

## 隧道噪声传播扩散规律及其检测方案探讨

陈立平<sup>1</sup>, 方继伟<sup>1</sup>, 干啸洪<sup>1</sup>, 张守龙<sup>1</sup>, 李芹子<sup>1</sup>, 黄俊<sup>2</sup>

(1. 宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司, 浙江 宁波 315124;  
2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 隧道噪声是影响行车环境和安全的重要因素, 掌握其传播扩散规律是开展噪声控制的前提和依据。通过理论与实测相结合的方法对隧道噪声大小、分布规律、混响时间及频谱特性进行研究, 并对隧道检测方案进行探讨。研究表明: 1) 隧道噪声大小在空间分布具有一定的规律性, 沿纵向呈中间高两端低的分布规律, 且在隧道进口前 50 m 增加迅速; 2) 隧道横断面内的直达声是噪声的主要来源, 一次反射声在其声聚焦处对噪声影响巨大, 而混响声则恶化了隧道内的整体噪声情况; 3) 隧道内噪声主要是中低频噪声且呈现明显的双峰状, 低频和中频峰值分别出现在 100 Hz 和 1 200 Hz 附近; 4) 隧道混响时间与隧道断面形状、边界平均吸声系数以及噪声频率有关, 周长面积比越大、吸声系数越大以及噪声频率越高都会使得混响时间变小; 5) 隧道噪声检测参数应包含 A 计权声压、噪声频谱特性和混响时间, 具体测点布置应综合考虑隧道长度和横断面形式, 并结合当前技术手段科学制定。

**关键词:** 隧道噪声; 频谱特性; 混响时间; 检测方案

**DOI:** 10.3973/j.issn.1672-741X.2016.12.006

**中图分类号:** U 45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-741X(2016)12-1442-07

## Discussion on Propagation Rules and Detection Schemes of Noise in Tunnels

CHEN Liping<sup>1</sup>, FANG Jiwei<sup>1</sup>, GAN Xiaohong<sup>1</sup>, ZHANG Shoulong<sup>1</sup>, LI Qinzi<sup>1</sup>, HUANG Jun<sup>2</sup>

(1. Ningbo Traffic Construction Project Testing and Inspection Center Co., Ltd., Ningbo 315124, Zhejiang, China;  
2. Jiangsu Transportation Institute, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

**Abstract:** The noise in tunnel affects the driving environment and safety much; as a result, it is very important to study the propagation rules and detection schemes of it. The dB, distribution rules, reverberation time and frequency spectrum characteristics of the noise in tunnel are studied by theoretical calculation and site monitoring; and then the noise detection schemes are discussed. Some conclusions are drawn as follows: 1) The longitudinal distribution rule of dB of noise in tunnel is largest in the middle and smallest at the ends; and the dB of noise in tunnel increases a lot far away tunnel entrance of 50 m. 2) The direct sound is the main source of noise in tunnel within tunnel horizontal cross-section; the first reflected sound has a great influence on noise in tunnel at the focusing point of sound; the acoustic environment in tunnel is worsened by reverberant sound. 3) The main noises in tunnel are medium and low frequency noises and show clear bimodal shapes; the peak values of low frequency noise and medium frequency noise are 100 Hz and 1 200 Hz respectively. 4) The reverberation time in tunnel is related to shape of tunnel cross-section, average sound absorption coefficient of tunnel boundary and noise frequency. The reverberation time decreases with the perimeter-area ratio of tunnel cross-section, sound absorption coefficient of tunnel boundary and noise frequency increase. 5) The A-weighted sound pressure, frequency spectrum characteristics of noise and reverberation time should be included by the detection parameters of noise in tunnel; the tunnel length, shape of tunnel cross-section and technical level should be considered when make arrangement of noise monitoring points.

**Keywords:** tunnel noise; frequency spectrum characteristic; reverberation time; detection scheme

**收稿日期:** 2016-08-18; **修回日期:** 2016-10-31

**第一作者简介:** 陈立平 (1985—), 男, 安徽安庆人, 2015 年毕业于北京交通大学, 地下工程专业, 博士, 工程师, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: 443270071@qq.com。

## 0 引言

隧道内噪声对环境的影响不容忽视,直接影响到人们的身心健康,也是影响隧道行车环境和安全的重要污染源之一<sup>[1-3]</sup>。隧道具有其独特的声环境特点,一方面,半封闭的隧道环境使噪音难以快速消散,并且经壁面多次反射和叠加,产生相对于开放空间更大的噪音值,且混响时间长(音箱效应),极易使人产生烦躁和紧张等情绪,严重影响交通环境和安全<sup>[4]</sup>;另一方面,隧道口对噪声具有放大和扩散效应(又称喇叭效应),对隧道出入口附近区域产生长期困扰。

