

轿车子午线轮胎侧向松弛长度的仿真分析

宋美芹¹, 邢正涛², 翟明荣¹, 孟照宏¹, 史彩霞², 于成龙¹

(1. 青岛轮云设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266400; 2. 青岛双星轮胎工业有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要:对215/60R17 96H DH16S轿车子午线轮胎进行侧向松弛长度的仿真分析。结果表明:采用两种仿真方法[对轮胎与轮辋同时施加瞬时侧偏角(简称方法1)和仅对轮辋施加瞬时侧偏角(简称方法2)]可以得到不同的轮胎侧向松弛长度,方法2结果与试验结果的吻合度更高;随着负荷的增大,轮胎侧向力的最大值和侧向松弛长度均增大;随着充气压力的增大,轮胎侧向力最大值变化不大,侧向松弛长度减小。

关键词:轿车子午线轮胎;侧向松弛长度;阶跃输入;有限元方法

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2024)03-0188-04

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2024.03.0188



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎为车辆与地面接触的唯一部件,影响车辆的操纵稳定性、行驶平顺性和安全性等。轮胎的瞬态效应主要包括轮胎松弛长度、惯性和陀螺效应,是车辆操纵稳定性的主要评价指标之一^[1-6]。轮胎松弛长度是轮胎表征瞬态特性的主要指标,反映了轮胎输入力与输出位移响应之间的时间延迟特性,即当车辆出现瞬态转向时,轮胎驱动轮随方向盘转动一定角度(此时轮胎承受侧向力),由于轮胎结构的复杂性及胶料的粘弹性,在一段时间后,轮胎才与轮辋转向角度一致,侧向力达到稳定。从轮胎引入转向角到其侧向力达到稳定所需的时间为轮胎松弛时间,轮胎在侧向力达到其63.2%稳定值的时间内滚动的距离为轮胎松弛长度。

轮胎松弛包括侧向松弛和纵向松弛两种,前者影响车辆的操纵稳定性,后者影响车辆的制动性能。轮胎松弛长度(或松弛时间)越短,轮胎的操控性能越优异。因此,准确预测轮胎松弛长度对精确模拟车辆转向响应具有重要的意义^[7]。

从20世纪50年代起,人们开始探索研究轮胎松弛长度,轮胎松弛特性的作用机理、分析模型(包括刷子模型、弦模型和非稳态模型等)、试验方法和表征方法等已有文献报道^[8-9]。

作者简介:宋美芹(1986—),女,山东青岛人,青岛轮云设计研究院有限责任公司工程师,硕士,主要从事轮胎性能仿真的相关工作。

E-mail: smq@doublestar.com.cn

V. V. VANTSEVICH等^[10]对之前文献中的轮胎侧向和纵向松弛长度进行了统计分析。W. LUTY^[11]运用基本松弛模型对轮胎侧向松弛长度进行仿真分析,得到了轮胎转角变化对侧向力的影响规律。C. F. WEI等^[7]采用有限元方法,研究了轮胎材料和结构特性对轮胎松弛长度的影响。李飞等^[12-13]采用不同的测试方法对轮胎侧向松弛长度进行了研究,得出测试方法对轮胎松弛长度的影响。

在轮胎松弛长度的有限元仿真中,边界条件设定方法有两种,一种是对轮胎与轮辋同时施加瞬时侧偏角(简称方法1),另一种是仅对轮辋施加瞬时侧偏角(简称方法2)。

本工作以215/60R17 96H DH16S轿车子午线轮胎为研究对象,通过建立复杂花纹轮胎的三维有限元模型,分析不同轮胎侧向松弛长度的仿真实现方法,并借助六分力试验机对轮胎侧向松弛长度进行了验证,可为轮胎动力学数字化模型的快速构建提供参考。

1 有限元仿真

1.1 材料模型

橡胶材料具有非线性的力学性能,目前常用的材料模型有Neo-Hookean模型、Yeoh模型、Mooney-Rivlin模型及Ogden模型,主要表征橡胶材料的超弹和粘弹特性,同时在表征其粘弹特性时也会用到Prony级数、时温等效方程和松弛参

