

轮胎垂向刚度实验方法研究

孙绪利, 颜振, 李慧敏, 张凯凯, 王龙庆

(青岛森麒麟轮胎股份有限公司, 山东 青岛 266229)

摘要: 主要介绍了不同垂向刚度的测试方法的区别, 同时分析了轮胎侧倾角、滚动速度及加载频率对轮胎垂向刚度的影响。结果表明: 随侧倾角的增加, 轮胎静态垂向刚度先增加后逐渐减小; 随滚动速度增加, 轮胎动态垂向刚度先减小后逐渐增加, 且在一定速度范围内, 轮胎动态垂向刚度小于速度为零时的刚度; 随加载频率的增加, 轮胎动态垂向刚度逐渐增加。

关键词: 轮胎刚度; 侧倾角; 滚动速度; 加载频率

中图分类号: TQ336.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2024)08-0043-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2024.08.010

轮胎作为车辆与路面之间的唯一接触部件, 也作为车辆的减振元件, 其滚动特性对车辆的平顺性有很大影响。不平路面的激励通过轮胎的传递、过滤, 将振动传递给车身及驾驶员, 这一过程中轮胎的垂向刚度、阻尼起着重要作用。轮胎的动态性能很大程度上决定着车辆的平顺性, 然而长期以来, 人们常用轮胎的静态垂向刚度代替动态垂向刚度, 实际上两种刚度大不一样, 造成的误差也很大, 这样的替代是不合理的。轮胎常用的静态刚度法是在轮胎不滚动状态下测量, 测量轮胎下沉量与力的变化, 动态刚度法常用轮胎跌落法和激振器激振法但这两种方法均是在轮胎不滚动状态下进行^[1-3], 本文采用的动态刚度法是在六分力测试设备上轮胎滚动状态下进行测试。本文通过选取规格为 205/55R16 的不同胎面胶料的轮胎 (A/B/C 三方案胎面胶料邵氏 A 硬度分别为 67/62/64) 对比了静态垂向刚度、动态垂向刚度试验方法的差异, 并分析了轮胎侧倾角、滚动速度及加载频率对轮胎垂向刚度的影响。

1 静态垂向刚度

本文采用两种静态垂向刚度试验方法, 两种方法采用的都是径向力的变化与轮胎径向形变量间的比值, 不同的是第一种试验方法是在 GB/T23663—2020 基础上加以改进, 计算特定径向力与对应径向位移的比值, 试验设备为汕头浩大的轮胎综合性能试验机, 第二种试验方法采用的垂直载荷输入以线性扫掠形式进

行, 此方法垂向刚度为垂直载荷 - 负载半径 (FZ-RL) 曲线的斜率, 试验在美国 MTS 六分力试验机上进行, 试验设备精度更高。

1.1 静态垂向刚度 - 方法一

方法一是在国标 GB/T23663—2020 基础上加以改进, 在径向载荷作用下, 径向力的变化与轮胎径向形变量间的比值, 测试气压 230 kPa, 测试载荷 492 kg。其计算方法如下:

静态垂向刚度 = (径向力 2 - 径向力 1) / (径向位移 2 - 径向位移 1), 单位 N/mm;

径向力 1: 径向力 1 = (基准径向力 - 250 N), 单位为 N;

径向力 2: 径向力 2 = (基准径向力 + 250 N), 单位为 N;

径向位移 1: 径向力 1 所对应的位移量, 单位为 mm;

径向位移 2: 径向力 2 所对应的位移量, 单位为 mm;

基准径向力 = 试验中施加径向负荷 $\times 30\% \times 9.8 \text{ m/s}^2$, 单位为 N。

图 1 为不同方案轮胎试验过程垂向载荷随径向形变量的变化, 由上计算可得三种方案轮胎的静态垂向刚度分别为 200.0 N/mm、203.3 N/mm、205.8 N/mm,

作者简介: 孙绪利 (1989-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事轮胎结构设计与性能研究方面工作。

