

轮胎模态试验及在轮胎结构设计中的应用研究

葛剑敏,王卫防,孙世铭,Rolf Gall

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司,上海 200072]

摘要:分析了轮胎模态分析的试验方法及其在轮胎设计中的应用,并建立了轮胎模态分析试验系统。测量了各类型轮胎的固有频率特性,分析了轮胎气压、胎面花纹和轮胎质量对轮胎的固有频率特性的影响规律、模态振型与振动和噪声的关系,得出结论:轮胎气压增大,轮胎的固有频率也随之增高;同型号、同规格光面轮胎的基频低于有花纹轮胎;轮胎刚度变化对轮胎固有频率的影响大于轮胎质量的影响。此外,还用试验模态验证了有限元模态分析的正确性及产生误差的原因。

关键词:轮胎;固有频率;模态振型;刚度;阻尼

中图分类号:TQ336.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8171(2001)04-0203-05

车辆是通过唯一部件轮胎与路面发生力作用的,可以说,车辆动力学模型中的力输入几乎全部为美国SAE定义的轮胎六分力,轮胎力学特性是决定或影响车辆动力学特性的重要力学特性之一。随着现代车辆速度的不断提高,车辆的主动安全性、噪声、行驶动力性和乘坐舒适性在车辆性能中占有越来越重要的位置。随着我国公路的发展,轮胎噪声已成为环境噪声的主要来源之一,减轻轮胎的振动降低噪声以及改善车辆行驶性能成为目前的迫切任务。而轮胎的固有特性直接影响轮胎与车辆的振动与噪声。对车辆性能定量分析与研究、先进底盘控制系统的设计开发在很大程度上都依赖于车辆动力学模型和轮胎力学模型的研究。国外许多汽车厂家对轮胎与汽车的合理配套提出了诸如安全性、噪声、包络特性、操纵稳定性和牵引附着性等各种要求,例如福特汽车公司已经要求其轮胎配套厂家提供轮胎的固有频率。我们与世界先进水平的差距较大。因此,研究轮胎的振动特性对轮胎的合理设计具有重要意义,也将有利于提高轮胎质量和销售量^[1~3]。

本文分析了模态试验的方法,测量了轮胎的固有频率特性,研究了轮胎气压、轮胎质量和

胎面花纹对轮胎固有频率特性的影响规律以及模态振型与振动和噪声的关系。通过模态试验验证了有限元模态分析的正确性及产生误差的原因。

1 试验方法分析

由于轮胎本身结构的特殊性和复杂性及与车辆配套后各种性能的要求,在进行轮胎模态试验时,要考虑轮胎的悬置、激振方式和拾振等问题。

与汽车车身和发动机机体等其它构件一样,轮胎模态试验有刚性约束和自由悬置两种方式。试验中为确定轮胎的固有特性,使边界条件对测试结果影响最小,把轮胎用弹簧吊起来,使其处于自由状态。弹簧刚度的选择应使得约束系统频率(指轮胎在弹性元件悬挂下的自然振动频率)低于轮胎第一阶固有频率的 $1/4$ (参考理论分析值)。对两种悬置进行的理论分析及试验验证说明,由于轮胎胎体与轮辋相比刚度悬殊,而且是对称体,轮胎在有影响的频段内,弹性模态都是由胎体相对轮心的弹性变形而构成,两种方式所得的试验结果基本一致。所不同的是固支法多了两阶刚体模态,它们对靠近的两阶模态有一定的影响,表现在第三阶模态的试验数据相差较大,其它数据基本一致。

对于激振方式,可采用手锤激振或激振器

作者简介:葛剑敏(1963-),男,河南洛阳人,同济大学和上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司企业博士后,主要从事汽车系统动力学和轮胎噪声与振动方面的研究工作。

激振法。在力和加速度传感器的选用和安装上考虑了附加质量、附加刚度及原点测量阻抗选择不当带来的局部柔度过大致使振型畸变的问题。可采用随机激振法,例如激励信号为带宽 2.5 kHz 的白噪声。激励力通过阻抗头作用于轮胎上,由结构动态分析仪 (Structure Dynamic Analyzer 5423A) 监控并进行数据处理。

