

基于魔术公式的轮胎纵滑特性参数计算方法

邱昌峰, 周磊, 陈仁全, 孙向阳, 贾春辉, 仇吉伟, 张超, 杨洪涛

(青岛双星轮胎工业有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要: 基于轮胎纵滑试验的数据辨识模型参数, 建立轮胎纵滑模型, 提出基于魔术公式计算轮胎纵滑特性参数的方法, 可计算任意负荷下轮胎的动态纵向刚度、最大附着力因数和滑动附着力因数等参数。结果表明, 基于魔术公式的轮胎纵滑特性参数计算结果与测试结果的一致性很好。本方法可为轮胎研发部门和汽车厂轮胎性能改进提供有力的数据支持。

关键词: 轮胎; 魔术公式; 纵滑特性; 动态纵向刚度

中图分类号: TQ336.1; U463.341

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2021)10-0607-05

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2021.10.0607



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着新技术的发展, 轮胎的开发模式不断改变, 轮胎试制-轮胎评价的传统模式受到冲击, 虚拟轮胎设计-虚拟调试的新模式慢慢兴起^[1-4]。国内各轮胎厂、汽车厂及高校等研究机构正整合资源, 共同研究轮胎、车辆虚拟调试和评价, 以降低成本、提高轮胎调试和评价效率及精度^[5-8]。轮胎的纵滑特性参数在车辆虚拟仿真中具有重要的作用, 因为轮胎纵滑特性参数需要与防抱死(ABS)系统匹配, 在仿真过程的车辆制动时, 使得车辆滑行距离最短, 从而提高车辆的安全性和稳定性。由于轮胎纵滑特性参数的设定和验证需要进行大量的实车试验, 再加上大量的操作条件和车辆系统中相互作用的制约, 轮胎室内测试变得尤为重要。

本工作利用美国MTS(美特斯)公司的Flat Trac CT室内试验台提供轮胎及车辆仿真数据, 从而节省制作成本, 缩短开发周期。由于试验台是液压驱动, 在大滑移角下, 轮胎会产生振动, 影响纵滑数据, 因此不能采用原始数据直接求得轮胎的纵滑特性参数, 需要对数据进行拟合后再计算。

一般的拟合方法(如多项式拟合、插值等)具有一定的局限性, 不能延伸任意负荷下轮胎的纵滑特性, 不能为车辆的ABS系统提供任意载荷下的

数据, 因此本工作采用基于魔术公式的轮胎纵滑特性计算方法, 能够准确计算纵滑参数, 为车辆底盘工程师提供车辆建模、仿真的有效数据, 从而优化车辆性能, 使轮胎与车辆的性能达到最优。

1 实验

1.1 轮胎坐标系

测试采用SAE(Society of Automotive Engineers)轮胎坐标系, 如图1所示。SAE轮胎坐标系以车轮接地中心为原点, 三轴符合笛卡尔右手坐标系, 其X轴沿着车轮平面与道路平面的交线方向, 正方向代表轮胎滚动的方向; Y轴沿着轮轴在道路平面上的投影方向, 正方向代表从坐标系的后面看X轴正方向时, 向右为正方向; Z轴定义为X轴正方向与Y轴正方向的向量积, 与道路平面垂直, 正方向代表指向道路内部^[9]。

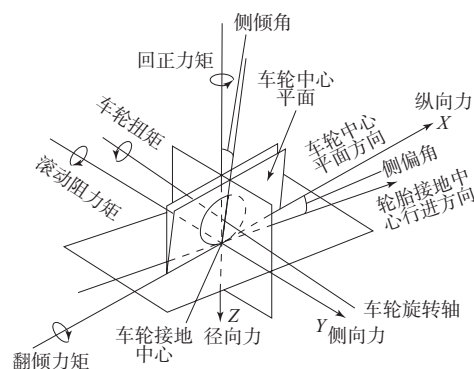


图1 SAE轮胎坐标系

作者简介: 邱昌峰(1987—), 男, 山东潍坊人, 青岛双星轮胎工业有限公司工程师, 硕士, 主要从事轮胎动力学性能测试、分析和建模仿真等研究。

E-mail: qcf825@163.com

1.2 试验轮胎

为了更好地验证试验数据的可靠性,本工作选用规格为205/55R16的同1条DOUBLESTAR轮胎(速度级别为V,负荷指数为91),选取3个不同负荷进行试验。

1.3 试验设备及方法

轮胎纵滑特性试验在美国MTS公司生产的Flact Trac CT六分力试验机上进行,根据GMW16337《轮胎动态六分力》标准进行测试,其测试充气压力为228 kPa,试验速度为60 km·h⁻¹,侧偏角、侧倾角均为0°,试验参考负荷为4 000 N,具体的纵滑特性测试程序参数设置如下:起始滑移率1 -2%,终止滑移率1 30%,起始滑移率2 -30%,终止滑移率2 2%,滑移率速率 10 %·s⁻¹,稳定时间 0.2 s,滑移率转数 1。

