

文章编号:1671-8879(2014)06-0131-08

# 高速公路隧道内噪声声场分布特性

张雪峰,魏庆朝,赵泽鹏,田 琪,倪永军

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

**摘 要:**针对某高速公路隧道,把隧道壁及路面设置为全反射边界条件,以点声源作为基本噪声源建立了足尺有限元分析模型。利用 LMS Virtual Lab 软件对模型进行有限元分析,对隧道内声传播介质——空气进行声传播计算,研究了点声源条件下隧道内声场的分布特性及声源频率和位置对声场分布的影响。研究结果表明:公路隧道内噪声主要分为两大区域分布,贴近界面呈明显的规律性声压叠加与消减的声场紊乱区及远离界面的声场稳定区。声源频率从 250 Hz 逐步增加到 1 000 Hz 时,紊乱区的范围由距离隧道壁 2.3 m 以内范围向 0.7 m 以内递减;声源位置不同时,仅影响到声源附近 5 m 范围内的声场,隧道内整体声场仍符合前述分布规律。参数分析表明隧道内噪声场主要分为平均声压级较高的紊乱区和较低的稳定区两大区域,声源频率会影响两区域分布范围,声源位置仅能影响声源附近小范围声场分布,对隧道整体声场影响不大。

**关键词:**隧道工程;高速公路;隧道;噪声;有限元法;声场分布;降噪

**中图分类号:**U45;TL375.2

**文献标志码:**A

## FEM-based study on distribution characteristics of noise field in highway tunnel

ZHANG Xue-feng, WEI Qing-chao, ZHAO Ze-peng, TIAN Qi, NI Yong-jun

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In this paper, a full scaled model of a highway tunnel was established based on the Finite Element Method (FEM). The tunnel wall and the pavement were set as total reflection boundary conditions and point acoutic source was used as the basic sound source. The model was analyzed based on FEM by using the software LMS Virtual Lab. And the sound propagation characteristic in air, which is the propagation medium in tunnel, was calculated. The sound pressure distribution of the tunnel and the influence of sound source frequency and location on the sound pressure distribution were analyzed under the condition of point source. The research results show that the sound distribution is mainly divided into two large areas in the highway tunnels, the sound field disorder region which is close to the interface and presenting obvious regularity of sound pressure superposition and reduction, and the sound field stable region which is far away from the interface of sound field. When the frequency of the sound source increases from 250 Hz to 1 000 Hz, the range of the disordered region decreases from 2.3 m in the vicinity of the tunnel walls to 0.7 m. Changing of the sound source location can only affect the sound field within the range of 5 m away from the sound source, but the global sound field in-

收稿日期:2014-08-24

基金项目:交通运输部建设科技项目(2011 318 315 1400)

作者简介:张雪峰(1968-),男,内蒙古呼和浩特人,工学博士研究生,E-mail:zxf@163.com。

side the tunnel is essentially unchanged. The analysis of the parameters show that the sound field in the tunnel is mainly divided into two areas, the disorder area and the stable area. Sound source frequency can affect the distribution of the two areas. The sound source position can only influence the range close to the sound source, but have slight influence on the sound field of the whole tunnel. 16 figs, 21 refs.

**Key words:** tunnel engineering; highway; tunnel; noise; FEM; distribution of the sound field; noise reduction

## 0 引言

公路隧道内交通噪声与普通公路交通噪声的最大区别在于隧道内空间属于半封闭空间,而长隧道由于长度远大于其宽度和高度,其内声场可以看做长空间声场,与普通扩散场有很大区别,对交通噪声的汇聚作用非常明显,且衰减较慢<sup>[1]</sup>。为降低公路隧道内的噪声,对隧道内噪声的声场分布特性进行分析是十分必要的,明确隧道内噪声声场的分布特性是各种隧道降噪措施应用的基础。

