

城市轨道交通列车故障救援方案的研究

刘 铭 郎诚廉

(同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

摘 要 [目的]城市轨道交通一旦发生故障,需要其他列车救援,就会严重影响后续列车运行和乘客的出行安全。若救援的路径选择不合适,还会对已开通的线路造成二次影响。故需基于救援路径和组织,研究列车救援方案。[方法]分析现有的城市轨道交通列车故障救援程序。结合列车故障救援的实际作业时间和流程,分析列车故障救援过程及作业时间。对一条线路不同位置发生列车故障时的救援路径选择进行了探讨,从救援列车的选择、救援方式的选择和故障列车存放位置的选择三方面入手,对其进行组合,得到列车故障救援的不同方案。以上海轨道交通 7 号线为例,进行列车故障救援方案的比选和汇总。[结果及结论]把列车故障救援过程分为故障处置、救援准备、救援处置和救援结束 4 个阶段。基于救援列车的选择、救援方式的选择和故障列车存放位置的选择及组合,得到了上海轨道交通 7 号线全线列车故障救援方案图。经实践验证,该救援方案能有效地避免二次延误,进而提升地铁服务质量。

关键词 城市轨道交通; 列车故障; 救援方案

中图分类号 U292.4*5: U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.032

Research on Fault Rescue Plans for Urban Rail Transit Trains

LIU Ming, LANG Chenglian

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Once failures occur in urban rail transit, the need for assistance from other trains can significantly impact the subsequent train operation and passenger safety. Improper choices in the rescue path may also lead to secondary effects on already operating lines. Therefore, it is essential to study fault rescue plans based on rescue paths and organization. [Method] Existing procedures for fault rescue of urban rail transit trains are analyzed. Combining the actual operation time and process of train fault rescue, the process and operation time of train fault rescue are analyzed. The discussion includes the selection of rescue paths when a train fault occurs at different locations on a line. By considering the choice of the rescue train, the selection of rescue method, and the location for storing the faulty train, these aspects are combined to derive vari-

ous fault rescue plans. Taking Shanghai Rail Transit Line 7 as example, the fault rescue plans are compared and summarized.

[Result & Conclusion] The train fault rescue process is divided into four stages: fault handling, rescue preparation, rescue operation, and rescue completion. Based on the selection and combination of the rescue train, rescue method, and location for storing the faulty train, a comprehensive fault rescue plan for the entire Shanghai Rail Transit Line 7 is obtained. Through practical verification, this rescue plan can effectively avoid secondary delays, thereby enhancing the quality of metro services.

Key words urban rail transit; train fault; rescue plan

在城市轨道交通运营过程中,列车故障需要救援的情况时有发生。地铁列车一旦发生故障无法处理而需要其他列车进行救援时,会严重影响后续列车运行和乘客的出行安全。在救援列车连挂故障列车的救援过程中,若救援的路径选择不合适,同样会对已开通的线路造成二次影响。故需基于救援路径及组织,对城市轨道交通列车故障救援方案进行研究。

1 列车故障救援的过程及作业时间

根据现有的城市轨道交通列车故障救援的实际作业时间及流程,列车故障救援过程可以分为 4 个阶段。

1) 故障处置阶段,主要环节为故障接报、救援列车清客^[1]。

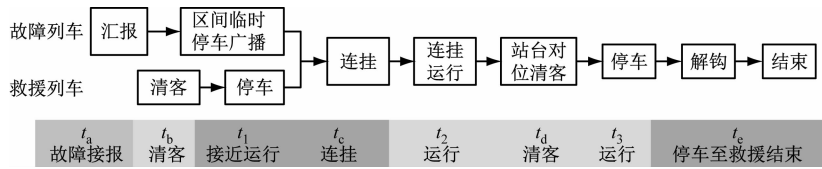
2) 救援准备阶段,主要环节为救援列车接近故障列车、救援列车连挂故障列车做动车准备。

