

城市轨道交通智能综合检测列车检测系统集成方案*

戴源廷¹ 马志鹏^{2**} 徐栋³ 周潇⁴

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 100081, 北京;

2. 中国铁道科学研究院, 100081, 北京; 3. 北京市轨道交通运营管理有限公司, 100068, 北京;

4. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 401120, 重庆//第一作者, 副研究员)

摘要 目的:随着新一代城市轨道交通智能综合检测列车的研发,需要对其搭载检测系统的集成方案展开研究。方法:利用改进层次分析法,从需求、效益、功能替代性3个维度量化各检测系统的评分,提出城市轨道交通智能综合检测列车各检测系统配置方案决策模型,确定各检测系统的优先级。以北京某条地铁运营线路为例,对其展开智能综合检测列车各检测系统集成分析,提出集成原则,按照动拖比配置进行分类并进行动力性能核算。提出搭载不同检测系统的3节编组列车配置方案与2节编组列车配置方案。总结了智能综合检测列车的技术优势。结果及结论:经需求、效益、功能替代性3个维度对各检测系统的评分量化,结合智能综合检测列车各检测系统配置方案决策模型,将各系统分为 A_0 、 B_0 、 C_0 3个优先级,不同检测系统的配置方案取决于钢轨探伤系统、车辆动力学响应检测系统等 B_0 级系统的搭载情况。挑选出符合车辆动力性能的动拖比配置方案,依据所搭载 B_0 级检测系统的不同,得到适应于智能综合检测列车动拖比为2:1的3节编组列车方案与动拖比为3:1的2节编组列车方案。

关键词 城市轨道交通;智能综合检测列车;检测系统集成方案

中图分类号 U279.3⁺23

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.10.005

Urban Rail Transit Intelligent Comprehensive Inspection Train Detection System Integration Scheme

DAI Yuanling, MA Zhipeng, XU Dong

Abstract Objective: With the next-generation development of urban rail transit ICIT (intelligent comprehensive inspection train), research is needed on the integration scheme for its on-board detection systems. Method: Utilizing an improved analytic hierarchy process, the evaluation scores of various detec-

tion systems are quantified from three dimensions: demand, benefit, and functional substitutability. A decision model is proposed for configuring the scheme and determining the priority of each detection system in urban rail transit ICIT. Taking an operating line in Beijing Subway as example, an integration analysis of the various detection systems in ICIT is conducted, integration principles are formulated, and configurations are classified and power performance is calculated according to the power-to-weight ratio. Configuration schemes are proposed for both three-car formation and two-car formation trains equipped with different detection systems. The technological advantages of ICIT are summarized. Result and Conclusion: By quantifying the evaluation scores of various detection systems from the dimensions of demand, benefit, and functional substitutability, and combining the decision model for the configuration scheme of each detection system in ICIT, the systems are categorized into three priorities: A_0 , B_0 , and C_0 . The configuration schemes of different detection systems depend on the presence of B_0 -level systems such as rail flaw detection systems and vehicle dynamics response detection systems. Suitable power-to-weight ratio configuration schemes are selected based on vehicle power performance. Depending on the on-board B_0 -level detection systems, a configuration scheme for a three-car train with a power-to-weight ratio of 2:1 and a configuration scheme for a two-car train with a power-to-weight ratio of 3:1 adapted to ICIT are obtained.

Key words urban rail transit; ICIT; detection system integration scheme

First-author's address Urban Rail Transit Center, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., 100081, Beijing, China

随着城市轨道交通(以下简称“城轨”)线网规

*北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金项目(L221001);中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2020YJ192);铁科院(北京)工程咨询有限公司科研开发基金项目(2021ZXJ003);重庆市建设科技计划项目(城科字2022第5-2号)