数等。

1.2 结构模型

轮胎有限元建模流程如图1所示。

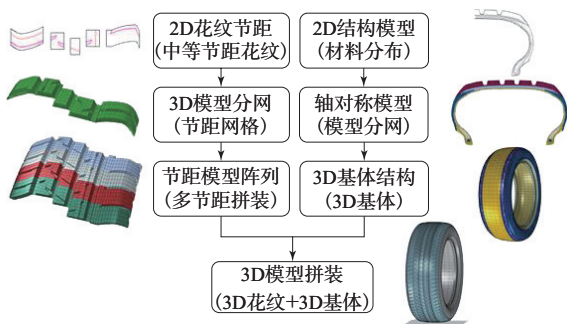


图1 轮胎有限元建模流程

轮胎的有限元模型分为胎体和胎面花纹两部分,具体建模步骤见文献[14]。

轮胎侧向松弛长度的测试条件为:充气压力 230 kPa,标准负荷 5 000 N,侧偏角 1°,速度 5 km·h⁻¹;考虑到仿真计算的时效问题,仿真速度设定为60 km·h⁻¹,其他条件同测试条件。

1.3 有限元分析方法

在车辆转弯的仿真分析中,轮胎在一段时间内达到预定侧偏角,其侧向力在该段时间内从较小值增大到稳定值,不同转向输入会影响轮胎的松弛特性。在轮胎有限元仿真分析中,转向的阶跃输入(或称瞬时输入)可以采用方法1和方法2两种边界条件。方法1设定轮胎与轮辋的瞬时阶跃起始时间为0.15 s,阶跃时间为0.10 s;方法2仅对轮辋设定阶跃起始时间为0.15 s,阶跃时间为0.10 s。

在轮胎侧向松弛长度的实际试验中,无法对轮胎和轮辋同时施加侧偏力或侧偏角,只能通过轮辋施加力或角度,然后传递给轮胎。哪种仿真方法与试验结果更加吻合,需要经过试验分析来验证。

2 轮胎侧向松弛长度测试

采用美国MTS公司生产的六分力试验机按照GMW 15204—2007《轮胎力和力矩稳态试验》和GMW 15206—2007《轮胎残余回正力矩试验》测试试验轮胎的力学性能,测试条件为:温度 25 ℃,数据采集频率 1 024 Hz。

轮胎侧向松弛长度的测试方法主要有刚度法、侧偏角阶跃法(先施加侧偏角,再施加测试速度)和转动角阶跃法(先施加测试速度,再施加侧偏角),其中侧偏角阶跃法包括先转角后加载法和先加载后转角法^[2]。

为实现仿真分析与试验过程的一致性,本工作采用转动角阶跃法^[13],具体步骤如表1所示。

表1 转动角阶跃法测试要求

步骤	时间/s	侧偏角/(°)	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	5.0	0	5	等待稳定
4	1.0	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

