

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.023

北京地铁区间设备设施 综合检查模式研究

于霖, 李宇杰, 叶利宾, 张军, 杨硕, 崔广炎

(北京市地铁运营有限公司, 北京 100044)

摘要: 为提高北京地铁区间设备设施检查水平, 实现降本增效的目标, 基于国家标准、行业办法、地方标准和企业标准明确区间设备设施检查工作依据, 论述北京市地铁运营有限公司自动化检查设备和检查方式, 对比分析典型综合检查设备的功能参数和优缺点, 提出北京地铁区间设备设施综合检查模式。研究表明: 企业标准可以覆盖国家标准、行业办法和地方标准中的检查内容和检查周期; 综合检测车适用于动态检查, 综合检测小车适用于静态检查, 二者均远优于手持式设备; 搭载式检测设备主要用于日常检查, 综合检测车和综合检测小车编组搭配既有专业检测设备主要用于定期检查, 固定监测设备和手持式设备主要用于专项检查; 综合检查工作短期宜采用租赁服务、长期宜采用购买设备的方式实施。本研究可为推进城市轨道交通基础设施智能运维工作提供参考。

关键词: 北京地铁; 区间设备设施; 综合检查模式; 检查方式; 检测设备

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)02-0164-07

Study on Comprehensive Inspection Mode for Beijing Subway Interval Facilities

YU Lin, LI Yujie, YE Libin, ZHANG Jun, YANG Shuo, CUI Guangyan

(Beijing Mass Transit Railway Operation Corp., Ltd., Beijing 100044)

Abstract: To improve the inspection level of Beijing Subway interval facilities, and achieve cost reduction and efficiency improvement, the inspection basis of interval facilities was clarified based on the national standard, industry method, local standard and enterprise standard. The automatic inspection equipment and way of inspection of Beijing Mass Transit Railway Operation Corp. Ltd. were discussed. The functional parameters, advantages and disadvantages of typical comprehensive inspection equipment were compared and analyzed. The comprehensive inspection mode of Beijing Subway interval facilities was presented. The results indicate that the enterprise standard can cover the inspection contents and inspection cycles in the national standard, industry method and local standard. The comprehensive detection vehicle is suitable for dynamic inspection, while the comprehensive detection car is suitable for static inspection, both of which are far superior to the handheld equipment. The on-board detection equipment is mainly used for routine inspection. The comprehensive detection vehicle and the comprehensive detection cars combined with the existing professional detection equipment are mainly used for scheduled inspection. The fixed monitoring system and the handheld equipment are mainly used for special inspection. The comprehensive inspection should be implemented by leasing service in the short term, and by purchasing equipment in the long term. This study can serve as a reference for promoting intelligent operation and maintenance of urban rail transit infrastructure.

收稿日期: 2024-03-19 修回日期: 2024-10-13

第一作者: 于霖, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通运维研究, 16115284@bjtu.edu.cn

通信作者: 李宇杰, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事城市轨道交通运维研究, 15901112566@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1600700); 北京市科技计划项目(Z221100005222029); 北京市地铁运营有限公司科研项目(2022000501000001)

引用格式: 于霖, 李宇杰, 叶利宾, 等. 北京地铁区间设备设施综合检查模式研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 164-170.

YU Lin, LI Yujie, YE Libin, et al. Study on comprehensive inspection mode for Beijing Subway interval facilities[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 164-170.

Keywords: Beijing Subway; interval facilities; comprehensive inspection mode; way of inspection; comprehensive detection equipment

地铁设备设施在复杂多变的城巽环境条件下运行,随着服役年限的增长,将会陆续出现不同类型的异常甚至故障^[1]。检查工作是实现设备设施全生命周期状态感知、评定和预警,指导科学养护维修,保证地铁运营安全的有效手段^[2]。截至 2023 年底,北京市地铁运营有限公司(简称“地铁公司”)运营线路 17 条,运营里程 548 km。随着运营里程的增加和技术的进步,以人为主的传统检查方式已无法满足实际生产需求,先进的自动化检查设备不断发展应用^[3]。