**通信作者

模的逐渐扩大,基础设施服役年限的逐渐累积,应用综合检测技术实现关键基础设施健康状态的高效感知,成为城轨基础设施运维的迫切需求^[1]。

既有城轨综合检测列车存在集成化程度不足、智能化水平不高的缺陷,无法实现多专业数据的同步、精准采集,难以满足城轨智能化、建设运营绿色化的发展需求^[2]。为突破既有综合检测列车的技术瓶颈,需要研发新一代城轨智能综合检测列车。目前,深圳市地铁集团有限公司牵头研发出 2 节编组 B 型综合检测列车,中国铁道科学研究院牵头研发出 3 节编组 B 型综合检测列车。

本文从需求、效益、功能替代性等 3 个维度出发,利用改进结构的层次分析方法,提出了城轨智能综合检测列车各检测系统的配置方案决策模型;以实际线路为工程背景,分析城轨智能综合检测列车的集成配置条件,根据搭载检测系统的不同提出两种切实可行的配置方案,为城轨智能综合检测列车的集成研发方案提供参考。

1 城轨智能综合检测列车各检测系统配置方案决策模型

1.1 检测系统简介

城轨智能综合检测列车各检测系统需求数量如表 1^[3]。

表 1 城轨智能综合检测列车各专业检测系统配置
Tab. 1 Detection system configuration for URT intelligent comprehensive inspection train of each discipline

专业	检测系统名称	系统编号
通信	通信检测系统	1
	信号检测系统	2
线路	钢轨探伤系统	3
	车辆动力学响应检测系统	4
	钢轨波磨检测系统	5
	轨道动态几何状态与钢轨廓形检测系统	6
供电	轨道状态巡检系统	7
	弓网关系检测系统	8
	接触网悬挂状态巡检系统	9
结构	隧道三维结构检测系统	10
	隧道衬砌状态巡检系统	11
综合	定位同步系统	
	车载综合管控系统	

为实现基础设施全断面状态数据的主动感知,定位同步系统与车载综合管控系统作为智能综合检测列车的必备检测系统,不作为决策模型的主要分析对象,其余各检测系统编号依次为 1~11。

1.2 需求维度分析

城轨智能综合检测列车作为动态综合检测设备,受到城轨行业的广泛关注。通过对北京、重庆、广州等城市轨道交通运营公司的调研,截至 2023 年 2 月,各检测系统的需求统计结果见图 1。

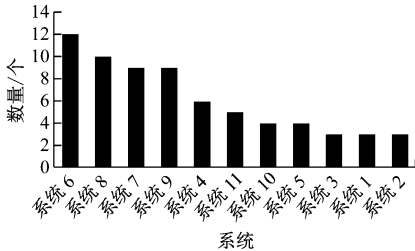


图 1 智能综合检测列车各检测系统需求数量统计
Fig. 1 Detection system demand amount statistics of intelligent comprehensive inspection train

随着城轨智能综合检测列车的进一步推广,仅依据当前调研情况得到的系统需求具有短期性与随机性。为更全面反映市场对各检测系统的需求,本文基于上述统计情况,利用层次分析法结合专家评分对各检测系统的需求权重进行分析^[4-5]。

1.2.1 层次结构的建立

为了将各检测系统进行统一比较分析,本文改进了传统层次分析法的层次结构,删除功能层,建立如下的目标层与指标层结构:① 目标层 A(检测系统的总体需求);② 指标层 B₁—B₁₁(通信检测系统, …, 隧道衬砌状态巡检系统)。

1.2.2 判别矩阵的构造

判别矩阵 N 中的各个元素均不为 0,以左对角线互为倒数分布,元素的大小反映了在其下角标的两个元素中,前者相对于后者的重要性大小。判别矩阵结构、标度及含义详见文献[6]。

1.2.3 权重向量的计算

和积法和方根法是常用的计算权重的方法。本文选用方根法进行计算^[7]。

对判别矩阵 N 中各元素 a_{ij} 按行求积:

$$D_i = \prod_{j=1}^q a_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, q \quad (1)$$

