

轮胎侧偏松弛长度试验方法研究

邱昌峰, 周 磊, 刘俊杰, 陈仁全, 张 超

(青岛双星轮胎工业有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要: 轮胎侧偏松弛长度测试的方法主要包括刚度法、侧偏角阶跃法和正弦变频扫描法。刚度法的轮胎侧偏松弛长度为轮胎侧偏刚度与侧向刚度的比值; 侧偏角阶跃法的轮胎侧偏松弛长度为轮胎在侧偏角、负荷、转矩等变量阶跃输入的影响下, 为了达到变量作用下稳态六分力数值的63.2%所滚动的距离; 正弦变频扫描法的轮胎侧偏松弛长度为轮胎测试速度和输入信号与输出信号时间差的乘积。采用不同的测试方法, 获得轮胎的松弛长度数值不同。

关键词: 轮胎; 松弛长度; 刚度法; 侧偏角阶跃法; 正弦变频扫描法

中图分类号: U463.341; TQ336.1; TQ330.7

文献标志码: B

文章编号: 1006-8171(2019)10-0633-04

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.10.0633

对于目前车辆动力学的研究和车辆设计而言, 轮胎稳态数据足以描述轮胎的动态行驶过程^[1], 然而稳态数据不能完全反映汽车在特定状态或瞬态变化时, 例如在汽车摆振时、汽车侧翻瞬间和急刹车瞬间轮胎六分力的情况, 此时轮胎的相位滞后研究变得及其重要。

轮胎的瞬态效应主要包括松弛长度、惯性和陀螺效应等。轮胎侧向松弛长度影响汽车的转向系统, 轮胎纵向松弛长度则影响汽车的防抱死系统, 因此轮胎松弛长度的研究非常重要。目前, 汽车操纵稳定性瞬态道路试验主要包括转向瞬态横摆试验和转向盘角脉冲输入试验等。在主观评价中通常用一定的角速度快速地左右转动方向盘, 感受行驶方向与方向盘的相应性。而汽车转向的滞后多数是由轮胎的特性产生的, 由于轮胎是由橡胶及其他骨架材料制成的粘弹性物体, 在转向的过程中, 轮胎先随方向盘转动一定角度, 此时轮胎扭转产生横向变形, 行驶一段距离后, 轮胎达到轮胎转向角度所需要的时间称为轮胎相位滞后时间。轮胎转向滞后反映了轮胎的转向灵敏度, 在室内试验中通常以松弛长度(轮胎滚动的距离)来考核。汽车制造商和轮胎制造商对轮胎瞬态效应的研究越来越重视, 汽车制造商对轮胎的松弛长

度提出具体的要求, 以保证轮胎与汽车底盘、悬挂相匹配, 从而提高汽车的转向性能和操控性能。

本工作对比研究轮胎侧偏松弛长度的不同测试方法。

1 实验

1.1 试验轮胎

选用规格为205/50R17的DOUBLESTAR品牌轮胎, 其速度级别为V, 负荷指数为99, 轮胎花纹如图1所示。



图1 试验轮胎花纹

1.2 试验设备

GDJ-3型轮胎刚度试验机, 天津久荣车轮技术有限公司产品; Flact Trac CT III型轮胎六分力试验机, 美国MTS公司产品。

1.3 试验方法

轮胎刚度测试参考GB/T 23663—2009《汽

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, 主要从事轮胎检测与分析工作。

E-mail: qcf825@163.com

车轮胎横向和纵向刚性试验方法》，试验条件如下：环境温度 18~24 °C，标准充气压力 250 kPa，标准负荷 4 300 N，横向加载速度 50 mm·min⁻¹。

轮胎六分力测试参考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》，试验条件如下：环境温度 21 °C，标准负荷 4 300 N，数据采集频率 1 024 Hz。

正弦变频扫频法的试验步骤如下：轮胎的侧偏角幅值为1°，频率从1~5 Hz进行线性变频加载，从而计算出侧偏角与侧向力的传递函数，基于传递函数，输入信号与输出信号的时间差可通过滞

