

文章编号: 2095-2163(2020)09-0127-05

中图分类号: TB52

文献标志码: A

基于 LabVIEW 的车辆通过噪声测试系统设计

潘 硕¹, 胡定玉¹, 杨 超², 廖晓瑶²

(1 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要: 车辆通过噪声是城市噪声污染的主要源头之一, 分析其声场特性是防治噪声污染的重要前提。本文设计了一套基于 LabVIEW 的车辆通过及可视化分析噪声测试系统, 主要模块包括: 噪声测试系统模块、车辆通过噪声去除多普勒效应预处理模块、波束形成算法为主的噪声源定位模块、车辆局部噪声测试及可视化模块等, 可实现多通道噪声信号的采集与处理, 噪声云图实时监控, 车辆通过噪声测试分析等多种功能。系统已在实车噪声源定位上取得了良好的效果, 可为车辆噪声的测试及控制提供技术支持。

关键词: 车辆通过噪声; 噪声测试系统; 波束形成; 噪声源定位

Design of pass-by noise measurement system based on LabVIEW platform

PAN Shuo, HU Dingyu, YANG Chao, LIAO Xiaoyao

(1 School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of engineering and Technology, Shanghai 201620, China;

2 Shanghai University of Engineering Science, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 Vehicle pass-by noise is one of the main sources of urban noise pollution, so analyzing its sound field information is an important prerequisite for preventing and controlling noise pollution. This paper designs a vehicle pass-by noise measurement and visual analysis system based on LabVIEW. The main modules include noise measurement system module, vehicle pass-by noise removal Doppler effect preprocessing, noise source positioning module based on beamforming algorithm, vehicle localization noise measurement and visualization modules, etc., It can realize the collection and processing of multi-channel noise signals, real-time monitoring of noise cloud images, vehicle pass-by noise measurement analysis and other functions. The system has achieved good results in the localization of noise sources of real vehicles, and can provide technical support for the measurement and control of vehicle noise.

【Key words】 vehicle pass-by noise; noise measurement system; beamforming; sound source location

0 引 言

车辆通过噪声是城市噪声污染中的主要来源。当前,关于车辆噪声测试的技术标准主要有中国的 GB1495—2002 规范的汽车加速行驶车外噪声限值及测量方法^[1]和欧洲的 ISO362-1:2007 测试标准等。其中关于通过噪声的测试方案,采用在车辆单侧或两侧传声器线阵列测得的平均声压级确定,此类方法不能反映车辆通过噪声的空间分布情况。因此,有必要利用先进的测试及分析方法,将车辆通过噪声进行可视化展示,从而明确车辆通过时的噪声分布。另外,为了分析车辆各零部件的噪声贡献,有必要从车辆通过噪声中区分出各部分的局部噪声,如轮胎、挡风玻璃、发动机的噪声等。随着动力系统降噪水平的提高,道路正常行驶时的动力系统噪声所占比例开始下降,轮胎噪声所占权重开始增加^[2]。针对通过噪声中的局部噪声,如轮胎噪声进

行特性分析,是车辆通过噪声测量中下一步需要考虑的问题。

近年来,基于传声器阵列的声学测量技术被用于通过噪声测试。该技术利用传声器阵列获取噪声信号,并利用声成像技术进行声场可视化^[3]。在运动声源定位领域,波束形成方法是主流方法之一^[4]。孟凡宇利用波束形成方法对快速行驶的汽车进行声源定位,结果表明波束形成方法可以较为准确地识别出汽车扬声器的位置^[5];同济大学杨洋基于互谱成像函数波束形成方法,实现了发动机噪声源的定位及强度识别^[6]。近几年,众多国内外企业利用波束形成技术,开发出多种用于声源定位的噪声测量系统。德国 GFal 朗德公司开发的声学摄像机系统,实现了对汽车、飞机等运动声源的识别。随着噪声测试要求的提高和社会需求的增加,车辆噪声源定位及可视化分析系统的应用前景非常广

