

文章编号:1006-1355(2021)02-0184-06

## 地铁车站敷设方式对站台噪声特性的影响

曾钦娥, 侯博文, 费琳琳, 李佳静

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:**为研究不同车站敷设方式对站台噪声特性的影响,选取同一线路相同站台型式的地下站及高架站展开现场噪声测试,根据列车进、出站时站台噪声水平、站台环境噪声水平及站台背景噪声水平分析车站敷设方式对站台噪声的影响,并根据噪声频谱特性分析两个站台噪声特性的差异。结果表明,两个站台在列车进(出)站时站台进(出)站端等效连续A声级 $L_{Aeq}$ 存在大于现行标准限值80 dB(A)情况,站台中部噪声则始终低于标准限值。列车进、出站引起的地下站台噪声水平略高于高架站站台,其中列车进、出站时 $L_{Aeq}$ 大约为0.3 dB(A)至2.1 dB(A),环境噪声水平 $L_{Aeq,1h}$ 大约为0.8 dB(A)至1.1 dB(A),但无车无广播时高架站站台背景噪声略大于地下站台,大约为1.9 dB(A)。从列车进、出站站台时噪声频谱特性来看,200 Hz以下,两站台噪声峰值频率存在显著差异,高架站台出现在25 Hz至50 Hz,地下站台出现在50 Hz至100 Hz,主要由站台结构振动引起;200 Hz以上,两类站台噪声频谱分布规律基本一致,高架站声压级略小于地下站台,平均小2.0 dB(A)至3.8 dB(A)。建议根据不同敷设方式的车站的结构特性及站台空间形式采取噪声控制措施。

**关键词:**声学;地铁车站;站台噪声;现场测试;高架站;地下站;频谱特性

中图分类号:X827;U231

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.031

## Influences of Metro Station Layout Modes on Platform Noise Characteristics

ZENG Qine, HOU Bowen, FEI Linlin, LI Jiajing

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

**Abstract:** The noise status and characteristics of metro station platform with different station layout modes was studied. The field tests of noise of underground stations and elevated stations with the same platform type were conducted on the same line. According to the noise level induced by the trains' arrival and departure, platform environment noise level and platform background noise level without trains' passing, the influence of station layout modes on platform noise was analyzed. And the difference of noise spectrum characteristics between the two platforms were analyzed. The results show that the equivalent continuous A-weighted sound pressure levels ( $L_{Aeq}$ ) at both ends of two platforms with the trains' arrival and departure exceed the standard limit of 80 dB(A), while the noise in the middle of the platforms are always lower than the standard limit. The noise level of underground station is slightly larger than that of elevated station platform. The  $L_{Aeq}$  caused by trains' arrival and departure in underground station platform is about 0.3 dB(A) - 2.1 dB(A) higher than in elevated station. While the environmental noise level (an hour equivalent continuous A-weighted sound pressure level)  $L_{Aeq,1h}$  is about 0.8 - 1.1 dB(A). However, the background noise in the elevated station platform is about 1.9 dB(A) larger than that in the underground platform. From the viewpoint of noise spectrum characteristics with trains' arrival and departure, there is a significant difference of the noise peak frequencies between the two platforms below 200 Hz. The noise spectrum peak of the elevated platform appears at 25 Hz - 50 Hz, while the peak of the underground platform appears at 50 Hz - 100 Hz, which mainly radiated by platform structure vibration. The noise spectrum distribution rules of the two stations are basically the same above 200 Hz, and the sound pressure level of the elevated station is about 2.0 dB(A) - 3.8 dB(A), smaller than that of the underground platform. It is suggested that noise control measures on platforms should be taken into consideration according to the structure characteristic and platform spatial form of different station layout modes.

