

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.06.005

# 音乐公路模拟试验与计算机仿真

陈葱琳, 付豪, 尹豪

(重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘要:** 通过音乐公路介绍, 进行了音乐公路模拟设备开发与试验研究, 包括模拟试验设备的设计思路、技术路线、实现与模拟测试和数据采集。利用 SpectraLAB 软件对采集音频进行分析, 综合运用噪声过滤、乐理、计算机信息处理以及数理统计分析等知识, 建立了音频与凹槽尺寸、音符与音频相关变量之间的关系模型, 从而得到了相关数据和参数指标, 并进行了音乐公路设计及计算机仿真效果模拟。通过对音乐公路原理的核心技术进行研究和探索, 将为在国内推广修筑音乐公路提供科学依据和技术支撑。

**关键词:** 道路工程; 音乐公路; 模拟试验; 模型参数; 计算机仿真

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)06-0023-04

## Simulation Experiment and Computer Simulation of Musical Road

CHEN Cong-lin, FU Hao, YIN Hao

(School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Transportation University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Through introduction of musical road, we developed and tested the musical road simulation equipment, including design proposal, technology of simulation equipment, realization, simulation test, and data collection. By utilizing SpectraLAB, we analyzed the collected audio frequencies. Combining the knowledge of several subjects such as noise filtration, basic music theory, technology of information processing and statistical analysis, we established the relational model of audio frequency with size of groove, musical notes and audio frequency variables to obtain the relevant data and parameters. Then, we conducted musical road design and computer simulation. It will provide a scientific basis and technical support for popularizing musical road in China through research and exploration of the core technology of musical road.

**Key words:** road engineering; musical road; simulation experiment; molding index; computer simulation

## 0 引言

在我国道路交通事故的成因统计中, 有相当大的比例都与驾驶员注意力不集中有关<sup>[1-2]</sup>。大量的研究表明, 路肩隆声带可降低约 20% 偏离道路的单方事故<sup>[3-7]</sup>, 有效提高道路交通安全状况。与隆声带的原理类似, 国外某些研究人员又探索出将一系列间隔不等的凹槽刻在路面之上——“音乐公路”便由此诞生了, 如美国、日本等修筑了试验性音乐公路, 取得了一定的社会效益。

相比较隆声带而言, 音乐公路显然更加人性化。

它是一种综合乐理、车辆行驶物理力学和公路工程建设等知识, 利用悦耳的声音来警示司乘人员主动限速、达到行车安全的一种公路形式。

随着我国第一条的音乐公路的修筑成功<sup>[8]</sup>, 音乐公路的影响日渐扩大, 但是我国不能一直依赖、受限于日本等发达国家的技术约束, 应该拥有属于自己修筑音乐公路的新技术及知识产权。

所以本文试图通过对音乐公路的修筑原理进行研究和探索, 为在国内推广修筑音乐公路提供科学依据和技术支撑。

收稿日期: 2013-02-21

作者简介: 陈葱琳(1990-), 女, 吉林长春人, 硕士研究生。(fuhaod1@gmail.com)

## 1 模拟设备开发与试验研究

### 1.1 设计思路

在模拟试验研究中,选用有代表性车型的车轮,在确定行驶速度范围内,模拟车辆在不同间距的凹槽组上行驶,则各种因素的影响可在噪声强度的变化中得以体现。通过对噪声强度变化数据的分析及计算机仿真模拟,建立不同间距的凹槽与噪声频率的关系<sup>[9-12]</sup>。

