

我国轨道交通环境噪声影响评价标准分析*

王 嘉^{1,2} 李 莉^{1,2}

(1. 同济大学交通学院, 201804, 上海; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 由于轨道交通线网日益密集以及环境噪声敏感区域不断增加, 轨道交通引发的噪声辐射问题日趋严峻, 故有必要对我国轨道交通环境噪声影响评价标准进行深入分析。[方法] 阐述了轨道交通环境噪声评价标准中涉及的评价量、频率范围以及计权方式, 并综合归纳了近年来轨道交通环境噪声的相关标准, 旨在明确噪声评价的具体方法、评价指标及限值设定。[结果及结论] 通过对噪声描述与测量基本参量的系统梳理, 指出了当前标准中存在的有待修正的内容。

关键词 铁路及城市轨道交通; 噪声标准; 噪声评价

中图分类号 TB533⁺.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.007

Analysis of Environmental Noise Impact Assessment Standards for Rail Transit in China

WANG Jia^{1,2}, LI Li^{1,2}

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] With the increasing rail transit network density and the expansion of environmental noise-sensitive areas, the issue of noise radiation caused by rail transit is becoming increasingly severe. It is therefore necessary to conduct an in-depth analysis of environmental noise impact assessment standards for rail transit in China. [Method] The evaluation volumes, frequency ranges, and weighting methods involved in the environmental noise assessment standards for rail transit are outlined. Additionally, relevant standards for rail transit environmental noise in recent years are summarized to clarify the specific evaluation methods, indicators, and limit settings. [Result & Conclusion] Through a systematic review of the fundamental parameters for noise description and measurement, the aspects of the current standards that require revision are identified.

Key words railway and urban rail transit; noise standard; noise assessment

根据 2021 年度城市轨道交通统计分析报告与铁道统计公报数据显示,截至 2021 年底,中国大陆地区共有 50 个城市开通了城市轨道交通服务,运营线路总数达到 283 条,所有制式线路累计长度为 9 206.8 km,同时国家铁路营业里程已达到 13.1 万 km,标志着轨道交通行业正处于快速发展阶段。铁路及城市轨道交通在极大便利居民生活的同时,也引发了轨道系统产生的环境噪声污染问题,成为亟待解决的挑战。轮轨相互作用激发的振动波通过轨道板、道砟等结构传播至周围环境,并向外部环境辐射噪声,对轨道交通沿线居民造成了显著困扰。因此,系统梳理现行标准中关于环境噪声影响的预测、评价与控制方法显得尤为重要。

本文依据我国轨道交通环境噪声影响评价的相关标准,对现行标准中的核心内容进行了梳理,并探讨了其存在的局限性,旨在为轨道交通环境噪声控制提供理论参考。

1 轨道交通环境噪声描述与测量基本参量

目前,国内外在噪声描述、测量及评价指标计算方面尚未形成统一标准,不同评价指标间的计算差异导致了环境噪声评估中的分歧与不便。常用的噪声评价量包括等效连续 A 声级、昼夜等效声级等。表 1 列出了现行轨道交通环境噪声评价标准中的评价指标、频率范围、计权方式。

1.1 等效连续 A 声级

等效连续 A 声级综合考虑了噪声的声压级大小与作用时间,并引入了 A 计权网络,以更好地模拟人耳对 55 dB 及以下低强度噪声的主观感受。然而,A 计权网络对低频段和高频段噪声的大幅衰减,使其难以真实客观地反映建筑物室内二次结构噪声的低频特性。因此,在低频噪声占主导地位的情况下,需调整评价计算方法,改变频率计权方式。

* 同济大学教学改革项目(2860106008)

表 1 我国现行轨道交通环境噪声评价标准中的评价指标、频率范围和计权方式^[1-8]Tab. 1 Evaluation index, frequency range, and weighting method in China's current rail transit environmental noise evaluation standard^[1-8]