**Key words:** acoustics; metro station; platform noise; field tests; elevated station; underground station; spectrum characteristics

收稿日期:2020-06-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201104);

国家自然科学基金资助项目(51708021)

作者简介:曾钦娥(1990-),女,江西省宜春市人,博士生,主要研究方向为铁路环境振动与噪声。

通信作者:侯博文,男,硕士生导师。

E-mail: houbw@bjtu.edu.cn

车站是城市轨道交通的重要组成部分,当列车进、出站时,产生的噪声会引起站台乘客及工作人员的烦恼,同时也会降低站台广播的语言清晰度<sup>[1-3]</sup>,因此,站台声环境质量逐渐成为车站环境友好设计的重要因素。不同车站敷设方式的站台结构、建筑设计等均存在显著差别,造成其噪声特性也差异显著,因此,有必要研究不同车站敷设方式站台噪声特性。

车站按其敷设方式可分为地下站、高架站、地面站,其中,地下站以其节约地上空间的显著优点,成为城市轨道交通车站最主要型式,随着城市轨道交通线网的延伸,高架站逐渐成为地铁郊区线及城际轻轨线的主要型式之一,如北京地铁八通线共15个站,其中高架站为9个,地面站由于占地面积大,各城市较少采用,因此,本文仅针对地下站及高架站站台噪声特性展开分析。地下站台一般采用封闭空间结构,存在明显的混响效应,而高架站台一般由雨棚、侧墙组成<sup>[4]</sup>,站台两端自由扩散,组成半封闭空间结构,且站台高度明显大于地下站台。列车进、出站过程产生的噪声在高架站与地下站站台层内的传播存在显著差异。

目前较多的研究人员对地下站站台和高架站站台的噪声水平进行了实地测量,刘茜<sup>[5]</sup>对同一线路不同高架站站台噪声展开了实地测量,结果表明列车进站等效连续A声级 $L_{Aeq}$ 均值为78 dB(A),出站 $L_{Aeq}$ 均值为79 dB(A)。程辉航等<sup>[6]</sup>对全自动运行线路9个高架车站的噪声特性展开了现场测量,表明列车进站噪声的 $L_{Aeq}$ 均值为77 dB(A)至80 dB(A)。马欢、李吉等<sup>[7-8]</sup>对不同城市地下站站台噪声测试,结果表明车辆通过时站台的 $L_{Aeq}$ 为77.0 dB(A)至88.3 dB(A)。刘茜等<sup>[9-10]</sup>对不同线路多个地下站站台内噪声进行测量,测试结果表明各类型车站站台中心点 $L_{Aeq}$ 的平均值为68 dB(A)至78 dB(A),全封闭站台门站台噪声 $L_{Aeq}$ 比半封闭站台门减小3 dB左右。侯博文等<sup>[11]</sup>针对地下站台不同位置的噪声分布规律进行了分析。综上所述,研究人员主要针对地下站台与高架站台的噪声水平分别展开分析,得出了不同地下站与高架站的噪声水平,但是由于不同线路轨道结构形式、车辆形式、站台门形式等均存在差异,列车运行产生的声源存在差别,因此既有研究中不同车站敷设方式站台噪声水平之间不具有可比性。国外Shimokura等<sup>[12]</sup>针对地下车站及地上车站的噪声特

性展开了现场实测,表明地下站台的等效连续A声级大于地上站台6.4 dB(A),但由于其站台形式与国内车站存在显著区别,噪声的传播方式也存在差异。

为研究不同车站敷设方式的站台噪声特性,本文选取同一线路相同站台型式的地下站及高架站,对站台噪声展开现场测试,分别从列车进、出站时站台噪声水平、站台环境噪声水平及站台背景噪声水平分析车站敷设方式对站台噪声的影响,基于噪声频谱特性分析两个站台噪声特性的差异,对不同敷设方式车站站台噪声控制提出了相关建议,可为不同车站敷设方式站台噪声控制措施提供数据支撑。

