

城市轨道交通噪声污染防治进展

户文成¹, 刘磊², 康钟绪^{1*}, 宋瑞祥¹, 张慧娟¹, 刘强¹

1. 北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 北京 100054

2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037

摘要 中国城市轨道交通发展迅速,运营里程已超过1万km,但随之而来的噪声污染问题日益严重。在总结近年来中国城市轨道交通行业发展的基础上,介绍了城市轨道交通噪声源种类和污染特点,调研了国内外城市轨道交通噪声污染管理方法现状,研究了国内外针对城市轨道交通噪声的控制技术及进展,重点分析了针对城市轨道交通轮轨噪声、桥梁结构噪声等重要噪声源的控制技术研究成果和应用情况,指出现阶段中国城市轨道交通存在的噪声相关问题,并提出了推进噪声排放标准制定、进一步加强城市轨道交通噪声控制技术研究和推广应用等建议。

关键词 城市轨道交通;噪声污染防治;轮轨噪声;结构噪声;声屏障

中国城市轨道交通处于快速发展阶段,运营线路长度迅速增加,截至2022年底,中国大陆地区共有55个城市开通城市轨道交通,运营线路308条,运营线路总长度10287.45 km^[1]。预计“十四五”期末城市轨道交通运营线路规模将接近13000 km,运营城市有望超过60座^[1]。可见,中国城市轨道交通运营规模持续扩大,在公共交通中发挥了明显的骨干作用,已经成为解决城市拥堵问题的首选之策^[2],为中国经济的发展作出了巨大贡献。

同时,城市轨道交通运营对环境造成的噪声污染也在日益加大,随着运营线路里程的增加,城市

轨道交通噪声问题越发凸显。以北京市为例,2021年因城市轨道交通噪声引起的投诉达437件,多以群体性噪声投诉案件为主,涉及八通线、5号线、13号线等多条线路,为城市的声环境管理增加难度。

噪声污染成为制约城市轨道交通发展及城市建设的重要因素,控制轨道交通噪声已经成为当前国家和行业关注的焦点问题之一。针对城市轨道交通噪声问题,2022年6月5日实施的《中华人民共和国噪声污染防治法》(简称《噪声法》)在完善噪声排放标准、强化噪声规划防治对策、噪声治理和运营噪声监测等方面提出了明确要求^[3-4]。

收稿日期:2023-11-07;修回日期:2024-05-07

作者简介:户文成,研究员,研究方向为环境噪声污染防治,电子信箱:who518@126.com;康钟绪(通信作者),研究员,研究方向为声学,电子信箱:zhongxukang@163.com

引用格式:户文成,刘磊,康钟绪,等.城市轨道交通噪声污染防治进展[J].科技导报,2024,42(20):70-84;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.01654

1 城市轨道交通噪声

中国城市轨道交通包括地下、地面、高架线等多种铺设形式,根据统计分析,全国城市轨道交通 10287.45 km 的运营里程中,容易引起线路两侧噪声污染的地面和高架线共约 2800 km^[1]。按《城市轨道交通分类》(T/CAMET 00001—2020)^[5],中国城市轨道交通分为地铁、轻轨、市域快轨、中低速磁浮、跨座式单轨、悬挂式单轨、自导向轨道、有轨电车、导轨式胶轮、电子导向胶轮等制式系统,此外,还有云轨等新型制式在开展研究^[6]。一般情况下,具有钢轮钢轨系统的地铁、市域快轨、轻轨系统噪声相对较高,引起的噪声问题更多,而根据各制式运营里程对比(图 1),恰恰是地铁、市域快轨、轻轨系统的占比较高,其中运行速度高的市域快轨还有持续增加的趋势^[1]。从分布城市看,存在地面线或高架线城轨的城市共 49 个,其中有地铁、轻轨或市域快轨运营的城市共 40 个(有地铁的城市 35 个,有市域快轨的城市 16 个,有轻轨的城市 3 个),这些城市可能成为城市轨道交通噪声污染的重点城市。

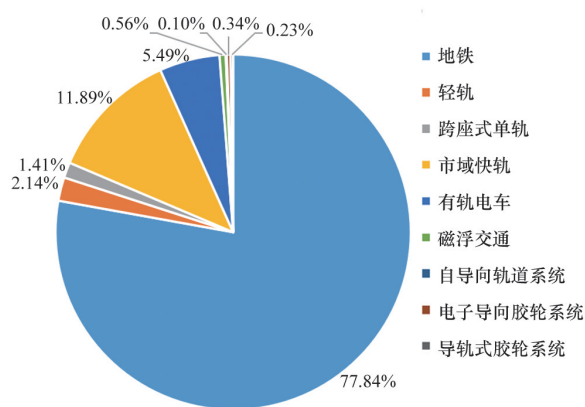


图 1 中国城市轨道交通各制式里程占比

从运行速度看,中国实际运营的城市轨道交通线路最高设计运行速度一般不超过 160 km/h。虽然《城市轨道交通工程基本术语标准》(GB/T 50833—2012)^[7]和《城市公共交通分类标准》(CJJ/T 114—2007)^[8]将高速磁悬浮系统也纳入城市轨道交通,国内仅有的 1 条高速磁浮线路速度可达 500

km/h,但运营总长短,约为 30 km,在中国城市轨道交通运营里程中占比极小。

1.1 城市轨道交通噪声源

城市轨道交通噪声有多种来源^[9-11],主要包括如下几种。

1) 车辆在线路轨道上正常运行产生的噪声,其中包括轮轨噪声、牵引机车及其辅助设备噪声、集电系统噪声、车辆气动噪声等。轮轨噪声是指由轮轨表面粗糙度和表面不连续的几何缺陷等激扰产生的轮轨振动或曲线轨道产生的轮轨摩擦振动向外辐射的噪声,包括摩擦噪声、冲击噪声和滚动噪声;牵引机车及其辅助设备噪声是车辆的牵引动力、传动、冷却通风等系统设备运行过程中形成的噪声;集电系统噪声是指受电弓与接触网(或供电第三轨)间的滑动摩擦产生的噪声;气动噪声是车辆高速运行时,列车表面与空气作用,引起附面层压力变化和产生气流涡旋、摩擦冲击形成的噪声。

对于钢轮钢轨系统轨道交通,车辆运营速度在 300 km/h 以下时,轮轨噪声辐射在轨道交通噪声中占主导地位^[12],因此,速度处于 160 km/h 以下的城市轨道交通噪声主要以轮轨噪声为主。钢轨辐射噪声主要集中在 500~1500 Hz 频段,车轮辐射噪声主要集中在 2000~4000 Hz 频段,其中峰值频率的变化受制式、车型、速度、轮轨关系、轨道结构等多种因素影响。

对于非钢轮钢轨系统的新型城市轨道交通,采用了胶轮、中低速磁浮系统等,没有钢轮钢轨导致的噪声,其整体噪声明显降低,测得的源强不超过 80 dB(A)^[6],对环境的影响显著减小。

2) 线路桥梁结构以及安装的声屏障等附属结构由于振动向外辐射的噪声。列车运行的强烈振动是激发桥梁结构噪声的主要原因,而桥梁振动及列车通过时的风压激励是声屏障结构辐射噪声的主要原因,研究显示^[11, 13-16],轨道交通桥梁结构噪声主要集中于 200 Hz 以下的低频段,峰值一般出现在 40~100 Hz 范围内,而声屏障的车致振动噪声主要集中在 120 Hz 以下的低频段。由于环境噪声的评价量均为 A 计权声级,一般情况下,能量主要集中在低频的结构噪声在 A 计权后对周围敏感点的

贡献仍相对较低。

3) 线路附属设施、设备噪声,包括车辆段、停车场等附属设施正常作业产生的噪声以及风亭、制冷通风设备等附属设备设施运行产生的噪声。

4) 列车运行产生的振动传播至附近建筑物,进而导致的室内结构辐射噪声。

按照《噪声法》对交通运输噪声的规定,城市轨道交通噪声应该是指城市轨道交通列车在运行时产生的干扰周围生活环境的声音,主要来源于地面和高架线路的部分噪声,这2部分噪声的控制成为防治城市轨道交通噪声污染的重点内容。车辆段、停车场等是城轨线路的附属设施,而风亭等附属设施是地下线路的主要噪声源,这些噪声影响区域虽小,但也会成为附近噪声敏感点的重要噪声污染源,一般在线路环评工作中会提出相应控制要求^[17]。由城轨列车运行的振动导致的噪声,形成于建筑物室内,会对建筑物室内人员的工作、休息造成影响,往往从减振角度进行控制^[17]。

