

# 多编组模式下城市轨道交通列车救援 组织方案优化研究\*

赵丹丹<sup>1</sup> 柏 赟<sup>1</sup> 曹耘文<sup>2</sup> 朱巧珍<sup>1</sup> 庄黄蕊<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 100044, 北京;

2. 上海轨道交通运营管理中心, 200070, 上海//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 采用多编组模式行车方案的线路, 因线路上有不同编组的列车混行, 列车发生故障后的救援处置不能完全沿用单编组模式下的处置原则及具体流程。研究了单编组模式和多编组模式下列车救援组织的差异, 分析了多编组模式对列车救援方案编制的影响。以总救援时间和线路运能损失的最小化为目标, 建立了多编组模式下列车救援方案的编制模型。以上海轨道交通 16 号线为案例, 对多编组模式下的列车救援组织方案进行分析, 总结了适用于多编组模式下列车故障救援组织的一般原则。

**关键词** 城市轨道交通; 列车救援; 多编组模式

**中图分类号** U298.6; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.03.009

## Optimization of Urban Rail Transit Train Rescue Organization Scheme under Multi-formation Mode

ZHAO Dandan, BAI Yun, CAO Yunwen, ZHU Qiaozhen, ZHUANG Huangrui

**Abstract** For lines adopting multi-formation mode, since there are mixed trains of different formations running on the line, the rescue treatment after failure occurrence cannot completely follow the disposal principles and specific procedures of single formation mode. The difference of train rescue organization between single formation mode and multi-formation mode is studied, and the influence of multi-formation mode on the formulation of train rescue plan is analyzed. With the goal of minimizing the total rescue time and transport capacity loss, a model for train rescue plan formulation under multi-formation mode is established. Taking Shanghai Rail Transit Line 16 as study case, the train rescue organization scheme under multi-formation mode is analyzed, and the general principles applicable to rescue organization of failure train under multi-formation mode are summarized.

**Key words** urban rail transit; train rescue; multi-formation mode

**First-author's address** Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

城市轨道交通列车发生无法动车的故障时, 需要制定合理的列车救援组织方案, 以及时恢复运营。列车救援组织方案一般包括确定救援列车、故障列车存放地点和救援路径等方面。目前业内对列车救援的研究大多是针对单编组模式(即开行方案中不存在大小编组列车混行)的线路, 其救援列车的选择原则较为简单, 一般会选择故障列车后方的第 1 列车作为救援列车。单编组模式下列车救援的主要研究方向分为 2 个方面: 救援组织流程的优化<sup>[1]</sup>, 以及救援组织方案中对救援路径<sup>[2-3]</sup>和故障列车存放地点<sup>[4]</sup>的研究。

多编组模式是指为缓解客流的不均衡性, 在线路开行不同编组列车的行车方案, 一般选取大、小两种编组的列车分别用于不同的客流时段。因此, 在部分运营时段会出现大编组列车和小编组列车在线路上混行的情况。此时若发生列车故障, 采用小编组列车救援大编组列车, 可能会出现动力不足; 采用大编组列车救援小编组列车, 会浪费较多的运能。因此, 多编组模式下的列车救援较单编组模式下更为复杂。

目前关于多编组模式下列车救援的研究较少, 文献[5]定性分析了多编组模式下典型故障情形时的救援方案, 但缺乏定量计算, 无法根据实际情形选出最优救援方案, 导致总救援时间较长或运能浪

\* 国家自然科学基金项目(71971016)

费较多。因此,对多编组模式下列车故障救援进行研究是十分必要的。本文针对多编组模式行车方案的特点,建立了多编组模式下城市轨道交通列车故障救援方案的编制模型,对列车在车站发生故障后所制定的列车救援方案进行优化研究,以尽可能缩短列车救援时间,减少运能损失。

