胎滾動阻力計算理論

考慮等速運動時，一自由滾動輪胎在輪軸中心，須有一水平作用力  $F_r$  以克服滾動阻力，由圖 1 可由平衡力矩得知

$$F_r \cdot h = F_n \cdot c \quad (1)$$

其中： $F_n$  為輪胎所承受的負荷， $h$  為輪軸中心高度， $c$  為作用力中心與軸心距。

滾動阻力通常表示為單位作用力的滾動阻力大小，因此，定義滾動阻力係數為

$$f_r = \frac{F_r}{F_n} \quad (2)$$

滾動阻力大小與負荷、充氣壓力、溫度、路面狀況及速度有關，對一般小客車滾動阻力大小為 10 至 25kgf/1000kgf，例如速度為 100km/h 時滾動阻力約為  $F_n$  的 (1.3-1.6)%，當速度為 100km/h 時滾動阻力約為  $F_n$  的 (1.9-2.4)%。

以上滾動阻力都以  $F_r$  表示而不是以能量  $E$  表示，是因為以  $F_r$  表示較直接，但在汽車煞車時滾動阻力可能為負值，而滾動阻力  $F_r$  是輪胎與地面接觸時橡膠及簾布層的遲滯(hysteretic)能量損失  $\Delta E$  有關，為了確保滾動阻力為正值所以定義能量損失係數為

$$e_R = \frac{\Delta E}{\Delta L} \quad (3)$$

其中： $\Delta L$  為行駛距離。

以能量定義滾動阻力比以力方式定義合理。

在計算滾動阻力時，須給定輪胎的行駛速  $V$ ，而速度為

$$V = R_e \Omega \tag{4}$$

其中： $R_e$  為等效半徑， $\Omega$  為輪胎轉速。

等效半徑  $R_e$  一般會被誤認為等於輪軸中心至地面距離  $h$  或稱為負荷半徑  $R_1$ ，實際上  $R_e$  介於  $R_1$  及未變形輪胎半徑之間，即

$$R_1 < R_e < R \tag{5}$$

圖 1 顯示輪胎真正行駛速度  $V$  介於輪胎變形最大速度  $V_1$  及未變形速度  $V_0$  之間。等效半徑  $R_e$  的求法如圖 2 所示，若輪胎的中心為  $O$ ，在考慮輪胎未受負荷時輪軸旋轉  $\phi$  角度，在鋼圈上的  $A$  點也將移至  $B$  點，此時輪胎轉動的角度為  $AOB = \phi$ ，當輪胎未受負荷時  $C$  點的位置將由  $C_0$  點將移至  $D_0$  點，在輪胎受負荷時  $C$  點的位置移動  $X$  距離，則輪胎表面上的  $C_1$  點將移至  $D_1$  點，其中距離  $OC_0 = R$ ， $OC_1 = R_1$ 。由幾何關係

$$C_1 D_1 = X = R_e \cdot \phi \tag{6}$$

$$C_1 E_1 = X_1 = R \tan \phi$$

$$X_0 = R \sin \phi$$

由上式可求出等效半徑  $R_e$

$$\frac{R_e}{R_1} = \frac{X}{X_1} \cdot \frac{\tan \phi}{\phi} \tag{7}$$

$$\frac{R_e}{R} = \frac{X}{X_0} \cdot \frac{\sin \phi}{\phi}$$

上式中若  $\phi$  不會太大則  $\tan\phi/\phi$  稍微大於 1， $\sin\phi/\phi$  稍微小於 1。

## 參、實例

本節以一南港轎車胎為例計算其滾動阻力，將輪胎以六種材料近似，其中在胎面膠、內襯膠及填充膠(apex)部分考慮成彈性材料，鋼絲層、簾布層及胎唇(bead)部分考慮成異方性材料，材料性質如表一所示。假設輪胎充氣壓力為  $2.0\text{kg/cm}^2$ ，單一輪胎荷重為  $400\text{kgw}$ 。考慮輪胎左右對稱，以半個輪胎進行分析。

首先求輪胎有效半徑，將輪胎充氣至  $2.0\text{kg/cm}^2$  同時地板受  $200\text{kgw}$  負荷。邊界條件為：地板只能上下移動，鋼圈考慮成剛體，輪胎與鋼圈及地板為接觸邊界條件。輪胎充氣及受負荷後結果如圖 3 所示。由(7)式可求出輪胎等效半徑  $R_e = 28.3\text{cm}$ ，由變形結果可知充氣後輪胎彈性變形半徑增加  $0.798\text{cm}$ ，受地板負荷彈性變形半徑減少  $1.478\text{cm}$ 。

輪胎滾動阻力模擬步驟如下：a. 將輪胎充氣至  $2.0\text{kg/cm}^2$  同時地板上升  $1.478\text{cm}$ ，b. 滾動鋼圈(時速  $90\text{km/hr}$ )同時地板以輪胎前進反方向移動。輪胎與地面磨擦係數為  $0.8$ 。結果如圖 4，由(2)式計算得滾動阻力係數為  $0.93\%$ 。