1.2 城市轨道交通噪声影响特点与测量

1.2.1 城市轨道交通噪声影响特点

城市轨道交通具有明显的间歇性和周期性,单车持续时间短,噪声具有如下明显特点。

1) 噪声具有间歇性、周期性,规律明显。图2显示的是某线路轨旁噪声时间历程曲线。根据线路运行组织情况,车辆之间的发车间隔有较大区别。2022年,全国高峰小时最小发车间隔平均为269 s,但有17条线路间隔已经低于120 s,而在平峰时段发车间隔可到10 min,甚至更高。

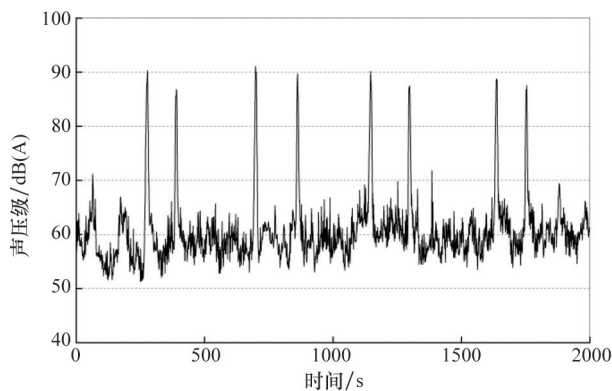


图2 某城市轨道交通线路轨旁噪声时间历程

2) 单车通过声级幅值高,持续时间短。城市轨道交通单车通过声级幅值往往明显高于背景噪声值(主要是钢轮钢轨系统制式),距离轨道中心线7.5 m处通过声级最高可达到85~95 dB(A)之间,图3所示为典型城市轨道交通单车通过时段的声压级曲线。根据实际运行速度以及编组长度不同,一般单车通过时间在4~15 s之间。幅值高、时间短、频繁发声的特点更容易引起附近居民的烦恼,特别是夜间时段,极易引起群众投诉。

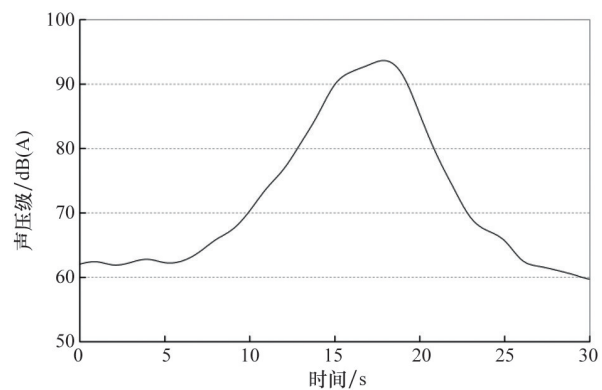


图3 单车通过时段声压级曲线

3) 单车通过声级不稳定,波动幅度大。由于线路和车辆维护保养的不及时以及车辆自身的差异,同一条线路、同一断面处的不同车辆的单车通过声级也具有较大的差异,可以达到6~8 dB(A),如图4所示。

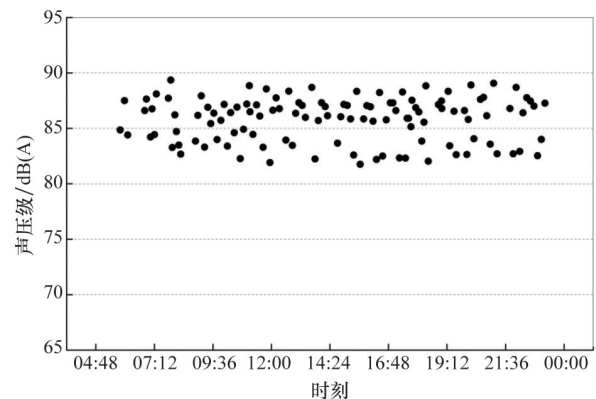


图4 某线路同一断面的单车通过声级差异

4) 与道路临近时,昼、夜等效声级的测量易受道路噪声影响。为方便出行,很多城市轨道交通线

路与城市道路甚至是主、次干路相邻,测量城市轨道交通噪声时,道路噪声成为了背景。虽然城市轨道交通单车通过声级高,但由于是间歇性,且单车噪声持续时间短,城市轨道交通昼、夜等效声级远低于其单车噪声,并不会明显高于作为背景的相邻道路噪声,甚至会低于道路噪声,导致城市轨道交通昼、夜等效声级无法准确测量。

5) 制式之间的噪声差别大,易引起线路附近的声环境质量超标。通过大范围的调研、测试发现,不同制式的噪声值差别大,根据单车通过声级数据可将中国10种制式的城市轨道交通系统分为3类:地铁和轻轨、市域快轨、其他制式。地铁和轻轨(最高设计运行速度为80 km/h时)单车通过声级主要分布在81~90 dB(A),其中小于85 dB(A)的占近70%,而市域快轨主要分布在75~93 dB(A)之间,其他制式主要分布在66~83 dB(A)之间。

根据单车通过声级和实际发车频次情况估算城市轨道交通线路对附近不同距离处的噪声贡献值,如表1所示。从表中数据可知,不考虑降噪措施情况下,地铁和轻轨、市域快轨会导致紧邻功能区的声环境超标,特别是夜间超标情况较为严重,最大超标量在15 dB(A)左右。

表1 紧邻不同功能区时边界处昼、夜间等级声级

边界处昼、夜间等级	功能区声级/dB(A)		
	地铁和轻轨	市域快轨	其他
7.5 m处单车值(假设)	85.0	90.0	80.0
紧邻2类时边界处昼间	62.9	61.9	47.7
紧邻2类时边界处夜间	58.1	61.9	47.7
紧邻1类时边界处昼间	61.3	60.5	45.5
紧邻1类时边界处夜间	56.5	60.5	45.5

注:表中估算采用频次为实地调研的平均值,市域快轨和其他制式的昼、夜间频次相同,因此结果相同;紧邻各类声功能区的边界位置按《声环境功能区划分技术规范》(GB/T 15190—2014)^[18]规定要求;按照《声环境质量标准》(GB 3096—2008)^[19]对不同功能区噪声限值要求,1类区限值为昼间55 dB(A)、夜间45 dB(A),2类区限值为昼间60 dB(A)、夜间50 dB(A)。

1.2.2 城市轨道交通噪声测量方法

城市轨道交通噪声的测量分为2种,一是单车通过声级测量,二是较长时间段内等效声级测量。

1) 单车通过声级测量。单车通过声级主要用于评价轨道机车车辆的噪声排放水平,是指车辆通过时间段内的等效连续A声级。在国际上,轨道交通单车噪声的测量主要以国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)的测量标准《Acoustics—railway applications—measurement of noise emitted by railbound vehicles》(ISO 3095—2013)为基本依据^[20],测点要求位于距轨道中心线7.5 m、高于轨面1.2 m处,轨道交通车辆速度等于或高于200 km/h时,测点选择在距轨道中心线25 m、高于轨面3.5 m处,如图5所示。中国的《声学 轨道机车车辆发射噪声测量》(GB/T 5111—2011)^[21]以ISO 3095为基本依据规定了轨道机车车辆车外噪声的测量方法,要求传声器置于轨道轴线两侧7.5 m、距轨顶面以上(1.2±0.2) m和距轨道轴线两侧25 m、距轨顶面以上(3.5±0.2) m,为了满足轨道车型式试验的要求,该标准详细规定了相应的车辆、轨道等测量条件,但在一般的交通噪声监测中,可以不必完全满足。此外,《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ 453—2018)^[17]中要求确定城市轨道交通源强时应参照GB/T 5111的相关规定,但为了测得噪声最大值,调整了部分情况下的测点高度:对于地面线,测点高度改为距轨顶面3.5 m处;对于高架线两侧有挡边结构的桥梁或有腹板结构的U型梁,测点高度为距轨顶面以上5 m处,两侧无挡板结构的桥梁,高度为距轨顶面以上3.5 m处;对于跨座式单轨交通,距轨顶面以上1.5 m,以及轨顶面以下1.5 m处均设测点。

