

基于轮胎稳态和瞬态特性的车辆响应研究

李雪莉, 张元伟, 邱海漩

(上海汽车集团股份有限公司, 上海 201802)

摘要:分析中低频下轮胎稳态和瞬态特性, 建立有较高精度的三自由度车辆模型, 研究轮胎稳态和瞬态特性与整车响应的关系。结果表明: 轮胎侧向因子对整车稳态和瞬态响应均有较大影响; 轮胎瞬态特性主要影响车辆的振动倾向和响应快慢; 车辆的精准控制要求谐振频率高、通频带宽、谐振峰水平低和相位滞后角较小。本研究结果有助于进一步探索轮胎性能的有效控制, 在提高车辆品质的同时, 降低轮胎开发轮次和成本。

关键词:车辆响应; 轮胎稳态特性; 轮胎瞬态特性; 三自由度车辆模型; 轮胎松弛长度

中图分类号: U463.341; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)07-0495-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.07.0495



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

在整车动力学正向研究过程中, 将用户要求转化为工程语言的整车技术规范(VTS), 并分解为系统特性是车辆性能目标达成的关键, 也是车辆生产的核心技术。轮胎作为整车动力学达标与否的关键部件^[1], 其性能与控制主要依托于主观评价, 随着正向开发流程的发展和完善, 整车动力学VTS目标的量化使得轮胎客观指标的设定成为可能, 可有效形成轮胎性能开发的主客观闭环。

目前, 如何在概念阶段设计与实现轮胎客观指标, 进行整车动力学性能综合与分解的迭代, 从而使整车动力学性能达标是摆在仿真工程师面前的难题。本工作通过对轮胎稳态和瞬态特性研究, 建立基于轮胎稳态和瞬态特性的三自由度车辆模型, 揭示了轮胎特性与整车动力学性能的关系, 为轮胎性能目标的控制与优化提供理论指导。

1 轮胎稳态和瞬态特性

1.1 轮胎力学特性主要参数

轮胎力学特性研究轮胎受力与运动状态之间的关系, 其主要参数有输入参数和输出参数两类^[2]。主要输入参数包括纵向滑移率(κ)、滚动速度(Ω)、侧偏角(α)、偏转角(ψ)、外倾角(γ)和垂向力(F_z), 主要输出参数包括纵向力(F_x)、侧向力

(F_y)、翻倾力矩(M_x)、滚动阻力矩(M_y)和回正力矩(M_z), 其中与底盘动力学直接相关的是 F_y 和 M_z , 而 F_x 和 F_z 对 F_y 间接产生作用, 进而影响车辆的运动。

1.2 轮胎稳态特性

1.2.1 轮胎稳态刷子模型

轮胎稳态刷子模型不考虑胎体变形^[3], 将轮胎等效为刚性胎体和弹性胎面两部分。在纯侧偏工况下, 轮胎接地印痕区内胎面单元变形如图1所示。图中, V 为轮胎接地印痕区接地中心(C点)速度, a 为半印痕长度, α 为 V 与胎体中心基准线间的夹角, v 为印痕区微元速度, $v_{\max}$ 为印痕区微元最大速度。

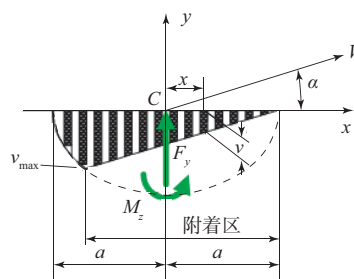


图1 纯侧偏工况下轮胎接地印痕区胎面单元变形示意

假设 α 输入无穷小或路面摩擦因数趋向无限大, 可以认为整个接地印痕区都为附着区, 胎面单元不发生滑移^[4]。对接地印痕区积分, 可得到 F_y 和 M_z :

$$F_y = \int_{-a}^a q_y(x) dx \quad (1)$$

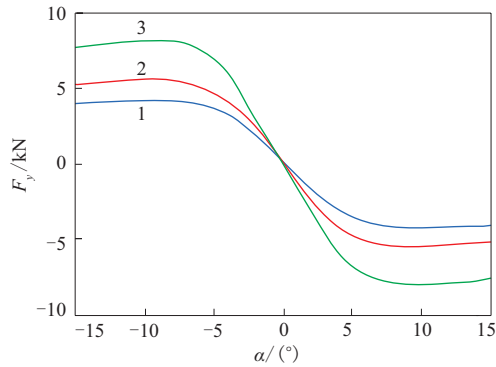
作者简介:李雪莉(1986—), 女, 山西忻州人, 上海汽车集团股份有限公司工程师, 硕士, 主要从事车辆动力学横向控制的研究。

