文章编号：1009-6582(2020)03-0154-07　　DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.03.022

城市隧道纵向通风风机噪声分布特性实测及应用研究

田杨明[1]　张志刚[2]　邓　涛[3,4]　田　源[3,4]

（1珠海城建地产开发有限公司，珠海 519000；2中交公路规划设计院有限公司，北京 100088；3西南交通大学土木工程学院，成都 610031；4西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室，成都 610031）

摘　要　为合理预测城市隧道纵向通风情况下风机噪声的分布规律，进而为城市慢行隧道采用射流纵向式通风的可行性研究提供依据，文章选取了两座典型城市下穿隧道对隧道纵向通风时的噪声进行现场测试研究，分析单组及多组风机运行时隧道内噪声的分布规律，并总结给出城市慢行隧道的噪声控制标准。研究结果表明：隧道内无风机运行时噪声主要为中低频噪声，其最高噪声水平集中于1 000~2 000 Hz之间，而风机噪声频段分布主要集中于250~4 000 Hz，其最高噪声水平集中于500~2 000 Hz；开启单组射流风机时，风机噪声在隧道内基本呈现出线性衰减规律；开启多组射流风机时，两组风机之间的噪声水平基本为对称分布，沿纵向呈中间低两端高的分布规律，且噪声水平相对于单组射流风机运行时有所提高，平均噪声增量为4 dB(A)左右；城市慢行隧道噪声控制标准为距地面1.5 m高度处的噪声水平不宜大于65 dB(A)，建议城市慢行隧道不宜采用全射流纵向式通风方案。

关键词　城市隧道　噪声分布　现场实测　慢行隧道　纵向通风　噪声控制标准

中图分类号：U453.5；U453.8+2　　**文献标识码：A**

1　引　言

城市慢行隧道是一种满足绿色出行需求的仅供行人与非机动车通行的隧道类型，是顺应现代化城市发展的产物，在解决城市密集人口的出行问题以及推动城市旅游发展方面均具有良好的应用价值，故在我国城市建设发展过程中逐渐兴起[1]。但与此同时，当慢行隧道采用纵向式通风设计时，由于射流风机在运行时会产生极大的噪声，且距隧道内地面距离较小，行人会较长时间暴露在高噪声环境中，极易产生焦虑感甚至更严重的情绪，故隧道内风机运行所引起的噪声问题不容忽视[2,3]。

近年来，我国相关学者在公路隧道噪声方面取得了一些研究成果。张 锐等[4]通过对大量隧道的噪声进行现场实测和调查分析，研究了隧道内噪声的来源及隧道内噪声的特点；王美燕[5]应用室内声学理论研究了多车道、多车流量情况下的隧道交通噪声，并给出了预测模型及噪声控制措施；黄 俊等[6]选取8座典型隧道对隧道实际噪声、单车噪声以及噪声频谱特性等进行了实测分析，并给出了有效的降噪措施；史小丽等[7]通过理论分析界定了公路隧道内的长空间声场特性，并提出了3种基于像源理论的交通噪声预测模型；师利明[8]利用波动声学和房间声学理论研究了公路隧道内噪声预测方法和降噪措施；和启星[9]通过建立公路隧道噪声有限元模型以及进行噪声试验，对隧道交通噪声问题进行了多方面的研究；陈立平等[10]通过理论和实测相结合的方法研究了隧道噪声大小、分布规律、混响时间及频谱特性。

综上所述，现有研究大多针对通行机动车的城市公路隧道，其噪声主要表现为车辆动力噪声和轮胎噪声，但对于噪声控制要求更高的城市慢行隧道而言，风机运行所带来的噪声问题是不容忽视的。

修改稿返回日期：2019-12-01

作者简介：田杨明(1969-)，男，高级工程师，主要从事隧道等工程建设管理工作，E-mail：371939870@qq.com.