近年来随着公路交通建设的飞速发展,公路隧道(特别是特长隧道)越来越多,隧道内的交通噪声污染问题越来越受到人们的关注,学者们采用过不同的方法针对隧道噪声进行过各种建模分析及实际调查<sup>[2]</sup>。师利明等基于房间声学理论对隧道内噪声进行预测,并研究了半圆形横断面公路隧道内的降噪措施,提出噪声预测的模式和方法,并给出了相应的隧道内噪声参数,同时认为交通隧道内的噪声声场可以看做是一个近似均匀分布的混响声场<sup>[3-4]</sup>;Heutschi 等提出了一种叠加模型,将洞外接受点的声压级分成了洞内直射和反射声在洞口位置的叠加<sup>[5]</sup>;罗威力等基于虚声源法利用计算机仿真计算三维矩形截面隧道洞内、洞口和洞外的交通噪声,结合微观交通仿真技术、噪声排放模型、洞口和洞外传播模型,实现单点声源和动态交通源的噪声分布计算<sup>[6]</sup>;乔海滨等基于有限元法采用 ABAQUS 有限元软件进行建模分析,认为隧道内的交通噪声主要源自于车辆行驶产生的胎噪,计算结果显示隧道中部的噪声甚至高于外界 18 dB<sup>[7]</sup>。Probst 运用积分方法提出了修正公式,可以与其他静态交通噪声模型结合使用而预测隧道洞口的噪声级别<sup>[8]</sup>。

以上研究基本都是从宏观上对隧道内整体噪声水平的实测及预测,而对于隧道内部声场的具体分布特性,由于长空间声场有着复杂的干涉问题,其预测并不准确。后来香港理工大学机械工程系 Li 等

提出了基于能量法的长隧道内声波衰减模型,并增加了修正项来计算空气的吸声系数,这一模型在高频范围内的预测结果较为准确,但在低频范围效果较差<sup>[9-10]</sup>;Lam 等又通过研究吸声材料在长空间内不同的安装数量和位置对其声场的影响,提出了降噪材料的最优安装方法<sup>[11]</sup>。通过已有的相关研究来看,对交通噪声的研究目前已有较为成熟的理论和方法基础,并且建立了各种预测模型,但准确率还有待提升。而对于隧道内交通噪声场的具体分布规律分析,尤其是交通噪声比较集中的中低频段分布规律目前并无较为准确可靠的预测方法。目前在声场计算中用的方法有实测统计法、模态分析法、半无限流体法、有限元法、波动理论、边界元法、结构强度法和统计能量法等<sup>[12-17]</sup>。针对不同的计算要求可以选取相应的方法进行计算,或者采用不同计算理论相结合建立适用的复合模型。另外也有学者通过测试分析数据得出一定的方程模型进行计算<sup>[17-19]</sup>。有限元法和边界元法等求解时,为保证计算精度,应采用不大于波长尺寸 1/6~1/8 的单元网格,因而比较适用于声波波长较大的低频求解问题。统计能量法等则主要用于被分析对象包含子结构多,声振传递路径复杂,既包含振动导致的声场问题,也包含噪声导致的结构振动问题的高频计算。

本文中声场介质为空气,与结构之间的耦合关系可以忽略,因而不宜采用模态分析法。而边界元法适应规则区域及边界条件,解题精度较高,适用于无限域等的求解,但只适合于处理小规模分析,解题的规模受到限制,前后处理工作量较大。当问题的规模(自由度)较大时,如高速公路隧道直径达 10 m 以上的模型,采用有限元法求解具有建模简单、对模型要求不高、结果直观、前后处理简便等优点,尤其是在计算本例中低频声场时,有限元法更为适应。为此,本文针对某高速公路隧道应用有限元模型在 100~1 000 Hz 范围内对点声源作用下隧道内的声场分布进行了研究,给出了点声源作用下隧道内声

场分布的声压级分布云图,并对隧道内的声场分布特性进行分析。

### 1 有限元理论

公路隧道内噪声主要来源于重型货车的发动机噪声及小轿车的轮胎噪声。通过现场测试可知,高速公路隧道内轮胎噪声和发动机噪声集中在 800 Hz 及 500 Hz 这 2 个频段,考虑到这 2 个频段的频率相差较小,实际声压分布差别不大,因而将计算频率范围扩大至 100~1 000 Hz,包含了最主要的交通噪声来源频段,且观察规律更为明显。

本文重点分析公路隧道内噪声声场的分布特性,需要得到较为精细的声压级分布云图,采用有限元法虽然计算工作量大,但是单元划分细致,比较适合隧道内声压分布云图的分析。

对隧道内声场进行声学有限元分析,其本质就是对隧道内的声传播介质空气进行声传播计算。当空气为理想流体时,声传播方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1}$$

式中: $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为隧道的纵向、横向和垂向; $c$  为声音在空气中的传播速度,取 340 m/s; $p$  为声压函数; $t$  为时间。