有关隧道声环境方面的研究成果较多,如肖上平等<sup>[5]</sup>、黄俊等<sup>[6]</sup>通过实测手段对隧道内外噪声进行研究,对隧道噪声环境进行了定性分析。凌天清等<sup>[7]</sup>、余海燕等<sup>[8]</sup>对隧道降噪新型材料及其声学特性进行研究,为隧道降噪材料的研制和选取提供了参考依据。文献<sup>[9-11]</sup>利用理论分析的方法建立隧道噪声预测分析模型,成功对隧道内噪声进行预测。师利明等将波动声学理论和房间声学理论在隧道内噪声预测方面的应用进行了对比分析,最终选用房间声学理论进行预测<sup>[3,9]</sup>。陈兴等以湖南省常张高速公路关口隧道为依托,对公路隧道的降噪效果进行了实地研究<sup>[1]</sup>。此外,有关隧道内降噪路面及侧墙降噪材料的研究也是研究的热点<sup>[12]</sup>。当前我国隧道建设过程中因防火需求,通常不考虑降噪设计,最新的《公路隧道设计规范》也无公路隧道声学设计方面的规定。随着人们对环境要求的不断提高以及“绿色建筑”概念的提出,隧道噪声问题也逐渐被人们所重视和关注。一些隧道已开展了相应的降噪设计和处理,如南京玄武湖隧道、湖南常张高速公路关口隧道等。可以预见在今后一段时间,会有越来越多的隧道考虑进行降噪设计或是改造。

虽然对隧道噪声研究较多,但针对隧道噪声传播扩散规律的认识还不够清晰,且当前尚缺乏针对隧道声环境检测的相关规定和说明。本文将对隧道声环境特性进行研究并结合实际隧道噪声监测结果及其分布规律,对隧道工程的声环境检测方案进行探讨。

## 1 隧道内噪声扩散传播规律

### 1.1 纵向扩散传播规律

隧道属地下细长型结构,该特点使得其内部噪声扩散和反射有别于普通公路或其他建(构)筑物,主要体现在纵向和横向 2 个方面。

在纵向路径上,隧道噪声随声源位置变化而出现不同的扩散规律。利用专业声学模拟软件 Odeon 对一座 300 m 长的隧道进行模拟,得到汽车通过隧道全过程中纵向噪声分布规律,如图 1 所示。

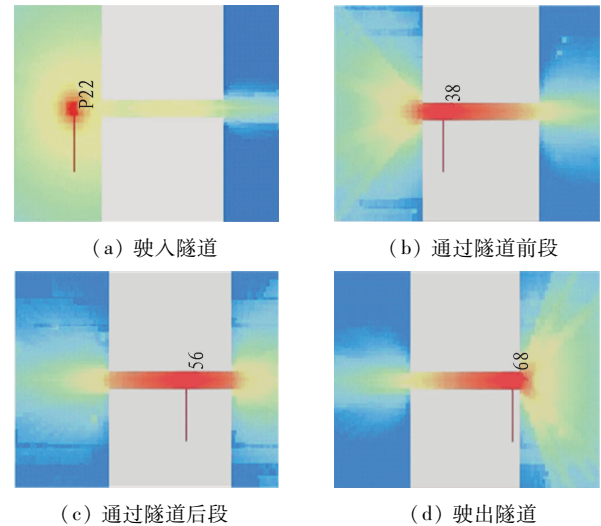


图 1 隧道纵向噪声传播扩散规律

Fig. 1 Propagation rules of noise along longitudinal direction of tunnel

由图 1(a)可知,在车辆接近隧道口附近时,隧道内噪声强度虽然不大,但衰减程度相较于外部空间小;图 1(b)表明车辆进入隧道时的情形,此时整个隧道内噪声强度较高,且隧道进口出现了明显的“喇叭效应”,噪声从隧道进口以一定角度向外发散,且强度较大;图 1(c)是车辆处于隧道中部情况,此时隧道表现出明显的“音箱效应”,这个隧道处于强噪声环境,同时在隧道口也有较为明显的噪声扩散;图 1(d)是车辆驶出隧道的情形,此时的情况与车辆驶入时的情况较为相似,隧道出口也出现明显噪声扩散。

为了进一步揭示隧道纵向不同位置的噪声分布规律,采用声级计对隧道不同位置的噪声值进行实地测量。现场气温 23 ℃,风速 2.4 m/s,测试时间段内现场车流量 1 456 辆/h,平均车速 45 km/h。测点沿隧道纵向每间隔 20 m 等间距布设,采集探头放置于隧道边墙处,高度距路面为 1.2 m。测试过程和结果分别如图 2 和图 3 所示。

