

# 城市轨道交通运营安全的风险耦合特性

施 挺

(上海申通地铁集团有限公司安全生产监督管理部, 201100, 上海)

**摘 要** [目的]城市轨道交通系统是一个复杂的人、机、环、管综合系统,其运营风险不是独立、静止存在的。研究各风险之间发生的动态耦合效应,能更有效地做出合理的风险管控,从而降低事故发生的概率与危害后果。[方法]系统性地分析了城市轨道交通运营风险因素来源,对人为、设备、环境、管理等4类风险因素进行了同质风险耦合分析与异质风险耦合分析,总结风险耦合演变规律。基于 $N-K$ (系统风险因素数量-参与耦合风险因素数量)模型量化计算人为、设备、环境、管理等4类风险因素不同组合形式的耦合值。[结果及结论]通过对多因素组合的耦合值计算分析可得:参与耦合的风险因素越多,风险越大。在双因素耦合中,设备在风险耦合中影响程度最高,人为-设备耦合的风险值最高;在三因素耦合中,设备风险同样易与其他因素发生耦合效应。研究结果能反映城市轨道交通系统运营风险的动态特征及相互作用关系,有助于企业安全管理部门建立针对性风险应对策略及管控方案。

**关键词** 城市轨道交通;运营安全;风险耦合; $N-K$ 模型;风险耦合值

**中图分类号** F530.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.11.005

## Coupling Characteristics of Operational Safety Risks in Urban Rail Transit

SHI Ting

(Safety Production Supervision and Management Department, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201100, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Urban rail transit system is a complex integrated system involving people, machine, environment, and management, with its operational risks existing not independently or statically. Understanding the dynamic coupling effects between various risks can lead to more effective risk control, thereby reducing the probability and hazardous impact of accidents. [Method] Based on a systematic analysis of the risk factor sources in urban rail transit operations, both homogenous and heterogeneous risk coupling analyses for four categories of risk factors: human, equipment, environment, and management are conducted. The evolution patterns of risk coupling are summarized. Using the  $N-K$  (number of system

risk factors-number of coupling factors) model, the coupling values for different combinations of the aforementioned four risk factors are quantified. [Result & Conclusion] Analysis of coupling value calculation for various factor combinations reveals that the more risk factors involved in coupling, the greater the risk. In dual-factor coupling, equipment has the highest impact on risk coupling, with the highest risk value in human-equipment coupling. In triple-factor coupling, equipment risks also exhibit a strong tendency to couple with other factors. Research results reflect the dynamic characteristics and the interactions of operational risks in urban rail transit system, providing valuable insights for enterprise safety management departments to develop targeted risk response strategies and management solutions.

**Key words** urban rail transit; operational safety; risk coupling;  $N-K$  model; risk coupling value

随着运营规模日益壮大,城市轨道交通系统安全性与可靠性愈受重视,企业安全管理形势更加严峻。城市轨道交通系统由复杂的人、机、环境、管理等要素相互协同、共同作用,受复杂的网络结构、多样的系统类型、新旧设施设备混用及突发大客流等因素影响,局部设施设备故障及人因异常事件等时有发生。城市轨道交通运营事件的风险来源不同,不同风险在成因、性质、形态上呈现出不同的特性<sup>[1]</sup>。从运营安全事件(事故)致因角度,结合系统工程基础理论,风险因素包括人为、设备、环境、管理等;从风险形态角度,运营风险包括潜在风险和突发风险;从风险可控角度,运营风险分为可控风险和不可控风险。此外,不同风险可能会对城市轨道交通运营造成不同程度的危害后果,包括人员伤亡、健康损害、经济损失及运营干扰等。

城市轨道交通系统风险是客观存在的,不同程度地存在于运营生产的各个环节,具有一定的动态特征。由于各系统要素之间有强相关性,风险也往往不是独立存在,各风险因素之间相互联结、相互影响,呈现一定的耦合性。为有效组织风险管控、

