

文章编号: 1674-599X(2020)01-0076-06

隧道超低频噪音消音原理及消音装置研究

高有湖¹, 耿哲², 陈元培¹, 李树忱², 冯现大³

(1. 山东滨莱高速公路有限公司, 山东 淄博 255200; 2. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250061;
3. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022)

摘要: 城市隧道工程施工过程中产生的噪音会对附近居民造成严重的影响。由于超低频音的穿透力很强, 隔音门和隔音壁等常规消音措施无法有效消除超低频噪音的影响。针对 0~20 Hz 的超低频噪音, 分析其在管道中的传播规律和声波特性, 发现: 在管道中安设空心长管可以对超低频声波进行 2 次消音处理。第一次消音是利用入射声波和反射声波相互干涉、抵消的原理, 并根据管道声波的连续性条件使超低频声波在长管管口发生短路, 阻碍其继续向外传播; 第二次消音是利用声波在变截面管道中传播发生能量衰减的原理, 降低超低频噪音的能量。根据该消音原理, 设计出了一种可移动、抽拉式的超低频噪音消音装置, 可有效消除隧道施工过程中产生的超低频噪音。

关键词: 隧道施工; 超低频音; 声波特性; 干涉; 消音装置

中图分类号: U453.8⁺2 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.013

The study on noise attenuation principle and silencer of ultra-low frequency noise in tunnel

GAO You-hu¹, GENG Zhe², CHEN Yuan-pei¹, LI Shu-chen², FENG Xian-da³

(1. Shandong Binlai Expressway Co., Ltd., Zibo 255200, China;

2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: During the construction of urban tunnel project, the noise generated by construction will have a serious impact on the nearby residents. Since the ultra-low frequency noise penetrating power is very strong, normal silencing measures can't effectively eliminate the effects of ultra-low frequency noise. Aiming at ultra-low frequency tone for 0~20 Hz, the propagation law and acoustic characteristics of ultra-low frequency acoustic waves in a pipeline are analyzed. It is found that the hollow long tube in the pipeline can be used for twice to eliminate the ultra-low frequency sound wave. The first elimination of noise is the principle of mutual interference and cancellation by incident and reflected acoustic waves. Based on the continuity condition of the acoustic wave in the pipeline, the ultra-low frequency acoustic wave is short-circuited at the nozzle of the long pipe. The second elimination of noise is the principle of energy attenuation, when sound waves travel through pipes of varying cross sections. According to the above theory, a movable and pumping type ultra-low frequency noise silencer is designed, which can effectively eliminate the ultra-low frequency noise produced during the tunnel construction.

Key words: tunnel construction; ultra-low frequency sound; acoustic characteristics; interference; noise suppressor

收稿日期: 2019-08-15

基金项目: 齐鲁交通发展集团科技项目(2016B20)

作者简介: 高有湖(1968-), 男, 山东滨莱高速公路有限公司高级工程师。

随着城市交通量的不断增大, 对交通线路的需求也越来越大。许多城市都已经使用或正在修建地铁。修建隧道所采用的施工方法有盖挖法、浅埋暗挖法、新奥法、明挖法和盾构法等。无论采用哪种施工方法, 都无法避免噪音的产生^[1-3]。城市地铁隧道地处城市市内, 有些隧道还会穿越居民区、学校和医院等密集建筑群, 隧道内产生的噪音会给人们的身体健康和和生活质量造成不良影响。人体长时间听到噪音, 不仅有损人的听力, 而且容易引发神经衰弱和内分泌失调等各种疾病。其中, 超低频音对人体的损害极大。它可与人体器官发生共振, 造成器官损伤; 还会引起周边建筑的门、窗震动, 给附近居民的生活带来很大的不便^[4-6]。有效地消除噪音已成为亟待解决的问题。