纵滑特性试验滑移加载使用三角波的加载方式,如图2所示。试验测试采集数据的频率为256 Hz,本工作滤波器使用椭圆低通滤波器,截止频率为10 Hz,滤波器的阶数为1阶。

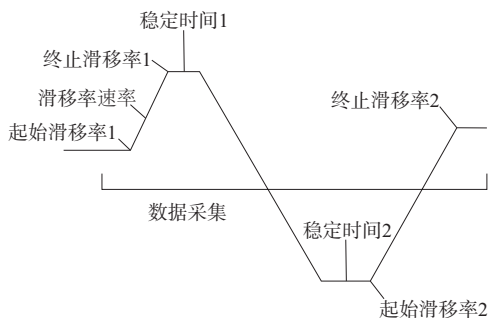


图2 滑移加载示意

2 轮胎纵滑特性参数

本工作轮胎纵滑特性参数主要包括滑移率(κ)、动态纵向刚度、峰值附着力因数、滑动附着力因数、局部滑移刚度等,如图3所示。图中, F_x 为纵向力, F_z 为径向试验负荷。

2.1 κ

汽车制动过程中,胎面留在地面的印痕是从车轮滚动到滑动一个渐变的过程,车轮制动能力越强,车轮滚动的成分就越少,滑动成分就越多,

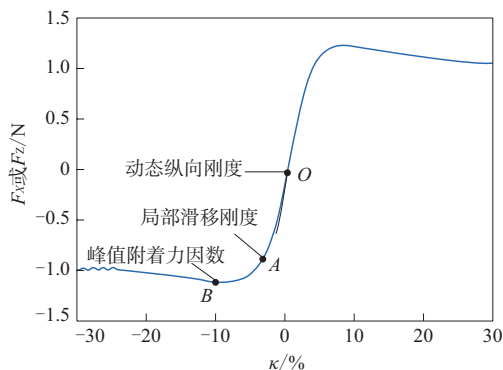


图3 制动/驱动附着力因数曲线

因此,一般采用 κ 来评价车轮滑动成分的量,其定义如下:

$$\kappa = \frac{r_0 \omega_w - \mu_w}{\mu_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中, μ_w 为车轮中心速度, r_0 为没有制动时的车轮滚动半径, ω_w 为车轮的角速度。当 $\kappa = -100\%$ 时,车辆纯滑动;当 $-100\% < \kappa < 0$ 时,车辆边滚动边滑动; $\kappa = 0$ 时,轮胎自由滚动(发生滑移和打滑现象);当 $0 < \kappa < 100\%$ 时,车辆边滚动边打滑;当 $\kappa = 100\%$ 时,车辆纯打滑。

2.2 动态纵向刚度

κ 为 $-3\% \sim +3\%$ (轮胎附着区)时, F_x 与 κ 的曲线斜率定义为轮胎动态纵向刚度。动态纵向刚度越大,轮胎达到最大附着力响应越快,反之则越慢。

2.3 峰值附着力因数

从图3可以看出,曲线OA段近似于直线,纵向力随 κ 的增大而增大,当过A点后纵向力缓慢上升,这是由于轮胎在A点后产生小的相对滑移,到达B点后,上升到最大值,附着力因数的最大值定义为峰值附着力因数。

2.4 滑动附着力因数

当附着力因数达到最大后,附着力因数随 κ 的增大而减小,直到 $\kappa = 100\%$, $\kappa = 100\%$ 的制动力因数为滑动附着力因数。

3 轮胎纵滑特性模型(魔术公式)

