

地铁应急预案知识库建模及案例库的构建^{*}

张振海¹ 李红亮¹ 王晴雯¹ 刘艳杰²

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 730070, 兰州;

2. 中铁通信信号勘测设计院有限公司, 100071, 北京//第一作者, 副教授)

摘要 提出了一种基于本体的应急预案知识建模, 构建了统一、规范的地铁应急预案本体知识库; 借鉴 MyCBR 案例推理工具, 结合已构建的地铁运营事故案例知识库, 提出一种基于语义相似度的案例检索方法来实现地铁应急事故案例的高效检索; 运用 Protégé 软件及 MyCBR 工具, 实现了应急预案知识推理和案例检索功能, 显著提升了应急预案知识的应用效率。

关键词 地铁; 运营管理; 应急预案; 本体建模; 案例库

中图分类号 F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.08.004

Ontology-based Knowledge Modeling of Metro Emergency Response Plan and Construction of Case Database

ZHANG Zhenhai, LI Hongliang, WANG Qingwen, LIU Yanjie

Abstract An ontology-based emergency response plan knowledge modeling is proposed, and a unified and standardized metro emergency response plan ontology knowledge database is constructed. By referring to MyCBR case reasoning tool, with the established knowledge database of metro operation accident cases, a case retrieval method based on semantic similarity is proposed to realize the efficient retrieval of metro emergency accident cases. Using Protégé software and MyCBR tool, the function of knowledge reasoning and case retrieval of emergency response plan is realized, which significantly improves the knowledge application efficiency.

Key words metro; operation management; emergency response plan; ontology modeling; case database

First-author's address School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

地铁突发事件应急预案及管理工作关系着地铁运营的安全。为了提高地铁应急预案知识的有

效性和及时性, 需要将应急预案知识规范化、语义化表达, 进而促进应急处置工作更高效、及时地发挥作用。

在预案信息化研究方面, 为促进应急预案知识的结构化管理与表达, 文献[1]提出运用结构化的知识模块, 从而实现应急预案的编制与生成。我国在应急预案信息化方面的研究起步较晚, 且主要集中在研究知识管理系统这一方面。文献[2]以构建应急预案数据库为基础开发了查询系统, 继而实现了响应方案的知识检索。在信息协同方面, 文献[3]建立了基于语义网技术服务的突发事件数字化应急预案系统, 使查询预案服务变得越来越方便, 且实现了不同种类的预案信息共享这一目标。在语义检索方面, 文献[4]针对人员因拥挤发生踩踏的突发事件, 为了增强不同机构和部门之间的信息共享, 故构建了医疗救援应急预案知识的本体库。在语义推理方面, 文献[5]为地铁突发事件的应急决策提供了较强的理论基础, 认为可在规则和案例推理的基础上生成应急响应方案。

在国内外的应急领域研究中, 将本体引入预案知识建模, 且实现高效的知识查询和案例检索是当前研究一大热点。本文基于本体相关知识对应急预案知识进行建模, 并实现了应急预案知识的推理和案例检索, 可显著提升应急预案知识的应用效率。

1 地铁应急预案

1.1 应急预案

美国联邦应急管理局不仅指出编制应急预案的目的是为了应对自然灾害与人为事故, 还对不同应急组织机构应该承担的职责进行了规范, 并对各阶段的角色和任务作了说明^[6]。我国将为有效地应对各类突发事件而提前制定的工作方案定义为

^{*} 国家自然科学基金项目(61763025); 中国博士后科学基金项目(167306)

突发事件应急预案^[7],且明确了编制应急预案的目的是为了加强应急预案的专业性与针对性。根据《应急预案编制规范》,应急预案的体系可由四级应急预案构成。以兰州市轨道交通应急预案为例,其体系图如图 1 所示。

