

# 燃料电池车声振测试及噪声源识别

申秀敏, 左曙光, 蔡建江, 冯 青

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 对燃料电池车进行了振动噪声测试, 采用分别运行法采集了在空气辅助系统和氢气辅助系统分别独立运行工况下的振动噪声信号。并通过对测试数据进行频谱分析等, 确定了燃料电池车振动噪声的主要频率特性及主要振动噪声源为空气辅助系统和氢气辅助系统以及燃料电池冷却水泵等, 同时针对主要振动噪声源提出了一些行之有效的改进方案, 尤其是对风机及氢气辅助系统箱体的改进提出了见解性的改进意见。通过现代信号分析技术进行振动噪声源识别, 确定主要的振动和噪声源, 并对燃料电池车的减振降噪提出了可行性方案, 是实施正确减振降噪措施的前提。

**关键词:** 燃料电池车; 空气辅助系统; 氢气辅助系统; 振动噪声

中图分类号: TB535; U467.4+ 93

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-04-0570-07

## Noise and vibration tests for fuel cell vehicle and noise sources identification

SHEN Xiu-min, ZUO Shu-guang, CAI Jian-jiang, FENG Qing

(Tongji University, Shanghai 211804, China)

**Abstract:** Noise and vibration tests for fuel cell vehicle are made by respectively acquiring the vibration and noise signals when it is independently working with the air auxiliary system and the hydrogen auxiliary system. Through spectrum analysis it is identified that the air auxiliary system, the hydrogen auxiliary system and the cooling water pump are the main vibration and noise sources of the fuel cell vehicle. Some effective improvement programs, especially for the fan and the cabinet of hydrogen auxiliary system, and some feasible scheme to reduce noise and vibration of the vehicle are proposed. So it is useful to reduce noise and vibration for fuel cell vehicle by determining the noise and vibration sources, which are identified with the modern signal analysis technology.

**Key words:** fuel cell vehicle; air auxiliary system; hydrogen auxiliary system; vibration and noise

## 1 引 言

现代工业、交通运输和航空事业的迅速发展促进了人类物质生活水平的提高, 与此同时, 也带来了噪声问题。众所周知, 噪声污染和空气污染、水污染一样, 被称为当今的三大污染。我国的环境噪声主要来源于交通方面, 而车辆产生的噪声占交通噪声的 75% 左右。随着人们对汽车乘坐舒适性要求的提高、环保意识的加强以及汽车工业的发展, 汽车的噪

声控制日益受到人们的重视。目前, 对汽油车、柴油车的车内噪声问题已经采取了行之有效的控制措施, 而混合动力汽车、电动汽车和燃料电池汽车等新能源汽车的噪声源识别与控制问题将成为科研人员面临的新课题。

对于燃料电池车, 与传统内燃发动机汽车相比, 燃料电池轿车噪声问题, 尤其是车外噪声有了很大的改善, 但驱动电机和燃料电池系统产生的振动噪声也不容忽视。目前国内鲜有燃料电池车的振动噪声特性的研究报道。2002 年 Florida 大学 Matheny 等<sup>[1]</sup>针对某型燃料电池车进行了怠速工况噪声试验研究, 识别出主要噪声源, 并指出使用质子交换膜燃料电池 (PEMFC)、风机等部件的汽车在很大程度上会影响车内噪声, 但其并没有研究各噪声源的频率分布、噪声源的传递路径以及改进措施。本文以新

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-02-25

基金项目: 国家 863 计划电动汽车重大专项 (2005AA501000) 和上海市曙光计划项目 (05SG22) 及汉高公司资助。

作者简介: 申秀敏 (1982-), 女, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事汽车振动与噪声控制方面研究。

通讯作者: 申秀敏; E-mail: sxm2004\_2000@163.com

型燃料电池样车为研究对象,通过独立运行法对其在消声室内的振动噪声试验及分析,得到了其在空气辅助系统和氢气辅助系统分别独立运行时车内、外噪声的主要频率成分并分析了其主要振动噪声源,并提出了相应的减振降噪方案。

## 2 燃料电池轿车的噪声源分析

以燃料电池作为动力源的车辆被称为燃料电池车<sup>[2]</sup>。由于动力源的改变,燃料电池车的结构布置形式与传统汽车有很大的不同,新型燃料电池车结构如图 1 所示,其中驱动电机总成、动力转向泵、空调压缩机、燃料电池冷却水泵、风机布置在前舱,氢泵布置在后舱,其振动噪声源也发生了根本的改变。燃料电池车的燃料供给系统中的空气压缩机(简称为风机),氢气供给泵(简称为氢泵)等为其提供燃料的装置却会产生振动噪声,另外空气滤清器在大进气量时,会产生啸叫声。此外,驱动电机——变速箱总成、冷却水泵、空调压缩机和动力转向泵等作为运动件也将对车内噪声产生影响。