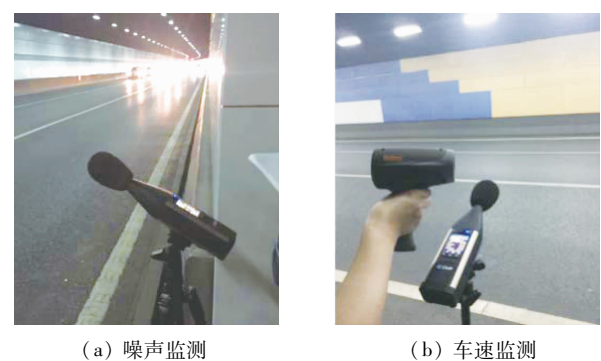


图 2 隧道噪声实测

Fig. 2 Noise detection in tunnel

由于通过测点车流量、车速以及车辆类型具有一定的随机性,会导致噪声测试结果出现波动,但噪声在纵向上的分布规律还是可以由图 3 得到明确的体现:隧

道内噪声呈现明显的中间高两端低的分布特性。在隧道外部,噪声值为 75 dB 左右,接近普通公路的交通噪声;进入隧道后噪声值快速增加,且在前 50 m 增加迅速,此后缓慢增加并渐趋稳定;到隧道中部时,噪声接近 88 dB,比隧道外部高出近 13 dB;此后,随着距隧道出口距离越近,噪声逐渐减小,并最终回复到正常水平。

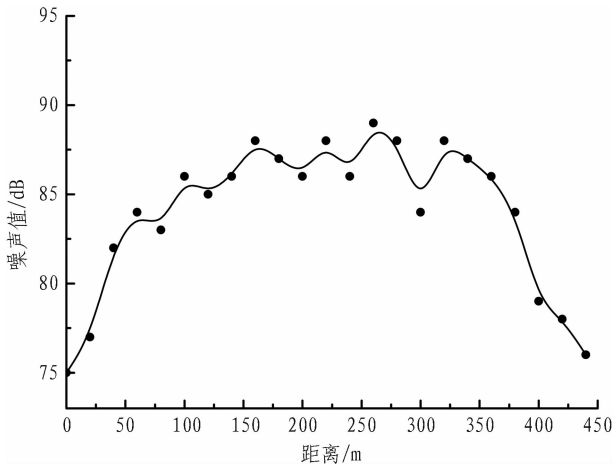


图 3 隧道噪声纵向分布规律

Fig. 3 Propagation rules of noise along longitudinal direction of tunnel

### 1.2 横向扩散传播规律

隧道横向尺度相对纵向尺度小很多,声波遇到断面边界会在短时间内产生多次反射并叠加,导致隧道内混响时间较长。对于圆弧形隧道断面,边界还会对噪声产生聚焦作用。因此隧道内的噪声应分 2 步进行分析:一是分析直达声与一次反射声,此时的噪声具有较强的指向性,不能通过室内声学的方法来计算;二是将二次及以上次数的反射声能视作混响声能,因为二次及以上反射声已经不具备十分明显的指向性和聚焦特性,可以近似地看作扩散声场。即隧道中的声压级为:直达声 + 一次反射声 + 混响声。

由此可以利用 matlab 软件编制相应的计算分析程序,实现对隧道横断面噪声传播扩散规律的模拟。为了编制程序方便,分析隧道模型横断面采用半径为 5 m 的标准圆弧。分析计算模型如图 4 所示。

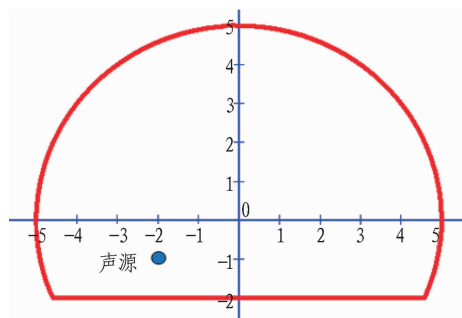


图 4 分析计算模型(单位: m)

Fig. 4 Analysis and calculation model for noise in tunnel (m)

点声源在三维空间内的衰减系数为  $4\pi r^2$ ,在平面内设置一定向外辐射的声线,其自然衰减系数为  $2\pi r$ ,故在此基础上,每条声线仍需用  $2\pi r$  的衰减。将此衰减量输入计算程序进行模拟,得到隧道内因一次反射声而增加的声压级分布见图 5。