## 1 测试方法

为分析不同车站敷设方式站台噪声特性,排除车辆型式、轨道结构形式、站台型式等因素对站台噪声的影响,选取同一线路相同站台型式的地下站台和高架站台进行测试,侧式站台为高架站的基本型式,因此本文站台型式为侧式站台,站台尺寸参数如表1所示。站台现场照片如图1所示。高架车站结构为站桥一体式结构,地下车站为框架结构。站台空间内主要有扶梯和直梯等设施,站台各表面均未做特殊吸声处理。列车运行车辆为B型车6节编组,轨道结构形式均为短枕式整体道床结构,线路正线运行速度为70 km/h。



(a) 地下站

(b) 高架站

图1 站台现场照片

按照标准<sup>[13-14]</sup>规定的测试方法在站台典型位置布置3个测点,分别位于列车进站端、站台中部及出站端,测点布置如图2所示。测点距离地面高为1.6 m,距离四周墙体大于1.2 m,声压传感器前端垂直指向列车运行方向。测量仪器采用东方所生产的16通道INV3062数据采集仪,声压传感器采用INV9206系列传声器,对列车运营时段(早7:00至晚22:00)进行连续采样,采样频率为51.2 kHz。测试前

表1 站台尺寸参数/m

	长度	单侧宽度	高度	站台门高	顶部
地下站	120	3	2.9	2.5	格栅吊顶
高架站	120	2.5	3.5~5	1.5	钢架雨棚

后采用B&K 4231声校准器(1 kHz、94 dB)对声压传感器进行校准,两次校准误差不超过0.5 dB。

## 2 站台噪声特性

### 2.1 列车进、出站站台最大A声级和等效连续A声级

为分析列车运行对不同车站敷设方式站台噪声特性,减少客流等随机噪声的影响,截取平峰时间段20趟列车进站和列车出站过程,其中,列车进站截取时间为列车车头进入站台至完全停止,列车出站截取时间为列车启动至完全驶离。基于标准<sup>[13-14]</sup>中规定的方法分别对列车进、出站的 $L_{Amax}$ 、等效连续A声级进行分析,取20趟列车的算数平均值为最终评价量,结果如图3至图4所示。图中误差线所示为标准差及数值。

从图3可以看出,列车进、出站时,地下站站台各测点位置处的最大A声级 $L_{Amax}$ 高于高架站站台。列车进站时,地下站、高架站站台 $L_{Amax}$ 最显著位置为进站端, $L_{Amax}$ 分别为85.9 dB(A)和84.2 dB(A),地下站比高架站大约大1.7 dB(A);地下站站台中部和出站端的 $L_{Amax}$ 比高架站大1.1 dB(A)至1.7 dB(A);列车出站时,地下站、高架站站台 $L_{Amax}$ 最显著位置为出站端, $L_{Amax}$ 分别为88.7 dB(A)和86.0 dB(A),地下站比高架站大约大2.7 dB(A),站台中部和出站端位置处地下站比高架站大1.9 dB(A)。

从图4可以看出,列车进站时,地下站、高架站站台进站端的 $L_{Aeq}$ 分别为80.1 dB(A)和79.8 dB(A),根据国家标准《城市轨道交通车站站台声学要求和测量方法》<sup>[13]</sup>中规定的列车进、出站过程站台最大容许噪声限值80 dB(A),地下站台略高于现行标准限

