

地下站台内轮轨滚动噪声的传播特性及其降噪措施

高亮, 曾钦娥, 侯博文, 费琳琳

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为分析轮轨滚动噪声作用下地下站台的声场特性, 基于几何声学法建立了全尺站台三维声学仿真模型, 首先利用有限元一边界元法计算得到了列车进站时引起的轮轨滚动噪声, 并以此作为地下站台声学仿真模型的声源输入, 研究了轮轨滚动噪声作用下地下车站站台内的声场分布及传播特性。在此基础上, 进一步分析了轨行区吸声材料的敷设位置及敷设长度对站台区降噪效果的影响规律。研究表明, ①列车驶入站台过程中, 站台噪声最显著区域为进站端靠行车侧距站台门6m范围内, 沿站台纵向及横向逐渐减小, 至出站端轮轨滚动噪声的影响较小, 其中列车1节车厢进入车站范围时站台区噪声最大, 进站端A计权声压级最大值达到83.1 dB(A); ②在轨行区站台板下部墙面及侧墙面同时敷设砂岩吸声板可取得较好的降噪效果, 站台区进站端降噪量可达到2.9~5.3 dB(A); ③将吸声材料的敷设范围沿站台两侧延伸10m至隧道区间内, 站台区进站端的降噪量可提高至6.1~7.9 dB(A), 尤其是当列车靠近站台但仍运行于隧道内时, 但继续延长敷设长度对站台区降噪效果的提高不明显。

关键词: 轨道交通; 地下站台; 轮轨滚动噪声; 声场分布; 降噪效果

中图分类号: TB533; U291.69

文献标志码: A

Analysis of Propagation Characteristics and Noise Reduction Measures on Underground Platform from Wheel-Rail Rolling Noise

GAO Liang, ZENG Qin'e, HOU Bowen, FEI Linlin

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

Abstract: In order to analyze the sound field distribution of subway underground platform from wheel-rail rolling noise, a three-dimensional full-length acoustic model of platform was established based on the geometric acoustic method. The wheel-rail rolling noise while the train was passing was calculated using the finite element method and boundary element method and it worked as the source

of the platform acoustic model. The sound field distribution and propagation characteristics of the platform from wheel-rail rolling noise were studied. Based on which, the noise reduction effect of using sound-absorbing materials was analyzed, including the laying positions and lengths of absorbing materials. The results show that with a train entering, the most notable regions of noise on the platform are at the train-arriving end and 6m away from the platform gate of the passing side in lateral, and the noise is gradually reduced along longitudinal and lateral. The effect of rolling noise on the train-leaving end is small. The noise on the platform is most remarkable when only one train pulls into the station. The A-weighted overall sound pressure level reaches 83.1 dB (A). Besides, the cases that sound-absorbing materials covered both on the vertical wall of the niche under platform and side wall opposite the platform alongside the track area can achieve a good noise reduction effect. The noise reduction at the platform train-arriving end can reach 2.9~5.3 dB (A). Moreover, the noise reduction at the platform train-arriving end can reach 6.1~7.9 dB (A) with the sound-absorbing materials laying area extending into the tunnel about 10m, especially when the train is near the platform but still in the tunnel. But the effect will not be improved obviously if the laying length continues to be extended.

Key words: subways; underground platform; wheel-rail noise; sound distribution; noise reduction effect

近年来,随着城市轨道交通快速发展,对轨道交通的运营需求从安全、快速逐渐向提高环境舒适度发展,噪声作为环境舒适度的一个重要指标,也成为人们重点关注对象。车站作为轨道交通的重要组成部分,其噪声在列车进、出站时显著增大,研究表明列车进、出站过程站台的等效A声级最大可达

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201104); 国家自然科学基金(51827813, U1734206)

第一作者: 高亮(1968—),男,教授,工学博士,主要研究方向为轨道工程与工务管理。Email: lgao@bjtu.edu.cn



论文
拓展
介绍

80dB(A)以上^[1]。地下站台是狭长封闭空间结构,高噪声环境更容易引起乘客及工作人员的烦躁、胸闷等症状,同时也会降低站台内广播传输至乘客的语音清晰度^[2-3],因此,有必要对地下站台声场的预测及控制措施展开研究,以提高站台环境舒适度。

列车进、出站时,站台噪声的声源主要包括轮轨滚动噪声、辅助设备噪声、制动啸叫噪声等,其中轮轨滚动噪声是主要作用声源^[4],频率分布在400~4 000Hz范围内。目前,针对轮轨滚动噪声的预测研究展开了较多的工作,取得了丰富的成果^[5-8],杨新文^[7]应用车辆-轨道耦合动力学理论和声辐射理论建立了轮轨滚动噪声预测模型,分析了轮轨滚动噪声特性,表明钢轨辐射噪声主要频率范围为500~2 000Hz,车轮辐射噪声主要频率范围为1 600~4 000Hz,道床板辐射噪声频率范围为125~4 000Hz。崔日新等^[8]采用有限元与边界元相结合的方法建立了阻尼钢轨振动辐射噪声模型,分析了高速轮轨力作用下阻尼材料、结构参数对阻尼钢轨声辐射特性的影响。针对地下站台噪声,Tang等^[9]采用声学有限元法分析了20~200Hz低频噪声作用下站台的声场分布。Zuhre等^[10]采用声学分析软件ODEON,以经验公式计算得到的列车通过噪声作为声源,分析了站台层的混响时间、语音传输指数的分布。黄旭炜等^[11]采用有限元法建立了有限长度站台噪声预测模型,分析了道床吸音板及站台门吸音膜对站台噪声的降噪效果,表明轨道区全铺吸音板可达到1.5~5.2dB的降噪效果,刘玮^[12]对地铁隧道区间梯形轨枕上铺设轨道吸音板后,隧道内的降噪量可达到3.9dB(A),但其降噪效果易受轨道结构形式、第三轨及排水沟的位置影响。Shimokura R等^[13-14]采用试验与仿真结合的方法,研究了站台尺寸及站台建筑表面应用吸声材料等措施对站台区声环境质量的改善效果,主要分析了对语音清晰度、混响时间及声压级等参数的影响。综上所述,现有对站台噪声的研究通常将声源及站台空间进行简化模拟,未考虑轮轨滚动噪声的声源特性,且地下车站轨行区和站台空间均为长空间结构,声音在其内部的传播特性与自由场和扩散场条件下不同。

