轮胎空腔模态预测方法研究

刘　伟[1,2]，韩腾飞[1,2]，刘二宝[1,2]

（1. 长城汽车股份有限公司 技术中心，河北 保定　071000；2. 河北省汽车工程技术研究中心，河北 保定　071000）

摘要：介绍3种轮胎空腔模态预测方法，并与实车测试数据进行对比分析。结果表明，与实测结果相比，轮胎在自由状态下理论公式计算及CAE仿真模拟误差较大且仅能预测出1个共振峰值，而考虑轮胎接地变形的仿真预测方法能表征出2个峰值且误差很小，可以更精准地对轮胎空腔模态进行前期预测，工程应用价值更高。

关键词：轮胎；空腔；模态；预测方法

中图分类号：TQ336.1^{+}1；O241.82　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8171(2018)00-0000-03

当前汽车工业发展迅速，汽车作为常用的交通工具已经走进千家万户，在大量普及的同时消费者对其使用要求也逐步提升，其中对行驶平顺性（NVH）关注度极高。车辆在行驶过程中会产生很多噪声，其中轮胎是整车噪声贡献度较大的部件，轮胎噪声水平直接影响车辆整体的NVH性能。汽车行驶速度超过一定值时，轮胎噪声即成为汽车噪声的主要来源[1]。轮胎噪声主要包含花纹噪声和路面激励引起的车内噪声，车辆行驶时轮胎空腔共振引起的车内噪声也极大影响整车NVH。由于轮胎空腔固有频率主要由轮胎规格决定，因此其固有特性很难改变，虽然有轮胎内部添加吸声材料案例，但出于成本考虑推广性不强。为了预防共振问题，车辆开发前期需要准确预测轮胎空腔固有频率，通过模态规划使轮辋及摆臂和悬架等底盘系统部件避开轮胎固有频率。

轮胎空腔固有频率预测有轮胎自由状态传统公式计算、轮胎自由状态仿真分析预测和轮胎接地仿真分析预测3种方法，本工作对比研究3种方法的预测精度和工程应用价值。

1　轮胎空腔噪声现象及发生机理

1.1　轮胎空腔噪声现象

在车辆行驶过程中受路面激励影响车内会出现频率单一的“咚咚音”，且伴随车速及路面粗糙度提高噪声增大，这种噪声现象即为轮胎空腔共振噪声，通常称为轮胎共鸣音。该噪声对应于整车噪声频谱如图1所示。

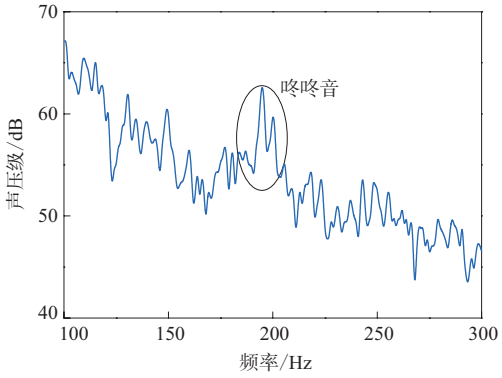


图1　车内空腔噪声对应于整车噪声频谱

1.2　轮胎空腔噪声发生机理

由于路面不平激励轮胎空腔产生振动，该振动通过轮辋、转向节和悬架等部件传给车身，导致车内噪声增大。

轮胎噪声属于单频噪声，与轮胎规格相关，一般问题频率在170～250 Hz范围内，通常可以通过开关车窗判断轮胎空腔噪声在车内的变化。有研究表明[2]，当车窗开启时受风噪及轮胎花纹噪声影响，车内噪声整体变大，但轮胎空腔共振噪声峰值无明显变化，从而说明轮胎空腔共振噪声主要以结构振动形式传递到车内。

