

轿车子午线轮胎侧向松弛长度的测试及表征

孟照宏^{1,2}, 史彩霞¹, 王 君¹, 邱昌峰², 于成龙², 宋美芹², 崇乾明¹

(1. 双星集团有限责任公司, 山东 青岛 266400; 2. 青岛轮云设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266400)

摘要:以轿车子午线轮胎为研究对象,对轮胎侧向松弛长度的测试及表征进行研究。结果表明:轮胎侧偏角阶跃测试方法属于一阶线性非时变系统,仿照一阶RC电路的阶跃响应,设定不同的时间常数数据检查点,可以提高数据拟合优度;提出一种基于先加载后转角的转动角阶跃测试方法,可以此进行测试数据的时间修正;当试验台对侧偏角的输入与反馈调校后并一次性按测试序列完成所有测试时,测试系统的时间延迟误差基本稳定,考虑时间延迟与未考虑时间延迟计算得到的轮胎侧向松弛长度差异随轮胎速度的增大呈正比放大趋势;在高负荷工况下,轮胎侧向松弛长度在小侧偏角区间发生交叠。研究结果可提高用于评估或验证单胎侧向动力学瞬态特性的数据分析效率和准确度。

关键词:轿车子午线轮胎;侧向松弛长度;延迟时间;阶跃响应;误差分析;时间修正

中图分类号: TQ336.1; U463.341⁺.4/.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2023)04-0246-05

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2023.04.0246



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

子午线轮胎是由橡胶、炭黑等材料复合而成的车辆承载部件,橡胶材料的非线性力学特性导致滚动轮胎与地面之间的力和力矩相对于运动输入表现出一定的滞后^[1-2],该现象在轮胎瞬态侧偏角阶跃时表现出的侧向力延迟响应类似一阶RC电路的阶跃响应,称为轮胎侧向松弛特性。在车辆底盘调校过程中,对应转向延迟响应的评价是重要的评价指标。研究表明,在车辆操纵稳定性(操稳)仿真评价中,通过增加对轮胎侧向松弛特性的参数化表征,能够增强车辆机动性指标控制,显著改善振荡输入条件下的车辆瞬态响应增益衰减程度^[2-3]。

J.E.STEVENS等^[4-7]对轮胎侧向松弛特性进行了探索研究,阐明了其作用机理、试验方法及对整车操稳动力学性能的影响;J.P.MAURICE等^[8-11]进一步将轮胎侧向松弛特性进行数字化表征,并引入到轮胎动力学Magic Formula模型中,奠定了车辆操稳仿真中应用低频瞬态侧向动态力学特性(一阶松弛系统)的基础。W.LUTY^[12-13]采用转鼓试验台对拖车轮胎侧向松弛特性进行侧偏角正弦变频扫频测试,得到其侧向松弛长度与轮胎侧偏

阻力、车轮转速等条件之间的变化关系并应用到车辆操稳仿真中,得到轮胎侧向松弛可以显著改变轮胎与车辆侧向动力学和行驶安全相关的观察物理量;C. ANGRICK等^[14]探究了轮胎内部及胎面温度对轮胎侧向松弛长度的影响规律,并探讨了该规律扩展到室外真实路况时的可行性;李飞等^[15-17]对轮胎侧向松弛长度进行了测试方法和数据处理方面的研究,发现了不同测试方法对轮胎侧向松弛长度测试结果的影响。

以上文献中对测试数据的处理并没有考虑试验台传感器固有的响应延迟、数据采集时间点与时间常数对应点错位时间和侧向力响应初始计算时间点不确定等因素造成的表征误差,其对于低速工况影响较小,但对车辆高速状态双移线、方向盘角阶跃等工况下的评价影响较大。同时,从文献[18-19]的仿真结果来看,依据轮胎侧向力计算其侧向松弛长度,同样因存在时间差异导致得到的时间常数出现偏差。

本工作以轿车子午线轮胎为研究对象,参考一阶RC电路的阶跃响应处理方法对转动角阶跃得到的侧向力时域响应曲线进行迭代优化,获取轮胎侧向松弛长度时间常数对应的时间区间,并以不同时间常数对应的轮胎侧向力作为数据校验点,验证数值优化的合理性。并以此为基础,参考