从而可得到基本的计算方程——Helmholtz 方程为

$$\nabla^2 p + \lambda^2 p = 0 \tag{2}$$

式中: $\nabla^2$  为拉普拉斯算子; $\lambda$  为波数<sup>[20]</sup>。

有限单元法是根据变分原理求解数学物理问题的一种数值计算方法。其本质在于将所需计算的方程离散,变为细致的单元,各单元之间通过单元节点相连,通过计算每个节点上的声压来确定每个单元各自的声场,因而所划分单元的尺寸以及选取的单元类型是至关重要的,将直接影响到模型的计算精度。但单元过于细致、单元节点过于复杂将影响计算效率。本文在平衡精度与效率后选取不大于波长尺寸 1/6 单元尺寸对隧道实体模型进行划分。

在声学中,有限元法就是求解下面的系统方程组

$$[K + i\omega C - \omega^2 M]p = F_A \tag{3}$$

式中: $\omega$  为结构的固有频率; $i$  为阻尼的虚部表示; $F_A$  为节点的声学激励,与边界条件上的法向速度成正比; $K$ 、 $M$ 、 $C$  分别为刚度、质量和阻尼矩阵; $p$  为要求的声压向量。

另一方面,在得出声模态后,通过模态叠加,即可得到声腔的反应

$$p = \sum_{k=1}^m a_k \varphi_k = \varphi a \tag{4}$$

式中: $a$  为模态参与系数; $\varphi$  为由流体模型的特征向量(模态)组成的矩阵; $\varphi_k$  为流体模型第  $k$  个特征向量。

$a$  由下式确定

$$(\varphi(K + i\omega C - \omega^2 M)\varphi)a = \varphi F_A \tag{5}$$

这个方程组要比系统方程简单得多,如果系统没有定义阻尼边界条件,上面方程退化成对角阵的形式。

### 2 声场有限元模型

LMS Virtual Lab 软件<sup>[21]</sup> CATIA 三维建模模块、CAD mesh 网格划分模块,并通过集成 Sysnoise 技术提供了包括有限元(FEM)和边界元(BEM)等声学解决方案,能够独立完成从简单的三维建模、网格划分到声学计算及后处理的一系列求解过程,十分方便。本文中隧道结构较为简单,可直接应用 VL 软件完成全部建模计算过程,如图 1 所示。

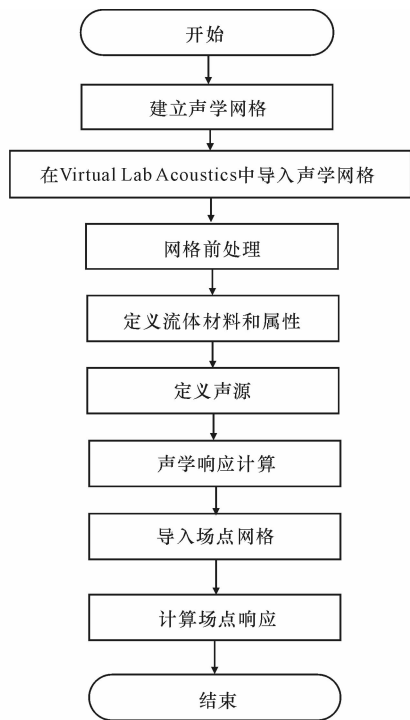


图 1 建模计算流程

Fig. 1 Flow of modeling calculation

本文所依托隧道位于国道 109 新线呼和浩特境内,有分离式隧道 2 座,共 3 847 m(双洞),其中桦树塬隧道长 1 405 m,窑沟隧道长 2 442 m,如下页图 2

所示。建模所选取标准区间隧道部分尺寸如图 3 所示,宽 11 m,高 7.1 m。经过试计算得知,声压级在距隧道口 10 m 范围内会明显衰减(见下文),因而本文模型长度选为 50 m 是比较合适的。



图 2 工程实例

Fig. 2 Field picture

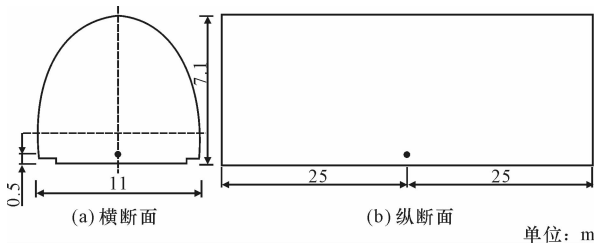


图 3 建模所选取标准隧道尺寸

Fig. 3 Dimensional drawing of the selected tunnel for modeling calculation

建立隧道实体模型见图 4,为保证模拟结果的精确度,单元网格长度应不大于计算波长的 1/6,并尽量采取正四面体网格。本文中计算的最高声源频率为 1 000 Hz,对应的波长为 0.34 m,通过计算可知网格尺寸不能大于 0.056 m。在声学有限元模块(FEM)设置模型相关参数,隧道内声学介质为空气,20 ℃时空气的密度  $\rho_0=0.122\ 5\text{ kg/m}^3$ ,声速为 340 m/s。