基于此，本文主要针对城市隧道内射流风机引起的噪声分布特性开展现场实测研究，分析了隧道内单组风机运行时距其不同距离下的噪声衰减规律以及多组风机同时运行时任意两组风机间的噪声分布规律，并得到了风机噪声频谱特性。随后将实测所得风机噪声分布特性结合相关依据总结所得的城市慢行隧道噪声控制标准，为依托工程采用纵向式通风方案的合理性进行了分析并给出了相应的通风方案设计建议。

2 研究背景

珠海板樟山新建中长大慢行非机动车城市隧道是一种仅供行人与非机动车通行的隧道，致力于打造成为具有城市特色的旅游与日常通行通道。该隧道全长为1 220 m，由非机动车道和人行道组成，其中非机动车道宽4.5 m，人行道宽3.5 m，最大净空高度为5.5 m，隧道横断面如图1所示。

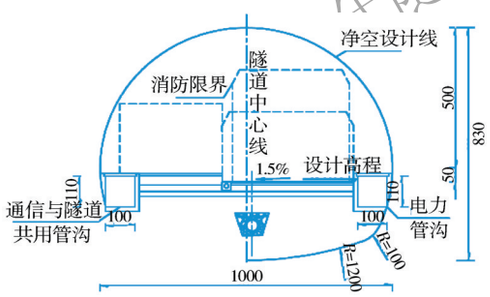


图1 城市慢行隧道横断面图(单位:cm)

Fig.1 Cross section of the urban pedestrian tunnel (Unit: cm)

隧道通风在初步设计阶段提出了横向风道式通风和全射流纵向式通风两种通风方案，前者经济成本较高，而后者则可能引发噪声污染问题。如图2所示，若隧道内安装射流风机进行纵向通风，则其占据的有效净高约为1.6 m，使得风机与行人间的距离较小。虽然在生产过程中会在风机前后位置添加消音罩，但其所产生的噪声仍可能处于较高水平，进而对隧道内行人的舒适性产生严重影响。

一般情况下，风机厂家在出厂前会对射流风机进行噪声水平测试，其标准噪声测试点位于距离风机出口10 m(45°)处且测试地点位于户外，具体测试方法如图3所示。但该测试方法所得的噪声数据并不能准确反映风机在隧道内运行时的实际噪声分布特性，因此，为得到城市隧道内射流风机运行时的噪声分布特性以及风机噪声频谱特性，选取了成都市内两座典型城市下穿隧道进行噪声现场测试研究。

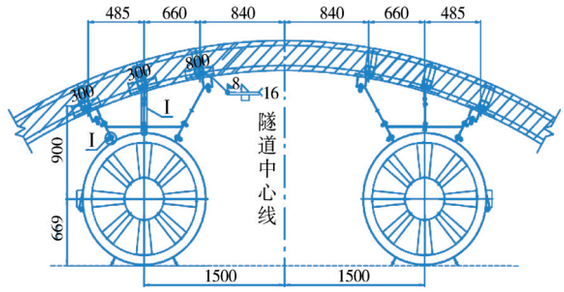


图2 射流风机安装断面示意(单位:mm)

Fig.2 Sketch of the installation section of jet fans (Unit: mm)

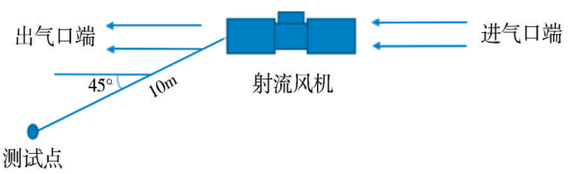


图3 风机标准噪声测试方法示意

Fig.3 Standard noise test method of fans

3 现场测试方案

3.1 测试设备

本次测试所选仪器为杭州爱华AWA5688型多功能声级计，如图4所示，型号级别为二级，其线性测量范围为28~133 dBA，33~133 dBC，40~133 dBZ和LCPeak(66~136) dB，频率范围为20~12 500 Hz，该声级计可用于户外及室内的噪声水平测试，并能方便地进行噪声频率分析，满足本次现场测试的要求。

3.2 测试方法及测点布置



图4 AWA5688型多功能声级计

Fig.4 AWA5688 multifunctional sound level meter

测试地点选为成都市天府下穿隧道和海洋公园下穿隧道中部位置附近，隧道内射流风机悬挂于隧道行车方向右侧墙壁上，风机型号为SDS632P-4-18°型，其中天府下穿隧道内每隔140 m悬挂两台风机，其距地面平均高度约为3 m；海洋公园下穿隧道内每隔100 m悬挂一台风机，其距地面高度约为4 m，风机具体布置形式如图5所示。