后角相位差除以该点的角速度获得，时间差乘以试验速度即为轮胎的松弛长度。

2 结果与讨论

2.1 刚度法

在小侧偏角下，轮胎的侧偏松弛长度(l_y)计算公式如下^[2]：

$$l_y = \frac{|K_y|}{K_{cy}} \quad (1)$$

式中， K_y 为轮胎的侧偏刚度，N·rad⁻¹； K_{cy} 为轮胎的侧向刚度，N·mm⁻¹。刚度法相关测试数据见表1—3。

由表3可见：在相同负荷下，轮胎的 l_y 随着充气

表1 轮胎侧偏刚度测试数据

| 充气压力/kPa | 负荷/N | | | | | N·rad ⁻¹ |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------|
| | 2 658 | 3 455 | 4 300 | 5 316 | 6 202 | |
| 250 | -59 675.16 | -72 515.92 | -79 796.18 | -82 490.45 | -81 802.55 | |
| 220 | -55 891.72 | -69 477.71 | -78 477.71 | -83 464.97 | -84 611.46 | |
| 200 | -53 197.45 | -67 012.74 | -77 159.24 | -83 751.59 | -87 420.38 | |

表2 轮胎侧向刚度测试数据

| 充气压力/kPa | 负荷/N | | | | | N·mm ⁻¹ |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| | 2 658 | 3 455 | 4 300 | 5 316 | 6 202 | |
| 250 | 135.66 | 136.17 | 135.72 | 133.35 | 132.13 | |
| 220 | 126.82 | 127.90 | 128.93 | 125.99 | 127.55 | |
| 200 | 120.49 | 122.14 | 122.38 | 119.78 | 121.38 | |

表3 轮胎侧偏松弛长度(刚度法)测试结果

| 充气压力/kPa | 负荷/N | | | | | mm |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| | 2 658 | 3 455 | 4 300 | 5 316 | 6 202 | |
| 250 | 439.86 | 523.53 | 587.94 | 618.60 | 619.10 | |
| 220 | 440.71 | 543.21 | 608.68 | 622.47 | 663.35 | |
| 200 | 441.50 | 548.65 | 630.49 | 699.21 | 720.22 | |

压力的减小而增大；在相同的充气压力下，轮胎的 l_y 随着负荷的增大而增大。

2.2 侧偏角阶跃法

在侧偏角阶跃法中，轮胎的松弛长度是指轮胎在侧偏角、负荷、转矩等变量阶跃输入的影响下，为了达到变量作用下稳态六分力数值的63.2%所滚动的距离。

轮胎的动态响应可以通过单位阶跃输入的作用响应来描述，单位阶跃的施加是指在缓慢滚动的轮胎上快速施加一个固定的侧偏角，待轮胎稳态滚动一段时间后描述轮胎侧向力与松弛长度之

间的关系，其中单位阶跃函数 $[l(t)]$ 的定义为

$$l(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， t 为时间。

对式(2)进行拉普拉斯变换得 $R(s)$ ：

$$R(s) = L[l(t)] = \int_0^{\infty} l(t)e^{-st} dt = \int_0^{\infty} e^{-st} dt = \frac{1}{s} \quad (3)$$

式中， $R(s)$ 为轮胎的阶跃输入函数， L 为拉普拉斯变换的表达， s 指复数变量。

侧偏角阶跃法一阶系统的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4)$$

式中， τ 是指使 $e^{-t/\tau}$ 由1变为1/e所需的时间常数。

因此轮胎阶跃输出 $[H(s)]$ 为

$$H(s) = R(s)G(s) = \frac{1}{s} \times \frac{1}{\tau s + 1} \quad (5)$$

再对 $H(s)$ 进行拉普拉斯反变换得：

$$H(t) = L^{-1}[H(s)] = L^{-1}\left(\frac{1}{s} \times \frac{1}{\tau s + 1}\right) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