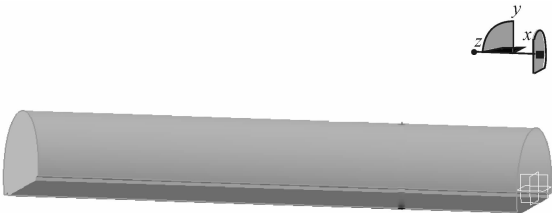


图 4 隧道实体模型

Fig. 4 Model of tunnel entity

在隧道实体外侧生成包围网格(可以理解为实体网格的一层表皮),这一外包络网格可以定义振动边界条件及吸声属性等(见图 5),本文中通过设置

此外包围网格的吸声属性可以模拟隧道壁及路面的吸声属性。本次模拟对隧道壁及公路面设置为不同吸声属性进行了试算(流体材料属性见图 6),发现吸声系数越大,隧道内声场总体声压级降低,且声场紊乱区范围缩小,但对总体分布规律并无大的影响。因而在本文中隧道壁及公路面吸声属性均保持默认,即为全反射壁面,不考虑隧道壁的吸声系数,使

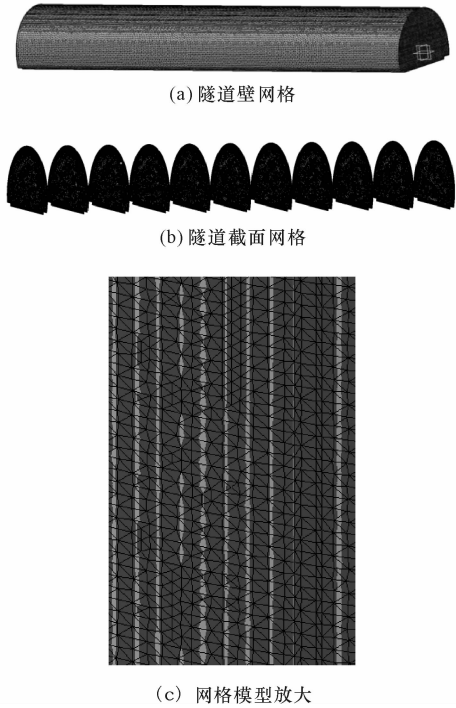


图 5 隧道有限元网格模型及截面场点网格模型

Fig. 5 Model of finite element grid and section field point grid

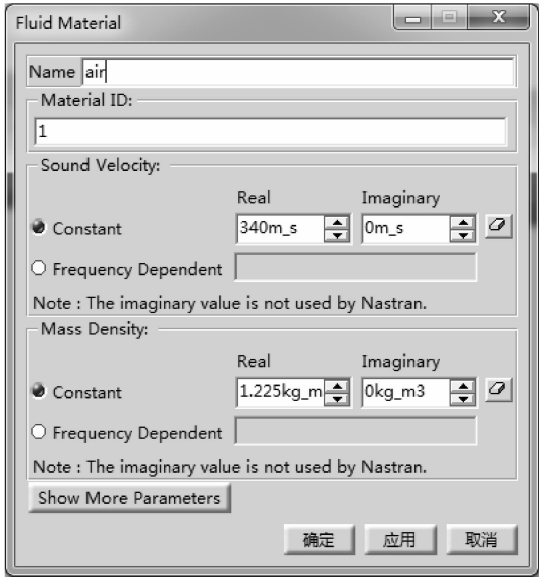


图 6 流体材料属性

Fig. 6 Properties of fluid material

声波在隧道内反射现象更为明显,以便于分析隧道内噪声声场的分布特性。但隧道两端的包络网格应设置为全吸声属性,以模拟声波在隧道两端继续向前传播,并不发生反射的情况,如图 7、图 8 所示。