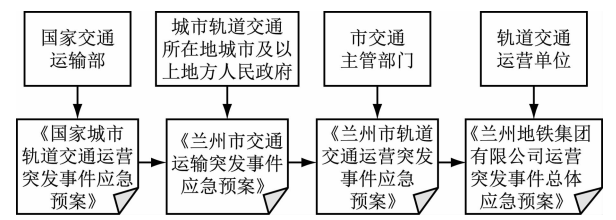


图 1 城市轨道交通应急预案体系

Fig. 1 Urban rail transit emergency plan system

1.2 地铁应急预案管理

地铁应急预案要明确应急人员的职责与分工,其在处理事件时要具有高度的协调性。为此,员工培训和日常应急演练应根据应急预案进行,各部门工作人员在突发事件中也应该按照培训中的操作采取措施,从而在最大程度上减少事故带来的负面影响、确保乘客生命财产的安全。地铁应急预案管理流程如图 2 所示。

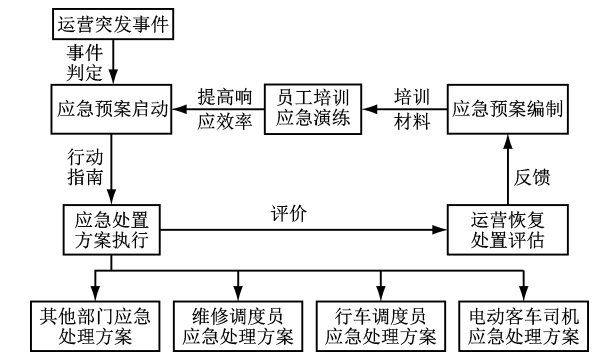


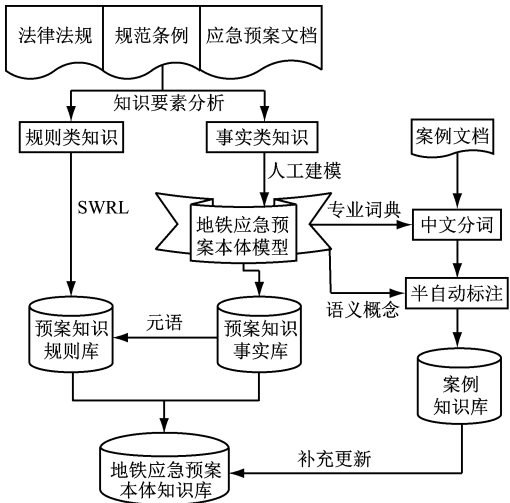
图 2 地铁应急预案管理流程

Fig. 2 Metro emergency plan management process

2 应急预案知识的本体建模

本体(Ontology)一词起源于哲学概念^[8],是一种对客观现实抽象本质的描述和说明。20 世纪 90 年代,计算机领域引入了本体的概念。本体在人工智能和智能信息集成等领域发挥着越来越重要的作用^[9]。本体通过一种特定的语言定义和说明^[10],能够让计算机系统理解并且解析静态的预案文本。本文运用本体构建地铁应急预案知识模型,能直观表达出事件特征、响应方案及后期处置之间的关系和规则,有利于集成地铁应急的各类信息,为今后

地铁智能化应急系统的发展奠定基础。建模的流程如图 3 所示。



注:SWR 为语义网规则语言

图 3 地铁应急预案知识建模流程

Fig. 3 Knowledge modeling process of metro emergency plan

2.1 本体建模工具

Protégé 软件是基于 Java 环境且由斯坦福大学医学信息研究组开发编写的本体构建工具,可用于创建、编辑和处理本体。由于其界面友好、使用方便、开放源代码,并且还支持中文,因此,本文选择 Protégé 软件作为本体模型构建工具。

2.2 领域规则

SWRL 是一种以 OWL(网络本体语言)为基础的规则描述语言,其建立于本体之上,并融入了多种规则描述方式。SWRL 使用 Horn-like 语句形式将规则与本体结合,并把一些经验知识转化为基于语义的推理规则,从而进行推理。本文使用 Protégé 软件中的 SWRL Tab 插件来编辑规则。