E-mail: lixueli@saicmotor.com

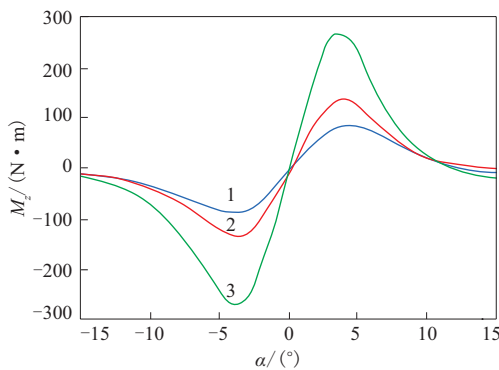
$$M_z = \int_{-a}^a x q_y(x) dx \quad (2)$$

式中, $q_y(x)$ 为侧向力分布函数。

轮胎稳态刷子模型纯侧偏工况下 F_y 和 M_z 与 α 的关系如图2所示。



(a) F_y 与 α 的关系



(b) M_z 与 α 的关系

垂向力/kN: 1—4; 2—5.4; 3—8.6。

图2 轮胎稳态刷子模型纯侧偏工况下 F_y 和 M_z 与 α 的关系

1.2.2 轮胎侧倾

当车轮存在 γ 时 (见图3), 车轮会发生绕自身旋转轴线与地面交点滚动的趋势, 在宽度方向可以把轮胎看作由无数个无厚度圆盘重叠而成。在轮胎中心平面内的圆盘在法向和侧向的变形分别为 Δz 和 Δy 。由于存在侧向变形, 纯侧倾运动时会产生侧向力 $F_{y\gamma}$ 和回正力矩 $M_{z\gamma}$ (下标 γ 指产生力的原因)。

轮胎稳态刷子模型纯侧倾工况下 F_y 和 M_z 与 γ 的关系如图4所示。

1.3 轮胎瞬态特性

在稳态刷子模型中, 轮胎的受力与运动状态直接相关, 由于轮胎多在中低频下工作, 轮胎与地

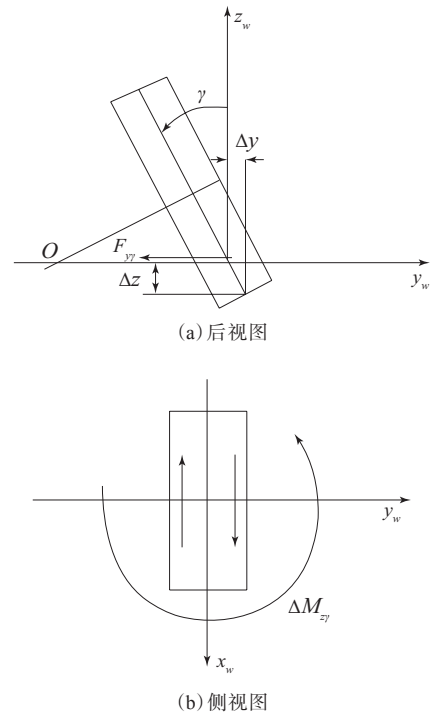
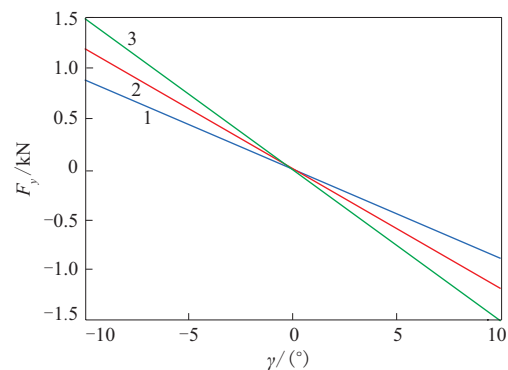
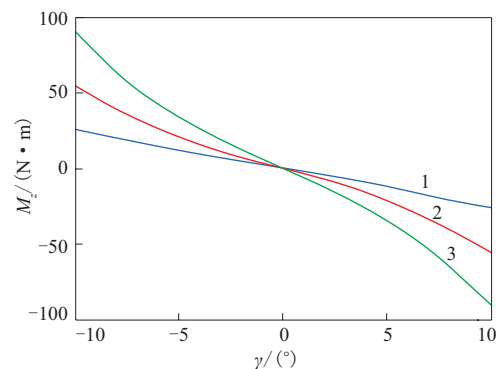