图 7 隧道两端包络网格

Fig. 7 Envelope grid of two sides of tunnel

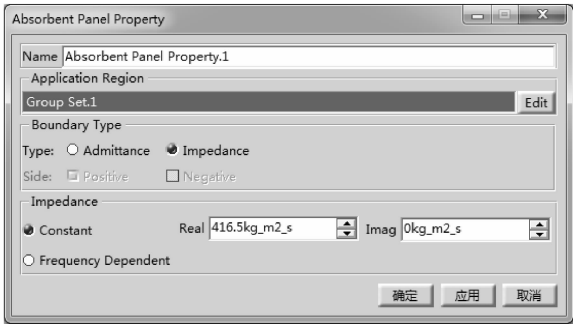


图 8 隧道两端吸声属性

Fig. 8 Sound absorption properties of two sides of tunnel

吸声属性在 VL 软件中是以声阻抗或声导纳来定义的,两者互为倒数,阻抗越大则吸声系数越小。一般认为对于空气,当声阻抗  $Z_p = \rho c = 416.5 \text{ kg/m}^2$  时属于全吸声边界,声波传递到此边界没有反射。本例中隧道内除车辆行驶产生的交通噪声外,还有风机噪声。但隧道内采用的射流风机所产生的噪声频率一般为 180~355 Hz,频率较低,噪声声压级一般不超过 80 dB,而且射流风机都已经在两端加设了消声器。而经实测发现高速公路隧道内汽车发动机、轮胎等产生的交通噪声甚至已经超过 94 dB,频率也集中在 500 Hz 和 800 Hz 这 2 个相对较高的频段,对人耳的影响远高于风机噪声。因而本文建模计算中,对风机噪声未作考虑。本文中模拟的所有工况,计算过程中声源频率设置均为 100~1 000 Hz,步长为 50 Hz。

3 声场计算结果分析

为了便于直观地观察隧道内噪声声场的分布规律,本文模型计算时将声源设为单极子点声源,通过计算得到某一瞬时状态下模型中各点的声压级值。为了便于查看隧道内声压分布情况,在有限元模型内插入截面场点网格,间隔为 5 m,场点网格划分精度与隧道一致,如图 3 中白点处为声源位置。

从计算结果(图 9~图 11)可以看出,声源频率

较低时,隧道内声压级分布不均,会出现整个隧道内明显的声波叠加引起声压增大或消减的区域交错分布的现象。随着声源频率的升高到一定临界值后(即频率达到这一临界值才会体现出较为明显的分布规律,不同结构临界值并不相同,本例中约为 200 Hz,考虑到短时间低频噪声对人听力影响较小,不作为本文重点,未将云图一一列出),隧道内的声场分布出现 2 种区域:声场紊乱区及声场稳定区,且紊乱区的平均声压级较高。

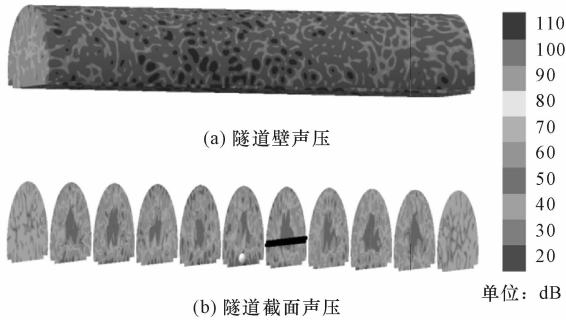


图 9 隧道壁及截面声压级云图(250 Hz)

Fig. 9 Cloud image of sound pressure level (SPL) in tunnel sidewalls and sections (250 Hz)

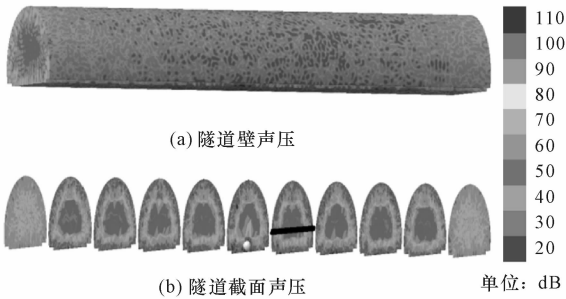


图 10 隧道壁及截面声压级云图(500 Hz)

Fig. 10 Cloud image of sound pressure level (SPL) in tunnel sidewalls and sections (500 Hz)

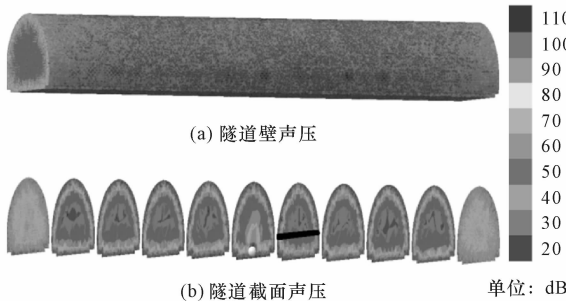


图 11 隧道壁及截面声压级云图(1 000 Hz)

Fig. 11 Cloud image of sound pressure level (SPL) in tunnel sidewalls and sections (1 000 Hz)