对 D_i 求 $1/q$ 次幂,得到:

$$a_i = \sqrt[q]{D_i}, i = 1, 2, \dots, q \quad (2)$$

对 a_i 做量纲一化处理,得到权重系数 w_i :

$$w_i = a_i / \sum_{i=1}^q a_i, i = 1, 2, \dots, q \quad (3)$$

对各行做量纲一化处理后, $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_i \ \dots \ w_q]^T$ 就是所求各因素的权重向量。

判别矩阵 N 的最大特征根 λ_{\max} 为:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^q \frac{\beta_i}{qw_i}, i = 1, 2, \cdots, q \tag{4}$$

式中:
 β_i —— NW 中的元素。

1.2.4 一致性检验

判别矩阵的一致性指标 I_C 与平均随机一致性指标 I_R 的比值 R_C 可作为一致性检验的评价标准。当 $R_C \leq 0.1$ 时,表示判别矩阵的一致性通过检验。

本文采用层次分析法通用的 I_C 、 R_C 、 I_R 的计算公式,详见文献[7]。

1.2.5 权重计算结果

在上文基础上,结合 9 位专家评分,得到目标层 A 下各指标之间的综合标度值,进一步计算得到各检测系统的权重向量及最大特征值,并进行一致性检验。目标层 A 下各因素的权重见表 2。

由表 2 可知,通过改进层次结构得到的权重,符合一致性检验标准。

表 2 目标层 A 下各因素的权重
Tab. 2 Weight of each factor of target layer A

因素	各因素的评分											权重
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	
B ₁	1	1	1/2	1/4	1/2	1/8	1/6	1/7	1/6	1/2	1/3	0.019 7
B ₂	1	1	1/2	1/4	1/2	1/8	1/6	1/7	1/6	1/2	1/3	0.019 7
B ₃	2	2	1	1/3	1	1/7	1/5	1/7	1/5	1	1	0.032 0
B ₄	4	4	3	1	3	1/6	1/3	1/4	1/3	3	2	0.067 5
B ₅	2	2	1	3	1	1/8	1/5	1/7	1/5	1	1/2	0.036 2
B ₆	8	8	7	6	8	1	3	2	3	8	7	0.276 2
B ₇	6	6	5	3	5	1/3	1	1/2	1	5	5	0.138 9
B ₈	7	7	7	4	7	1/2	2	1	2	6	6	0.201 9
B ₉	6	6	5	3	5	1/3	1	1/2	1	5	4	0.136 1
B ₁₀	2	2	1	1/3	1	1/8	1/5	1/6	1/5	1	1/2	0.030 1
B ₁₁	3	3	1	1/2	2	1/7	1/5	1/6	1/4	2	1	0.041 9

注: $\lambda_{\max} = 11.897\ 30$; $I_C = 0.089\ 73$, $I_R = 1.520\ 00$, $R_C = 0.059\ 00 < 0.100\ 00$ 。

1.2.6 量化结果

在城轨智能综合检测列车各检测系统配置方案决策模型的需求维度中,根据权重量化为各检测系统评分,确定各检测系统的需求优先级。以最高权重值作为评分基准,以此确定需求权重因子 σ_1 (36.205 6),经量化得到各检测系统排名由前往后的编号依次为系统 6、8、7、9、4、11、5、3、10、1、2。

1.3 效益维度分析

城轨效益主要体现在智能综合检测列车各检测系统所节省的人力与工时。结合调研与计算结果,以北京某运营地铁线路为例,智能综合检测列车与既有综合检测列车各检测项目工时对比,如表 3 所示。

表 3 为部分检测系统的计算结果,将该地铁线路里程折合为 100 km,得到各检测系统全年所节省的工时排名,引入效益因子 σ_2 ($4.372\ 5 \times 10^{-4}$),经量化得到各检测系统的效益评分,对效益评分由前

