

基于纵向力的轮胎模型及参数分析

黄海波¹, 靳晓雄², 陈栋华², 丁玉兰¹

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 200092)

摘要:通过垂直负荷分布修正和滑动摩擦因数参数化, 建立轮胎纵向力模型, 利用其对轮胎纵向力特性进行分析, 并研究各因素对轮胎纵向力的影响。结果表明, 随着静摩擦因数的增大, 接地胎面完全滑移的滑移率增大, 滑移力 (F_{sx}) 和附着力 (F_{ax}) 增大; 纵向刚度主要影响峰值前的纵向合力, 随着轮胎纵向刚度和接地印痕长度的增大, 接地胎面完全滑移的滑移率减小, F_{ax} 减小, F_{sx} 增大。

关键词:轮胎; 纵向力模型; 滑移力; 附着力

中图分类号: TQ336.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2005)12-0721-04

轮胎纵向滑移特性对车辆的制动和驱动有重要影响。稳态条件下轮胎纵向滑移模型主要反映轮胎纵向力与滑移率之间的关系。在汽车行驶过程中, 轮胎由于其粘弹性和塑性, 通常是边滚边滑^[1]。轮胎接地区域分为滑移区和附着区, 如图 1 所示。在附着区内, 胎面与地面没有相对滑移, 轮胎与地面之间产生附着力。如果附着力大于地面所能承受的摩擦力, 胎面相对于地面会产生相对滑移。在接地印痕后部, 胎面开始滑移, 产生的滑移力是胎面磨损的主要因素。接地印痕内, 附着区和滑移区以及附着力和滑移力对车辆的行驶稳定性、轮胎的磨损以及操纵安全性等有重要影响。本工作通过研究轮胎的垂直负荷分布和滑动摩擦因数, 建立能够更真实反映轮胎受力情况的轮胎模型, 并对各参数进行分析。

1 稳态纵向滑移刷子模型

设胎体为刚性, 整个轮胎弹性集中在胎面上; 侧偏角为零; 胎面未开始滑移时, 静摩擦因数保持不变。取轮胎胎冠的一个单元进行分析, 如图 2 所示。轮胎滚动时单元发生弹性变形, 由 m 点拉伸到 l 点, 设胎面的速度为 v_x , 胎基的速度为 v_c , 则胎冠弹性引起的胎基和胎面的相对变形 δ_x 为:

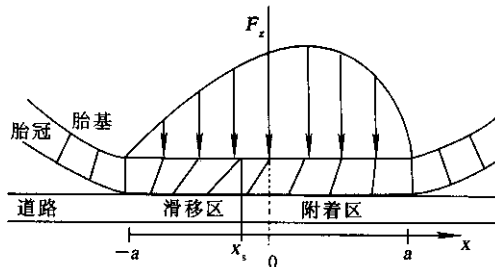


图 1 轮胎接地印痕分布示意

x_s —分界点; $2a$ —接地印痕长度; F_z —轮胎所受的径向力。

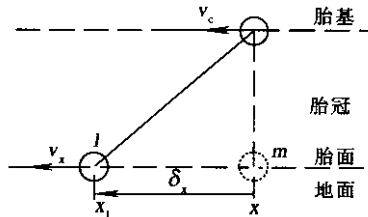


图 2 刷子模型局部单元受力示意

$$\delta_x = x_l - x = a - \frac{(a-x)v_x}{v_c} - x = -\frac{v_x - v_c}{v_c}(a-x) = -\lambda_x(a-x) \quad (1)$$

$$v_c = \omega R_d$$

式中 x_l ——单元胎面沿胎面的坐标;
 x ——单元胎面基部沿胎面的坐标;
 ω ——轮胎的滚动角速度;
 R_d ——轮胎滚动时的有效半径;
 λ_x ——轮胎的纵向滑移率。

设胎冠单元的刚度为 c_x , 则在点 x 处刷子单

元所受的力(F_x)如下:

$$dF_x = c_x \delta_x = c_x \lambda_x (a - x) dx \quad (2)$$

轮胎滚动时由于所受滚动阻力径向力分布前后不对称^[2](见图3),为了更好地接近实际情况,设轮胎垂直负荷(q_z)为:

$$q_z = \frac{3F_z}{4a} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{dx}{a} \right) \quad (3)$$