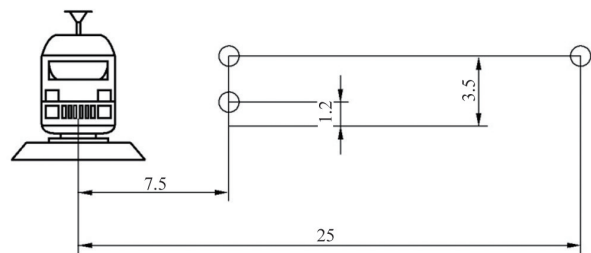


图5 单车噪声测点布置示意(单位:m)

2) 昼、夜等效声级测量。由于城市轨道交通噪声排放标准的缺失,主要以《声环境质量标准》

(GB 3096—2008)要求对其声环境影响进行测量和评价,其评价量为昼间、夜间等效声级,由于测量的数据包含了背景噪声,当需要划分城市轨道交通与其他噪声源的贡献时,需要进一步测量背景噪声并进行背景修正。

2 城市轨道交通噪声污染管理

2.1 国外管理要求

从20世纪90年代开始,国外多数国家对轨道交通噪声标准做了或多或少的规定^[22-23],但主要是针对铁路等传统轨道交通形式,对于城市轨道交通规定得较少。

2.1.1 美国

美国运输部联邦公共管理局(Federal Transit Administration,FTA)于2018年发布的《交通噪声及振动影响评估手册》提出了一套城市轨道交通噪声环境影响评价标准^[24]。该评价标准由2条曲线划分为3级:无影响区、有影响区和有严重影响区,如图6所示,2条曲线表示的是对应于各现状环境声级允许增加的轨道交通噪声声级,超过该值则被定义为有影响区。

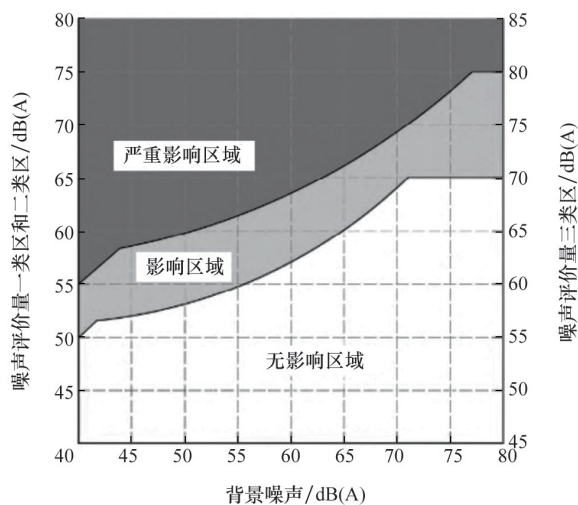


图6 美国交通项目噪声影响标准

土地按性质分为3类,特别需要安静的区域为1类区,公众夜间需要睡觉的场所为2类区,具有昼

间、夜间用途的公共建筑为3类区。对于1类和2类土地利用区的轨道交通噪声最高限值,标准规定轨道交通自身噪声等于或超过65 dB(A)的为有影响区,等于或超过75 dB(A)的为有严重影响区;3类土地利用区相应的标准值比1、2类土地利用区放宽5 dB(A)。

2.1.2 欧盟

欧洲各国按照轨道噪声的特点和不同的敏感建筑使用功能特点制定了不同轨道噪声限值^[25],测点位置为敏感建筑物外自由声场或户外1~2 m处。各国在制定轨道噪声标准的过程中,大部分考虑了新建和既有线路的差异,对于新建线路,各国的白天室外限值在55~70 dB(A)之间,夜间限值在45~60 dB(A)之间,对于既有线路,各国的白天室外限值在54~73 dB(A)之间,夜间在48~64 dB(A)之间,既有轨道交通噪声限值比新建线路宽松一些。

德国《交通噪声预防条例》(《Traffic noise prevention ordinance》)及《运输线路与声环境保护措施条例》(《Transportation route and sound protective measures ordinance》)规定,如果在一个新的建设项目,或对道路、铁路沿线的重大改造项目中,预计其噪声将会超过限制值,则必须实施噪声消减预防措施(表2)^[22]。

表2 德国轨道交通噪声限值

区域	环境噪声限值/dB(A)	
	昼间	夜间
医院、学校、中老年居住的住宅区	57	47
完全或通常作为住宅的区域,小型社区	59	49
中心区、村庄和混合区域	64	54
小型商业区	69	59

丹麦也有类似的限值要求,其区域分为城区或附近的休闲性区域、住宅区、公共机构、服务性企业等,除服务性企业等区域要求65 dB(A)外,其他区域限值均为60 dB(A)^[22]。

除此之外,欧盟还对轨道车辆规定了噪声限值要求^[22],测点为距轨道中心线7.5 m处,主要针对传统轨道交通车辆。

2.1.3 日本

为了缓解轨道交通引起的环境问题,日本针对新干线噪声制定了《关于新干线轨道噪声的环境标准》(1993年10月28日改为环境厅告示第91号),其中根据不同地域类型,提出噪声基准值,而哪些地区符合哪种类型由日本各级政府制定^[26]。评价量的获得方法是实测20辆列车来回通过时的最大声级后,取较高的一半数据的能量平均值(表3)。

表3 日本新干线噪声标准

地域类型	基准值/dB(A)
I类:居住用地区域	70
II类:商工业用地等非I类地区; 以及需要保证正常生活的地域	75

根据《针对常规铁路的新建线路或大规模改造时的噪声防止措施》(1995年12月20日环大第174号),当常规铁路建设新线路或进行大规模改造时,为了保障生活环境,提前预防噪声问题的发生,提出了特殊的方针要求^[22],见表4。

表4 日本建设新线或改造线路时有关噪声的要求

线路类型	要求
新线	昼间(7:00—22:00)为60 dB(A)以下 夜间(22:00—次日7:00)为55 dB(A)以下 在必须重点保护的居住区,应努力再降低分贝数
大规模改造线路	应比改造前的噪声值有所改善

2.2 国内管理要求

目前,中国尚未制定针对城市轨道交通噪声排放的评价指标和标准限值。

在环评阶段,依据《环境影响评价技术导则城市轨道交通》(HJ 453—2018)开展城市轨道交通的环评,需要满足《声环境质量标准》(GB 3096—2008)或不恶化当前的声环境质量,同时要求列出单车噪声数据,但并没有明确规定限值。

在验收阶段,依据《建设项目竣工环境保护验收技术规范 城市轨道交通》(HJ/T 403—2007)开展城市轨道交通建设项目验收^[27],仍以满足《声环

境质量标准》(GB 3096—2008)为主,针对线路噪声源提出了依据《铁路边界噪声限值及其测量方法》(GB 12525—1990)的要求^[28]。

在运营阶段,出现噪声问题并协调解决时也是依据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)。可见,由于没有排放标准,中国主要依据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)评价城市轨道交通噪声对环境的影响,其要求如表5所示。

表5 环境噪声限值

声环境功能区类别	时段环境噪声限值/dB(A)	
	昼间	夜间
0类	50	40
1类	55	45
2类	60	50
3类	65	55
4a类	70	55
4b类	70	60

注:0类声环境功能区:指康复疗养区等特别需要安静的区域;1类声环境功能区:指以居民住宅、医疗卫生、文化教育、科研设计、行政办公为主要功能,需要保持安静的区域;2类声环境功能区:指以商业金融、集市贸易为主要功能,或者居住、商业、工业混杂,需要维护住宅安静的区域;3类声环境功能区:指以工业生产、仓储物流为主要功能,需要防止工业噪声对周围环境产生严重影响的区域;4类声环境功能区:指交通干线两侧一定距离内,需要防止交通噪声对周围环境产生严重影响的区域,包括4a类和4b类2种类型。4a类为高速公路、一级公路、二级公路、城市快速路、城市主干路、城市次干路、城市轨道交通(地面段)、内河航道两侧区域;4b类为铁路干线两侧区域。