基金项目: 国家自然科学基金(51605274)。

作者简介: 潘 硕(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:车辆通过噪声测试及系统开发。

通讯作者: 胡定玉 Email:dyhu1987@163.com

收稿日期: 2020-06-04

阔。

基于工程需求,实现车辆通过噪声的测试与分析,亟需设计一套车辆通过噪声测试分析系统。本文基于 LabVIEW 开发平台,结合传声器阵列和数据采集仪卡等硬件设备,设计了一套车辆通过噪声测试与分析系统,旨在实现车辆通过噪声的可视化分析,满足实际测试的需求。该系统已在实车测试中取得良好效果,可为车辆设计和检修提供有效的测试数据支持。

1 车辆通过噪声信号处理

1.1 去除多普勒效应原理

在通过噪声声源识别过程中,由于测量设备与声源存在相对运动,测量设备记录的运动声源信号会因为多普勒效应而产生信号失真。假设声源以匀速直线运动状态通过传声器阵列前方,几何位置如下图所示 1 所示。

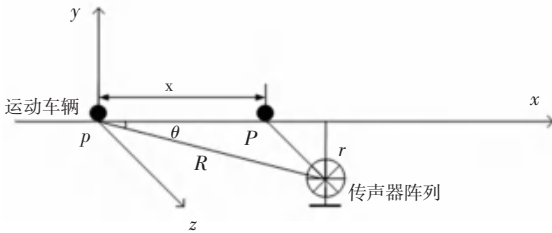


图1 运动车辆通过噪声测量

Fig. 1 Pass-by noise measurement of moving vehicles

根据运动声源理论,在图 1 所示的测量过程中,运动车辆以匀速 v 从传声器阵列前方直线通过,传声器阵列上第 n 个传声器记录了其辐射的声压 $p(t)$ 。当车辆运行速度的马赫数 $M = v/c < 0.2$ 时,可将传声器上记录的声压信号 $p(t)$ 表示为式(1):

$$p(t) = \frac{1}{4\pi R(\tau)} \frac{q'(t - R(\tau)/c)}{[1 - M\cos(\theta(\tau))]^2}. \quad (1)$$

式中, τ 为声源信号的发生时间; t 为传声器的接收时间; $\cos(\theta(\tau))$ 为相应的声辐射方向与声源运动方向的夹角余弦; $R(\tau)$ 的计算公式(2)为:

$$R(\tau) = \frac{M(x - vt) + \sqrt{(x - vt)^2 + (1 - M^2)r^2}}{1 - M^2}. \quad (2)$$

由式(1)可以看出, $p(t)$ 信号包含了对原信号的频移变换 $q'(t - R(\tau)/c)$ 和对幅值的变换 $\frac{1}{R(\tau)[1 - M\cos(\theta(\tau))]^2}$ 。因此,去除多普勒效应的影响即是对这两部分信息进行矫正^[7]。消除多普勒效应的矫正方法可以表示为公式(3):

$$q'(\tau) = p[(\tau + R(\tau)/c)R(\tau) [1 - M\cos(\theta(\tau))]^2]. \quad (3)$$

依据以上的原理,对现场测量的车辆通过噪声进行去除多普勒效应处理。

1.2 互谱成像波束形成原理

依据车辆通过噪声中的局部噪声分析、特征频谱分析和噪声云图实时显示等要求,本系统中的噪声源定位采用互谱成像波束形成方法。互谱成像波束形成方法最初由 Blacodon 和 Élias 提出,该方法为每个可能的噪声点源生成一个互谱矩阵,通过理论的和实际测量的互谱矩阵之间的最小二乘拟合确定源振幅,取得了很好的声源定位效果^[8-9]。

设实际测量信号的互谱矩阵 CSM (Cross-Spectral-Matrix) 为: $C_{mn} = PP^H$, P 为测量的声压值矩阵, m 代表传声器的标号,理想的测量信号互谱矩阵为: $C_{mn}^{mod} = gq(gq)^H = |q|^2 gg^H$, q 为重建面声源源强的矩阵, g 为重建面上重建点到各传声器的导向向量,关于第 n 个聚焦点,理想和实际之间的误差为式(4):

$$E = \sum |C_{mn} - C_{mn}^{mod}|^2. \quad (4)$$

将 C_{mn}^{mod} 和 C_{mn} 改写成单列向量的形式:

$$C_{mn}^{mod} = \rightarrow C_{m21}^{mod} \text{ 和 } C_{mn} = \rightarrow P_{m21},$$