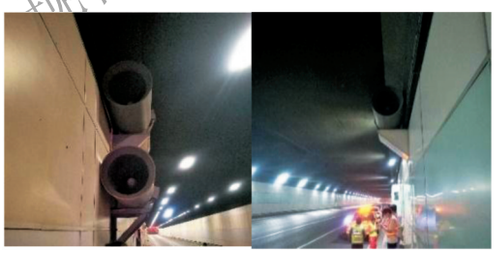


图5 风机布置形式示意

Fig.5 The arrangement pattern of fans

考虑到主要研究隧道内纵向通风情况下射流风机的噪声分布规律，因此，选择凌晨在测试隧道中部直线段进行现场测试以避免隧道内外交通背景噪声对测试结果产生较大的干扰。

本次测试严格按照《GB 3096-2008 声环境质量标准》[11]等相关规范标准进行，针对不同测试内容选择各自相对应的单次测量持时以及数据记录类型，如表1所示。考虑实际情况，每隔10 m布置一测试断面，且各断面测点均距离地面1.5 m，距隧道侧壁1 m，具体布置方法如图6所示。

4 测试结果及分析

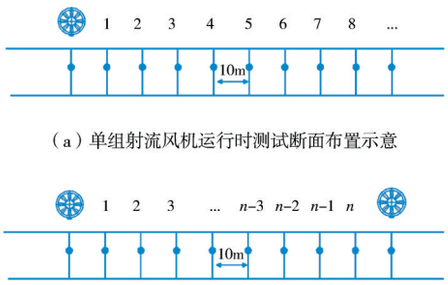
4.1 无风机运行时噪声变化规律

由于本次测试过程中两座隧道内基本无车辆通过，因此所得数据均为隧道外交通背景噪声。通过声级计自带统计功能可以对20 min内的噪声水平进行统计分析，得出该时间段内最大噪声值L_{max}以及等效噪声值$L_{eq,T}$，并利用OCT分析功能对噪声进行了频谱特性分析。无风机运行时天府下穿隧道和海洋公园下穿隧道内的噪声频谱特性如图7所示，可

表1 现场测试相关内容

Table 1 Relevant contents of field test

测试内容	单次测量持时 / min	数据记录类型
无射流风机运行时噪声分布及频谱特性	20	$L_{eq,T}$,L_{max},OCT
单组射流风机运行时噪声分布规律	1	$L_{eq,T}$,L_{max}
多组射流风机运行时噪声分布规律	1	$L_{eq,T}$,L_{max}
射流风机声源噪声频谱特性	1	$L_{eq,T}$,L_{max},OCT