## 肆、結論

本文證實有限元素法半靜態(quasi-static)輪胎滾動模型的可行性，此模型可計算輪胎接觸面積、等效半徑、測向及正向剛性，同時模擬汽車起動及煞車時輪胎受力情況。本文計算方法是利用外力平衡直接模擬輪胎滾動阻力，不須考慮橡膠的粘彈行為，可避免粘彈模型的錯誤。

表 1.1 輪胎用複合材料係數

材質	$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$	$V_{12}$	$V_{23}$	$V_{13}$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
簾布層	1512	3.96	3.96	0.997	0.997	0.997	0.49	0.49	0.49	1200
補強層	438	6.08	438	1.54	1.54	1.54	0.49	0.0068	0.49	1200
<b>BEAD</b>	20.65	20.65	73250	5.19	5.19	5.19	0.49	1.4e-4	1.4e-4	7500

單位(Mpa)

表 1.2 輪胎用橡膠彈性係數

材質	$C_1$	$C_2$	$E$	$\nu$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
胎面膠	1.41	-1.33	2.71	0.49	1200
胎邊膠	72.2	-67.2	1.37	0.49	1200
<b>APEX 膠</b>	3.65	-3.40	6.93	0.49	1200

單位(Mpa)

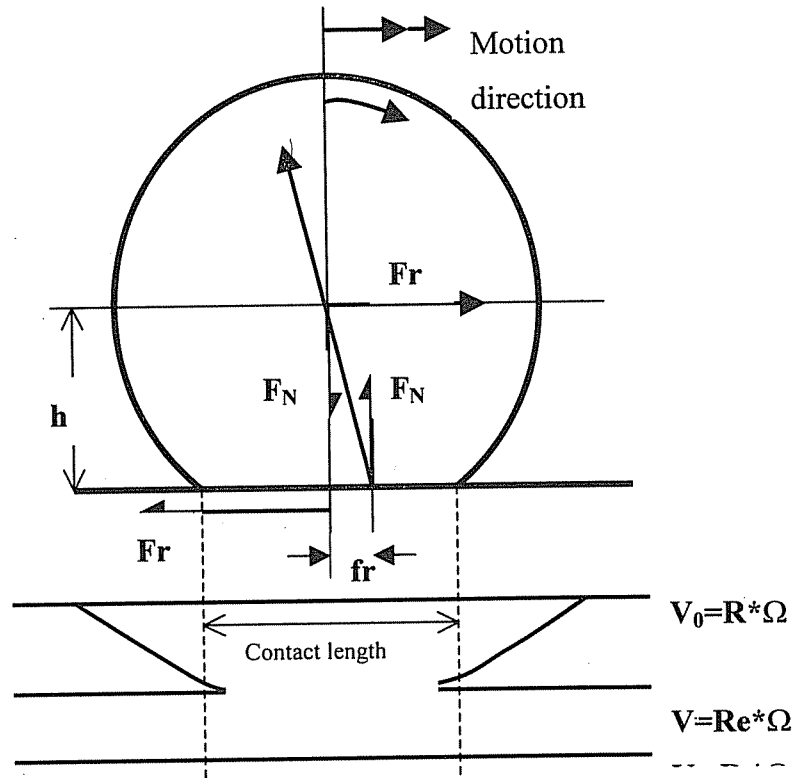


圖 1 輪胎滾動示意圖

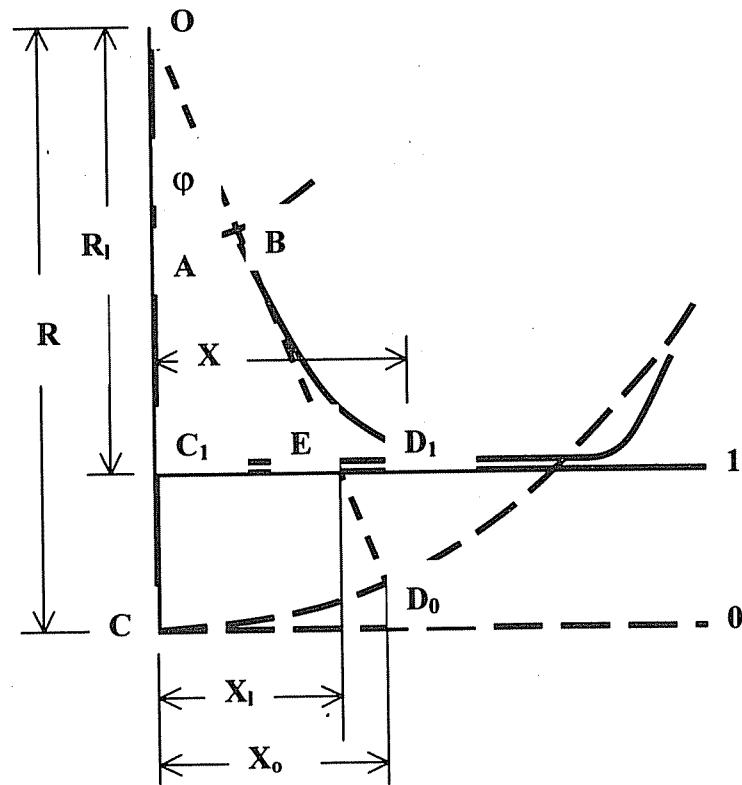


圖 2 滾動中輪胎變形示意圖

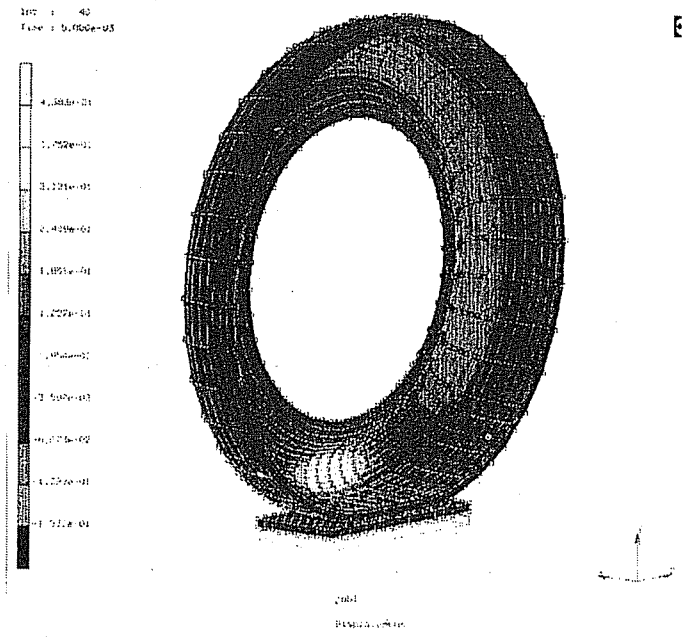


圖 3 輪胎接地形狀有限元素法計算模型

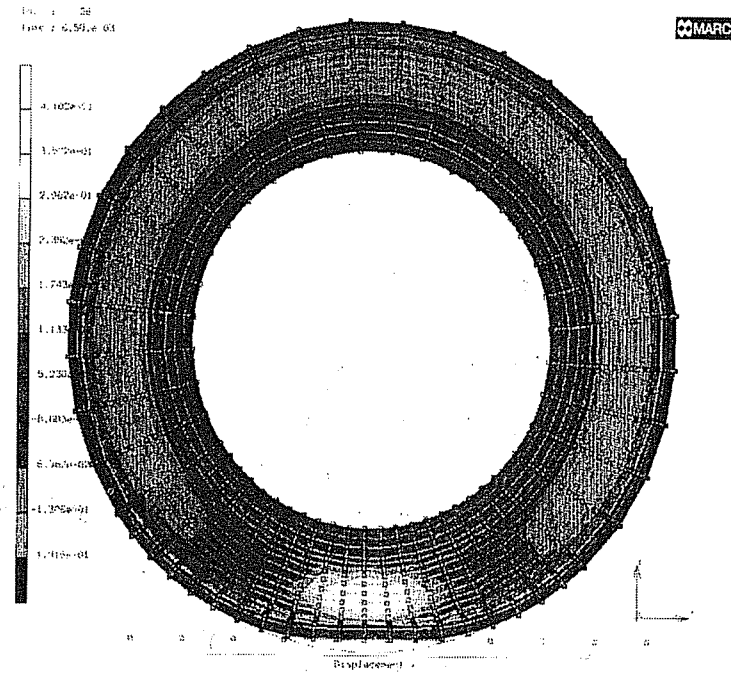


圖 4 輪胎滾動阻力有限元素法計算模型

## 伍、參考文獻

1. Samuel K. Clark, "Mechanics of Pneumatic Tires Chapter 8", U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
2. 黃義雄, "輪胎爆胎的分析與改善", 台灣大學機械所碩士論文, 1997.
3. Y. Watanabe and M. J. Kaldjian, "Modeling and Analysis of Bias-Ply motorcycle Tires", Computers and Structures, Vol.5-6, pp.653-658, 1983.
4. R. A. Stechschulte and J.R. Luchini, "A Laminated Composite Solid Element and Its Application to Tire Analysis", Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.22, No.2, pp.76-98, 1994.
5. A.A. Goldstein, "Finite Element Analysis of a Quasi-Static Rolling Tire Model for Determination of Truck Tire Forces and Moments", Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 24, No. 4, pp. 278-293, 1996.
6. 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, TSTCA, Vol. 25, No. 3, pp. 214-228, 1997.

# Tire Rolling Simulation

**Chiu, Jinn-Tong, Doong, Yann-Chern**

## ABSTRACT

In this paper, the finite element method is used to simulate the tire inflation, footprint and rolling processes under complexity boundary conditions of contact problem. From the simulation, the following results can be calculated, namely, 1.three dimensional inflation shape and stress distribution of tire, 2.footprint pressure and contour, 3. rolling resistance, braking force and moment. For the material model of FEM, the cord plies are fitted by orthotropic material model and the rubbers are fitted by Mooney-Rivlin material model. Finally, a PCR car tire is selected as an example to simulate the rolling process. The simulation was performed by using the finite element program MARC .

**Keywords:** tire, rolling resistance , inflation.