本文针对轮轨滚动声源作用下地下站台噪声,基于几何声学法建立站台全尺三维声学仿真模型,首先采用声学有限元-边界元法计算列车进站时引起的轮轨滚动噪声,以此作为地下站台声学仿真模型的声源输入,分析轮轨滚动噪声作用下地下站台区声场分布。在此基础上,研究轨行区敷设吸声材

料对站台噪声的控制效果,分别对轨行区吸声材料敷设位置及敷设长度进行分析。

1 地下站台轮轨滚动噪声声学预测模型

1.1 轮轨滚动声源预测

针对轮轨滚动噪声的计算,采用文献[13]中有限元-边界元相结合的方法对轮轨滚动噪声源进行预测。采用Thompson^[6]提出的荷载激励模型求解轮轨相互作用力,其荷载表达式为 $F=R/(\alpha_r+\alpha_w+\alpha_c)$,式中, R 为轮轨联合粗糙度谱, α_r 、 α_w 、 α_c 分别为轨道导纳、车轮导纳和轮轨接触导纳,轨道导纳和车轮导纳分别由有限元模型施加单位荷载力计算得到,接触导纳按文献[6]方法,车轮静载取70kN,计算得 $0.746 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$ 。轨道结构和车轮有限元模型如图1所示,其中,轨道结构为国内某城市轨道交通线路典型整体道床结构,其中,钢轨为我国标准60轨,轨道板长、宽、高为48m、4.2m、0.3m,扣件为DT VI 2型扣件,扣件间距为0.6m,车轮采用我国城市轨道交通B型列车LM车轮,直径为0.84m,车轮和轨道结构模型参数如表1所示。为考虑列车多轮对的约束作用引起的转向架范围内钢轨局部弯曲振动^[15],模型中按照列车轴距沿钢轨布置转向架的4个车轮,车轮采用质量单元mass21简化模拟,质量为750kg,车轮与钢轨之间采用弹簧单元连接,弹簧刚度为轮轨接触刚度。基于实测钢轨和车轮表面粗糙度,考虑轮轨接触滤波作用计算轮轨联合粗糙度谱 R ^[16-17],钢轨和车轮表面粗糙度如图2所示。

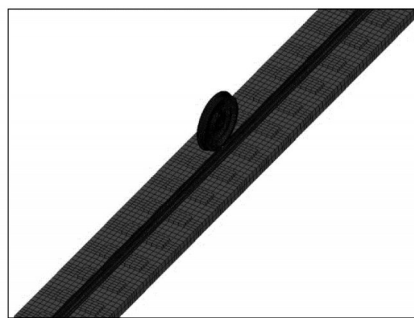


图1 车轮和轨道三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model of wheel and track

基于边界元法建立轮轨振动-声辐射模型,其中空气介质声速为 $340 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,密度为 $1.225 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。基于车轮和轨道结构三维有限元模型,以计算所得的

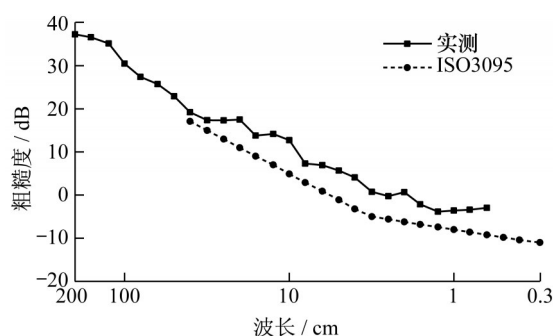
轮轨相互作用力为荷载激励,计算列车荷载作用下轮轨振动响应,以此轮轨振动响应作为声学边界元模型的输入,计算轮轨振动辐射噪声,仿真频段为200~4 000 Hz,频率间隔取10 Hz。为满足轮轨滚动声源的高频范围内声学网格的计算需求,有限元及

边界元的网格尺寸不得大于1/6倍的波长,单元网格尺寸取为0.012 m,网格密度大势必会引起计算代价的增大,因此,为了提高计算效率,计算时仅考虑了1/2模型,在轨道中心线界面处设置对称边界。

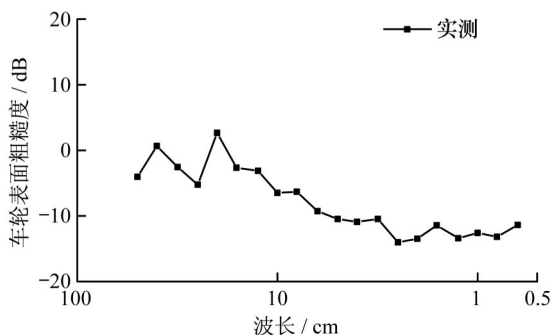
表1 车轮及轨道模型参数

Tab.1 Model parameters of wheel and track

部位	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/(N·m ⁻²)	
车轮	7 850	0.3	2.10×10 ¹¹	
钢轨	7 850	0.3	2.10×10 ¹¹	
轨道板	2 500	0.2	3.60×10 ¹⁰	
部位	垂向刚度/(MN·m ⁻¹)	垂向阻尼/(N·s·m ⁻¹)	横向刚度/(MN·m ⁻¹)	横向阻尼/(N·s·m ⁻¹)
扣件	60	1.00×10 ⁴	50	1.00×10 ⁴