在紧贴隧道内壁以及公路面一定范围内出现声场的紊乱区,在这一区域内,由于距隧道壁或地面等反射面较近,声波刚刚完成反射就与直射声波发生叠加,受其他声波的干扰较小,因而反射声波与直射声波的叠加现象非常明显,反映在有限元计算所得声压级云图上则体现为不同颜色的片状区域交错排列。片状区域的颜色越趋于暖色调代表此区域的声压级越大,即直射声波与反射声波在此区域内发生了同相位叠加;反之,冷色调的区域则是直射声波与反射声波在此区域内发生了反相位消减,导致声压级偏低。而在远离隧道壁等反射面后,来自不同方向的反射声波甚至是二次、三次反射声波反复叠加,导致隧道中心区域出现一个声压级相对均匀的声场,此区域内的声压级相比紊乱区的声压级偏低。

为了更好得出声源频率对声场分布的影响,将声源频率分别为 250、500、1 000 Hz 时的计算结果,向距离声源截面 5 m 的截面场点网格上经过隧道圆心的水平线上的声压值提取出来(图 9~图 11 中穿过隧道圆心的水平线位置),做成曲线图形式,如图 12 所示。

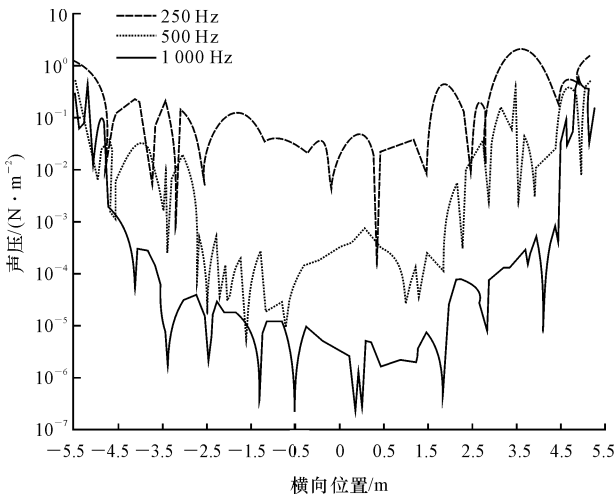


图 12 不同频率时同一水平线上声压值对比  
Fig. 12 Comparison of sound pressure level (SPL) in same horizontal line with different frequencies

在图 12 中,横轴负向表示左侧距隧道拱顶圆心的距离,正向表示右侧距隧道拱顶圆心的距离,从图 12 中可以明显地看出,两侧靠近隧道壁的区域声压值相对中央部位要高,且两侧声压值波动较明显。从 3 条曲线代表 3 个频率的对比可以看出,频率较低时,横轴两侧波动较大的声场紊乱区范围较大,反之频率较高时则较小。

通过对声压级云图和不同频率声压级对比图进行分析可以得出,隧道内声场稳定区与紊乱区的范围是随着声源频率的变化而变化的。当声源频率较大时,波长较小,相应的声场紊乱区范围较小。同时从声压级云图可以看出紊乱区内代表不同声压级值的点状区域面积随声源频率的升高而变小,说明此区域内声波的同相位叠加与反相位消减的间隔是与声波的波长成正比的。同时,随着声源频率的升高,声场稳定区的范围会随之增大。以本例中隧道直径 11 m 计算结果来看,当声源频率从 250 Hz 递增到 1 000 Hz 时,声场紊乱区分布区域为贴近隧道壁及公路面 2.3~0.7 m 的范围递减。从纵向看,在距隧道洞口 5~10 m 范围内声压级降低比较明显,其他位置声压级随隧道纵向变化不大(由于本例中隧道壁及路面吸声属性设置为全反射,因而衰减较小,实际情况中衰减较计算结果要大)。

为了分析声源位置不同时隧道内声场的分布规律,分别在隧道内不同位置布置声源进行了计算(图 13、14、15),分别将声源布置在隧道一侧车道的地面中央。隧道圆心处以及 2 个点声源对称布置。

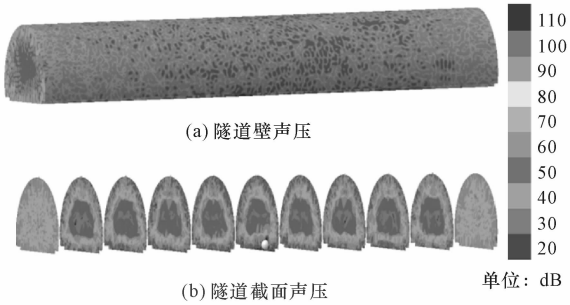


图 13 声源布置在单侧车道的地面中央时声压级分布云图(500 Hz)  
Fig. 13 Cloud image of sound pressure grading when acoustic source is set in middle ground of unilateral lane (500 Hz)