3) 救援处置阶段,主要环节为两车连挂运行、故障列车清客和两车继续运行至存放位置。

4) 救援结束阶段,救援列车与故障列车连挂运行存放位置后,停车、摘钩,救援列车退回正线运行。至此列车故障救援结束。

根据列车故障救援过程,得到故障列车和救援列车的作业时间。列车故障救援过程中的作业时

间如图 1 所示。



注: t_a —故障接报时间; t_b —救援列车清客时间; t_c —救援列车与故障列车的连挂时间; t_d —故障列车清客时间; t_e —连挂列车停车至救援结束的时间; t_1 —救援列车接近故障列车的运行时间; t_2 —连挂运行至故障列车清客站的时间; t_3 —清客站连挂运行至故障列车存放点的时间。

图 1 列车故障救援过程中的作业时间

Fig. 1 Operation time during faulty train rescue process

图 1 中, t_a 、 t_b 、 t_c 、 t_d 等由实际线路的作业规范时间确定, 本研究中, $t_a = 3 \text{ min}$, $t_b = 2 \text{ min}$, $t_c = 6 \text{ min}$, $t_d = 2 \text{ min}$ 。

由于去往故障列车存放位置的方式及存放点对 t_e 影响较大, 故按此划分救援类别, 并计算救援类别为 i 的连挂列车停车至救援结束时间 $t_{e,i}$ 。

对于救援类别 i ; $i = 1$, 表示牵引或推进故障列车至车辆段或停车场、就近双列位停车线; $i = 2$, 表示正向牵引故障列车至就近贯通式单列位停车线; $i = 3$, 表示逆向牵引故障列车至就近贯通式单列位停车线; $i = 4$, 表示正向推进故障列车至就近单列位停车线; $i = 5$, 表示逆向推进故障列车至就近单列位停车线。 $t_{e,i}$ 为:

$$t_{e,i} = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ t_{\text{摘钩}} + t_{\text{退回}} + t_{\text{投入}}, & i = 2 \\ t_{\text{摘钩}} + t_{\text{退回}} + t_{\text{换端}} + t_{\text{投入}}, & i = 3 \\ t_{\text{摘钩}} + t_{\text{换端}} + t_{\text{退回}} + t_{\text{换端}} + t_{\text{投入}}, & i = 4 \\ t_{\text{摘钩}} + t_{\text{换端}} + t_{\text{退回}} + t_{\text{投入}}, & i = 5 \end{cases} \quad (1)$$

$$t_{\text{zf}} = t_{\text{进路建立}} + t_{\text{配线对标}} + t_{\text{换端}} + t_{\text{投入}} \quad (2)$$

式中:

$t_{\text{摘钩}}$ ——摘钩的时间;

$t_{\text{退回}}$ ——救援列车退回的时间;

$t_{\text{换端}}$ ——救援列车司机换端的时间, 取 2.00 min;

$t_{\text{投入}}$ ——救援列车再次投入运行的时间, 取 0.50 min;

$t_{\text{进路建立}}$ ——连挂列车建立进路的时间, 取 0.25 min;

$t_{\text{配线对标}}$ ——连挂列车配线对标的时间, 取 0.50 min;

t_{zf} ——连挂列车经渡线折返至对向线路的时间。

列车的实际运行过程极为复杂, 分析计算时需

进行简化。简化后: 当列车运行距离较短时, 列车起动后, 先以恒定加速度 a_{up} 加速, 达到一定速度后以恒定制动加速度 a_{dn} 减速, 直至车速为 0; 当列车长距离运行时, 列车起动后, 先以恒定加速度 a_{up} 加速, 达到一定速度后以恒定速度运行, 最后恒定制动加速度 a_{dn} 减速, 直至车速为 0。简化后, 第 q 个环节的列车运行时间 t_q 为:

$$t_q = \begin{cases} \sqrt{\frac{2l_q(a_{\text{up}} + a_{\text{dn}})}{a_{\text{up}}a_{\text{dn}}}}, & l_q \leq \frac{v_q^2(a_{\text{up}} + a_{\text{dn}})}{2a_{\text{up}}a_{\text{dn}}} \\ \frac{l_q}{v_q} + \frac{v_q(a_{\text{up}} + a_{\text{dn}})}{2a_{\text{up}}a_{\text{dn}}}, & l_q > \frac{v_q^2(a_{\text{up}} + a_{\text{dn}})}{2a_{\text{up}}a_{\text{dn}}} \end{cases}, \quad q = 1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