### 1 多编组模式下列车故障救援简述

列车发生故障需要救援时,应首先确定救援列车。在与故障列车的相对位置角度,一般会选择故障列车相邻的后方列车作为救援列车,相邻前方列车、对向列车或备用车也可以作为救援列车<sup>[3]</sup>。在线路有侧线的情况下,还可以采用非相邻列车越行救援的方案。

区别于单编组模式,多编组模式下在选择救援列车时还要考虑列车的编组情况。不同编组的列车间进行救援时,若故障列车为大编组列车,为保证救援列车能够提供充足的动力,可采取将相邻前方列车的两列车连挂或相邻后方2列车连挂的救援列车方案;或采取将故障列车解编,再分别采用相邻前、后2列小编组列车救援的方案<sup>[5]</sup>。

确定救援列车后,将救援列车与故障列车连挂,并沿救援路径运行至故障列车存放地点,故障列车退出正线运行区域。故障列车的存放地点要根据故障所在位置进行选择,可分为车辆段/停车场存放模式、辅助线存放模式两种<sup>[4]</sup>。故障列车退出正线时的救援路径一般选择正向运行至存放地点,但在对向客流较少时也可选择通过渡线折返至对向,再运行至存放地点。

### 2 多编组模式下列车救援方案的编制模型

本文考虑多编组模式下救援列车的动力约束、线路条件约束和列车运行速度约束,以总救援时间及运能损失的最小化为目标,建立多编组模式下列车救援方案的编制模型,以确定救援列车、故障列车的存放地点和救援路径。

#### 2.1 多编组模式下列车救援的目标函数

考虑到列车故障救援时,故障列车退出正线前会造成运营堵塞,且救援列车需清客并在一定时间内无法再次上线运行,线路会损失救援列车的运能。因此,本文以缩短总救援时间和减少运能损失为目标,建立目标函数 $f$ :

$$\min f = \alpha \left[ \sum_{i=1}^m X_i t_{i,救援} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q Y_j Z_k (t_{jk,本退} + \gamma t_{jk,对退}) \right] + \beta C_i \quad (1)$$

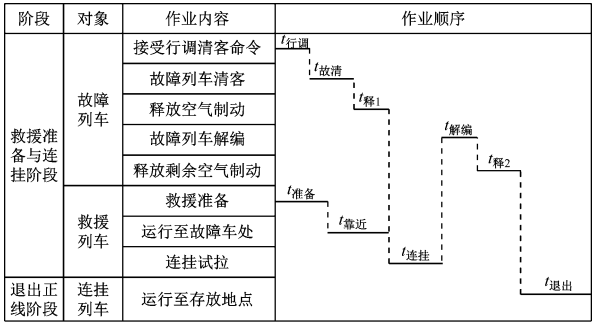
式中:

- $\alpha$ ——总救援时间的权重系数;
- $X_i$ ——第 $i$ 种列车救援方案是否被选择;
- $t_{i,救援}$ ——第 $i$ 种列车救援方案的救援准备与连挂阶段时间;
- $Y_j$ ——存放地点 $j$ 是否被选择;
- $Z_k$ ——救援路径 $k$ 是否被选择;
- $t_{jk,本退}$ ——故障列车存放位置为 $j$ 且退出正线路径为 $k$ 时,连挂列车退出正线过程中在本向线路上运行所需的时间;
- $t_{jk,对退}$ ——故障列车存放位置为 $j$ 且退出正线路径为 $k$ 时,连挂列车退出正线过程中在对向线路上运行所需的时间;
- $\gamma$ ——故障时段对向小时断面客流与本向小时断面客流之比;
- $\beta$ ——运能损失的权重系数;
- $C_i$ ——第 $i$ 种救援列车方案损失的运能;
- $m, n, q$ ——自然数序列。