3 计算原理

在轮胎松弛长度仿真与试验数据的分析中,为方便计算输出结果,可将其分解为无限多个小阶跃步,通过小阶跃步将所有结果相加,得到总结果,然后通过优化迭代得到最优解。

轮胎侧向力表达式为

$$F = F_{ss}(1 - e^{-t/\beta})$$

式中: F 为轮胎侧向力,N; F_{ss} 为轮胎达到稳定时的侧向力,N; t 为时间,s; β 为轮胎松弛时间,s。

对小阶跃步进行卷积积分,有

$$F = \frac{dF}{dA_T} \int_0^t (1 - e^{-(t-\tau)/\beta}) dA_T$$

式中, τ 为小阶跃的时间,s; A_T 为小阶跃步长。

当轮胎达到稳定时, $t=\beta$,此时阶跃侧向力与侧向松弛长度分别为

$$F_{63.2\%} = F_{ss}(1 - e^{-1})$$
$$l = v \times \beta$$

式中: $F_{63.2\%}$ 为稳态侧向力的63.2%; v 为轮胎速度,m·s⁻¹; l 为轮胎侧向松弛长度,m。

4 结果与讨论

4.1 不同仿真方法对轮胎侧向松弛长度的影响

不同方法下,轮胎侧向力随时间变化的仿真及拟合曲线如图2所示。

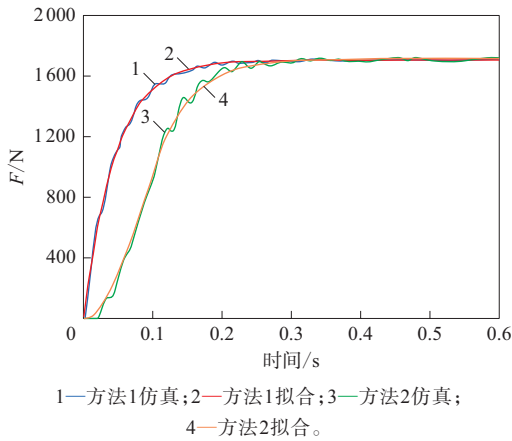


图2 轮胎侧向力随时间变化的仿真及拟合曲线

从图2可以看出,在相同充气压力、负荷和侧偏角下,通过两种方法得到的轮胎侧向力的最大值相近。但是轮胎侧向力趋于稳定的时间不同,采用方法2的轮胎侧向力趋于稳定的时间长于方法1。

不同负荷率下轮胎侧向松弛长度的仿真结果和试验结果如表2所示。

表2 不同负荷率下轮胎侧向松弛长度的仿真结果和试验结果			
负荷率/%	仿真结果		试验结果
	方法1	方法2	
40	0.354	0.375	0.475
80	0.656	0.732	0.810
100	0.752	0.856	0.820
120	0.809	0.932	0.851

从表2可以看出:轮胎侧向松弛长度的仿真结果与试验结果均有相同的规律,即随着负荷的增大,轮胎侧向松弛长度呈增大趋势;与方法1相比,方法2仿真结果与试验结果更接近。因此采用方法2进行后续轮胎侧向松弛长度的仿真计算。

4.2 不同工况对轮胎侧向松弛长度的影响

4.2.1 负荷的影响

不同负荷率下,轮胎侧向力随时间的变化曲线如图3所示,对应的侧向松弛长度如表3所示。

从图3和表3可以看出:随着负荷率的增大,轮胎侧向力最大值增大,但是增大的幅度逐渐减小;轮胎侧向力趋于稳定的时间延长,轮胎侧向松弛长度增大。

4.2.2 充气压力的影响

不同充气压力下轮胎侧向力随时间的变化曲

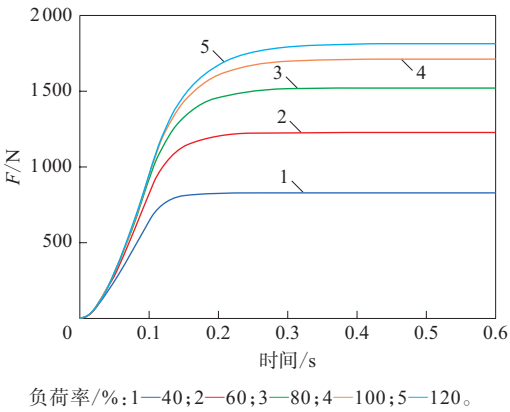


图3 不同负荷率下轮胎侧向力随时间的变化曲线

表3 不同负荷率下的轮胎侧向力最大值和侧向松弛长度

负荷率/%	侧向力最大值/N	侧向松弛长度/m
40	831.22	0.375
60	1 227.18	0.568
80	1 532.49	0.732
100	1 716.72	0.856
120	1 817.96	0.932