### 1.2 构造模拟试验设备的开发思路与实现

(1) 试验路面采用经草酸处理过后表面粗糙的玛雅米黄理石板材,用它来模拟实际车辆与路面的接触振动产生隆声。

(2) 试验采用的玛雅米黄板材,尺寸为1 000 mm×1 000 mm×18 mm,对其进行割槽处理,总共刻出120道相同宽度和深度的凹槽且呈扇形布置。

(3) 试验采用直径为200 mm、轮胎宽度约60 mm的小尺寸轮胎。

(4) 伸缩杆的长度控制范围280~440 mm。

### 1.3 传动设备构造设计与制造

仿真模型与实体装置如图1、2所示。

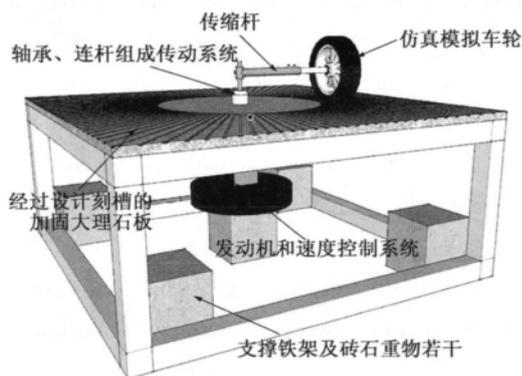


图1 构造的概念模型

Fig.1 Concept model of structure



图2 模拟试验中的装置系统

Fig.2 Equipment system for simulation experiment

### 1.4 试验结果与分析

(1) 由于板面凹槽是扇形布置,所以通过改变伸缩杆长度,即可改变凹槽之间间距,利用变速开关档位提供不同的角速度,经过反复实测得到多组数据。

(2) 试验过程中,利用录音设备对轮胎转动产生的隆声进行录制,并利用SpectraLAB软件对音频数据进行了分析。

SpectraLAB类似于频谱分析处理系统,是对被测信号进行频率及频谱分析的软件。它的基本工作原理是对所测量的音频信号进行快速傅里叶变换,把时域信号转变成频域信号,并得到相应的时域图和频域图等,利用其内部的计算原理,找出音频信号的Peak frequency和Peak amplitude。通过对频域图进行比较,选择我们所需要的基频频率。

由于人耳的听力受到声音相对幅度的影响以及物体振动发出的声音音调是由其峰值频率(又称为基频)决定的,并且人耳只能感受到声音的相对幅度较大的音频(较大的振幅波形产生较强的声音)。通过选取各段音频文件数据中相对幅度较高的频率作为最后的试验音频,这样既可以排除干扰的音频影响,又可以选取正常轮胎与凹槽振动产生的音频。

针对相同凹槽间距相同的行驶档位,进行了3组平行试验。以下取其中1组举例说明本论文的试验数据处理过程。

根据噪声相加减原理(声压不能直接相加),总声压级应为:

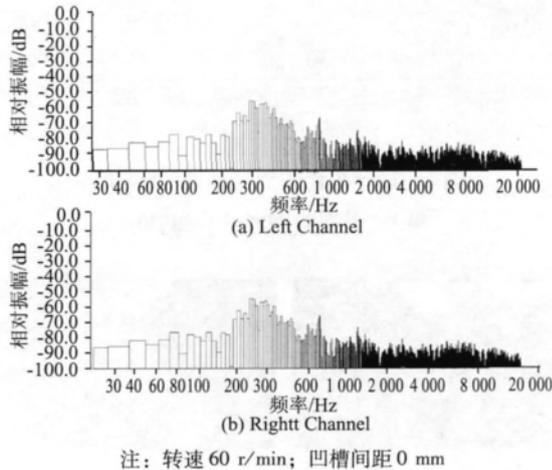
$$L_p = 10 \lg(10^{0.1 L_{p1}} + 10^{0.1 L_{p2}}),$$

式中 $L_p$ 为混合噪声级; $L_{p1}$ 为未配置小轮的噪声级; $L_{p2}$ 为小轮与地面发生的噪声级。

将图3、4的各个凹槽间距的混合噪声级与未配置小轮的噪声级相减,即 $L_p - L_{p1}$ ,再根据图4曲线求出相应的 $\Delta L_p$ ,即可得到小轮与地面发生的噪声级 $L_{p2} = L_p - \Delta L_p$ ,由此便可得到车轮与地面发声的噪声级图。

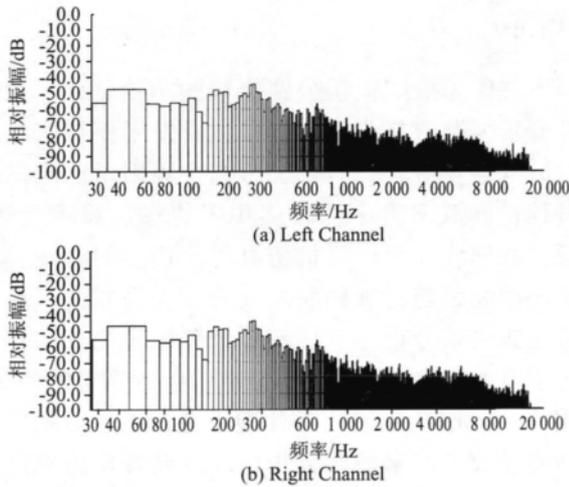
利用SpectraLAB提取声音文件中的数据,对得到数据进行拟合,根据基频性质,即可得试验音频。