地铁区间自动化检查设备主要包括固定监测设备、单功能的专业检测设备^[4-5]、多功能的综合检测设备和搭载式检测设备 4 种类型。陈红等^[6]采用自动化监测系统对昆明地铁穿越工程中既有隧道的位移进行了监测,通过实时分析反馈监测数据指导施工,保证了既有隧道运营安全。于承新等^[7]基于图像匹配-时间基线视差法研发了桥梁监测及预警系统,对济南市凤凰山路桥的变形进行了监测,结果表明桥梁健康状态良好。常惠等^[8]采用光纤光栅传感器对北京地铁典型区段轨道不平顺状态进行了监测,建立了组合预测模型,通过数据对比验证了该模型具有较高的预测精度。张春光等^[9]介绍了综合检测车车辆和检测系统的组成、检测原理和技术指标,该车可以集隧道、轨道、接触网、通号多种检测功能于一体。赵越等^[10]介绍了综合检测小车的结构组成和计算方法,经过在上海地铁测试证明该小车检测接触轨表观病害和静态几何形位的可靠性较高。王琰等^[11]介绍了搭载式检测设备的系统构架和技术路径,并在北京地铁进行了测试,结果表明该设备可以准确检测轨道动态几何形位。

以往的研究主要针对某种特定检查设备,具体阐述其结构、功能和工作原理,鲜有文献统筹考虑利用不同检查设备开展综合检查工作,以提高城市轨道交通运营维护水平。本文首先基于 4 个等级的规范标准明确检查工作的含义和要求,然后论述地铁公司既有自动化检查设备和现行检查方式,接着对比分析典型综合检查设备的功能参数和优缺点,最后提出北京地铁区间设备设施的综合检查模式。

1 检查工作依据

以土建和线路专业为例,北京地铁区间设备设施检查工作主要依据 3 部国家标准^[12-14]、1 部行业办法^[15]、

1 部北京市地方标准^[16]和 2 部地铁公司企业标准^[17-18]。

1.1 检查含义

检查是人们为确认设备设施安全状态而对可能存在的风险点进行查证的工作行为,可以借助人的感官、简单工具或精密仪器完成。

根据工作频次可以将检查分为日常检查、定期检查和专项检查。其中日常检查、定期检查属于针对设备设施运行状态评判开展的状态性检查,专项检查属于针对设备设施出现异常位置开展的异常性检查。

检查模式是为完成检查工作所采用的 1 套整体工作框架,包括检查设备、检查周期和检查方式等方面。检查方式主要包括完全人工,人工+设备、以人工为主,人工+设备、以设备为主,完全设备 4 种类型。不同检查方式采用的设备和检查速度如表 1 所示。

表 1 检查方式类型

Table 1 Types of way of inspection

检查方式	检查设备	检查速度
完全人工	目测	低
人工+设备、以人工为主	手持式设备	低
人工+设备、以设备为主	检测小车	较高
	检测车	高
完全设备	固定监测设备	高
	搭载式检测设备	

检查方法主要包括监测和检测 2 种类型,根据实施主体可以将监测和检测分为自行实施和第 3 方实施。

1.1.1 监测

监测是长时间对同一对象进行实时监视、测评。监视的实质是对被监视对象表观的变化形成数字化的状态反映。测评的实质是根据监视形成的数字化结果对被监视对象表观的运行状态提出状态评定结果,评定标准为正常运行状态指标。

监测可以分为固定监测和移动监测。固定监测的对象是固定点位或局部区域,移动监测的对象是长距离区域。

1.1.2 检测

检测是在某个时间对某一对象的技术性能指标进行检验、测评。检验的实质是对被检验对象本质的变化形成数字化的状态反映。测评的实质是根据检验形

成的数字化结果对被检验对象本质的运行状态提出状态评定结果, 评定标准与监测相同。

1.2 检查要求

土建、线路专业区间设备设施的重点检查对象分别是桥梁和隧道、轨道(含接触轨)。各级规范标准中针

对日常检查、定期检查和专项检查的具体要求如表2—表4所示。桥梁和隧道的检查内容可以归纳为位移、表观病害、内部病害和背后病害4种类型。轨道的检查内容可以归纳为几何形位、表观病害、伤损和磨损4种类型。