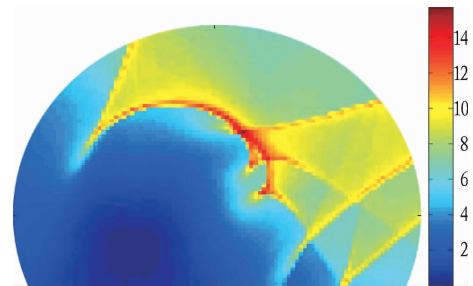


图 5 一次反射声增加的声压级分布(单位: dB)

Fig. 5 Distribution of first reflected sound line (dB)

图 5 显示内容并非直接是隧道内一次反射声声能分布情况,而是相对于声源在开阔空间(平直公路)上的一次反射声对声压级的增量。图 5 能明显地反应出隧道边界对一次反射声的聚焦效应。利用同样的方法,对隧道内存在不同声源情况进行分析。取某时刻存在一辆车和同时存在两辆车的 2 种工况,分别得到如图 6 和图 7 所示的结果。

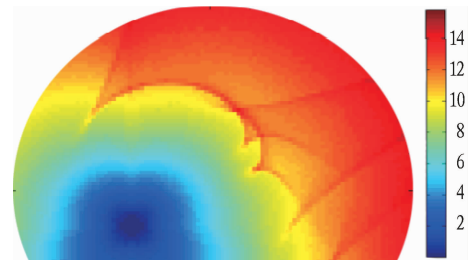


图 6 单声源隧道噪声增量(单位: dB)

Fig. 6 Noise increase of single sound source tunnel (dB)

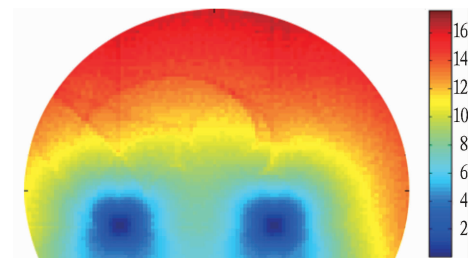


图 7 双声源隧道噪声增量(单位: dB)

Fig. 7 Noise increase of double sound source tunnel (dB)

由图 6 和图 7 可以看出: 1) 在当前情况下,车辆行驶位置(声源位置)的噪声值增加不明显,原因是靠近声源的地方,直达声过大,与较小的混响声能叠加后没有明显的变化。2) 距离声源较远的地方,声压级增加十分明显,最大可达到 14 dB。3) 一次反射声的声聚焦位置也很明显地在图中反应,声聚焦引起的声压增量同样非常显著。

总的看来,隧道横断面内的直达声是噪声的主要来源,一次反射声在其声聚焦处影响巨大,而混响声则增加了隧道内的整体噪声情况。

## 2 隧道噪声声学特性

### 2.1 频谱特性

通过现场实测隧道内噪声频谱特性可知,隧道内车辆噪声主要由 2 部分组成: 发动机噪声和轮胎-路面摩擦噪声。其中发动机噪声主要分布在低频段,从 50 ~ 250 Hz 是发动机噪声较大的区间;而轮胎-路面噪声集中在中频段,从 500 ~ 2 000 Hz,其中最高点出现在 1 200 Hz 附近。隧道内外噪声频率分布如图 8 所示。

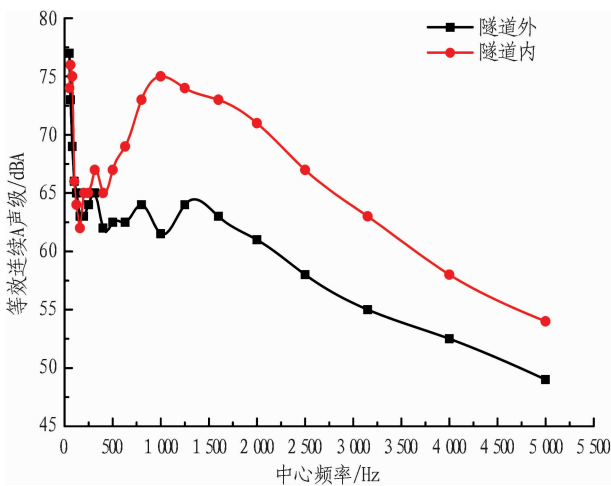


图 8 隧道噪声频谱特性

Fig. 8 Frequency spectrum characteristics of noise in tunnel

由图 8 可知,隧道内外交通噪声频谱特性都呈现明显的双峰状,在 100 Hz 和 1 200 Hz 附近分别出现峰值,在隧道内第 2 峰值要高于隧道外,这也说明若要进行隧道降噪设计,轮胎与路面间的中频摩擦噪声是考虑重点。

### 2.2 混响时间

隧道内混响时间,是用来描述声音衰减快慢程度的物理量,定义为声源停止后从初始的声压级降低 60 dB 所需的时间,理论上其值大小与隧道周边吸声系数以及断面周长面积比有关,关系如下:

$$10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \lg \left( (1 - \bar{\alpha}) \frac{c_0 C t}{4s} \cdot \frac{1}{2c_0 t} \right) = -60. \quad (1)$$