图3 轮胎纯侧倾工况示意



(a) F_y 与 γ 的关系



(b) M_z 与 γ 的关系

注同图2。

图4 轮胎稳态刷子模型纯侧倾工况下 F_y 和 M_z 与 γ 的关系

面之间的力和力矩相对于轮胎的运动输入表现为一定的滞后,如图5所示。从图5可以看出:轮胎在 α 阶跃输入作用下需要滚动一段距离(l_y)后, F_y 才达到稳态值;在 α 正弦输入作用下 F_y 表现出相位滞后。该现象即为轮胎瞬态特性。

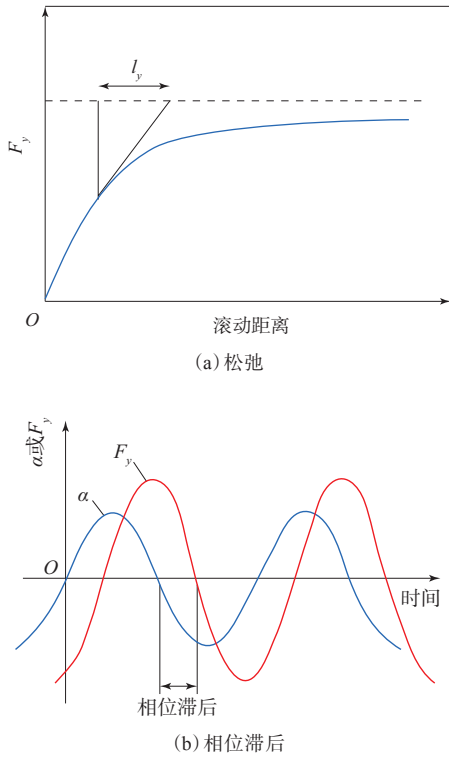


图5 轮胎瞬态特性

引入松弛的概念描述以上现象,根据理论推导^[5-6], F_y 对 α 增量的频率响应特性近似于一阶系统,因此 F_y 瞬态模型可以用一阶松弛系统来近似表达。 F_y 瞬态松弛($H_{F_y, \alpha}$)模型可表达为:

$$H_{F_y, \alpha} = \frac{K_{y\alpha}}{\sigma s + 1} \quad (3)$$

式中, $K_{y\alpha}$ 为轮胎侧偏刚度, σ 为系数, s 为频率复变量。当 $\sigma s \rightarrow 0$ 时, $H_{F_y, \alpha} \rightarrow K_{y\alpha}$,即在低频时,侧向力幅频特性水平渐近线与一阶松弛系统水平渐近线相同。

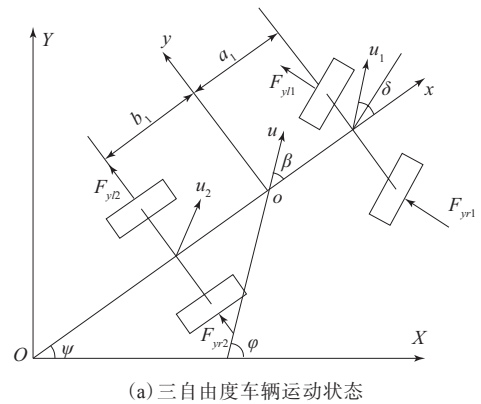
通常轮胎松弛长度的获取有两种方法,一种为直接法,通过 α 阶跃法提取 l_y ,另一种间接通过轮胎侧偏刚度与侧向刚度的比值得到。