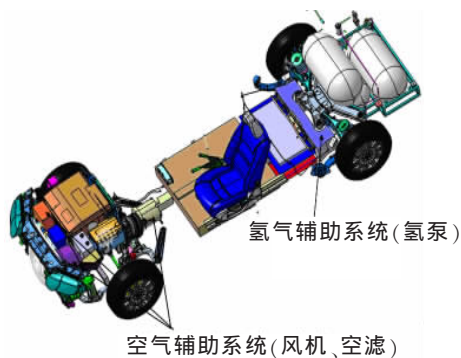


图 1 燃料电池车结构示意图  
Fig.1 Structure of fuel cell vehicle

## 3 振动噪声测试方法

采用分别运行法对燃料电池样车进行振动噪声测试。燃料电池车空气辅助系统、氢气辅助系统分别独立运行时,采集车内前排中间位置人耳高度处、车内后排中间位置人耳高度处、车前方及车左侧的声压以及车内后排左侧座椅底板处的振动加速度信号。车内、外参考测量点的布置如图 2 所示。

噪声和振动信号同步采集,试验采用的数采设备为 Head 公司的 SQLab (34 通道),加速度传感器为美国 PCB 公司生产的 icp 压电式加速传感器,麦克风为丹麦 B&K 公司生产。燃料电池样车声振试验工况如下:

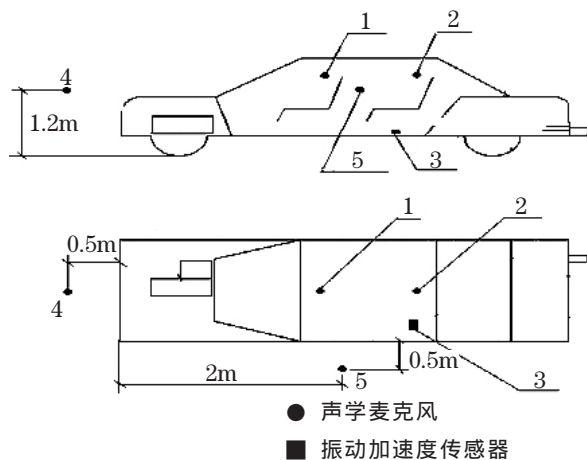


图 2 车内、车外参考测量点布置示意图  
Fig.2 Reference points arrangement in and out of the vehicle

### 3.1 空气辅助系统独立运行

(1) 由于风机转速范围为 1000rpm~3800rpm,我们设计稳态工况实验方案取 8 个测量点:

从 1000rpm~3800rpm 每隔 400rpm 测一次可以得到:1000rpm,1400rpm,1800rpm,2200rpm,2600rpm,3000rpm,3400rpm,3800rpm 共 8 个测量点。主要采集风机及空滤的近场噪声及振动加速度信号。

(2) 测取风机转速从 1000rpm~3800rpm 变化瞬态工况时的振动噪声特性。

### 3.2 氢气辅助系统独立运行

因氢气辅助系统主要声振部件工作转速恒定,故该工况为恒转速工况。主要采集车内、外参考点及氢辅系统箱体各个面的近场噪声及振动加速度信号。

## 4 振动噪声测试及结果分析

影响噪声测试精度的主要因素是背景噪声和其他干扰噪声<sup>[3]</sup>,因该试验着重分析新型燃料电池车的振动噪声源,而不考虑路面噪声和高速行驶工况产生的风噪,因此试验在同济大学汽车工程中心半消声室内进行,以保证试验结果的准确性。

在实测的信号中,可以直接获取一些信息,但这往往是有限的,因此有必要对测得的信号进行一定的加工处理,达到去伪存真和提取更多有用信息的目的<sup>[4,5]</sup>。本文采用现代工程信号处理技术中的频谱分析、传递函数分析等手段,深入地了解燃料电池车的振动噪声特性及燃料电池辅助系统振动特性。测试结果如下:

### 4.1 空气辅助系统独立运行时

首先通过公式(1)明确风机转速与转频之间的

关系。

$$(\omega/60) \times n = f \quad (1)$$

$\omega$ —风机转速, r/min;  $n$ —风机叶片数;  $f$ —风机转频, Hz

#### 4.1.1 风机稳态工况下的测试结果

图 3~6 是稳态工况下车内、外参考测量点的噪声频谱图,图 7 为车内、外参考点在各转速下的峰值噪声。可以明显看出他们具有相同的规律:均有一个频率从 980Hz 到 2600Hz 变化的噪声的峰值(风机转速是从 1400rpm 到 3800rpm 变化,最终到达 3800rpm 的稳定的工况),且噪声峰值随风机转速的增加而增加。由公式(1)计算可得到  $n=42$ ,即该峰值是风机转速的 42 倍。另外车外前方噪声峰值明显高于车外左侧噪声,这与风机前部结构声辐射有关,并且有明确的指向性,指向车前方。

通过车内、外参考测量点的噪声频谱图还可以发现,在 500Hz 以下的低频段均有一些不随风机转

速变化峰值,说明是由一个固定频率的振源或噪声源产生的。由试验工况推断,有可能是冷却水泵电机振动通过车架传到车身引起车内板件振动产生低频辐射噪声,因为试验工况下冷却水泵电机转速是恒定不变的。