式中， $H(t)$ 为轮胎在时间变量的阶跃输出函数。

因此定义轮胎指定六分力(侧向力和纵向力等)(F)与时间的关系式为

$$F = A(1 - e^{-Bt}) \quad (7)$$

式中, A 为稳态下 F 的数值, B 为 $1/\tau$ 的常数。假设测试的速度 v 为常量, 则式 (7) 可以表示为

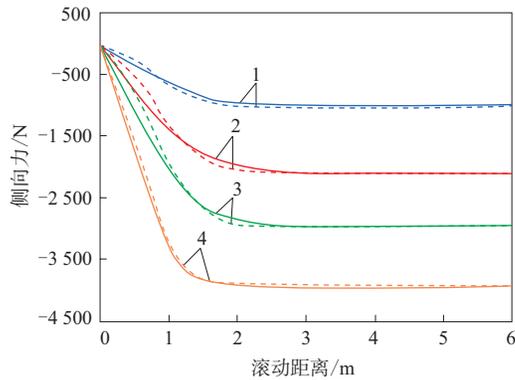
$$F = A[1 - e^{-(x/l)x}] \quad (8)$$

式中, $l = v\tau$, 为松弛长度; $x = vt$ 。

侧偏角阶跃法得到轮胎松弛长度见表 4, 试验曲线与模型曲线对比如图 2 所示。

表 4 轮胎松弛长度(侧偏角阶跃法)测试结果 mm

| 侧偏角/° | 试验负荷/N | | | |
|-------|--------|----------|----------|----------|
| | 3 455 | 4 300 | 5 316 | 6 202 |
| 1 | 964.32 | 1 016.24 | 1 157.25 | 1 347.36 |
| 2 | 875.37 | 979.68 | 1 097.68 | 1 112.48 |
| 3 | 768.45 | 906.68 | 964.44 | 954.32 |
| 5 | 582.95 | 716.46 | 764.86 | 832.54 |



实线为试验曲线, 虚线为模型曲线。侧偏角/°: 1—1; 2—2; 3—3; 4—5。试验负荷为 4 300 N, 充气压力为 250 kPa, 试验速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图 2 侧偏角阶跃法试验曲线与模型曲线对比

由表 4 可见: 采用侧偏角阶跃法测定, 在相同负荷下, 轮胎的松弛长度随着侧偏角的增大而减小; 在相同的侧偏角下, 轮胎的松弛长度随着负荷的增大而增大。

由图 2 可见, 在相同负荷、轮胎侧偏角在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内, 试验曲线与模型曲线非常接近。

2.3 正弦变频扫频法

正弦变频扫频法以侧偏角正弦输入, 其输入函数为

$$\alpha = \alpha_0 \sin(2\pi ft + \varphi_1) \quad (9)$$

式中, α 为侧偏角, α_0 为侧偏角振幅, f 为轮胎扫描时的频率, φ_1 为侧偏角初始相位。正弦信号的激励输入如图 3 所示。

正弦变频扫频法以侧向力正弦输出, 其输出函数为

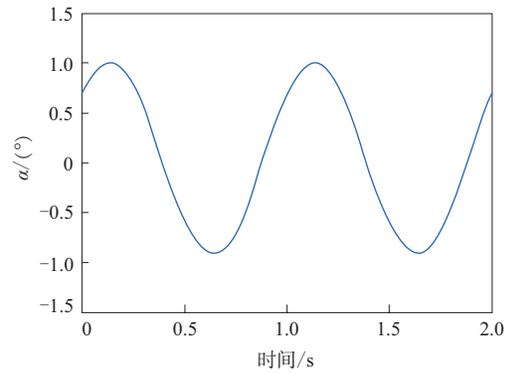


图 3 正弦信号的激励输入

$$F = F_a \sin(2\pi ft + \varphi_2) \quad (10)$$

式中, F_a 为轮胎侧向力振幅, φ_2 为侧向力初始相位。正弦信号的激励输出如图 4 所示。

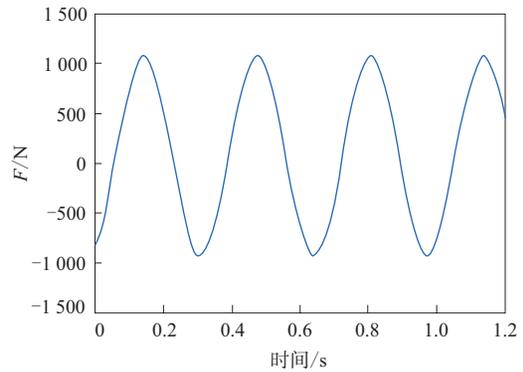


图 4 正弦信号的激励输出

因此输入信号与输入信号的时间差 (Δt) 为

$$\Delta t = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{2\pi f} \quad (11)$$