2 三自由度车辆模型建立

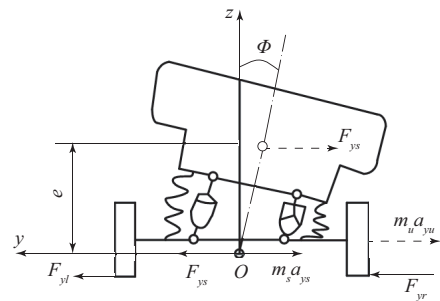
二自由度车辆模型包括侧向和横摆两个自由

度,在侧倾转向效应较小的情况下,可以得到较好的仿真效果。但是,在侧倾转向效应较大时,这样的简化模型就不够精确了。考虑侧倾自由度的转向盘阶跃输入运动理论最早出现于1956年的美国康乃尔实验室,可以将高速、大转角和侧向加速度较大时的侧倾转向效应计入,大大提高了车辆模型的仿真精度^[6]。

三自由度车辆模型在二自由度车辆模型的基础上增加了侧倾自由度,车辆运动状态如图6所示,非簧载质量参与横摆运动,簧载质量参与横摆运动(有横摆角速度)和侧倾运动(有侧倾角速度),忽略俯仰运动。若前后轴侧倾中心高相同,则横摆与侧倾解耦。图中,下标 l 和 r 分别表示车辆左侧和右侧,下标1和2分别表示车辆前轴和后轴, a_1 和 b_1 分别为质心到前后轴的距离, u 为车辆纵向速度, δ 为车轮转角, β 为质心侧偏角, φ 为车身侧倾角, m_s 和 m_u 分别为非簧载质量和簧载质量, F_{ys} 和 F_{yu} 分别为非簧载力和簧载力, a_{ys} 和 a_{yu} 分别为非簧载质量和簧载质量在 y 轴的加速度, e 为质心高度, Φ 为轮胎侧倾角。



(a) 三自由度车辆运动状态



(b) 非簧载和簧载质量运动

图6 三自由度车辆模型

建立的三自由度车辆模型与机械系统动力学自动分析(Adams)车辆模型对比,三自由度车辆模型具有非常高的精度,可以用来研究轮胎特性对车辆响应的影响^[7-8],如图7和8所示。

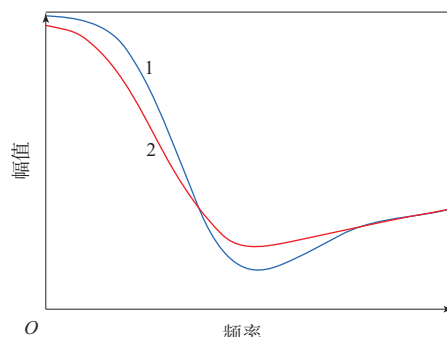
3 轮胎特性参数对整车性能的影响

车辆三自由度侧倾研究以轮胎松弛模型为对象,车辆响应为目标,对轮胎的稳态和瞬态特性参数进行试验设计与分析。

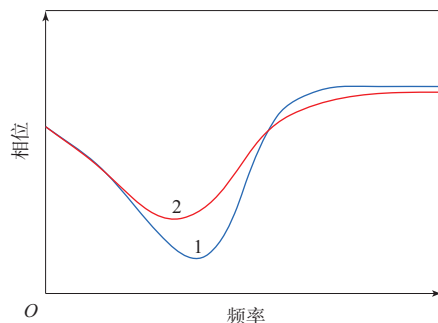
3.1 轮胎稳态参数对整车性能的影响

将轮胎侧偏刚度、侧倾刚度、回正刚度、侧倾回正刚度以及悬架运动学与动力学特性合成为等效侧偏刚度,进行归一化并等效为轮胎侧向因子,设计轮胎侧向因子分别为0.8,1.0和1.2,进行试验设计与分析,得到轮胎侧向特性对整车响应的影响^[9-10],如图9—12所示。

