

杨杰, 陈颖祺, 岳嘉鑫, 等. 地铁运营高致灾危险源辨识及管控研究[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(3): 88-93. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24050801

地铁运营高致灾危险源辨识及管控研究

杨杰, 陈颖祺, 岳嘉鑫, 金熠凡, 葛芝梁

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 伴随轨道交通网络化运营的推进,运营安全问题日益突出。本研究以地铁运营产生的海量运营数据作为研究对象,探讨高致灾危险源的辨识与分级以及高致灾危险源的精细化管控治理。首先,针对地铁海量运营日志中存在的危险源进行数据挖掘,找出潜在危险源;其次,对危险源进行量化计算,辨识出高致灾危险源并进行分级;最后,研究高致灾危险源的精细化管控与治理技术。旨在实现轨道交通运营安全,在扼制高致灾危险源的同时,能够提高运营数据利用率,降低运营故障率,为科学制订和修订行业相关标准规范提供决策依据。

关键词: 交通安全分析; 轨道交通运营安全; 数据挖掘; 危险源辨识; 危险源分级与管控

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2026)03-0088-06

Study on the identification and control of high disaster-causing hazard sources in subway operation

YANG Jie, CHEN Haoqi, YUE Jiabin, JIN Yifan, GE Zhiliang

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the advancement of the networked operation of rail transit, operational safety issues are becoming increasingly prominent. This study takes the massive operation data generated by subway operations as the research object, exploring the identification, classification, and fine-grained control and governance of high-consequence hazardous sources. Firstly, data mining is conducted on the hazards existing in the massive operation logs of the subway to identify potential hazardous sources. Secondly, quantitative calculations are performed on the hazardous sources to identify and classify high-consequence hazardous sources. Lastly, the study focuses on fine-grained control and governance techniques for high-consequence hazardous sources. The aim is to proactively address operational safety in rail transit, curb high-consequence hazardous sources, enhance the utilization of operational data, reduce operational failure rates, and provide decision-making basis for the scientific formulation and revision of industry-related standards and specifications.

Key words: traffic safety analysis; rail transit safety; data mining; hazard source identification; hazard source classification and control

0 引言

如今,轨道交通已经成为了综合交通网络的骨干,轨道交通运营安全的地位也日益凸显。导致轨道交通运营事故发生的根本是危险源及隐患的积累,由量变到质变,最终导致危险的发生。轨道交通日常运营积累了蕴含着海量运营状态表征的隐患数据,如何预处理海量运营数据,构建辨识算法,挖掘关键危险源,并对其进行科学、细致的分级,找到高

致灾危险源,制定分级管控方案,成为了重要的课题。

数据挖掘是通过分析大量数据,挖掘其中隐含价值的方法。该方法结合了数据库技术、智能算法、知识工程、统计学等。在轨道交通运营安全管理上应用数据挖掘技术,对海量数据进行挖掘,可大幅推动安全管理的发展。Li等学者^[1]对美国天然气管道事故报告进行文本挖掘,提取有效信息,探究天然气管道事故严重程度和影响因素之间的时空相关性

基金项目: 大学生创新训练项目(CX2310015)。

作者简介: 杨杰(2002—),男,本科生,主要研究方向:地铁运营管理及研究。Email:wyj7809@163.com;陈颖祺(2002—),男,本科生,主要研究方向:地铁运营管理及研究。

收稿日期: 2024-05-08

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

模式,这些都奠定了数据挖掘技术在交通运输领域的研究基石。在事故辨识方面,Mazouri等学者^[2]收集6500条伊朗铁路事故数据,运用关联规则挖掘各因素之间的关联。王晓旭等学者^[3]提出交通数据的并置模糊拥堵模式挖掘,对于解决道路交通拥堵问题而产生重大危险事故具有重要的意义,其本身也是一种危险源管控预警措施。