为了与理论计算结果相比较,测点尽量选在相应于模型的节点上。为避免局部模态的影响,将测点尽可能地布置在刚度较大的部位。为使轮胎更符合实际情况,应使激振力垂直于轮胎胎面^[1,2]。

图 1 所示为轮胎自由悬置手锤激振的轮胎模态试验,轮胎被悬挂起来使其处于自由状态,测取轮胎表面各点的振动加速度,可以得到轮胎处于自由状态下的固有频率。用激振器激振轮胎可以得到轮胎处于自由状态下的振型。

图 2 所示为轮胎轴固定激振器激振轮胎模态试验。轮胎轴固定,不转动,用激振器对轮胎

接触面进行无负荷和有负荷下随机激振,可以测得轮胎在接触状态下的模态,例如在计算机上编写程序,用 Monte Carlo 方法产生伪随机激励信号,用来驱动激振器,达到激振轮胎、测取结构振动加速度值的目的。由于激振谱只需要用磁带记录,试验时用磁带放出,国产的通用振动设备即可达到模态试验的目的。此时也可以用手锤激振法测得轮胎轴固定状态下的固有频率。轮胎的模态试验原理如图 3 所示。



图 2 轮胎轴固定激振器激振模态试验



图 1 轮胎自由悬置手锤激振模态试验

2 试验条件

为了研究轮胎的模态参数与轮胎结构参数的关系,把轮胎的模态分析与轮胎的结构设计结合起来,选择许多不同结构参数的轮胎,在不同的气压和激振方式下进行了大量试验。考虑到温度对轮胎特性有很大影响,因此所有试验都在室内 25℃ 左右的常温下进行。当用手锤敲击或激振器随机激振时,可以测得轮胎不同方向的固有频率特性曲线;当用激振器在某一固有频率下以正弦信号激振时,可以测得轮胎不同方向的模态振型。

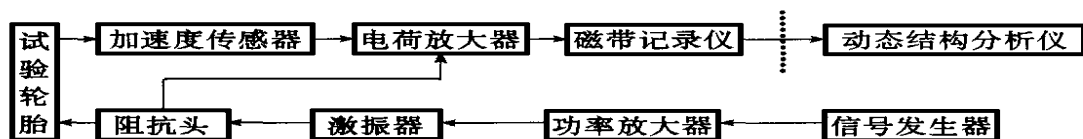


图 3 轮胎模态试验原理框图

3 影响轮胎固有频率特性的因素

3.1 轮胎气压

图 4 和 5 所示为光胎面轮胎气压与固有频

率的关系曲线。由图 4 和 5 可以看出,随着轮胎气压的增大,轮胎的固有频率提高;振型阶次越高,越容易受气压的影响,因为轮胎气压改变了带束层张力和轮胎刚度。随着轮胎气压的增