表2 日常检查要求

Table 2 Requirements for routine inspection

检查对象	检查内容	规范标准	检查周期	检查方式
桥梁	裂缝、渗漏水、锈蚀、松动脱落、缺失破损、错台异物等	GB/T 39559.2—2020	1次/3月	完全人工; 人工+设备、以人工为主
		交运规〔2019〕8号	1次/3月	
		DB11/T 718—2016	1次/月	人工+设备、以人工为主
		土建设施养护维修规程	1次/月	完全人工; 人工+设备、以人工为主; 人工+设备、以设备为主
隧道	裂缝、渗漏水、锈蚀、松动脱落、缺失破损、错台异物等	GB/T 39559.3—2020	1次/月	完全人工; 人工+设备、以人工为主
		交运规〔2019〕8号	1次/月	
		DB11/T 718—2016	1次/月	
		土建设施养护维修规程	1次/月	完全人工; 人工+设备、以人工为主; 人工+设备、以设备为主
轨道	擦伤掉块、松动缺失、开裂破损等	GB/T 39559.4—2020	1次/周	完全人工; 人工+设备、以人工为主
		交运规〔2019〕8号	1次/周	
		DB11/T 718—2016	1次/2天	
		线路设备维修规程	不少于2次/周	完全人工

表3 定期检查要求

Table 3 Requirements for scheduled inspection

检查对象	检查内容	规范标准	检查周期	检查方式
桥梁	裂缝、渗漏水、锈蚀、松动脱落、缺失破损、错台异物等	GB/T 39559.2—2020	1次/3年	完全人工; 人工+设备、以人工为主
		DB11/T 718—2016	1次/年	人工+设备、以人工为主
		土建设施养护维修规程	2次/年	完全人工; 人工+设备、以人工为主; 人工+设备、以设备为主
隧道	裂缝、渗漏水、锈蚀、松动脱落、缺失破损、错台异物等	GB/T 39559.3—2020	1次/年	完全人工; 人工+设备、以人工为主
		DB11/T 718—2016	1次/6月	人工+设备、以人工为主
		土建设施养护维修规程	2次/年	完全人工; 人工+设备、以人工为主
轨道	轨距、水平、高低、轨向、三角坑、车体垂直和横向振动加速度; 擦伤掉块、松动缺失、开裂破损; 内部裂纹; 波浪磨耗、垂直磨耗、侧面磨耗等	GB/T 39559.4—2020	1次/2年至1次/2周	完全人工; 人工+设备、以人工为主
		DB11/T 718—2016	1次/2年至1次/月	
		线路设备维修规程	1次/2年至1次/日	人工+设备、以设备为主

注: 桥梁和隧道在交付运营第3年之后, 位移的检查周期均为1次/3年。

表4 专项检查要求

Table 4 Requirements for special inspection

检查对象	检查内容	规范标准	检查周期	检查方式
桥梁	沉降、横向位移; 混凝土碳化深度、钢筋锈蚀、混凝土强度、内力变化、伤损等	GB/T 39559.2—2020	出现5.3.1节的10种情况时	
		DB11/T 718—2016	出现6.3.1.1节的6种情况时	
		《土建设施养护维修规程》	出现4.5.3.1节的5种情况时	完全人工; 人工+设备、以人工为主; 人工+设备、以设备为主
隧道	沉降、横向位移、限界; 裂缝、渗漏水、锈蚀; 混凝土碳化深度、钢筋锈蚀、混凝土强度等	GB/T 39559.3—2020	出现5.3.1节的5种情况时	人工+设备、以人工为主
		DB11/T 718—2016	出现5.3节的特定情况时	
		《土建设施养护维修规程》	出现4.4.1.3节的5种情况时	人工+设备、以设备为主
轨道	松动缺失、开裂破损; 内部裂纹; 波浪磨耗、垂直磨耗、侧面磨耗等	GB/T 39559.4—2020	出现5.1.3.1节的4种情况时	
		DB11/T 718—2016	出现4.3.1.1节的4种情况时	
		《线路设备维修规程》	出现4.2.4节的6种情况时	

地铁公司企业标准中桥梁和隧道的日常检查周期均为1次/月, 定期检查周期均为2次/年。轨道的日常检查周期为不少于2次/周, 定期检查周期大多为1次/年至1次/月不等。针对异常情况进行的专项检查没有固定检查周期。地铁公司企业标准可以覆盖国家标准、行业办法和北京市地方标准中的检查内容及其对应的检查周期, 线路专业的检查周期可以覆盖其他专业。