轮胎空腔共振噪声传递路径为：轮胎（空腔振动激励）→悬架（摆臂、副车架、减震器振动）→车身（地板、侧围、顶棚振动）→乘客（咚咚音）。

作者简介：刘伟（1982—），男，河北保定人，长城汽车股份有限公司高级工程师，学士，主要从事汽车NVH性能研究与控制工作。

E-mail：lw1152005@126.com

2　轮胎空腔固有频率预测

2.1　轮胎自由状态传统公式计算

轮胎空腔模态固有频率主要与声音在轮胎内部的传播速度和轮胎周长相关，常用计算公式为

$$f_i=ic/l \quad (1)$$

式中，f_i为第i阶空腔固有频率，本研究主要考虑第1阶，c为声音在轮胎空腔内传播速度，l为轮胎空腔中心周长[3]。

该计算方法表征了轮胎不承受载荷无变形自由状态下的特性，而实际上轮胎承受轴荷并有较大变形，相关研究表明轮胎接触地面后空腔共振频率会分解为2个[4]，因此该方法计算的结果与实车数据有一定差距，不能精准反应实车状态。

2.2　轮胎自由状态仿真分析预测

2.2.1　仿真分析模型

该方法以有限元理论为基础，将轮胎内部空腔进行有限元处理，轮胎状态为自由状态。以235/55R20轮胎为例进行分析，其仿真模型如图2所示。

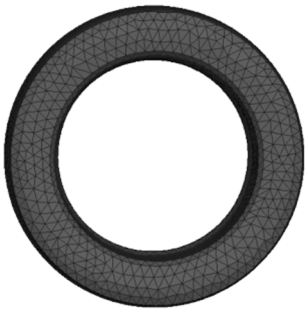


图2　轮胎自由状态仿真计算有限元模型

2.2.2　仿真分析结果

由于有限元建模是基于自由状态，因此空腔振动形态为标准的环状振动，与轮胎自由状态传统公式计算结果基本一致，只能表征一种振动形态，由于无需进行轮胎尺寸数据转化，因此消除了计算失误率，只需基于3D模型进行有限元建模，自动化程度更高，计算结果如图3所示。

2.3　轮胎接地仿真分析预测

2.3.1　仿真分析模型

在轮胎自由状态仿真分析预测的基础上充分考虑轮胎装车状态承受载荷的变形，轮胎接地仿真分析有限元模型空腔形状与实际状态更加吻合，计算结果与实测值更接近，如图4所示。

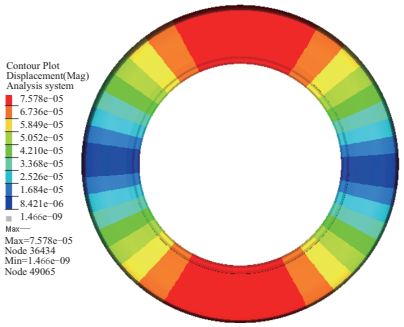


图3　轮胎自由状态仿真计算结果

图4　轮胎接地仿真计算有限元模型

2.3.2　仿真分析结果

轮胎与地面接触发生变形，导致轮胎失去圆周方向的均匀性，空腔模态会分离成2个，一个为垂直方向振动形态，另一个为水平方向振动形态，仿真分析结果能够准确计算出固有频率并直观显示振动形态，如图5所示。

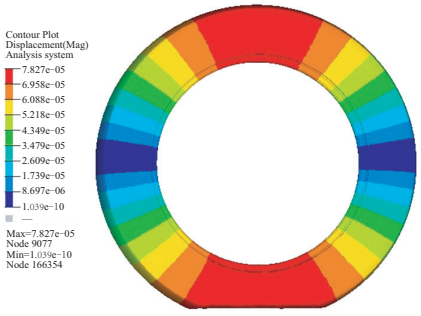
3　试验对比验证

以某款SUV车内空腔噪声为例验证3种方法的准确性和工程应用性。车辆以80 km·h^{-1}的速度在粗糙路面上行驶时车内的轮胎空腔共鸣噪声明显，测试轮胎空腔共振峰值频率为172.64和188.56 Hz，如图6所示。