收稿日期: 2023-03-01

三种方案轮胎的垂向刚度差异较小。

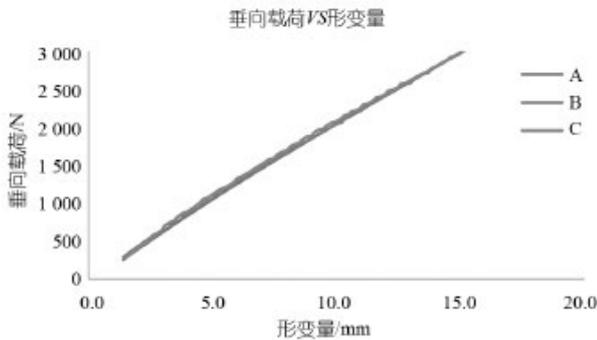


图1 不同轮胎垂向载荷位移曲线

1.2 静态垂向刚度 - 方法二

静态垂向刚度测试方法二是在美国 MTS 六分力实验机上进行试验，其中垂直载荷输入以线性扫描形式进行，通过对垂向载荷与轮胎负载半径的线性拟合计算轮胎的垂向刚度（即图2中虚线的斜率）。试

验轮胎与方法一中所用轮胎为同一轮胎，试验气压 230 kPa，设定载荷 (F_z) 492 kg，气压控制方式为 controlled 即控制胎压使其在试验过程中保持不变。路面速度为 0，侧偏角为 0° ，侧倾角为 0° 、 2° 、 4° 、 6° ，测试垂直载荷由 10% F_z 加载到 150% F_z 再加载到 10% F_z 的过程。具体设置如表 1 所示，试验结果如图 2 所示。

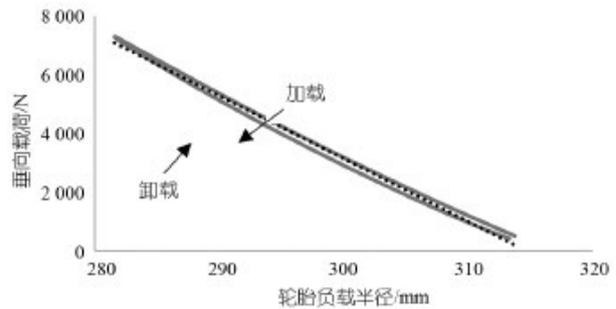


图2 方法二实验过程垂直载荷随负载半径

表 1 不同侧倾角下轮胎垂向刚度测试工况

项目	侧倾角 /°	垂直载荷起始值 /%	垂直载荷第 1 结束值 /%	垂直载荷第 2 结束值 /%	垂直载荷结束值 /%	垂直载荷斜率 / (N·s ⁻¹)	垂直载荷第 1 等待时间 /s	垂直载荷第 2 等待时间 /s
工况 1	0	10	150	10	10	500	0.2	0.2
工况 2	2	10	150	10	10	500	0.2	0.2
工况 3	4	10	150	10	10	500	0.2	0.2
工况 4	6	10	150	10	10	500	0.2	0.2

由图 3 可知， 0° 侧倾角下三种方案轮胎的垂向刚度分别为 218.38 N/mm、217.52 N/mm、218.31 N/mm，与中方法一测得的垂向刚度对比，方法二测得的垂向刚度数值偏大且方案间差异较小，由此可得胎面胶料对静态垂向刚度的影响较小。对比三条轮胎不同侧倾角下的垂向刚度，发现随侧倾角的增加，轮胎的垂向刚度先增加后逐渐减小，在 2° 侧倾角下轮胎垂向刚度最大，这是由于轮胎在同样的载荷下小侧倾角下径向位移量较大，而在大侧倾角下，轮胎的径向位移量小导致轮胎的垂向刚度减小。

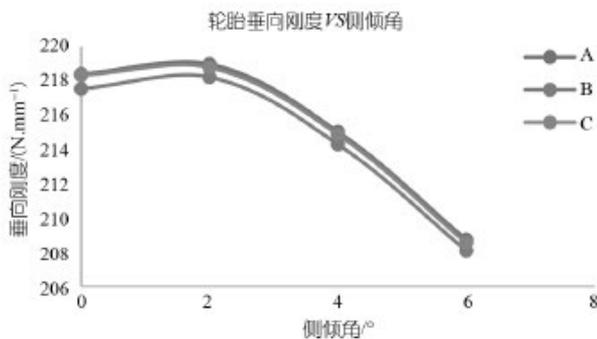


图3 不同侧倾角下轮胎垂向刚度

2 动态垂向刚度

2.1 滚动速度对轮胎垂向刚度的影响

轮胎在正常使用条件下均有不同的速度，为研究滚动速度对轮胎垂向刚度的影响，设计以下试验进行验证，采用正弦扫描的形式进行位移加载，位移加载范围为 $-20\sim 20$ mm，速度范围为 $0\sim 90$ km/h，试验气压 230 kPa，试验载荷 492 kg，具体试验步骤如表 2 所示，试验结果如图 3 所示：