2 地铁公司检查模式

截至2023年底, 地铁公司所辖桥梁128.4 km, 隧道384.4 km, 轨道单线延长1430.6 km。针对定期检查工作, 论述地铁公司既有的自动化检查设备, 以及桥梁、隧道和轨道现行的检查方式。

2.1 自动化检查设备

地铁公司土建和线路专业目前拥有10辆专业检测车、2套固定监测设备、1套搭载式检测设备, 在自动化检查设备方面已经具备了一定基础。既有自动化设备的详细信息如表5所示。

表5 自动化检查设备信息

Table 5 Information of automatic inspection equipment

类型	名称	数量	功能	原理
专业检测设备	轨道检查车	2	动态几何形位	激光
	钢轨探伤车	3	内部裂纹	超声波
	动态扫描小车	1	隧道限界	激光
固定监测设备	双轨探伤小车	4	擦伤掉块、内部裂纹	图像、超声波
	桥梁监测系统	1	沉降、横向位移	传感器
搭载式检测设备	道岔监测系统	1	擦伤掉块、松动缺失、开裂破损	图像
	车载轨道检测设备	1	动态几何形位、波浪磨耗	激光、传感器

2.2 检查方式

桥梁和隧道定期检查的内容主要为表观病害。桥梁监测系统尚未实现全网桥梁的实时监测, 动态扫描小车依靠人工推动, 检测速度约为2 km/h, 数据处理较慢。轨道定期检查的内容包含几何形位、表观病害、伤损和磨耗。轨道检查车与钢轨探伤车连挂运行, 检测速度约为40 km/h, 可以实现每2个月对全网轨道进行1次动态检查。但轨道检查车、钢轨探伤车和双轨探伤小车均无法检测道岔运行状态, 道岔监测系统仅在部分区段进行了试点应用。车载轨道检测设备可以真实地反映轨道在运营期间的状态, 无需占用专用车辆和进行专门调度, 但现阶段尚未推广应用。

地铁公司既有的自动化设备功能单一, 数量较少, 无法满足桥梁、隧道和轨道定期检查的要求。因此, 目前所辖桥梁和隧道定期检查的主要方式为完全人工和人工+设备、以人工为主, 轨道定期检查的主要方式为人工+设备、以人工为主和人工+设备、以设备为主, 需要消耗许多人力物力, 占用大量天窗时间。

随着机器学习、移动通信、精准定位等技术的不断进步, 自动化检查设备呈现集成化、小型化、智能化的发展趋势^[19]。未来设备检查必然会逐步替代人工检查, 检查方式将以人工+设备、以设备为主和完全设备为发展方向。

3 典型综合检测设备

综合检测设备集监测、检测功能于一体, 可以同步检查不同专业的区间设备设施, 实现多源数据的联动分析与深度挖掘。通过对比4种典型综合检测设备的功能参数, 分析不同综合检测设备的优缺点。

3.1 功能参数对比

在北京地铁测试过的4种综合检测设备分别为A公司综合检测车、B公司综合检测车、C公司综合检测小车和D公司综合检测小车(见图1), 现已集成隧道检测模块、轨道检测模块和供电专业的接触网检测模块。各综合检测设备与手持式设备的功能和精度分别如表6和表7所示。对于同一项检查内容, 4种综合检测设备的工作原理相同, 并与对应功能专业检测设备的工作原理一致。由于数据采集设备和数据处理算法不同, 不同综合检测设备的精度存在一定差异。



(a) A公司综合检测车

(b) B公司综合检测车



(c) C公司综合检测小车

(d) D公司综合检测小车

图1 典型综合检测设备

Figure 1 Typical comprehensive inspection equipment

表6 综合检测设备功能对比

Table 6 Function comparison of comprehensive detection equipment

检查内容	隧道			轨道				接触网	
	位移	表观病害	背后病害	几何形位	表观病害	伤损	磨耗	几何形位	表观病害
A公司综合检测车	√	√	×	√	√	×	√	√	√
B公司综合检测车	√	√	√	×	×	×	×	×	×
C公司综合检测小车	√	√	×	√	√	×	×	×	×
D公司综合检测小车	√	√	×	√	√	√	×	√	√
原理	激光	图像	电磁波	激光	图像	超声波	传感器	激光	图像
手持式设备	√	√	√	√	√	√	√	√	√