Liu等学者^[4]提出将知识图理论应用于铁路运营事故分析,并辨识出关键危险源,为铁路运营者提供了事故预防工作的决策依据。后来,Liu等学者^[5]基于模拟事件、组合客流数据和投入产出模型,推估北京地铁系统运营危险源。Xu等学者^[6]提出了一种信息熵加权的术语频率,进行危险源重要性评价,从221份地铁施工事故报告中提取了37项风险因素。随后,Qiu等学者^[7]创造性地将文本挖掘技术与复杂网络相结合,探索煤矿事故致因机制,通过对307份事故报告的文本挖掘,识别出52项主要事故致因因素。作为补充,罗文慧等学者^[8]建立双隐层适应卷积神经网络,通过反复样本训练,实现危险源的辨识。Ding等学者^[9]深入研究了数据挖掘算法,对某特大城市的轨道交通调度日志进行建模,挖掘出轨道交通运营的关键危险源,并开发了基于数据仓库的危险源智能辨识系统。黎华^[10]开展城市轨道交通运营风险管理工作,结合实际情况采用有效管控措施开展研究。孙双杰^[11]着眼于轨道交通车站的常见安全隐患和风险管理进行阐述、研究。Wu等学者^[12]采用ISM-MICMAC集成方法对城市轨道交通施工事故风险进行分析与控制。Tang^[13]通过挖掘地铁运营产生的多源异构运营大数据,研究运营风险链和关键隐患精细化管控。史秀红^[14]结合国内城市轨道交通运营单位的组织机构及其运营管理特点,研究综合应急预案体系。曾欣^[15]以系统工程理论和方法、安全管理相关理论为基础,提出了城市轨道交通运营安全模式的实施步骤和具体内容。张兰玲等学者^[16]对城市轨道交通双重预防机制建设流程及建设内容进行阐述,探讨了相应的解决方案。刘壮壮^[17]针对城市轨道交通运营时发生的事故,进行故障危险源的辨识,开发基于运营危险源辨识的预警信息系统。黎忠文等学者^[18]建设并应用城市轨道交通网络化运营双重预防机制。董贺轩等学者^[19]基于实证分析研究,探索地铁站公共空间危险源与空间设计之间的关系,对危险源进行评价。

综上所述,尽管国内外众多学者在工程领域危险

源的辨识算法、风险等级划分及风险管控方面已开展了大量基础性研究,但仍存在以下亟待改进之处:

(1)大数据及数据挖掘算法研究在国内的应用已经较为广泛,但在轨道交通安全管理上应用较少。轨道交通运营安全数据结构十分复杂,需要通过高效的挖掘算法与辨识算法,才能挖掘出轨道交通运营危险源。

(2)在轨道交通运营危险源辨识方面鲜有研究成果,在铁路交通和矿业工程领域有一些关于危险源辨识的算法研究,基本集中在事故树分析法、关联规则算法上,另有部分研究主要集中在危险源的事故致因模式研究。

(3)在风险管控算法研究和管控措施上,现有轨道交通运营安全管控相对笼统,缺乏针对性。事故和故障发生后,在短时间内很难快速处置,应使每个危险源都有精确的应急预案或处置方案。

本文研究的目的在于从地铁运营数据中精确地挖掘出潜在危险源,并对这些危险源进行量化分级,找出最容易导致灾害或事故发生的危险源(后简称高致灾危险源)。这将有助于研究找出高致灾危险源,为实现危险源精细化管控与治理提供方法论指导。通过这些措施,有望提高超级网络化模式下的轨道交通运营安全,提升地铁安全服务水平,并为科学制订修订行业相关标准规范提供理论与决策依据。这将有助于国内轨道交通行业的可持续发展,为广大市民提供更加安全、便捷的出行服务。

1 轨道交通运营危险源数据挖掘

1.1 危险源数据预处理

本次研究的数据挖掘算法选用文本挖掘法。这是一种高效准确的大数据挖掘算法,具体步骤包括:数据收集、文本数据预处理、特征提取等^[20]。

首先,本次实验选取了上海地铁某号线某三年间的地铁运营日志作为原始数据,共计13475条原始数据。其次,对地铁运营日志的原始数据进行预处理,原始数据中包含大量的正常调度、定期检查等信息,但上述信息与地铁运营险性事件不相关,将其定义为干扰数据,并做删除处理,然后对去干扰后的数据进行分词,在分词之前需要加载自建词典,以提高分词准确率;最后,具体流程见图1。

由于运营日志的描述不统一,记录格式多样,使用机械筛选容易发生遗漏、误判等情况。故采用Python语言和人工方式相结合的方法进行细致筛选,使用运行代码对运营日志中出现的大量正常运

营记录、正常施工记录、定期检查记录、司机对表等干扰数据进行了筛除,再通过人工复核删除了正常的天气预报和车辆回库(未造成晚点或加开)等干扰数据。经过清理干扰工作后,得到了5 248条危险源相关数据,作为后续危险源挖掘所使用的数据,具体结果见表1。

