

赛车轮胎低频动力学特性试验研究

杨晓光, 庄志鹏, 邓佑鲜, 高世双

(万力轮胎股份有限公司 万力橡胶轮胎研究院, 广东 广州 510425)

摘要: 试验研究负荷、充气压力、滚动速度和激振频率等参数对赛车轮胎低频动力学特性的影响。结果表明: 非滚动状态下, 动态刚度随径向负荷和充气压力的增大而增大, 阻尼系数随径向负荷的增大而增大, 随充气压力的增大而减小; 滚动状态下, 动态刚度和阻尼系数随充气压力的增大而增大, 负荷对两者基本无影响; 随着滚动速度的增大, 动态刚度增大, 阻尼系数基本无变化; 随着激振频率的增大, 阻尼系数增大, 动态刚度基本无变化。赛车轮胎的低频动力学特性研究结果与文献描述情况大部分一致。

关键词: 赛车轮胎; 动态刚度; 阻尼系数; 负荷; 充气压力

中图分类号: TQ336.1; U463.341; TQ330.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2018)04-0195-05

赛车轮胎的动力学特性对赛车性能有着至关重要的影响。无论是顶级的一级方程式车队还是大学生方程式车队, 都是会选择与赛车性能最匹配的轮胎^[1]。选择赛车轮胎除了首先考虑轮胎的尺寸之外, 刚度和阻尼特性是另一个非常基础而重要的因素。K. Ramji等^[2]测试了6组具有不同帘布层的小尺寸斜交轮胎的静态径向、纵向、侧向和扭转刚度, 根据试验结果建立了轮胎静态刚度与充气压力和负荷之间的关系。为了研究和分析飞机轮胎摆振和防滑刹车系统, K. S. Robert等^[3]研究了非滚动状态飞机轮胎纵向和侧向刚度与阻尼特性, 试验结果表明飞机轮胎的纵向和侧向刚度随充气压力和负荷的增大而增大。J. Dunn等^[4]开展了一系列测试, 获得了子午线轮胎激振频率、滚动速度、充气压力和负荷等因素对轮胎径向刚度和阻尼的影响趋势, 并建立了轮胎刚度与阻尼预测模型。V. H. Saran等^[5]针对不同帘布层的斜交轮胎开展了滚动状态下轮胎径向刚度与阻尼特性的参数影响研究。尽管轮胎的刚度和阻尼特性已被较为广泛地研究, 但是赛车轮胎相关的刚度和阻尼等动力学特性研究仍然很缺乏。

本工作针对小尺寸赛车轮胎开展低频动力学特性试验, 旨在研究负荷、充气压力、滚动速度、激

振频率和温度等参数对赛车轮胎动态刚度和阻尼特性的影响, 以期为赛车车队选择轮胎和调试赛车性能提供参考。考虑全面的参数敏感性试验研究的时间和成本因素, 采用基于试验设计的方法进行测试和数据分析。赛车轮胎规格为175/55 R13。

1 实验设计

1.1 试验参数

赛车轮胎的动力学试验采用电控液压三轴轮胎试验台。计算机控制液压泵可提供轮胎径向、纵向和侧向激振。试验过程中分别采集和记录轮胎的位移和受力。激振频率范围为1~20 Hz, 涵盖该小尺寸赛车轮胎的一阶径向固有频率; 用液压激振幅值为0.001 5 m、直径为2.44 m的刚性转鼓模拟路面并提供最大速度可达100 km·h⁻¹的轮胎转速。试验设计用来测量非滚动和滚动状态下的赛车轮胎径向低频动力学特性。具体试验参数设计及取值见表1。

1.2 试验原理

由于轮胎结构复杂性以及橡胶材料的超弹性和粘弹性等非线性因素, 轮胎的动力学特性模型复杂程度不尽相同。常见的车辆动态模型中用到的轮胎模型一般为单自由度的集中质量、弹簧、阻尼模型。根据文献[6], 在低频范围内, 轮胎的单自由度模型可以简化成线性模型, 如图1所示。

作者简介: 杨晓光(1983—), 男, 辽宁辽阳人, 万力轮胎股份有限公司万力橡胶轮胎研究院副院长, 博士, 主要从事轮胎与车辆动力学研究工作。

表1 试验参数设计

试验参数	非滚动状态	滚动状态
充气压力/kPa	40, 60(1), 80(2), 100(3), 120	60(1), 80(2), 100(3)
负荷/N	250, 500(1), 750(2), 1 000(3), 1 250	500(1), 750(2), 1 000(3)
滚动速度/ (km · h ⁻¹)	0	40(1), 60(2), 80(3)
激振频率/Hz	1阶径向固有频率	5(1), 10(2), 15(3)