经过对实测音频数据滤噪处理,利用回归分析,即可对实测数据进行处理,如表1所示,并建立不同凹槽间距下模拟车辆行驶的速度及音频关系模型。考虑模拟试验系统是按照一定比例设计的,由精确的音符频率对照表2中可以得出,低、中、高音之间为2倍关系,任何一个音符的出现都会表现出高、中、低音。表现出低音,则说明此音符的声压级较大。通过试验,对钢琴发出的7个音符进行了分析。



注: 转速 60 r/min; 凹槽间距 0 mm

图 3 未配置小轮的噪声级  $L_{p1}$  图



注: 转速 60 r/min; 凹槽间距 14 mm

图 4 混合噪声级  $L_p$  图

Fig. 4 Diagram of mixed noise level  $L_p$

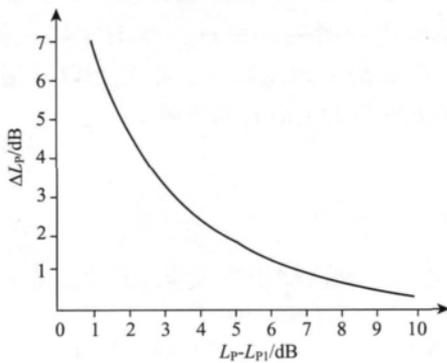


图 5  $\Delta L_p - (L_p - L_{p1})$

Fig. 5  $\Delta L_p - (L_p - L_{p1})$

以中音哆为例,发现利用 SpectraLAB 测得低音哆中对  
对应音频有 262、523、1 047 Hz 的有较大相对幅度,其中  
262 Hz 的相对幅度最大。可以得出对于任何一个音

符,高中低音音频均会出现,只是对于低(中或高)音  
音频,该音频的声压级较大。放大 4 倍后与精确音符  
频率对照表表现出对应关系。由此可以进行回归分  
析以期接近实际路面条件下车辆行驶的状态及获得  
的振动音频效果。

表 1 模拟试验槽间距、速度与音频实测数据汇总

Tab. 1 Data of groove spacing, speed and audio frequency  
obtained from simulation experiment

方案	半径/ mm	凹槽间距/ mm	速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	音频/ Hz	放大 4 倍 的音频/Hz
1	280	10(40)	6.73	87	348
			11.88	80	320
			17.27	108	432
2	300	11(44)	6.67	90	360
			13.13	90	360
			19.39	130	520
3	320	12(48)	7.62	68	272
			15.51	101	404
			21.71	143	572
4	355	14(56)	8.03	168	672
			16.06	168	672
			22.94	293	1172
5	400	16(64)	9.05	110	440
			18.1	171	684
6	436	18(72)	10.6	130	520
			19.4	233	932

注: 括号内的数据为按比例放大的实际间距; 音频是按倍率放  
大的。

表 2 精确的音符频率对照表

Tab. 2 Empirical formulas of groove spacing and vibration  
frequency

音符	对应频 率/Hz	音符	对应频 率/Hz	音符	对应频 率/Hz
1	261.63	1	523.25	1	1 046.5
1.5	277.18	1.5	554.37	1.5	1 108.73
2	293.66	2	587.33	2	1 174.66
2.5	311.13	2.5	622.25	2.2	1 244.51
3	329.63	3	659.26	3	1 318.51
低 4	349.23	中 4	698.46	高 4	1 396.91
音 4.5	369.99	音 4.5	739.99	音 4.5	1 479.98
5	391.99	5	783.99	5	1 567.98
5.5	415.31	5.5	830.61	5.5	1 661.22
6	440	6	880	6	1 760
6.5	466.16	6.5	932.33	6.5	1 864.66
7	493.88	7	987.77	7	1 975.53