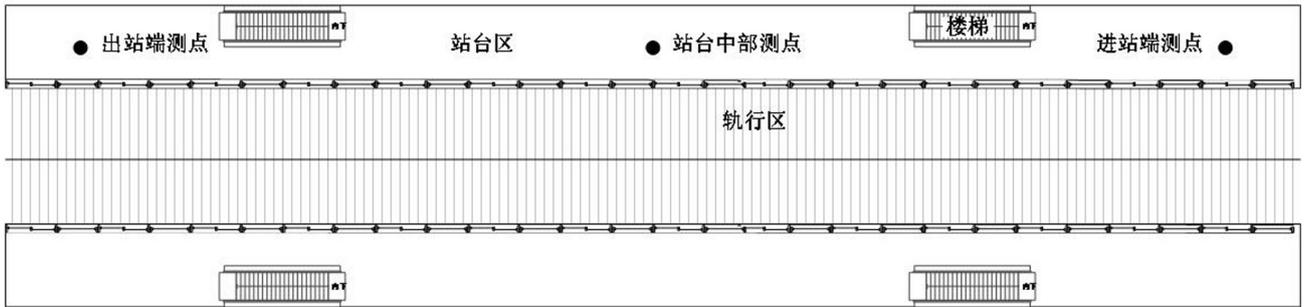


图2 站台噪声测点布置示意图

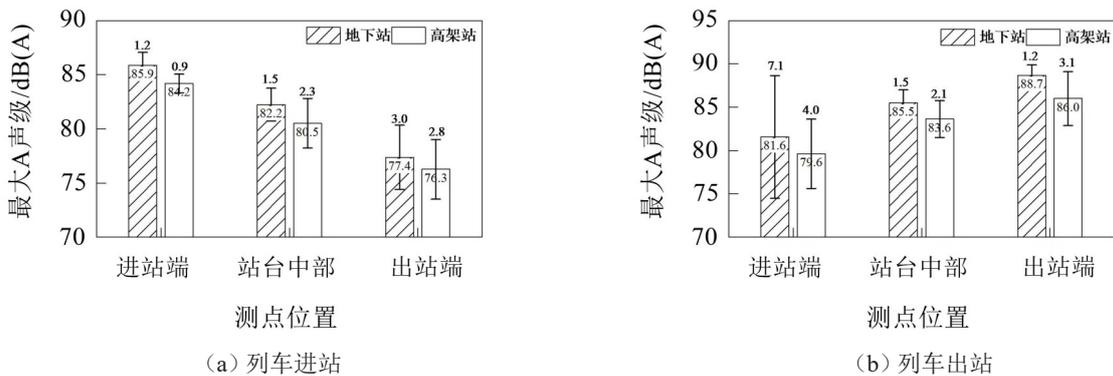


图3 不同车站敷设方式站台的 $L_{Amax}$

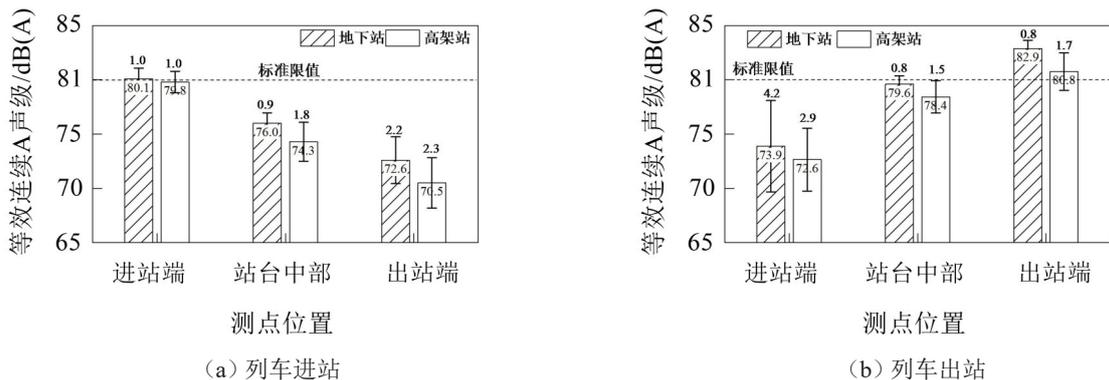


图4 不同车站敷设方式站台的 $L_{Aeq}$

值,高架站台虽未超过标准限值,但已十分接近标准限值,站台中部位置处地下站、高架站站台中部位置处的 $L_{Aeq}$ 分别为76.0 dB(A)和74.3 dB(A),均小于现行标准限值;列车出站时,地下站、高架站站台出站端的 $L_{Aeq}$ 分别为82.9 dB(A)和80.8 dB(A),略高于现行标准限值,站台中部的 $L_{Aeq}$ 分别为79.6 dB(A)和78.4 dB(A),均满足现行标准限值。