2.3 知识模型构建

2.3.1 地铁应急预案知识框架

应急预案知识框架是一种客观的、层次化的描述。通过了解应急预案知识框架,可以对预案知识有一个框架性、系统性的认识 and 了解。这为应急工作人员进行高效、正确的应急决策奠定了基础,也有助于进一步降低紧急事故带来的危害。本文梳理构建的地铁应急预案知识框架如图 4 所示。

在图 4 的地铁应急预案知识框架中:

1) 事故特征是地铁事故的基本特征信息。其核心要素是故障表征。

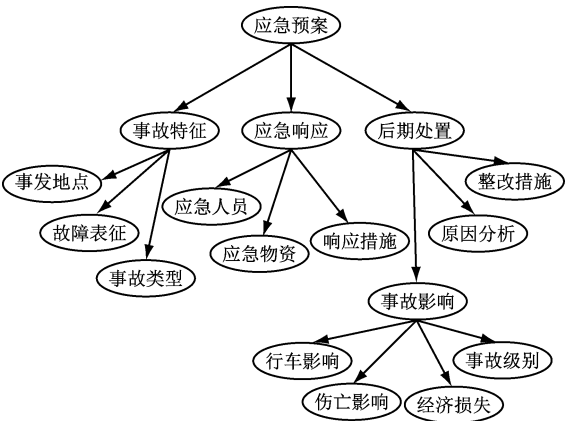


图 4 地铁应急预案知识框架图

Fig. 4 Knowledge framework diagram of metro emergency plan

2) 应急响应方案是迅速应对突发事件的核心关键。应急响应措施是在突发事件发生之后工作人员为最大化降低事故危害,尽快排出故障,恢复地铁的正常运营而采取的措施。在应急人员采取应急措施的同时,还需要有应急物资的支援。

3) 后期处置包含对事故影响的分析、事故原因的分析和后期整改措施的分析三部分。

2.3.2 应急预案知识模型构建

以图 4 中的地铁应急预案的知识框架为基础,以 Protégé 软件为载体,构建本体知识模型 Onto-EPMO。本文采用类-C、关系-R 和实例-I 三种建模元语进行表达^[11]: $\text{Onto-EPMO} := \{Cs, Rs, Is\}$ 。

其中,Cs 表示地铁应急预案知识概念的组成分类,Rs 描述地铁应急预案中概念之间的关系,Is 表示各类概念的实例。本文建以预案知识相关概念为基础,确立了事故特征(C_{s1})、应急方案(C_{s2})及后期处置(C_{s3})三类概念,其形式化为 $Cs := \{C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}\}$ 。在 C_{s1} 、 C_{s2} 及 C_{s3} 下可进一步细分子类。例如,事故特征(C_{s1})下的事发地点可进一步分为车站(C_{s11})、区间线路(C_{s12})及列车(C_{s13})三个子类,其形式化为 $Cs_1 := \{C_{s11}, C_{s12}, C_{s13}\}$ 。

在 Is 中,道岔故障(I_{s11})、计轴设备故障(I_{s12})、转辙机故障(I_{s13})等实例都属于信号故障类实例(I_{s1}),形式化为 $Is_1 := \{Is_{11}, Is_{12}, Is_{13}\}$ 。

Rs 是拓展的属性信息,其形式化为 $Rs := \{Rs_1, Rs_2, Rs_3, \dots\}$,如表 1 所示。例如,事故特征属性可以进一步划分为运营线路、车站、区间、列车号及故障表征。

知识概念间的关系可以用属性来描述,同时,

属性也反映了知识之间相互作用的原理。地铁应急预案知识部分属性分类表如表 1 所示。

表 1 地铁应急预案知识属性分类表(部分)

Tab. 1 Knowledge attribute classification of metro emergency plan (partial)