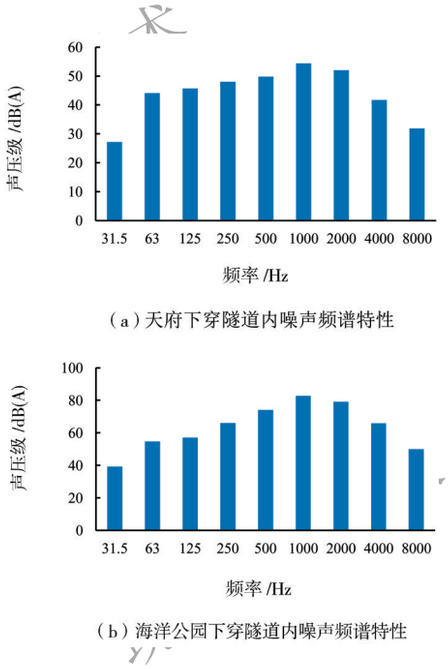
（a）单组射流风机运行时测试断面布置示意

（b）多组射流风机运行时测试断面布置示意

（c）断面测点布置示意

图6 测试断面及测点位置示意

Fig.6 The test section and locations of the measuring points



（a）天府下穿隧道内噪声频谱特性

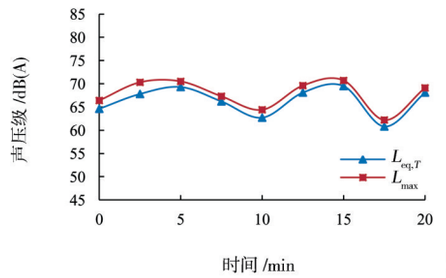
（b）海洋公园下穿隧道内噪声频谱特性

图7 无风机运行时隧道内噪声频谱特性

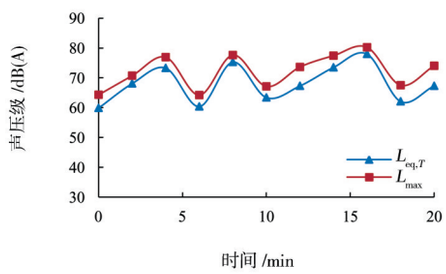
Fig.7 Noise spectrum characteristics in the tunnel when the fan is not running

知两座隧道内高水平噪声频段均为250~2 000 Hz，属中低频噪声，其中1 000~2 000 Hz所对应的噪声水平强度最高。

为更好地描述隧道内噪声的变化特征，对20 min内所得噪声变化情况进行了统计分析，如图8所示。天府下穿隧道内背景噪声在62~71 dB(A)之间波动，海洋公园下穿隧道内背景噪声在59~73 dB(A)之间波动，噪声水平的波动主要是由于隧道外交通噪声变化所造成的。



（a）天府下穿隧道内噪声随时间变化特性



（b）海洋公园下穿隧道内噪声随时间变化特性

图8　无风机运行时隧道内噪声随时间变化特性

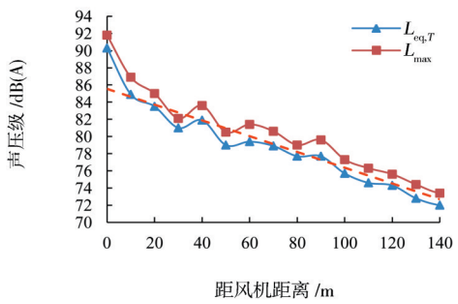
Fig.8　The noise varying with time in tunnel when the fan is not running

4.2　单组风机运行时噪声分布特性

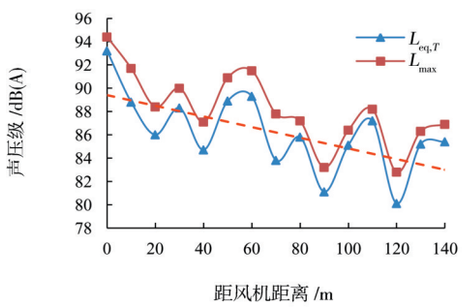
图9给出了隧道内单组风机运行时噪声随距风机距离的变化情况。单组风机运行时，隧道内噪声主要来源于射流风机。从图中可以看出，天府下穿隧道内风机下方噪声等效值$L_{eq,T}$为90.3 dB(A)，最大值L_{max}为91.3 dB(A)，且随着距风机距离的增加，噪声水平逐渐降低，噪声水平与距风机距离之间基本呈线性相关趋势，其中距离风机30 m范围内噪声水平降低速度较快。同样地，海洋公园下穿隧道风机下方噪声水平最高达到了93 dB(A)，且噪声水平与距风机距离之间也基本呈线性相关趋势。

4.3　多组风机运行时噪声分布特性

图10给出了隧道内多组风机同时开启时两组风机间噪声水平的分布情况。隧道内多组风机运行



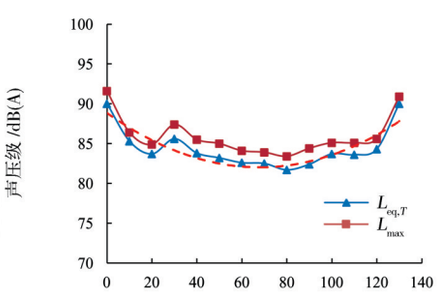
（a）天府下穿隧道内噪声分布规律



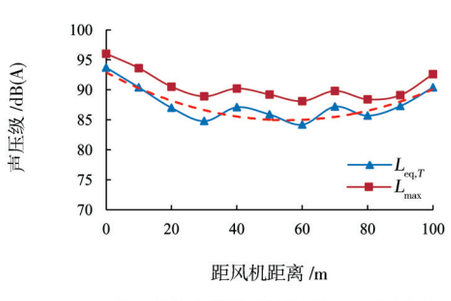
（b）海洋公园下穿隧道内噪声分布规律

图9　单组风机运行时隧道内噪声纵向分布规律

Fig.9　Longitudinal distribution of noise in the tunnel when single group of fan is running