进一步对比地下站和高架站的 $L_{Aeq}$ 的大小,可发现地下站站台各测点位置处的等效连续A声级 $L_{Aeq}$ 高于高架站站台。其中,列车进站时,地下站进站端位置比高架站大约0.3 dB(A),地下站站台中部及出站端位置比高架站大1.7 dB(A)至2.1 dB(A);列车出站时,地下站出站端位置比高架站大约2.1 dB(A),地下站站台中部及出站端位置比高架站大约1.2 dB(A)。

从列车进、出站引起的站台噪声水平 $L_{Amax}$ 、 $L_{Aeq}$ 均可以看出,地下站台的噪声水平略大于高架站台。地下站台虽然采用全高半封闭站台门,隔声效果优于半高站台门,但由于全高半封闭站台门同时使站台形成狭小的封闭长空间,且地下站台高度较小,声反射作用较强,导致其噪声水平较大;高架站台为半高站台门,虽然直达声较大,但由于站台区域与轨行区域形成一个较大的整体空间,且站台层高度较大,声反射距离长,混响作用相比地下站台显著减小,因此其站台噪声水平较小。

2.2 站台环境噪声水平

为分析不同车站敷设方式站台的环境噪声水平,选取站台中部测点进行无列车无广播声源 $L_{背景}$ 、1小时等效连续A声级 $L_{Aeq,1h}$ 、累计百分声级 $L_{10}$ 和 $L_{90}$ 、无列车有广播声源 $L_{广播}$ 分析,其中 $L_{背景}$ 、 $L_{广播}$ 为所截取20组数据等效连续A声级的算数平均值, $L_{Aeq,1h}$ 、 $L_{10}$ 、 $L_{90}$ 为平峰时段(日10:00~16:00和晚19:00~22:00)每1h的算数平均值,结果如表2所示。

从表2可以看出,无列车无广播时高架站台的

背景噪声声压级略高于地下站台约1.9 dB(A),这主要是由于高架站台位于地上,站台两侧下部为城市主干路,主干路汽车通过、鸣笛、人流噪声传播至高架站台,造成高架站台噪声增大,而地下站台噪声主要由站台内部客流、设备等运行噪声引起。地下站与高架站的累计百分声级 $L_{90}$ 也进一步说明了高架站的背景噪声高于地下站台。从全天 $L_{Aeq,1h}$ 、 $L_{10}$ 来看,地下站台的环境噪声水平高于高架站台,差值约0.8 dB(A)至1.1 dB(A),与列车通过时引起的 $L_{Aeq}$ 、 $L_{Amax}$ 规律一致,表明高架站台由于列车运行引起站台噪声环境水平小于地下站台。

表2 站台中部测点环境噪声水平/dB(A)

指标	地下站	高架站
$L_{背景}$	61.2±2.8	63.1±1.9
$L_{Aeq,1h}$	75.8±1.6	74.7±2.0
$L_{10}$	79.5±0.4	78.7±0.6
$L_{90}$	56.1±0.8	58.3±0.6
$L_{广播}$	79.8±1.0	69.9±1.9

无列车有广播时高架站台内的广播噪声显著小于地下站台,小约9.9 dB(A),这主要是由于两站台的扬声器系统播放基准音量也存在一定差异,进而导致两站台的广播噪声出现一定变化。此外,由于地下站台内广播声源在站台空间内存在显著的混响效应,造成声压级增大。

3 站台噪声频谱特性

人体对噪声的感受除了与声压级大小有关外,还与噪声的频率分布特性相关,本节对地下站及高架站列车进、出站时的站台噪声频谱特性进行分析,列车进站时选取影响较显著的进站端测点及站台中部测点进行分析,列车出站时选取影响较显著的出站端测点及站台中部测点进行分析。由于站内噪声存在明显的低频特性,而A计权会显著低估低频特性的影响<sup>[15-16]</sup>,因此本节对站台声压级频率特性的