由图 3 中所示，方案 C 在各速度下的垂向刚度均大于其他两个方案，但差异在 2% 以内。同时随着速度增加，三种方案轮胎的垂向刚度先减小后增加，在 $0\sim 10$ km/h 范围内，垂向刚度减小较快，在 $20\sim 90$ km/h 范围内，随速度的增加，轮胎动态垂直刚度逐渐增加。在 $0\sim 10$ km/h 范围内，轮胎速度为零时受橡胶材料迟滞效应影响较大，加载卸载过程的滞回环较大，同样的载荷变化下速度为零时的负载半径变化较大，由此计算的垂向刚度大于速度为 10 km/h 的垂向刚度。在 $20\sim 90$ km/h 速度范围内，此时轮胎的迟滞效应影响较小，轮胎在离心力的作用下轮胎负载半径略有增

表 2 不同速度下轮胎垂向刚度试验工况设置

项目	充气气压 /kPa	速度 / (km·h ⁻¹)	垂直加载位移第 1 结束位 置 /mm	垂直加载位移第 2 结束 位置 /mm	垂直加载位移频率 /Hz	垂直加载周期
工况 1	230	0	-20	20	0.5	5
工况 2	230	10	-20	20	0.5	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
工况 10	230	90	-20	20	0.5	5

加, 即同样的负载半径下速度较高时轮胎的垂向力较大, 从而计算所得的垂向刚度较大。同时可以发现速度超过 80 km/h 的情况下轮胎垂向刚度才大于速度为零时的垂向刚度。

2.2 加载频率对轮胎动态垂向刚度的影响

研究轮胎位移加载频率对轮胎动态垂向刚度的影响, 设定实验速度为 30 km/h, 预设载荷 4 000 N, 轮胎垂直加载位移按正弦波形式加载, 加载频率分别为 0.5 Hz、1.0 Hz、1.5 Hz, 具体试验步骤如表 3 所示, 试验结果如图 4 所示:

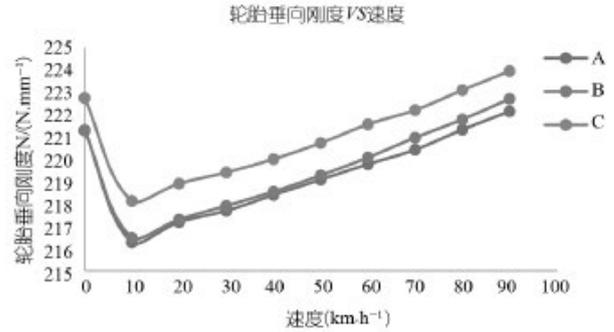


图 4 不同速度下轮胎垂直刚度

表 3 不同速度下轮胎垂向刚度试验工况设置

项目	充气气压 /kPa	速度 / (km·h ⁻¹)	垂直加载位移第 1 结束位 置 /mm	垂直加载位移第 2 结束位 置 /mm	垂直加载位移频率 /Hz	垂直加载周期
工况 1	100	30	-20	20	0.5	5
工况 2	100	30	-20	20	1.0	5
工况 3	100	30	-20	20	1.5	5

由图 5 中所示, 在不同加载频率下, C 方案的垂向刚度均大于 A、B 方案, 但差异较小。随着位移加载频率的增加, 三种方案的轮胎动态垂向刚度逐渐增大, 为分析这一原因, 我们对比了轮胎 A 的三种频率下的位移加载过程曲线 (如图 6 所示), 发现随位移加载频率的增加, 迟滞特性较为明显, 滞回环的面积较大, 在轮胎加载-卸载循环内能量损耗较大^[4], 加载频率的增加使得轮胎径向受到的力滞后于轮胎加载位移的变化, 这也是轮胎动态垂向刚度随加载频率增加而略有增大的原因。