（a）天府下穿隧道内噪声分布规律



（b）海洋公园下穿隧道内噪声分布规律

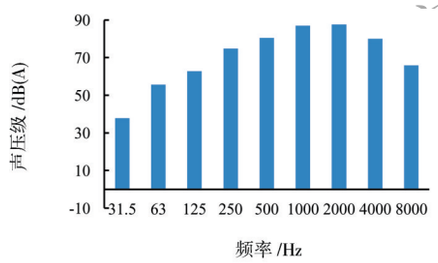
图10　多组风机运行时隧道内噪声分布特性

Fig.10　Longitudinal distribution of noise in the tunnel when multiple groups of fans are running

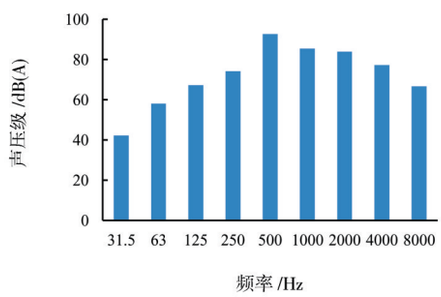
时，两组风机之间的噪声水平基本为对称分布，均呈现中间低两端高的“U”型分布。天府下穿隧道内风机下方噪声仍处于较高水平，为90 dB(A)，风机间最低噪声为82.5 dB(A)，相比于同等距离下单组射流风机运行时提高了4 dB(A)左右。同样地，海洋公园下穿隧道内风机下方噪声值也处于较高水平，为95 dB(A)左右，风机间最低噪声为85.9 dB(A)，相比于同等距离下单组射流风机运行时同样提高了4 dB(A)左右。

4.4 风机噪声频谱特性分析

图11给出了利用声级计OCT功能分析得到风机噪声的频谱特性。隧道内射流风机高水平噪声分布频段均为250~4 000 Hz。其中天府下穿隧道风机1 000~2 000 Hz区间段对应噪声水平最高，海洋公园下穿隧道风机500 Hz对应噪声水平最高。



（a）天府下穿隧道内射流风机噪声频谱特性



（b）海洋公园下穿隧道内射流风机噪声频谱特性

图11 隧道射流风机噪声频谱特性

Fig.11 Noise spectrum characteristics of the jet fan in the tunnel

5 慢行隧道纵向通风方案可行性分析

5.1 适用于慢行隧道的噪声控制标准

随着人们对出行环境需求的不断提高，隧道噪声问题也逐渐引起了人们的重视与关注。由于目前我国隧道建设过程中通常未考虑隧道声学方面的设计，且我国也暂未制定相关公路隧道内环境噪声的规范标准。基于此，本文根据各行业界对噪声控制标准的划分结果[11~14]，对与城市慢行隧道环境相似条件下的噪声控制标准进行了总结，如表2所示，初步确定了城市慢行隧道的噪声控制标准，为进一步进行慢行隧道通风设计提供基础依据。

表2 相似慢行隧道环境下噪声控制标准统计

Table 2 Statistics of the noise control standards in the conditions similar to that of the pedestrian tunnel

规范类型	环境类型	控制标准/dB(A)
声环境质量标准[11]	高速公路、一级公路、二级公路、城市快速路、城市主干路、城市次干路、城市轨道交通（地面段）、内河航道两侧区域	≤70
工业企业厂界环境噪声排放标准[12]	有通话需求的高噪声车间设置的值班室、观察室、休息室（室内背景噪声级）	≤70
地下建筑空间声环境控制标准[13]	车站站台、站厅环境噪声	≤70
	地下商业空间内环境噪声	≤60
	地下停车库空间内各点背景噪声	≤65
经验性总结[14]	保障正常交谈和通讯联络的环境噪声	≤60