预防运营事件及安全事故,本文基于实际运营数据,系统性地研究城市轨道交通运营风险因素及其耦合关系,并采用  $N-K$  (系统风险因素数量-参与耦合风险因素数量) 模型分析上海轨道交通运营风险特性。

## 1 城市轨道交通运营风险因素分析

城市轨道交通运营风险管理的基础是各类风险因素的辨识与分析。根据城市轨道交通运营特点,可能影响运营安全与稳定的风险因素包括大客流风险、设施设备故障风险、人员因素风险、外部因素风险、恶劣天气与自然环境风险、公共安全风险等。

1) 大客流风险。城市轨道交通的服务对象主要为城市通勤客流、旅游客流、消费客流等。由居民活动的时空分布特征,可能会在短时间或特定区域积聚大量出行客流,引发安全风险和压力。大客流包括常态大客流和突发大客流。前者主要由运能不足导致,后者则是由设施设备故障、异常干扰、周边大型活动等突发事件引起。因此,大客流风险往往伴随着其他风险,进而影响运营安全。

2) 设施设备故障风险。城市轨道交通设施设备故障时有发生,轻则引起列车运行延误,重则导致运营安全事故。诱发设施设备故障的因素主要为设施设备自身使用情况和维护保养管理情况等。在复杂的列车运行工况下,线路设施设备长期处于较高负荷运转,故障率升高;对于老线路而言,设施设备使用年限较长,出现自然磨损、老化故障;对于新运营线路,设施设备功能设计可能存在缺陷,还需要经历试运营磨合过程。此外,日常维护管理水平、应急处置能力等参差不齐,也可能导致设备无法达到良好稳定的运行状态。

3) 人为因素风险。基于历史事件统计数据,人为因素是导致地铁运营事件的主要因素之一。人为因素风险主要来源于内部员工的不安全作业行为及外部人员的不安全侵害行为<sup>[2]</sup>。内部员工执行生产作业的过程中,可能由于自身专业技能水平不熟练、身心状态不佳、心理素质不高、责任意识不强等原因形成风险隐患。外部乘客可能会有携带违禁品乘车、违规吸烟、抢行冲门、故意或误触紧急装置等不文明、不规范乘车行为,以及故意自我伤害、伤害他人行为等故意伤害行为。这些不安全行为存在很多不确定性,增大了安全风险管理的难度。

4) 外部因素风险。城市轨道交通系统周边活动可能影响正常运营及维护保障,甚至造成安全隐患及事故。例如,沿线重大施工或保护区施工等可能会影响线路列车运行工况,沿线居民高空抛物、绿化侵限、高架线路异物入侵等可能造成安全隐患。

5) 恶劣天气与自然环境风险。不同季节都可能产生不利的气候条件、极端恶劣天气或自然灾害,可能引发较大范围的设施设备损坏、运营中断甚至路网停运等事件。在冬季,雨雪冰冻天气会造成高架、地面的轨道区间积雪,轨旁设施设备结冰,从而影响列车正常运行,在车站出入口或通道的积雪还可能导致乘客意外滑倒乃至受伤事件。在夏季,台风及暴雨天气下,高架线路可能会发生周边建筑物设施入侵,隧道线路可能出现区间积水,车站出入口可能出现雨水倒灌等情况,此外,受恶劣天气影响,应急设施设备可能出现运转不良的情况,影响应急处置。

6) 公共安全风险。在车站、车场及控制中心等区域内,可能由于设备老化、人员违规使用明火、吸烟及蓄意破坏等,引发消防安全隐患甚至火灾事故。此外,乘客蓄意破坏、恐怖袭击等可能造成城市轨道交通公共区域的治安事件,新冠疫情暴发会引起对于城市轨道交通公共卫生风险的关注。