a 钢轨表面粗糙度



b 车轮表面粗糙度

图2 轮轨表面粗糙度

Fig. 2 Roughness of rail and wheel

1.2 地下站台轮轨滚动噪声声学预测模型

针对车站站台狭长大型空间结构及轮轨滚动噪声中高频特性,采用几何声学法对车站站台空间噪声进行模拟。根据几何声学法的理论,将声波等效为沿不同方向传播的声线,在车站空间内沿直线传播,当声线遇到结构界面(墙体、站台门等)时,声能量发生反射和散射,声传播路径如图3所示,声线经界面反射后的声能量取决于各界面的吸声系数和界面反射条件,当反射后的携带的声能量小于给定能量限值时,该声线停止传播。半径为 r 的球面声源辐射总平均能量 Q 的公式为:

$$Q = 4\pi r^2 \cdot I = \frac{2\pi |A|^2}{\rho_0 c_0} \quad (1)$$

式中, A 为脉动球源的声压振幅, I 为声强, ρ_0 为空气密度, c_0 为声速。

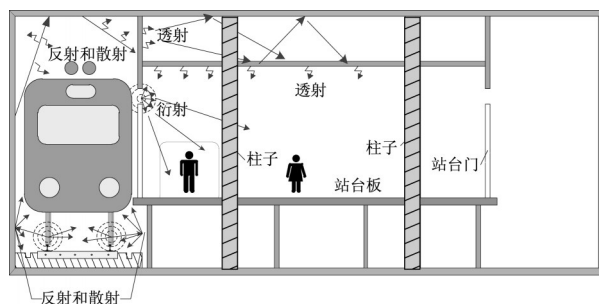


图3 地下站台轮轨滚动声源-站台声传播路径示意

Fig. 3 Schematic diagram of acoustic transmission path of wheel-rail noise source to platform at underground platform

每条射线的声能量为 $Q_j = Q/N$, N 为射线数量。界面声强可通过计算声线所到达的能量获得:

$$I_{\omega,i} = \frac{1}{S_i} \sum_j Q_j (|R|^2 + 2|R|\cos(\arg R) + 1) \quad (2)$$

式中, i 表示第 i 个边界单元, S_i 为边界单元的面积, j 表示第 j 根射线, Q_j 表示第 j 根射线的声功率, R 为反射系数,根据 $\sqrt{1-\alpha}$ 计算, α 为吸声系数。

边界面上的声压级可通过以下计算公式获得:

$$L_{p,i} = 10 \lg \left(\frac{\rho_0 c_0 I_{\omega,i}}{p_0^2} \right) \quad (3)$$

根据某地铁地下站台结构设计图,采用COMSOL软件建立了全尺寸站台三维声学仿真模型,模型由列车、轨行区、站台板、站台门、柱子、两端设备间、办公区及站台扶梯组成,站台层布局示意图如图4a所示。模型中站台区长度为120 m,宽度为15 m,高度按照站台实际吊顶高度为3.0 m,轨行区

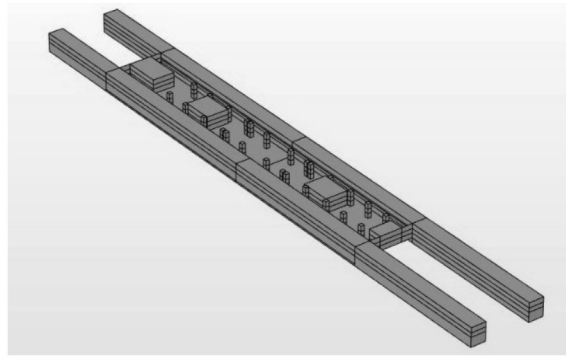
宽度为4.2m。为了考虑车厢结构表面对声源的反射作用,在轨行区内按照实际运行的B型列车尺寸(车厢宽度2.8m,长度19.5m,高度3.8m)简化为矩形车厢边界,车厢底板位置为站台板以下1.05m。轨行区两端分别向隧道内延长50m,并将隧道孔边界面设置为完全吸收界面,以消除人工截断边界反射作用的影响。轨行区各表面为素混凝土表面,站

台板地面、柱子表面及两端设备间的表面均为瓷砖贴面,吊顶为铝板格栅结构,各结构界面的吸声系数如表2所示。模型如图4b所示,声源声线数为7000根,声线终止声功率为 $1 \times 10^{-10} \text{W}$,网格尺寸为0.8m,单元总数量为137133个。

以计算所得的轮轨滚动噪声作为模型声源输入。为模拟列车进站过程某瞬间的辐射噪声,将轮



a 站台层平面布局示意



b 站台层噪声仿真三维模型

图4 车站站台层几何模型

Fig. 4 Geometry model of station platform

轨滚动辐射噪声等效为点声源^[18],考虑4节列车编组长度,车轮点声源共32个,钢轨点声源32个。

表2 结构界面吸声系数^[19]

Tab. 2 Sound absorption coefficient of structure interface^[19]

频率/Hz	瓷砖	素混凝土	扶梯	站台门	铝片
125	0.01	0.01	0.05	0.35	0.29
250	0.01	0.01	0.05	0.25	0.16
500	0.01	0.02	0.05	0.18	0.10
1 000	0.02	0.02	0.06	0.12	0.10
2 000	0.02	0.02	0.04	0.07	0.15
4 000	0.02	0.05	0.02	0.09	0.18
8 000	0.02	0.06	0.02	0.09	0.20

1.3 模型验证

为保证模型的可靠性,首先对轮轨滚动声源计算结果的准确性进行了验证。将轮轨噪声的计算结果与实测得到的相同线路正线区间内的轨旁噪声结果进行对比,其中车速为 $65 \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,测点位置为轨旁距离中心线1.1m处,高度与轨面高度一致,结果如图5所示。从图中可以看出,虽然在低频段计算结

果与实测结果存在一定的差异,这主要是由于列车实际运行过程中还包含了车辆设备噪声、空气动力噪声等其他噪声,但整体上计算声压级结果与实测声压级结果的大小及随频率变化趋势基本一致。因此,本文建立的轮轨滚动噪声模型是比较可靠的,可用于站台噪声模型的计算分析。