作者简介:孟照宏(1987—),男,山东青岛人,双星集团有限责任公司工程师,硕士,主要从事车辆和轮胎动力学特性研究。

E-mail: mengzhaohong0703@163.com

文献[20]提出简化计算方法,以提高用于评估或验证单胎侧向动力学瞬态特性的数据分析效率和准确度。

1 实验

1.1 试验轮胎及设备

以215/60R17 96H DH16S轿车子午线轮胎(见图1)为研究对象,采用美国MTS公司的Flat-Trac CT III六分力试验台进行轮胎侧向松弛长度的测试研究。



图1 试验轮胎

1.2 试验原理及方法

轮胎侧向松弛长度的测试主要有转动角阶跃法、侧偏角阶跃法、正弦变频扫频法和刚度法^[15-17,21],均涉及到轮胎六分力试验台的传感器延迟误差和时间常数起算时间的确定问题。

本工作以转动角阶跃法为研究算例,计算滚动轮胎经过瞬态侧偏角输入后侧向力上升至稳态值63.2%时对应的滚动距离;由于该测试方法同时满足非线性系统和时变系统的特征,可将其归于一阶线性非时变系统,因此其阶跃响应为单位阶跃函数与系统冲激响应的卷积;仿照一阶RC电路的阶跃响应,频域下输出电压和输入电压的关系为^[22]

$$V_o(s) = \frac{1}{1 + \tau s} V_i(s) \quad (1)$$

式中, $V_o(s)$ 为频域下输出电压, $V_i(s)$ 为频域下输入电压, τ 为时间常数, s 为频率复变量。

由拉氏变换可得时域下输出电压和输入电压的关系为

$$V_o(t) = V_i(t)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

式中, $V_o(t)$ 为时域下输出电压, $V_i(t)$ 为时域下输入电压, t 为时间。

由式(2)可得,当 $t=\tau$ 时, $V_o(t)=63.2\%V_i(t)$;当 $t=2\tau$ 时, $V_o(t)=86.5\%V_i(t)$;当 $t=3\tau$ 时, $V_o(t)=95\%V_i(t)$ 。

同理,瞬态侧偏角输入下的轮胎侧向力在空间域的响应表达为

$$F_y(t) = F_{yt}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

式中, $F_y(t)$ 为瞬态侧偏角输入下的轮胎侧向力, F_{yt} 为侧向力稳态值。

增加数据校验点 $[2\tau, 86.5\%F_{yt}]$ 和 $[3\tau, 95\%F_{yt}]$ 作为约束,可以提高测试数据优化函数的响应精度。

由式(3)可获得 τ 对应的时间区间 $[t_1, t_2]$ 。对 $[t_1, t_2]$ 内的速度与时间关系曲线进行样条插值,并将该区间等分为 n 份,即可采用复化梯形求积得到轮胎侧向松弛长度为

$$L_y = \frac{1}{2n} \left[V_x(t_1) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} V_x(t_i) + V_x(t_2) \right] \quad (4)$$

式中, L_y 为轮胎侧向松弛长度, $V_x(t_1)$ 和 $V_x(t_2)$ 分别为 t_1 和 t_2 时间点的轮胎速度, $V_x(t_i)$ 为 t_i 时间点的轮胎速度。

轮胎低速状态下采用先转角后加载或先加载后转角的侧偏角阶跃测试方法得到的松弛特性模型有着现实的意义^[15-17,21],但当高速行驶的车辆紧急避险时,提前设定的侧偏角将受到局限,因此本工作采用先滚动加载后瞬态转角输入的转动角阶跃测试方法,以规避文献中对试验的部分预先设定,其某段测试序列如表1所示。另外,调整测试方法中的轮胎速度和负荷设定,不仅能够获取不同速度、负荷条件下的轮胎侧向松弛数据,还能够省略轮胎动力学建模的自由滚动半径测试过程(如表1步骤3),降低测试成本。

1.3 试验方案

轮胎侧向松弛长度试验方案如表2所示。

需要注意的是,在测试过程中,若发现侧偏角超调量超过设定值的10%,则当次试验须重新测试或对试验台重新进行调校后测试。

2 数据分析与结果讨论

2.1 数据分析

以 $[\text{Min}(f)]$ 为目标优化函数[见式(5)],采用非线性最小二乘法与L-BFGS校正算法相结合的

表1 转动角阶跃测试方法

步骤	时间/s	侧偏角/(°)	轮胎速度/(km·h ⁻¹)	备注
1	15.0	0	0	Mullins效应消除
2	0.5	0	5	加载速度
3	10.0	0	5	等待稳定
4	5.0	0	5	数据采集
5	0.1	1	5	施加侧偏角
6	5.0	1	5	保持稳定
7	5.0	0	0	侧偏角复位