式中:

l_q ——第 q 个环节的列车运行距离;

v_q ——第 q 个环节的列车运行速度。

其中, $q = 1$ 表示救援列车接近故障列车环节; $q = 2$ 表示连挂运行至故障列车清客站环节; $q = 3$ 表示清客站连挂运行至故障列车存放点环节; $q = 4$ 表示清客站连挂运行至最近的渡线环节; $q = 5$ 表示对向线路连挂运行至故障列车存放点环节。

2 列车故障救援方案

2.1 方案设计

列车故障救援的基本方案主要包含救援列车、救援方式和故障列车存放位置三方面内容^[2]。

1) 救援列车。当有城市轨道交通列车发生故障需要救援时, 可以选择故障列车的后续列车、前行列车及对向运行列车作为救援列车。由于对向运行列车救援会干扰对向列车运营, 使对向救援列车接近并与连挂的过程产生更大的延误, 且救援过程较为复杂, 一般情况下不予采用。

2) 救援方式。救援方式主要包括牵引和推进两种基本方式。两种救援方式下救援列车连挂故障

列车后的运行速度不同。在牵引的救援方式下,连挂列车的运行速度较高,约为 35 km/h,可有效降低列车故障救援对正线的干扰;在推进的救援方式下,连挂列车的运行速度较低,约为 25 km/h。

3) 故障列车的存放位置。故障车的存放位置可分为两大类——车辆段或停车场,停车线或存车线,其中,停车线或存车线又分为尽头式和贯通式、单列位和双列位等类型。故障车回车辆段或停车场存放,更便于检修人员对故障车及时维修;若故障车存放在正线的停车线或存车线,则存在需二次救援的问题。

2.2 列车故障救援的方案

按不同的救援列车、救援方式和故障列车存放位置进行组合,即可得到不同的列车故障救援方案^[3]。

按采用后续列车和前行列车进行救援,各有 3 种通用的救援方案。本研究选择常用的后续列车方案,分析各救援方案的优缺点和列车故障救援组织过程。

2.2.1 后续列车正向推进方案

后续列车正向推进方案是使用最多的列车故障救援方案,其安全性高,对正线干扰不大,还能节省司机换端的作业时间。其主要缺点为推进运行的速度不高。后续列车正向推进方案的列车救援过程如图 2 所示^[4]。

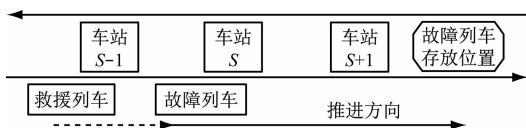


图 2 后续列车正向推进方案的列车救援过程

Fig. 2 Train rescue process in subsequent train forward push plan

2.2.2 后续列车逆向牵引方案

当故障列车的存放位置距故障发生位置较近时,为了减少连挂列车运行的距离,可以采用后续列车逆向牵引方案,组织逆向救援。后续列车逆向牵引方案的列车救援过程如图 3 所示。

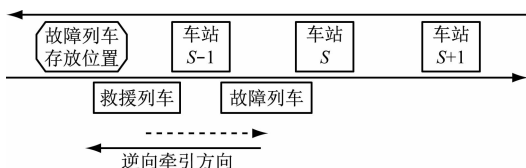


图 3 后续列车逆向牵引方案的列车救援过程

Fig. 3 Train rescue process in subsequent train reverse traction plan

2.2.3 后续列车对向组合方式救援方案

在某些情况下,后续救援列车可利用对向线路进行救援。后续救援列车连挂故障列车后正向推进或逆向牵引至最近的渡线,折返至对向线路,再运行至故障列车的存放位置^[5]。以后续列车先推进后牵引方案为例,列车救援过程如图 4 所示。