表7 综合检测设备精度对比

Table 7 Precision comparison of comprehensive detection equipment

检查设备	隧道						轨道									接触网	
	收敛/椭圆度/mm	限界/mm	错台/mm	裂缝/mm	渗漏水/cm ²	背后空洞探测深度/m	轨距/mm	水平/mm	高低/mm	轨向/mm	三角坑/mm	表面裂纹/mm	擦伤掉块/mm ²	磨耗/mm	拉出值/mm	导高/mm	
A公司综合检测车	2	5	5	0.2	4		±0.8	±1.5	±1	±1.5	±1.5	1	225	0.2	±5	±5	
B公司综合检测车	2	2	2	0.1	0.86	3~10											
C公司综合检测小车	2	5	5	0.2	1000		±0.4	±1	±0.3	±1.2	±0.2	0.2	25				
D公司综合检测小车	2	5	2	0.2	10		±0.3	±0.5	±1	±1	±0.7	1	9		±2	±3	
手持式设备	1	1	1	0.2	0.1	1	±0.2	±0.12	±0.7	±0.7	±0.2	0.2	0.25	0.15	±4	±3	

总体而言，手持式设备的静态检查功能最全，精度最高。A公司综合检测车的动态检查功能最全，精度最高，D公司综合检测小车的静态检查功能较全，精度较高。A公司综合检测车采用3辆B型车编组，功能可拓展性最强，D公司综合检测小车采用电动走行平台，自身空间有限，采用多节小车编组方式后功能可拓展性较强。4种综合检测设备主要基于图像识别检测隧道、轨道、接触网的表观病害，下一步可以拓展到通号和机电专业的线缆、箱柜等区间设备脱落变形检测。

3.2 优缺点分析

4种综合检测设备与手持式设备的11项效益指标见表8。综合检测车的检测速度最高，检出率最高，所需作业人数最少，每年综合费用最低。但由于部分线路无法互联互通或限界不同，综合检测车存在跨线运行问题，并且需要封闭沿线区间，严重影响其他作业，所需准备时间长，设备单价高。

综合检测小车的检测速度较高，检出率较高，可以实现线网级应用，不需要封闭沿线区间，对其他作业影响较小。此外，所需准备时间较短、作业人数较少，

表8 综合检测设备效益对比

Table 8 Benefit comparison of comprehensive detection equipment

检查设备	检测速度/(km/h)			检出率/%	跨线运行	对其他作业影响	准备时间/min	作业人数	设备单价/万元	使用寿命/年	每年人工费/万元	每年维护费/万元	每年运输费/万元	每年综合费用/万元
	隧道	轨道	接触网											
A公司综合检测车	二维模块≤120, 三维模块≤15			≥95	需要	大	15~60	6人/列/台	5000	30	120	250	40	576.7
B公司综合检测车	>10			≥95	需要	大	15~60	3人/列/台	2000	30	60	100	40	266.7
C公司综合检测小车	≤15	≤15		≥90	不需要	小	15	4人/列/台	500	30	800	250	6	1072.7
D公司综合检测小车	≤15	≤15	≤15	≥90	不需要	小	15	4人/列/台	500	30	800	250	6	1072.7
手持式设备	≤1	≤1	≤1	约70	不需要	无影响		3~5人/组	3	8	5800			5800.4

注：每年人工费=作业人数×20万元/人；每年维护费=设备价格×5%；综合检测车每年运输费=10万元/次×4次，综合检测小车每年运输费=500元/次×12次；每年综合费用=设备单价/使用寿命+每年人工费+每年维护费+每年运输费。全网预计需要10台综合检测小车，290人操作手持式设备。

设备单价较低, 每年综合费用较低。但由于综合检测小车在结构形式、荷载分布、运行速度等方面与运营列车差别较大, 无法模拟列车运行工况下的各种场景。

手持式设备不存在跨线运行问题, 不影响其他作业, 基本不需要准备时间, 设备单价最低。但检测速度低, 检出率低且受人为因素影响大, 所需作业人数多, 每年综合费用高。