注:充气压力为230 kPa,负荷为6 965 N;试验台调校时,须对侧偏角输入与反馈进行跟踪观测,以保证最小的系统时间延迟。

表2 试验方案设计

步骤	负荷率/%	侧偏角/(°)	轮胎速度/(km·h ⁻¹)
1	40	0.5, 1, 2, 3, 4, 5	5, 60
2	80	0.5, 1, 2, 3, 4, 5	5, 60
3	100	0.5, 1, 2, 3, 4, 5	5, 60
4	120	0.5, 1, 2, 3, 4, 5	5, 60

注:充气压力为230 kPa。

方式对测试数据进行迭代优化。

$$\text{Min}(f) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_{ti} - F_{yi})^2}{N}} \quad (5)$$

式中, F_{ti} 为式(3)对应的第 t_i 时间点轮胎侧向力预测值, F_{yi} 为测试数据第 t_i 时间点轮胎侧向力, N 为截断时间点后的数据样本总量。

数据处理及计算过程如下。

(1) 测试数据预处理。对比侧偏角输入与反馈误差,找到系统测试时间延迟误差(时间延迟误差);对步骤3下的轮胎侧向力取平均值。

(2) 按照时间延迟误差和轮胎侧向力平均值将侧向力与时间的关系曲线平移至坐标原点,构建具有延迟特征的轮胎侧向力阶跃响应曲线。

(3) 截断时间点设定。目标优化函数对测试数据的拟合起始时间为 T_s ,以防止轮胎侧向力响应延迟对拟合优度产生影响。

(4) 数据校验点验证。优化函数计算得到时间常数后,采用数据校验点验证拟合精度时,可使用样条插值算法解决数据采集时间点与时间常数对应点错位的问题。

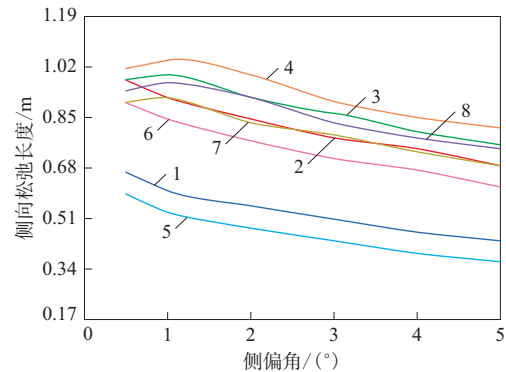
为提高数据计算处理效率,本工作对轮胎侧向松弛长度计算方法进行了程序化处理。

2.2 结果讨论

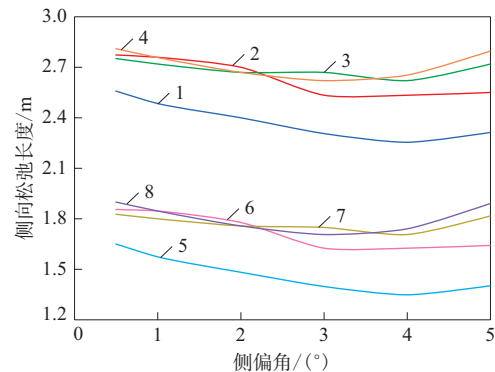
2.2.1 时间延迟误差对轮胎侧向松弛长度的影响

根据轮胎侧向松弛测试工况获取侧向松弛

长度计算结果,如图2所示,侧偏角度及轮胎侧向力遵从ISO-W坐标系(轮胎接地中心点笛卡尔坐标系)。



(a) 速度为5 km·h⁻¹



(b) 速度为60 km·h⁻¹

未考虑延迟时间负荷率/%: 1—40; 2—80; 3—100; 4—120。

考虑延迟时间负荷率/%: 5—40; 6—80; 7—100; 8—120。

图2 延迟时间对不同速度下轮胎侧向松弛长度的影响

从图2(a)可以看出:在低速工况下,时间延迟误差引起侧向松弛特性表征差异;侧向松弛长度随着负荷的增大而增大,但增大梯度逐渐减小,与文献[21]的结论一致;在小侧偏角区间[0°, 2°], 100%和120%负荷率对应的侧向松弛长度先增大后减小,且峰值拐点向大负荷一侧移动,与文献[21]的结论一致。

从图2(b)可以看出:侧向松弛长度随着侧偏角的增大先减小后增大;在高速度和高负荷工况下,侧向松弛长度在小侧偏角区间[0°, 2°]的差异较小,发生曲线交叠,参考文献[15],采用刚度法能够很好地解释这种现象,即高速度和高负荷工况下,测试轮胎侧偏刚度对径向负荷的响应处于峰值拐点附近,呈略微下降趋势,而静态横向刚度随负荷