轮胎的松弛长度 (l_s) 为

$$l_s = v \Delta t \quad (12)$$

如果将轮胎的侧向力与侧偏角的数据绘制在一张图上, 得到一个椭圆的圆环, 如图 5 所示。

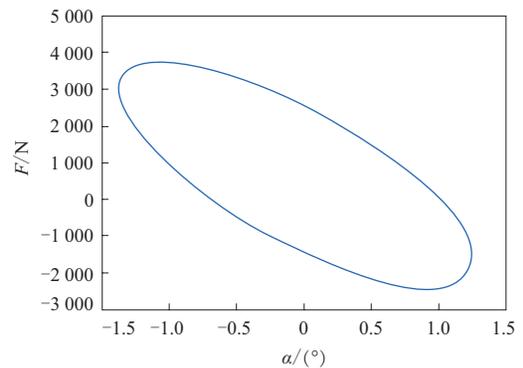


图 5 侧向力与侧偏角的关系

轮胎侧向力振幅和松弛长度分别见表5和6。

由表5可见:在相同频率下,轮胎的侧向力振幅随着负荷的增大而增大;在相同负荷下,轮胎的侧向力振幅随着频率的增大而减小。

表5 轮胎侧向力振幅 N

| 扫描频率/ Hz | 试验负荷/N | | | | |
|-------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | 2 658 | 3 455 | 4 300 | 5 316 | 6 202 |
| 1 | 956.82 | 1 175.87 | 1 326.57 | 1 428.27 | 1 483.81 |
| 2 | 943.23 | 1 166.45 | 1 331.96 | 1 432.52 | 1 487.60 |
| 3 | 941.84 | 1 152.38 | 1 307.85 | 1 408.09 | 1 455.69 |
| 4 | 935.90 | 1 126.58 | 1 258.90 | 1 339.59 | 1 381.64 |
| 5 | 922.10 | 1 103.06 | 1 223.55 | 1 285.68 | 1 316.00 |
| 6 | 911.26 | 1 043.55 | 1 176.35 | 1 223.12 | 1 242.77 |

表6 轮胎松弛长度(正弦变频扫频法)测试结果 mm

| 扫描频率/ Hz | 试验负荷/N | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2 658 | 3 455 | 4 300 | 5 316 | 6 202 |
| 1 | 317.79 | 407.58 | 487.64 | 523.70 | 552.58 |
| 2 | 315.26 | 393.16 | 462.54 | 515.10 | 548.43 |
| 3 | 311.93 | 389.62 | 451.28 | 499.29 | 534.68 |
| 4 | 307.67 | 383.47 | 442.23 | 488.33 | 518.84 |
| 5 | 304.37 | 380.73 | 436.04 | 474.07 | 504.42 |
| 6 | 302.35 | 379.57 | 427.24 | 464.80 | 487.00 |

由表6可见:在相同频率下,轮胎的松弛长度随着负荷的增大而增大;在相同负荷下,轮胎的松弛长度随着频率的增大而减小。

3 结语

3种轮胎松弛长度测试结果表明,在相同的测试条件下,不同的测试方法所得轮胎松弛长度的数据不同。轮胎的松弛长度越大,轮胎的滞后时间越长,车辆的转向灵敏度越差。轮胎松弛长度的测量数据与汽车的转向系统和防抱死系统有密不可分的关联性,合理地设计轮胎的结构、配方及花纹,得到合理的轮胎松弛长度,进而可提高汽车的转向性能和操控性能。

参考文献:

- [1] 张天华,许喆,王伟. 交错结构免充气安全轮胎的静态接地性能和疲劳寿命的有限元分析与预测[J]. 橡胶工业,2018,65(12):1383-1386.
- [2] 郭孔辉,侯永平,胡于进,等. 大侧偏角下侧偏松弛长度的研究[J]. 汽车工程,2001,23(2):78-81.

收稿日期:2019-04-23

东洋最新款Open Country轮胎为并排行驶车辆而设计

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2019年8月22日报道:

东洋轮胎美国公司发布了第1款用于并排行驶车辆的轮胎,即Open Country S×S轮胎(见图1)。

东洋表示,新轮胎Open Country M/T-R的性能和设计特别针对小批量车辆,尤其是并排车辆。



图1 Open Country S×S轮胎

轮胎直径为812.8 mm(32英寸),可提供高离地间隙以应对障碍物。通过激烈的赛车运动测试而开发的耐久结构和先进的复合材料,在崎岖的道路、泥泞的小道和不平的路面上能提供灵敏的非公路牵引性能。32×9.50 R15规格Open Country S×S轮胎已上市,这是为超级并排运动(如Polaris RZR, Can-Am Maverick和Arctic Cat Wildcat)而性能升级的轮胎。其特点包括钩形胎面花纹块,在各种路面条件下提供牵引力,包括沙、泥和岩石。胎面包裹在胎侧上,无论是在极端角度还是在低牵引力路面上,都能提供额外的抓着力。此外,耐磨胎侧胶有助于保护轮胎免受损坏。

据东洋称,在2019年全美越野赛车协会(NORRA)举办的UTV级比赛中,CageWrX赢得了墨西哥1000越野赛冠军;东洋汽车车队的车手Bryce Menzies2019年在加利福尼亚州约翰逊谷的比赛中也取得了令人印象深刻的成绩,这些赛况验证了Open Country S×S轮胎。

(张 钊摘译 赵 敏校)