式中:  $p$ 、 $p_0$  分别为当前和初始声压;  $\bar{\alpha}$  为隧道横断面的平均吸声系数;  $c_0$  为声速;  $C$  为隧道横断面周长;  $t$  为混响时长;  $s$  为隧道横断面面积。将  $c_0 = 334 \text{ m/s}$  代入式(1),得:

$$106 \frac{Ct}{s} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) = \ln t - 6.7. \quad (2)$$

由式(2)可知,隧道内的混响时间与隧道横断面周长与面积比以及平均吸声系数都有关系。周长与面

积比越大,混响时间越短;吸声系数值越大,混响时间越短。隧道内混响时长与吸声系数与周长面积比之间的关系如图 9 所示。

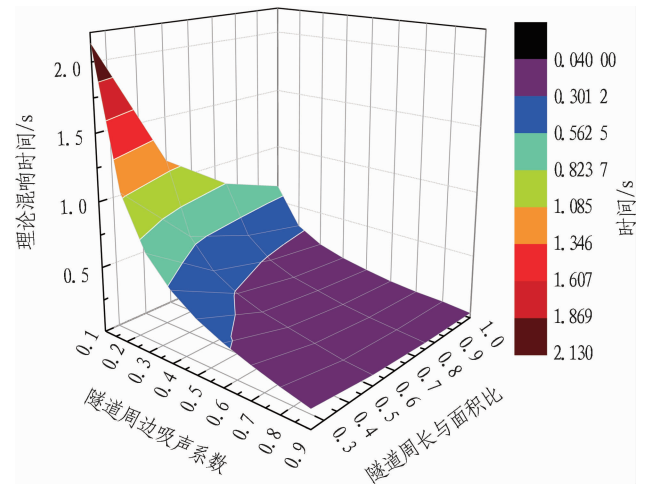


图 9 隧道噪声混响时间

Fig. 9 Reverberation time of noise in tunnel

图 9 表示的为平面理想情况,即隧道两端无反射声;但在实际情况下,隧道往往不能做到绝对的平直,而且在隧道开口处,由于声阻抗不匹配,一定会产生反射声。所以测量值与该计算值会有一些出入。但上述结果可以表现混响时间与隧道基本参数之间的定性关系。在设计中,可以利用改变隧道横断面周长与面积比和平均吸声系数的方法对隧道内混响时间进行调节。

实际情况隧道内混响时间较为复杂,且与噪声频率密切相关。为了能更好掌握隧道内混响时间与频率的关系,选取了一座夜间封闭的隧道为测试对象,进行了 5 个典型断面的实地测试,测试过程和结果分别如图 10 和 11 所示。



测试过程中利用气球爆炸声作为无定向脉冲声源。

图 10 隧道混响时间测试

Fig. 10 Detection of reverberation time in tunnel

由于 60 dB 的衰减范围在实际测量中难以做到,通常按衰减 30 dB 时间乘以 2 作为混响时间,本次实验也采用该方案。测试过程中声源位于隧道中线,距路面垂直距离为 1.2 m;采集探头位于内侧车道中线,与路面垂直距离为 1.2 m。

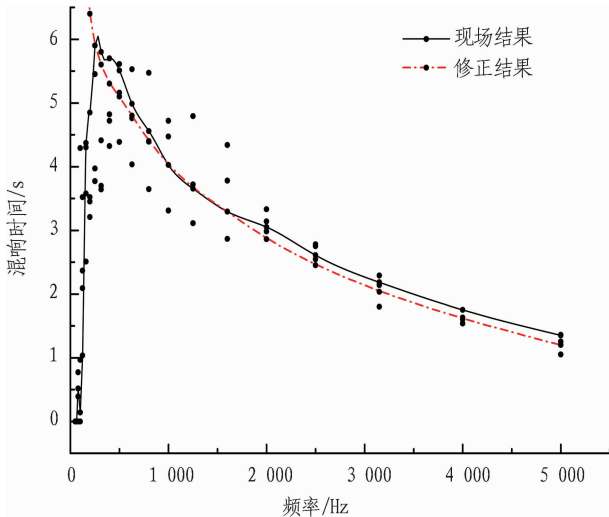


图 11 隧道内混响时间与频率的关系

Fig. 11 Relationship between reverberation time and noise frequency in tunnel

图 11 现场实测结果在前端出现了陡峭的上升段，

这主要是由于试验中声源产生的低频声很少，难以探测。实际关系如图 11 中的修正结果所示，即随着噪声频率的升高，混响时间逐渐降低。由图 9 理论结果与图 11 实测结果对比可知，实测值明显大于理论值，这主要是由于实际隧道情况与理想状态差距较大，也体现了隧道噪声实测的重要意义。