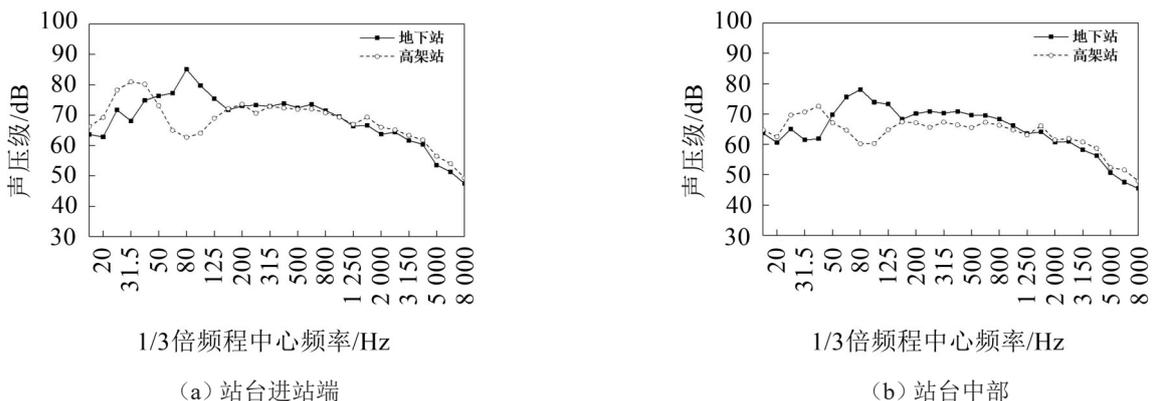


图5 列车进站时站台不同位置的频谱特性

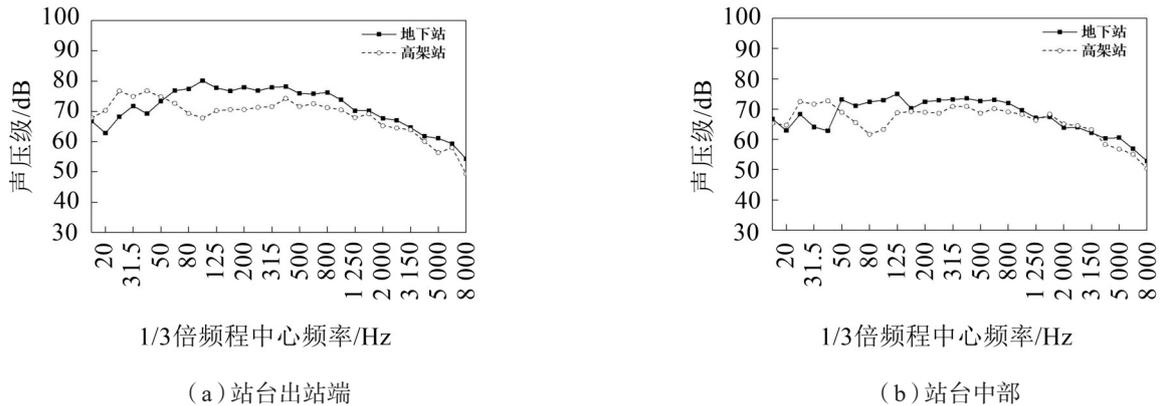


图6 列车出站时站台不同位置的频谱特性

分析未考虑计权因子,列车进、出站站台噪声 1/3 倍频程声压级计算结果如图5至图6所示。

从图5可以看出,在200 Hz以下,不同车站敷设方式站台噪声的频率分布均存在显著峰值,且峰值显著大于200 Hz以上噪声声压级幅值。其中,列车进站时,高架站在20 Hz至50 Hz存在较大值,在40 Hz出现峰值,峰值为81.0 dB;地下站在50 Hz至100 Hz存在较大值,在80 Hz出现峰值,峰值为85.0 dB,地下站台的低频噪声峰值显著大于高架站台低频噪声的峰值大约4.0 dB。从图6中可以看出,列车出站时,频率分布特性与列车进站时基本一致,仅在200 Hz以下低频噪声的峰值声压级存在一定的降低。地下站台的低频噪声显著频率与高架站台显著频率存在显著差别,这主要是低频范围噪声主要为车辆-轨道-下部基础耦合作用所引起的站台结构振动辐射噪声。由于既有噪声评价指标值采用A计权方式,对低频噪声进行了较大修正,导致其对评价指标值 $L_{Aeq}$ 的贡献较小,但其声压级幅值较大,对人们烦恼度的影响不可忽略<sup>[17-19]</sup>。有必要采取相应的轨道减振措施减少轨道振动向车站结构的传递,如采用减振扣件、浮置板轨道、梯形轨枕等,但应详细考虑列车-减振轨道-车站结构的相互耦合作用。

在200 Hz以上,列车进站时,两个站台的声压级频率分布规律基本一致,主要来源于列车运行引起的轮轨噪声、制动噪声及列车设备运转噪声,其中,200 Hz至1 250 Hz范围内地下站台的噪声略大于高架站台,1 250 Hz以上高架站台的噪声略大于地下站台,但幅值差异较小,约1 dB至2 dB。列车出站时,高架站的噪声略小于地下站台,平均小约2.0至3.8 dB。应根据不同敷设方式车站轨行区声源-站台区噪声传递路径及站台区内声场作用方式采取不同的措施,其中,对于地下站台,可有效利用站台门,将站台门高度增高至顶板,形成密闭性站台门,有效隔绝轨行区噪声向站台传递。同时,在站台