噪声类型	标准、法规和导则编号	评价指标	频率范围/Hz	计权方式
铁路边界噪声	GB 12525—90	等效连续 A 声级		A
车站站台噪声	GB 142275—2006	等效连续 A 声级		A
城市声环境功能区噪声	GB 30965—2008	等效连续 A 声级;夜间最大 A 声级		A
	JGJ/T 1705—2009	等效连续 A 声级	16 ~ 200	A
	HJ 4535—2018	等效连续 A 声级	16 ~ 200	A
室内二次结构噪声	DB31/T 4705—2009	等效连续 A 声级;夜间最大 A 声级	20 ~ 20 000	A
	HJ 7935—2016	倍频带能量平均声压级;低频 A 声级	12.5 ~ 315.0	A
	GB /T 503555—2018	1/1 倍频程等效声级	31.5 ~ 250.0	A

等效连续 A 声级 $L_{Aeq,T}$ 的定义为:在特定测量时段(即从 t_1 时刻到 t_2 时刻)内,声压平方积分和的时间平均与基准声压平方之比的以 10 为底对数值的 10 倍,计算公式为^[9]:

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt}{p_0^2} \quad (1)$$

式中:

- $p_A(t)$ —— t 时刻的 A 计权瞬时声压值;
 p_0 ——基准声压,取 2×10^5 Pa;
 t_1 ——测量时段起始时刻;
 t_2 ——测量时段截至时刻。

1.2 暴露声级

暴露声级与等效连续声级类似,但采用 1 s 作为声音的参考持续时间,而非在整个测量周期内求平均值。暴露声级 L_{AE} 的定义为:声暴露量 E 与基准声暴露量 E_0 之比的以 10 为底对数值的 10 倍。其中,声暴露量 E 为特定测量时段(即从 t_1 时刻到 t_2 时刻)内声压平方积分和。

单次噪声时间的暴露声级计算公式为^[9]:

$$L_{AE} = 10 \lg \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (2)$$

式中:

- E ——声暴露量, $E = \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt$;
 E_0 ——基准声暴露量, $E_0 = 4 \times 10^{-10} \text{ Pa}^2 \text{ s}$ 。

考虑时段 T 内的 n 次噪声事件时,计算式可表示为:

$$L_{AE} = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{AE,i}} \quad (3)$$

1.3 昼夜等效声级

昼夜等效声级采用单一的计算结果来全面表征全天范围内的噪声污染状况。该方法通过对昼间与夜间噪声声压级进行加权求和,并特别考虑了噪声对居民休息时段可能产生的更强干扰效应。

昼夜等效声级 L_{dn} 计算公式为^[9]:

$$L_{dn} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{24} \left[t_d 10^{0.1 L_{d,h}} + t_n 10^{0.1 (L_{n,h}+10)} \right] \right\} \quad (4)$$

式中:

- $L_{d,h}$ ——昼间 h 小时的等效连续声压级;
 $L_{n,h}$ ——夜间 h 小时的等效连续声压级;
 t_d ——昼间的小时数;
 t_n ——夜间的小时数。

其中, t_d 、 t_n 时间段随国家和地区而异,GB/T 3222.1—2022《声学 环境噪声的描述、测量与评价 第 1 部分:基本参量与评价方法》中采用的时段分别是 15 h、9 h,即昼间为当日 06:00 至 22:00,夜间为当日 22:00 至次日 06:00。也有部分地区采用的时段为 16 h、8 h,即昼间为当日 07:00 至 22:00,夜间为当日 22:00 至次日 07:00。

为了提升全天各时段声压级加权计算的精确度,部分国家和地区采用昼-晚-夜等效声级 L_{den} 作为评价指标,将一天的 24 h 细致划分为昼、晚、夜 3 个时段,其计算式为^[1]:

$$L_{den} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{24} \left[t_d 10^{0.1 L_{d,h}} + t_e 10^{0.1 (L_{e,h}+5)} + t_n 10^{0.1 (L_{n,h}+10)} \right] \right\} \quad (5)$$

式中:

- $L_{e,h}$ ——晚间 h 小时的等效连续声压级;

t_d 、 t_e 、 t_n ——昼、晚、夜3个时段,默认值为12 h、4 h、8 h。

1.4 基于心理声学的声品质评价指标

在现有的标准体系中,A计权声压级被广泛用于评估轨道交通环境噪声。然而,心理声学研究表明,A计权声压级在衡量低频噪声、离散噪声及语音频率范围内的噪声时,无法准确模拟人耳对声音事件的主观感知过程。因此,引入了基于心理声学的声品质评价指标,以更精确地反映人体对环境噪声的烦恼程度。这一理论框架更侧重于人类对声音特性的主观判断。主要的声品质评价指标涵盖:响度、尖锐度、粗糙度、抖动度(又称波动度)以及烦恼度。