## 2 城市轨道交通运营风险耦合分析

城市轨道交通运营风险因素通常不是独立存在的,不同风险因素之间可能会同时或先后发生,并相互作用、彼此影响继而对安全造成影响,即风险因素之间存在耦合效应。同一类型风险因素内部风险因子相互作用为同质风险耦合,不同类型风险因素中不同风险因子相互作用为异质风险耦合<sup>[1,3]</sup>。本研究针对城市轨道交通运营风险因素之间的同质风险耦合、异质风险耦合进行分析。

### 2.1 同质风险耦合分析

同质风险耦合分析分别考虑人为风险因素、设施设备风险因素、环境风险因素、管理风险因素各自内部同类风险因子相互作用的耦合效应。

#### 2.1.1 人为风险因子同质耦合

人具有主观能动性,人为风险因素相较其他因素更为复杂。在风险因素内部,人为风险因子的同质耦合关系如图 1 所示。

由图 1 可知:① 工作人员生理状态不佳会引起注意力不集中,继而导致指令、操作、检查等作业失

误;② 生理状态不佳还会引发工作疲劳,当作业人员处于疲惫与懈怠时,安全责任意识下滑,继而出现工作不积极、违章违纪等不安全状态和行为;③ 紧张等不良情绪会影响应急处置能力,容易发生人为失误;④ 专业知识水平不够,可能导致技能熟练度低,继而引发操作问题。

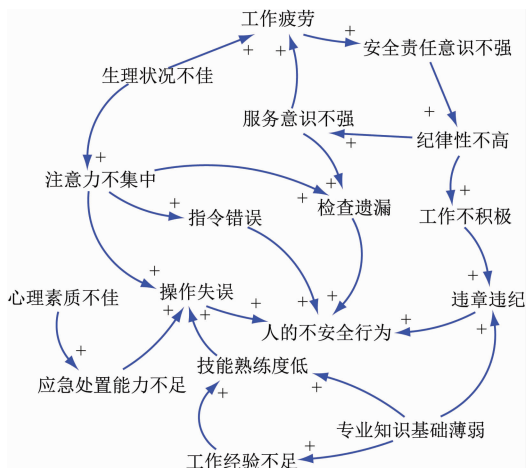


图1 人为风险因子的同质耦合关系图

Fig.1 Relation diagram of human risk factor homogenous coupling

### 2.1.2 设施设备风险因子同质耦合

根据历史事件统计,设施设备风险因素引发风险事件占了很大比例。设施设备风险因子的同质耦合关系如图2所示。

由图2可知:① 设备设计缺陷会使设备更容易老化与磨损,在运营使用中出现异常状况;② 备品备件不充足,会影响设备的维修更换。

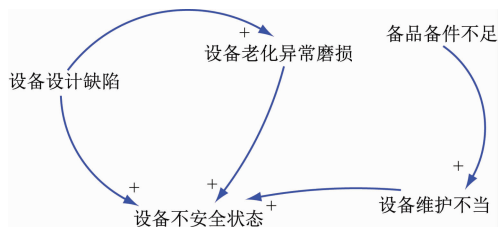


图2 设施设备风险因子的同质耦合关系图

Fig.2 Relation diagram of equipment risk factor homogenous coupling

### 2.1.3 环境风险因子同质耦合

环境风险因子的同质耦合关系如图3所示。由图3可知:① 恶劣天气可能引发站内大客流风险,也会使作业区域环境恶劣,降低运营稳定性;② 非法活动干扰及内部社会环境风险可能对运营环境造成破坏。

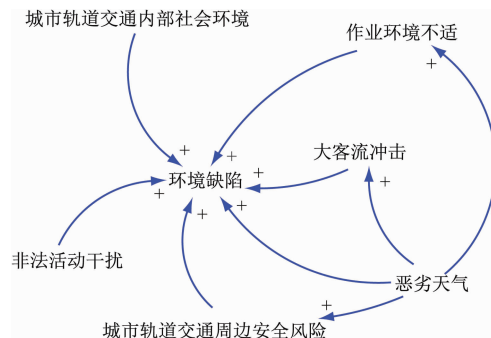


图3 环境风险因子的同质耦合关系图

Fig.3 Relation diagram of environment risk factor homogenous coupling

### 2.1.4 管理风险因子同质耦合

管理风险因子的同质耦合关系如图4所示。由图4可知:① 规章制度不健全会出现人力资源管理不配套、排班不合理等问题,继而导致执行决策环节出现问题;② 管理制度落实不到位可能引起决策失误、工作程序不合理;③ 安全保障力不足往往是对于人员的安全教育及技能素质培训不足,继而导致管理出现决策问题。