综合考虑检测功能、精度和效益的各项指标可以发现, 综合检测车适用于动态检查, 综合检测小车适用于静态检查, 二者均远优于手持式设备。

4 综合检查模式

北京地铁区间设备设施检查工作应按照检查内容和检查周期要求, 在充分利用既有自动化检查设备的前提下, 积极应用新技术新设备, 提高工作效率和质量, 进一步减少检查人员数量, 实现“检修分离”, 降低运营维护成本。

4.1 设备组合模式

对于日常检查, 由于搭载式检测设备能够在不影响列车正常运行的情况下进行实时检测, 而且不独占车辆资源, 土建、线路和供电专业的区间设备设施应通过在运营列车上安装搭载式检测设备, 建立以运营期为主的日常检查体系。

对于定期检查, 近期通过统筹采用综合检测小车编组和既有专业检测小车开展静态检查, 采用综合检测车和既有专业检测车开展动态检查, 做到高速与低速设备合理搭配, 避免资源浪费。远期待既有专业检测设备退出服役后, 逐渐过渡为全部采用综合检测设备, 建立以非运营期为主的定期检查体系。

对于专项检查, 应在全网重点桥梁、道岔等区域安装固定监测设备进行动态监测, 针对自动化检查设备无法覆盖的专项检查内容, 采用手持式设备进行补充检查或现场复核。

通号和机电专业的区间设备设施可以通过将相应功能模块集成到综合检测设备上开展定期检查和专项检查。从而建立“以设备为主、人工为辅, 以线路专业为核心”的区间设备设施综合检查模式。

4.2 服务提供模式

综合检查工作的实施方式主要包括租赁服务和购买设备 2 种类型。租赁服务不会形成固定资产, 不需要专门配备作业人员, 但检查工作受限于第三方单位, 存在不够及时、数据外泄等风险。相反地, 购买设备

检查工作时间自主可控, 数据自己掌握, 但会形成固定资产, 需要专门配备作业人员和数据分析人员或重组专职巡检队伍, 需要重新划定各专业的作业流程和数据传递规则。

综合检测设备购置属于一次性投资金额较大的项目, 综合考虑资产、人员、及时性和安全性等因素, 短期建议以租赁服务为主, 同时培养本公司的人才队伍。在综合检测设备成熟稳定后, 长期建议采用购买设备的方式开展综合检查工作。

5 结论

本文通过对比论述检查工作依据、地铁公司检查模式和典型综合检测设备, 建立北京地铁区间设备设施综合检查模式。主要结论如下。

1) 检查方式主要包括完全人工, 人工+设备、以人工为主, 人工+设备、以设备为主, 完全设备 4 种类型。检查方法可以分为监测和检测 2 种类型。

2) 综合检测设备与对应功能专业检测设备的工作原理相同。综合检测车适用于动态检查, 综合检测小车适用于静态检查, 二者均远优于手持式设备。

3) 区间设备设施综合检查模式应以设备为主、人工为辅, 以线路专业为核心。日常检查主要采用搭载式检测设备, 定期检查主要采用综合检测设备搭配既有专业检测设备, 专项检查主要采用固定监测设备和手持式设备。建议短期实施方式为租赁服务, 长期实施方式为购买设备。

参考文献

- [1] 李宇杰, 王梦恕, 徐会杰, 等. 运营期轨道交通土建设施安全隐患产生原因的分析 and 思考[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(S2): 49-54.
LI Yujie, WANG Mengshu, XU Huijie, et al. The analysis and study of potential safety hazard causes by operating rail transit construction facilities[J]. Modern tunnelling technology, 2016, 53(S2): 49-54.
- [2] 于子良, 黄志辉, 杨珏, 等. 轨道隧道巡检现状及智能检测机器人发展趋势[J]. 机车电传动, 2020(6): 137-142.
YU Ziliang, HUANG Zhihui, YANG Jue, et al. Current situation of detection for rail and railway tunnel and development trend of intelligent detection robot[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 137-142.
- [3] 徐炜彤. 深圳城市轨道交通综合检测列车方案研究及实施[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
XU Weitong. Research and implementation of comprehensive