往后进行排名,得到其相应的检测系统编号依次为系统 9、3、7、10、6、11、8、4、5、1、2。

1.4 功能替代分析

城轨智能综合检测列车有助于统筹线网级检测资源,替代既有轨道检测列车、接触网检测列车、钢轨探伤车等专用内燃工具,推进运维阶段工务装备的电气化升级^[8]。从功能替代性的维度,城轨智能综合检测列车的可替代设备的投资估算如表 4 所示。

通过设定功能替代因子 σ_3 ,量化智能综合检测列车搭载的各检测系统的功能替代性,得到排名由前往后的检测系统编号依次为系统 3、10、11、6、7、9、8、4、5、1、2, σ_3 为 0.005。

1.5 决策模型

设定需求维度、效益维度、功能替代性的评分分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 。其中: x_1 反映出城轨行业对智能综合检测列车各检测系统的客观需求; x_2 与 x_3 可统

表 3 智能综合检测列车与既有综合检测列车各检测项目工时对比

Tab. 3 Comparison of working hours for each inspection item between intelligent comprehensive inspection train and existing comprehensive inspection train				
项目	检测周期	既有综合检测列车		智能综合检测列车工时/h
		检测手段	工时/h	
钢轨探伤	月检	双轮探伤仪	384.0(仅检测)	24.0(仅检测)
线路巡检	周检	人工+巡检小车	1 284.8	332.8(检测工时为 104.0, 分析工时为 228.8)
无缝线路巡检	月检	人工+巡检小车	366.7(检测工时为 234.7, 分析工时为 132.0)	156.0(检测工时为 24.0, 分析工时为 132.0)
隧道检测	一年两次	人工+隧道全断面检测列车	172.0(检测工时为 128.0, 分析工时为 44.0)	48.0(检测工时为 4.0, 分析工时为 44.0)
接触网巡检	月检	人工+轨道车+梯车	5 231.4(包含检测与分析工时)	200.0(检测工时为 24.0, 分析工时为 176.0)
合计			7 438.9	760.8

表 4 城轨智能综合检测列车可替代设备的投资估算
Tab. 4 Investment estimation of alternative equipment for URT intelligent comprehensive inspection train

项目	投资估算/万元
隧道检测车	1 500
轨道检测车	1 200
接触网检测车	1 200
钢轨探伤车	2 000
内燃工程车配套项目	3 000
合计	8 900

一为经济性指标,体现智能综合检测列车各检测系统节省的人力成本及设备成本。设定决策模型的评分为 y ,得到配置方案的决策模型如下:

$$y = \sum_{g=1}^n (k_g x_g), g = 1, 2, \cdots, n \tag{5}$$

式中:

- n ——维度;
- k_g ——各维度的权重系数。

城轨智能综合检测列车各检测系统配置方案以检测需求为导向,辅助功能与效能指标。本文设定 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 0.6、0.2、0.2,通过决策模型得到各检测系统配置优先级排名如表 5 所示。

根据表 5 可见:检测系统评分越高,越需优先考虑该系统配置。将各检测系统分为 A_0 、 B_0 、 C_0 等 3 个优先级; A_0 级表示智能综合检测列车普遍需要配置的检测系统, B_0 级表示在考虑实际的情况下决定是否配置的检测系统, C_0 级相比 A_0 、 B_0 级更加次要。因此,不同检测系统配置方案的区别往往体现

表 5 城轨智能综合检测列车各检测系统配置优先级排名
Tab. 5 Configuration priority ranking of each detection system of URT intelligent comprehensive inspection train

检测系统名称	评分	优先级	排名
轨道动态几何状态及钢轨廓形检测系统	7.4	A_0	1
弓网关系检测系统	6.2	A_0	2
接触网悬挂状态巡检系统	6.2	A_0	3
轨道状态巡检系统	5.4	A_0	4
钢轨探伤系统	4.8	B_0	5
隧道三维结构检测系统	3.2	B_0	6
隧道衬砌状态巡检系统	3.0	B_0	7
车辆动力学响应检测系统	2.2	B_0	8
钢轨波磨检测系统	1.6	B_0	9
通信检测系统	1.0	C_0	10
信号检测系统	1.0	C_0	11