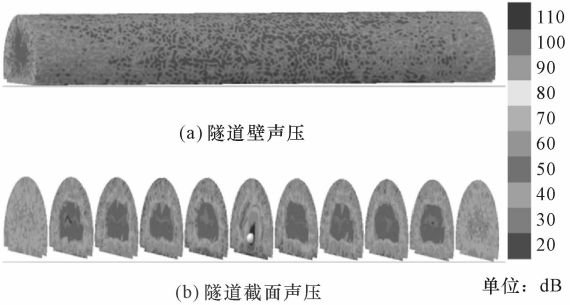


图 14 声源布置在隧道圆心处时声压级分布云图(500 Hz)  
Fig. 14 Cloud image of sound pressure grading when acoustic source is set in circle center of tunnel (500 Hz)

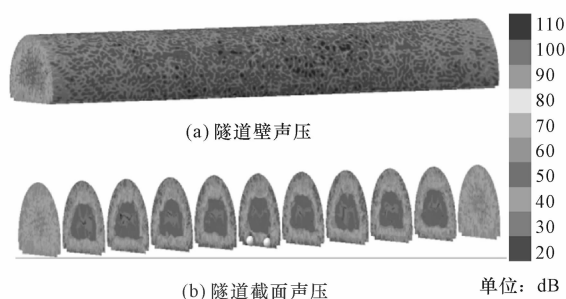


图 15 2 个点声源对称布置时声压级分布云图(500 Hz)

Fig. 15 Cloud image of sound pressure grading on the condition of symmetrical arrangement of two acoustic sources (500 Hz)

对比声压级分布云图可以发现,当声源分别位于不同位置时,声场的分布规律大体相同,均符合上文中所归纳的特点,但在距离声源较近的一定范围内(此范围随声源功率及频率的不同会有有一定变化,功率及频率越大则范围越大,本例情况下约为 5 m)的声场会随着声源的上下左右移动而发生移动,在距离声源较远以后则声场分布并未出现明显不同。另外当声源布置在隧道圆心处时,隧道整体声压级值偏小。通过具体声压数值对比图也可以看出,不同曲线在两侧,即靠近隧道壁附近时,声压分布规律大体相同,但在中间部分距离声源位置较近时,因为声源的布置方式不同,三者的分布有着较为明显的区别。

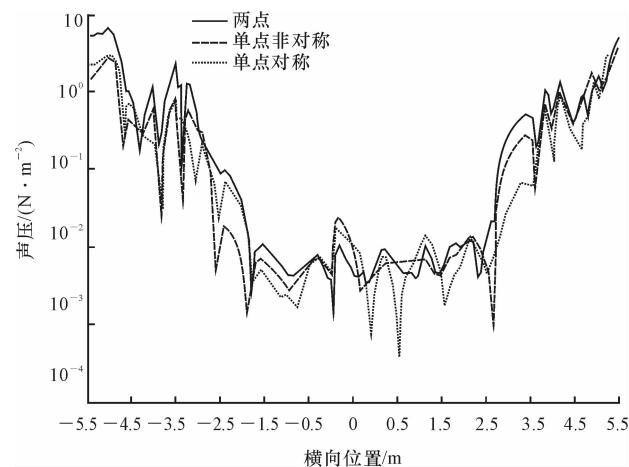


图 16 声源位置不同时同一直线上声压值对比

Fig. 16 Comparison of the sound pressure level (SPL) in the same line with the different locations of the acoustic source

当在隧道内同时布置 2 个声源时,通过声压级云图可以看出,声场的分布仍无较大变化,只是在 2 个声源之间的区域内出现了明显的声场紊乱区,其他区域内的声场分布仍符合上文所述规律。

## 4 结 语

(1)公路隧道内噪声声场分布主要呈现 2 种区域:贴近隧道壁及公路路面呈明显的规律性声压叠加与消减的声场紊乱区域及远离界面的声场稳定区域。紊乱区分布范围与噪声源频率密切相关,声源位置对其影响不大,且这一区域声场并非混乱,而是明显的呈现出声波叠加规律,但声压级会随着声波的传播不断剧烈变化。