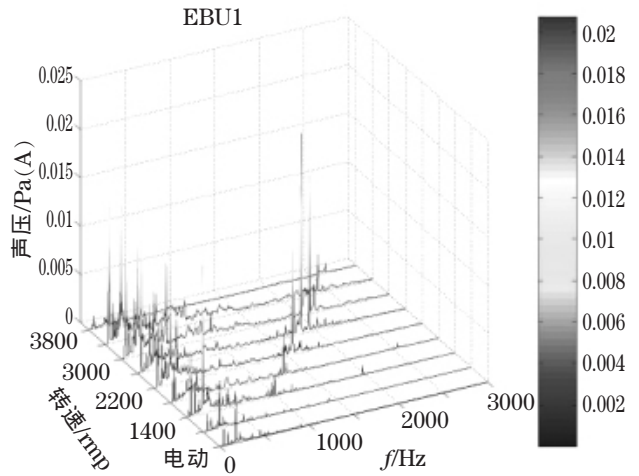


图 5 驾驶员右耳侧噪声  
Fig.5 Noise of the driver right ear

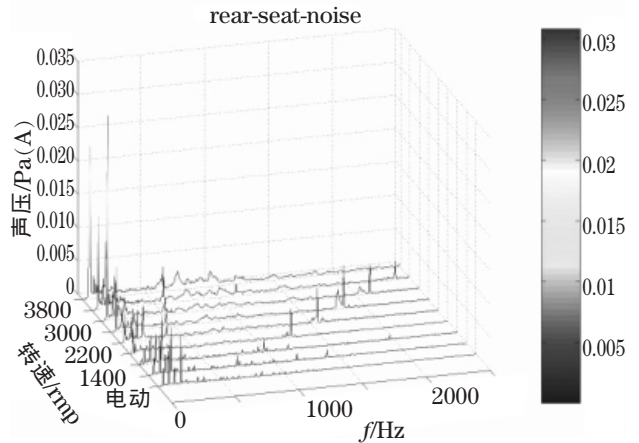


图 6 后排乘客右耳侧噪声  
Fig.6 Noise of the passengers right ear

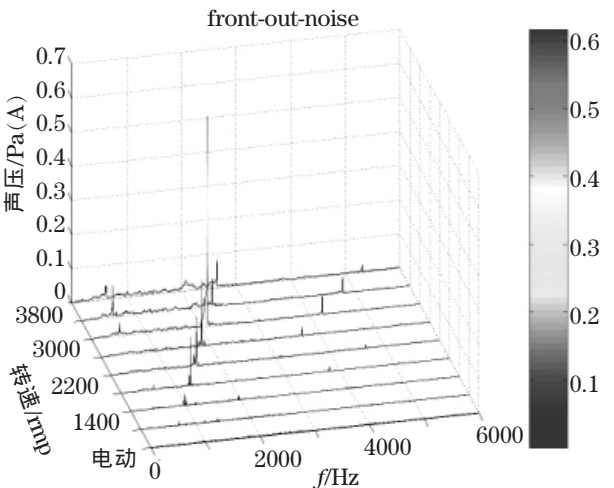


图 3 车外前方测点噪声  
Fig.3 Noise in front of the vehicle

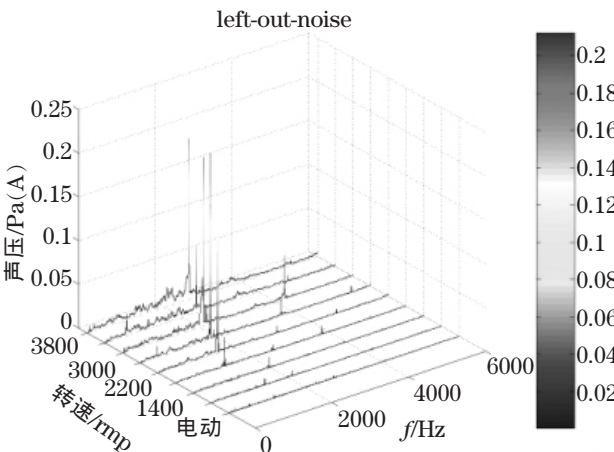


图 4 车外左侧测点噪声  
Fig.4 Noise in left side of the vehicle

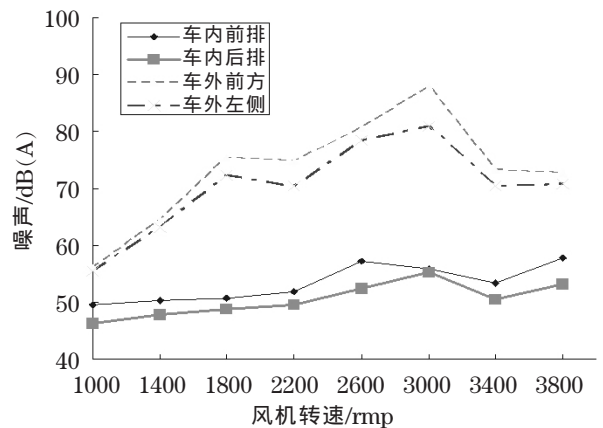


图 7 车内、外参考点噪声  
Fig.7 Noise of reference points in and out of the vehicle