于钢轨探伤、车辆动力学响应等 B_0 级检测系统的集成。

2 城轨智能综合检测列车各检测系统集成案例分析

2.1 各检测系统集成原则

以北京某条地铁运营线路为例,选取运营车辆为 A 型,采用接触网供电,电压等级为 DC 1 500 V,线路设计速度为 120 km/h。智能综合检测列车必须满足车辆最小限界的要求,可采用小于 A 型车的 B 型车配置方案,采用 1 500 V 直流供电,搭载的检测系统必须符合 120 km/h 设计速度下的检测

精度^[9-10]。

2.2 动拖比配置

在城轨智能综合检测列车搭载的检测系统中,钢轨探伤系统由于安装空间较大,不能集成于列车的动车转向架上;而车辆动力学响应检测系统若采用遥测技术,由于安装空间的限制,需要集成于列车拖车转向架上。因此,上述系统的集成将影响列车的动拖比配置情况,需要进行不同动拖比情况下动力性能的核算。

对此,本文对不同动拖比配置情况展开分析,设定 6 种常用配置方案,如表 6 所示。

表 6 城轨智能综合检测列车动拖比配置方案
Tab.6 Configuration scheme of power-to-weight ratio of URT intelligent comprehensive inspection train

方案	编组/节	动拖比
一	3	1:1
二	3	2:1
三	3	5:1
四	2	1:1
五	2	3:1
六	2	全部为动车

注:动拖比指动车转向架和拖车转向架数量比例。

以该运营线路为例,对方案二进行列车动力性能核算。假设单节车辆质量依次为 36 t、35 t、36 t,额定载荷下每节车辆核载 10 人,人均质量为 60 kg。列车牵引黏着系数为 0.16~0.18,平均起动加速度 $\geq 0.9\text{ m/s}^2$,制动黏着系数为 0.14~0.16,平均减速度 $\geq 1.0\text{ m/s}^2$,核算列车在额定载荷及损失动力的工况下是否可以在 35‰的坡道上起动。

2.2.1 列车动力性能核算

列车动力性能核算过程参考文献[11]。经计算,方案二下列车黏着牵引力为 124.47 kN,平均起动加速度为 $1.012\text{ m/s}^2 > 0.900\text{ m/s}^2$,满足牵引性能要求。在额定工况下,列车黏着制动力为 108.91 kN,制动加速度为 $0.93\text{ m/s}^2 < 1.00\text{ m/s}^2$;在损失动力工况下,列车起动加速度为 $0.232\text{ m/s}^2 > 0.083\text{ m/s}^2$,满足正常起动要求。

2.2.2 列车动力性能核算结果对比分析

同理可得,各分组下列车的动力性能核算结果如图 2 所示。

方案 2 中的动拖比配置可以满足列车动力性能的需求,同时也证明了方案二、三、五、六为可行方

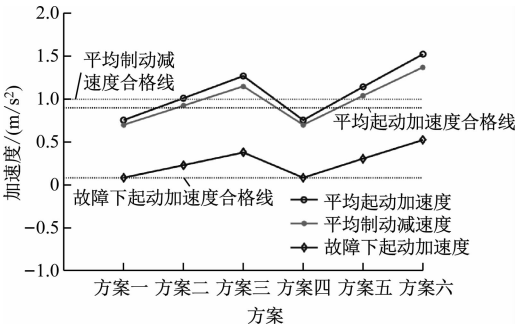


图 2 列车动力性能核算结果

Fig.2 Train dynamic performance checking calculation results

案。在实际城轨智能综合检测列车的集成方案中,可根据不同的搭检测设备选择不同的方案。

3 城轨智能综合检测列车编组方案

编组方案一 智能综合检测列车若安装钢轨探伤系统,不宜采用 2 节编组列车方案,推荐采用动拖比为 2:1 的 3 节编组列车方案。3 节编组列车方案下的设备布置如图 3 所示。图 3 中, TM 为半动半拖车, TMcp 为带受电弓和司机室的半动半拖车。