为验证站台轮轨滚动噪声声学预测模型的可靠性,选取与仿真车站结构尺寸一致的原型车站进行站台噪声测试,其中,站台噪声测点位于进站端,距站台进站端端墙15m,距站台门1.5m,距地面高度1.6m,声压传感器朝向列车运行方向,现场传感器布置如图6a所示。根据现场测算,列车进站时第1、2节车厢通过测点的车速约为 $40 \sim 50 \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,因此以 $45 \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下的轮轨滚动噪声作为输入,站台噪声进站端测点的预测结果和实测结果如图6b所示。由于列车进站过程中,声压级随时间瞬态变化,因此,取列车进站初期10s内每1s的1/3倍频程结果绘制成包络图表示列车进站过程中声压级频率

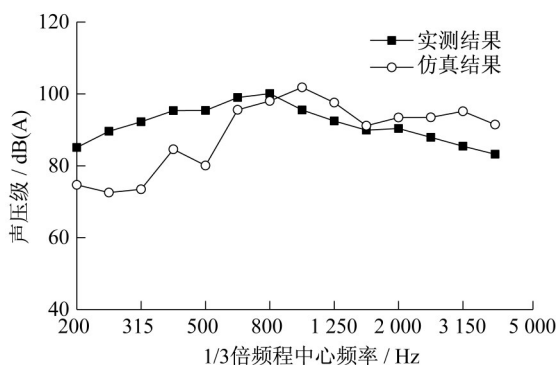


图5 $65\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度下轮轨噪声计算结果与实测结果对比
Fig. 5 Wheel-rail noise comparison of calculated results with measured results at a speed of $65\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$

分布。从图中可以看出,在500Hz以上,预测结果处于实测结果包络范围内,且随频率变化的趋势基本一致,在中心频带630~1 000Hz附近出现较大值。在200~400Hz范围内预测结果小于实测结果,这是由于实测噪声结果中还包含列车气动噪声、列车机电设备和空调设备的运转噪声,而本文仅考虑了轮轨滚动声源。由图6对比结果可知,本文所建立的地下站台轮轨滚动噪声声学预测模型是较为准确可靠的。

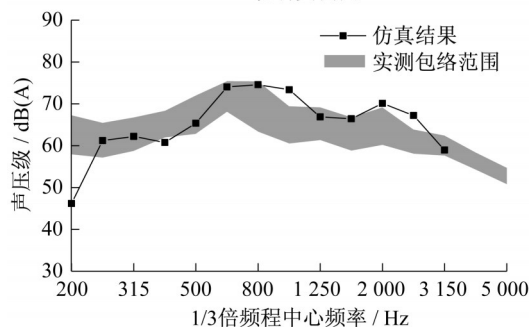
2 地下站台声场分布特性

2.1 站台噪声分布

为分析列车进站过程轮轨滚动噪声作用下站台噪声分布特性,由于双侧同时存在列车运行时可考虑为2个单侧列车轮轨滚动噪声的叠加,因此,本文仅考虑车站单侧列车运行工况。将列车进站过程简化为3种工况:列车位于隧道内(即列车车头距进站



a 现场实测图



b 模型验证结果

图6 站台噪声预测结果和实测结果对比

Fig. 6 Platform noise comparison of simulated and measured results

端端墙-5m,为方便描述,简称“0节车”)、列车进入车站长度为1节车长(简称“1节车”)以及列车进入车站长度为3节车长(简称“3节车”)时3个位置,列车运行位置及列车编组情况如图7所示。根据列车进站的减速度计算列车运行至不同位置时的速度,减速度按照地铁设计规范^[20]取值为 $0.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,3个位置的列车速度分别近似取为 $50\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $45\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $35\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。利用建立的地下站台轮轨滚动噪声声学预测模型,计算得到列车运行至3个位置时站台区域声压级分布,取距站台地面高1.6m的平面进行站台平面声场分析,结果如图8所示。