其中: $X_i, Y_j, Z_k$ 均为0-1变量,被选择均取1,不被选择均取0。

##### 2.1.1 总救援时间的计算

列车在车站发生故障后,救援流程一般如图1



注: $t_{行调}$ ——行调发布故障列车清客命令到清客列车接受清客命令的时间; $t_{故障}$ ——故障列车清客的时间; $t_{释1}$ ——故障列车释放空气制动的的时间; $t_{准备}$ ——救援列车进行救援准备的时间,包括清客时间和可能的救援列车连挂时间; $t_{靠近}$ ——救援列车运行靠近故障列车的时间; $t_{连挂}$ ——列车连挂试拉的时间; $t_{解编}$ ——当故障列车为大编组列车且选择解编救援方案时,故障列车解编作业的时间; $t_{释2}$ ——故障列车释放剩余空气制动的的时间; $t_{退出}$ ——列车运行至存放地点退出正线的时间。

图1 列车故障救援处置流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of train failure rescue disposal process

所示。列车故障救援可以划分为救援准备与连挂阶段  $t_{救援}$  和退出正线阶段  $t_{退出}$ 。

### 2.1.1.1 救援准备与连挂

根据图 1, 列车在救援准备与连挂阶段的时间计算如下:

$$t_{i,救援} = \max(t_{行调} + t_{故清} + t_{释1}, t_{i,准备} + t_{i,靠近}) + t_{连挂} + t_{解编} + t_{释2} \quad (2)$$

式中:

$t_{i,救援}$ ——第  $i$  种救援方案所需的救援准备与连挂作业时间;

$t_{i,准备}$ ——第  $i$  种救援方案所需的救援准备时间;

$t_{i,靠近}$ ——第  $i$  种救援方案所需的靠近故障列车的时间。

式(2)中,  $t_{i,准备}$  与救援列车选择方案有关; 救援列车与故障列车的距离决定  $t_{i,靠近}$ 。其余作业时间可根据线路应急处置的标准作业时间计算。

救援列车靠近故障列车之前要先做救援准备。是否需要司机换端、重新安排进路及调用备用等准备作业, 均与救援列车、故障列车间的相对位置有关, 将这 3 项救援准备作业所耗费时间记为  $t_{准备1}$ , 第  $i$  种救援方案所需的  $t_{准备1}$  记为  $t_{i,准备1}$ 。若选择 2 列小编组列车连挂后作为救援列车, 在对故障列车进行救援前, 需要 1 列救援列车先靠近另 1 列救援列车, 再将这 2 列小编组救援列车间进行 1 次连挂作业。设采用第  $i$  种救援方案所需的 2 列救援列车连挂作业靠近的时间为  $t_{i,救靠}$ , 则因救援列车之间连挂而产生的救援列车准备时间  $t_{i,准备2}$  为:

$$t_{i,准备2} = \max(t_{释1}, t_{i,救靠}) + t_{连挂} + t_{释2} \quad (3)$$

由此, 第  $i$  种救援列车方案下  $t_{i,准备}$  的计算式为:

$$t_{i,准备} = t_{i,准备1} + t_{i,准备2} \quad (4)$$

此外, 救援列车在退出正线前要进行清客, 一般情况下救援列车的清客会在故障列车进行排故时同步完成。当选择故障列车的后方列车作为救援列车时, 若救援列车与故障列车之间没有车站, 则救援列车的清客作业需在故障列车所在车站的站台或故障列车前方第 1 个车站的站台完成, 即在计算  $t_{i,准备}$  时需额外加上救援列车清客时间  $t_{i,援清}$ 。当选择故障列车前后 2 列小编组列车去救援故障的大编组列车时, 在 2 列小编组列车分别与故障列车连挂后, 需进行故障列车的解编作业, 即需在总救援时间上加上解编延误  $t_{i,解编}$ 。不选择解编救援方案时, 其解编延误为 0。

### 2.1.1.2 组织故障列车退出正线

救援列车与故障列车连挂后, 要推进/牵引故障列车沿着选定的路径运行至存车点后再退出正线, 该阶段所需的时间为:

$$t_{jk,本退} = l_{jk,本}/v_{本退} + t_{起停} \quad (5)$$

$$t_{jk,对退} = l_{jk,对}/v_{对退} \quad (6)$$

式中:

$l_{jk,本}$ ——选择存放地点  $j$  和救援路径  $k$  退出正线时, 列车在本向线路上行驶的距离;

$l_{jk,对}$ ——选择存放地点  $j$  和救援路径  $k$  退出正线时, 列车在对向线路上行驶的距离;

$t_{起停}$ ——列车的起停附加时分;

$v_{本退}$ ——连挂列车在救援路径的本向线路上运行的平均速度;

$v_{对退}$ ——连挂列车在救援路径的对向线路上运行的平均速度。

### 2.1.2 线路运能损失

多编组模式下的列车救援, 其救援列车可选用大编组列车或小编组列车。选用不同编组列车作为救援列车, 所损失的列车载客能力不同。在式(1)的基础上, 用救援列车的载客能力  $C_i$  来表示线路运能损失, 其计算式为:

$$C_i = P_i \omega \quad (7)$$

式中:

$P_i$ ——第  $i$  种方案救援列车的编组节数;

$\omega$ ——车辆定员。

### 2.2 多编组模式下列车救援的约束条件

#### 2.2.1 救援列车的选择约束

在选择救援列车时要考虑动力约束, 即单一小编组列车不能救援大编组列车。只有当故障列车后方的 2 列车都为小编组列车时, 才能选择 2 列小编组列车连挂救援的方案。只有当故障列车前方和后方的第 1 列车均为小编组列车时, 才能选择解编救援方案。

#### 2.2.2 速度约束

为保证安全, 在救援列车靠近故障列车及连挂列车退出正线时, 列车的运行速度均不能超过救援列车靠近故障列车的最大限速及连挂列车退出正线的最大限速, 即:

$$V_{靠近} \leq V_{靠近max} \quad (8)$$

$$V_{退出} \leq V_{退出max} \quad (9)$$

#### 2.2.3 逻辑约束

救援列车方案、故障列车的存放地点和退出正

线时的救援路径都只能选择1种,即:

$$\sum_{i=1}^m X_i \sum_{j=1}^n Y_j \sum_{k=1}^q Z_k = 1 \tag{10}$$

3 多编组模式下列车救援案例分析

上海轨道交通16号线(以下简称“16号线”)于2021年11月12日起试行在线解编、连挂的运营方式。本文以该线为研究对象,当列车发生故障

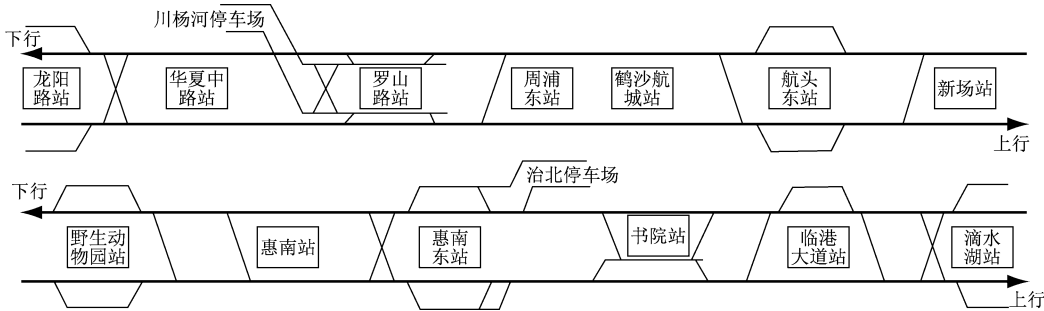


图2 上海轨道交通16号线线路示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of Shanghai Rail Transit Line 16

16号线采用多编组模式,部分运营时段3节编组列车和6节编组列车在线路上混行。当6节编组列车发生故障时,单列3节编组列车不能提供足够动力,无法完成救援。16号线列车采用全自动车钩,如果采用连挂救援方案,连挂所需时间较短。16号线的6节编组列车为2列3节编组列车由全自动车钩连挂而成,因此,解编救援方案是可供选择的方案之一。