编组方案二 从功能需求的角度出发,若智能综合检测列车不需要集成钢轨探伤系统,可以采用 2 节编组列车配置方案,推荐动拖比为 3:1。2 节编组列车方案下的设备布置如图 4 所示。图 4 中, Mcp 为带受电弓和司机室的动车。

4 智能综合检测列车的技术优势

- 综上,智能综合检测列车具有如下优势:
- 1) 城轨智能综合检测列车可实现标准化、规范化、系统性的基础设施运行状态检测,实现多专业数据的融合分析,有利于统一技术标准,统一技术手段,从而对城轨线路运营质量进行统一评价打分。
 - 2) 有效统筹线网级检测资源,逐步替代各专业检测列车和小型设备等,推进运维阶段工务装备的电气化升级,促进设备集约化,有效降低整体运维成本,助力绿色长效发展机制的形成。
 - 3) 随着系统集成化程度进一步提高,可实时获取基础设施的运行状态和数据,有效提升前端智能感知技术与数据传输技术水平,实现“感知-分析-评价-决策”全流程智能化,推动智慧城轨建设。

5 结语

本文通过对城轨智能综合检测列车决策模型的综合评价,明确各检测系统的决策优先级,在此

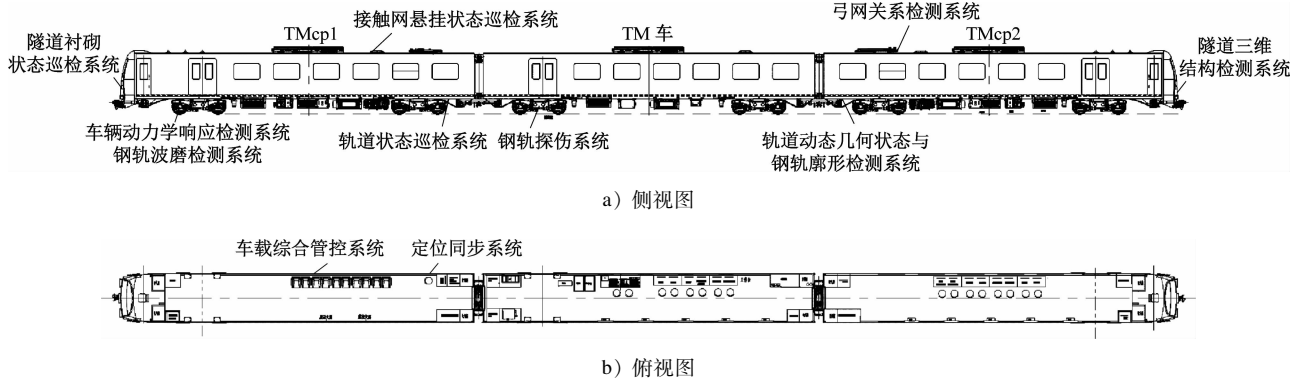


图3 3节编组列车方案下的设备布置图

Fig. 3 Equipment layout diagram of three-car formation train scheme

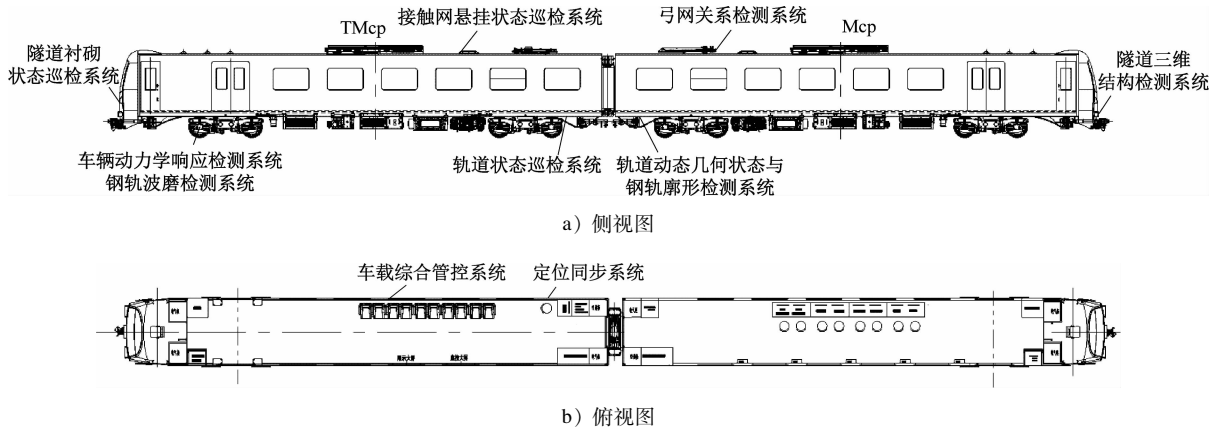


图4 2节编组列车方案下的设备布置图

Fig. 4 Equipment layout diagram of two-car formation train scheme

基础上展开适应于北京某地铁线路条件的智能综合检测列车检测系统集成案例分析,提出与其相适应的列车编组方案,验证了该方案的合理性。

随着城轨智慧化、运营网络化、建设运营绿色化的不断发展,通过搭载多种智能感知设备,搭配多元耦合全断面基础设施状态综合感知与分析评价平台的城轨智能综合检测列车,实现关键设施健康状态的高效感知及基础设施的病害识别,将成为保障城市轨道交通运营安全的重要手段。

参考文献

- [1] 魏志恒, 徐栋, 陈万里, 等. 城市轨道交通基础设施综合检测技术应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(11): 81.
WEI Zhiheng, XU Dong, CHEN Wanli, et al. Research on application of comprehensive inspection technology for urban rail transit infrastructure [J]. Modern Urban Transit, 2021 (11): 81.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案[A]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2022.