从图9—12可以看出,轮胎侧向因子对横摆角速度增益的影响较小,侧向加速度和侧倾角增益随着轮胎侧向因子的增大而增大,因此调整轮胎侧向因子可以改变对车辆稳态特性的影响。这是



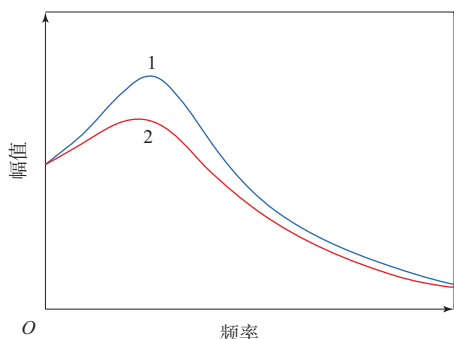
(a) 幅值



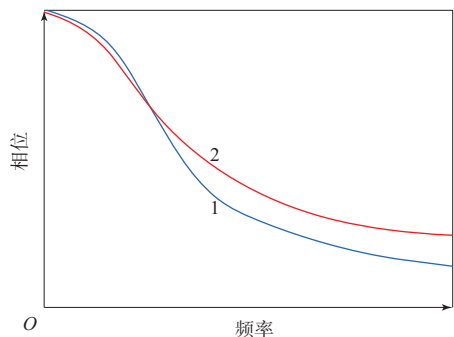
(b) 相位

注同图7。

图8 侧向加速度频率响应



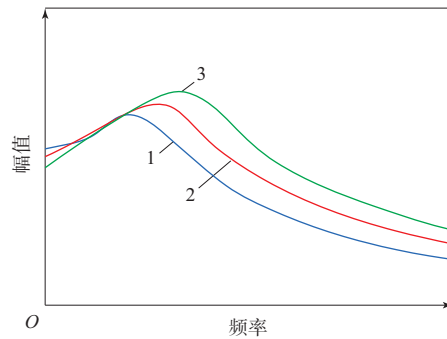
(a) 幅值



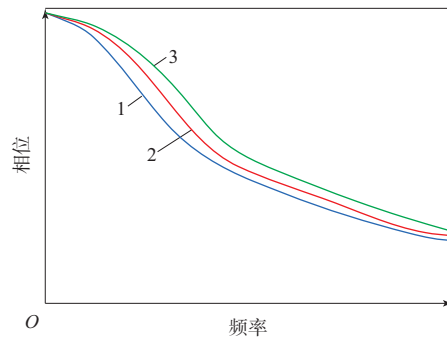
(b) 相位

模型:1—Adams;2—三自由度。

图7 横摆角速度频率响应



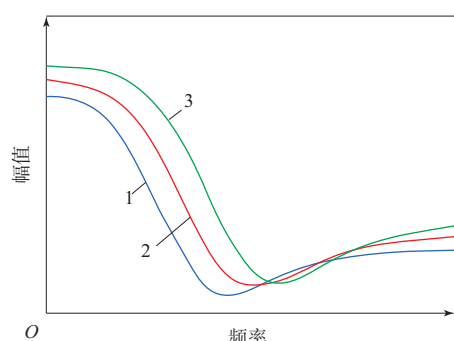
(a) 幅值



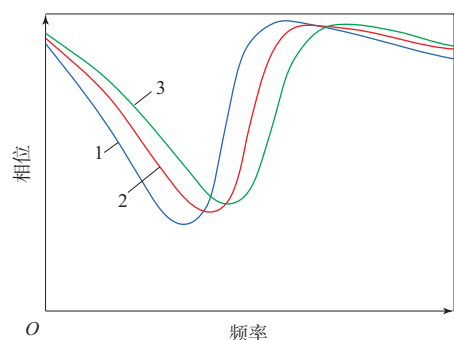
(b) 相位

侧向因子:1—0.8;2—1.0;3—1.2。

图9 轮胎侧向因子对横摆角速度频率响应的影响



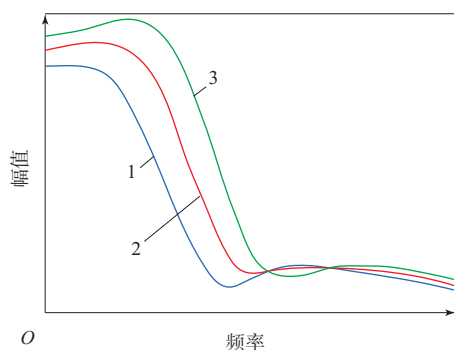
(a) 幅值



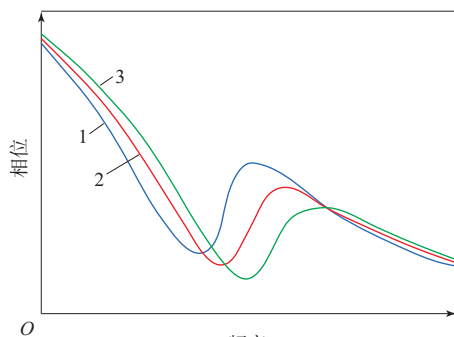
(b) 相位

注同图9。

图10 轮胎侧向因子对侧向加速度频率响应的影响