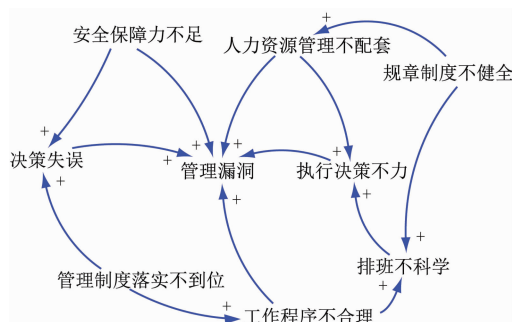


图4 管理风险因子的同质耦合关系图

Fig.4 Relation diagram of management factor homogenous coupling

## 2.2 城市轨道交通异质风险耦合分析

基于对上海轨道交通历史事件的统计分析,不同类型风险因素之间的异质耦合发生可能性更高。由于4类风险因素所对应的风险因子数量多、关系庞杂,为更清晰地表达异质耦合关系,将同类风险因子进行整合,继而进行各异质风险因子之间的耦合关系分析。4类风险因素的异质耦合关系如图5所示。由图5可知:

1) 人的不安全行为会影响设备维护,设备维修不到位加剧磨损、老化,继而故障频出;同样,设备磨损、老化也会增加人为风险。

2) 人的不安全行为会导致作业环境存在风险。



例如:乘客在禁烟区吸烟容易引发火灾风险;维修施工人员没有做到工完场清,将工具等遗留在现场,可能会造成异物侵限,导致运营中断等事故。

3) 人和管理的影响关系是相互的。人的不安全行为会影响整个班组乃至组织的风气;组织的不良风气会增加管理负担;管理制度决定管理行为,会导致班组的不安全行为,从而增加人为风险。

4) 不利的自然环境和社会环境条件会影响正常的作业环境,工作环境不佳会加速人为失误及设备老化。

5) 与设备相关管理制度不合理,会导致设备投入运营后容易出现故障。

6) 管理和环境发生耦合作用时往往伴随着人为因素与设备因素的参与。

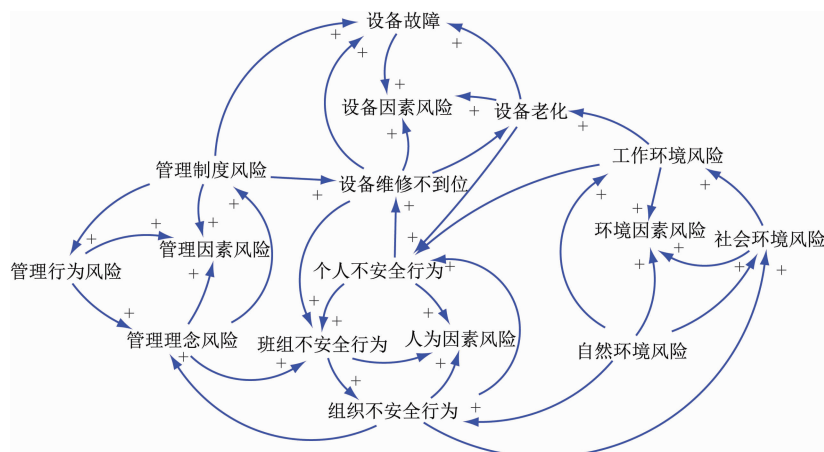


图 5 4 类风险因素异质耦合关系图

Fig. 5 Relation diagram among the four types of risk factor heterogeneous coupling