H. B. PACEJKA^[10]的魔术公式是近期在汽车操纵动力学研究中比较流行的公式,它是用特殊正弦函数建立的轮胎纵向力、侧向力和回正力矩模型。因只用一套公式就完整地表达了纯工况下

轮胎的力学特性,故称为魔术公式。本工作采用魔术公式的PAC2002模型对轮胎纵滑特性进行参数辨识,从而求得其纵滑特性参数。

为了更有利地模拟任意负荷下的轮胎纵滑特性,模型参数均为无量纲。

垂直标称负荷(F_{Z0}')定义如下:

$$F_{Z0}' = \lambda_{F_{Z0}} \times F_{Z0} \quad (2)$$

垂直负荷增量(df_z)定义如下:

$$df_z = \frac{F_z - F_{Z0}'}{F_{Z0}'} \quad (3)$$

纵滑特性魔术公式的PAC2002模型具体如下:

$$F_x = F_{x0}(\kappa, F_z, \gamma) \quad (4)$$

$$T = B_x \kappa_x - \arctan(B_x \kappa_x) \quad (5)$$

$$F_{x0} = D_x \sin\{[C_x \arctan(B_x \kappa_x - E_x T)] + S_{vx}\} \quad (6)$$

$$\kappa_x = \kappa + S_{hx} \quad (7)$$

$$\gamma_x = \gamma \times \lambda_{\gamma x} \quad (8)$$

$$C_x = P_{cx1} \times \lambda_{cx} \quad (9)$$

$$D_x = \mu_x \times F_z \quad (10)$$

$$\mu_x = (P_{dx1} + P_{dx2} df_z) \times (1 - P_{dx3} \times \gamma^2) \lambda_{\mu x} \quad (11)$$

$$E_x = (P_{ex1} + P_{ex2} df_z^2) \times [1 - P_{ex4} \operatorname{sgn}(\kappa_x)] \lambda_{ex} \quad (12)$$

$$K_x = F_z(P_{kx1} + P_{kx2} df_z) \times \exp(P_{kx3} df_z) \lambda_{kx} \quad (13)$$

$$B_x = \frac{K_x}{C_x D_x} \quad (14)$$

$$S_{hx} = (P_{hx1} + P_{hx2} df_z) \lambda_{hx} \quad (15)$$

$$S_{vx} = F_z(P_{vx1} + P_{vx2} df_z) \lambda_{vx} \times \lambda_{hx} \quad (16)$$

式中: F_{Z0} 为额定负荷, F_{x0} 为轮胎纵向力函数, γ 为轮胎外倾角;式中的纵滑特性比例因子和辨识参数因子的含义如表1和2所示。

根据轮胎纵滑特性魔术公式的计算方法,可以求得滑移率与纵向力的特性曲线,通过模型曲线可进一步计算出轮胎的纵向刚度、峰值附着力因数、纯滑动附着力因数、最大纵向力等特征参数,为汽车底盘开发工程师提供数据支持。

表1 纵滑特性比例因子

比例因子	含义	比例因子	含义
$\lambda_{F_{Z0}}$	额定负荷比例因子	λ_{KX}	F_x 滑动刚度比例因子
λ_{CX}	F_x 形状比例因子	λ_{HX}	F_x 水平位移比例因子
$\lambda_{\mu X}$	F_x 峰值摩擦因数比例因子	λ_{VX}	F_x 垂直移动比例因子
λ_{EX}	F_x 曲率比例因子	$\lambda_{\gamma X}$	F_x 侧倾比例因子

表2 辨识参数因子

参数因子	含义	参数因子	含义
P_{CX1}	纵向力形状因子	P_{KX1}	标称负荷下的纵滑刚度因子
P_{DX1}	标称负荷下的峰值因子	P_{KX2}	纵滑刚度随负荷的变化因子
P_{DX2}	峰值因子随负荷的变化因子	P_{KX3}	纵滑因子
P_{DX3}	峰值因子随侧倾角的变化因子	P_{HX1}	标称负荷下水平位移因子
P_{EX1}	标称负荷下的曲率因子	P_{HX2}	水平位移随负荷的变化因子
P_{EX2}	曲率随负荷的变化因子	P_{VX1}	标称负荷下垂直位移因子
P_{EX3}	曲率随负荷平方的变化因子	P_{VX2}	垂直位移随负荷的变化因子
P_{EX4}	驱动时曲率因子		

4 试验数据分析

4.1 数据处理

本工作分别对40% F_z (1 600 N),80% F_z (3 200 N),120% F_z (4 800 N)3种负荷下的轮胎进行测试,然后对测试数据进行PAC2002模型参数辨识,从而得到模型数据,最后对模型数据进行分析,对比曲线如图4所示。