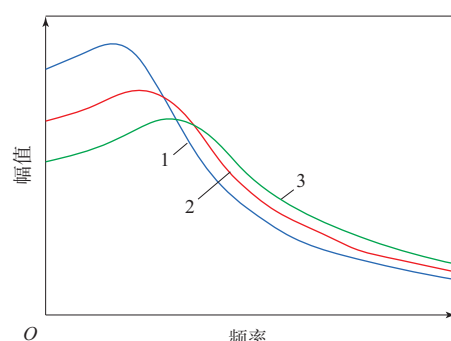
(a) 幅值



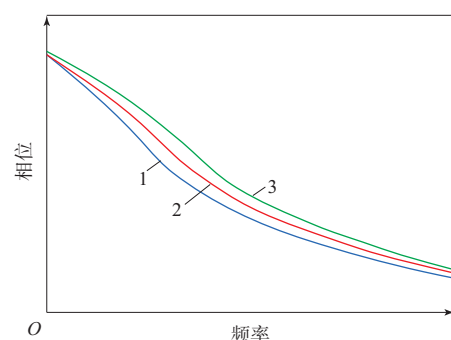
(b) 相位

注同图9。

图11 轮胎侧向因子对侧倾角频率响应的影响



(a) 幅值



(b) 相位

注同图9。

图12 轮胎侧向因子对侧偏角频率响应的影响

因为轮胎侧向因子的改变使得控制矩阵发生了变化,因而车辆响应的极值和响应快慢发生了显著变化,其中横摆角速度增益和侧倾角增益的峰值谐振频率和谐振峰水平随着轮胎侧向因子的增大均升高;侧向加速度的截止频率也随着轮胎侧向因子的增大而升高;侧偏角增益谐振频率随着侧向因子的增大而升高,而谐振峰水平随着轮胎侧偏刚度的增大而显著降低。车辆的这4个响应量的响应均随着轮胎侧向因子的增大而变快。

3.2 轮胎瞬态特性对整车性能的影响

以轮胎松弛长度为因子,选取3种轮胎松弛长度(分别为0, 0.5和1.0 m)进行试验设计,分析其对整车性能的影响,结果如图13—16所示。

从图13—16可以看出:轮胎松弛长度改变了车辆响应增益的衰减程度,随着轮胎松弛长度的增大,车辆的4个响应量的谐振峰水平提高,也就是振动倾向增大;随着轮胎松弛长度的增大,输入频率高于谐振频率之后,横摆角速度、侧倾角和侧偏角响应明显变慢。因此,轮胎松弛长度对车辆响应的衰减程度和快慢有较大影响,从车辆响应