### 3 隧道噪声影响因素分析

影响隧道噪声测试结果的因素很多，包括测试条件、隧道结构、车型车速及测点位置等。其中测试条件是通常作为是否适合进行测试的判定条件，即只有满足一定条件才进行测试，否则不能测试。而隧道中的环境相对比较稳定，故在此不进行深入分析。通过对几座典型隧道内的噪声实测数据分析，重点对隧道长度、平均车速和车流量对测试结果的影响进行说明。实测结果如表 1 所示。

表 1 测试隧道基本情况

Table 1 Basic conditions of test tunnels

隧道名	测试长度/ m	断面形式	气温/°C	风速/(m/s)	车流量/(辆/h)	平均车速/ (km/h)	实测噪声值/dB		
							隧道内	隧道外	差值
中山门隧道	63	圆拱形	26.1	2.1	877	33	79.8	75.3	4.5
富贵山隧道	127	圆拱形	25.9	1.1	1 425	44	81.8	73.6	8.2
定淮门隧道	500	矩形	28.5	1.7	2 280	49	78.2	72.5	4.7
通济门隧道	1 400	矩形	22.6	4.7	2 805	55	90.6	78.9	11.7
玄武湖隧道	2 660	矩形	26.2	4.3	4 626	52	87.1	75.6	11.5
九华山隧道	2 780	矩形	25.7	2.4	2 112	66	88.8	77.9	10.9

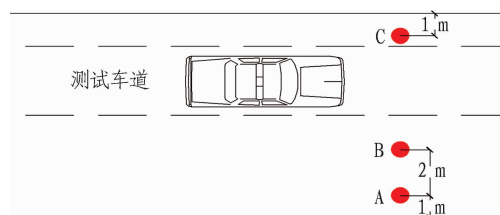
由表 1 隧道内外噪声差值结果可知：正常运营情况下，隧道内外噪声差值最小的是中山门隧道(4.5 dB)，最高为通济门隧道(11.7 dB)，平均差值为 8.6 dB。差值在平均值以下的 3 座隧道和平均值以上的 3 座隧道相比，具有隧道长度相对较短、车速相对较低等明显特征。

为了进一步研究测点位置、车速以及隧道纵坡对测试结果的影响，以普通小汽车为实验车辆，在封闭隧道内(无其他外来车辆干扰)分别以 40、60、80 km/h 的速度进行测试，对于下沉式隧道，在出入口附近路面具有一定的坡度。本次测试对上坡和下坡情况进行了分别考虑，现场情况与测点布设位置如图 12 所示，最终得到各测点单车噪声如图 13 所示。

由图 13 可知：1) 同一断面内的不同测点位置以及隧道纵坡对测试结果影响不明显。2) 车速对噪声的影响较为显著。车速从 40 km/h 增大到 80 km/h 的过程中，最近点 A 声级从 75 dBA 增大到 89 dBA。3) 在 40~80 km 时速范围内，车速每增加 1 km/h，噪声值平均增加 0.35 dBA。