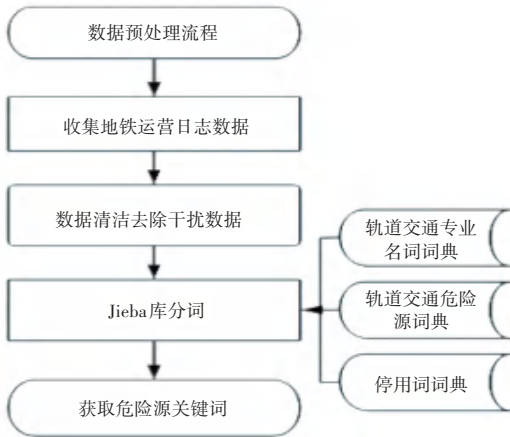


图1 数据预处理流程

Fig. 1 Flow chart of data preprocessing

表1 危险源云归并取值处理

Table 1 Hazard source cloud merging and value processing

原始数据	数据频数	占比/%
正常调度记录	8 227	61.05
造成危险记录	5 248	38.95
总计	13 475	100

1.2 危险源数据挖据

本文数据挖掘工作借助 Pycharm 开发平台,并使用 Python 中的 Jieba 库进行分词。Jieba 库内置3种分词办法,本文选取更适合做文本挖掘法的精确模式。

由于轨道交通运营日志数据是由不同描述习惯的人员做记录,存在大量不规范、口语化的描述,使得危险源在分词的时候容易被打断,所以在对数据分词前,需要加载自定义专业术语词典,以提高分词的准确性。本文为数据挖掘工作构建了一个包含255个城市轨道交通危险源相关词汇和172个城市轨道交通专业术语构成的自定义专业术语词典:Risk_Word。此外构建了由哈尔滨工业大学停用词表与自定义词汇组成的768个词汇作为停用词词典:Stop_Word,载入该词典删除无意义的词汇。结合自建词典,用 Python 中的 Jieba 库进行分词操作,得到最终危险源数据分词结果,文本挖掘法的分词代码如图2所示。

```
import os
import jieba
import re
import pandas as pd

def get_stop_dict(file):
    content = open(file, encoding='utf-8')
    word_list = []
    for c in content:
        c = re.sub('\n|\r', '', c)
        word_list.append(c)
    return word_list

file_path = input("请输入当前文件夹的路径")
os.chdir(file_path)

stop_file = "stop_word_list.txt"
user_file = "risk_word_list.txt"

stop_words = get_stop_dict(stop_file)
file_name = input("请输入文件的名称")
text = open(file_name, encoding='utf-8').read()

jieba.load_userdict(user_file)
text_lines = text.split("\n")

counts = {}

for line in text_lines:
    line = re.sub("[^u4e00-u9fa5a-zA-Z]*", "", line)
    line_filtered = [word for word in jieba.cut(line) if word not in stop_words]
    filtered_words = [word for word in line_filtered if len(word) > 1]
    for word in filtered_words:
        counts[word] = counts.get(word, 0) + 1

word_freq = pd.DataFrame({"word": list(counts.keys()), "freq": list(counts.values())})
word_freq = word_freq.sort_values(by="freq", ascending=False)
word_freq.to_excel("word_freq.xlsx", index=False)

print("done!")
```

图2 文本挖掘法分词代码

Fig. 2 Text mining method word segmentation code

对分词结果进行文本挖掘法的最后一步:获取危险源关键词。参考地铁施工危险源分类方法与轨道交通运营实际情况,从设备因素、人为因素、环境因素、管理因素进行了优化与拓展,得到8种关键危险源,共计258个危险源词汇,具体结果见表2。

表2 危险源词汇统计

Table 2 Hazardous source vocabulary statistics

危险源	模糊描述
车门故障	车门夹人、车门无法关闭、车门跳黄...
屏蔽门故障	屏蔽门夹物、安全门故障、屏蔽门光带故障...
车辆故障	DC故障、TCMS故障、牵引故障、DT故障...
异物侵限	轨道有异物、铁丝挂触网、广告牌掉落...
ATC故障	ATS运行图紊乱、通讯异常、ATS无法复位...
大客流	早高峰、晚高峰、换乘大客流、人较多...
人为因素	司机行为、司机确认车门、乘客行为...
自然灾害	暴雨、雷电、大风、强雷电...