1.4.1 响度

响度是衡量人耳对声音强弱主观感知程度的关键参数,它考虑了听觉敏感频带的分布特性和声音的掩蔽效应。在声品质评价中,响度占据最大的权重,且与声压、频率及波形等因素密切相关。响度的符号为 N ,计量单位为sone,其中1 000 Hz、40 dB纯音的响度被定义为1 sone。根据Zwicker模型,响度 N 的计算式如下:

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N'_0 \left(\frac{E_{TQ}}{sE_0} \right) \left[\left(1 - s + \frac{sE}{E_{TQ}} \right)^k - 1 \right] dz \quad (6)$$

式中:

N'_0 ——参考特征响度;

E_{TQ} ——安静听阈的激励级;

E_0 ——参考声强 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 的激励级;

E ——各临界频带的激励级。

1.4.2 尖锐度

尖锐度反映了声音的音色特征,即声音的刺耳程度,它主要关注声音高频部分对总响度的贡献,相当于声音信号在频域上的“重心”。尖锐度的符号为 S ,计量单位为acum,其中1 000 Hz、带宽160 Hz、60 dB窄带噪声的尖锐度被定义为1 acum。基于Zwicker修正模型,尖锐度 S 的计算式为:

$$S = 0.11 \times \frac{\int N'(z) g(z) dz}{\int N'(z) dz} \quad (7)$$

式中:

$N'(z)$ ——某个Bark上的响度谱;

$g(z)$ ——高特征频带的加权函数。

1.4.3 粗糙度和抖动度(波动度)

粗糙度和抖动度(波动度)描述了声音的调制

特性,不同的调幅和调频会产生迥异的听觉感受。调制频率在20~200 Hz范围内主要反映声音的粗糙度,而调制频率低于20 Hz则主要反映声音的抖动度。粗糙度的符号为 R ,计量单位为asper,其中1 000 Hz、100%调幅、调制频率70 Hz、60 dB噪声的粗糙度被定义为1 asper。抖动度的符号为 F ,计量单位为vacil,其中1 000 Hz、100%调幅、调制频率4 Hz、60 dB噪声的抖动度被定义为1 vacil。两者的计算式分别为如下:

$$R = C_r \times \int d_L(z) f_{\text{mod}} dz \quad (8)$$

$$F = C_f \times \frac{\int d_L(z) dz}{f_{\text{mod}}/4 + 4/f_{\text{mod}}} \quad (9)$$

式中:

d_L ——调制深度;

f_{mod} ——调制频率。

1.4.4 烦恼度

烦恼度是衡量人对声音厌烦程度的重要指标,它综合考虑了响度、尖锐度、粗糙度及抖动度(波动度)4个声品质评价指标的影响。烦恼度的符号为 P_A ,为无量纲系数,可用au表示单位。其计算式如下:

$$P_A = N(1 + \sqrt{w_s^2 + w_{FR}^2}) \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} w_s = 0.25(S - 1.75) \lg(N + 10), & S > 1.75 \\ w_s = 0, & S \leq 1.75 \end{cases} \quad (11)$$

$$w_{FR} = 2.18(0.4F + 0.6R)/N^{0.4} \quad (12)$$

式中:

N ——累计百分比响度;

w_s ——尖锐度系数;

w_{FR} ——粗糙度与抖动度系数。

1.4.5 语言干扰级

语言干扰级是用于量化噪声对语言清晰度影响的一个简化参数,其依据为600~4 800 Hz中心频率区间内6个倍频带声压级平均值的计算结果。该参数的符号表示为LSI,其度量单位为dB。在噪声水平位于0~30 dB范围内时,对日常对话的干扰相对较小;当噪声水平处于30~60 dB区间时,对对话的干扰变得较为显著;而噪声一旦超过85 dB,则将严重阻碍正常交谈的进行。