- inspection train scheme for Shenzhen urban rail transit[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.
- [4] 柴东明, 魏世斌, 刘玲平, 等. 深圳地铁轨检车检测系统的研制[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 140-143.
CHAI Dongming, WEI Shibin, LIU Lingping, et al. Development of the inspection system for Shenzhen metro track inspection car[J]. China railway science, 2005, 26(5): 140-143.
- [5] 张玉华, 许贵阳, 李培, 等. 钢轨探伤车自主化超声检测系统的关键技术[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 131-136.
ZHANG Yuhua, XU Guiyang, LI Pei, et al. Key technology to autonomous ultrasonic detection system of rail flaw detection car[J]. China railway science, 2015, 36(5): 131-136.
- [6] 陈红, 刘明光. 自动化监测系统在昆明地铁4号线下穿既有地铁中的应用[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(6): 123-126.
CHEN Hong, LIU Mingguang. Application of automatic monitoring in under-passing of the existing line for the construction of Kunming metro line 4[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(6): 123-126.
- [7] 于承新, 张国建, 赵永谦, 等. 基于数字测量技术的桥梁监测及预警系统[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 115-122.
YU Chengxin, ZHANG Guojian, ZHAO Yongqian, et al. Bridge monitoring and warning system based on digital measurement technology[J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2020, 50(1): 115-122.
- [8] 常惠, 饶志强, 赵玉林. 地铁轨道不平顺状态的监测与预警[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9190-9195.
CHANG Hui, RAO Zhiqiang, ZHAO Yulin. Monitoring and early warning of the irregularity of subway track[J]. Science technology and engineering, 2020, 20(22): 9190-9195.
- [9] 张春光, 赵方, 李学峰, 等. 城市轨道交通综合检测车方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(11): 22-27.
ZHANG Chunguang, ZHAO Fang, LI Xuefeng, et al. Research on urban rail transit comprehensive inspection vehicle scheme[J]. Modern urban transit, 2019(11): 22-27.
- [10] 赵越, 孙明, 张国富, 等. 地铁接触轨综合检测系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(1): 132-136.
ZHAO Yue, SUN Ming, ZHANG Guofu, et al. Research on comprehensive detection system for subway contact rails[J]. Intelligent computer and applications, 2022, 12(1): 132-136.
- [11] 王琰, 王昊, 石熠. 城市轨道交通搭载式轨道几何检测系统[J]. 现代城市轨道交通, 2019(8): 59-62.
WANG Yan, WANG Hao, SHI Yi. On-board track geometry inspection system for urban rail transit[J]. Modern urban transit, 2019(8): 59-62.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通设施运营监测技术规范 第2部分: 桥梁: GB/T 39559.2—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for operational monitoring of urban rail transit facilities: Part 2: Bridge: GB/T 39559.2—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通设施运营监测技术规范 第3部分: 隧道: GB/T 39559.3—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for operational monitoring of urban rail transit facilities: Part 3: Tunnel: GB/T 39559.3—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通设施运营监测技术规范 第4部分: 轨道和路基: GB/T 39559.4—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for operational monitoring of urban rail transit facilities: Part 4: Track and earthworks: GB/T 39559.4—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 城市轨道交通设施设备运行维护管理办法: 交运规〔2019〕8号[S]. 北京: 中华人民共和国国务院公报, 2019.
- [16] 北京市质量技术监督局. 城市轨道交通设施养护维修技术规范: DB11/T 718—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
Technical specification for maintenance and repair of urban rail transit facilities: DB11/T 718—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [17] 北京市地铁运营有限公司土建设施养护维修规程[S]. 北京: 北京市地铁运营有限公司, 2022.
- [18] 北京市地铁运营有限公司线路设备维修规程[S]. 北京: 北京市地铁运营有限公司, 2022.
- [19] 靳守杰, 魏志恒, 王文斌, 等. 城市轨道交通综合检测车应用分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(11): 69-73.
JIN Shoujie, WEI Zhiheng, WANG Wenbin, et al. Application analysis of comprehensive inspection trainset for urban rail transit[J]. Modern urban transit, 2021(11): 69-73.

(编辑: 傅依萱)