注:括号内数字为对应的试验设计水平。

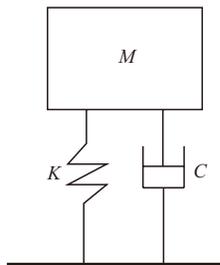


图1 轮胎的质量、弹簧、阻尼模型

轮胎系统的动力学方程如下:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中, K 和 C 分别表示轮胎弹簧系数和阻尼系数,用以表征轮胎的柔性; F 为系统所受外力;集中质量 M 表征轮胎、轮辋和试验台加载移动部分的等效质量。式(1)写成速度导纳的形式为

$$\frac{\dot{X}}{F} = \frac{j\omega}{(K - \omega^2 M) + j\omega C} \quad (2)$$

式中, j 是虚部, ω 为角频率。在轮胎非接触状态下,式(2)可简化为

$$\frac{\dot{X}}{F} = \frac{-j}{\omega M} \quad (3)$$

基于上述公式,对轮胎非接触状态进行扫频激振,得到平均等效质量为51.75 kg。

式(2)可进一步写成如下形式:

$$\frac{\dot{X}}{F} = \frac{\omega^2 C}{(K - \omega^2 M)^2 + \omega^2 C^2} + \frac{j\omega(K - \omega^2 M)}{(K - \omega^2 M)^2 + \omega^2 C^2} \quad (4)$$

其中实部 $R_m = \frac{\omega^2 C}{(K - \omega^2 M)^2 + \omega^2 C^2}$, 虚部 $I_m =$

$$\frac{\omega(K - \omega^2 M)}{(K - \omega^2 M)^2 + \omega^2 C^2}。$$

根据文献[7],轮胎动态刚度与阻尼系数的通用表达式可以写成如下形式:

$$C = \frac{R_m}{R_m^2 + I_m^2} \quad (5)$$

$$K = \omega^2 M + \frac{\omega I_m}{R_m^2 + I_m^2} \quad (6)$$

试验得出一阶径向共振频率对应的动态刚度和阻尼特性简化表达式为

$$K = M(2\pi f_n)^2$$

$$C = 1/D$$

其中, f_n 为一阶径向共振频率, D 为速度导纳相位图中圆的直径。

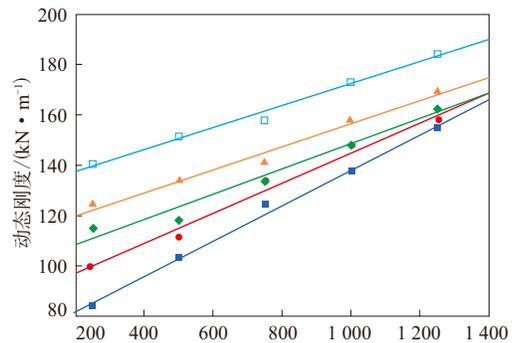
2 结果与讨论

2.1 非滚动状态轮胎的低频动力学特性

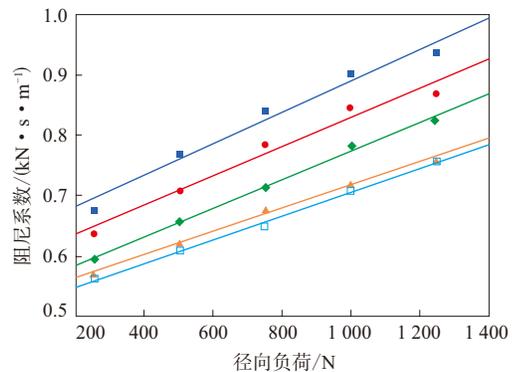
非滚动状态轮胎的低频动力学特性试验结果及拟合曲线如图2所示。

从图2可以看出:赛车轮胎非滚动状态下的动态刚度随径向负荷和充气压力的增大而增大;阻尼系数随径向负荷的增大而增大,随充气压力的增大而减小。

文献中不同轮胎非滚动状态下动态刚度和阻尼系数受充气压力和负荷影响的情况统计见表2。



(a) 动态刚度



(b) 阻尼系数

充气压力/kPa: ■—40; ●—60; ◆—80; ▲—100; □—120。

图2 充气压力和径向负荷对非滚动状态轮胎低频动力学特性的影响

表2 非滚动状态下动态刚度和阻尼受充气压力和负荷影响情况文献统计

影响参数	变化趋势	径向动刚度	径向阻尼	参考文献
充气压力	↑	↑	↓	[8][9][10]
	↑	↑	↑	[11][12]
负荷	↑	→	↑	[9]