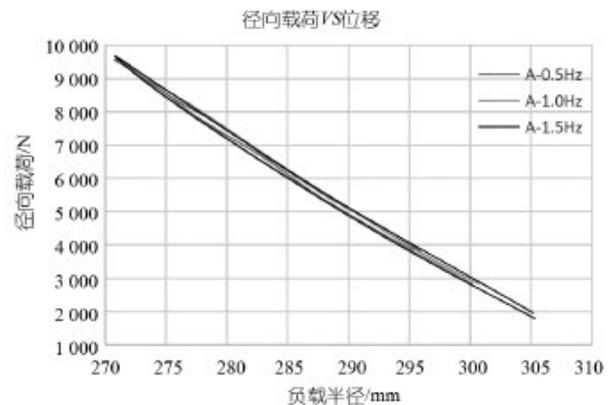


图 6 三种频率下的载荷加载过程曲线

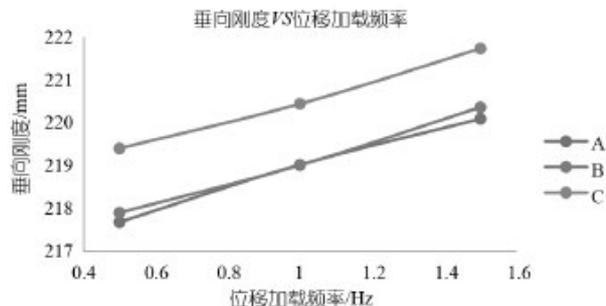


图 5 不同位移加载频率下轮胎垂向刚度变化

3 结论

本文主要介绍了不同垂向刚度的测试方法的区别, 同时分析了轮胎侧倾角、滚动速度及加载频率对轮胎垂向刚度的影响, 结论如下:

- (1) 轮胎垂向刚度受胎面胶料硬度的影响较小。
- (2) 随侧倾角的增加, 轮胎静态垂向刚度先增加后逐渐减小。
- (3) 随行驶速度增加, 轮胎动态垂向刚度先减小

后逐渐增加，且在一定速度范围内，轮胎动态垂向刚度小于速度为零时的刚度，这是由于速度增加，轮胎径向力的变化与径向位移的变化滞后造成的。

(4) 随加载频率的增加，轮胎动态垂向刚度逐渐增加，这是由于轮胎位移变化与径向力的滞后造成的。

参考文献：

[1] 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.

[2] 贺海留, 刘欣然. 影响轿车子午线轮胎静态径向刚度的因素 [J]. 轮胎工业, 2004,24(6):359-362.
 [3] 葛剑敏, 郑联珠. 轮胎垂直滚动动态刚度和阻尼的研究 [J]. 轮胎工业, 2000,020 (12):707-709.
 [4] 张志达, 李韶华, 周军魏. 重型汽车轮胎径向刚度实验研究 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2018,31(2):35-39,64.

Research on the experimental method of tire vertical stiffness

Sun Xuli, Yan Zhen, Li Huimin, Zhang Kaikai, Wang Longqing

(Qingdao Sentury Tire Co. LTD., Qingdao 266229, Shandong, China)

Abstract: This article mainly introduces the differences in testing methods for different vertical stiffness, and analyzes the effects of tire roll angle, rolling speed, and loading frequency on tire vertical stiffness. The results indicate that as the roll angle increases, the static vertical stiffness of the tire first increases and then gradually decreases; As the rolling speed increases, the dynamic vertical stiffness of the tire first decreases and then gradually increases, and within a certain speed range, the dynamic vertical stiffness of the tire is less than the stiffness at zero speed; As the loading frequency increases, the dynamic vertical stiffness of the tire gradually increases.

Key words: tire stiffness; roll angle; rolling speed; loading frequency

(R-03)

轮胎装备巨头，拿下两大奖项

Tire equipment giant wins two major awards

近日，软控股份获评由国家发展改革委、工业和信息化部等五部委联合认证的 2024 年度“国家鼓励的重点软件企业”。入选企业需在专利或计算机软件著作权等知识产权、核心关键技术、研发投入、人员学历结构等七维度同时达标，这一认定是国内最具含金量的软件企业资质之一。

同时，软控作为橡胶装备领域的龙头企业，坚持行业应用软件的研发与创新，致力于构建高性能、标准化、全智能的数智化产品，自主开发“软控质联云平台”，面向复杂装备的全生命周期智能管理，提供装备质量精益管控、数字化安装调试、智能运维等业务场景，建设了集语音识别、质量检测、分析统计于一体的质量精益管控模块，从制造源头赋能橡胶装备质量提升，赋能全球客户 7×24 h 智能服务。该平台成功上榜山东省工业和信息化厅发布的第四批“山东省软件产业高质量发展重点项目”名单。

软控以“算法国产化，应用场景化”为发展目标，自主开发行业专属应用软件、工业 App 等数字化转型产品与解决方案，驱动橡胶轮胎行业精准前行。公司与全球轮胎行业龙头企业建立了长期战略合作，打造行业数字化转型最佳实践。未来软控将持续深化融合物联网、大数据与 AI 算法，实现对轮胎生产全链条的实时监控与智能管理，全面提升产业数字化水平。

编自“中国轮胎商务网”

(R-03)