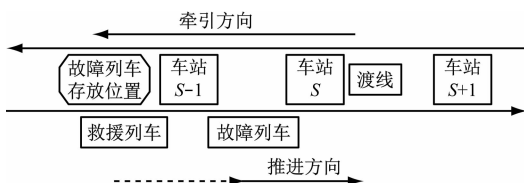


图 4 后续列车先推进后牵引方案的列车救援过程

Fig. 4 Train rescue process in the plan of subsequent train forward push followed by traction

3 列车故障救援方案的案例应用

在实际的运营组织中,选择救援路径,还要考虑故障点在全线路中的位置,以及线路的配线设置、车辆段位置、终端站存车线设置等多种因素。本研究以上海轨道交通 7 号线(以下简称“7 号线”)为例,对列车救援方案进行分析探讨。

7 号线全长 44.35 km,共设 33 座车站,2 个停车场及 3 条停车线。7 号线线路布置示意图如图 5 所示。

结合 7 号线的线路布置情况和运营时刻表,设计 7 号线列车在某处发生故障,并根据线路情况设计列车故障救援方案。

故障场景设计为:某日 08:00,某上行列车运行至大场镇站一行知路站区间中点处,司机发现列车突发紧急制动,且停车后无法缓解制动;经司机处理故障后,列车仍无法缓解制动;处理时间达救援时间上限后,行车调度人员组织对该车进行救援。

3.1 列车故障救援方案

按照正向救援原则,结合考虑 08:00 时各次列车在正线运行的位置,组织故障列车的后续列车作为救援列车,对故障列车实施救援。由于故障点距运行方向后方的可停车位置较远,无法组织后续列车逆向牵引救援。在故障列车与救援列车连挂后,可选择 4 种列车故障救援方案。