其中, $C_{m21}^{mod} = |q|^2 \cdot [gg^H]_{m21}$, 设 $G_{m21} = [gg^H]_{m21}$, 原式等于式(5):

$$E = |P_{m21} - q \cdot G_{m21}|^2 = P_{m21}^H P_{m21} - q(G_{m21}^H P_{m21} + P_{m21}^H G_{m21}) + q^2 G_{m21}^H G_{m21}. \quad (5)$$

显然,使目标函数最小的 q 和聚焦位置点 n 反应了真实源强的强度和位置。因此,首先关于 E 的最小化式可得式(6)和式(7):

$$P_{m21} \cong q \cdot G_{m21}. \quad (6)$$

$$q = \frac{G_{m21}^H P_{m21}}{G_{m21}^H G_{m21}}. \quad (7)$$

将式(7)代入 E , 即式(8):

$$E = P_{m21}^H P_{m21} - \frac{(G_{m21}^H P_{m21})^2}{G_{m21}^H G_{m21}}. \quad (8)$$

由式(8)看出, $P_{m21}^H P_{m21}$ 是传声器测量数据决定的固定值, E 的最小化即为 $\frac{(G_{m21}^H P_{m21})^2}{G_{m21}^H G_{m21}}$ 的最大化问题。

设 $I^2 = \frac{(G_{m21}^H P_{m21})^2}{G_{m21}^H G_{m21}}$, 根据通道数归一化,通过式(9)对各重建点进行互谱波束形成运算,即可得到重建面声压强度云图,实现结果数据的可视化。

$$I^2 = \frac{1}{M^2} \frac{(G_{m_{21}}^H P_{m_{21}})^2}{G_{m_{21}}^H G_{m_{21}}} \quad (9)$$

2 系统开发

2.1 系统组成

本系统主要由前端采集装置、后端处理系统和系统处理软件三部分组成。其中,前端采集装置和后端处理系统组成的现场测试装置如图 2 所示。前端采集装置布置在测试现场,负责采集信号,其主要硬件包括传声器阵列和阵列内嵌的高速摄像机。按测试需求选配合适的传声器阵列,不合适的传声器阵列将严重影响后续的测试分析任务。后端处理系统包括 NI-9234 数据采集板卡、NI-PXI 机箱、管理平台等,是以 pc 机的形式为主体的计算处理硬件,数据采集板卡直接嵌在 PXI 机箱中,以 PXI-e 接口

连接到主机的主板上,使得 CPU 可以高速访问缓存数据。软件部分是以 LabVIEW 为平台开发的车辆通过噪声采集系统。软件通过 DAQmx 调用数据采集硬件,将噪声数据代入到噪声处理模块中,利用波束形成等算法进行声像合成。数据处理结果由管理平台管理,可保存或实时输出,方便现场测试或异地分析。

软件系统的架构组成如图 3 所示。软件系统底层采用模块化设计理念,各部分组件之间相对独立,利于系统的分步分工开发。底层组件紧跟实际测试实验中的需求,设置了传声器设置、信号处理方法等模块,在使用时可以根据用户需求自由调用。经过大量的验证和测试,底层处理模块的稳定性和有效性得到提升。

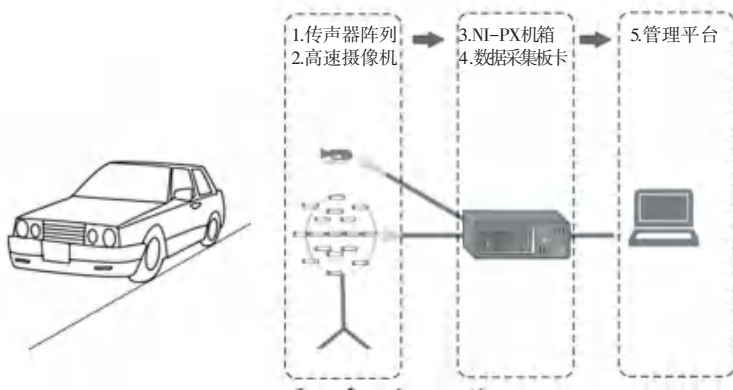


图 2 系统主要硬件

Fig. 2 Main hardware of the system



图 3 系统架构图

Fig. 3 System architecture diagram

2.2 功能模块

本系统为实现车辆通过噪声测试分析的基本功能,共设有六大功能模块,并采取基本功能层与应用功能层分离的措施,基本功能层为数据采集功能层,

具有数据采集器的通用功能,可以进行普通的数据采集工作;应用功能层为车辆通过噪声测试分析层,针对车辆通过噪声开发的特定分析功能模块。后续考虑拓展新的功能模块,以便服务车辆通过噪声测试