2 基于噪声试验的评价指标对比

本文依据轨道交通行业的现行评价标准,选取国内某城市轨道交通线路周边居民住宅的室内二次结构进行噪声测试,旨在探讨不同评价指标对计算结果的具体影响。

测试过程中,室内二次噪声测点被布置于一楼至三楼面向地铁线路的房间中央,测点依次编号为 Z1、Z2 和 Z3,采样频率设定为 5 120 Hz。数据处理阶段,采用汉宁窗函数,响度与尖锐度的计算遵循 Zwicker 模型,且假定声场类型为自由场。

图 1 为 HJ 453—2018 评价量 1/3 倍频程等效连续声级,图 2 为 GB/T 50355—2018 评价量 1/1 倍频程等效声级。通过对比分析图 1 与图 2,可以观察到 HJ 453—2018 标准中采用的 1/3 倍频程等效连续 A 声级最大值普遍低于 GB/T 50355—2018 标准中采用的 1/1 倍频程等效声级最大值,因此,采用 GB/T 50355—2018 标准对噪声限值的要求更为严格。

图 3 揭示了各声品质评价量随楼层变化的趋势:总响度先减后增,部分三层测量值甚至超过一层,最大差异达到 2.55 sone;尖锐度沿楼层微弱衰减,每层衰减约 0.2 vacil;粗糙度则先增后减,二层与一层最大差异为 0.15 asper;烦恼度亦先减后增,一层最大烦恼度值达到 34.785 au;

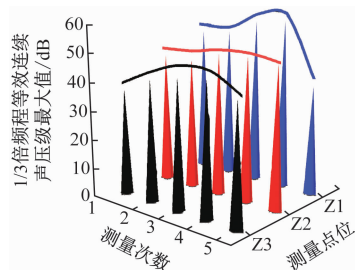


图 1 HJ 453—2018 评价量 1/3 倍频程等效连续声级

Fig. 1 HJ 453—2018 evaluation quantity 1/3 octave equivalent continuous sound level

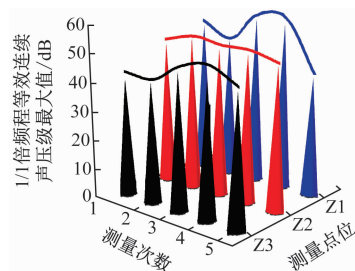


图 2 GB/T 50355—2018 评价量 1/1 倍频程等效声级

Fig. 2 GB/T 50355—2018 evaluation quantity 1/1 octave equivalent continuous sound level

同样呈现衰减趋势,每层衰减约 0.2 vacil;粗糙度则先增后减,二层与一层最大差异为 0.15 asper;烦恼度亦先减后增,一层最大烦恼度值达到 34.785 au;