2 高致灾危险源半定量辨识与分级

2.1 轨道交通危险源半定量辨识算法

本文基于行业标准及地铁运营的独有特性,对某地铁线路过去3年运营日志中的行车事故进行了深入剖析。通过对危险源发生频率及其后果严重程度的双重视角,对地铁运营中的高风险危险源进行半定量辨识。

在此基础上,本文提出了危险源发生频率与后果组合分析法的危险源辨识优化方案,旨在提升辨识过程的精确性和客观性。通过强化指标体系的量化值,有效降低了操作过程中的主观性干扰。具体的危险源发生频率与后果严重程度组合分析法的辨识计算公式如下:

$$R = F \times C \quad (1)$$

其中, F 表示危险源引发事故、事件发生的频率,见表1; C 表示危险源引发事故、事件后果的严重程度,见表2、表3; R 表示危险源等级(当 $R > 320$ 时为不可接受风险,为R1级;当 R 在 $101 \sim 320$ 时为不希望风险,为R2级;当 R 在 $40 \sim 100$ 时为可容忍风险,为R3级;当 $R < 40$ 时为可接受风险,为R4级)。

危险源发生频率与后果严重程度的赋分规则参考LEC评价法^[15],并结合轨道交通安全领域特征综合得出,具体赋分规则见表3、表4。

表3 危险源发生频率(F 的取值)

Table 3 Frequency of hazard occurrence (value of F)

F 分值	事故发生频率/(次·每年 ⁻¹)
10.0	≥200
6.0	100~200
3.0	50~100
1.0	20~50
0.5	5~20
0.1	≤5

表4 危险源后果严重程度(C 的取值)

Table 4 Severity of hazard consequences (value of C)

C 分值	行车事故
60	因故障造成中断运营正线行车 10 min 以上;乘车人员跃下轨道;因故障导致列车晚发、晚到 10 次以上;造成人员伤亡
30	因故障造成中断运营正线行车 6~10 min 以上;因故障晚发、晚到列车 5 次;触发列车紧急制动;造成多次加开列车
20	因故障造成中断运营正线行车 4~6 min 以上;因故障晚到、晚发列车;造成加开列车
10	因故障造成中断运营正线行车 4 min 以下
5	需乘务人员干预解决
1	不影响列车正常运营

2.2 轨道交通高致灾危险源分级结果

本文对上海地铁某号线某3年间的地铁运营日志中的258个危险源分级结果进行了统计分析,统计数据见表5。通过统计分析表明,在该时段内运营过程中存在4个R1级危险源,15个R2级危险源,63个R3级危险源以及179个R4级危险源,具体的

高致灾危险源词云图如图3所示。

表5 危险源量化计算分级结果

Table 5 Classification results of hazard source quantitative calculation

危险源等级	灾害度分值范围	危险源名称
R1 级	80~100	车门故障、异物侵限、大客流、VOBC 死机
R2 级	60~80	定位丢失、WSP 丢失、计轴受扰、辅助逆变器...
R3 级	30~60	ATPM 模式丢失、司机行为、运行图紊乱...
R4 级	0~30	空调故障、通讯故障、乘客行为...



图3 高致灾危险源词云图

Fig. 3 High-consequence hazardous source word cloud

3 高致灾危险源管控研究

3.1 高致灾危险源的应急处理方案设计

经过数据挖掘分析,研究发现了轨道交通的危险源的数量相当庞大,高致灾危险源的数量也不容乐观,每种高致灾危险源都会造成较为严重的后果,需要根据不同高致灾危险源的情况来设计对应的高精细化应急处理方法,以此实现风险管控。

高精细化应急处理方法包括:危险源源头分析、预防与管控措施、应急处理实施、后期处置四个方面。本文针对异物侵入这种R1级高致灾危险源设计了对应的高精细化应急处理方案,以提高工作人员对事故的应急处置能力,具体应急处理方案的步骤与内容见表6。