的其他需求。各功能模块的详细内容见表 1。

表 1 主要功能模块
Tab. 1 Main functional modules

功能模块:	详细内容:
实时数据采集	通过连接 NI 数据采集卡等硬件设备,进行信号的实时采集,可根据需要信号类型选择相应类型的传感器。
噪声数据处理	对采集到的信号数据进行处理,包括:波形调理,波形测量,信号运算,信号加窗,滤波器,谱分析,信号变换等等
实时噪声云图显示	结合波束形成算法,重建指定重建面上的噪声强度云图,实现噪声云图的实时显示。
噪声频谱特性分析	对各通道噪声信号进行谱分析,包括:自功率谱,单边互功率谱,STFT 时频图,WVD 时频图,Buneman 频率估计等等。
车辆通过噪声回顾	从已完成的噪声测试任务中,利用数据处理后的结果,重现测试任务时的车辆通过时的场景,以声像结合的方式,直观的回顾车辆时通过噪声特性和分布状态。
车辆噪声源分布分析	对重建面的噪声声源强度分布分析,结合车辆的物理构造和车辆各部件的声源频谱特性,分析某局部噪声的声源分布,并用来初步诊断影响车辆通过噪声的主要声源。

2.3 系统实现

该系统以 QMH(Queued Message Handler)架构为基础进行开发,采用图像化编程语言,以数据流的思想构建程序框架。开发环境基于 LabVIEW 2018,并插入 sound&vibration 模块、视觉与运动模块等处理模块,方便快速有效地进行程序开发。LabVIEW 自身并行化的运算方式提高了程序运算的速度。测试数据存储采样 TDMS 格式的数据文件存储格式。采样调用 DLL 动态

链接库的方式运行噪声测试分析算法。

队列消息处理架构(QMH)的框架设计如图 4 所示。该架构有助于多段代码并行运行,并在它们之间发送数据。代码的每一部分表示一个任务,例如获取数据,其设计类似于状态机。这种设计可以将每个任务划分为多个状态。除了事件处理循环(EHL)和消息处理循环(MHL),还需要第三个并行进程来处理用户操作。

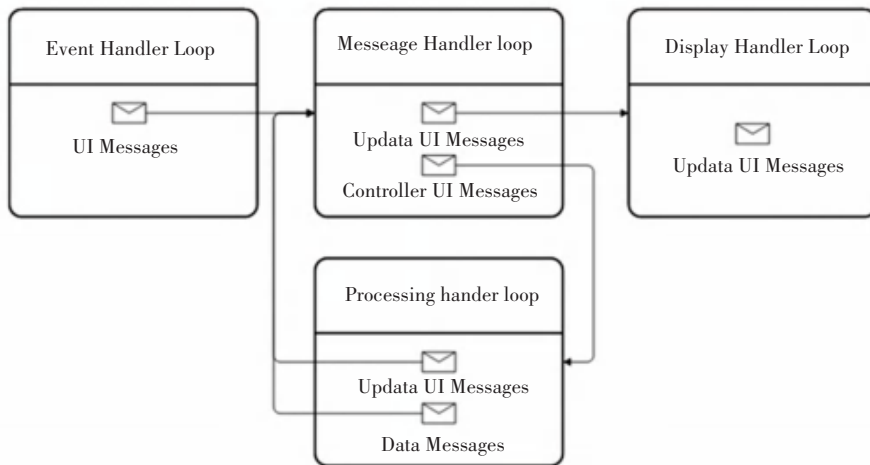


图 4 QMH 架构框架图

Fig. 4 QMH framework diagram

3 测试实验

在一次实际测试中,选取汽车作为测试对象,在户外进行测试实验。实验参数见表 2。

利用本文所述的噪声测试软件,对此次实验数据进行分析。首先对数据做去除多普勒效应处理,

处理结果如图 5 所示。可以看到噪声数据经过处理后,有效去除了多普勒效应导致的信号畸变。从噪声的频域图上可以看出,车辆噪声低频部分的幅值特别大,对于车辆胎噪声源定位有很大的影响,需要进一步的低频滤波处理。