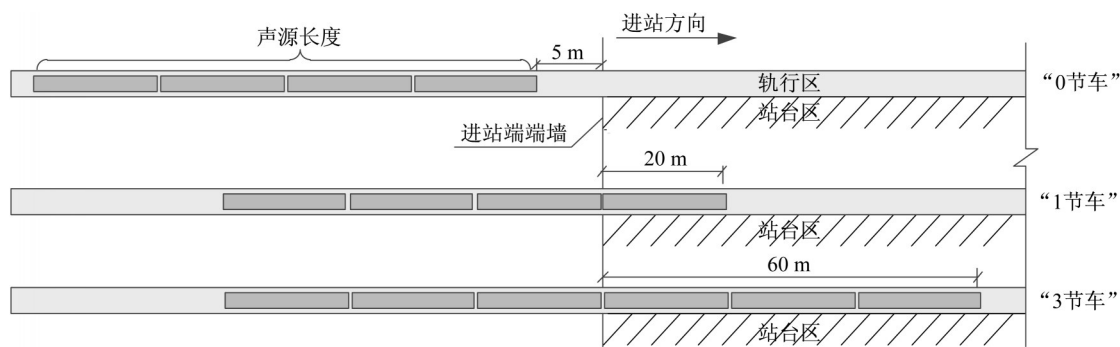


图7 列车运行位置示意

Fig. 7 Schematic diagram of trains position

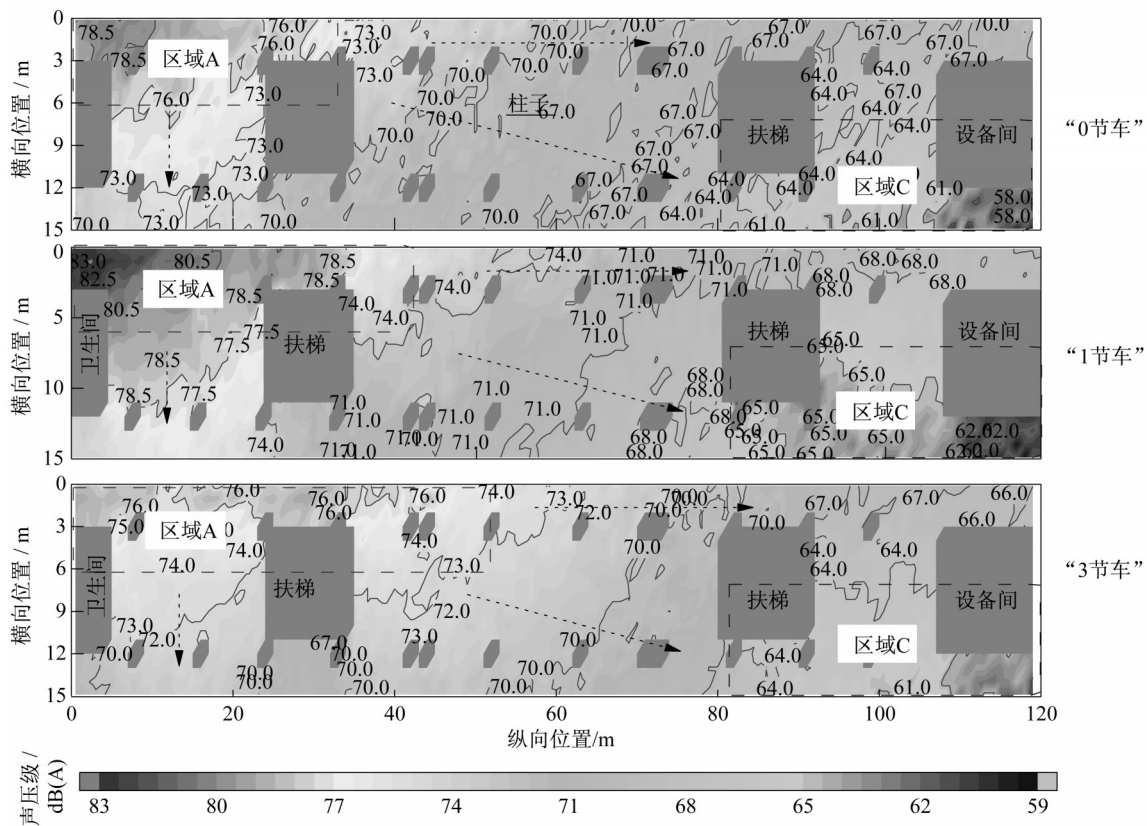


图8 列车运行至不同位置站台区声压级分布云图

Fig. 8 Platform sound pressure level distribution map with trains at different positions

由图8可知,单侧列车运行至3个不同位置时,“1节车”工况下轮轨滚动声源对站台噪声环境的影响最显著,站台进站端端部靠行车侧的声压级最大值为83.1dB(A),相比“0节车”工况声压级增大了3.6 dB(A),随着列车继续进站,列车速度降低,轮轨滚动声源声压级逐渐减小,站台端部最大声压级为77.9dB(A),相比“1节车”工况减小了5.2 dB(A)。

轮轨滚动噪声对站台不同区域噪声的影响差异显著,在列车进站端靠行车侧横向距站台门6m范围内,如图8所示区域A,轮轨噪声影响显著,总声压级在3dB(A)范围内变化,其中,“1节车”的声压级为78.5~83.1 dB(A)。轮轨滚动噪声显著影响区域纵向范围随列车运行位置的变化而变化,其中,“1节车”的纵向显著影响范围为40m。轮轨滚动噪声对站台其他区域的影响由显著影响区域沿站台纵向、横向逐渐减小,从区域A向区域C呈阶梯式下降趋势,如图8所示箭头方向,至出站端时噪声影响较小,出站端区域C的声压级在60~67dB(A)内,与所测站台背景噪声值54~64dB(A)^[21]大小相当,基本融入站台背景噪声,轮轨滚动声源对该区域影响较小。另外,站台区域扶梯两侧的声压级差值约为

3dB(A),说明大型扶梯对轮轨滚动声源在站台内的传递具有一定的隔声和吸声作用。

2.2 站台噪声传播特性研究

为进一步分析列车进站过程中轮轨滚动噪声在站台内的传播规律,以轮轨滚动噪声影响最显著的“1节车”工况为研究对象,分析噪声沿站台纵、横向的变化规律,测点选取位置如图9所示,其中,纵断面各测点距离站台门1.5 m,测点纵向间距为1.0m;各横断面分别位于站台进站端、站台中部、出站端,距进站端端墙纵向距离分别为15m、60m、105m,各点横向间距为1m,如图9所示,测点1、测点2、测点3为横断面与纵断面的交叉点,代表站台不同区域的典型位置。

由图10a纵向分布规律可知,沿列车行进方向,随着距进站端端墙距离的增大,整体呈线性减小趋势,至出站端减小约14dB(A)左右,测点1、测点2和测点3的声压级分别为80.6、72.0、67.6 dB(A)。但在不同区域内噪声值存在一定的放大,其中,在扶梯侧形成了明显的凸起,扶梯侧边放大约0.9~2.0dB(A),这是由于扶梯侧面将此范围内隔成2.5m宽的区域,反射作用加强;在站台出站端20m范围内,由

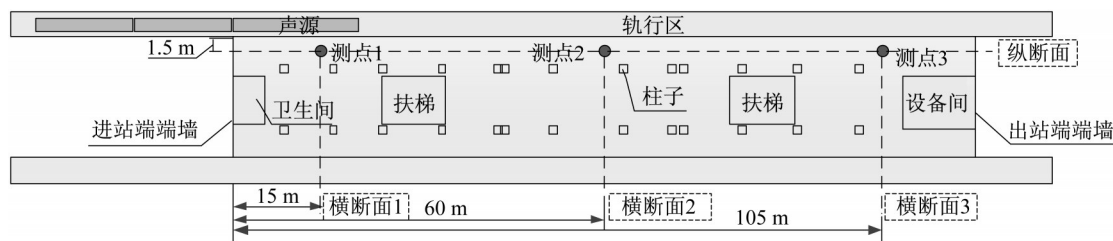


图9 站台测点位置示意

Fig. 9 Diagram of station platform

于设备间的墙体与端墙、站台门形成一个较小的空间,声反射作用加强,声压级存在增大并保持波动性变化,波动范围在2dB(A)左右。

由图 10b 横向分布计算结果可知,总体上不同断面声压级沿横向基本呈线性减小,其中横断面1和横断面3沿横向减小较大,共减小约5 dB(A),而横断面2,波动性减小,共减小了约3dB(A)。