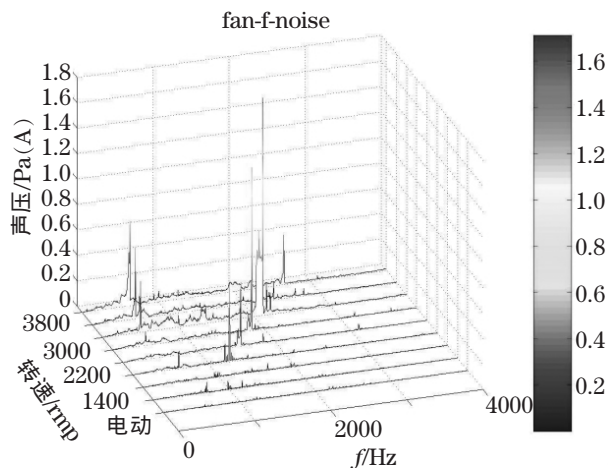


图 8 风机近场噪声  
Fig.8 Noise near the fan

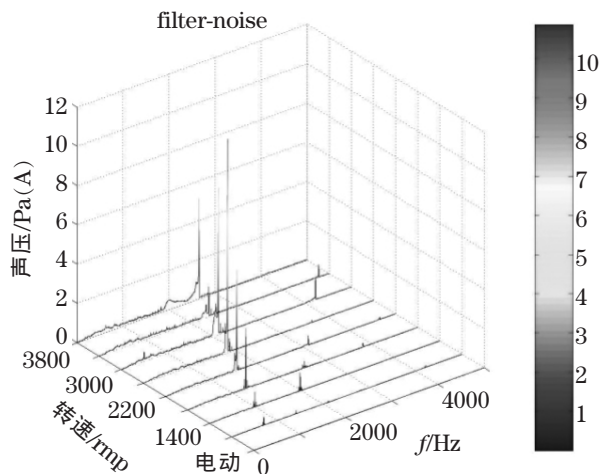


图 9 空滤近场噪声  
Fig.9 Noise near the filter

风机及空滤进场噪声频谱图如图 8、9 所示。风机近场噪声在低频段已明显削减，但 42 倍频的峰值依然可见，频率主要集中在 980Hz~2600Hz 之间（即风机转 1400rpm~3800rpm 之间）。根据文献[6]对风机噪声的研究表明，风机噪声主要为空气动力学噪声，包括旋转噪声和涡流噪声。旋转噪声与风机转速、叶片几何形状和尺寸有关，其噪声呈窄频带、低中频特性，有明显的峰值，具有确定的频率；而涡流噪声大小取决于风机叶轮的形状、直径以及气流的速度等因素，其噪声呈连续宽频特性，为中、高频噪声。

空滤近场的噪声频谱图其噪声的峰值也主要是集中在 980Hz~2600Hz 的中、高频也即风机转速的 42 倍频处，且其峰值明显高于风机进场噪声。因此车内、外 42 倍频噪声主要是由风机所产生的空气动力性噪声经排气管、空滤最后经过空气传播出来的。