的增大呈近似线性下降趋势,且两者下降梯度的差异较小(见图3)。

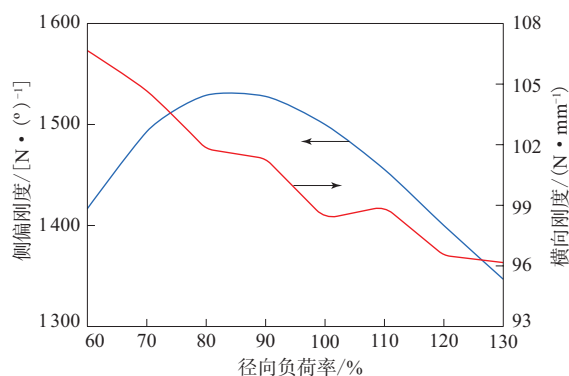


图3 径向负荷对刚度的影响

测试中还发现,当试验台对侧偏角的输入与反馈调校后,一次性按测试序列完成所有测试时,时间延迟误差基本稳定,即延迟时间相同,因此考虑时间延迟与未考虑时间延迟计算得到的松弛长度差异随速度的增大呈正比放大趋势。

2.2.2 简化计算方法

大量的测试跟踪和研究发现,正式测试之前对测试台架进行侧偏响应调校和暖胎,时间延迟误差相对稳定(本研究试验轮胎的时间延迟误差为0.054 69 s)。

文献[20]针对车辆操稳评价中对转向盘转角阶跃试验的数据处理方法,对轮胎侧偏角阶跃测试数据提出了时间修正的概念(延迟时间与角阶跃时间之比),以简化相同测试流程下数据文件重复检查的问题,依据此方法即可对侧向力瞬态响应数据进行比例修正(见图4),从而数据处理流程得到规范,计算效率提高。

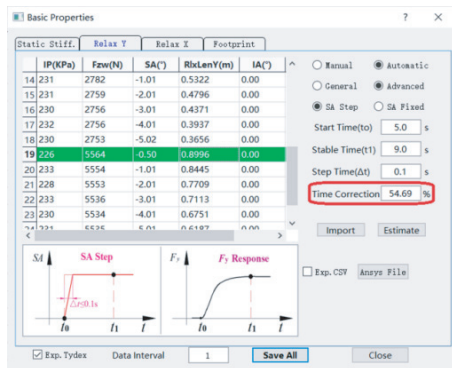


图4 轮胎侧向松弛长度的时间修正界面

3 结论

本工作对轮胎侧向松弛长度进行了测试及表征研究,探究了测试台架时间延迟误差对试验数据的影响,从原理上解释了转动角阶跃法的测试机理和数据处理方法,并提出减少测试误差的一种简化计算方法,有如下结论。

(1) 轮胎转动角阶跃法属于一阶线性非时变系统,能够仿照一阶RC电路的阶跃响应设定不同的时间常数数据检查点,以提高数据拟合优度。

(2) 提出一种转动角阶跃测试数据的时间修正方法;当试验台对侧偏角的输入与反馈调校后,一次性按测试序列完成所有测试时,时间延迟误差基本稳定,因此考虑时间延迟与未考虑时间延迟计算得到的轮胎侧向松弛长度差异随轮胎速度的增大呈正比放大趋势。

(3) 在高负荷工况下,轮胎侧向松弛长度在小侧偏角区间发生交叠,这是轮胎动力学模型—魔术公式模型中轮胎侧向松弛长度未能充分表征的情形。

此外,根据一阶线性非时变系统的响应原理,在一阶RC电路中,定义时间常数为电阻与电容的乘积,对于可看做多个线性弹簧与阻尼器并联的轮胎而言,能否定义其侧向松弛特性为弹簧定长系数与阻尼系数的乘积有待开展进一步理论和测试研究。

参考文献:

- [1] 史影霞,孟照宏,苏明,等. 复杂花纹轿车子午线轮胎带束层结构对轮胎高速温度场的影响研究[J]. 橡胶工业,2022,69(8):578-585.
- [2] 李雪莉,张元伟,邱海漩. 基于轮胎稳态和瞬态特性的车辆响应研究[J]. 橡胶工业,2020,67(7):495-501.
- [3] VANTSEVICH V V, GRAY J P. Relaxation length review and time constant analysis for agile tire dynamics control[C]. Proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Boston: Design Engineering Division Computers and Information in Engineering Division,2015:2-5.
- [4] STEVENS J E. Relaxation characteristics of pneumatic tires[J]. Journal of the Aerospace Sciences,1959,26(6):343-350.
- [5] LOEB J S. The measurement of tire static stiffnesses and their relation to relaxation lengths[D]. State of Ohio:The Ohio State University,1985.
- [6] LOEB J S, GUENTHER D A, CHEN F H, et al. Lateral stiffness, cornering stiffness and relaxation length of the pneumatic tire[J]. SAE