China Association of Metros. Green urban rail development action

plan of urban rail transit in China[A]. Beijing: China Association of Metros, 2022.

- [3] 田新宇, 魏世斌, 赵延峰, 等. 城市轨道交通基础设施综合检测列车创新技术[J]. 现代城市轨道交通, 2019(8): 32.
TIAN Xinyu, WEI Shibin, ZHAO Yanfeng, et al. Innovative technology of comprehensive inspection train for urban rail transit infrastructure[J]. Modern Urban Transit, 2019(8): 32.
- [4] NGUYEN A T, NGUYEN L D, LE-HOAI L, et al. Quantifying the complexity of transportation projects using the fuzzy analytic hierarchy process [J]. International Journal of Project Management, 2015, 33(6): 1364.
- [5] 林拥军, 肖恬煦, 张曾鹏, 等. 基于层次分析法-隶属度理论的混凝土框架结构安全性模糊综合评价方法[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 28.
LIN Yongjun, XIAO Tianxu, ZHANG Zengpeng, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method for safety of concrete frame structures based on AHP-membership theory[J]. Industrial Construction, 2022, 52(10): 28.
- [6] 董云逸, 邢科家, 姚宇峰. 编组站综合自动化系统联调联试行车安全风险评价[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(12): 82.

(下转第 42 页)