(a) 测试现场



(b) 测试方案

图 12 隧道内单车噪声测试

Fig. 12 One-vehicle noise detection in tunnel

### 4 隧道声环境检测方案探讨

目前，国家暂无专门针对隧道噪声测量的标准。由于没有国家规定的测量方法，加上隧道内部的空间

条件限制,利用怎样的测量方法才能正确反应出隧道内的噪声值大小,这一问题值得探讨。

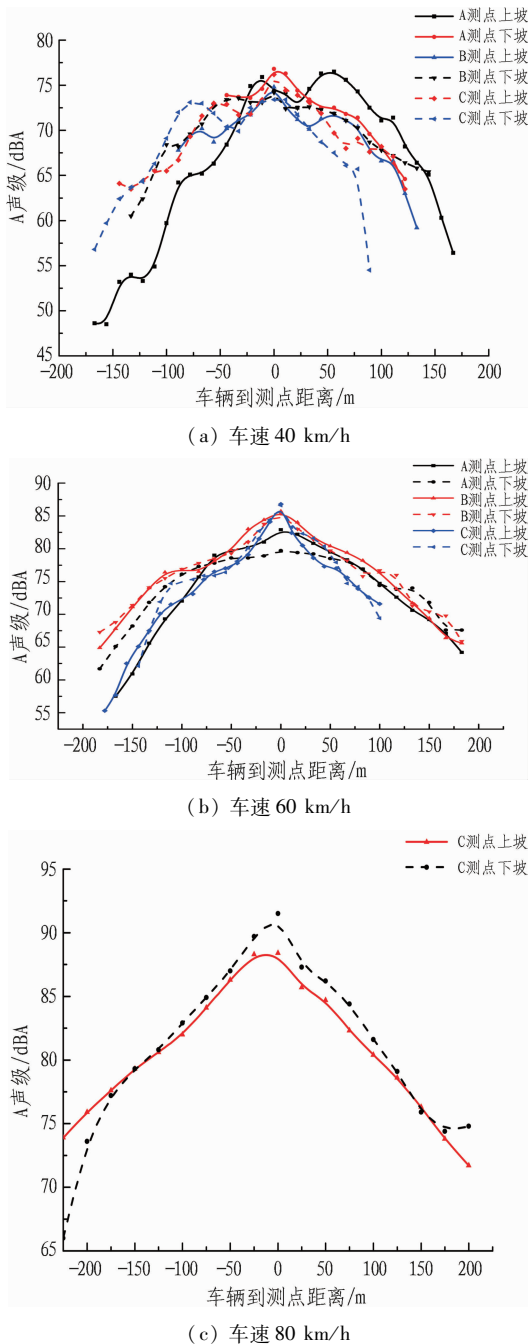


图 13 不同车速下隧道内单车噪声

Fig. 13 Detection results of one-vehicle noise in tunnel under different vehicle velocities

#### 4.1 检测项目

笔者认为,隧道噪声测试方法可参照交通噪声测试方法进行,测试点应包括隧道暗埋段、敞开段、隧道口及风机和风塔等位置。测试参数应包含 A 计权声压、混响时间和噪声频谱。A 计权声压可以判断隧道噪声大小,将其与平直公路上的噪声级进行对比,能够反映出隧道对公路噪声的增强情况,是研究隧道降噪性能的基础。此外隧道噪声频谱特性和混响时间也应作为必测项目,

因为声频谱特性是隧道降噪措施制定过程中降噪材料和方案选取的重要前提依据,使降噪方案更具针对性,提高噪声控制效果;混响时间作为隧道噪声衰减规律的综合参数,能够反应隧道噪声叠加程度,通过对比降噪前后隧道混响时间也可以对降噪效果进行定量评价。测试过程中应同时记录隧道断面形式、出入口形式、温度、风速以及设计车速和车流量等信息。

#### 4.2 检测方案

由于隧道噪声在纵向和横向都具有特定的空间分布特性,因此测点布置应考虑隧道长度和横断面形式,并结合当前技术手段而制定。

纵向测点应包含隧道外、隧道进口、隧道前端、隧道中部(由前文研究可知,隧道后端和出口情况与隧道前端和进口情况类似,可以不必重复测量)以及隧道横断面或纵断面曲率发生变化的地方。隧道外测点主要是作为对比基准点,其距离隧道口应大于 50 m 以上。检测过程中天气应良好,风速不大于 5 m/s。为减小干扰,横断面内测点应布置在距路面高 1.2 m 处,且距隧道侧墙距离为 2 m。

在混响时间检测过程中,应采用专业无定向脉冲声源。当现场条件不允许时,也可采用气球爆炸声作为替代声源。测点布置如图 14 所示。

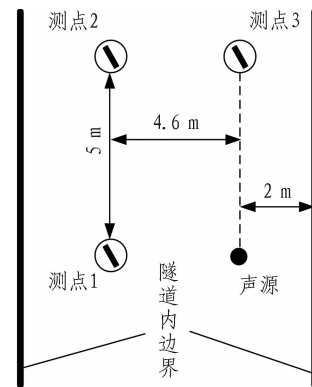


图 14 混响时间检测方案

Fig. 14 Detection scheme for reverberation time

隧道噪声频谱特性检测可在隧道 A 计权声压检测过程中一并获取,这里不再赘述。

### 5 结论与讨论

#### 5.1 结论

1)隧道内噪声沿纵向呈现中间高两端低的分布规律,且在隧道入口前 50 m 增加迅速,此后缓慢增加并渐趋稳定,隧道内噪声相比于隧道外峰值高出近 13 dB。

2)隧道横断面内的直达声是噪声的主要来源,一次反射声在其声聚焦处影响巨大,而混响声则增加了隧道内的整体噪声情况。隧道内噪声主要是中低频噪声且呈现明显的双峰状,低频和中频峰值分别出现在