目前, 许多学者进行了隧道内降噪技术的研究。在隧道内降噪新材料方面, 胡连军^[7]等人根据现有吸声材料及其吸声原理, 提出从轨道系统、机车车辆及隧道结构等多方面考虑的地铁隧道噪声控制体系。黄学辉^[8]等人设计了适用于公路隧道降噪的水泥基膨胀性珍珠岩材料, 并对不同配比下的吸声性能进行了分析。丛卓红^[9]等人设计了抗滑降噪型沥青混合料, 分析了其降噪性能, 并对铺筑试验路段进行了验证。在降噪理论分析与模型实验方面, 史小丽^[10]等人利用缩尺模型对修正的相干模型和不相干模型理论的预测值与实测值进行了对比, 对公路隧道降噪设计进行了优化。张雪峰^[11]等人对隧道内声波传播进行了有限元分析, 研究了点声源条件下隧道内声场的分布特征及声源频率和位置对声场分布的影响。但目前的研究工作大多是针对运营隧道进行降噪消音, 而对于隧道施工过程中的降噪消音研究甚少, 对于消除隧道内超低频噪音的研究更为鲜见。现在隧道施工中的消音降噪装置有消音门和消音墙。该类消音装置对于消除高频噪音具有显著作用, 但对于拥有较强通透力的超低频噪音, 却无法起到令人满意的消音作用。因此, 作者拟研究隧道超低频噪音的消音理论。根据管道内声波的传播特性, 设计出一种消音装置。该装置可以对隧道施工产生的超低频噪音进行 2 次消音处理。第一次消音处理是利用消音装置对掌子面处发出的超低频噪音声波进行反射, 使反射声波与入射声波相互干涉、抵消, 从而起到消音的效果; 第二次消音处理是利用变截面管道的消音原理, 将安装有

消音装置的隧道看作变截面管道, 声波在变截面管道中传播会发生能量衰减, 从而对经过初次消音的噪音声波进行再消音处理, 将消音效果最大化。依据研究理论, 对该消音装置进行可行性改造, 以期作为隧道工程消音提供理论依据和技术借鉴。

1 声波消音原理

1.1 隧道消音的理论假设

为了便于对隧道消音的理论分析和应用, 对声波在隧道中的传播作出假设: ①只考虑平行隧道轴线传播的声波, 对于其他方向的声波不予考虑; ②忽略声波在隧道中传播时的能量损失所带来的影响; ③隧道为理想管道, 隧道内的声波为平面波, 以平面波原理为理论依据; ④只考虑相同频率声波之间的影响。

1.2 隧道消音的原理

根据该理论假设, 对消音原理进行了理论分析。先设计一种理想化的简易消音装置, 如图 1 所示。该装置为一个一端开口、一端闭合的空心长管, 这样既可以有效地反射掌子面传来的噪音声波, 又可以提供消音空间, 同时, 长管结构还能够过滤掉不平行隧道轴线的声波。

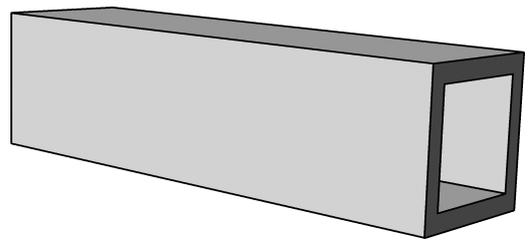


图 1 理想消音的简易装置

Fig. 1 The idealized noise suppressor

将消音装置沿隧道轴线方向摆放, 开口端指向掌子面方向, 作为消音装置的前端。隧道的消音量是该装置闭合端后方测量到的声强与隧道掌子面处的声强二者之间的衰减量, 其计算公式^[12]为:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{I_i}{I_t} \quad (1)$$

式中: ΔL 为隧道的消音量; I_i 为隧道掌子面处声波的强度; I_t 为测量点处声波的强度。

根据声波的基本公式为:

$$I = \frac{P^2}{2\rho v} \quad (2)$$

式中： I 为声波的强度； P 为声波的幅值，即声压； ρ 为介质的密度； v 为声波在该介质中传播的速度。

将式(2)代入式(1)，可得消音量 ΔL 与掌子面处声压 P_i 和测量点处声压 P'_i 之间的关系为：

$$\Delta L = 20 \lg \frac{P_i}{P'_i} \quad (3)$$

以消音装置末端为原点，建立直角坐标系。设隧道消音装置的长度为 l ，隧道掌子面到坐标原点的距离为 L ，如图 2 所示。该装置可以对隧道施工产生的超低频噪音进行 2 次消音处理。首先隧道掌子面处发出的声波在消音装置闭口端发生反射，反射声波与入射声波在隧道内会互相干涉。根据平面波原理——声压连续条件，消音装置开口端干涉后的声波与沿隧道传出的声波的声压大小相等，从而起到初步消音的效果；又因为声波在变截面管道中传播会发生能量衰减，对低频噪音进行了 2 次消音。根据其计算方法，得出消音装置闭合端后方的声压大小，即可求出该装置的理论消音量。