由表2可见,文献统计情况与测试结果基本一致。

2.2 滚动状态轮胎的低频动力学特性

滚动状态轮胎的低频动力学特性试验研究涉及的参数比非滚动状态多。本工作选取4个滚动状态轮胎的试验参数,每个参数设计3个水平值,如表3所示。所研究的小尺寸赛车轮胎的额定负荷为750 N,标准充气压力为80 kPa,平均速度为60 km·h⁻¹。

表3 L₉正交设计表

序号	参数设计水平				输出	
	充气压力	径向负荷	滚动速度	激振频率	动态刚度/(kN·m ⁻¹)	阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)
1	1	1	1	1	73.192	0.303
2	1	2	2	2	74.418	0.243
3	1	3	3	3	76.017	0.224
4	2	1	2	3	87.359	0.210
5	2	2	3	1	94.520	0.348
6	2	3	1	2	89.633	0.250
7	3	1	3	2	111.660	0.286
8	3	2	1	3	101.957	0.287
9	3	3	2	1	109.175	0.353

注:各参数水平对应数值见表1。

采用平均响应分析方法,得到不同参数对轮胎动态刚度和阻尼系数的影响趋势。充气压力和负荷对滚动轮胎动态刚度和阻尼系数的影响分别见表4和5。

表4 充气压力对滚动轮胎动态刚度和阻尼系数的影响

项 目	充气压力设计水平		
	1	2	3
动态刚度/(kN·m ⁻¹)	74.542	90.504	107.597
阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	0.273	0.269	0.309

表5 负荷对滚动轮胎动态刚度和阻尼系数的影响

项 目	负荷设计水平		
	1	2	3
动态刚度/(kN·m ⁻¹)	90.737	90.298	91.608
阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	0.266	0.293	0.302

由表4和5可见:动态刚度和阻尼系数随充气压力增大而增大;随着负荷的增大,动态刚度和阻

尼系数呈增大的趋势,但变化范围小于8%,可认为所选取的负荷变化范围对动态刚度和阻尼系数基本无影响。

相关文献对滚动状态动态刚度和阻尼特性受充气压力和负荷影响的统计情况见表6。由表6可见,文献统计情况与测试结果基本一致。

表6 滚动状态下动态刚度和阻尼受充气压力和负荷影响情况统计

影响参数	变化趋势	径向动刚度	径向阻尼	参考文献
充气压力	↑	↑	↓	[5][13][8][14]
	↑	↑		[6]
	↑	↑	↑	[15][16]
	↑	↑	→	[17]
负荷	↑	↑		[6]
	↑	↑	↑→	[15][16]
	↑	↑	↑	[5]

对比轮胎非滚动状态和滚动状态下的动态刚度和阻尼系数不难得出,滚动状态下轮胎的动态刚度和阻尼系数小于非滚动状态。一旦轮胎开始滚动,轮胎动态刚度会减小^[18],可见导致动态刚度和阻尼系数变化的直接原因是轮胎滚动速度的引入。轮胎滚动速度对动态刚度和阻尼系数的影响见表7。

表7 滚动速度对滚动轮胎动态刚度和阻尼系数的影响

项 目	滚动速度设计水平		
	1	2	3
动态刚度/(kN·m ⁻¹)	88.261	90.317	94.066
阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	0.280	0.269	0.317

由表7可见:滚动轮胎的动态刚度随滚动速度的增大而增大,与文献[19]中描述弹簧系数随速度和负荷的增加而缓慢增大一致;滚动轮胎的阻尼系数随滚动速度的增大范围小于8%,可认为所选取的轮胎滚动速度变化范围对阻尼系数基本无影响。

滚动速度对轮胎动态刚度和阻尼特性影响的相关文献统计情况见表8。与表7中相关结果对比,影响趋势不同。除考虑试验设计方法、测试精度、数据处理精度等局限外,轮胎高速(本研究为60~100 km·h⁻¹,表8为0~50 km·h⁻¹)滚动情况下,由离心力造成的轮胎胎侧张力增大以及与试验台机构的共振等因素也会对测试结果造成影响。