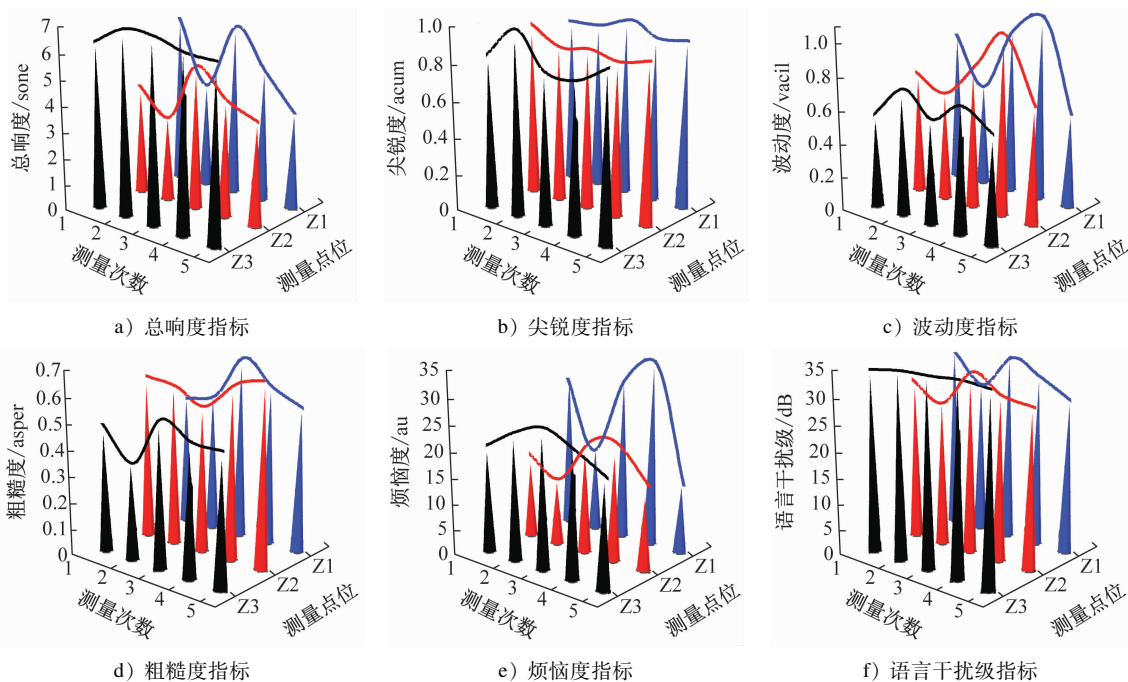


图 3 基于心理声学的声品质指标参量值

Fig. 3 Parameters of sound quality index based on psychoacoustics

语言干扰级同样先减后增,部分三层测量值高于一层,最大差异为 5.55 dB。这些结果表明,声品质评价量的变化规律与倍频程声压级随楼层增加而减小的趋势存在差异,提示单一声压级评价可能忽视了建筑物中层声品质指标参量值的增加,进而可能加剧环境噪声对人体的主观影响。因此,建议在环境噪声评价中引入心理声学声品质指标评价方法,以更准确地模拟人耳对噪声影响的主观感受。

3 结语

本文通过对铁路及城市轨道交通环境噪声影响评价标准进行深入分析,得出以下结论:

1) 室内二次结构噪声标准 JGJ/T 170—2009 中虽采用等效连续声级作为声学评价量,但根据计算公式,实际计算指标为多趟列车通过时段内的暴露声级,建议在后续修订中对此进行明确说明。同时,地方标准 DB 31/T 470—2009 中规定的频率范围(20~20 000 Hz)与二次结构噪声的低频特性不符,建议在修订时予以调整。

2) 基于现场实测数据,本文考虑了不同计算方法对噪声评价指标的影响,并建议采用重叠系数为 3/4 的峰值保持法进行数据处理。同时,分析了 1/3 倍频程声压级、1/1 倍频程声压级与声品质评价量随楼层增加的变化规律,建议在分析以低频特性为主的噪声时,结合 C 计权网络进行。此外,1/1 倍频程等效声级在特定频段内的噪声分布特性分析上表现更佳,且在低频范围内的计算结果通常大于等效 A 声级。因此,本文建议引入心理声学声品质评价指标,以更全面地模拟人耳对环境噪声的主观感受。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准: GB/T 50355—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for limits and measurement methods of vibration in the room of residential building: GB/T 50355—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [2] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 城市轨道交通: HJ 453—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for environmental impact assessment—Urban rail transit: HJ 453—2018[S]. Beijing: China Environ-

mental Science Press, 2018.

- [3] 中华人民共和国环境保护部. 城市轨道交通(地下段)结构噪声监测方法: HJ 793—2016[S]. 北京: 中国环境科学出版社 2016.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Measurement method of ground-borne noise arising from urban rail transit (underground): HJ 793—2016[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准: JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [5] 上海市质量技术监督局. 城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅建筑室内结构振动与结构噪声限值及测量方法: DB31/T 470—2009[S]. 上海: 上海市质量技术监督局, 2009.
Shanghai Quality and Technical Supervision Bureau. Limits and measurement methods for ground-borne vibration and noise in dwellings caused by the moving vehicles of urban rail transit (underground railway): DB31/T 470—2009[S]. Shanghai: Shanghai Quality and Technical Supervision Bureau, 2009.
- [6] 环境保护部. 声环境质量标准: GB 3096—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental quality standards for noise: GB 3096—2008[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化委员会. 城市轨道交通车站站台声学要求和测量方法: GB/T 14227—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Acoustical requirement and measurement on station platform of urban rail transit: GB/T 14227—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [8] 国家环境保护局. 铁路边界噪声限值及其测量方法: GB 12525—1990[S]. 北京: 国家环境保护局, 1990.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Emission standards and measurement methods of railway noise on the boundary alongside railway line: GB 12525—1990[S]. Beijing: State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China, 1990.
- [9] 国家市场监督管理总局, 中国标准化委员会. 声学 环境噪声的描述、测量与评价 第1部分: 基本参量与评价方法: GB/T 3222.1—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