类别	属性名称	Protégé 软件中的属性类型
事故特征	运营线路	integer
	车站	symbol
	区间	symbol
	列车号	symbol
应急方案	应急员工	symbol
	应急响应措施	symbol
	应急物资	symbol
事故影响	死亡人数	integer
	经济损失	float
	延误时间	date
	事故级别	symbol
事故原因	事故类型	symbol
	故障原因	symbol
整改措施		symbol

2.4 基于 SWRL 的应急预案知识表达

地铁运营应急预案领域不仅有事实类知识,还有规则类知识。因此,针对规则类预案知识编制应急预案规则库,要以 OWL 概念知识库作为基础,可更好地表达领域知识内容。规则类预案知识使用 SWRL 表达,可有效实现地铁运营应急预案规则类知识的语义表达。

本文以事实类本体知识库的概念层次与属性关系为基础,通过分析类之间的语义关系,确定形成了预案的规则集,最终在 Protégé 5.2.0 软件环境下利用 SWRL Tab 插件编辑完成推理规则,实现应急预案知识的表达和推理。在应急预案中,推理规则主要包含事故级别推理规则和事故应急处理规则两类。本文所举例子为地铁一般 A 类事故的判定标准。以 SWRL 为基础,建立事故级别的推理规则表达方式。

3 概念树相似度的计算

基于地铁应急预案知识体系中故障表征的本体知识结构,综合考虑各类语义相似度计算方法的优缺点,本文选择以语义信息为基础的“概念树”相

似度计算法^[12]。概念树是一种层次化视图^[13]。以信号故障表征的本体知识结构部分内容为例,构建的语义概念树状结构如图5所示。

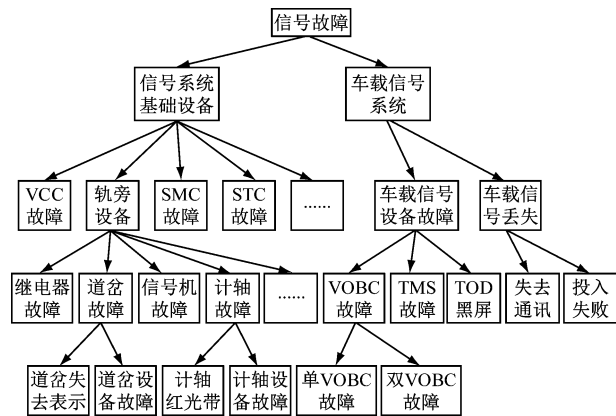


图5 信号故障语义概念树状结构

Fig.5 Signal fault semantic concept tree structure

3.1 树相似度的计算

树相似度的计算以概念所处的层次及各个概念之间的概念距离为依据,反映概念间的直接相似程度。概念 c_1 和 c_2 间的树相似度 $S_t(c_1, c_2)$ 为:

$$S_t(c_1, c_2) = \begin{cases} k(f_{c_1} + f_{c_2}) / [2m(d(c_1, c_2) + k) \max(|f_{c_1} - f_{c_2}|, 1)], & k > 0, c_1 \neq c_2 \\ 1, & c_1 = c_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

m ——概念树的深度,即概念层次的最大值;

f_{c_1}, f_{c_2} ——概念 c_1 及 c_2 在概念树中的层次位置;

$d(c_1, c_2)$ ——连接概念 c_1 和 c_2 的最短路径。

k ——为调节参数,且 $k > 0$; k 通常取2。

如 $S_t(c_1, c_2) = 1$,则表示概念 c_1 与 c_2 间有等价关系。

以图5中的概念树为例,则 $m = 5$;信号机故障的概念层次 $f_{c_1} = 4$,继电器故障的概念层次 $f_{c_2} = 4$,STC设备故障的概念层次 $f_{c_3} = 3$,TMS故障的概念层次 $f_{c_4} = 4$;信号机故障和继电器故障的概念距离 $d_1 = 2$;STC设备故障和TMS故障的概念距离 $d_2 = 5$ 。