由表2可知，可作为城市慢行隧道噪声控制标准参考依据的环境噪声水平主要集中于60~70 dB(A)。因此，结合城市慢行隧道内风机与行人间的位置关系确定板樟山长大慢行隧道噪声控制标准为距隧道地面1.5 m高度处（考虑高于大多数行人耳部位置平均高度）的噪声水平不宜大于65 dB(A)。

5.2 慢行隧道纵向通风方案噪声问题分析

在珠海板樟山慢行隧道中，人行道上方最大净空高度为5 m，当隧道内采用纵向通风方式时，风机占居净空高度约为1.6 m，悬挂的射流风机与地面距离仅为3.6 m。此时，行人头顶与风机下缘的距离将不足2 m。依据现场实测数据，经初步推测可知慢行隧道内噪声水平将远大于65 dB(A)，进而无法满足行人的舒适性要求。因此，珠海板樟山城市慢行隧道不宜采用全射流纵向式通风方案进行运营通风，建议采用噪声干扰较小的风道送入式通风方案并辅以一定的降噪措施。

6 结 论

（1）隧道内无风机运行时噪声主要为中低频噪声，其最高噪声水平集中于1 000~2 000 Hz之间；隧

道内射流风机噪声频段分布主要集中于250~4 000 Hz，其最高噪声水平集中于500~2 000 Hz。

（2）隧道内开启单组射流风机时，风机噪声在隧道内沿纵向基本呈现出线性衰减规律。

（3）隧道内开启多组射流风机时，两组风机间噪声水平基本为对称分布，沿纵向呈中间低两端高的“U”型分布规律，且噪声水平相对于单台射流风机运行时有所提高，平均噪声增量约为4 dB(A)左右。

（4）分析得出城市慢行隧道噪声控制标准为距地面1.5 m高度处的噪声水平不宜大于65 dB(A)，故珠海板樟山城市慢行隧道不宜采用全射流纵向式通风方案进行运营通风，建议采用噪声干扰较小的风道送入式通风方案并辅以一定的降噪措施。

本文将城市隧道内射流风机的噪声分布特性实测结果初步应用于慢行隧道工程运营通风方式的选择，而忽略了隧道断面形式等因素的影响，故后续工作可综合现场实测及数值模拟进行深入研究。

参考文献
References

[1] 曾石发, 田 源, 唐 莎, 等.城市慢行隧道运营通风控制标准研究[J]. 公路交通科技, 2019,36(12):104-109.
ZENG Shifa, TIAN Yuan, TANG Sha, et al. Study on Urban Pedestrian Tunnel Operation Ventilation Control Standards[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(12):104-109.

[2] 张振华, 郭 春, 郑 鑫, 等. 公路隧道内噪声控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (增2): 1015-1019.
ZHANG Zhenhua, GUO Chun, ZHENG Xin, et al. Research on Noise Control Techniques in Highway Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (S2): 1015-1019.

[3] 张忠宇, 马 波, 郭映飞,等.城市低等级公路隧道声学改造探讨[J].地下空间与工程学报,2017,13(增1): 493-496.
ZHANG Zhongyu, MA Bo, GUO Yingfei, et al. Noise Treatment on Tunnels of Low-grade Highways in Urban Area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017,13(S1): 493-496.

[4] 张 锐, 黄晓明, 赵永利,等.隧道噪声的调查与分析[J].公路交通科技, 2006(10):29-32+40.
ZHANG Rui, HUANG Xiaoming, ZHAO Yongli, et al. Investigation and Analysis of Tunnel Noise[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(10):29-32+40.

[5] 王美燕. 公路隧道噪声预测及降噪措施研究[D].西安：西北工业大学, 2007.
WANG Meiyan. Research on Noise Prediction and Control Measures of Highway Tunnels[D].Xi′an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

[6] 黄 俊, 虞辰杰, 张忠宇,等.城市隧道噪声实测与降噪措施研究[J].城市道桥与防洪,2016 (4):164-168+17.
HUANG Jun, YU Chenjie, ZHANG Zhongyu, et al. Study on Noise Measurement and Noise Reduction Measure of Urban Tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2016 (4):164-168+17.