此外,中国针对不同制式的车辆制定了相应的通用技术条件^[29-33],其中规定相应的车外噪声限值要求,主要用于车辆产品定型时的型式检验(表6)。

表6 各制式城市轨道交通车外噪声要求

制式	标准	噪声要求/ dB(A)	测试速度/ (km/h)
地铁	GB/T 7928—2003	80	60
轻轨	GB/T 23431—2009	80	60
市域快轨	GB/T 37532—2019	85	*
有轨电车	CJ/T 417—2022	79	70
跨座式单轨	J/T 287—2008	75	60
中低速磁悬浮	CJ/T 375—2011	68	60

注:表中噪声测点距轨道中心线距离均为7.5 m;*表示最高运行速度的75%。

3 城市轨道交通噪声控制技术

城市轨道交通噪声的控制技术一直是噪声控制领域中研究重点之一。

3.1 噪声源头控制

3.1.1 轮轨噪声控制

轮轨噪声是轮轨相互作用产生的,包括滚动噪声、冲击噪声和曲线啸叫噪声^[10]。对于现阶段的城市轨道交通,轮轨噪声仍是最为重要的噪声源。

轮轨噪声随着运行速度增加而逐渐增大^[34]。现阶段市域快轨的占比逐渐增加,高速的城市轨道交通车辆也相应增加,此外,城市轨道交通中小半径曲线多、制启动频繁,出现大量钢轨波磨问题,导致强烈的轰鸣噪声,加剧了城市轨道交通轮轨噪声影响^[35]。轮轨噪声的控制显得极为重要,主要集中在以下几个方面。

1) 低噪声车轮。研究人员通过多种方法实现低噪声车轮的设计。除了通过对车轮外形和型面做声学优化设计或使用弹性车轮抑制车轮辐射噪声外,还可以通过车轮降噪阻尼器、降噪阻尼环的安装、车轮约束阻尼处理等手段实现车轮辐射噪声的控制^[35-36]。

低噪声车轮在轨道交通上已有所应用^[36-41],日本和巴黎地铁应用弹性车轮,可降低车轮噪声 10 dB(A),德国铁路车轮应用阻尼器,可降低轮轨总噪声 5~9 dB(A),其中车轮本体的噪声可降低 10 dB(A);意大利有轨电车上应用的阻尼器,可降低轮轨总噪声 1~3 dB(A),其中车轮本体噪声可降低 3~5 dB(A),有效降低小曲线段行驶时的啸叫声。

国内研究虽然起步较晚,但也取得了一定的成果^[42-45]。研究的车轮约束阻尼处理技术应用于 KKD 型车轮^[43],在实验室内测试降噪效果达到了 10 dB(A)。设计的车轮阻尼器^[44]应用于地铁和轻轨车轮上,用于抑制轮轨高频啸叫噪声。研制的阻尼环设计简单、安全可靠,在国内 ZMB080 型地铁车辆转向架车轮中率先应用^[42,45],实现了 10 dB(A)左右的降噪效果。广州、深圳、成都等城市的多条地铁线路上应用了新研制的低噪声车轮,低地板有轨电车上应用了新研制的弹性车轮。

2) 钢轨降噪措施。利用调谐质量阻尼吸振技术或约束阻尼处理技术,将钢轨振动能量转移到吸振器质量块或阻尼材料中消耗掉,可以有效降低钢轨振动,从而减少向环境辐射噪声。主要的措施包括阻尼钢轨、钢轨吸振器等。

国外开展了多项相关研究^[46],日本曾在高架铁道敏感地段采用阻尼钢轨,在轨腰两侧粘贴防振材料,增加振动沿钢轨的衰减率,可降低钢轨声功率 12 dB(A)。由于钢轨动力吸振器比阻尼钢轨在更宽的频率上具有更好的减振降噪效果,新西兰、法国、德国和瑞典等国已投入使用^[47]。

国内开展了阻尼钢轨、轨道噪声控制器的模型研究,测试对比了不同措施对钢轨噪声的控制效果^[48-50],北京地铁 13 号线的对比测试显示,钢轨安装阻尼板后轨腰的振动峰值降低了 6~7 dB(A)^[49],而采用脉冲激励法测试的钢轨噪声控制器在中低频处具有较好的噪声控制效果,降噪量达到 4~6 dB(A)^[50]。研制的 SJTU-2 型钢轨吸振器结合了动力吸振和多层约束阻尼^[51],可以降低 200 Hz 以上的噪声,在上海轨道交通 3 号线和 4 号线的应用中,正线实现约 4 dB(A)的降噪量,站台实现 2~3 dB(A)的降噪量。一种迷宫式约束阻尼降噪钢轨在北京地铁得到试验应用,实现了 3~8 dB 的降噪量^[52]。

3) 轨道吸声板。中国大量城市轨道交通线路采用无砟轨道结构,但从噪声辐射角度看,无砟轨道线路轮轨噪声比有砟轨道高约 6 dB(A)^[53]。而在无砟轨道混凝土板表面铺设轨道吸声板或吸声块,可以吸收部分轮轨噪声(也包括牵引噪声),具有与有砟轨道道砟功能类似的效果,德国的应用经验表明,吸声板或吸声块的使用可实现 3~5 dB(A)的降噪量^[10]。日本、韩国等对道床吸音板进行了一系列研究和实际应用,降噪量可达 3.9~6.2 dB(A)^[54]。

国内在轨道交通车站轨道区铺设轨道吸音板的测试显示能实现 4~5.8 dB(A)的降噪量^[55]。研发的以水泥为胶结料、膨胀珍珠岩为骨料的轨道吸声板价格低廉,在铁路轨道的应用实现了 1.9 dB(A)的降噪量^[56]。北京地铁昌八联络线铺设的轨道吸音板产生了 3 dB(A)以上的降噪效果^[57]。在深圳 11 号线实施的水泥基陶粒多孔地铁轨道吸音板,

实现了轨旁噪声平均2.2 dB(A)、最大2.9 dB(A)的降噪效果^[58]。

4) 轮轨打磨及其他。钢轨表面粗糙度是产生轨道振动噪声的起因,而钢轨打磨可以降低钢轨粗糙度,消除钢轨表面的擦痕和波磨,实现轮轨噪声的声源控制。通过钢轨打磨,可实现降低轮轨滚动噪声5 dB(A)以上^[46],对于波磨严重情况,改善效果更好。该技术在加拿大、澳大利亚、中国、南非、英国、德国、法国、荷兰、日本等均有大规模应用^[10]。

通过轨顶涂敷摩擦调节剂,改变轮轨之间的轨顶摩擦特性,可有效抑制、延缓轨顶磨耗,从而实现噪声的抑制。欧洲和日本的应用显示,该措施可有效减缓钢轨波磨的发展^[59-61],而在中国西安地铁渭河车辆段的对比测试显示,在一些小半径曲线段,轨顶摩擦调节剂实现了约12 dB(A)的降噪效果^[62]。

定期检查、镟修车轮,打磨车轮扁疤,消除因车轮扁疤导致的车轮不圆整,降低车轮对钢轨的骤然压力及撞击力,可减少噪声辐射。此外,通过线路设计上减少小半径曲线段、采用超长无缝钢轨等方法也能有效控制轮轨噪声辐射^[44]。

3.1.2 桥梁结构噪声控制

列车通过高架桥梁时,振动能量通过轨道结构传递到桥面及其他桥梁构件,激发桥梁振动并向空中辐射噪声,被称为桥梁结构噪声。桥梁结构噪声主要集中在低频范围,由于环境中的中高频噪声会对低频噪声产生一定的掩蔽效应,长期以来桥梁结构噪声对环境的影响一直被低估,但当轨道交通中高频噪声得到有效控制后,桥梁结构噪声将逐渐暴露出来^[63]。

由于桥梁自身结构较大,声辐射表面积较大,且声屏障往往安装于桥梁之上,无法阻挡桥梁结构噪声辐射,因此,研究和技术人员主要从减少列车通过时向桥梁传递的振动能量和降低桥梁自身结构噪声辐射能力2方面出发开展其噪声控制研究^[11,13-15,63]。