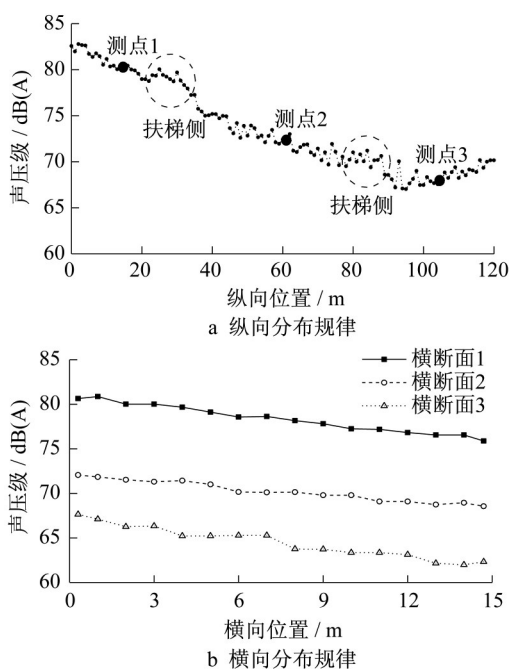


图10 站台内噪声空间分布规律

Fig. 10 Spatial distribution of noise in station platform

3 轨行区降噪措施及影响因素分析

3.1 吸声材料属性

在站台轨行区侧墙敷设吸声材料是一种有效降低轮轨滚动声源向站台传递的控制措施,采用砂岩吸音板为轨行区吸声材料。砂岩吸音板将砂粒通过聚合物聚合而成,砂粒之间的空隙形成多孔结构,对声能进行吸收耗散达到降噪效果,具有强度高、防火

性好、耐久性好等特点,安装厚度仅为6cm,可满足车站轨行区运营需求,其吸声系数如表3所示,在250~2 000Hz范围内具有较好的吸声性能,与轮轨滚动噪声的作用频率范围具有良好的一致性。为分析其对轨行区轮轨滚动噪声-站台的噪声传递的控制效果,分别研究了轨行区吸声材料的敷设位置和敷设长度对轮轨滚动噪声-站台噪声的降噪效果。

表3 吸声材料的吸声系数

Tab. 3 Sound absorption coefficient of sound-absorbing materials

中心频率/Hz	吸声系数	中心频率/Hz	吸声系数
125	0.12	800	0.73
160	0.15	1 000	0.71
200	0.31	1 250	0.63
250	0.42	1 600	0.59
315	0.65	2 000	0.57
400	0.62	2 500	0.60
500	0.78	3 150	0.63
630	0.79	4 000	0.55

3.2 计算工况

轮轨滚动噪声经车轮和钢轨向两侧辐射,经轨行区四周墙体的反射和散射作用最终向站台区域传播,在传播途径各边界面上设置吸声材料可降低传递至站台区的轮轨滚动噪声,如图 11 所示的面1、面2、面3为轨行区吸声材料的可敷设位置,其中,面1为站台板下部侧墙,面2为轨行区侧墙面,面3为轨行区顶面,对不同敷设位置的降噪效果进行分析,计算工况如表4所示,选取如图9所示具有代表性的测点1、测点2、测点3分析站台区降噪效果。

3.3 吸声材料敷设位置影响

为分析轨行区吸声材料不同敷设位置对站台区降噪量的影响,以列车进站轮轨滚动噪声影响最显著的“1节车”工况为声源输入位置,分析站台区不同测点位置的降噪效果,结果如图12所示,纵坐标为200~2 000Hz范围内总声压级的插入损失。

对比各工况测点1~3的降噪效果,可知,站台区降噪效果随着距声源距离的增大而增大。这是由于

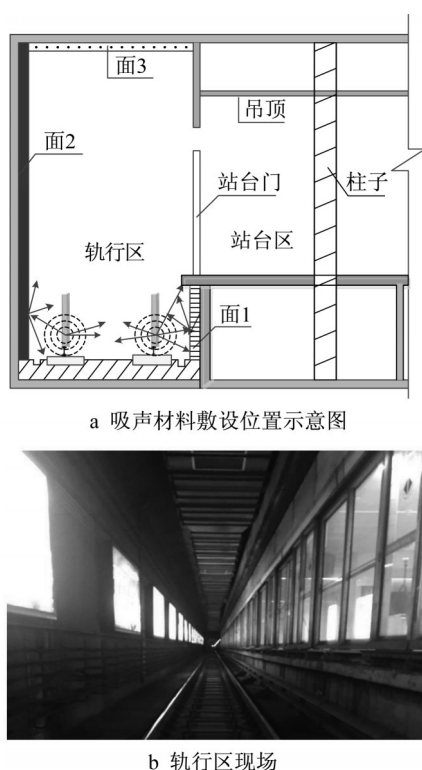


图11 轨行区吸声材料敷设布置示意

Fig. 11 Laying surfaces of noise reduction measures in track area

表4 不同敷设位置计算工况

Tab. 4 Cases of sound-absorbing materials at different laying surfaces

工况	敷设面	敷设吸声材料长度
工况1	面1	120m(站台长度范围内)
工况2	面1+面2	120m(站台长度范围内)
工况3	面1+面2+面3	120m(站台长度范围内)