### 3 基于 $N-K$ 模型的城市轨道交通运营风险耦合分析

为了更好地研究风险之间耦合作用的大小,更准确地掌握风险耦合规律,选择  $N-K$  模型量化风险因素及风险因子的耦合效应,对风险耦合程度(即耦合值)进行定量分析。

#### 3.1 $N-K$ 模型耦合值计算方法

$N-K$  模型<sup>[4]</sup>起源于生物学领域,用于研究生物进化及基因排列组合的生存适应度景观问题,后被运用到其他领域的风险耦合研究中。

$N-K$  模型中, $N$  指系统的风险因素数量, $K$  为参与耦合的风险因素数量,且  $K$  取值范围为  $[0, N]$ 。如果某系统内有  $N$  个因素,每个因素有  $n$  种状态,那么该系统内有  $n^K$  种风险耦合组合形式。在城市轨道交通风险耦合研究中,风险因素状态有两种:风险因素处于安全状态,状态值为 0;风险因素处于不安全状态,状态值为 1。

通过计算参与耦合的风险因素之间的风险耦合值  $T$  来量化城市轨道交通系统中人为、设备、环境及管理因素的耦合程度。 $T$  越大,说明该因素状态组合的耦合程度越高,也意味着这种组合的风险

越高,导致运营事故发生的概率也越高。利用  $N-K$  模型计算风险耦合值  $T$ ,有:

$$T = \sum_{h,i,j,k} \left[ P_{hijk} \ln \left( \frac{P_{hijk}}{P_{h,s} P_{i,s} P_{j,s} P_{k,s}} \right) \right] \quad (1)$$

式中:

$h, i, j, k$ ——人为、设备、环境及管理因素的状态值,取 0 或 1;

$P_{hijk}$ ——4 种风险因素耦合发生的概率;

$P_{h,s}$ ——人为因素状态值为  $h$  时的单因素耦合概率;

$P_{i,s}$ ——设备因素状态值为  $i$  时的单因素耦合概率;

$P_{j,s}$ ——环境因素状态值为  $j$  时的单因素耦合概率;

$P_{k,s}$ ——管理因素状态值为  $k$  时的单因素耦合概率。

基于上海轨道交通系统历史事件数据,利用  $N-K$  模型分析了 5 种单因素耦合、6 种双因素耦合(包含人为-设备、人为-环境、人为-管理、设备-环境、设备-管理、环境-管理)及 5 种多因素耦合(人为-设备-环境、人为-设备-管理、人为-环境-管理、设备-环境-管理、人为-设备-环境-管理)的发生概率,并计算了

有两种及以上因素参与作用的风险耦合值。

### 3.2 上海轨道交通运营风险耦合分析

经统计,2016—2020 年间,上海轨道交通共发生 125 起运营风险事件。这些事件均发生在正式运营线路、车站、车场等生产场所,导致线路运营延误在 15 min 以上,或直接引发人身伤害、财产损失等。分类统计各事件对应的风险因素。当  $h, i, j, k$  分别取值为 0 或 1 时,人为、设备、环境、管理 4 种因素形成了 16 种风险耦合形式。依次统计单因素、双因素、三因素及四因素耦合的 16 种风险耦合形式的发生次数,结果如表 1 所示。

表 1 各种因素耦合次数、概率统计

Tab.1 Coupling frequency and probability statistics of various factors

耦合种类	耦合形式	耦合因素 状态值组合	发生次数	发生概率
单因素耦合	$C_0$	0000	0	0
	$C_{11}$	1000	8	0.064
	$C_{12}$	0100	47	0.376
	$C_{13}$	0010	1	0.008
	$C_{14}$	0001	3	0.024
双因素耦合	$C_{21}$	1100	22	0.176
	$C_{22}$	1010	2	0.016
	$C_{23}$	1001	11	0.088
	$C_{24}$	0110	1	0.008
	$C_{25}$	0101	12	0.096
	$C_{26}$	0011	3	0.024
	$C_{31}$	1110	0	0
三因素耦合	$C_{32}$	1101	9	0.072
	$C_{33}$	1011	3	0.024
	$C_{34}$	0111	2	0.016
四因素耦合	$C_4$	1111	1	0.008