区域侧墙及吊顶设置吸声材料,以减少噪声在站台内的混响及反射作用;对于高架站台,其站台门形式为半高站台门,隔声作用较小,建议在轨行区站台板下部侧墙及上、下行线之间进行吸声处理,在新建线路中,可考虑选用鱼腹式岛式车站,其站台门形式为全封闭式,可有效减少轨行区噪声传递至站台。

## 4 结语

针对不同敷设方式的高架站和地下站的站台噪声展开现场测试,根据列车进、出站时站台噪声水平、站台环境噪声水平及站台背景噪声水平分析车站敷设方式对站台噪声的影响,并根据噪声频谱特性分析两类车站站台噪声的差异特性,提出了相应的噪声控制建议,得出以下结论:

(1) 列车进站时地下站及高架站站台进站端端部噪声 $L_{Aeq}$ 分别为80.1 dB(A)和79.8 dB(A),列车出站时出站端部噪声 $L_{Aeq}$ 分别82.9 dB(A)和80.8 dB(A),站台两端在车辆进、出站过程中,站台噪声值略大于国家现行规范中给出的标准限值,而车站站台中部噪声 $L_{Aeq}$ 为74.3 dB(A)至79.6 dB(A),始终符合国家现行标准限值。

(2) 地下站台列车进、出站引起的噪声大于高架站台内的噪声,站台端部最大A声级 $L_{Amax}$ 大约1.7 dB(A)至2.7 dB(A),等效连续A声级 $L_{Aeq}$ 大约0.3 dB(A)至2.1 dB(A),地下站台环境噪声水平 $L_{Aeq,1h}$ 的声压级大于高架站台,大约0.8 dB(A)至1.1 dB(A),但无车无广播时高架站台的背景噪声略大于地下站台,大约1.9 dB(A)。

(3) 不同敷设方式站台噪声在200 Hz以下频率存在显著差别,高架站台的显著频率为25 Hz至50 Hz,地下站台的显著频率为50 Hz至100 Hz,且地下站台内噪声的峰值显著大于高架站台,大约4.0 dB。在200 Hz以上,地下站与高架站声压级频谱分布规律基本一致,高架站的声压级略小于地下站台,列车