由式(1),则信号机故障和继电器故障的树相似度 $S_{t1} = \frac{k(4+4)}{(2+k) \times 2 \times 5 \times 1} = 0.4$,STC设备故障和

TMS故障的树相似度

$$S_{t2} = \frac{k(3+4)}{(5+k) \times 2 \times 5 \times 1} = 0.2$$

3.2 嫡系相似度计算

上层概念在概念树中称为父概念。嫡系相似度 S_s 指父概念之间的相似度,仍可用式(1)进行计算。

仍以图5中的概念树为例,计算信号故障语义概念的嫡系相似度。比较信号机故障和继电器故障的嫡系相似度 S_{s1} ,STC设备故障和TMS故障的嫡系相似度 S_{s2} 。由概念树可知,信号机故障和继电器故障的父概念都是轨旁设备故障,STC设备故障的父概念是信号系统设备, TMS故障的父概念是车载信号设备故障。由式(1)可得 $S_{s1} = 1, S_{s2} = 0.2$ 。

3.3 综合相似度的计算

综合相似度,也称概念相似度,可由树相似度和嫡系相似度综合计算得到,记作 S_c 。 c_1 和 c_2 2个非等价概念间的概念相似度为:

$$S_c(c_1, c_2) = \frac{S_t(c_1, c_2) + S_s(c_1, c_2)}{2} \quad (2)$$

经计算,计算信号机故障和继电器故障的综合相似度 $S_{c1} = 0.7$,STC设备故障和TMS故障的综合相似度 $S_{c2} = 0.2$ 。

局部相似度和全局相似度共同构成一个完整的案例相似度。故障表征属性的语义相似度相当于案例中某特征属性的局部相似度。得到案例中各个属性的相似度之后,再进行全局相似度的计算,也就是案例整体相似度。

3.3.1 局部相似度

地铁运营事故案例属性整体上可以分为数值和符号两大类。

对于数值类属性,本文采用式(3)^[14]来计算其相似度:

$$\text{sim}(x_i, y_i) = 1 - \text{Dis}(X - Y) = 1 - \frac{|x_i - y_i|}{\text{Max}(i) - \text{Min}(i)} \quad (3)$$

式中:

x_i, y_i ——分别为案例 X 和 Y 中第 i 个属性值;

$\text{Max}(i), \text{Min}(i)$ ——分别为第 i 个属性取值的上下限;

$\text{Dis}(X, Y)$ ——概念树中案例 X 与 Y 的距离;

$\text{sim}(x_i, y_i)$ —— x_i 与 y_i 的相似度。

对于符号类属性,本文采用基于语义信息的

“概念树”的相似度计算方法来计算其相似度。

3.3.2 全局相似度

在地铁运营安全事故案例库中提取2个拥有 n 个案例属性的案例 X 和 Y ,表示为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,则案例 X 和 Y 的全局相似度 $S(X, Y)$ 为:

$$S(X, Y) = \sum_{i=1}^n \omega_i S_c(x_i, y_i) \quad (4)$$

式中:

ω_i ——事故案例的第 i 个案例属性的权重值;

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i \in [0, 1]。$$

$S_c(x_i, y_i)$ ——案例 X 和 Y 中第 i 个案例属性的综合相似度,相对于整体而言为局部相似度。

4 案例知识检索

4.1 案例库构建环境与工具

MyCBR^[15]是一款由德国人工智能研究中心研发的便捷、支持推理框架设计、扩展性强、适应性强的案例推理工具,可作为Protégé的插件使用。本文基于MyCBR插件对原有系统的案例进行检索。

4.2 事故案例及其知识检索

首先,以地铁运营案例为例,构建地铁运营突发事件案例本体知识库;然后,选取记录存档的部分运营突发事件作为研究对象;最后,选取故障表征作为知识索引,进行案例知识检索。