表8 滚动状态下动态刚度和阻尼特性受滚动速度的影响情况统计

滚动速度	径向刚度	径向阻尼	参考文献
↑	↓	↓	[8][13][14][15][16][20]
↑	↓→	↓→	[17]
↑	↑	↑	[5]

轮胎动态刚度和阻尼系数随激振频率的变化情况见表9。

表9 激振频率对滚动轮胎动态刚度和阻尼系数的影响

项 目	激振频率设计水平		
	1	2	3
动态刚度/(kN·m ⁻¹)	92.296	91.904	88.444
阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	0.335	0.260	0.249

由表9可见:滚动轮胎的动态刚度和阻尼系数随激振频率的增大而减小,但动态刚度变化范围小于5%,可认为所选取的轮胎激振频率变化范围对动态刚度基本无影响;而阻尼系数变化范围是所有参数影响中变化最明显的,约为30%,反映了阻尼系数对激振频率的敏感性。

激振频率对动态刚度和阻尼特性影响的相关文献统计情况见表10。由表10可见,文献统计情况与测试结果部分一致。

表10 滚动状态下动态刚度和阻尼受激振频率影响情况统计

激振频率	非滚动状态		滚动状态		参考文献
	径向刚度	径向阻尼	径向刚度	径向阻尼	
↑	↑	↓			[8][12][20]
↑	↓	↓			[11][21]
↑	↑	↓	→	↓	[15][16]

在进行小尺寸赛车轮胎低频动力学特性试验测试时还应注意温度变化的影响。尽管本研究中轮胎的正常使用充气压力为80 kPa,但是在赛车比赛期间,由于温升原因,其充气压力可达到90 kPa或更高。赛车轮胎温升的变化主要源于其往复变形所产生的热量损失。当负荷、滚动速度和激振频率越高,充气压力越低时,轮胎的能量耗散越大,温升越明显。因此,为了排除温升对试验结果的影响,在试验过程中,暖胎后需重新调整充气压力到设定值。除以上影响轮胎低频动态刚度和阻尼系数的因素外,轮胎的尺寸、结构、激振的振幅和花纹分布情况等因素也对测试结果有影响。

3 结论

(1)在非滚动状态下,赛车轮胎的动态刚度随径向负荷和充气压力的增大而增大,阻尼系数随径向负荷的增大而增大,随充气压力的增大而减小。

(2)滚动状态下,动态刚度和阻尼系数随充气压力的增大而增大,负荷对两者基本无影响;随着滚动速度的增大,动态刚度增大,阻尼系数基本无变化;随着激振频率的增大,阻尼系数增大,动态刚度基本无变化。

(3)小尺寸赛车轮胎的低频动力学特性研究结果与文献描述情况大部分一致。考虑测试条件、测试参数范围、轮胎尺寸、结构、花纹、振幅等与文献不同,部分结果的差异性依然存在,特别是滚动速度对动态刚度和阻尼系数的影响。

参考文献:

- [1] Pat Clarke. Tyres[EB/OL]. <http://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/tyres/>.
- [2] Ramji K, Goel V K, Saran V H. Stiffness Properties of Small-sized Pneumatic Tyres[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D. Journal of Automobile Engineering, 2002, 216: 107-114.
- [3] Robert K S, Robert C D. Tire Stiffness and Damping Determined From Static and Free-Vibration Tests[EB/OL]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800018802_1980018802.pdf.
- [4] Dunn J, Olatunbosun O. Generalised Representation of the Low Frequency Radial Dynamic Parameters of Rolling Tyres[J]. International Journal of Vehicle Design, 1991, 12(5/6): 513-524.
- [5] Saran V H, Goel V K. Rolling Dynamic Stiffness and Damping Characteristics of Small-sized Pneumatic Tyres[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D. Journal of Automobile Engineering, 2000, 214: 243-248.
- [6] 彭超英,喻谷源,余群. 轮胎动刚度特性的初步探讨[J]. 农业机械学报, 1989(1): 19-25.
- [7] Dunn J, Olatunbosun O. A New Electro-Hydraulic Tri-axial Test Facility for Low Frequency Rolling Tyre Dynamics[J]. International Journal of Vehicle Design, 1988, 9(2): 242-251.
- [8] 季学武,高义民,裘熙定,等. 轮胎动刚度和阻尼特性的研究[J]. 汽车工程, 1994, 16(5): 315-321.
- [9] Do Minh Cuong, Zhu Sihong, Dinh Vuong Hung, et al. Study on the Vertical Stiffness and Damping Coefficient of Tractor Tire Using Semi-empirical Model[J]. Journal of Science, 2013, 83(5): 5-15.
- [10] 聂信天,史立新,顾浩,等. 农用轮胎径向刚度和阻尼系数试验研究[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 139-143.
- [11] 陈栋华,靳晓雄. 轮胎刚度和阻尼非线性模型的解析研究[J]. 中国