3.2 以异物侵限为例的高致灾危险源应急处置流程图

通过观察分析了有关异物侵限事故的轨道交通运营日志记录内容与事故案例报告,整理并归纳得出了较优的应急处理流程,制定了应急处理流程图,具体流程如图4所示。

表6 异物侵限应急处理方案设计

Table 6 Emergency response plan design for foreign object intrusion

应急处理步骤	应急处理具体内容
危险源源头分析	(1)疏散平台、联络通道门、电缆支架、标志牌等内部设施设备侵限及线路沿线建筑物、构筑物等外部物品侵限。(2)设施设备故障、老化、脱落等情况导致侵限。(3)施工作业完毕后设备恢复、线路出清不彻底。(4)违规施工、人为破坏等因素。(5)恶劣天气、自然灾害等因素
预防管控措施	(1)相关单位需维护、巡检设施设备,及时处理异常。(2)车站、司机等人员需加强巡视,制止侵限的外界设施。(3)列车司机需加强瞭望,发现异物侵限立即采取措施。(4)施工人员需遵守规章制度,不得违章,严格清场作业。(5)相关单位需关注预警信息,及时防范。施工人员需执行线路出清程序,确认设备正常。
应急处置实施	(1)在列车司机能够自行处理异物的情况下:①运营控制中心根据线路特点和现场状况,实施安全防护措施,预估影响范围和时间,调整线路运营。②列车司机向乘客通知情况,安抚乘客情绪,同时做好个人防护。③轨道侧的异物由司机移离轨道区域,暂时存放于司机室;接触网异物则由司机使用绝缘工具进行清除。④列车司机需强化观察,确保安全。(2)在列车司机无法自行清理异物的情况下:①运营控制中心发布抢修指令,派遣抢修人员前往现场。预估影响范围和时间,调整线路运营。②列车司机向乘客通知情况,安抚乘客情绪,做好个人防护。③抢修负责人制定抢修计划,开展抢修工作。司机与站务员协同抢修人员清除车站范围内的异物侵限。④抢修结束后,抢修负责人评估是否可以恢复列车正常运行,并向运营控制中心汇报
后期处理	(1)OCC在应急处理后需及时调整列车运行方案,恢复正常运行。(2)OCC确认异物侵害危险解决后,解除预警。(3)相关专业及单位开展对异物侵限影响范围内设施设备的检查、修复。(4)相关单位负责进行异物侵限原因分析,做好预防措施,并归档。(5)相关单位对事件处置流程进行评估、分析、总结和归档,明确责任,落实整改措施,减少类似事故的发生