式中, d 为负荷分布修正因数,可以控制负荷分布形状。改进后的垂直负荷分布如图4所示。

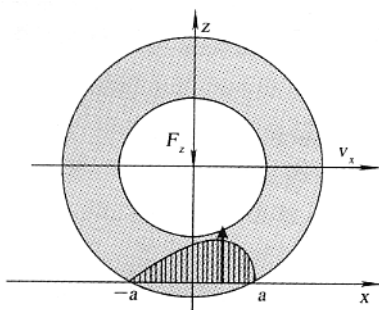


图3 垂直负荷分布示意

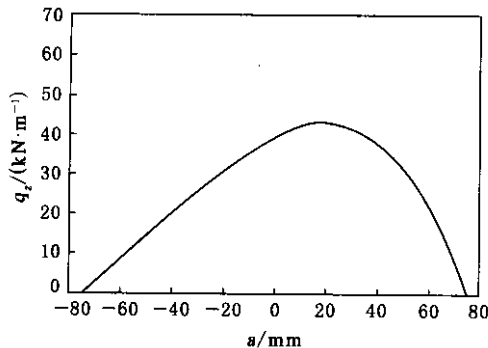


图4 模型改进后的垂直负荷分布

轮胎的滑动摩擦因数随速度的提高而减小^[1,3],因此修正的滑动摩擦因数(μ_s)为速度的函数^[4]:

$$\mu_s = \mu_a - n v_s \quad (4)$$

$$v_s = v_x \lambda_x / (1 + \lambda_x)$$

式中, μ_a 为轮胎与地面的静摩擦因数, n 是与轮胎材料有关的参数, v_s 为轮胎滑移速度。

由库仑定律: $dF_x = \mu_a q_z$,得到附着区与滑移区的临界点位置 x_s , $x_s \in [-a, a]$ 。

当轮胎单元坐标达到 x_s 点时胎面开始滑移,滑移力为 $\mu_s F_{sz}$ 。 F_{sz} 为滑移区内的轮胎径向力。这时在接地区域会出现3种情况。

(1) $x_s \leq -a$ 。整个接地印痕区域都附着在地

面上,胎面没有滑移,轮胎的力学特性主要依赖胎面特性,则

$$F_x = F_{ax} = \int_{-a}^a c_x \lambda_x (a - x) dx \quad (5)$$

式中, F_{ax} 为轮胎的附着力。

(2) $x_s \geq a$ 。接地胎面完全滑移,则

$$F_x = F_{sx} = \int_{-a}^a \mu_s \frac{3F_z}{4a} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{dx}{a} \right) dx \quad (6)$$

式中, F_{sx} 为轮胎的滑移力。

(3) $-a \leq x_s \leq a$ 。此时滑移区和附着区同时存在,轮胎处于半滑移状态,则在附着区内,

$$F_{ax} = \int_{x_s}^a c_x \lambda_x (a - x) dx \quad (7)$$

在滑移区内,

$$F_{sx} = \int_{-a}^{x_s} \frac{3F_z}{4a} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{dx}{a} \right) dx \quad (8)$$

根据库仑定律:

$$F_{sx} = \int_{-a}^{x_s} \mu_s \frac{3F_z}{4a} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{dx}{a} \right) dx \quad (9)$$

则总的纵向力为

$$F_x = F_{ax} + F_{sx} \quad (10)$$

在实际情况下,轮胎通常处于第3种情况,如图5所示。当 $\lambda_x \leq 23\%$,轮胎处于边滚边滑的情况;当 $\lambda_x = 23\%$,轮胎接地胎面完全滑移,已经没有附着区域, $F_{ax} = 0$,驱动力完全由滑移力提供, $F_{sx} = \mu_s F_{sz}$ 。纵向力最大值对应的滑移率出现在轮胎最大滑移力和最大附着力之间。