100 Hz 和 1 200 Hz 附近,在隧道内中频峰值要高于隧道外,这也说明轮胎与路面间的中频摩擦噪声是隧道降噪考虑的重点。

3)隧道混响时间与隧道断面形状、边界平均吸声系数以及噪声频率有关。周长与面积比越大、吸声系数越大以及噪声频率越高,都会使混响时间变短。

4)隧道噪声检测参数应包含 A 计权声压、噪声频谱特性和混响时间,具体测点布置应综合考虑隧道长度和横断面形式,并结合当前技术手段而制定。

## 5.2 讨论

1)当前隧道环境因素通常作为是否适合进行测试的判定条件,目前尚缺乏相应的隧道噪声与测试环境之间的修正方法。隧道噪声理论上都是有不同车型噪声的叠加,对隧道内不同车型的噪声规律研究具有较大意义和价值,但目前尚难以做到实测,主要是由于实际运营情况下的干扰车辆所致,且很难形成单一车型的车流,后续研究可借助数值手段进行仿真分析。

2)隧道内同一断面内的不同测点位置以及隧道纵坡对测试结果影响不明显,而车速对噪声的影响较为显著,故在测试过程中应避开拐弯或陡坡等有可能导致车速起伏路段。随着隧道降噪工程的实施,后续有必要针对不同的降噪材料和方案进行效果验证和对比研究。

3)影响隧道噪声的因素比较多,如隧道断面形式、车流量、车型、车速、路面材料以及天气因素等,很难建立一个系统的分析预测模型,故尚需后续进一步深入研究。且隧道噪声实测缺乏有效的规范性指导,急需研究制定统一的隧道声环境检测与评价规范或指导性方案。

## 参考文献(References):

- [1] 陈兴,梁志坚,阙秀明.公路隧道噪声降噪案例研究[J].声学技术,2008,27(2):244-246.(CHEN Xing, LIANG Zhijian, QUE Xiuming. Highway tunnel noise reducing case studies[J]. Technical Acoustics, 2008,27(2):244-246.(in Chinese))
- [2] 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,2006,23(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, 23(10): 29-32,40.(in Chinese))
- [3] 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(2):66-68.(SHI Liming. Method of noise prediction and measures of noise reducing in highway tunnel[J]. Noise and Vibration Control, 2010(2):66-68.(in Chinese))
- [4] 陈延训.城市地下隧道交通噪声环境及改善[J].环境工程,1990,8(4):36-38,47.(CHEN Yanxun. Urban underground tunnel traffic noise and environment improving [J]. Environmental Engineering, 1990,8(4):36-38,47.(in Chinese))
- [5] 肖上平,李义连.隧道环境噪声调查与评价:以地质大学隧道为例[J].安全与环境工程,2006,13(2):44-47.(XIAO Shangping, LI Yilian. Investigation and assessment on environmental noise in the tunnel: Taking CUG tunnel for example [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(2):44-47.(in Chinese))
- [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 of noise measurement from urban tunnel and noise reduction design [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(4):164-168,17.(in Chinese))
- [7] 凌天清,王瑞燕,张剑,等.陶砂砂浆与陶粒混凝土对降低隧道内行车噪声的影响[J].中国公路学报,2011,24(1):20-24,77.(LING Tianqing, WANG Ruiyan, ZHANG Jian, et al. Influence of ceramsite mortar and ceramic concrete on reducing traffic noise in tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011,24(1):20-24,77.(in Chinese))
- [8] 余海燕.水泥-木梗纤维复合吸声材料的组成、性能及吸声模型研究[D].北京:中国建筑材料科学研究总院,2006.(YU Haiyan. Study of the composition, performance and acoustic model of cement-wood fiber composite sound absorption material [D]. Beijing: China Building Materials Academy,2006.(in Chinese))
- [9] 师利明,罗德春,邓顺熙.公路隧道内噪声预测和降噪措施的理论研究[J].中国公路学报,1999,12(增刊1):101-105.(SHI Liming, LUO Dechun, DENG Shunxi. Theoretical research on noise prediction and measures of reducing noise in highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(S1):101-105.(in Chinese))
- [10] 吴硕贤.“虚墙”法及其在交通噪声计算中的应用[J].声学学报,1994,19(4):309-315.(WU Shuoxian. Image walls and a new concept for simple estimates of traffic noise [J]. Acta Acustica, 1994,19(4):309-315.(in Chinese))
- [11] 吴硕贤,赵越喆.隧道声学系统的语言清晰度预测[J].电声技术,2005(1):15-17.(WU Shuoxian, ZHAO Yuezhe. Prediction of speech articulation on acoustics system in tunnel [J]. Audio Engineering, 2005(1):15-17.(in Chinese))
- [12] 张锐,黄晓明,赵永利.隧道路面使用状况调查与分析[J].公路隧道,2007(1):12-16.(ZHANG Rui, HUANG Xiaoming, ZHAO Yongli. Investigation and analysis of tunnel pavement condition [J]. Highway Tunnel, 2007(1):12-16.(in Chinese))