出站时平均小约2.0 dB至3.8 dB。

(4)应根据不同敷设方式站台的结构特性及空间差异采取相应的噪声控制措施。针对列车通过引起的低频噪声,应结合列车-轨道-车站结构的耦合作用采取相应的轨道减振措施。针对列车通过引起的中高频噪声,对于地下站台建议提高站台门的隔声作用,结合站台区吸声处理,改善站台噪声环境;对于高架站台可对轨行区进行吸声处理,对于新建高架站,建议考虑采用鱼腹式岛式站台设计。

#### 参考文献:

- [1] 彭健新. 三种干扰噪声对汉语语言清晰度的影响[J]. 振动与冲击, 2005(6): 98-101.
- [2] 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): 1205-1220.
- [3] PRODEUS A, DIDKOVSKA M, MOTORNIUK D, et al. The effects of noise, early and late reflections on speech intelligibility[C]. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2020.
- [4] 曾敏. “桥建合一”高架车站桥梁结构合理型式及设计技术[J]. 工程与建设, 2016, 30(6): 762-765.
- [5] 刘茜. 某新建城市轨道交通高架车站噪声现状-站台部分[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 145-153.
- [6] 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): 18-24.
- [7] 马欢, 刘岩, 杨冰, 等. 地铁站台噪声特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(5): 141-143.
- [8] 李吉, 曾瑞, 于向蕾. 大连地铁2号线地下车站噪声调查与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(7): 73-75.
- [9] 刘茜. 某城市地铁典型线路地下站台噪声现状分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 150-157.
- [10] 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): 143-148.
- [11] 侯博文, 曾钦娥, 费琳琳, 等. 城市轨道交通地下车站站台噪声评价方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020: 1-7.
- [12] SHIMOKURA R, SOETA Y. Characteristics of train noise in above-ground and underground stations with side and island platforms[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(8): 1621-1633.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 14227-2006 城市轨道交通车站站台声学要求和测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [14] 环境保护部国家质量监督检验检疫总局. GB 3096-2008 声环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [15] LEVENTHALL H G. Low frequency noise and annoyance [J]. Noise and Health, 2004, 6(23): 59-72.
- [16] PERSSON K, BJ RKMAN M. Annoyance due to low frequency noise and the use of the dB(A) scale[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 127(3): 491-497.
- [17] 汤继新, 刘艳, 罗雁云, 等. 高架轨道交通低频噪声对居民烦恼度影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(10): 25-29.
- [18] ABBASI A M, MOTAMEDZADE M, ALIABADI M, et al. Study of the physiological and mental health effects caused by exposure to low-frequency noise in a simulated control room[J]. Building Acoustics, 2018, 25(3): 233-248.
- [19] 张硕, 杨碧君, 刘加华, 等. 地铁低频噪声强度与烦恼度关系特征研究: 泛在信息社会中的声学—中国声学学会2010年全国会员代表大会暨学术会议[C]. 中国黑龙江哈尔滨, 2010.

#### (上接第173页)

- [7] 余关仁, 沈景凤, 陈侃, 等. 轨道支撑失效对钢弹簧浮置板动力响应特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(6): 78-81.
- [8] 王小韬, 赵子诚, 周文涛, 等. 浮置板断簧条件下的列车-轨道耦合系统动力特性分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 1-9.
- [9] 陈林, 姚林泉. 不同无砟轨道类型对车辆动力学特性影响的数值分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 1-9.
- [10] 石蕊, 张晓芸, 石广田, 等. 钢弹簧浮置板中低频振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 131-185.
- [11] 韩艺翠, 贺玉龙, 李怀龙. 成都地铁钢弹簧浮置板道床减振性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 136-139.
- [12] 吴道禹, 谢家明, 卢俊明, 等. 基于有限元法的钢弹簧浮置板轨道减振性能分析及优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 94-99.
- [13] 赵留辉. 地下线路浮置板轨道减振特性仿真分析[J]. 铁道建筑, 2014(8): 102-105.
- [14] 姚京川, 杨宜谦, 王澜. 浮置板式轨道结构隔振效果分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 108-110.
- [15] 丁德云, 刘维宁, 李克飞, 等. 钢弹簧浮置板轨道参数研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 30-35.