[7] 史小丽,王选仓,贾奇英.公路隧道内交通噪声预测[J].公路交通科技, 2010, 27(2):147-151.
SHI Xiaoli, WANG Xuancang, JIA Qiying. Traffic Noise Prediction inside Highway Tunnels[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(2):147-151.

[8] 师利明.高速公路隧道内交通噪声预测和降噪措施[J].噪声与振动控制, 2010, 30(2):66-68.
SHI Liming. Method of Noise Prediction and Measures of Noise Reducing in Highway Tunnel[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(2):66-68.

[9] 和启星. 公路隧道内噪声声场的有限元仿真及试验研究[D].北京：北京交通大学,2016.
HE Qixing. The FEM-simulation and Experimental Research of the Noise Filed in the Highway Tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[10] 陈立平, 方继伟, 干啸洪,等.隧道噪声传播扩散规律及其检测方案探讨[J].隧道建设,2016,36(12):1442-1448.
CHEN Liping, FANG Jiwei, GAN Xiaohong, et al. Discussion on Propagation Rules and Detection Schemes of Noise in Tunnels[J]. Tunnel Construction, 2016,36(12):1442-1448.

[11] 环境保护部.声环境质量标准: GB 3096-2008[S].北京: 中国环境科学出版社, 2008.
Environmental Protection Department. Environment Quality Standard for Noise: GB 3096-2008[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2008.

[12] 环境保护部.工业企业厂界环境噪声排放标准: GB 12348-2008[S].北京：中国环境科学出版社, 2008.

Environmental Protection Department. Emission Standard for Industrial Enterprise Noise at Boundary: GB 12348-2008[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.

[13] 哈尔滨工业大学.地下建筑空间声环境控制标准: CECS 371-2014[S].北京:中国计划出版社, 2014.
Harbin Institute of Technology. Acoustic Environment Control Standard for Underground Architectural Spaces: CECS 371-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[14] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
MA Dayou. Noise and Vibration Control Engineering Manual[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2002.

现代隧道技术

Measured Noise Distribution Characteristics of Longitudinal Ventilation Fans in Urban Tunnels and Its Application Research

TIAN Yangming[1] *ZHANG Zhigang*[2] *DENG Tao*[3,4] *TIAN Yuan*[3,4]

(1 Zhuhai Urban Construction Real Estate Development Co., Ltd., Zhuhai 519000; 2 CCCC Highway Consultants Co.,Ltd., Beijing 100088; 3 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031; 4 Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract In order to reasonably predict the distribution law of fan noise in the longitudinal ventilation of urban tunnels and provide reference for the feasibility study of longitudinal jet ventilation of urban pedestrian tunnels, two typical urban tunnels are selected to conduct field test of the noise under the condition of longitudinal ventilation in the tunnel, the noise distributions in the tunnel with single and multiple groups of fans are analyzed, and the noise control standards for the pedestrian tunnel are given. The results show that: the noise in the tunnel is mainly the medium and low frequency noise when the fans are not running, and the highest noise level is concentrated between 1 000-2 000 Hz, noise frequency of the fan is mainly concentrated between 250-4 000 Hz, and the highest noise level is concentrated between 500-2 000 Hz; the fan noise shows a basically linear attenuation tendency in the tunnel when a single group of jet fan is running; when multiple groups of jet fans are running, the distribution pattern of noise level between two groups of fans is symmetric with characteristics of being high on two ends and low in the middle along the longitudinal direction, the noise level is higher compared with that of single group of jet fan, the average noise increment is about 4 dB(A); the noise control standard for the urban pedestrian tunnel is that the noise level at 1.5 m above the ground should not be higher than 65 dB(A), and it is suggested that full jet ventilation mode should not be adopted in urban pedestrian tunnels.

Keywords Urban tunnel; Noise distribution; Field measurement; Pedestrian tunnel; Longitudinal ventilation; Noise control standard

现代隧道技术
现代隧道技术
现代隧道技术