1) 桥梁结构自身优化。研究发现,混凝土梁结构噪声低于钢梁结构,而混凝土梁不同桥梁截面结构形式的声辐射特性也存在差异^[11,13,63]。研究显示,混凝土U梁结构噪声大于箱梁3~6 dB(A)^[64],而

单箱单室梁结构噪声比单箱双室梁大3.3 dB(A),比双箱双室梁大6.7 dB(A)^[65]。改变桥梁的约束条件能够影响其噪声辐射,数据显示,短接刚性连续箱梁比简支箱梁降低了3 dB(A)^[66];固支箱梁噪声比简支箱梁小8 dB(A)左右^[64]。通过优化桥梁的结构参数也可实现对噪声辐射的影响。研究显示,增大桥梁板件厚度,能够降低噪声辐射^[67],将U梁腹板和底板厚度从24 cm优化至34 cm,结构辐射噪声可降低4 dB(A)^[68]。将简支箱梁腹板倾角从24°降低至12°可以降低结构噪声^[69],针对广州地铁6号线连续刚构箱梁腹板倾角优化显示^[70],倾角从48°减小到42°时斜下方结构噪声可以降低1.5~2.0 dB(A),减小到35°时可以降低3.0 dB(A)以上。通过在桥梁局部增设加劲肋的方式来提高桥梁的局部刚度也会影响其声辐射特性^[71],设置横肋能有效降低结构噪声辐射,横肋全跨布置比仅在跨中加密布置效果好^[72]。

桥梁结构上敷设约束阻尼,通过黏弹性材料消耗结构振动机械能,可以达到降噪目的。研究显示^[73-74],约束阻尼层对钢混结合桥梁较宽频段内具有降噪效果,且高频段降噪效果优于低频段,可使噪声降低4.3 dB(A)。

桥梁上安装调谐质量阻尼器,改变桥梁共振特性,也可达到减振降噪目的^[75-76]。数值仿真结果显示,多重动力吸振器对城市轨道交通混凝土箱梁的降噪量达到了3 dB(A),而对广州地铁4号线20 mm混凝土简支箱梁研制的调谐质量阻尼器,在安装后的测试结果显示,桥下共振频带处噪声降低9.3~12.4 dB(A),10次过车降噪量平均值为2.1 dB(A)。

2) 轨道减振措施。采用减振扣件、梯形轨枕、橡胶减振垫、钢弹簧浮置板等减振措施,降低钢轨传递到桥梁上的振动能量,从而降低桥梁结构噪声^[11]。

针对减振扣件的测试研究显示^[77],与DZIII-1型普通减振扣件相比,采用GJIII型中等减振扣件时,梁下噪声降低2.8 dB(A)。虽然减振扣件可以减少从钢轨传入桥梁的振动能量,进而降低桥梁结构噪声,但一定程度上会增加钢轨振动与噪声^[78]。

梯形轨枕在北京5号线高架段的实验实现了

桥梁结构噪声 0.8~2.4 dB(A) 的降噪效果^[79], 而其他研究数据显示, 对混凝土梁的降噪效果仿真结果能够达到 7 dB(A) 左右^[78,80], 但研究显示, 梯形轨枕会使桥面以上噪声有所增加^[81]。

针对橡胶减振垫的研究发现, 与普通轨道相比, 采用橡胶减振垫后, 仿真的高架桥梁结构噪声能够实现 8 dB(A) 以上的降噪效果^[82~84], 杭州地铁 1 号线的高架段实测显示, 橡胶减振垫能够降低桥梁结构噪声 6.9 dB(A), 但却导致轮轨噪声的增加^[85]。

钢弹簧浮置板属于高等减振措施, 能够大幅降低振动向桥梁结构的传递, 仿真研究显示, 钢弹簧浮置板能够降低桥梁结构噪声 20 dB(A) 以上^[86~88], 且有研究认为, 采用钢弹簧浮置板轨道的箱梁在各场点平均降噪量达到 16.6 dB(A), 橡胶减振垫平均降噪量达到 10.6 dB(A), 减振扣件平均降噪量为 5.6 dB(A), 钢弹簧浮置板轨道的降噪效果最优^[89]。上述研究只考虑了桥梁结构噪声, 在应用钢弹簧浮置板实际轨道交通线路中, 轨道中心线 7.5 m 处的测试结果显示, 钢弹簧浮置板的实际降噪量不高, 最大仅能达到 3.7 dB(A)^[90]。同时, 车内噪声测试显示, 采用钢弹簧浮置板减振措施一般会导致车内噪声增加 3~5 dB(A)^[91~92]。

3.1.3 其他噪声控制

城市轨道交通速度一般不会超过 160 km/h, 与速度相关的气动噪声、集电系统噪声等声源能量占比小, 在此不再详述其控制方法。

对于车辆零部件噪声以及风亭、冷却塔等附属设备设施噪声的控制仍以吸声、消声、隔声等传统降噪技术针对具体设备实际情况进行。

线路附近敏感建筑物室内结构噪声, 是由线路上车辆运行的振动传播至建筑结构导致的, 通过轨道减振和建筑物减振等措施能够得到有效控制^[89]。

3.2 噪声传播途径控制

在噪声传播路径上进行控制是城市轨道交通噪声的主要控制方法, 主要措施是声屏障^[9,13~15]。声屏障主要通过支撑结构和屏体拼接组成, 支撑结构一般为钢柱, 屏体主要为各种隔声材料, 包括混凝土板、金属板及透明塑料板材料, 为了减少反射, 提高降噪性能, 屏体结构中往往增加吸声材料, 如玻

璃纤维、矿渣棉、石棉、泡沫铝等。

声屏障措施一般应用于地面段、高架段城市轨道交通的噪声控制, 根据结构形式可以分为直立型声屏障和封闭型声屏障。

3.2.1 直立型声屏障

直立型声屏障是最常用的结构形式, 施工方便、技术成熟、占据空间小, 往往是声屏障的首选。

直立型声屏障的降噪性能主要取决于屏障高度, 同时, 其降噪效果仅体现在屏障的声影区内。常规直立型声屏障高度一般在 3~5 m 左右, 能够有效地遮挡轮轨噪声的传播, 周边具有高层敏感建筑物时, 提高声屏障高度, 可进一步提高其降噪能力, 一般情况下, 直立型声屏障的综合降噪量为 3~10 dB(A)^[9,13,93]。

加装、优化声屏障的顶部结构^[94~96], 比如 Y 型、T 型、内折型及其他复杂结构等, 可以在增加声屏障实际高度的情况下, 提升降噪量 1~4 dB(A)^[13]。对比刚性、吸声、软表面 3 种结构形式声屏障的降噪性能表明, 吸声、软表面结构都能较好地改善声屏障的声学性能, 且软表面声屏障降噪效果最好, 同等高度下, 顶端为软表面的 T 型声屏障具有较好的降噪效果, 噪声附加插入损失可达 8 dB(A) 以上^[97]。

部分学者还从提高声屏障板件的隔声性能角度开展研究^[98~100], 提升了直立型声屏障的插入损失, 当然结合经济可行性, 新材料在实际工程中的应用仍相对较少。

3.2.2 封闭型声屏障

总体来说, 直立型声屏障因高度受限, 其降噪效果有限, 不适用于有较高降噪需求的噪声敏感区, 特别是对于沿线高层建筑降噪效果不明显。为了阻挡更多的噪声辐射, 将直立型声屏障屏体向顶部延伸, 用声屏障屏体将轨道侧面和顶部进行局部或全部封闭, 形成封闭型声屏障, 可以大幅提高声屏障降噪效果。

半封闭声屏障, 是指屏体封闭一侧以及顶部的部分或全部, 可大幅降低轨道交通噪声对高层建筑的影响。半封闭声屏障在城市轨道交通中得到了广泛的应用, 如上海、武汉、宁波等城市^[9,13]。研究人员开展的封闭型声屏障实验研究数据显示, 半封