3.1.1 方案一

方案一:安排救援列车正向运行,由救援列车把故障列车推进至昌平路存车线停放^[6]。

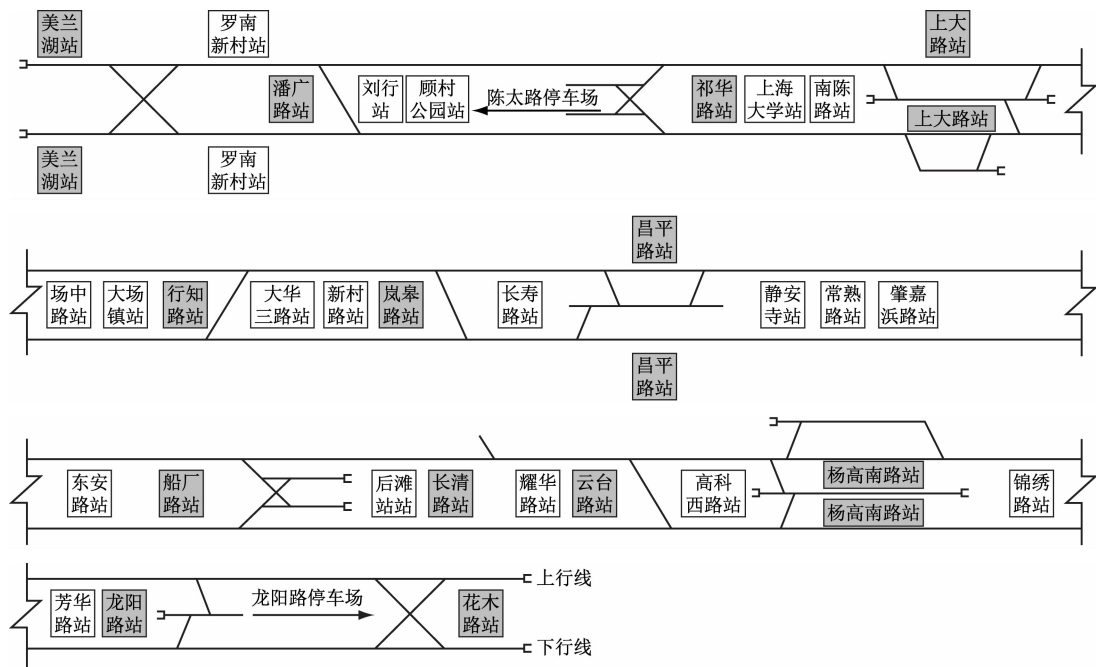


图5 7号线线路布置示意图

Fig. 5 Diagram of Line 7 track layout

方案一的救援行车组织示意图如图6所示。两车连挂后,救援列车后退,退行至上行正线。

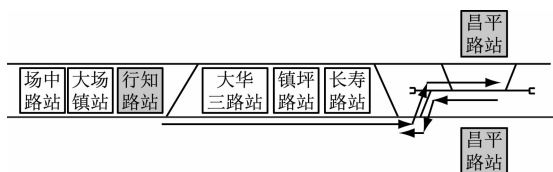


图6 方案一的救援行车组织示意图

Fig. 6 Diagram of rescue train organization in plan I

经分析,从列车发生故障到两车连挂所造成的影响时间 t_{w1} 为:

$$t_{w1} = t_a + t_b + t_l + t_c \quad (4)$$

后续列车正向推进故障列车运行至救援结束所造成的影响时间 t_{w2} 为:

$$t_{w2} = t_2 + t_d + t_3 + t_{e,4} \quad (5)$$

在连挂列车运行期间,在该方向上,后续列车可与连挂列车保持安全追踪间隔,跟进连挂列车运行。

3.1.2 方案二

方案二:安排救援列车正向运行,由救援列车把故障列车推进至龙阳路停车场停放。方案二的救援行车组织示意图如图7所示。

经分析,有:

$$t_{w1} = t_a + t_b + t_l + t_c \quad (6)$$

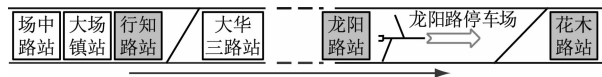


图7 方案二的救援行车组织示意图

Fig. 7 Diagram of rescue train organization in plan II

$$t_{w2} = t_2 + t_d + t_3 + t_{e,1} \quad (7)$$

在连挂列车运行期间,该方向上的后续列车可与连挂列车保持安全追踪间隔跟进连挂列车运行。

3.1.3 方案三

方案三:安排救援列车正向运行,利用行知路渡线折返至下行线,经祁华路下行线,返回陈太路停车场。方案三的救援行车组织示意图如图8所示。

经分析,有:

$$t_{w1} = t_a + t_b + t_l + t_c \quad (8)$$

后续列车正向推进故障列车运行直至折返至对向线路所造成的影响时间 t_{w3} 为:

$$t_{w3} = t_2 + t_d + t_4 + t_{zf} \quad (9)$$

在连挂列车运行期间,该方向上的后续列车可与连挂列车保持安全追踪间隔跟进连挂列车运行,当连挂列车离开该方向的线路后,该方向开始恢复正常行车。

折返至对向线路直至救援结束所造成的影响时间 t_{w4} 为:

$$t_{w4} = t_5 + t_{e,1} \quad (10)$$

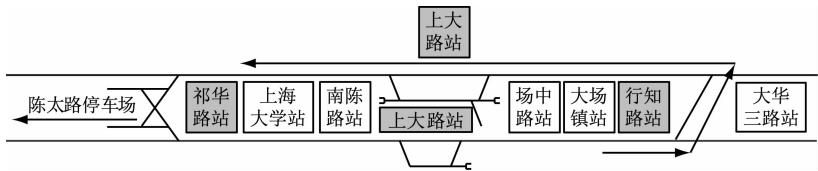


图 8 方案三的救援行车组织示意图

Fig. 8 Diagram of rescue train organization in plan III

3.1.4 方案四

方案四:组织救援列车顺向运行,利用行知路

渡线折返至下行线,牵引故障列车至上大路停车线。方案四的救援行车组织示意图如图 9 所示。

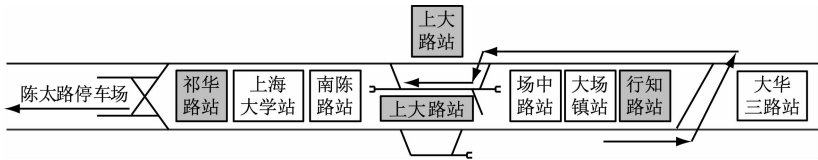


图 9 方案四的救援行车组织示意图

Fig. 9 Diagram of rescue train organization in plan IV

经分析,有:

$$t_{w1} = t_a + t_b + t_l + t_c \tag{11}$$

$$t_{w3} = t_2 + t_d + t_4 + t_{zf} \tag{12}$$

在连挂列车运行期间,该方向上的后续列车可与连挂列车保持安全追踪间隔跟进连挂列车运行,当连挂列车离开该方向的线路后,该方向开始恢复正常行车。

之后,有:

$$t_{w4} = t_5 + t_{e,2} \tag{13}$$

3.2 列车故障救援方案的比较和分析

经计算,不同列车故障救援方案的故障影响时间如表 1 所示。

表 1 不同列车故障救援方案的故障影响时间表

Tab. 1 Fault influencing time of different faulty train rescue plans

方案	故障点至存放点距离/m	t_{w1}/s	t_{w2}/s	t_{w3}/s	t_{w4}/s	t_w/s
一	7 158	218	1 574		1 792	
二	21 032	218	3 061		3 279	
三	9 147	218		602	960	1 780
四	5 632	218		602	706	1 526

由表 1 可以看出:由于故障列车距离龙阳路停车场的距离太远,方案二的 t_w 远远长于其他三种方案 t_w ,故在实际发生故障时不予考虑;方案一由于救援时推进速度不高,导致连挂运行时间偏长。将方案三和方案四相比:方案三故障位置与存放位置走行距离较长,方案四中救援列车仍需退回正线运

营,将对正线产生二次延误,延长了该方案的 t_w 。为了使 t_w 最小,在实际发生故障需要救援时应优先选择方案四——组织救援列车顺向运行,利用行知路站渡线折返至下行线,牵引故障列车至上大路站的停车线。

3.3 线路的方案

按不同故障场景类推,可以得到 7 号线的全线列车故障救援推荐方案,如表 2 所示。

由表 2 可见,列车故障位置的不同会导致列车故障救援方案选择结果不同。

综合分析表 2 可知:选择后续列车故障救援具有较大的优越性;逆向救援在实际应用中的局限性较大;故障位置与存放位置间的走行距离仍是决定存放位置选择的重要因素。

7 号线全线列车故障救援推荐方案的实践应用效果表明:①当 7 号线正线发生列车故障时,该方案能帮助地铁行车调度员直观选择合适的救援线路和救援组织方案,为行车调度人员的应急处置决策提供支持,提升应急能力水平;② 该方案提高了故障处置效率,使行车调度人员和列车司机等能根据列车故障位置,及时明确判断如何进行应急行车组织;③该方案针对复杂的行车环境,预先明确提出了具体的处理方法,规范了处理流程,有效避免了二次延误,提高了行车安全水平,优化了服务质量。