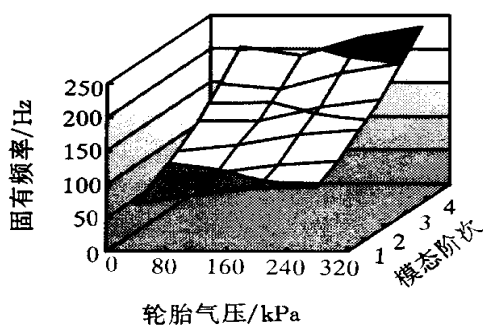


图4 光胎面轮胎固有频率与气压的关系

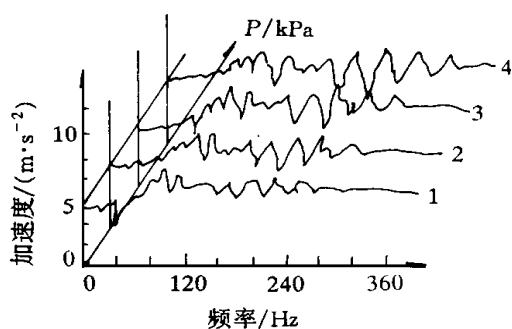


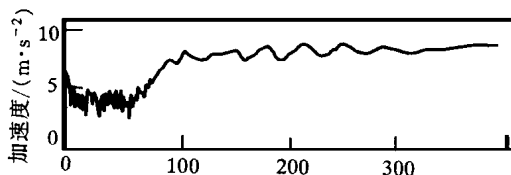
图5 不同气压轮胎频响曲线

1—80 kPa; 2—160 kPa; 3—240 kPa; 4—320 kPa

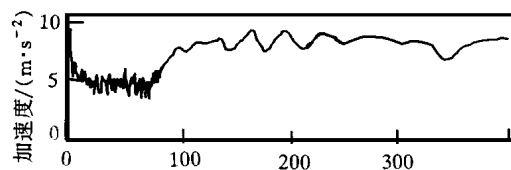
大,胎体刚度提高,而轮胎的固有频率与轮胎刚度成正比,因此轮胎的固有频率提高。如图5所示,随着轮胎气压增大,胎体的径向阻尼减小,各阶次固有频率对应振幅增大,尤其对高阶频率影响更大。因此,增大轮胎气压有利于降低轮胎的滚动阻力,延长轮胎的使用寿命,但汽车的行驶平顺性降低。

3.2 轮胎胎面花纹

图6所示为轮胎固有频率特性与胎面花纹的关系曲线。试验轮胎为195/60R14光面轮胎和WARRIOR 195/60R14有花纹轮胎,轮胎气压为250 kPa。根据振动理论分析可知:对于由弹性胎体和胎面组成的振动系统,在胎体参数不变条件下,轮胎的固有频率与轮胎刚度成正比,而与轮胎的质量成反比。由于胎面花纹沟槽不同,从而影响轮胎胎面质量和刚度。有花纹轮胎的胎面刚度和质量小于光面轮胎的刚度和质量。由图6可以看出,光面轮胎的固有频率低于有花纹轮胎的固有频率。这说明轮胎胎面花纹质量对轮胎固有频率的影响大于轮



(光面轮胎频率响应特性曲线)



(有花纹轮胎频率响应特性曲线)

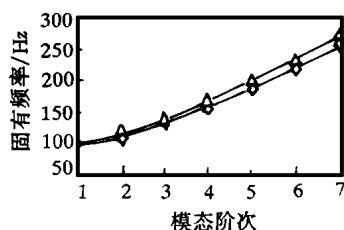


图6 轮胎固有频率与胎面花纹的关系

—光面轮胎; —有花纹轮胎

胎胎面刚度对轮胎固有频率的影响。因此,轮胎胎面花纹沟槽橡胶的质量影响轮胎的固有频率、平顺性和噪声,即随着轮胎胎面质量的减小,轮胎的固有频率提高。

3.3 轮胎质量

图7和8所示为轮胎固有频率特性与质量的关系曲线。轮胎型号为WARRIOR 185/60R14(相同花纹不同质量的2条轮胎),轮胎气压为250 kPa。根据振动理论分析可知,在胎面参数不变的条件下,轮胎的固有频率与该系统胎体刚度成正比,而与胎体质量成反比。

由图8可以看出,随着轮胎胎体质量减小,轮胎的固有频率(图7中振动曲线波峰对应的横坐标数值)也降低。这说明轮胎质量的减小改变了轮胎胎体刚度,使胎体刚度大大降低,其刚度变化对轮胎固有频率特性的影响大于质量变化对轮胎固有频率特性的影响。因此当轮胎胎体质量减小时,固有频率降低。