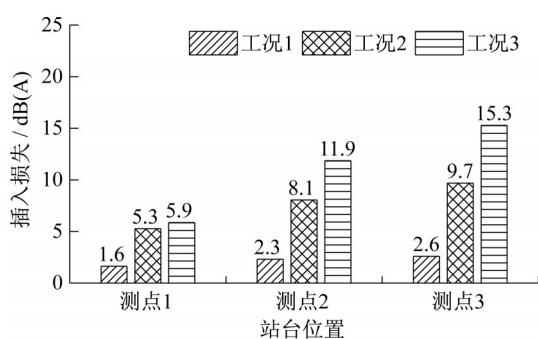


图12 不同敷设面工况下站台区域的降噪效果

Fig. 12 Noise reduction effect in the platform under different laying surface conditions

声源与测点之间的传递距离的增大,声音经过轨行区内吸声材料多次反射和吸收,降噪效果显著增大,如工况3对远场测点2和测点3的降噪效果分别达到了11.9、15.3dB(A),但由于在远场区域内,随着

声源与测点距离的增大,轮轨滚动声源的影响逐渐减小,在站台其他声源叠加作用下,轮轨滚动噪声的比重较小,其降噪效果与实际降噪效果会存在较大差异,因此,采用轮轨滚动噪声影响显著区域测点1的降噪量描述吸声材料的降噪效果更符合实际降噪效果。

对比工况1~3测点1的降噪效果,可以看出,随着敷设面的增加,降噪效果增大。工况1~3的降噪量分别为1.6 dB(A)、5.3 dB(A)、5.9 dB(A)。其中,工况1的降噪效果仅为1.6 dB(A),效果微小;工况2在工况1的基础上增加侧墙敷设面后,降噪效果显著提升了3.7dB(A);虽然工况3在工况2的基础上增加了顶面,敷设面积显著增大,但其降噪效果并未显著增大,仅增大了约0.6dB(A)。因此,综合经济成本及降噪效果,在站台板下部侧墙(面1)及轨行区侧墙面(面2)同时敷设吸声材料可取得较好的降噪效果。

3.4 吸声材料敷设长度影响

进一步分析延长吸声材料敷设至隧道内的降噪效果,首先对两侧墙延长长度为10m时站台的降噪效果进行分析,如图13a所示为列车运行至不同位置时站台进站端测点1位置的降噪效果,从图中可以看出,相比仅在站台长度范围敷设吸声材料,站台测点1的降噪量均有所增大,但列车运行于隧道内(“0节车”)时,站台位置处的降噪量显著提高,测点1位置处降噪量达到了7.9dB(A),增大了5dB(A),而当列车进入车站后,延长吸声材料仅使站台区域降噪量提高了约1dB(A)。这是由于列车未进入车站前轮轨滚动声源与测点1的传递路径较长,最近的轮轨滚动声源与测点1的距离约22.5m,延长吸声材料后,声源与测点1整个传递路径上吸声面显著增大,其降噪量显著增大,而“1节车”和“3节车”工况下,进入车站范围内的轮轨滚动声源与测点1的传递距离短,对测点1噪声的贡献量最大,而隧道内的轮轨滚动声源由于传递距离大,在传递距离经过侧壁本身的反射与吸收,对测点1的贡献较小,敷设的吸声材料主要对隧道内的声源产生吸声作用。因此,延长吸声材料至隧道区间内主要对列车在隧道内时产生较好的降噪效果,而列车进入站台后,降噪效果较小。

针对“0节车”,分析隧道区间内吸声材料延长长度分别为10m、20m、30m后的降噪效果,测点1位置处的降噪效果如图13b所示,可见,在敷设长度为10m的基础上继续延长敷设长度,站台降噪量的提

高不明显,每延长10m,降噪量增加约为1dB(A)。因此,从降低站台噪声的角度,同时兼顾敷设吸声材料的经济性,可考虑仅延长10m。

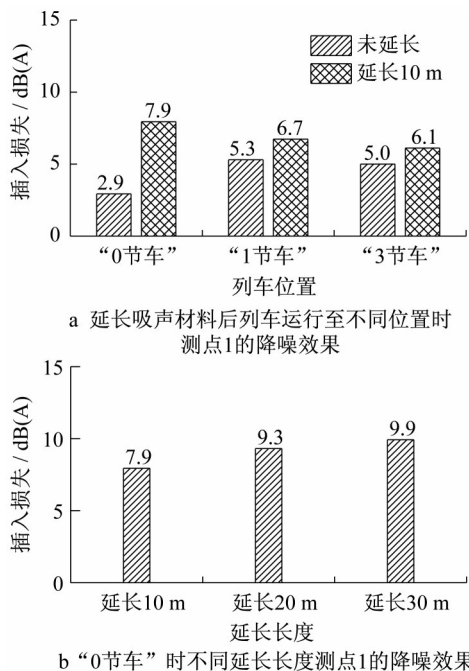


图13 延长吸声材料的降噪效果

Fig. 13 Noise reduction effect with extended sound-absorbing material

4 结论

基于几何声学法建立了地下车站站台三维声学仿真模型,采用有限元-边界元法计算轮轨滚动噪声,以此作为站台声学模型声源输入,研究了轮轨滚动声源作用下站台区域的声场分布特性。在此基础上,分析了轨行区吸声材料的敷设位置和敷设长度对站台区域的降噪效果。主要结论如下:

(1)单侧列车进站过程中,站台区受轮轨滚动声源噪声影响显著的区域为列车进站端靠行车侧距站台门6m范围内,随后沿站台纵向及横向逐渐减小,站台出站端背行车侧受轮轨滚动噪声的影响较小,基本可忽略。

(2)列车“1节车”厢进入车站范围时,站台区噪声最大,轮轨滚动声源噪声影响显著区域声压级为77.9~83.1dB(A),沿站台纵向呈线性减小,至出站端减小约14dB(A)左右,沿站台横向14m范围内减小约3~6 dB(A)。