闭声屏障的降噪量约为 15 dB(A)^[101-103], 上海轨道交通 3 号线半封闭声屏障的实测降噪量可达 12.8~15.4 dB(A)^[104]。

全封闭声屏障是指屏体进一步延伸, 将线路两侧和顶部完全封闭, 仅在少量局部位置开口(主要考虑通风排烟和安全需求)。由于将噪声源全部封闭在内部, 全封闭声屏障降噪效果最佳, 对线路两侧的噪声防护效果最好, 全封闭声屏障试验研究显示, 其降噪量超过 20 dB(A)^[101-103]。全封闭声屏障已经在上海、宁波、杭州、北京等城市的轨道交通部分路段应用。由于全封闭声屏障插入损失的测试有一定难度, 效果的测试数据相对较少。上海轨道交通 6 号线全封闭声屏障效果测试结果为平均降噪 20 dB(A), 最高 23 dB(A)^[105], 针对宁波轨道交通 1 号线高架段全封闭声屏障的效果测试显示, 地面测点随着距离增加降噪效果增加, 最大达到了 13 dB(A)^[106], 深茂铁路全封闭声屏障的测试数据显示实际降噪量达到了 16~18 dB(A)^[107]。一般情况下, 为了满足通风排烟等要求, 往往需要在局部留有开口, 仿真研究显示, 全封闭声屏障的开口面积比对两侧高层建筑物的达标情况具有显著影响, 开口越大, 相同高度楼层的达标距离需求越远^[108], 此外, 开口对两侧建筑物的噪声影响受频率、开口结构的影响, 还具有显著的指向性特性^[109]。针对顶部开口影响的研究显示^[110], 近场降噪量能够达到 15 dB(A), 远场为 10 dB(A), 开口导致的漏声降低了全封闭声屏障的降噪效果。为此, 一些城市设计全封闭声屏障时, 开始考虑在开口位置安装消声装置, 仿真研究显示^[111], 安装消声百叶等装置后, 敏感点处可实现 7 dB(A) 以上的降噪效果。

3.3 受声点控制

城市轨道交通无法采取有效控制措施, 或采用源头控制、噪声传播途径控制措施后仍无法满足降噪需求时, 为敏感建筑物更换隔声窗成为解决噪声问题最后一种有效手段。隔声窗可以在室外声环境无法满足要求的情况下实现室内的噪声达标。

隔声窗一般是指隔声量超过 25 dB 的外窗, 并有行业标准《隔声窗》(HJ/T 17—1996)^[112]规定了其性能等级分级, 如表 7 所示, 根据隔声需求可以按

等级选取相应窗户等级。

表 7 隔声窗的隔声性能等级分级

等级	计权隔声量 R_w /dB
I	$R_w \geq 45$
II	$45 > R_w \geq 40$
III	$40 > R_w \geq 35$
IV	$35 > R_w \geq 30$
V	$30 > R_w \geq 25$

隔声窗的隔声性能与玻璃结构的选择、框架与安装时的密封、规避共振和吻合效应等相关, 一般情况下, 采用单层、多层或夹胶玻璃等不同结构形式对隔声性能影响最大^[113]。

目前, 一些性能要求较高的建筑外窗采用三玻两腔中空玻璃构造, 研究发现^[114], 与等厚中空玻璃构造相比, 不等厚中空玻璃的构造可以显著提升中空玻璃的隔声效果, 外侧玻璃厚度尽可能大, 增加内外玻璃的面密度之差, 能尽可能地减少两片玻璃的共振和吻合效应, 以此提高玻璃整体的隔声性能。真空玻璃^[115]在中高频段的隔声效果显著提升, 但由于真空玻璃的生产工艺复杂, 造价高昂, 实际无法大规模推广。夹胶玻璃^[116]是在两片玻璃之间通过特殊的高温处理夹入了一层或多层有机聚合物中间膜, 使玻璃和中间膜永久黏合在一起的一种特殊复合玻璃。中间膜通常使用 PVB(聚乙烯醇缩丁醛)、EVA(乙烯醋酸乙烯共聚物)、PU(聚氨酯)等高分子材料, 声音透过时高分子链会产生摩擦和位移, 消耗一定的声能, 起到了阻尼作用, 从而整体上提升玻璃隔声性能^[117]。

4 中国城市轨道交通噪声污染防治建议

通过广泛的调研发现, 中国城市轨道交通存在如下问题。

1) 城市轨道交通线路规划阶段对噪声问题重视程度不足。在城市轨道交通线路规划设计阶段, 针对城市声环境规划的考虑仍显不足, 致使线路与敏感点的相对位置更易产生噪声投诉问题, 且不利

于后期降噪措施的实施,造成改造困难、集中投诉等问题。

2) 城市轨道交通噪声排放标准缺失。在中国城市轨道交通如此迅速发展情况下,未出台城市轨道交通环境噪声排放标准,导致大量噪声问题难以解决。

首先,噪声排放标准的缺失导致在线路的设计、环评、验收等阶段,只能以《声环境质量标准》(GB 3096—2008)为依据,无法真正评价城市轨道交通的实际影响。其次,运营阶段,车辆状态、轮轨打磨、零部件维护保养等因素都可能引起噪声排放的增加和单车噪声的差异,噪声排放标准的缺失导致线路运营阶段的噪声排放无法监管,不能及时处理相关问题,导致形成大量投诉事件。最后,噪声排放标准的缺失导致管理困难。对于新建线路,难以明确城市轨道交通自身的排放责任,对于既有项目,噪声超标则完全看群众的投诉,一般“一事一议”,只能通过政府或主管部门协调解决,或通过法律诉讼解决,群众和责任单位的权益保障缺乏标准支撑。而对于城市轨道交通和道路交通噪声并存时,噪声超标责任划分难,噪声问题处理难。

3) 单车噪声重视程度不够。城市轨道交通噪声具有明显的单车特性,而且单车噪声幅值高、持续时间短但频繁出现是群众投诉的重要原因,但现阶段,中国仅有针对车辆定型时的车辆噪声要求,对实际运行的单车噪声并没有明确的限制要求,不利于单车噪声扰民的控制。

4) 噪声控制技术仍有不足。城市轨道交通噪声的控制技术研究及应用仍有不足之处,如从车辆到线路等产品、设备、设施的声学一致性差,直立型声屏障效果有限,封闭型声屏障应用上仍不普遍,轨道减振措施有利于控制振动的传递但不利于轮轨噪声的控制,针对结构声尚未形成特别有效、可行的技术措施等。

针对中国城市轨道交通噪声污染防治现状以及存在的问题,提出如下建议。

1) 在国际上针对城市轨道交通噪声污染的管理,尚未形成统一的思路,国内也主要从声环境质量角度开展。管理方法的不完善,导致城市轨道交通

存在实际噪声排放难以评价、运营阶段噪声无法监管、噪声超标责任划分困难、管理无依据等问题,因此应尽快制订、完善中国城市轨道交通噪声排放标准,以排放标准为依据,从线路规划、设计、环评、验收、运营期噪声监管等各阶段加强对城市轨道交通噪声的管理。

2) 城市轨道交通噪声主要取决于车辆及与车辆配合的线路系统,表现形式上具有显著的单车特性,应进一步完善车辆等产品噪声标准,加强系统各环节、各阶段的声学设计技术研究,提升产品声学一致性,系统声学一致性,有效控制单车噪声。

3) 城市轨道交通噪声应从源头、传播途径、受声点3个方向加强噪声控制技术研究和应用。进一步研究针对轮轨、结构声的高性能屏障措施,并积极推广应用,加强轮轨噪声和结构辐射声的联合研究,开展平衡减振与降噪的新技术研发,加强基于声学的车辆、轮轨维护保养技术和产品研发。

参考文献 (References)

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2023.
- [2] 侯秀芳, 李楠. 城市轨道交通行业统计分析工作及基于统计分析建立综合效能评价体系的初步研究[J]. 城市轨道交通, 2016(3): 20-26.
- [3] 袁杰, 刘炳, 江别涛. 中华人民共和国噪声污染防治法》释义[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 2022.
- [4] 伍向阳, 辜小安, 刘兰华. 新形势下轨道交通噪声防治应对策略探讨[J]. 中国环保产业, 2022(6): 55-57, 62.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通分类: GB/T 44413—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [6] 刘明辉. 新型轨道交通噪声振动源强特性研究[J]. 黑龙江环境通报, 2018, 31(1): 79-82.
- [7] 城市轨道交通工程基本术语标准: GB/T 50833—2012[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.
- [8] 中华人民共和国建设部. 城市公共交通分类标准: CJJ/T 114—2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [9] 王之龙. 城市轨道交通噪声控制技术研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(9): 87-90.
- [10] 杨新文, 王金, 练松良. 轨道交通轮轨噪声研究进展[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 100-108.
- [11] 刘林芽, 宋立忠, 秦佳良, 等. 轨道交通桥梁结构噪声