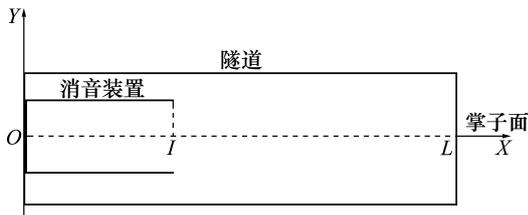


图 2 隧道和消音装置示意

Fig. 2 The tunnel and the noise suppressor

1.2.1 初次消音

将隧道掌子面产生的声波作为入射声波，经过消音装置反射后的声波作为反射声波，由于透射声波极小，因此忽略该声波的透射声波，入射声波与反射声波相互干涉形成了合成声波。根据声压的连续性条件，得到沿隧道传播的声波和声压，分别如图 3,4 所示。

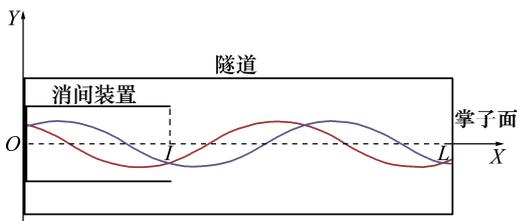


图 3 某一时刻隧道和消音装置的声波示意

Fig. 3 The sound waves of the tunnel and the noise suppressor at a certain moment

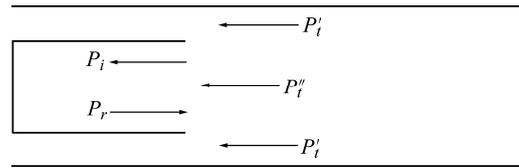


图 4 隧道内声压示意

Fig. 4 The sound pressure in the tunnel

入射声波为：

$$y_1 = P_i \cos \left(\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) \right) \quad (4)$$

反射声波为：

$$y_2 = P_r \cos \left(\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right) \quad (5)$$

合成声波为：

$$y_3 = P'_i \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

$$P'_i = P_i^2 + P_r^2 + 2P_i P_r \cos \left(\frac{2\omega x}{v} \right) =$$

$$P_i^2 + P_r^2 + 2P_i P_r \cos \left(\frac{4\pi x}{\lambda} \right) \quad (7)$$

式中： P_r 为反射声波的声压； ω 为声波的角速度； x 为声波的所处的位置； t 为声波的传播时间； φ 为相位角； λ 为声波的波长。

根据声压连续性条件，在消音装置开口端隧道中声波的声压 P'_i 与合成声波的声压 P'_i 相等，即：

$$P'_i = P'_i \quad (8)$$

由式(4)~(8)的计算可知，合成声波的声压大小只与声波所处的位置有关。当 $x = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 时，隧道中声波的声压 P'_i 最小，最小值为 $P_i - P_r$ 。即：当

$l = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 时，消音装置开口端的声压达到最小值。此时，在消音装置开口端发生强烈的驻波共振，导致该频率的声音被阻断，不再向前传播。但由于消音装置无法完全反射入射声波，且声波在消音装置中传播会发生自然衰减，因此入射声波和反射声波无法完全抵消，即它们的最小值大于零，还有部分声波可以传出。为加大消音效果，可以选择改变消音装置的位置。即：当 $L = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 时，使合成

声波在隧道掌子面处的声压 P'_i 也为最小值。这样就可以改变隧道内部的音场，并进一步增大对该频率声波消音的效果，如图 5 所示。

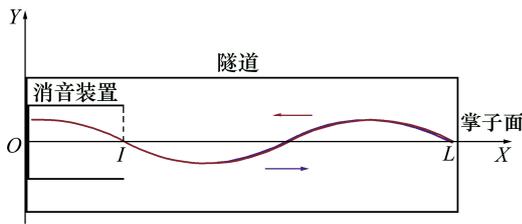


图 5 声压均为最小值时, 隧道掌子面和管口位置示意
 Fig. 5 The sound pressure at the tunnel face and the nozzle when the sound pressure is the minimum

声波在消音管道中传播时会发生自然衰减, 衰减量只与管道尺寸和管道材质有关。因此, 入射声波和反射声波会有固定的衰减量 ΔL_P , 需要对入射声波和反射声波的声压进行衰减处理, 如图 6 所示。