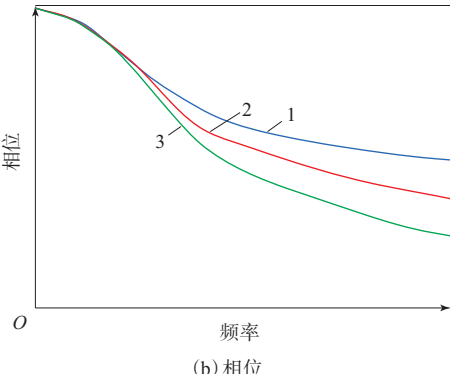
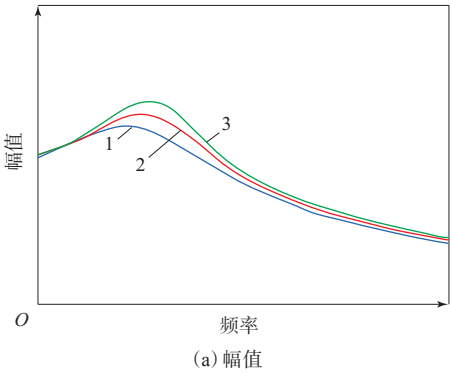


图13 轮胎松弛长度对横摆角速度频率响应的影响

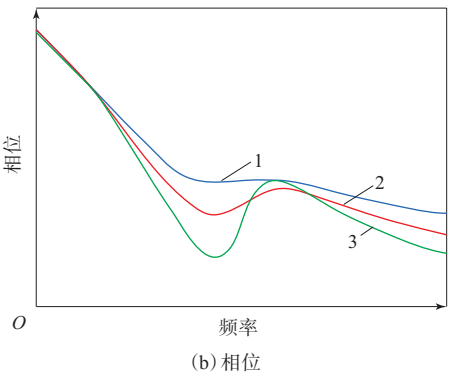
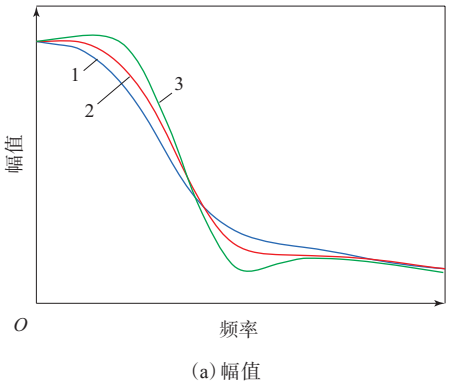


图15 轮胎松弛长度对侧倾角频率响应的影响

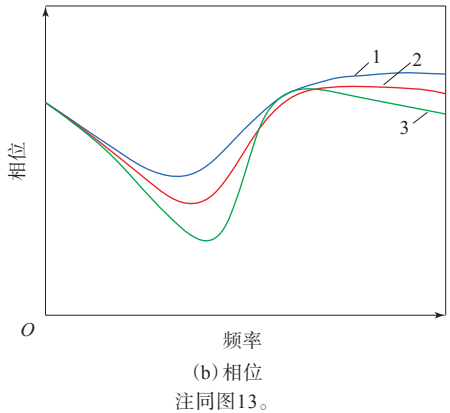
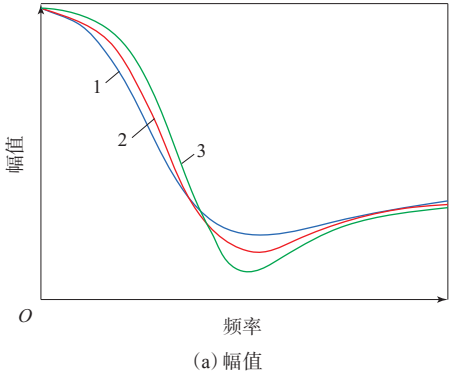


图14 轮胎松弛长度对侧向加速度频率响应的影响

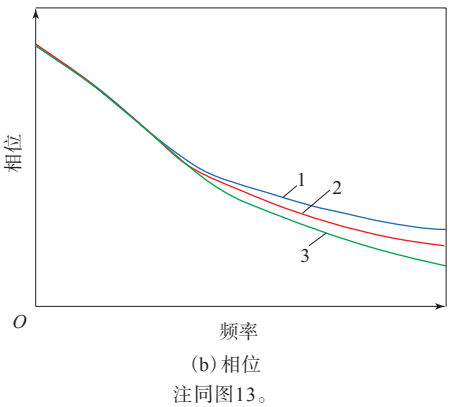
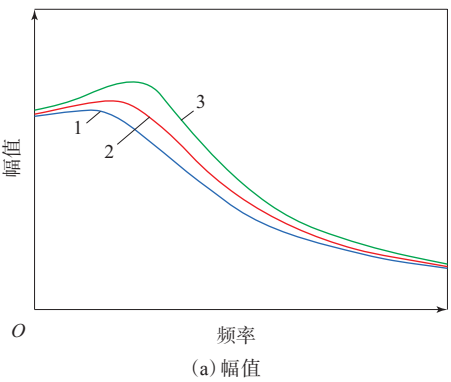