依据上海轨道交通作业时分标准,故障救援流程中各项作业时间取值分别为: $t_{\text{援清}}=2.0\text{ min}$ ;  $t_{\text{行调}}=0.5\text{ min}$ ;  $t_{\text{故清}}=2.0\text{ min}$ ;  $t_{\text{释1}}=4.0\text{ min}$ ;  $t_{\text{连挂}}=1.5\text{ min}$ ;  $t_{\text{释2}}=1.5\text{ min}$ ;  $t_{\text{解编}}=1.0\text{ min}$ 。

3.1 大编组列车故障的救援

当6节编组列车在周浦东站下行站台发生故障且线路的上、下行客流均衡时,选择本向后方第1列6节编组列车作为救援列车,其救援准备与连挂阶段时间最短(14 min)。这主要是因为后方列车在接到救援命令后可直接前往故障列车处进行救援,作业流程较少。

如线路的上、下行客流不均衡,当客流较大的方向发生列车故障时,为保障本向运能,可考虑对向列车救援。若没有固定6节编组列车作为救援列车,可以采用故障列车解编救援或2列小编组列车连挂作为救援列车的方案。本案例中,16号线的6节编组列车为2列3节编组列车由全自动车钩连挂

后,可采用本文所述方法快速制定故障救援组织方案,以尽可能缩短列车总救援时间,减少运能损失。

16号线的具体配线设计如图2所示,全线设有13座车站和2个停车场,在龙阳路站、航头东站、野生动物园站、书院站和滴水湖站设有存车线,以存放故障列车。此外,该线在罗山路站、航头东站、野生动物园站和惠南东站设置了越行线,具备了非相邻列车越行救援的条件。

而成,因此解编作业时间较短。其它采用多编组模式的线路如果不具备此车辆解编条件,可能会出现因解编作业耗时较长导致救援处置时间随之增大的情况。

3.2 小编组列车故障的救援

当小编组列车发生故障时,大、小编组列车都可以作为救援列车。选择不同救援列车,总救援时间和运能损失将有所不同。如图3所示,本文以3节小编组列车在下行鹤沙航城站发生故障需要救援为例,着重对不同编组列车的救援结果进行分析。故障发生后,行车调度扣停了故障车后方第1列车(T2,6节编组),后方第2列车(T1,3节编组)依然正常向前运行。该故障情形下有方案一(T2为救援列车)和方案二(T1越行救援)两种救援方案。根据式(1),这两种救援方案的目标函数值如表1所示。

在不考虑运能损失时,方案一的列车救援时间较短,为较优方案。若考虑运能损失,当 $\omega\beta/\alpha=1$ 时,目标函数值相等;当 $\omega\beta/\alpha<1$ 时,方案一更优; $\omega\beta/\alpha>1$ 时,方案二更优。由此,当3节编组列车发生故障时,若后方第1列车为6节编组列车时,虽然采用后方第1列车救援时间较短,但是运能损失较大。若其他位置有3节编组列车可作救援列车且救援时间相差不大时,可对方案进行比选,选出最优方案。

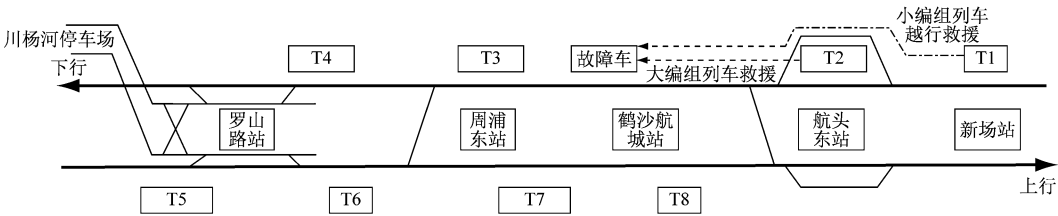


图 3 多编组模式下小编组列车故障的救援方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rescue plan for small formation train failure under multi-formation mode