注:耦合形式  $C_0$  对应 4 个因素状态值均为 0,即 4 类风险因素均为安全;耦合形式  $C_{11}$  为单因素耦合的第 1 种形式,对应的耦合因素状态值组合为 1000,表示  $h=1, i=j=k=0$ ,表示单因素耦合中只有人为因素参与耦合,在 125 起事件中发生了 8 次,发生概率是 0.064;余类同。

根据式(1),对照表 1 中风险耦合形式,分别计算双因素、三因素及四因素的风险耦合值  $T$ ,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,根据  $T$  大小,对多耦合形式排序可得: $C_4, C_{32}, C_{31}, C_{34}, C_{21}, C_{25}, C_{24}, C_{33}, C_{26}, C_{23}, C_{22}$ 。由此,可以得出以下结论:

表 2 多因素耦合形式下的风险耦合值  $T$

Tab.2 Risk coupling value  $T$  under coupling forms of multiple factors

耦合形式	$T$	耦合形式	$T$
$C_{21}$	0.105	$C_{31}$	0.199
$C_{22}$	$\approx 0$	$C_{32}$	0.236
$C_{23}$	0.015	$C_{33}$	0.059
$C_{24}$	0.075	$C_{34}$	0.188
$C_{25}$	0.086	$C_4$	0.341
$C_{26}$	0.059		

1) 总体而言,城市轨道交通系统中参与耦合的风险因素越多,风险越大。其中,人为-环境-管理的  $T$  小于人为-设备、设备-管理、设备-环境等双因素  $T$ ,说明设备在风险耦合系统中起着重要的作用。

2) 在双因素耦合中,人为-设备的  $T$  最高,明显高于排在第二、第三位的设备-环境和设备-管理的  $T$ ,说明人为和设备的风险存在强关联性,风险普遍存在于人为设备交互的过程中,需要充分重视。

3) 在三因素耦合中,人为-设备-管理的  $T$  大于人为-设备-环境的  $T$ 。环境是客观因素,较为稳定;而管理属于主观因素,与其他因素的耦合效应更显著。设备-环境-管理的  $T$  明显高于人为-环境-管理的  $T$ 。经分析:人具有能动性,人为因素在管理因素的协同作用下,风险耦合效应较低;而设备的风险易与其他因素发生耦合,从而诱发风险事件。这也符合地铁运营的实际情况。

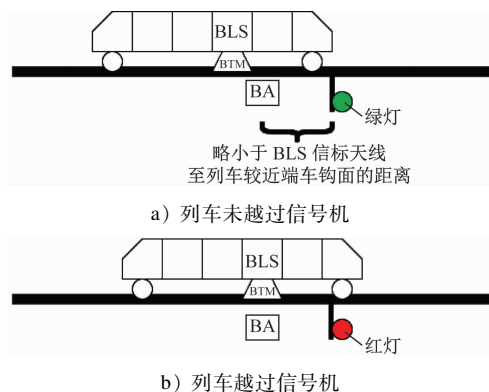
## 4 结语

本文全面分析了城市轨道交通系统各类风险因素的来源,针对人为、设备、环境、管理 4 类风险因素在运营系统中的风险耦合关系进行了同质耦合、异质耦合分析,定性地说明了风险耦合演变规律。随后,基于上海轨道交通系统的历史事件数据,使用  $N-K$  模型对城市轨道交通运营风险的 4 类因素的耦合效应进行量化计算,获取了不同风险因素的耦合风险概率,为更加科学、有针对性地组织开展安全风险管理、预防安全事故奠定了基础和支持。

## 参考文献

- [1] 马伶俐.城市轨道交通运营风险耦合研究[D].北京:北京交通大学,2014.