图16 轮胎松弛长度对侧偏角频率响应的影响

角度希望轮胎松弛长度越小越好。

4 结论

轮胎侧向因子对整车稳态和瞬态响应均有较大影响;轮胎瞬态特性主要影响车辆的振动倾向和响应快慢;车辆的精准控制要求谐振频率高、通频带宽、谐振峰水平低及相位滞后角较小。本研究结果有助于深入探索轮胎性能的有效控制,在提高车辆品质的同时,降低轮胎开发轮次和成本。

参考文献:

- [1] 曾季, 阙元元, 蔡尚脉, 等. 电动汽车轮胎的发展现状与设计思路[J]. 橡胶工业, 2019, 66(12): 883-894.
- [2] 朱遥, 陈志强, 杨振. 轿车轮胎附着因数-滑移率特性的测试及其与整车制动效能的相关性研究[J]. 橡胶工业, 2019, 66(10): 785-789.
- [3] Pacejka H B. Tyre and Vehicle Dynamics[M]. Delft: Delft University of Technology Consultant TNO Automotive Helmond the Netherlands, 2006.
- [4] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2011.
- [5] Guo K, Ren L. Final Report for the GM Joint R&D Project: Non-linear Dynamics Tire Model[Z]. Changchun: Jilin University of Technology, 1999.
- [6] 任雷. 复杂工况下的轮胎非稳态侧偏特性研究[D]. 长春: 吉林工业大学, 2000.
- [7] Frederick J Winsor, Chrysler Corp. Cornering Compliance Applied to Dynamics of Rolling Vehicles[R]. USA: Society of Automotive Engineers, 1976.
- [8] Koji Tsuji, Nobuhirio Totoki, Mazda Motors. The Complex Cornering Compliance Theory and Its Application to Vehicle Dynamics Characteristics[R]. USA: Society of Automotive Engineers, 2002.
- [9] Verma M K, Shepard W L, Motors G M. Comparison of Transient Response Test Procedures for Motor Vehicles[R]. USA: Society of Automotive Engineers, 1981.
- [10] Fuja S P, Ryan J P, Schmid H A. Synthesis of Chassis Parameters for Ride and Handling for the 1997 Chevrolet Corvette[R]. USA: Society of Automotive Engineers, 1997.

收稿日期: 2020-02-15

Study on Vehicle Response Based on Steady and Transient Characteristics of Tire

LI Xueli, ZHANG Yuanwei, QIU Haixuan

(Shanghai Automobile Group Co., Ltd, Shanghai 201802, China)

Abstract: The steady and transient characteristics of the tire under medium and low-frequency were analyzed, the vehicle model with three degrees of freedom and high accuracy was established, and the relationship between the steady and transient characteristics and the whole vehicle response was studied. The results showed that the tire lateral factor had great influence on the steady and transient response of whole vehicle. The transient characteristics of the tire mainly affected the vibration tendency and response speed of the vehicle. The precise control of the vehicle required high resonance frequency, wide frequency band, low resonance peak level and small phase lag angle. The results of this research were helpful to further study of the effective control of the tire performance, improvement of the vehicle quality, and reduction of the tire development cycle and costs.

Key words: vehicle response; tire steady characteristics; tire transient characteristics; three degree of freedom vehicle model; tire relaxation length

声明 《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》均不收取审稿费。任何机构、个人以任何名义向作者收取审稿费均为诈骗行为。请广大作者互相转告, 勿信诈骗信息。官方投稿网站仅为www.rubbertire.com.cn和www.rubbertire.cn。三刊未与任何第三方机构进行收稿和审稿合作, 如有任何疑问请及时与编辑部联系。