风机的垂向振动加速度频谱图如图 10 所示。风机振动主要以垂向为主，这主要与风机的安装方

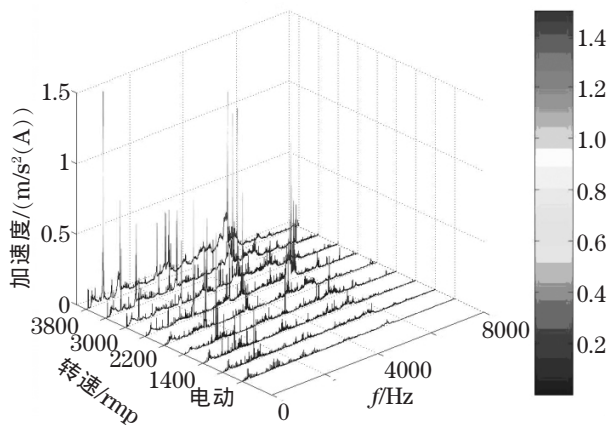


图 10 风机垂向振动加速度频谱图  
Fig.10 Vertical vibration acceleration spectrum of the fan

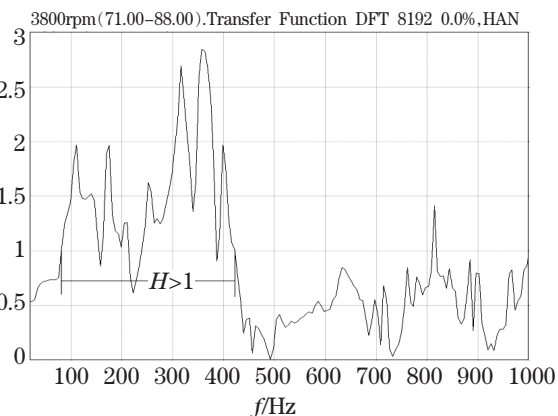


图 11 风机至车身传递函数  
Fig.11 Transfer function from the fan to the body

式及其悬置有关。由于风机四个悬置比较紧凑，因此将其看作一个整体测量悬置上下的振动加速度并计算其悬置的传递函数，如图 11 所示。

通过风机悬置的传递函数图可以发现，在 500Hz 以下的低频段传递函数大于 1，在 700Hz~2000Hz 频段内传递函数也接近于 1。说明风机悬置并没有起到很好的隔振效果，这也是导致车内振动噪声在 500Hz 以下低频段以及风机转速 42 倍频处较大的一个主要原因。

#### 4.1.2 风机转速从 1000rpm~3800rpm 变化瞬态工况下的测试结果

图 12~15 是瞬态工况下车内、外参考测量点的噪声频谱图。可以发现均在 30Hz~60Hz 频段内有一固定的不随风机转速变化的峰值，根据试验时的工况，冷却水泵以恒定转速运转，此峰值与冷却水泵有关；同时车内、外噪声均在 1000Hz~2600Hz 也即风机转速的 42 倍频有很大的峰值，可以确定该峰值与风机发出的噪声有关，并且是通过空气传播出来的。

风机及空滤进场噪声频谱图如图 16、17 所示。风机噪声除了在风机转速的 42 倍频处有明显的峰

值外,在风机转速的10.5倍频处也有较大的峰值,产生如此结果可能有两个原因:(1)风机是呈一个圆盘形状的,在前方有一很大的面积,可能产生指向性很明确的噪声;(2)根据风机的安装位置及安装方式,风机很可能在自身振动的激励下,随着安装位置前后摆动,从而向前辐射噪声。