以故障表征“cutout”为例,案例相似度计算程序已在计算机中提前设置完成。通过系统计算,当发生事故特征为“cutout”信号故障时,行车调度员必须立马采取应急方案且下达“前往投入点”的指令。此时,司机则需“重新投入”操作,采用“PM(保护人工驾驶)模式后,尽快完成故障处理,并恢复地铁正常运营。

在处理此类突发事件时,列车会有大约4 min的延误;值班员要及时向指挥中心报告突发事件的情况及状态,做好辅助工作;站台工作人员要及时和乘客作出有效沟通,缓解乘客在列车延误期间的情绪。

可见,面对突发事件时,知识检索引导相关工作人员有序完成应急操作,可进一步完善突发事件的应急响应,提高响应效率。

5 结语

1) 基于本体的地铁应急预案知识建模过程为:

首先,要结合国家法律法规、政府相关规范条例和当地交管部门及轨道交通运营公司所拟的应急预案文档,进行知识要素分析;其次,对于规则类知识通过语义规则描述语言SWRL建立预案知识规则库;最后,对突发事件案例进行语义化表达。

2) 在逐步深入研究应急预案信息化的过程中,基于数据库的应急预案知识管理已经无法满足知识信息集成等智能化的发展需求。要促进知识间的交互协作,且有效实现规范化、语义化地表达预案知识,还需构建本体知识库。

3) 本文构建了故障表征信息的概念树,以此概念树为基础计算出了各类故障表征信息的局部相似度和案例间的综合相似度。地铁应急预案知识检索系统则实现了案例知识查询的高效性。此外,语义技术在地铁应急预案知识管理研究方面的发展潜力也由该检索系统充分展示^[11]。

参考文献

- [1] MA C, PENADÉS, BORGES M R S. A product line approach to the development of advanced emergency plans[C]// ISCRAM. Proceedings of 8 th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management: From Early-Warning Systems to Preparedness and Training. Brussels: ISCRAM, 2011:1.
- [2] ZHANG M, LI P, WANG F. The emergency decision support platform of urban rail transit based on information sharing and digitalized plan[C]// ICCTP. Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent Reliable-Proceedings of the 10 th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Nanjing: ICCTP, 2010:287.
- [3] 刘畅. 基于语义 Web 服务的数字化应急预案系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- LIU Chang. Research on system for digital emergency plans based on semantic web services[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [4] HAGHIGHI P D, BURSTEIN F, ZASLAVSKY A, et al. Development and evaluation of ontology for intelligent decision support in medical emergency management for mass gathering[J]. Decision Support Systems, 2013, 54(2): 1192.
- [5] 张璐. 基于本体的城市轨道交通应急预案数字化方法及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- ZHANG Lu. Ontology-based digital method and application of urban rail emergency plan[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [6] LINDSAY B R. Federal emergency management: a brief introduction[R]. Congressional Research Service Reports, 2012.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 城市轨道交通运营突发事件应

急预案编制规范:JT/T 1051—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for developing response plan to urban rail transit operation emergency: JT/T 1051—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

- [8] ZUNIGA G L. Ontology: its transformation from philosophy to information systems[C]//Proceedings of the International Conference on Formal Ontology in Information Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2001:187-197.
- [9] 董皓,付义龙,黄启翔.基于本体的城市轨道交通应急预案表示方法[J].都市轨道交通,2015(2):70.
DONG Hao, FU Yilong, HUANG Qixiang. Expression method of contingency plan based on ontology for urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015(2):70.
- [10] 刘植惠.本体(Ontology)与语义网(Semantic Web)[J].重庆图情研究,2006(3):1.
LIU Zhihui. Ontology and semantic web[J]. Chongqing Library and Information Science Research, 2006(3):1.
- [11] 彭小凡.地铁运营应急预案知识本体建模及应用研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
PENG Xiaofan. Research on knowledge ontology modeling and application of subway operation emergency plan[D]. Wuhan:

Huazhong University of Science and Technology, 2017.