- 研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 1-19.
- [12] 中国铁道科学研究院. 京津城际铁路动态检测报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008.
- [13] 李小珍, 杨得旺, 郑净, 等. 轨道交通桥梁减振降噪研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 55-75, 136.
- [14] 李小珍, 郑净, 宋立忠, 等. 轨道交通桥梁减振降噪 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 223-234.
- [15] 李小珍, 郑净, 毕然, 等. 轨道交通桥梁减振降噪 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 142-151.
- [16] 张小安, 翟婉明, 石广田, 等. 城市轨道交通直壁式声屏障车致振动噪声研究[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(1): 78-87.
- [17] 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.
- [18] 环境保护部. 声环境功能区划分技术规范: GB/T 15190—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2015.
- [19] 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.
- [20] International Organization for Standardization. Acoustics—railway applications—measurement of noise emitted by railbound vehicles: ISO 3095: 2013(E)[S]. Switzerland: ISO, 2013.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学 轨道机车车辆发射噪声测量: GB/T 5111—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [22] 储益萍, 周裕德, 祝文英. 国内外城市轨道交通噪声标准探讨[J]. 噪声与振动控制, 2007(增刊1): 138-143.
- [23] 石凯琴, 张楠, 王晨, 等. 中外轨道交通噪声标准探析[J]. 声学技术, 2022, 41(4): 570-576.
- [24] U. S. Department of Transportation. Transit noise and vibration impact assessment manual (Report 0123) [R]. Washington D. C.: Federal Transit Administration, 2018.
- [25] Kalivoda M, Danneskiold-Samsøe U, Krüger F, et al. EU Rail Noise: A study of European priorities and strategies for railway noise abatement[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(3): 387-396.
- [26] 加岛章. 日本城市轨道交通的环境政策[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(1): 64-71.
- [27] 国家环境保护总局. 建设项目竣工环境保护验收技术规范 城市轨道交通: HJ/T 403—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [28] 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: 中国环境科学出版社, 1990.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局. 地铁车辆通用技术条件: GB/T 7928—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市轻轨交通铰接车辆通用技术条件: GB/T 23431—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通市域快线 120 km/h ~ 160 km/h 车辆通用技术条件: GB/T 37532—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 跨座式单轨交通车辆通用技术条件: CJ/T 287—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中低速磁浮交通车辆通用技术条件: CJ/T 375—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [34] 叶军, 郭骁, 王冠, 等. 时速 80 ~ 250 km 轨道交通轮轨噪声源贡献特性研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(2): 60-64, 70.
- [35] 徐志胜. 轨道交通轮轨噪声预测与控制的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [36] 查国涛. 橡胶减振降噪元件在轨道交通轮轨中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [37] Cervello S, Donzella G, Pola A, et al. Analysis and design of a low-noise railway wheel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(3): 179-192.
- [38] Merideno I, Nieto J, Gil-Negrete N, et al. Theoretical prediction of the damping of a railway wheel with sandwich-type dampers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(20): 4897-4911.
- [39] 崔应港, 蔺高. 城轨交通轮轨降噪措施现状分析[J]. 科技创新与应用, 2014, 4(30): 38-39.
- [40] 邹强, 江波, 刘友存, 等. 阻尼车轮的降噪结构设计与应用[J]. 铁道车辆, 2016, 54(4): 6-8, 4.
- [41] Steven C, 云济. Syope 新型降噪车轮[J]. 国外机车车辆工艺, 2003(6): 34-36.
- [42] 刘晖霞, 易兴利, 张斌. ZMB080 型地铁车辆转向架车轮降噪研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(4): 22-24, 28.
- [43] 雷晓燕, 张鹏飞. 阻尼车轮减振降噪的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 60-64.
- [44] 朱学治. 火车车轮阻尼器的降噪性能分析及其改进技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [45] 孟磊, 王罡, 张斌, 等. 北京地铁 10 号线车轮降噪片换装降噪环研究及示范[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(2): 47-50, 95.

- [46] 陶洪敏, 宋雷鸣. 轨道结构的减振降噪技术[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(4): 43-44, 54.
- [47] 圣小珍, 雷晓燕. 欧洲铁路轮轨噪声研究方法和进展[J]. 华东交通大学学报, 2001, 18(3): 6-10.
- [48] 关静岩. 城市轨道交通钢轨的动力吸振技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [49] 魏鹏勃, 夏禾, 曹艳梅, 等. 安装阻尼板的钢轨减振性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4): 35-39.
- [50] 宋雷鸣, 孙守光. 钢轨噪声控制技术的实验研究[J]. 振动工程学报, 2004, 17(S2): 1113-1115.
- [51] 蒋伟康, 万泉, 严莉, 等. 轨道交通的约束阻尼钢轨吸振器技术研究与应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 78-80, 226-227.
- [52] 尹学军, 张宝才. 迷宫式约束阻尼钢轨的原理与工程应用[C]. 海峡两岸轨道交通建设与环境工程高级技术论坛. 北京: 人民交通出版社, 2008: 360-365.
- [53] Diehl R J, Nowack R, Hölzl G. Solutions for acoustical problems with ballastless track[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 899-906.
- [54] 徐露颖, 罗雁云, 李莉. 吸声板在轨道交通噪声控制中的应用[J]. 交通与运输(学术版), 2013(1): 132-136.
- [55] 韩延彬, 周宇, 木东升, 等. 城市轨道交通车站道床吸音板应用分析[J]. 兰州交通大学学报, 2018, 37(2): 18-26.
- [56] 仲新华, 谢永江, 汪加蔚, 等. 铁路无砟轨道水泥基吸声板的研制[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(6): 105-107.
- [57] 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): 106-108.
- [58] 杨博. 轨道交通道床吸音板的研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [59] Eadie D T, Santoro M. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 747-757.
- [60] Eadie D T, Santoro M, Oldknow K, et al. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves[J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1212-1221.
- [61] Suda Y, Iwasa T, Komine H, et al. Development of on-board friction control[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1109-1114.
- [62] 李鹿添, 杜敏涛. 城市轨道交通轨顶摩擦调节剂降噪技术应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019, 7: 72-76.
- [63] 王星欢. 城市轨道交通高架线路箱梁结构噪声的预测与控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [64] 韩江龙. 城市轨道交通桥梁结构噪声特性及降噪技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [65] 刘林芽, 许代言, 李纪阳. 轨道交通箱型梁腔室结构的减振降噪研究[J]. 应用声学, 2016, 35(4): 302-308.
- [66] 张博. 都市高架轨道箱梁的声学优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [67] 张迅, 李小珍, 刘全民, 等. 混凝土箱梁的结构噪声及其影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 409-414.
- [68] 刘林芽, 秦佳良, 雷晓燕, 等. 基于响应面法的槽形梁结构噪声优化研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 56-60, 80.
- [69] Zhang X, Li X Z, Liu Q M, et al. Theoretical and experimental investigation on bridge-borne noise under moving high-speed train[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(4): 917-924.
- [70] Song L Z, Li X Z, Zheng J, et al. Vibro-acoustic analysis of a rail transit continuous rigid frame box girder bridge based on a hybrid WFE-2D BE method[J]. Applied Acoustics, 2020, 157: 107028.
- [71] Lee Y Y, Ngai K W, Ng C F. The local vibration modes due to impact on the edge of a viaduct[J]. Applied Acoustics, 2004, 65(11): 1077-1093.
- [72] 韩江龙, 吴定俊, 李奇. 板厚和加肋对槽型梁结构噪声的影响[J]. 振动工程学报, 2012, 25(5): 589-594.
- [73] 刘全民, 李小珍, 张迅, 等. 钢桁结合梁桥约束阻尼层减振降噪方法研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(12): 130-136.
- [74] 刘全民, 李小珍, 刘林芽, 等. 铁路钢板结合梁桥约束阻尼层减振降噪分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 1392-1400.
- [75] 刘兴龙, 尹学军, 孔祥斐, 等. 控制城市轨道交通高架桥梁结构噪声的试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(2): 140-144.
- [76] 周力, 张天琦, 罗雁云, 等. 城市轨道交通高架桥“降噪型”动力吸振器参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 1664-1672.
- [77] 王平, 唐剑, 杨鹏, 等. GJ-III减振扣件轨道对轨道交通高架段环境噪声的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 4-9.
- [78] Song X D, Li Q. Numerical and experimental study on noise reduction of concrete LRT bridges[J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 208-224.
- [79] 高飞, 夏禾, 安宁. 北京地铁5号线高架结构的辐射噪声分析与实验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5):