比较风机及空滤噪声频谱图发现均在风机转速的42倍频处出现了噪声峰值,且空滤噪声相对较大。此现象说明42倍频的噪声不是风机辐射的,而是与后部空滤等某些部件有关。

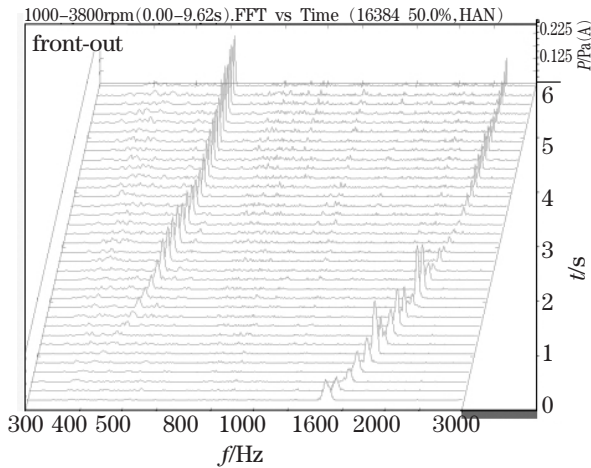


图 12 车外前方测点噪声

Fig.12 Noise in front of the vehicle

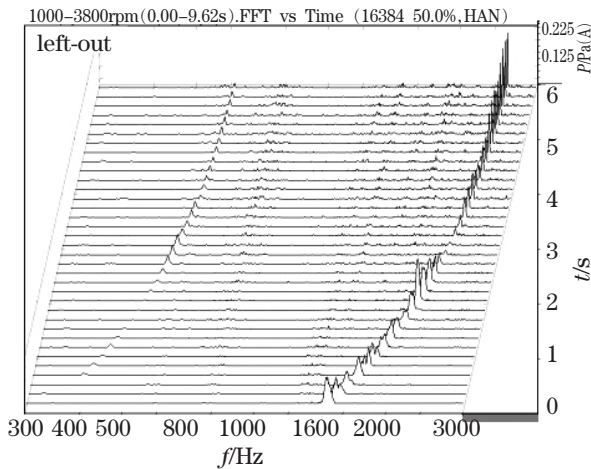


图 13 车外左侧测点噪声

Fig.13 Noise in left side of the vehicle

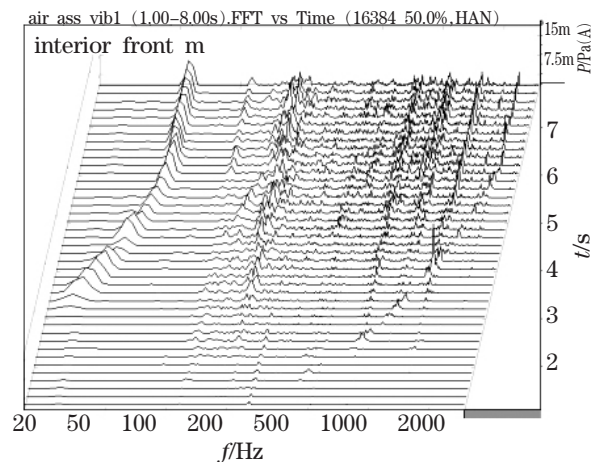


图 14 驾驶员右耳侧噪声

Fig.14 Noise of the driver's right ear

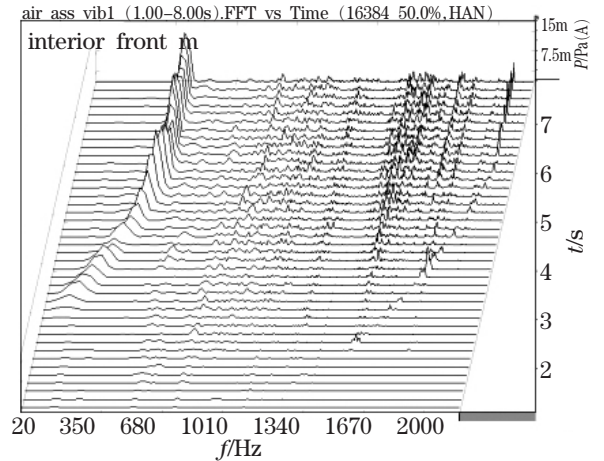


图 15 后排乘客右耳侧噪声

Fig.15 Noise of the passengers' right ear

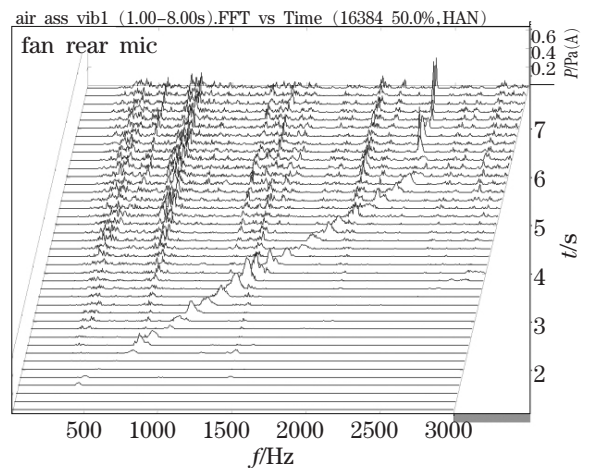


图 16 风机近场噪声

Fig.16 Noise near the fan

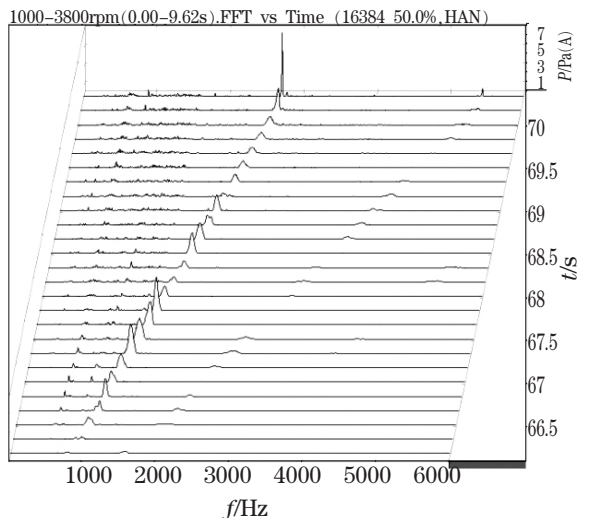


图 17 空滤近场噪声

Fig.17 Noise near the filter

### 4.2 氢气辅助系统单独工作

氢气辅助系统中的氢泵为隔膜泵,工作时转速恒定,故采集了其独立运行时车内前排座椅、后排座椅、车外左侧及车外前方噪声信号,其频谱图如图 18 所示,噪声的峰值及峰值频率如表 1 所示。

表 1 车内、外参考点噪声  
Table 1 Noise of reference points in and out of the vehicle

	车内前排	车内后排	车外前方	车外左侧
峰值频率/Hz	56	56	391.2	391.2
噪声/dB(A)	51.78	65.41	48.64	50.12

通过车内、外噪声频谱图及表 1 发现,氢辅系统独立运行时,车内、外噪声呈明显的倍频关系,车内噪声主要集中在 350Hz 以下的低频段,最高峰值出现在 56Hz(氢泵的工作频率),且车内后排座椅噪声明显高于前排座椅,车内噪声主要是由于氢泵工作时产生的振动经结构传递至后排座椅,引起车内板件振动,从而引起低频辐射噪声;而车外噪声主要集中在 300Hz~500Hz 频段,最高峰值出现在 391Hz(氢泵工作频率的 7 倍频),车外噪声主要是由氢泵工作时引起氢辅系统箱体共振产生的辐射噪声经空气传播引起的。