线如图4所示,对应的侧向松弛长度如表4所示。

从图4和表4可以看出,随着充气压力的增大,轮胎侧向力最大值的变化很小,但轮胎侧向松弛长度呈现减小的趋势。这是因为,随着充气压力的增

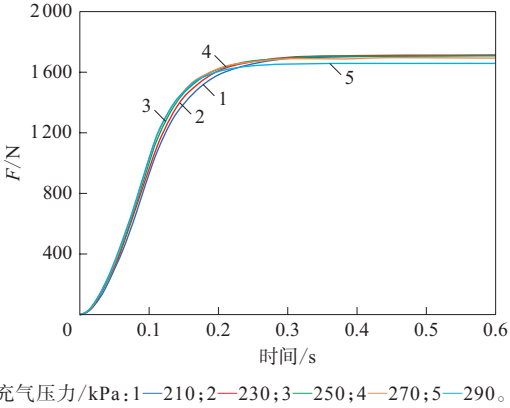


图4 不同充气压力下轮胎侧向力随时间的变化曲线

表4 不同充气压力下的轮胎侧向力最大值和侧向松弛长度

充气压力/kPa	侧向力最大值/N	侧向松弛长度/m
210	1 710.07	0.911
230	1 716.67	0.850
250	1 709.77	0.789
270	1 694.98	0.728
290	1 660.82	0.679

大,胎侧刚性增大、形变减小,轮胎与路面的接触面积减小,导致轮胎侧向松弛长度减小。

5 结论

(1)在仿真分析中,采用不同的边界设定方法可以得到不同的轮胎侧向松弛长度,与方法1相比,方法2与试验结果的吻合度更高。

(2)随着负荷的增大,轮胎侧向力的最大值和侧向松弛长度均增大。

(3)随着充气压力的增大,轮胎侧向力最大值变化不大,轮胎侧向松弛长度减小。

另外,轮胎侧向松弛长度的影响因素还有轮胎速度、侧偏角、阶跃时间以及骨架材料、胶料等,有待开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 侯永平,胡于进,李成刚,等.大侧偏角下侧偏松弛长度特性的研究[J].汽车工程,2001,23(2):78-81.
- [2] 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.
- [3] 何菁,王兆龙,张凯凯,等.轮胎侧向松弛长度测试方法的研究[J].橡胶科技,2023,21(7):353-357.
- [4] 丁凤龙.子午线轮胎动力学与滚动噪声的分析研究[D].北京:北京化工大学,2019.
- [5] 徐仁辉.轮胎瞬态侧倾特性及主动车轮外倾控制研究[D].长春:吉林大学,2023.

- [6] 高磊.基于操稳性能评价的轮胎与整车匹配方法研究[D].长春:吉林大学,2022.
- [7] WEI C F, OLATUNBOSUN, OLUREMI A. The effects of tyre material and structure properties on relaxation length using finite element method[J]. Materials & Design, 2016, 102(15):14-20.
- [8] JOHN E S. Relaxation characteristics of pneumatic tires[J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1959, 26(6):343-350.
- [9] JEFFREY S L. The measurement of tire static stiffnesses and their relation to relaxation lengths[D]. Ohio, USA: The Ohio State University, 1985.
- [10] VANTSEVICH V V, GRAY J P. Relaxation length review and time constant analysis for agile tire dynamics control[C]. Boston: ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2015. DOI: 10.1115/DETC2015-46798.
- [11] 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.
- [12] 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),2018,32(9):29-34.
- [13] 孟照宏,史彩霞,王君,等.轿车子午线轮胎侧向松弛长度的测试及表征[J].轮胎工业,2023,43(4):246-250.
- [14] 史彩霞,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.

收稿日期:2023-12-07

Simulation Analysis of Lateral Relaxation Length of Passenger Car Radial Tire

SONG Meiqin¹, XING Zhengtao², ZHAI Mingrong¹, MENG Zhaohong¹, SHI Caixia², YU Chenglong¹

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

Abstract: A simulation analysis of the lateral relaxation length of 215/60R17 96H DH16S passenger car radial tires was conducted. The results showed that using two simulation methods[simultaneously applying instantaneous sideslip angle to the tire and rim (referred to Method 1) and only applying instantaneous sideslip angle to the rim (referred to Method 2)], different lateral relaxation lengths of tires could be obtained, and the results of Method 2 were in better agreement with the experimental results. With the increase of the load, both the maximum lateral force and lateral relaxation length of the tire increased. With the increase of the inflation pressure, the maximum lateral force of the tire changed little, and the lateral relaxation length of the tire decreased.

Key words: passenger car radial tire; lateral relaxation length; step input; finite element method