- [12] 向东,赵勇,陈阳.面向语义信息的案例知识表达与相似度计算方法研究[J].计算机工程与科学,2011(12):159.
XIANG Dong, ZHAO Yong, CHEN Yang. Research on case knowledge representation and conceptual similarity computation based on semantic information[J]. Computer Engineering and Science, 2011(12):159.
- [13] 陆磊,李启明.基于案例推理的地铁运营安全事故案例库构建[J].东南大学学报,2015(5):990.
LU Ying, LI Qiming. Construction of accident case database for subway operation based on case-based reasoning[J]. Journal of Southeast University, 2015(5):990.
- [14] 李磊.铁路突发事件应急决策若干问题研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2013.
LI Lei. Research on some problems in railway emergency decision making[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2013.
- [15] ROTH-BERGHOFER T, ADRIAN B, DENGEL A. Case acquisition from text: ontology-based information extraction with SCOOBIE for myCBR[C]//ICCB. Proceedings of 18 th International Conference on Case-Based Reasoning, July, 2010. Alesandria, Italy. Berlin: Springer, 2010:451.

(收稿日期:2020-06-01)

(上接第16页)

- [2] 孙洪亮,周博.城市轨道交通车辆维修制度探讨[J].城市轨道交通研究,2017(2):105.
SUN Hongliang, ZHOU Bo. On metro vehicle maintenance system for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2017(2):105.
- [3] 郭新,李春广,黄挺,等.地铁车辆检修模式探讨[J].城市轨道交通研究,2015(4):5.
GUO Xin, LI Chunguang, HUANG Ting, et al. Application of subway vehicle maintenance model[J]. Urban Mass Transit, 2015(4):5.
- [4] 蔺高,蒋欣,王大奎.城市轨道交通车辆检修模式探讨[J].设备管理与维修,2020(8):55.
LIN Gao, JIANG Xin, WANG Dakui. Discussion on maintenance mode of urban rail transit vehicles[J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(8):55.
- [5] 邢海福,郭正海.杭州地铁车辆均衡修维修模式研究与实践[J].现代城市轨道交通,2020(2):21.
XING Haifu, GUO Zhenghai. Research and practice of 'balanced maintenance' mode for metro vehicles in Hangzhou[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(2):21.
- [6] 万宇.成都地铁车辆均衡修探讨与应用[J].铁道机车车辆,2017(10):109.
WAN Yu. Discussion and application of vehicle maintenance

system optimization for Chengdu Metro[J]. Railway Locomotive & Car, 2017(10):109.

- [7] 荣伟.地铁电客车均衡修探索与实践[J].现代城市轨道交通,2019(11):98.
RONG Wei. Exploration and practice of balanced maintenance of metro electric motor vehicle[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(11):98.
- [8] 程祖国,王居宽,陈鞍龙,等.城市轨道交通车辆部件故障与均衡修修程周期[J].城市轨道交通研究,2006(1):46.
CHENG Zuguo, WANG Jukuan, CHEN Anlong, et al. Vehicle component failures and balanced-maintenance period[J]. Urban Mass Transit, 2006(1):46.
- [9] 王长庚,张海强.车辆均衡修检修模式在广州地铁的应用与探讨[J].电力机车与城轨车辆,2016(3):85.
WANG Changgeng, ZHANG Haiqiang. Application and discussion of vehicle balanced maintenance mode in Guangzhou Metro[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016(3):85.
- [10] 叶芹禄.地铁车辆段停车列检库规模的修正算法[J].城市轨道交通研究,2015(12):11.
YE Qinlu. Amendment of scale calculation for metro depot parking shed[J]. Urban Mass Transit, 2015(12):11.

(收稿日期:2021-08-16)