同时还采集了氢辅系统箱体各个面的振动加速度及近场噪声,其频谱图如图 19、20 所示。

氢辅系统各个面的振动加速度及进场噪声频谱图均成非常明显的倍频关系,且基频均为 56.4Hz。箱体的振动噪声主要集中在 300Hz~500Hz 频段(335 Hz、391Hz、447Hz)。其振动加速度及噪声频谱图的最高峰值出现在 6 倍频(336Hz)处,根据氢泵工作原理图推测很有可能 336Hz 是氢泵的工作频率(即活塞的工作频率),此工作频率与箱体的某一阶固有频

率相一致而引起箱体的共振并辐射噪声。

通过表 2 发现,氢辅系统箱体各个面的振动加速度及近场噪声的峰值均出现在箱体的前侧,其次是箱体的底部,可能与氢泵的安装结构以及箱体前侧大面积的平板结构共振引起的辐射噪声有关。

同时通过对所测结果分析计算氢辅系统箱体左前悬置的传递函数如图 21 所示。

在 500Hz 以下的频段内,传递函数接近于 1,在 500Hz~800Hz 频段内,悬置的传递函数大于 1,也就是说箱体的悬置并没有起到隔振的作用反而出现了放大的效果。

## 5 振动噪声控制

根据以上试验分析以及样车自身客观条件的限制,对燃料电池样车空气辅助系统中的加湿器的支撑方式和空滤的固定方式进行改进,并进行了试验验证

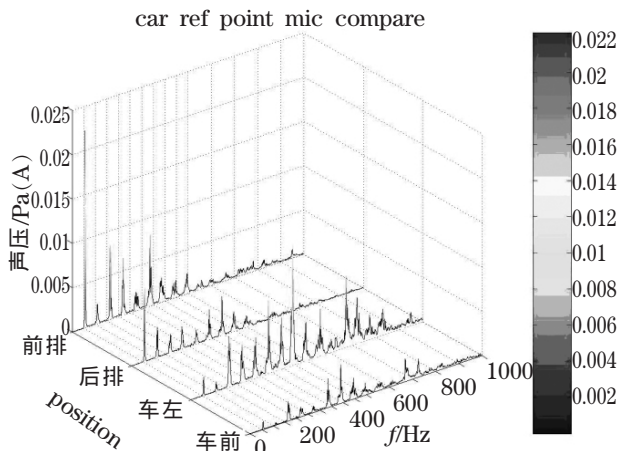


图 18 车内、外参考点噪声频谱图  
Fig.18 Noise spectrum of reference points in and out of the vehicle

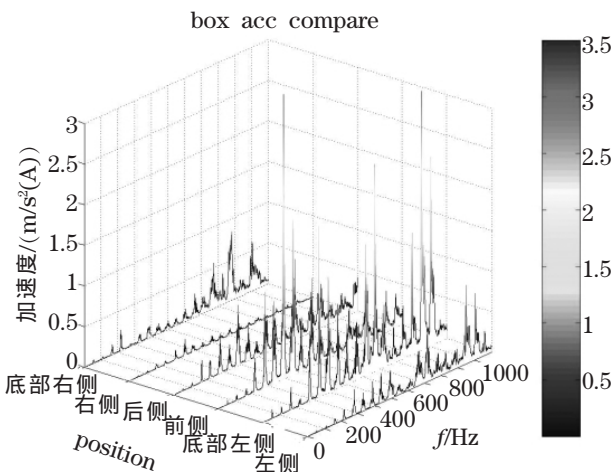


图 19 氢辅系统箱体各个面的振动加速度  
Fig.19 Vibration acceleration of the hydrogen auxiliary system

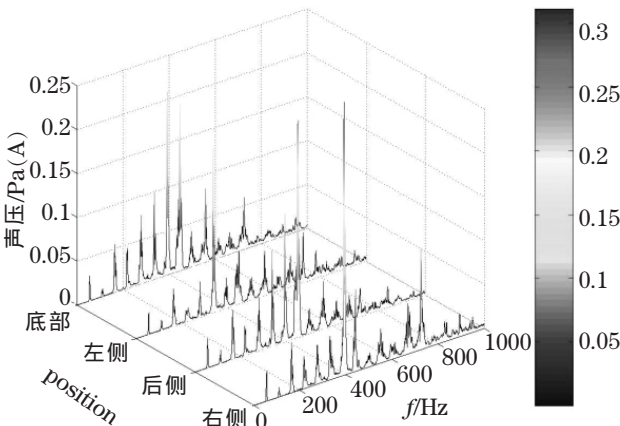


图 20 氢辅系统箱体各个面的近场噪声  
Fig.20 Noise of the hydrogen auxiliary system

表2 氢辅系统各个面的振动加速度及近场噪声

Table 2 Noise and vibration of hydrogen auxiliary system

	箱体 前侧	箱体 后侧	箱体 底部	箱体 左侧	箱体 右侧
加速度/(m/s <sup>2</sup> )	2.5	1.4	3.0	1.2	1.3
近场噪声/dB(A)	80.1	77.5	80.4	78.4	79.5