由图4可见,测试曲线与仿真曲线一致性很好。

通过魔术公式的PAC2002模型对原始数据进行参数辨识,其辨识参数结果如表3所示。

4.2 数据分析

本工作通过相关性系数(R^2)来判定原始测试数据与仿真数据的拟合度,若 R^2 接近100%,则说明数据拟合度高,反之越低。

拟合数据与原始数据对应点误差的平方和(S_e)计算公式如下:

$$S_e = \sum_{i=1}^n (F_{x01} - F_{x02})^2 \quad (17)$$

式中, F_{x01} 为PAC2002模型的纵向力数据, F_{x02} 为试验机测试的纵向力数据。

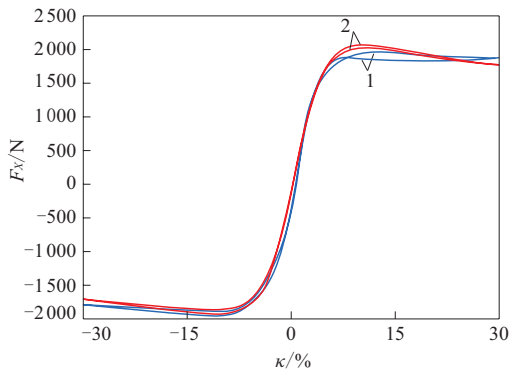
原始数据与均值之差的平方和(S_t)计算公式如下:

$$S_t = \sum_{i=1}^n F_{x02}^2 \quad (18)$$

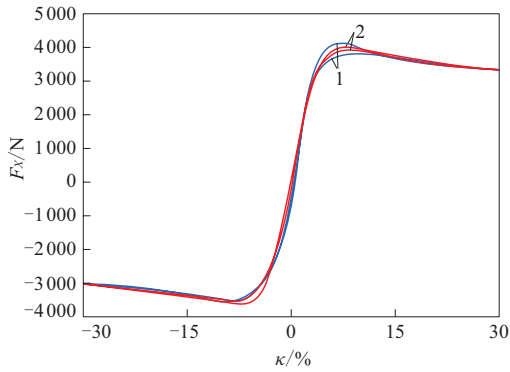
R^2 计算公式如下:

$$R^2 = (1 - \frac{S_e}{S_t}) \times 100\% \quad (19)$$

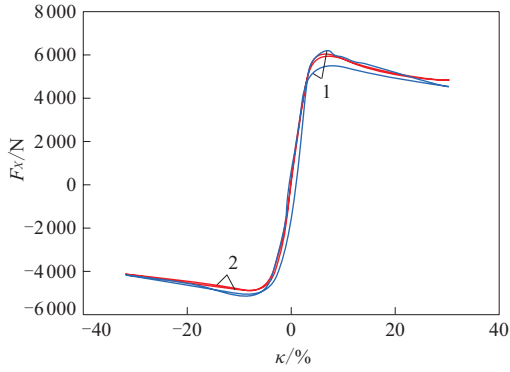
基于魔术公式的轮胎纵滑特性计算可以获得动态纵向刚度、峰值附着力因数、滑动附着力因数、最大纵向力等参数,如表4所示。



(a)40%F_z



(b)80%F_z



(c)120%F_z

1—测试曲线;2—仿真曲线。

图4 3种负荷下轮胎的纵滑特性测试曲线与仿真曲线对比

表3 辨识参数结果

参数因子	结果	参数因子	结果
P_{CX1}	1.507 9	P_{KX1}	31.203 5
P_{DX1}	1.216 2	P_{KX2}	23.760 4
P_{DX2}	-0.128 8	P_{KX3}	-0.526 3
P_{DX3}	0	P_{HX1}	-0.002 9
P_{EX1}	-0.041 0	P_{HX2}	-0.002 2
P_{EX2}	-0.104 5	P_{VX1}	0.063 6
P_{EX3}	-0.197 3	P_{VX2}	0.087 0
P_{EX4}	-6.181 7		

由表4可以看出,不同负荷下测试数据与计算数据的相关性系数均大于92%,说明两种结果相关性好。轮胎研发部门可通过纵滑特性参数改进轮胎的结构、配方及花纹,进一步提高轮胎的行驶安全性能。汽车底盘开发工程师可通过轮胎纵滑特性参数改进汽车ABS系统参数,使之与汽车底盘参数相配,为车辆的开发提供有力的支持。

5 结语

(1) 基于魔术公式计算轮胎纵滑特性参数是一种简单精确的计算方法,利用试验机测试的原始试验数据进行辨识求得辨识参数,可得到任意负荷下轮胎纵滑特性曲线,从而为车辆制动提供虚拟仿真的准确数据。

(2) 基于魔术公式的轮胎纵滑特性参数计算结果与测试结果的一致性很好。

(3) MTS公司的Flact Trac CT六分力试验机不能进行轮胎抱死试验,无法计算轮胎滑动峰值附着力因数,本工作通过纵滑特性参数辨识,可计算得到滑动附着力因数,为轮胎结构、配方、花纹的改进提供有力的数据支持。