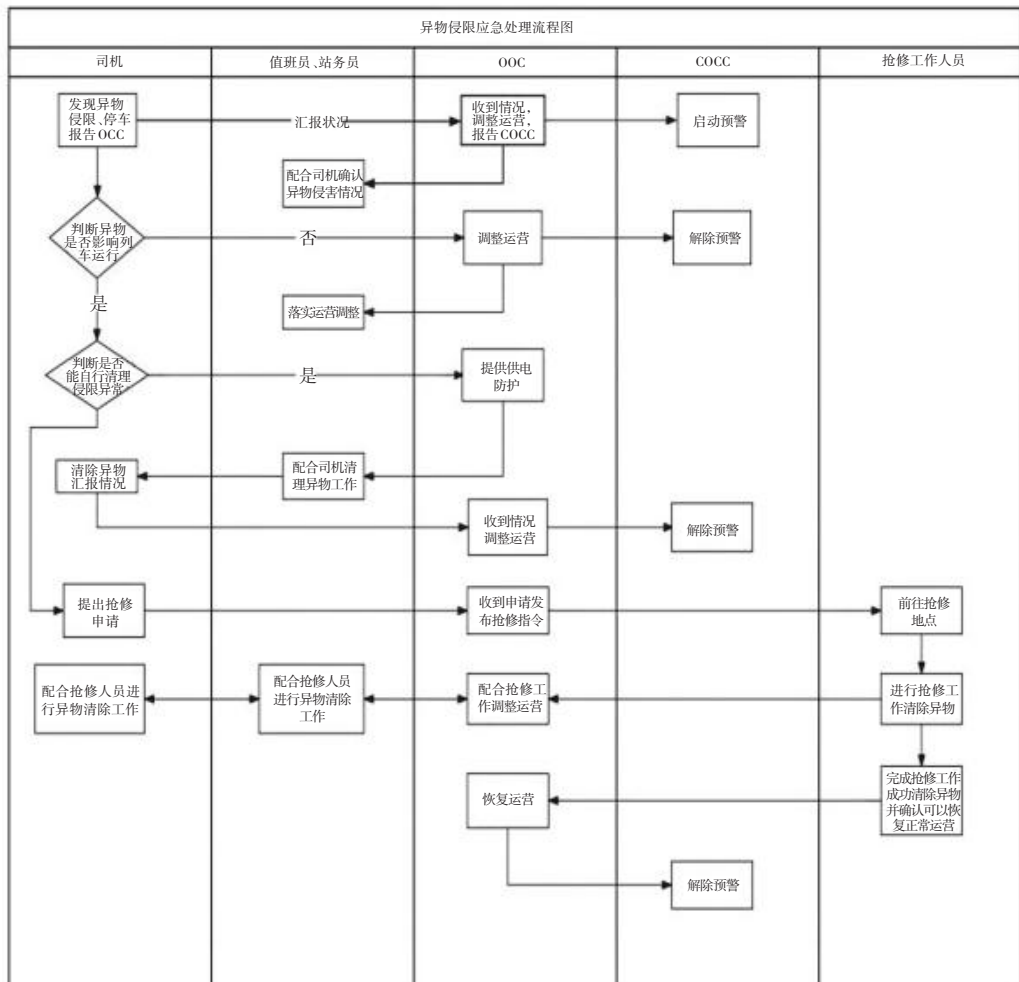


图4 异物侵限应急处理流程

Fig. 4 Emergency response procedure for foreign object invasion

4 结束语

本文通过对地铁危险源挖掘并量化分级的研究,分析了地铁运营中潜在的危险源,并进行科学分级,找出高致灾危险源,旨在改变国内轨道交通生产数据利用率较低,而故障率却处于高位的现状。此外,研究还以安全为核心,以运营需求为导向,为城市轨道交通海量运营数据的应用提供了数据挖掘的思路。这一方法体系不仅适用于轨道交通运营危险源的智能辨识,还为实现危险源的精细化管理提供了有力保障。这不仅有助于提升轨道交通运营的安全性,也有利于推动国内轨道交通行业的健康发展。在未来的工作中,将继续深化研究,为国内轨道交通运营安全做出更大的贡献。

参考文献

- [1] LI Xiaobing, PENMETS P, LIU Jun. Severity of emergency natural gas distribution pipeline incidents: Application of an integrated spatio-temporal approach fused with text mining[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020(69): 104383.
- [2] MAZOURI F, JABBOUR S, RADDAOUI B, et al. Breaking symmetries in association rules[J]. Procedia Computer Science, 2019, 148:283-290.
- [3] 王晓旭,王丽珍,王家龙. 交通数据的时空并置模糊拥堵模式挖掘[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(8):683-692.
- [4] LIU Jintao, SCHMID F, LI Keping, et al. A knowledge graph-based approach for exploring railway operational accidents[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 207:103572.
- [5] LIU Kai, ZHU Jiatong, WANG Ming. Anevent - based probabilistic model of disruption risk to urban metro networks[J]. Transportation Research Part A Policy and Practice, 2021, 147(2):93-105.
- [6] XU Na, MA Ling, LIU Qing, et al. An improved text mining approach to extract safety risk factors from construction accident reports[J]. Safety Science, 2021, 138(8):105216.
- [7] QIU Zunxiang, LIU Quanlong, LI Xinchun, et al. Construction and analysis of a coal mine accident causation network based on text mining[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 153:320-328.
- [8] 罗文慧,蔡凤田,吴初娜,等. 基于文本挖掘的道路运输安全危险源辨识模型[J]. 西南交通大学学报,2021,56(1):147-152.
- [9] DING Xiaobing, YANG Xuecheng, LIU Zhigang. The safety management of urban rail transit based on operation fault log[J]. Safety Science, 2017, 94(c):10-16.
- [10] 黎华. 城市轨道交通运营风险管理研究[J]. 运输经理世界, 2021(6):3-4.
- [11] 孙双杰. 轨道交通车站的安全隐患及其风险管理[J]. 现代经济信息, 2020(12):170-171.
- [12] WU Ping, CHEN Qian, CHEN Yinqi et al. ISM - MICMAC based safety risk sources analysis and control measures for underground engineering of urban rail transit projects[J]. Journal of Engineering Research, 2023, 11(3):40-50.
- [13] TANG Yongsheng. Risk chain and key hazard management for urban rail transit system operation based on big data mining[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021, 2021: 3692151.
- [14] 史秀红. 城市轨道交通综合应急预案体系研究[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(7):147-149.
- [15] 曾欣. 南昌轨道交通运营安全管理研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2017.
- [16] 张兰玲,柯柏峰,李春芳,等. 基于信息化技术的城市轨道交通双重预防机制建设[J]. 综合运输, 2022, 44(2):38-42.
- [17] 刘壮壮. 城市轨道交通运营危险源主动辨识及预警系统[J]. 物流科技, 2024, 47(4):68-71.
- [18] 黎忠文,周志杰,龙增,等. 城市轨道交通网络化运营双重预防机制建设[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(6):479-485.
- [19] 董贺轩,罗颖,谢琪熠,等. 老龄出行安全视角下地铁站公共空间危险源评价与防控策略[J]. 华中建筑, 2023, 41(3):21-26.
- [20] 刘小玲,薛亮. 城市轨道交通行车安全危险源辨识及风险控制研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(8):123-124.