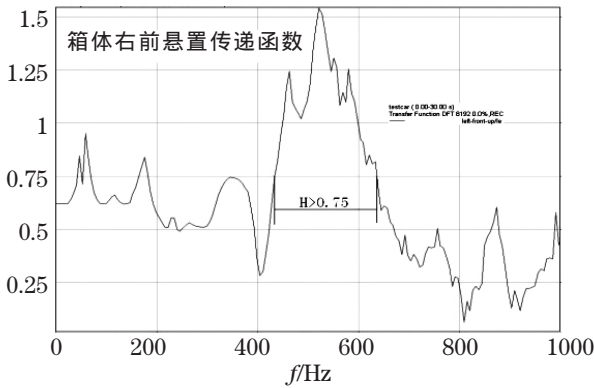


图21 氢泵至副车架传递函数

Fig.21 Transfer function from hydrogen pump to body frame

证：改进前空滤只是通过下方的两个悬置点固定的，为了增强其稳定性，将上部加装一个螺栓连接至燃料电池控制器的壳体上，同时在加湿器下方安装橡胶支撑。通过对改进后的燃料电池车进行振动噪声测试，将改进前后主要测点的噪声进行比较见表3，发现改进后燃料电池车主要测点的噪声有了明显的降低。

另外，对于车内、外的低频噪声，根据声学知识，低频噪声主要为结构传递噪声<sup>[7,8]</sup>，因此在以后的减振降噪工作重应考虑优化风机及氢泵的悬置，以减小风机及氢泵振动通过悬置向车身传递的振动量同时减少辐射噪声。而42倍频处车内、外噪声峰值主要原因是由于风机叶片转动引起气流脉动噪声经风机近排气口通过空滤向外传播的，因此降噪的重点也应该放在风机进气管的消声和隔声工作以及空气滤清器的改进设计上。

## 6 结论

通过对燃料电池样车振动噪声特性测试及分析得出氢气辅助系统(氢泵)、空气辅助系统(风机、空滤)及冷却水泵是车内、外振动噪声的主要来源。对燃料电池样车的减振降噪不仅仅只是振动的问题，是一个系统性的问题。既要控制振动噪声源，又要采取衰减振动与噪声的措施。振动噪声测试分析对燃料电池车以后的减振降噪工作有着重要的参考价值。

表3 空气辅助系统改进前后测点噪声值比较

Table 3 Noise comparison before and after improved

测试工况	测试位置	改进前 /dB(A)	改进后 /dB(A)
空气辅助	后排座椅中间	62.3	59.1
	前排驾驶员右耳	71.5	64.2
	驾驶员踏板处	79.5	66.9
系统独立 运行	空滤附近	93.1	87.6
	左侧助力泵	87.9	84
	风机前方	84.7	82.7
	右侧助力泵下方	81.8	80
	风机后下方	86.1	82.7
	加湿器前方	89.3	82

## 参 考 文 献

- [1] Matheny M S, Erickson P A, Niezrecki C, et al. Interior and Ex2 terior noise emitted by a fuel cell transmit Bus [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, **251**(5).
- [2] 阎礁, 左曙光, 陈有松, 等. 燃料电池轿车车后内噪声实验分析与控制[J]. 噪声与振动控制, 2006, **26**(4): 62-66.  
YAN jiao, ZUO Shuguang, CHEN Yousong, et al. Experimental analysis and control to the rear interior noise of the fuel cell vehicle [J]. Noise and Vibration Control in Chinese, 2006, **26**(4): 62-66.
- [3] 郭荣, 万钢, 左曙光, 等. 燃料电池轿车主要噪声源识别的试验研究[J]. 汽车工程, 2007, **29**(5): 377-380.  
GUO Rong, WAN Gang, ZUO Shuguang, et al. An experimental study on noise sources identification for fuel cell vehicle[J]. Automotive Engineering in Chinese, 2007, **29**(5): 377-380.
- [4] 左言言, 曾发林, 郭建新, 等. 轻型客车车内噪声的试验研究[J]. 汽车工程, 2000, **22**(3): 204-207.  
ZUO Yanyan, ZENG Falin, GUO Jianxin, et al. An experimental research on interior noise of light bus [J]. Automotive Engineering, 2000, **22**(3): 204-207. (in Chinese).
- [5] 吴文江. SQ6450 轻型汽车噪声源的诊断[J]. 噪声与振动控制, 2000, **20**(5): 47-48.  
WU Wen jiang. Noise source judgement of SQ6450 type light car[J]. Noise and Vibration Control in Chinese, 2000, **20**(5): 47-48.
- [6] 续魁昌. 风机噪声控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.  
XU Kuichang. Fan noise control [M]. Beijing: Machinery Industry Press. 1999.
- [7] 靳晓雄, 张立军. 汽车噪声的预测与控制[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.  
JIN Xiaoxiang, ZHANG Lijun. Prediction and control of vehicle noise[M]. Shanghai: Tongji University Press. 2004.
- [8] 庞剑, 谡刚, 何华. 汽车噪声与振动-理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 6.  
PANG Jian, CHEN Gang, HE Hua. Vehicle noise and vibrator-Theory and application [M]. Beijing: Institute of Technology Press. 2006. 6.