表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters

测试对象	汽车	车速	9.8 m/s
测试场地	校内公路	记录数据时长	2.012 7 s
环境噪声	55.6 dB	记录时刻点距离	7.8 m
测试设备	NI PXIe-8840, NI PXIe-4499,等	终止时刻点距离	11.9 m
		采样率	20.48 KS/s
		行驶直线与阵列距离	2 m
传声器阵列阵型	32 阵元星型阵列	阵列孔径	1.5 m

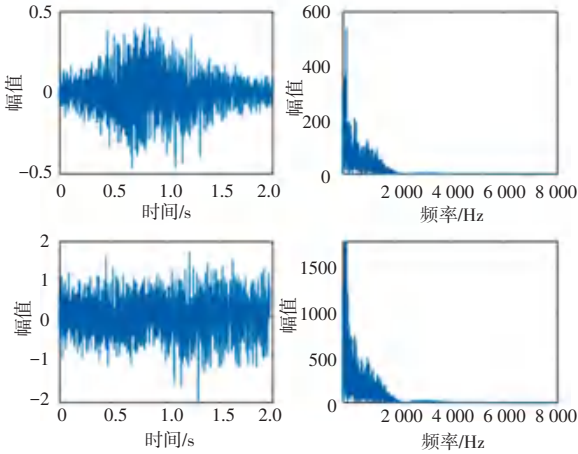


图 5 实验数据去除多普勒效应

Fig. 5 Experimental data to remove the Doppler effect

此次测试实验处理的最终结果如图 6 所示。从测试结果可以看出,车辆的前轮刚刚进入视野时,其的噪声明显突出,是此时最主要的声源。通过对该点处的声信号聚焦分析,即可以获悉车胎噪声的频率特性和声学特征。



图 6 测试实验分析

Fig. 6 Measurement experiment analysis

4 结束语

本文设计的基于 LabVIEW 的车辆通过噪声系

统,实现了噪声测试的基本功能,解决了车辆通过测试中的声源定位分析的问题,并在车辆通过噪声局部噪声定位分析方面取得良好的效果,为噪声测试、车辆噪声控制等领域提供有利的技术支持。

随着车辆动力系统降噪水平的提高,道路正常行驶时的动力系统噪声所占比例开始下降,轮胎噪声所占权重开始增加。针对通过噪声中的局部噪声,如轮胎噪声特性分析,是车辆通过噪声测量中下一步需要考虑的地方。因此,本噪声测试软件尚需拓展在声学特征方面的分析功能,以期在噪声源分析诊断中发挥更大的作用。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准 GB1495-2002 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[2] 施长宏,王辉,白洪堂,等.《通过噪声》室外与室内测量方法的研究[J]. 汽车实用技术, 2018, 44(7):50-53.

[3] CHIARIOTTI P, MARTARELLI M, CASTELLINI P. Acoustic beamforming for noise source localization-Reviews, methodology and applications [J]. Mechanical systems and signal processing, 2019, 120(APR.1):422-448.

[4] ULF M. History of acoustic beamforming [C]//1st Berlin Beamforming Conference, 21-22 Nov. 2006.

[5] MENG F, LI Y, MASIERO B, et al. Signal reconstruction of fast moving sound sources using compressive beamforming [J]. Applied Acoustics, 2019, 150(JUL.):236-245.

[6] 杨洋,倪计民,褚志刚. 基于互谱成像函数波束形成的发动机噪声源识别[J]. 内燃机工程, 2012(3):88-93.

[7] 罗禹贡. 基于近场声全息理论的运动声源动态识别方法[J]. 声学学报, 2004(3):36-40.

[8] BLACODON D, ELIAS G. Level Estimation of Extended Acoustic Sources Using an Array of Microphones[C]// Aiaa/ceas Aeroacoustics Conference. 2003.

[9] BLACODON D, ELIAS G. Level Estimation of Extended Acoustic Sources Using a Parametric Method [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(6):1360-1369.