(2)本文所做的参数研究仅考虑了声源频率及位置对隧道内声场的影响,对不同结构尺寸与隧道断面形状尚未进行深入研究;对于实际隧道内噪声场为多组不同频率与移动速度下的混合声源情况下隧道内噪声场分布规律还有待于进一步研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] Yang L N, Shield B M. Development of a ray tracing computer model for the prediction of the sound field in long enclosures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 229(1): 133-146.
- [2] Oshino Y, Kono S, Iwase T, et al. Research committee of road traffic noise in the acoustical society of Japan: ASJ prediction model 1998 for road traffic noise[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1999, 55(4): 281-324.
- [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, 30(2): 66-68.  
SHI Li-ming. Method of noise prediction and measures of noise reducing in highway tunnel [J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(2): 66-68. (in Chinese)
- [4] 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(S1): 101-105.  
SHI Li-ming, LUO De-chun, DENG Shun-xi. 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)
- [5] Heutschi K, Rene B. Sound radiation from railway tunnel openings[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2006, 92(4): 567-573, 577.
- [6] 罗威力, 蔡 铭, 刘济科. 矩形截面隧道交通噪声计算机仿真[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 33-37.

- LUO Wei-li, CAI Ming, LIU Ji-ke. Computer simulation of traffic noise in rectangular cross-section tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 33-37. (in Chinese)
- [7] 乔海滨, 黄晓明. 隧道交通噪声数值模拟及调查研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(12): 154-158.
- QIAO Hai-bin, HUANG Xiao-ming. Numerical simulation and investigation of tunnel vehicle noise [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(12): 154-158. (in Chinese)
- [8] Probst W. Prediction of sound radiated from tunnel openings [J]. Noise Control Engineering Journal, 2010, 58(2): 201-211.
- [9] Li K M, Iu K K. Propagation of sound in long enclosures [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(5): 2759-2770.
- [10] Li K M, Iu K K. Full-scale measurements for noise transmission in tunnels [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(3): 1138-1145.
- [11] Lam P M, Li K M. A coherent model for predicting noise reduction in long enclosures with impedance discontinuities [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(3): 559-574.
- [12] 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.
- LING Tian-qing, WANG Rui-yan, 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(13): 20-24. (in Chinese)
- [13] 韩 森, 董雨明, 陈海峰, 等. 露石水泥混凝土路面降噪特性 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 32-34.
- HAN Sen, DONG Yu-ming, CHEN Hai-feng, et al. Noise reduction performance of exposed-aggregate cement concrete pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 32-34. (in Chinese)
- [14] 陈书明, 王登峰, 刘 波, 等. 基于统计能量分析和半无限流体方法的轿车车外噪声预测 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 111-115.
- CHEN Shu-ming, WANG Deng-feng, LIU Bo, et al. Car exterior noise reduction based on statistical energy analysis and semi-infinite fluid method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 111-115. (in Chinese)
- [15] 夏 恒, 宫 镇, 陆森林. 用边界元法计算高速车辆内部气流噪声 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2003, 24(1): 47-50.
- XIA Heng, GONG Zhen, LU Sen-lin. Calculations about interior aerodynamic noise for high-speed automobile by BEM [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003, 24(1): 47-50. (in Chinese)
- [16] 孙玲玲, 宋孔杰. 驾驶室结构声的统计能量分析 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 101-104.
- SUN Ling-ling, SONG Kong-jie. Prediction of structure-borne sound transmission in driver compartment using statistical energy analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 101-104. (in Chinese)
- [17] 陈书明, 王登峰, 宋学伟, 等. 基于 FE-SEA 混合方法的声腔内部噪声预测 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 236-238.
- CHEN Shu-ming, WANG Deng-feng, SONG Xue-wei, et al. Spoke internal noise prediction based on the FE-SEA hybrid method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 236-238. (in Chinese)
- [18] Langley R S. On the diffuse field reciprocity relationship and vibrational energy variance in a random subsystem at high frequencies [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(2): 913-921.
- [19] Jing Y, Larsen E W, Xiang N. One-dimensional transport equation models for sound energy propagation in long spaces: theory [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(4): 2312-2322.
- [20] 刘晓波, 刘 剑. 重载电力机车司机室声振特性分析 [J]. 机车电传动, 2013(1): 39-42.
- LIU Xiao-bo, LIU Jian. Acoustic-vibration characteristics of heavy electric locomotive cab [J]. Electric Drive for Locomotive, 2013(1): 39-42. (in Chinese)
- [21] 李增刚. SYSNOISE5.6 详解 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- LI Zeng-gang. SYSNOISE5.6 Detailed [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)