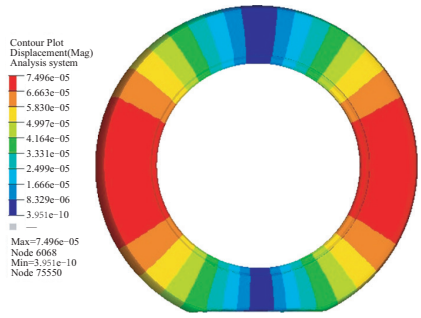
该车所配轮胎规格为235/55R20，轮胎胎面宽度为235 mm，断面高宽比为55%，轮辋直径为508 mm(20英寸)。按常规计算如下：

$$f=c/l=340\,000/[3.14(235\times0.55+25.4\times20)]=170\ (\text{Hz})$$

轮胎自由状态传统公式计算、轮胎自由状态仿真分析预测和轮胎接地仿真分析预测3种方法的计算结果分别为170，175，171/185 Hz，与试验结果(172.64/188.56 Hz)相比，误差分别约为2～18，3～13，1～3 Hz。由此可见，轮胎接地仿真分析预测的误差很小，预测精度最高。



(a) 垂直方向



(b) 水平方向

图5　轮胎接地仿真计算结果

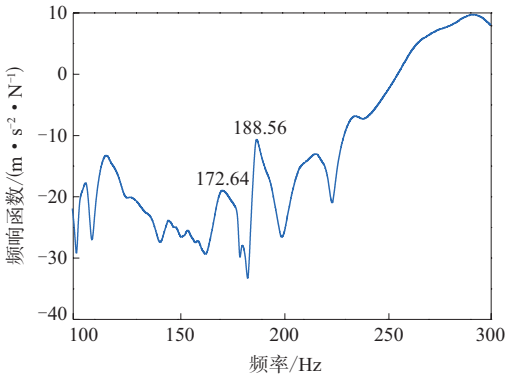


图6　轮胎空腔共振频率测试结果

(3) 建立轮胎接地状态下有限元模型，能够预测行驶轮胎空腔模态固有的2个峰值特性，与实测值误差较小，预测精度较高。

车辆开发前期精准预测轮胎空腔固有频率并开展周边件模态频率规划避频，能够有效避免轮胎空腔共振引起的车内空腔噪声。车辆质量和行驶速度会影响轮胎的下沉量和接地面积，从而影响预测精度，这是今后应继续深入研究的课题。

4　结论

本工作采用3种方法预测轮胎空腔固有特性并进行实车对比研究，得出如下结论。

(1) 利用理论公式及仿真软件都可以快速预测轮胎空腔固有频率，计算精度有较大差异。

(2) 轮胎自由状态下空腔固有频率只有1个峰值，而行驶状态下因受承载变形会产生2个峰值，因此，轮胎自由状态下的特性模拟不适用于行驶状态。

参考文献：

[1] 殷瑞婧，雍占福，冯启章，等. 电动汽车轮胎滚动阻力与噪声协调设计及产品开发[J]. 轮胎工业，2017，37(2)：67-74.

[2] 沈伟，易斌，陆伟领. 动力吸振器在降低车内路噪中的应用[J]. 汽车工程，2010，32(8)：18-22.

[3] 文伟，张军，宫世超，等. 轮胎空腔共振噪声工程控制及应用[A]. 2015中国汽车工程学会年会论文集[C]. 北京：中国汽车工程学会，2015：1815-1818.

[4] 于学华. 轮胎空腔共振噪声的解决办法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2009，37(7)：90-93.

收稿日期：2017-04-10

Study on Predicting Method of Tire Cavity Mode

LIU Wei[1,2]，*HAN Tengfei*[1,2]，*LIU Erbao*[1,2]

(1. R&D Center of Great Wall Motor Company，Baoding　071000，China；2. Hebei Provine Automotive Engineering Technical Research Center，Baoding　071000，China)

Abstract：Three kinds of predicting methods on tire cavity modes were introduced，and compared with real vehicle test data. The results showed that，compared with the measured values，both theoretical formula calculation and CAE simulation for the tire in freedom state had bigger error， and only could predict a resonance peak. But the simulation prediction method considering the tire deformation on the ground could characterize the two peaks，and its error was little，which could be more accurate to forecast tire cavity modes，and had higher engineering application value.

Key words：tire；cavity；mode；predicting method