(下转第 44 页)

建议,为乘客提供查询途径。

3) 基于第一、二点预先计算的数据,结合表 4 中的模型标定参数,针对受线路中断影响的 OD 客流,使用公式(1)计算 M1 至 M8 的选择概率。在进行 OD 客流重分布预测及客流清算后,识别并预警断面客流增大的路线,及时加开列车以疏导客流。

4 结语

1) 本文根据导致运营中断的重大风险突发事件类别,通过覆盖线网各类型线路的乘客问卷调查,分析了不同场景下乘客出行行为的差异程度。结果表明,乘客对各决策肢的选择意愿受突发事件类别、出行距离场景及出行时段峰期的影响。

2) 调查问卷结果显示,在同线短距离(TD1)出行场景下,当突发事件导致运营中断时,选择共享单车(M5)作为替代出行方案的乘客平均比例超过 4.5%。这表明将共享单车纳入决策肢是符合实际情况的。

本文利用调研数据分析了乘客在突发事件下的路径选择行为,建立了 Logit 模型,并探讨了影响乘客在突发事件下不同路径选择行为的因素。根据所建立的路径选择模型,客流疏导措施、接驳策略等对乘客的影响主要体现在出行时间和出行方式的改变上。由此,可计算这些措施和策略对乘客路径选择概率的影响。本文的后续研究目标是在进行 OD 客流量预测后,根据乘客路径选择模型实现重新配流,并利用配流后的断面客运量等结果对不同疏导措施的有效性进行评估。进一步地,以系统最优或用户均衡为目标,根据断面客运量的改善情况和疏导措施的评价结果,对疏导措施进行优化。

参考文献

- [1] BARRON A, MELO P C, COHEN J M, et al. A passenger-focused management approach to the measurement of train delay im-

pacts[J]. Journal of the Transportation Research Record, 2013, 2351(1): 46.

- [2] SUN H, WU J, WU L, et al. Estimating the influence of common disruptions on urban rail transit networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 62.

- [3] PNEVMATIKOU A M, KARLAFTIS M G, KEPAPTOSGLOU K. Metro service disruptions: how do people choose to travel[J]. Transportation, 2015, 42(6): 933.

- [4] 叶红霞. 突发事件下城市轨道交通网络客流重分布预测方法研究与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(8): 63.

YE Hongxia. On the prediction method of passenger flow redistribution under urban rail transit network emergency[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(8): 63.

- [5] 柳伍生, 潘自翔, 魏隽君, 等. 地铁站点运营中断下周边乘客的出行行为研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2953.

LIU Wusheng, PAN Zixiang, WEI Juanjun, et al. Research on the travel behavior of subway passengers under the influence of operation interruption[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2953.

- [6] 李臣, 陈艳艳, 周雨阳, 等. 城市轨道交通突发事件下乘客出行选择影响因素研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 105.

LI Chen, CHEN Yanyan, ZHOU Yuyang, et al. Influencing factors of passenger travel choice under urban rail transit emergency conditions[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 105.

- [7] 陈佳豪. 基于累积前景理论的城轨运营中断下乘客路径选择行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

CHEN Jiahao. Research on passenger's path selection behavior under the interruption of urban rail operation based on cumulative prospect theory[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

· 收稿日期:2023-11-28 修回日期:2024-01-03 出版日期:2025-03-10

Received:2023-11-28 Revised:2024-01-03 Published:2025-03-10

· 通信作者:郭靖凡,高级工程师,guojingfan@gzmt. com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 39 页)

General Administration of Quality Supervision, Standardization Administration of the People's Republic of China. Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise; part 1: basic quantities and assessment procedures; GB/T 3222. 1—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

· 收稿日期:2022-12-06 修回日期:2023-02-24 出版日期:2025-03-10

Received:2022-12-06 Revised:2023-02-24 Published:2025-03-10

· 第一作者:王嘉,博士研究生,jiawang@tongji. edu. cn

通信作者:李莉,副研究员,lilee@tongji. edu. cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license