- 134-139.
- [80] Li X Z, Liang L, Wang D X. Vibration and noise characteristics of an elevated box girder paved with different track structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 425: 21-40.
- [81] 许永富, 刘鹏辉, 王东方, 等. 宁波轨道交通高架段减振轨道降噪效果测试分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2017, 20(4): 77-81.
- [82] Liu L Y, Song R, Zhou Y L, et al. Noise and vibration mitigation performance of damping pad under CRTS-III ballastless track in high speed rail viaduct[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(8): 3525-3534.
- [83] Liang L, Li X Z, Zheng J, et al. Structure-borne noise from long-span steel truss cable-stayed bridge under damping pad floating slab: Experimental and numerical analysis[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 106988.
- [84] Zhang X, Cao Z Y, Ruan L H, et al. Reduction of vibration and noise in rail transit steel bridges using elastomer mats: Numerical analysis and experimental validation[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2021, 235(2): 248-261.
- [85] 易强, 王平, 赵才友, 等. 高架铁路环境噪声空间分布特性及控制措施效果研究[J]. *铁道学报*, 2017, 39(3): 120-127.
- [86] 李小珍, 梁林, 赵秋晨, 等. 不同轨道结构形式对高架箱梁结构噪声的影响[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(10): 78-87, 106.
- [87] 李小珍, 聂骏, 郭镇, 等. 钢弹簧浮置板轨道对箱梁振动声辐射的影响研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(13): 34-41.
- [88] Crockett A R, Pyke J R. Viaduct design for minimization of direct and structure-radiated train noise[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(3): 883-897.
- [89] 张良涛. 轨道交通桥梁结构噪声影响及治理措施研究[J]. *都市快轨交通*, 2020, 33(2): 57-63.
- [90] 丁德云, 王文斌, 马蒙, 等. 不同车速下钢弹簧浮置板轨道减振降噪性能试验研究[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(6): 144-151.
- [91] 肖安鑫, 田野. 钢弹簧浮置板轨道对车内噪声影响的实测与分析[J]. *噪声与振动控制*, 2012, 32(1): 51-54, 66.
- [92] 刘存真, 李莉, 卜征, 等. 不同轨道结构对地铁车内噪声影响实验研究[J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(1): 154-159.
- [93] 辜小安, 李耀增, 刘兰华, 等. 中国高速铁路声屏障应用及效果[J]. *铁道运输与经济*, 2012, 34(9): 54-58.
- [94] Ekici I, Bougdah H. A review of research on environmental noise barriers[J]. *Building Acoustics*, 2003, 10(4): 289-323.
- [95] 陈继浩, 冀志江, 徐晖, 等. 声屏障顶部结构研究进展[J]. *噪声与振动控制*, 2008, 28(6): 1-4, 12.
- [96] 周信, 肖新标, 何宾, 等. 高速铁路声屏障插入损失影响因素及规律[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(6): 1024-1031.
- [97] Ishizuka T, Fujiwara K. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions[J]. *Applied Acoustics*, 2004, 65(2): 125-141.
- [98] Xiao Y, Lai H L, Li Q, et al. Improved interference-type sound barriers: Use of hyperbolic phase modulation[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 161: 107186.
- [99] 王建辉, 李沛沛. 聚合物-粉煤灰陶粒多孔降噪声屏障材料制备及影响因素分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(5): 27-37.
- [100] 秦晓春, 倪安辰, 韩莹, 等. 声子晶体型高速公路声屏障的降噪性能[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5493-5501.
- [101] 李小珍, 杨得旺, 高慰, 等. 高速铁路半、全封闭声屏障振动与降噪效果研究[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(S1): 8-13.
- [102] 李小珍, 赵秋晨, 张迅, 等. 高速铁路半封闭式声屏障降噪效果测试与分析[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(4): 661-669, 755.
- [103] 杨得旺. 高速铁路桥上全封闭声屏障降噪效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [104] 夏平. 上海轨道交通3号线半封闭式声屏障设计及降噪分析[J]. *现代城市轨道交通*, 2011(2): 61-62, 65.
- [105] 马娜. 上海轨道交通6号线全封闭声屏障工程设计[J]. *现代城市轨道交通*, 2010(5): 38-39, 5.
- [106] 唐吉意, 林平. 城市轨道交通全封闭声屏障近地面降噪性能分析[J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2017, 33(5): 40-44.
- [107] 伍向阳. 铁路全封闭声屏障降噪效果试验研究[J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(12): 177-181.
- [108] Zhang L J, Wu R, Kang Z X. Design and study on opening on top of closed sound barrier for urban rail transit[C]//2015 4th International Conference on Energy and Environmental Protection. Shenzhen: DEStech Publications, 2015: 3242-3249.
- [109] Yang J, Kang Z X, Edgar M, et al. Simulation study on the noise reduction performance of enclosed noise barriers with different opening layouts[C]//Euro Noise

2021. Madeira Portugal: Sociedade Portuguesa de Acustica(SPA), 2021: 342-350.
- [110] Li Q T, Duhamel D, Luo Y Y, et al. Analysing the acoustic performance of a nearly-enclosed noise barrier using scale model experiments and a 2.5-D BEM approach[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 158: 107079.
- [111] 徐志胜, 李绍富, 张群, 等. 带百叶吸声体的轨道交通全封闭声屏障声学设计研究[J]. *四川环境*, 2023, 42(1): 121-124.
- [112] 国家环境保护局. 隔声窗: HJ/T 17—1996[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [113] 方丹群. 噪声控制工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [114] 马攀龙, 田苏, 陈海涛, 等. 中国隔声玻璃研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(32): 1-9.
- [115] 唐健正, 李洋. 真空玻璃的节能优势[J]. *建设科技*, 2010(7): 54-56.
- [116] 钟铁柱. 建筑外窗隔声性能浅析[J]. *中国建筑金属结构*, 2012(3): 37-40.
- [117] 沈佑竹, 高浩然, 刘永刚, 等. 高性能建筑外窗隔声性能研究[J]. *江苏建筑*, 2023(3): 141-145.

Progress on prevention and control of urban rail transit noise pollution

HU Wencheng¹, LIU Lei², KANG Zhongxu^{1*}, SONG Ruixiang¹, ZHANG Huijuan¹, LIU Qiang¹

1. Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100054, China
2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China

Abstract The urban rail transit in China has developed rapidly, with an operating mileage exceeding 10,000 km. Therefore, with the ensuing noise pollution which will be increasingly serious, the prevention and control of noise pollution is bound to become more important. On the basis of the development of urban rail transit industry of China in recent years, in this paper, types of noise sources and characteristics of urban rail transit are introduced. The present situation of noise pollution management methods and research progress of noise control technology in urban rail transit at home and abroad were investigated. The research results and applications of the control technologies for important noise sources, such as wheel-rail noise and bridge structure noise, were reviewed. Then, the noise-related problems of the urban rail transit at the current stage were highlighted and some suggestions were made, such as pushing forward the formulation of noise emission standards and further strengthening the research and application of noise control technologies in urban rail transit, so as to provide references for the further prevention and control of urban rail transit noise pollution in China.

Keywords urban rail transit; noise pollution prevention; wheel-rail noise; structural noise; noise barrier ●



(责任编辑 王微)