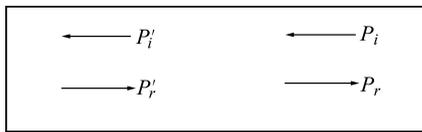


图 6 消音装置内部声压示意
 Fig. 6 The sound pressure inside the noise suppressor

入射声波衰减量与反射声波衰减量的关系为:

$$\Delta L_{P_i} = \Delta L_{P_r} = 1.1 \frac{\alpha}{R_n} l. \quad (9)$$

入射声波衰减量为:

$$\Delta L_{P_i} = 20 \lg \frac{P_i}{P'_i}. \quad (10)$$

反射声波衰减量为:

$$\Delta L_{P_r} = 20 \lg \frac{P_r}{P'_r}. \quad (11)$$

式中: α 为吸声系数(钢板: $\alpha=0.027$); R_n 为管道断面积与管道周长之比; P'_i 为消音装置末端入射声波的声压; P'_r 为消音装置末端反射声波的声压。

根据声波反射的基本原理, 有:

$$\frac{P'_r}{P'_i} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (12)$$

联立式(9)~(12), 可得:

$$\frac{P_i}{P_r} = \frac{P_i}{P'_i} \cdot \frac{P'_i}{P'_r} \cdot \frac{P'_r}{P_r} = e^{\frac{1.1\alpha l}{20R_n}} \frac{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1} e^{\frac{1.1\alpha l}{20R_n}} = e^{\frac{2.2\alpha l}{20R_n}} \cdot \frac{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}. \quad (13)$$

式中: ρ_1 为隧道内空气的密度; ρ_2 为消音装置材料的密度; c_1 为声音在空气中的传播速度; c_2 为声音在消音装置材料中的传播速度。

经过第一次消音处理后, 隧道中声波第一次消音量为:

$$\Delta L_1 = 20 \lg \frac{P_i}{P'_i} = 20 \lg \frac{P_i}{P_i - P_r} = 20 \lg \left[1 - \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1) \cdot e^{\frac{2.2\alpha l}{R_n}}} \right]^{-1}. \quad (14)$$

1.2.2 二次消音

将增设消音装置后的隧道看成突变截面管, 声波在突变界面管中传播会有能量衰减, 从而对超低频噪音进行了 2 次消音, 如图 7 所示。

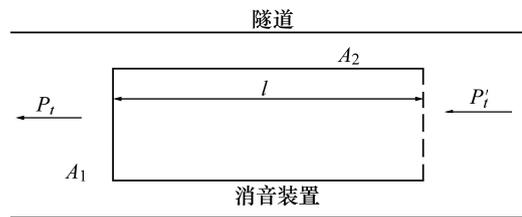


图 7 突变界面管内声压示意

Fig. 7 The sound pressure in an abrupt interface of the tube

根据突变截面管的消音原理, 增设消音装置后声波的强度为:

$$\frac{P'_i}{P_i} = \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{A_1}{A_2} - \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\omega l}{v} \right)} = \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{m^2 - 1}{2m} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\omega l}{v} \right)}. \quad (15)$$

式中: A_1 为隧道总截面积; A_2 为隧道剩余截面积; m 为消音隧道剩余截面积与隧道总截面积的比。

经过第二次消音处理后, 隧道中声波第二次消音量为:

$$\Delta L_2 = 20 \lg \frac{P'_i}{P_i} = 20 \lg \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{m^2 - 1}{2m} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\omega l}{v} \right)}. \quad (16)$$

由式(9)~(16)可求得该消音装置的最终消音量为:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 20 \lg \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{m^2 - 1}{2m} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\omega l}{v} \right)}}{1 - \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1) \cdot e^{\frac{2.2\alpha l}{R_n}}}}. \quad (17)$$

从式(17)可知,消音装置的最终消音量除了受所消除噪音自身属性的影响外,还受到消音装置与隧道截面的面积比的影响。隧道剩余截面积越小,即 m 越接近于0,消音效果越好。鉴于隧道中还有施工通风与隧道排渣运输等需求,需要将该装置与排渣管路和通风管路错开安置,同时,在安置截面合理布设,以确保运输车辆和施工人员的通行顺畅。

经计算和分析可知:消音装置的消音量与消音装置的管道长度、安装位置、材料属性以及覆盖面积有很大的关联。为实现消音效果的最大化,还可采用一些方法。如:①当选取最佳消音装置的管道长度来消除固定频率的超低频噪音。为保证入射声波和反射声波相互干涉形成的声波在消音装置开口端的声压为最小值,管道长度必须为该频率声波 $1/4$ 波长的奇数倍,从而使该频率声波在管口位置,无法传出隧道。②合理选择安放位置。为达到最理想的消音效果,通过改变消音装置的位置,确保隧道掌子面处声压也为最小值,利用改变隧道内音场的方法进一步提高消音效果。③采用优质的消音材料,尽可能增大消音装置的覆盖面积。根据工程需要和工程实际条件,选择性价比较高的消音材料和适当的覆盖面积,进一步提高消音量,这种改进方法对于不同频率的超低频音都有效果。