下面分析各参数对 F_x , F_{ax} 和 F_{sx} 的影响。为了更好地观察,纵向刚度的取值比实际情况偏小。

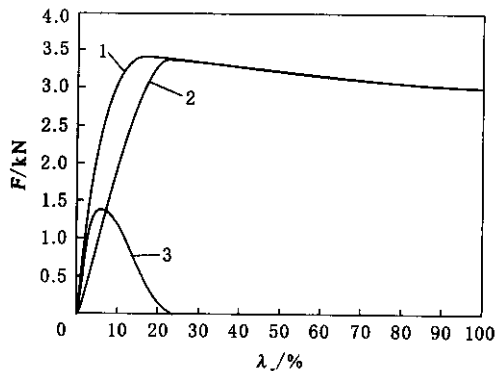


图5 纵向合力及分力随滑移率的变化

1— F_x ; 2— F_{sx} ; 3— F_{ax} 。 F_z 为4 000 N。

2 参数分析

2.1 静摩擦因数

静摩擦因数对纵向力的影响如图 6 所示。由图 6 可见,随着静摩擦因数的增大,接地胎面完全滑移的滑移率增大,最大附着力增大;相同滑移率下,随着静摩擦因数的增大, F_{sx} 和 F_{ax} 增大。说明路面的静摩擦因数越大,越有利于轮胎的制动和驱动,胎面打滑或抱死的几率越小。但是 F_{sx} 的增大会加速轮胎的磨损,缩短轮胎的寿命。

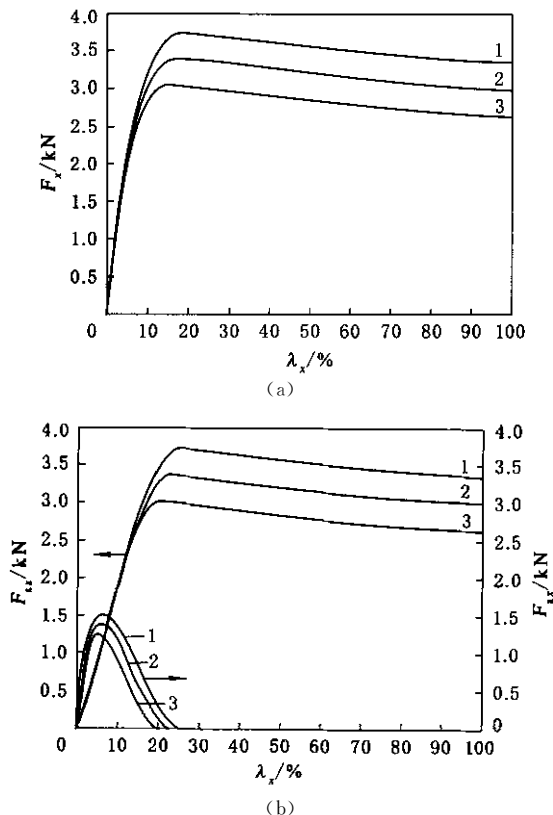


图 6 静摩擦因数对纵向力的影响

静摩擦因数:1—1.1;2—1.0;3—0.9。

2.2 纵向刚度

纵向刚度对纵向力的影响如图 7 所示。由图 7 可见,纵向刚度主要影响峰值前的纵向合力;随着轮胎纵向刚度的增大,接地胎面完全滑移的滑移率值减小;纵向刚度对纵向最大附着力和最大滑移力影响较小;相同滑移率下,随着纵向刚度的增大, F_{ax} 减小, F_{sx} 增大,这给车辆行驶稳定性带来较大的隐患,同时加速了轮胎的磨损。

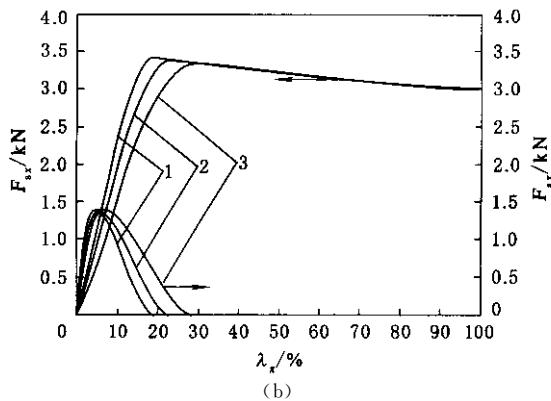
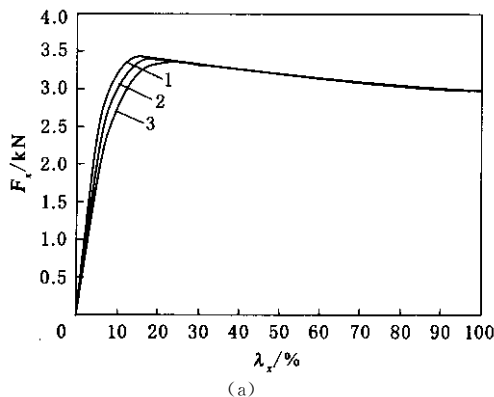


图 7 纵向刚度对纵向力的影响

纵向刚度($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$):1—1.2;2—1.0;3—0.8。

2.3 接地印痕(径向刚度)