- 工程机械学报, 2004, 2(4): 408-412.
- [12] 周继铭, 程悦菘, 郑联珠, 等. 轮胎刚度和阻尼非线性模型的研究[J]. 吉林工业大学学报, 1992, 22(3): 47-51.
- [13] Jianmin G, Gall R, Zuomin W. Dynamic Damping and Stiffness Characteristics of the Rolling Tire[J]. Tire Science and Technology, 2001, 29(4): 258-268.
- [14] 葛剑敏, 刘春辉, 郑联珠. 轮胎垂直滚动动态刚度和阻尼的研究[J]. 轮胎工业, 2000, 20(12): 707-709.
- [15] Lines J A, Murphy K. The Stiffness of Agricultural Tractor Tyres[J]. Journal of Terramechanics, 1991, 28(1): 49-64.
- [16] Lines J A, Murphy K. The Radial Damping of Agricultural Tractor Tyres[J]. Journal of Terramechanics, 1991, 28(2-3): 229-241.
- [17] Kising A, Göhlich H. Dynamic Characteristics of Large Tyres[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1989, 43(43): 11-21.
- [18] Pacejka H B. Mechanics of Pneumatic Tyres[M]. Washington D C: National Bureau of Standards, 1971.
- [19] Gent A N, Water J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛, 译. 北京: 清华大学出版社, 2012: 243-279.
- [20] 崔腾. 利用路面模拟试验台对轮胎刚度阻尼特性的分析[J]. 科协论坛, 2013(12): 165-166.
- [21] Lehtonen Tero, Kajjalainen Osku, Pirjola Heikki, et al. Measuring Stiffness and Damping Properties of Heavy Tyres[M]. Yokohama: World Automotive Congress, 2006.

收稿日期: 2017-11-07

Experimental Study on Low Frequency Dynamic Characteristics of Racing Tire

YANG Xiaoguang, ZHUANG Zhipeng, DENG Youxian, GAO Shishuang

(Wanli Tire Co., Ltd, Guangzhou 510425, China)

Abstract: The effects of load, inflation pressure, rolling speed and exciting frequency on the low frequency dynamic characteristics of racing tires were studied. The results showed that under non-rolling condition, the dynamic stiffness increased with the increasing of radial load and inflation pressure, and the damping coefficient increased with the increasing of radial load and decreased with the increasing of inflation pressure. Under rolling condition, the dynamic stiffness and damping coefficient increased with the increasing of inflation pressure, and load had little effect on the dynamic stiffness and damping coefficient. With the increasing of rolling speed, the dynamic stiffness increased, and the damping coefficient was basically unchanged. As the exciting frequency increased, the damping coefficient increased, and the dynamic stiffness was basically unchanged. The research results of low-frequency dynamic characteristics of racing tires were mostly consistent with the reports in the published literatures.

Key words: racing tire; dynamic stiffness; damping coefficient; load; inflation pressure

Speedco门店添加Love's品牌轮胎

中图分类号: TQ336.1 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com) 2018年1月31日报道:

普利司通公司的品牌不再拥有全美Speedco门店大部分货架的专有权。

2017年9月, Love's Travel Stops & Country Stores从普利司通手中购买了Speedco连锁店, 52个店面中的46个还提供风神、固特异、优科豪马和Love's的翻新轮胎。

Love's Truck Tire Care店已经有相同阵容。

“通过在Speedco门店提供更多的轮胎品牌, 我

们的技术人员可以通过分析司机或车队的预算和目标, 为他们提供更多的建议。”Speedco运营总监Aaron Aylworth说: “Love's收购Speedco的目标是以更多的方式为载重汽车运输业提供服务, 我们所要做的是在Speedco门店为他们提供更多的轮胎选择。”

Speedco继续提供普利司通和费尔斯通品牌的轮胎, 以及更换柴油、联合检查和电池工作等服务。Speedco计划2018年增加轻型机械服务。

Love's Truck Tire Care店已经提供轻型机械修理。

(吴淑华摘译 李静萍校)