(下转第 27 页)



注:BTM 为应答器传输模块;BA 为应答器。

图 6 信号机关闭时里列车通过信标示意图

Fig. 6 Diagram of train passing beacon when signal machine is turned off

当 WTC 通过 BLS 定位判断列车到达停车点后,列车自动结束任务,释放降级列车后方资源。

## 4 结语

在双制式四网的车-地通信冗余方案保障下,该方案使用 WTC 确保降级列车可以获得安全的资源授权,基于 BLS 定位,与后车交互资源实现追踪运行,实现降级列车安全高效地退出运营,该方案没有改变车-车通信的追踪逻辑,避免了轨旁设备的增加,并减少初期建设与后期维护成本。

目前,该降级列车运行控制方法已通过上海轨道交通 3、4 号线信号系统更新改造工程的样板段评审,可供其他同类项目尤其是施工空间紧张的改造项目参考。

## 参考文献

- [1] 陈思维. 上海轨道交通 3、4 号线信号系统改造方案研究[J].

(上接第 22 页)

- MA Lingling. Study on operational risk coupling of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [2] 刘双庆, 尤秋菊, 张世杰. 基于事故统计分析的地铁运营安全管理研究[J]. 安全, 2019, 40(1): 62.
- LIU Shuangqing, YOU Qiuju, ZHANG Shijie. The study of subway operation safety management based on statistical analysis of accidents[J]. Safety & Security, 2019, 40(1): 62.
- [3] 王焕新, 刘正江. 基于 N-K 模型的海上交通安全风险因素耦合分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 56.
- WANG Huanxin, LIU Zhengjiang. Coupling analysis of the risk factors for the maritime transportation safety based on the N-K model

城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 148.

- CHEN Siwei. Research on signaling system transformation scheme of Shanghai Rail Transit Line 3/4[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 148.
- [2] 陈欣. 城市轨道交通列车自主运行系统后备模式研究[J]. 铁道通信信号, 2024, 60(3): 7.
- CHEN Xin. Research on fallback mode of train autonomous control system of urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2024, 60(3): 7.
- [3] 徐海贵, 陆怡然, 冯玮, 等. 一种用于 TACS 系统的信号机显示方法: 202110413093.0[P]. 2022-07-08.
- XU Haigui, LU Yiran, FENG Wei, et al. Signal machine display method for TACS system: 202110413093.0[P]. 2022-07-08.
- [4] 徐海贵, 汪小勇, 陆怡然, 等. 带降级管理装置的列车自主运行系统及其应用: 202010966553.8[P]. 2022-07-15.
- XU Haigui, WANG Xiaoyong, LU Yiran, et al. Train autonomous operation system with degradation management device and application: 202010966553.8[P]. 2022-07-15.
- [5] 陈绍文, 汪小勇, 凌小雀, 等. 一种 TACS 系统主备定位转换方法、装置、设备及介质: 202211601287.4[P]. 2023-04-04.
- CHEN Shaowen, WANG Xiaoyong, LING Xiaoque, et al. TACS system main-standby positioning conversion method, device, equipment and medium: 202211601287.4[P]. 2023-04-04.
- [6] 余东海, 职文超, 吕新军, 等. 一种列车资源重教育系统、方法、设备及介质: 202310533460.X[P]. 2023-09-19.
- YU Donghai, ZHI Wenchao, LYU Xinjun, et al. Train resource re-education system, method, equipment and medium: 202310533460.X[P]. 2023-09-19.

· 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-04-12 出版日期:2024-11-10  
Received:2024-03-18 Revised:2024-04-12 Published:2024-11-10  
· 通信作者:李永峰,工程师, yonzl@foxmail.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

- el[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 56.
- [4] CHU F, CHU C. Single item dynamic lot-sizing models with bounded inventory and outsourcing[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2008, 38(1):70.

· 收稿日期:2024-07-08 修回日期:2024-07-19 出版日期:2024-11-10  
Received:2024-07-08 Revised:2024-07-19 Published:2024-11-10  
· 通信作者:施挺,工程师, 24575003@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license