接地印痕对纵向力的影响如图 8 所示。由图 8 可见,随着接地印痕的增大(轮胎径向刚度减小),接地胎面完全滑移的滑移率反而减小;与纵向刚度相似,其对纵向最大附着力影响较小;相同滑移率下,随接地印痕长度增大, F_{ax} 减小, F_{sx} 增大,同样对车辆行驶稳定性和轮胎的磨损不利。

3 结论

(1)通过修正轮胎的垂直负荷分布和参数化滑动摩擦因数,建立了轮胎纵向力刷子模型,使之更符合实际情况。

(2)正常情况下轮胎都在低滑移率下滚动,因此可以通过对纵向和径向刚度的调节控制轮胎的磨损及提高车辆的操纵稳定性。

(3)随着静摩擦因数的增大,接地胎面完全滑移的滑移率增大,最大附着力增大;相同滑移率

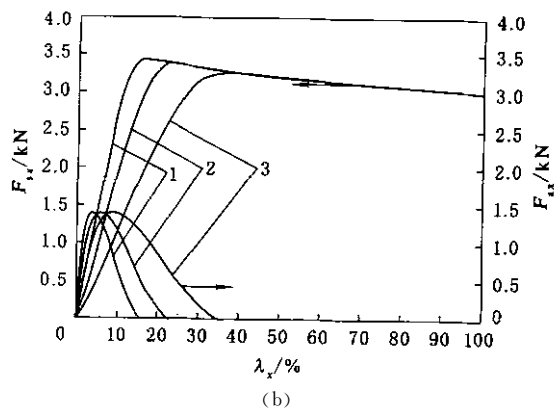
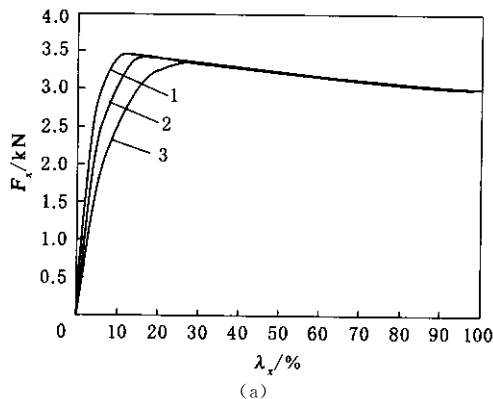


图8 接地印痕对纵向力的影响

接地印痕长度: 1—1.2a; 2—1.0a; 3—0.8a。

下,随着静摩擦因数的增大, F_{sx} 和 F_{ax} 增大。纵向刚度主要影响峰值前的纵向合力;随着轮胎纵向刚度的增大,接地胎面完全滑移的滑移率值减小;纵向刚度对纵向最大附着力和最大滑移力影响较小;相同滑移率下,随着纵向刚度的增大, F_{ax} 减小, F_{sx} 增大。随着接地印痕长度的增大(径向刚度减小),接地胎面完全滑移的滑移率减小;与纵向刚度相似,其对纵向最大附着力影响较小;相同滑移率下,随接地印痕长度增大, F_{ax} 减小, F_{sx} 增大。

参考文献:

- [1] 张洪欣. 汽车系统动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. 16-32.
- [2] 于志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 7-10.
- [3] Millan A J M. A non-linear friction model for self-excited vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 205(3): 323-335.
- [4] Svendenius J. Wheel model review and friction estimation [A]. Lund: Department of Automatic Control, 2003. 27.

收稿日期: 2005-07-11

Improved tire model for longitudinal force and parameter analysis

HUANG Hai-bo, JIN Xiao-xiong, CHEN Dong-hua, DING Yu-lan

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new tire model for longitudinal force was established by modifying the distribution of normal load and parameterizing the sliding friction coefficient. The model was used to analyze the longitudinal force characteristics of tire and investigate the influence of various factors on the longitudinal force of tire. The results showed that the sliding ratio of ground-contact tread, the sliding force (F_{sx}) and the adhesion force (F_{ax}) increased as the static friction coefficient increased; the longitudinal stiffness mainly had influence on the joint longitudinal forces before the peak value; and the sliding ratio of ground-contact tread and F_{ax} decreased, and F_{sx} increased as the longitudinal stiffness and the length of foot-print increased.

Keywords: tire; longitudinal force model; sliding force; adhesion force

启事 第三届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文集尚有部分剩余,每本售价100元。如有需要者,请与本刊编辑部乔晓霞联系。电话:(010)68156717。