4 结语

基于城市轨道交通运营经验,分析了列车故障的组织救援过程,总结了列车故障救援方案,并分

表 2 7 号线的全线列车故障救援推荐方案

Tab.2 Recommended plan for whole line faulty train rescue on Line 7

列车运行方向	列车发生故障的区间	列车故障救援推荐方案内容
上行	美兰湖站—顾村公园站	后续列车与故障车连挂后推进经美兰湖折返线折返至下行线,牵引回陈太路停车场
	顾村公园站—陈太路停车场	由陈太路停车场出备用车牵引故障车回陈太路停车场
	陈太路停车场—上大路停车线	后续列车与故障车连挂后推进至陈太路停车场
	上大路停车线—昌平路站	后续列车与故障车连挂后推进至上大路停车线
	昌平路站—船厂路站	后续列车与故障车连挂后推进至昌平路停车线
	船厂路站—云台路站	后续列车与故障车连挂后推进至船厂路停车线
	云台路站—杨高南路停车线	后续列车与故障车连挂后牵引回杨高南路停车线
	杨高南路停车线—芳华路站	后续列车与故障车连挂后先推进后牵引至杨高南路停车线
	芳华路站—花木路站	由龙阳路停车场出备用车牵引故障车回龙阳路停车场
	花木路站—龙阳路停车场	由龙阳路停车场出备用车牵引故障车回龙阳路停车场
	龙阳路停车场—杨高南路停车线	后续列车与故障车连挂后推进至龙阳路停车场
	杨高南路停车线—长清路站	后续列车与故障车连挂后推进至杨高南路停车线
	长清路站—船厂路站	后续列车与故障车连挂后牵引回船厂路停车线
	船厂路站—昌平路停车线	后续列车与故障车连挂后推进至船厂路停车线
	昌平路停车线—行知路站	后续列车与故障车连挂后推进至昌平路停车线
下行	行知路站—上大路停车线	后续列车与故障车连挂后经行知路渡线折返至下行线,牵引回上大路停车线
	上大路停车线—上海大学站	后续列车与故障车连挂后推进至上大路停车线
	上海大学站—陈太路停车场	后续列车与故障车连挂后牵引至陈太路停车场
	陈太路停车场—罗南新村站	后续列车与故障车连挂后推进至陈太路停车场
	罗南新村站—美兰湖站	前行列车与故障车连挂后牵引至陈太路停车场

析了各方案的优缺点及适用情况。根据列车故障救援方案的基本原则和方法,设计了 7 号线案例区段列车发生故障的典型场景,并分析比选了典型场景下的列车故障救援方案,最终得到 7 号线全线的列车故障救援推荐方案。本文研究成果可供行车调度员在列车故障救援组织工作中参考应用。

参考文献

[1] 李宇辉. 城轨列车故障救援组织与优化[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(9): 31.
LI Yuhui. Organization and optimization of urban rail train fault rescue[J]. Railway Transport and Economy, 2011, 33(9): 31.

[2] 王晶. 基于列车运行调整策略优化的城市轨道交通列车故障救援方案选择方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
WANG Jing. Selection method of train fault rescue schemes for urban rail transit based on train operation adjustment strategy optimization[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

[3] 韩乾. 西安地铁一号线列车故障救援行车组织方案研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
HAN Qian. Study on the traffic organization of failure train of Xi'an Metro Line 1[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

[4] 张红萍. 城市轨道交通列车故障救援组织优化研究[J]. 时代汽车, 2021(3): 184.
ZHANG Hongping. Research on optimization of train failure rescue organization for urban rail transit[J]. Auto Time, 2021(3): 184.

[5] 陈颖斌, 潘寒川, 刘志钢, 等. 城市轨道交通列车救援组织优化探讨[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(9): 105.
CHEN Yingbin, PAN Hanchuan, LIU Zhigang, et al. A tentative study on optimization of train rescue organization in urban rail transit[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(9): 105.

[6] 张增勇, 毛保华, 杜鹏, 等. 我国城市轨道交通故障车停车线布局设置的模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 79.
ZHANG Zengyong, MAO Baohua, DU Peng, et al. Modeling the distribution setting of parking tracks for disabled trains in urban rail transit system of China[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 79.

• 收稿日期:2023-03-16 修回日期:2023-05-05 出版日期:2024-01-10
Received:2023-03-16 Revised:2023-05-05 Published:2024-01-10
通信作者:刘铭,工程师,liuming1a2b3c@163.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