根据振动理论可知,对于一个有阻尼振动系统,随着系统阻尼的增大,振动幅值减小。轮

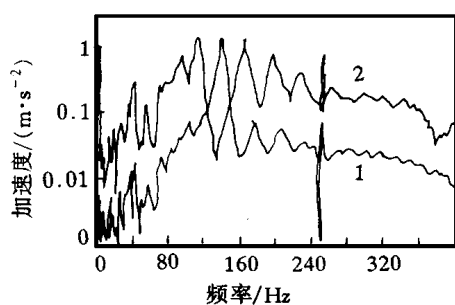


图7 不同质量轮胎频响曲线

1—胎体质量较大轮胎;2—胎体质量较小轮胎

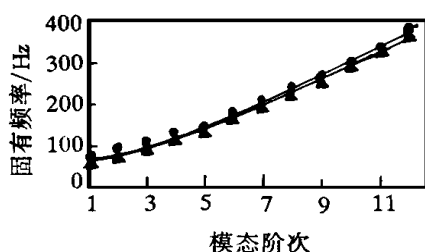


图8 轮胎固有频率与轮胎质量的关系

●—胎体质量较大轮胎;▲—胎体质量较小轮胎

胎是一个有阻尼振动系统,如图8所示,随着轮胎胎体质量减小,轮胎胎侧橡胶厚度减小,使轮胎内摩擦阻尼降低,轮胎质量的减小也改变了轮胎的阻尼,使轮胎的阻尼降低,导致滚动阻力降低;同时,轮胎径向振动幅值增大,使轮胎的平顺性变差,但通过与汽车悬挂系统的合理匹配可以改善整车系统的平顺性。因此,在设计低滚动阻力轮胎时要考虑轮胎质量的减小对轮胎刚度、固有频率特性及对配套汽车平顺性的影响。

4 轮胎试验模态振型分析

图9所示为轮胎轴固定、不转动、轮胎不接地、无负荷状态下用激振器在不同频率下激振得到的某子午线轮胎的模态振型。由图9可以看出,由于一次振型为偏心振型,传至车轴的激振力最大,是引起路面噪声的主要原因。轮胎不接地时二次以上的高次振型是轴对称的,故轮胎胎面振动在轴心产生的力相互抵消,使整个胎面的重心位置没有振动。然而实际轮胎是接地的,实际振型也非完全轴对称,因此也会产

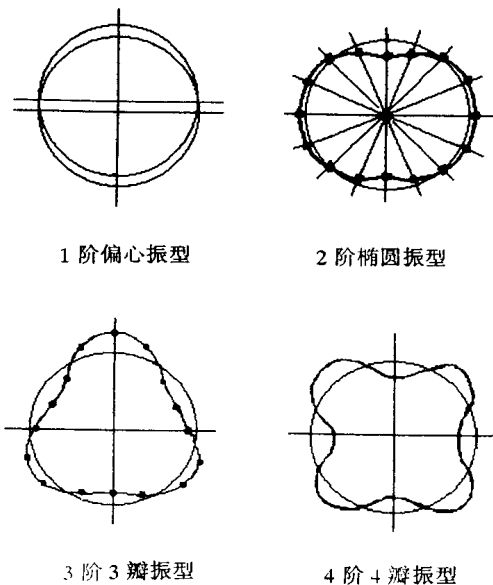


图9 轮胎的模态振型

生车轴激振力,而且胎面的高次振动成为影响路面噪声的重要振型。

5 轮胎的试验模态与有限元计算对比分析

试验轮胎固有特性可验证理论计算(轮胎有限元模态计算或仿真计算)的正确性,并分析理论计算(如有限元模态分析计算)的误差。图10所示为195/60R14光面轮胎有限元计算与试验模态对比曲线。由图10可以看出,有限元计算结果与试验结果有一定的差异。由于轮胎结构为复杂的复合材料结构,很难准确地测量和计算出该复合材料的基本参数,因此,在轮胎有限元计算过程中选择的基本材料参数存在一定误差,导致有限元计算结果产生误差。该试验为有限元模态分析及计算提供了理论依据。