- [4] 刘维桢, 孙淑杰. 基于激光扫描技术的铁路限界检测系统[J]. 铁路技术创新, 2012(1): 56.
LIU Weizhen, SUN Shujie. Railway clearance detection system based on laser scanning technology[J]. Railway Technical Innovation, 2012(1): 56.
- [5] 张国一, 彭亚凯. 基于STM32的隧道限界检测系统设计[C]//《工业建筑》2018年全国学术年会论文集(下册). 北京: 工业建筑杂志社有限公司, 2018: 757.
ZHANG Guoyi, PENG Yakai. Design of tunnel clearance detection system based on STM32[C]// Proceedings of Industrial Construction 2018 National Academic Annual Conference (Volume II). Beijing: Industrial Construction Magazine Agency Co., Ltd., 2018: 757.
- [6] 何人伟, 戴源廷, 宋天浩, 等. 360°激光扫描技术在城市轨道交通限界检测中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2022(2): 8.
HE Renwei, DAI Yuanting, SONG Tianhao, et al. Application of 360°laser scanning technology in clearance detection of urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(2): 8.
- [7] 段培勇, 薛峰, 谢锦妹, 等. 激光扫描技术在铁路限界检测中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2013, 53(8): 89.
DUAN Peiyong, XUE Feng, XIE Jinmei, et al. Research on the application of laser scanning technology in railway clearance detection[J]. Railway Engineering, 2013, 53(8): 89.
- [8] 杨轲. 基于激光点云数据的铁路限界检测关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
YANG Ke. LiDAR based railway clearance detection[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [9] 钟丹. 基于车载Lidar点云的快速铁路限界检测[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHONG Dan. Fast railway clearance inspection using mobile laser scanning point cloud[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [10] 韩军. 基于点云数据的隧道限界检测及其可视化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
HAN Jun. Tunnel boundary detection and visualization based on point cloud data[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [11] 邹有建, 肖龙鑫, 陈鼎. 判断某点是否在任意多边形内两种算法的比较[J]. 地矿测绘, 2009, 25(3): 28.
ZOU Youjian, XIAO Longxin, CHEN Ding. A contrast between two approaches to find whether the point being inside a polygon[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2009, 25(3): 28.
- [12] 李威, 戴源廷, 刘斐然, 等. 城市轨道交通限界检测系统的动态补偿方法研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 24.
LI Wei, DAI Yuanting, LIU Feiran, et al. Research on dynamic compensation method of clearance detection system for urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(5): 24.
- [13] 刘德儿, 王永君, 闫国年. 基于向量代数的点与多边形拓扑关系的推理[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 89.
LIU Deer, WANG Yongjun, LYU Guonian. Determination of topological relationship between point and polygon based on vector algebra[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(2): 89.
- [14] 朵建华, 杨柏钟. 基于多传感器融合的轨道识别方法探究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(9): 98.
DUO Jianhua, YANG Baizhong. Recognition method of railway tracks based on multi-sensor fusion[J]. Modern Urban Transit, 2021(9): 98.
- [15] 苏靖棋. 车载激光雷达测量系统[J]. 现代城市轨道交通, 2020(1): 110.
SU Jingqi. Vehicle on-board lidar measurement system[J]. Modern Urban Transit, 2020(1): 110.

(收稿日期:2023-03-01)

(上接第28页)

- DONG Yunyi, XING Kejia, YAO Yufeng. The evaluation on the traffic safety risk of SAM joint commissioning and testing[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(12): 82.
- [7] 冯旭. 高速铁路联调联试行车安全关键环节分析及评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
FENG Xu. Study on the evaluation and key links for operation safety of high-speed railway integrated commissioning and testing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [8] 魏志恒, 王文斌, 李明航, 等. 面向绿色化的城轨基础设施检测模式分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 75.
WEI Zhiheng, WANG Wenbin, LI Minghang, et al. Analysis of urban rail transit infrastructure testing model for greenification[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 75.
- [9] 刘玉文, 尤维秀. 城市轨道交通车辆选型相关技术因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3): 136.
LIU Yuwen, YOU Weixiu. Analysis of the related technical factors in urban rail transit vehicle type selection[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(3): 136.
- [10] 苗勃. 地铁车辆咨询相关技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017.
MIAO Bo. Study on the related technology of consulting of metro vehicles[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.
- [11] 叶霞飞, 顾保南. 轨道交通线路设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2010.
YE Xiafei, GU Baonan. Rail transit line design[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2010.

(收稿日期:2023-03-01)