(3)在轨行区侧墙及站台板下部侧墙敷设吸声材料可有效减少轮轨滚动声源向站台传递,站台进站端的降噪量为2.9~5.3dB(A),而仅在站台板下

部侧墙敷设吸声材料对轮轨滚动噪声的降噪效果不明显,降噪量仅为1.6dB(A)左右,在轨行区顶面增加吸声材料的敷设后,降噪量仅增加了0.6dB(A)左右。

(4)延长轨行区吸声材料10m至隧道壁两侧,对于列车运行于隧道内时具有良好的降噪效果,进站端位置降噪量可提升至6.1~7.9dB(A),而沿隧道方向继续增加敷设长度对降噪量的提高不显著,每延长10m增加约1dB(A)。

此外,本文仅对轮轨滚动噪声作用下轨行区敷设吸声材料对站台区域的降噪效果进行了分析,若综合轨道降噪措施和站台空间降噪措施,可使车站形成更好的噪声环境。

作者贡献申明:

高亮:提出了论文研究思路和方法,论文内容修改及提炼。

曾钦娥:建立模型,处理数据与分析,论文的撰写。

侯博文:指导论文模型的建立,论文内容的修改及提炼。

费琳琳:展开车站站台噪声现场测试,并进行数据分析。

参考文献:

- [1] 刘茜,史聪灵,伍彬彬,等.城市轨道交通站台噪声测量研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(11): 143. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.11.023.
LIU Qian, SHI Congling, WU Binbin, *et al.* Analysis on noise status of urban railway platform [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(11): 143. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.11.023.
- [2] YANG L, SHIELD B M. The prediction of speech intelligibility in underground stations of rectangular cross section [J]. J Acoust Soc Am, 2001, 109(1): 266. DOI: 10.1121/1.1329617.
- [3] SHIMOKURA R, SOETA Y. Evaluation of speech intelligibility of sound fields in underground stations [J]. Acoustical Science and Technology, 2011, 32(2): 73. DOI: 10.1250/ast.32.73.
- [4] 张海滨,蒋伟康,万泉.城市轨道交通列车噪声辐射特性的试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11): 83. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.11.014.
ZHANG Haibin, JIANG Weikang, WANG Quan. Experimental study on noise radiation characteristics of urban

- rail trains [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11): 83. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2010.11.014.
- [5] THOMPSON D J, HEMSWORTH B, VICENT N. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part 1: Description of the model and method[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 123-135. DOI: 10.1006/jsvi.1996.0252.
- [6] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, part I: Introduction and interaction model [J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 161(3): 387. DOI:10.1006/jsvi.1993.1082.
- [7] 杨新文. 高速铁路无砟轨道区段轮轨滚动噪声特性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 421. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2014.03.015.
- YANG Xinwen. Characteristics of wheel-rail rolling noise of ballastless track in high-speed railway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(3): 421. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2014.03.015.
- [8] 崔日新,高亮,蔡小培. 高速铁路阻尼钢轨减振降噪特性研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 78. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2015.02.012.
- CUI Rixin, GAO Liang, CAI Xiaopei. Study on vibration and noise reduction properties of damping rail for high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 78. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2015.02.012.
- [9] TANG C H, WANG Y S, GUO H. Sound field simulation and optimization at an underground subway station [J]. Building Acoustics, 2013, 20(3): 243. DOI: 10.1260/1351-010X.20.3.243.
- [10] SÜ Z, ÇALIŞKAN M. Acoustical design and noise control in metro stations: case studies of the ankara metro system [J]. Building Acoustics, 2007, 14(3): 203. DOI: 10.1260/135101007781998910.
- [11] 黄旭伟,周宇,韩延彬,等. 城市轨道交通车站轨行区降噪措施仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 145. DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.07.034.
- HUANG Xuwei, ZHOU Yu, HAN Yanbin, *et al.* Simulation analysis of noise reduction measures in the track area of urban rail transit station [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 145. DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.07.034.
- [12] 刘玮. 轨道吸音板在北京地铁工程中的设计与应用[J]. 铁道勘察, 2015, 41(2): 106. DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.2015.02.032.
- LIU Wei. Application and test of track acoustical slab in Beijing subway engineering [J]. Railway Investigation and Surveying, 2015, 41(2): 106. DOI:10.19630/j.cnki.tdkc.2015.02.032.
- [13] SHIMOKURA Ryota, SOETA Yoshiharu. Sound field characteristics of underground railway stations - Effect of interior materials and noise source positions [J]. Applied Acoustics, 2012, 73(11): 1150. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.05.012.
- [14] KIM Y H, SOETA Y. Architectural treatments for improving sound fields for public address announcements in underground station platforms [J]. Applied Acoustics, 2013, 74(11): 1205. DOI:10.1016/j.apacoust.2013.05.001.
- [15] WU T X, THOMPSON D J. Behaviour of the normal contact force under multiple wheel/rail interaction [J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 3(37): 157. DOI: 10.1076/vsd.37.3.157.3533.
- [16] European Committee for Standardization. Railway Applications-Acoustics-Rail and Wheel roughness measurement related to noise generation: BS EN 15610:2019[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2019.
- [17] REMINGTON P J. Wheel/rail rolling noise, I: theoretical analysis [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6): 1805. DOI:10.1121/1.394746.
- [18] 王德威,李帅,张捷,等. 高速列车车外噪声预测建模与声源贡献量分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 3113. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2018.12.026.
- WANG Dewei, LI Shuai, ZHANG Jie, *et al.* Prediction of external noise of high-speed train and analysis of noise source contribution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(12): 3113. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2018.12.026.
- [19] 汤超,王岩松,尹正宜. 地铁地下站点声场仿真分析及优化[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(3): 124. DOI:10.3969/j.issn.1006-1335.2014.03.026.
- TANG Chao, WANG Yansong, YIN Zhengyi. Sound field simulation and optimization of an underground subway station [J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(3): 124. DOI:10.3969/j.issn.1006-1335.2014.03.026.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [21] 程辉航,刘畅,陈俊洋,等. 全自动运行城市轨道交通车站噪声评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(1): 18. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.21.034.
- CHENG Huihang, LIU Chang, CHEN Junfeng, *et al.* Noise assessment of urban rail transit stations with fully automatic operating systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(1): 18. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.21.034.