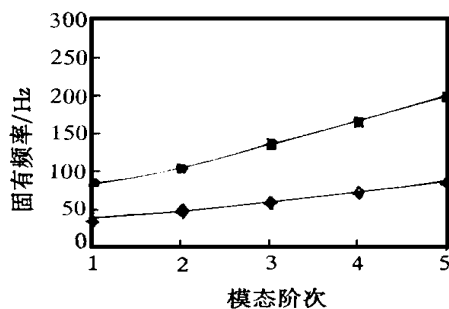


图10 轮胎有限元计算与试验模态对比

■—试验模态; ●—有限元计算

6 结论

本研究建立了轮胎模态分析试验系统,探讨了轮胎模态分析的试验方法及其在轮胎设计中的应用。通过对不同气压、胎面花纹和轮胎质量下轮胎的固有频率特性及模态振型的测量,分析了轮胎不同参数对轮胎模态振型、振动和噪声的影响。得出结论:随着轮胎气压增大,轮胎刚度提高,阻尼减小,轮胎的固有频率增大,滚动阻力降低,平顺性变差;同型号、同结构光面轮胎的基频小于有花纹轮胎的基频。随着轮胎质量减小,轮胎刚度大大降低,其刚度变化对轮胎固有频率特性的影响大于质量变化对轮胎固有频率特性的影响,轮胎的阻尼降低使滚动阻力降低,但平顺性变差。轮胎的一阶偏心振型直接影响轮胎的行驶平顺性,是引起轮胎平顺性变差和路面接缝噪声的主要原因。轮胎二阶以上的高次振型是影响轮胎与路面接触噪声的重要振型。通过试验结果与有限元模态计算结果的对比,说明在轮胎有限元分析过程中

所选取轮胎材料参数的误差引起有限元计算结果产生一定的误差。该系统在轮胎的设计与理论研究中得到了广泛使用,并取得了良好效果。致谢:在该试验系统的建立、调试和试验中,隆有明副所长在技术和工作中给予了极大的指导和支持,徐进书记、韩兆丙所长、姚明副所长在各方面给予了大力支持,装备室的袁熙荣工程师、丁琪余工程师和其它部门在系统设计中给予了全力支持,在此表示深深的感谢。感谢上海市华谊集团轮胎公司博士后基金的资助。

参考文献:

- [1] Guan Di-hua, Wu Wei-dong, Zhang Ai-qian. Tire modeling for vertical properties by using experimental modal parameters [J]. SAE, 980252:17-20.
- [2] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 105-124.
- [3] 葛剑敏. 车辆自激振动机理与试验研究[D]. 长春:吉林工业大学, 1998.

第11届全国轮胎技术研讨会论文(二等奖)

Tire modal test and its application to tire structure design

GE Jian-min, WANG Wei-fang, SUN Shi-ming, Rolf Gall

[Shanghai Tire and Rubber (Group) Co., Ltd., Shanghai 200072, China]

Abstract: The tire modal test and its application to the tire structure design were analysed, and a tire modal analysing test system was established. The inherent frequency characteristics of various tires was determined, the effective law of tire inflation pressure, tread patterns and tire weight on the inherent frequency characteristics of tires was analysed. It was found that the inherent frequency increased as the tire inflation pressure increased; the basic frequency of the tire with tread patterns was lower than that without tread patterns in the same type and size; the influence of the tire stiffness on the inherent frequency was greater than that of the tire weight. The FEA of tire modal was confirmed and the cause of deviation was diagnosed by the modal test.

Keywords: tire; inherent frequency; modal vibration type; stiffness; damp

湖北公路通车里程近6万 km

中图分类号:U412.1 文献标识码:D

“九五”期间,湖北省公路交通基础设施建设发展态势良好,重点工程与干线建设齐头并进,全省路网工程全面启动。

到2000年年底,公路通车总里程达到

57 000 km,比1995年新增公路8 272 km;高速公路里程达到568 km,路网密度达到 $30.7 \text{ km} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 。目前京珠高速公路湖北段、襄十、襄荆等重点工程相继启动,宜昌、军山、荆州、鄂黄等长江大桥建设进展顺利。

(摘自《中国汽车报》,2001-01-08)