参考文献:

[1] TAHERI S, WEI T. A new semi-empirical method for estimating tire combined slip forces and moments during handling maneuvers[J]. Journal of the American Society of Nephrology Jasn, 2015, 8 (2) :

表4 纵滑特性参数结果

项 目	40%F _z		80%F _z		120%F _z	
	测试数据	魔术公式	测试数据	魔术公式	测试数据	魔术公式
纵滑刚度/(N·% ⁻¹)	438.20	455.77	956.30	972.45	1 488.42	1 521.03
峰值附着力因数	1.23	1.21	1.14	1.13	1.09	1.05
滑动附着力因数	—	1.09	—	0.96	—	0.89
最大纵向力/N	1 986.42	1 950.22	3 648.59	3 627.80	5 189.65	5 035.24
R ² /%	95.44		95.62		92.92	

- 2896.
- [2] 徐婷. 考虑接地印迹特性的半物理轮胎模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [3] XIA D, LU D, TONG Y. A prediction method of tire combined slip characteristics from pure slip test data[C]. Detroit: SAE International, 2020.
- [4] 吕波. 轮胎侧偏纵滑特性分析及预测[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [5] 宗长富, 郭孔辉. 汽车操纵稳定性的研究与评价[J]. 汽车技术, 2000(6): 6-11.
- [6] 韦勇, 韦宝侣, 赵亮, 等. 轮胎力学特性对汽车操纵稳定性的影响分析[J]. 轮胎工业, 2020, 40(3): 131-138.
- [7] 崔志博, 柴德龙, 吕佳锋, 等. 高速滚动子午线轮胎变形和印痕预测方法[J]. 橡胶工业, 2020, 67(5): 346-355.
- [8] 许男. 复合工况下轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [9] GENT A N, WALTER J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛, 李勇, 冯希金, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [10] PACEJKA H B. Tire and vehicle dynamics (third edition) [M]. Great Britain: Elsevier Ltd, 2012.
- 收稿日期: 2021-04-18

Calculation Method of Tire Longitudinal Slip Characteristic Parameters Based on Magic Formula

QIU Changfeng, ZHOU Lei, CHEN Renquan, SUN Xiangyang, JIA Chunhui, QIU Jiwei, ZHANG Chao, YANG Hongtao

(Qingdao Doublestar Tire Industry Co., Ltd., Qingdao 266400, China)

Abstract: Based on the data of tire longitudinal slip test, the parameters of the tire longitudinal slip model were identified and the tire longitudinal slip model was established. A method to calculate the tire longitudinal slip characteristic parameters based on the magic formula was proposed. The dynamic longitudinal stiffness, maximum adhesion coefficient and slip adhesion coefficient of the tire could be calculated under different loads. The results showed that the calculation results based on the magic formula were in good agreement with the test results. This method could provide strong data support for tire performance improvement of tire research and development department and automobile factory.

Key words: tire; magic formula; longitudinal slip characteristic; dynamic longitudinal stiffness

赛轮集团为海螺集团矿山轮胎供货

日前,一批18.00R25, 21.00R33, 21.00R35, 24.00R35, 35/65R33和27.00R49全钢工程机械子午线轮胎成功发往海螺集团矿山装配仓库,这标志着赛轮集团股份有限公司(简称赛轮集团)中标“2021年海螺集团全系列子午线工程轮胎”项目后正式供货。作为海螺集团的长期直销轮胎供货商,赛轮集团已连续5年为其提供优质的产品与服务。

海螺集团是全球知名的大型跨国企业集团,2021年8月2日,《财富》杂志公布“2021世界500强企业”排名榜单,海螺集团以379.29亿美元的营业收入位居第315位,连续3年进入世界500强企业排

名榜,且排名较上年大幅提升52位。

近年来,赛轮集团始终紧紧围绕客户需求,实地走访调研海螺集团下属的70余家子公司矿山,为海螺集团矿山轮胎产品提供了有效的解决方案。截至目前,赛轮集团已为海螺集团的铜陵、济宁、铜仁等30余家子公司安装了“TIMP赛轮全生命周期轮胎智能管理系统”,实现了矿山开采领域数字化及矿山无人驾驶应用的提升。为了配合海螺集团战略直销客户深层次合作交流,赛轮集团率先启动矿山项目服务组,为海螺集团子公司的轮胎产品提供全球先进水平的后市场服务保障,为双方达成更大范围的合作奠定基础。

(本刊编辑部)