- Technical Paper Series, 1990, 99: 147–155.
- [7] HEYDINGER G J, GARROTT W R, CHRSTOS J P, et al. The dynamic effects of tire lag on simulation yaw rate predictions[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1994, 116(2): 249–256.
- [8] MAURICE J P, PACEJKA H B. Relaxation length behaviour of tyres[J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 1997, 27(s1): 339–342.
- [9] HIGUCHI A, PACEJKA H B. The relaxation length concept at large wheel slip and camber[J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 1997, 27(s1): 50–64.
- [10] PACEJKA H B, BESSELINK I J M. Magic formula tyre model with transient properties[J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 1997, 27(s1): 234–249.
- [11] PACEJKA H B, IGO B. Tire and vehicle dynamics (third edition) [M]. New York: Butterworth Heinemann, Elsevier Ltd, 2012.
- [12] LUTY W. An analysis of tire relaxation in conditions of the wheel side cornering angle oscillations[J]. Journal of Kones, 2011, 18(1): 325–332.
- [13] LUTY W. Influence of the tire relaxation on the simulation results of the vehicle lateral dynamics in aspect of the vehicle driving safety[J]. Journal of Kones, 2015, 22(1): 185–192.
- [14] ANGRICK C, VAN P S, PROKOP G. Influence of tire core and surface temperature on lateral tire characteristics[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2014, 7(2): 468–481.
- [15] 李飞, 姜清伟, 李洋. 轮胎侧偏非稳态特性测量方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(9): 29–34.
- [16] 邱昌峰, 周磊, 刘俊杰, 等. 轮胎侧偏松弛长度试验方法研究[J]. 轮胎工业, 2019, 39(10): 633–636.
- [17] 卢荡, 索艳茹, 卢磊, 等. 一种轮胎侧向松弛长度测量方法[P]. 中国: CN 109556891A, 2019-04-02.
- [18] LUTY W. Simulation research of the tire basic relaxation model in conditions of the wheel cornering angle oscillations[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2016, 148(1): 012015.
- [19] WEI C F, OLATUNBOSUN O A. The effects of tyre material and structure properties on relaxation length using finite element method[J]. Materials & Design, 2016, 102: 14–20.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 汽车操纵稳定性试验方法: GB/T 6323—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [21] 王健. 考虑胎压的非稳态轮胎力学特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [22] 朱桂萍, 于歆杰, 陆文娟. 一阶RC电路时域分析和频域分析的对比[J]. 电气电子教学学报, 2007, 29(3): 29–34.

收稿日期: 2022-12-02

Measurement and Characterization of Lateral Relaxation Length of Passenger Car Radial Tire

MENG Zhaohong^{1,2}, SHI Caixia¹, WANG Jun¹, QIU Changfeng², YU Chenglong²,
SONG Meiqin², CHONG Qianming¹

(1. Doublestar Group Co., Ltd, Qingdao 266400, China; 2. Qingdao Lunyun Design and Research Institute Co., Ltd, Qingdao 266400, China)

Abstract: The measurement and characterization of the lateral relaxation length of passenger car radial tire were studied. Since the step test method of the sideslip angle of the tires was a first-order linear and time-invariant system, by simulating the step response of a first-order RC circuit and setting different time constant data checkpoints, the data fit could be improved. In addition, a step test method of rotation angle by loading first and then turning angle was proposed, which could be used for time correction of the test data. The time delay error of the test system was basically stable when the input and feedback of the test bench to the sideslip angle were adjusted and all the tests were completed according to the test sequence at one time. It was found that the difference between the lateral relaxation length of the tire calculated with and without considering the time delay was directly proportional to the increase of tire speed. Meanwhile, under the high load condition, the lateral relaxation length of the tire overlapped at the small sideslip angle. The research results could improve the efficiency and accuracy of data analysis for the evaluation and verification of the lateral dynamic transient characteristics of a single tire.

Key words: passenger car radial tire; lateral relaxation length; time delay; step response; error analysis; time correction