表 1 多编组模式下小编组列车故障救援的目标函数值  
Tab. 1 Objective function value of rescue for small formation train failure under multi-formation mode

方案	$t_{救援}/min$	$P/节$	$C/人$	$f$
方案一	12	6	$6\omega$	$\alpha(12 + t_{退出}) + 6\omega\beta$
方案二	15	3	$3\omega$	$\alpha(15 + t_{退出}) + 3\omega\beta$

注： $P$  表示编组数； $C$  表示损失的列车运能。

4 结语

本文在总结列车常规故障救援的思路、原则及组织流程的基础上,着重分析了多编组模式对列车救援的影响,建立了编制模型,用以求解线路上任意车站列车发生故障后的最优救援组织方案,并以上海轨道交通 16 号线为例,编制了多编组模式下的列车救援组织方案,总结了不同救援方案的适用场景。

一般情况下,以故障列车后方第 1 列车作为救援列车所耗费的总救援时间最短。同编组列车之间进行救援操作较为简单,且不会造成过多运能损失。大编组列车发生故障时,可采取解编救援方式或 2 列小编组列车连挂后作为救援列车。小编组列车发生故障时,可适当牺牲救援时间来降低运能损失。本文仅对故障救援阶段进行了研究,在后续的运行调整阶段可以通过加开备用车的方式对运能进行补充。因此,在后续工作中,可以对多编组模

式下因列车救援进行的线路运行调整展开进一步的研究。

参考文献

[1] 马波. 城市轨道交通列车故障救援组织优化研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2016(4): 76.  
MA Bo. Optimization of urban rail transit train fault rescue organization[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2016(4): 76.  
[2] 宋焱. 城市轨道交通列车故障救援方案探讨与应用[J]. 都市快轨交通, 2013(3): 77.  
SONG Lang. Discussion and application of rescue plan for fault trains on rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013(3): 77.  
[3] 刘纪俭, 凌松涛. 地铁列车救援路径的选择[J]. 城市轨道交通研究, 2014(12): 80.  
LIU Jijian, LING Songtao. On route selection for subway train rescue[J]. Urban Mass Transit, 2014(12): 80.  
[4] 杜鹏, 张增勇, 毛保华. 城际轨道交通列车故障救援模式的探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2011(3): 75.  
DU Peng, ZHANG Zengyong, MAO Baohua. Discussion on rescue mode of disabled train in inter-city railway[J]. Urban Mass Transit, 2011(3): 75.  
[5] 钱佳旻. 上海轨道交通 16 号线重联列车救援方案分析探讨[J]. 隧道与轨道交通, 2018(1): 42.  
QIAN Jiamin. Analysis and discussion on rescue plan for coupled train of Shanghai Rail Transit Line 16 [J]. Tunnels and Rail Transit, 2018(1): 42.

(收稿日期: 2020-04-17)

RCEP 满月, 广西货物春运“开门红”

区域全面经济伙伴关系协定(RCEP)生效以来,中国铁路南宁局集团有限公司每天都能组织开行 3 列左右国际货运班列。南宁国际铁路港是中国—东盟铁路物流的重要枢纽。春运以来,南宁国际铁路港到达和发送的货物总量相比往年都有大幅增长。今年春运期间恰逢 RCEP“满月”,给中越班列等跨境班列货物运输带来较大幅度的增长,也进一步丰富了货物运输的品类。“下船即上车,下车即上船”——在北部湾港,各式各样的货物搭乘海铁联运班列经西部陆海新通道南来北往、出山入海。作为将中国西部与东盟国家紧密相连的“黄金通道”,西部陆海新通道为北部湾港吞吐量持续快速增长强势赋能。数据显示,2022 年 1 月北部湾港货物吞吐量为 2 367.54 万 t,同比增长 7.65%,其中集装箱吞吐量完成 48.53 万标准箱,同比增长 3.65%。  
(摘自 2022 年 2 月 25 日《新华每日电讯》,记者向志强、覃星星、陈一帆、赵欢报道)