2 消音装置的设计

结合理论分析和工程实际,设计一种在隧道施工时可用的超低频噪音消音装置。该装置需要满足的条件有:①当消音装置的管道长度为所要消除低频噪音 $1/4$ 波长的奇数倍时,可以对该频率的噪音起到最大的消音效果。因此,为了消除不同频率的超低频噪音,要求消音装置的管道长度可以变化。②通过改变消音装置的安放位置、增大覆盖面积和采用优质的消音材料等方法,使消音效果最大化。因此,消音装置必须是可以自由移动的。隧道空间有限,消音管不能影响隧道的正常施工,消音装置的覆盖面积要适中。根据工程需要,选用合适的材料来制作消音装置。

超低频噪音消音装置包括:消音管主管、消音管副管、车轮、导向轮、把手和刹车装置,如图8所示。

消音管为可抽拉式的双层结构,分消音管主管和消音管副管。消音管副管安装在消音管主管内部。

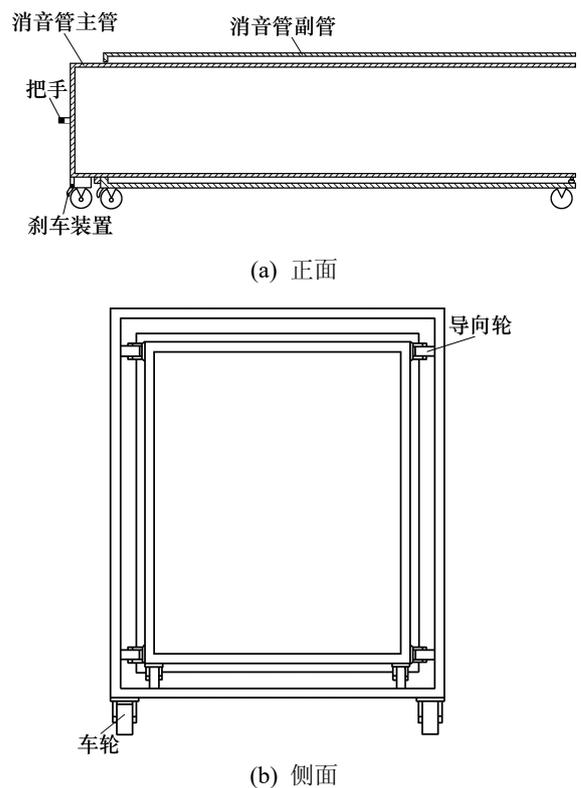


图8 隧道消音装置

Fig. 8 The tunnel noise suppressor

管体均为空心长方体。消音管主管两端开口;消音管副管一端开口,一端闭合,且闭合端设有抽拉把手。根据要消除的超低频噪音的频率,通过抽拉把手改变消音装置的管道长度,从而提高消音效果。

消音管主管前、后各装有一组车轮,后端装有一组车轮,消音管主管后车轮和消音管副管车轮处均设有刹车装置。车轮的目的是用于消音装置在隧道中的移动,消音管副管的车轮一方面起到方便抽拉的作用,另一方面起到支撑作用。消音管副管前端外围装有导向轮,方便消音管副管的抽拉,防止发生卡壳现象。

根据实际工程中隧道截面的大小,布设截面合理的消音装置,如图9所示。在不影响正常施工的前提下,最大化地消除隧道中产生的超低频噪音。

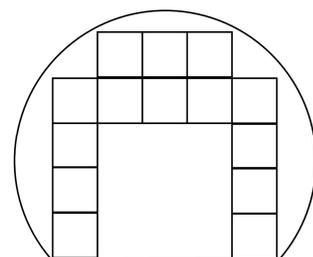


图9 隧道消音装置的合理布设

Fig. 9 The reasonable layout of the tunnel noise suppressor

该装置具有占地面积小、操作简单、作用明显及针对性强的特点, 可有效消除隧道施工产生的低频噪音, 大幅降低低频噪音给周围居民的健康和生活造成的不良影响。

3 结论

通过对超低频噪音的声波特性和传播规律的理论研究, 设计一种理想化的消音装置, 以安装有消音装置的管道为物理模型, 分析了消音装置对超低频噪音的消音原理和影响因素。得出的结论为:

1) 该装置对超低频噪音进行了 2 次消音。第一次消音是利用入射声波和反射声波相互干涉、抵消的原理, 并根据管道声波的连续性条件, 使超低频声波在长管管口阻碍其向外传播。第二次消音是利用声波在变截面管道中传播发生能量衰减的原理, 将增设消音装置后的隧道看成突变截面管, 超低频声波通过消音装置时会发生能量衰减, 从而起到 2 次消音的效果。

2) 影响超低频噪音消音的因素有: 消音装置的管道长度、安放位置、覆盖面积以及所用材质。通过改变消音装置的管道长度, 选择消除固定频率的超低频噪音; 通过改变消音装置的安放位置、增大覆盖面积和采用吸声系数较小的材料可以进一步提高消音效果。

3) 根据消音理论分析, 设计了一种在隧道施工时可用的超低频噪音消音装置。该装置采用抽拉式结构, 通过调整管道长度来消除不同频率的超低频噪音; 装置底部装有车轮, 移动方便快捷。同时, 该装置具有占地面积小、操作简单、作用明显及针对性强的特点, 能够在不影响隧道正常施工的前提下起到良好的消除超低频噪音的效果。

参考文献(References):

- [1] 黄宏伟. 城市隧道与地下工程的发展与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2001, 21(4): 311-317. (HUANG Hong-wei. Development and prospect of urban tunnel and underground engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2001, 21(4): 311-317. (in Chinese))
- [2] 孙钧. 岩土力学与地下工程结构分析计算的若干进展[J]. 力学季刊, 2005, 26(3): 329-338. (SUN Jun. Recent development on the computation techniques of geomechanics and underground structures[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(3): 329-338. (in Chinese))
- [3] 张前进, 武科, 崔帅帅, 等. 新建隧道下穿既有地铁爆破施工数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3): 41-48. (ZHANG Qian-jin, WU Ke, CUI Shuai-shuai, et al. Numerical simulation of blasting construction of the newly-built tunnel below the existing subway[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3): 41-48. (in Chinese))
- [4] 马建, 孙守增, 赵文义, 等. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65. (MA Jian, SUN Shou-zeng, ZHAO Wen-yi, et al. Review on China's tunnel engineering research: 2015[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 1-65. (in Chinese))
- [5] 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 Zhi-jian, QUE Xiu-ming. Highway tunnel noise reduction case studies[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(2): 244-246. (in Chinese))
- [6] 周显鹏, 刘朝晖, 熊征, 等. 聚合物改性水泥路面抗滑降噪施工技术分析[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 179-183. (ZHOU Xian-peng, LIU Zhao-hui, XIONG Zheng, et al. Analysis of anti skid and noise reduction construction technology of polymer modified cement pavement[J]. Highway Engineering, 2018(3): 179-183. (in Chinese))
- [7] 胡连军, 杨吉忠, 于翔麟, 等. 城市地铁吸声降噪分析及工程措施概述[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(8): 111-115. (HU Lian-jun, YANG Ji-zhong, YU Xiang-lin, et al. Analysis of sound absorption and summary of engineering measures in urban metro[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(8): 111-115. (in Chinese))
- [8] 黄学辉, 尚福亮, 薛红亮, 等. 公路隧道降噪用吸声材料的研制[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(4): 27-30. (HUANG Xue-hui, SHANG Fu-liang, XUE Hong-liang, et al. Development of the sound absorption material used for noise reduction in the highway tunnel[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(4): 27-30. (in Chinese))
- [9] 丛卓红, 王莎, 郑南翔, 等. 抗滑降噪型隧道沥青混合料设计[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 36-41. (CONG Zhuo-hong, WANG Sha, ZHENG Nan-xiang, et al. Asphalt mixture design with anti-skidding and low noise performance in tunnel pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 36-41. (in Chinese))
- [10] 史小丽, 王选仓. 公路隧道内降噪优化设计[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 420-424. (SHI Xiao-li, WANG Xuan-cang. Design optimization for reduce noise inside highway tunnels[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(2): 420-424. (in Chinese))
- [11] 张雪峰, 魏庆朝, 赵泽鹏, 等. 高速公路隧道内噪声声场分布特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(6): 131-138. (ZHANG Xue-feng, WEI Qing-chao, ZHAO Ze-peng, et al. FEM-based study on distribution characteristics of noise field in highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(6): 131-138. (in Chinese))
- [12] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬, 等. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001. (DU Gong-huan, ZHU Zhe-min, GONG Xiu-fen, et al. Acoustics foundation[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001. (in Chinese))