对于不同凹槽间距的情况,通过对按比例放  
大后的数据进行分析,建立回归方程,得到凹槽间距



- WEI Jun, LI Pei, XU Yue, et al. Influencing Factor Analysis on Coordinated Working Performance of Hinge Joint in Hollow Slab [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (2): 29-33.
- [5] 俞博,叶见曙,张剑,等. 装配式混凝土铰接板桥铰缝剪力计算 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2011, 28 (1): 60-64.
- YU Bo, YE Jian-shu, ZHANG Jian, et al. Transverse Shear of Fabricated Concrete Articulated Plate Bridge [J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2011, 28 (1): 60-64.
- [6] 项贻强,邢骋,邵林海,等. 铰接预应力混凝土空心板梁桥的空间受力行为及加固分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42 (4): 734-738.
- XIANG Yi-qiang, XING Cheng, SHAO Lin-hai, et al. Spatial Behavior and Strengthening Analysis of Fabricated PC Hollow Slab Beam Bridge with Hinge Joints [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42 (4): 734-738.
- [7] ANNAMALAI G, BROWN R C. Shear Strength of Post-tensioned Grouted Keyed Connections [J]. PCI Journal, 1990, 35 (3): 64-73.
- [8] 范亮. 先后浇混凝土界面抗剪性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004.
- FAN Liang. Study on the Shear Behaviors of Pre-casting and Post-casting Concrete Interface [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004.
- [9] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土构件试验数据集 [M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1985.
- China Academy of Building Research. Test Data Material for Reinforced Concrete Members [M]. Beijing: China Academy of Building Research, 1985.
- [10] CAN/CSA-S6-00, Canadian Highway Bridge Design Code [S].
- [11] HUCKELBRIDGE A A Jr, EL-ESNAWI H, MOSES F. Shear Key Performance in Multi-beam Box Girder Bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9 (4): 271-285.
- [12] 周旺华. 现代混凝土叠合结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- ZHOU Wang-hua. Modern Composite Concrete Structure [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.
- [13] ACI 318-08. Building Code Requirements for Structural Concrete [S].

(上接第26页)

- CHEN Tao, PAN Xue-zheng, LIANG Ming-jin, et al. Experimental Study on Alert Effect of Shoulder Rumble Strips [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (8): 140-143.
- [3] GRIFFITH M S. Safety Evaluation of Rolled-in Continuous Shoulder Rumble Strips Installed on Freeways [J]. Transportation Research Record, 1999, 1665: 28-34.
- [4] ISACKSON C. Continuous Milled Shoulder Rumble Strips, Nationwide Survey [R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation, 2000.
- [5] HANLEY K E, GIBBY A R, FERRARA T C. Analysis of Accident-reduction factors on California state highways [J]. Transportation Research Record, 2000, 1717: 37-45.
- [6] HICKEY J J, HARRISBURG H. Shoulder Rumble Strip Effectiveness [C] // 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D. C. : Transportation Research Board, 1997.
- [7] CORKLE J, MICHAEL M, MONTEBELLO D. Synthesis on the Effectiveness of Rumble Strips, MN/RC-2002-07 [R]. Alexandria, VA: National Technical Information Service, 2002.
- [8] 赵文红. 首条音乐公路在河南长葛建成 [N]. 科技日报, 2013-02-23 (3).
- ZHAO Wen-hong. The First Melody Road have been built in Changege, Henan Province [N]. China Science and Technology Daily, 2013-02-23 (3).
- [9] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- DU Gong-huan, ZHU Zhe-min, GONG Xiu-fen. Basic of Acoustics [M]. Nanjing: Nanjing University of Technology Press, 2001.
- [10] 王新磊. 声-振安全带设计原理的分析与验证 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- WANG Xin-lei. Analysis and Verification of Sound and Vibration Safety Strips' Design Theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [11] 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 Xiao-xiong, ZHANG Li-jun. Automobile Noise Prediction and Control [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [12] 陈南,张建润,孙蓓蓓,等. 汽车振动与噪声控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- CHEN Nan, ZHANG Jian-run, SUN Bei-bei, et al. Automobile Vibration and Noise Control [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [13] Your Car as a Musical Instrument: Melody Roads [EB/OL]. [2013-03-02]. <http://2008/09/car-musical-instrument-melody-roads-Japan>.