

## 城市轨道交通停车线设置对故障救援影响的定量分析\*

彭磊<sup>1</sup> 王晓潮<sup>1</sup> 刘致远<sup>2\*\*</sup> 杨子涵<sup>3</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 天津市英贝特航天科技有限公司, 300141, 天津;

3. 北京交通大学交通运输部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//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 停车线作为城市轨道交通列车故障后停放故障列车的配线,其设置情况对城市轨道交通列车故障救援方案的选择及救援延误等有着重要影响。采用定量分析法,将地铁列车故障救援方案归纳为5种类型,并构建对应的计算模型。将地铁列车线路划分为若干区段,通过统计各区段最优救援方案延误时间的方法对停车线设置方案给故障救援造成的影响进行定量分析。以福州至长乐机场轨道交通线路为例,进行了验证测试,并在此基础上对原停车线设置方案进行了优化,从而降低救援延误。试验结果表明,提出的定量分析方法可有效地反映地铁列车停车线的设置对地铁列车故障救援效果的影响,更可辅助优化地铁列车停车线的设置。

**关键词** 城市轨道交通; 停车线; 故障列车救援; 定量分析; 救援延误

**中图分类号** U212.3

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2022.09.024

## Quantitative Analysis of the Impact of Urban Rail Transit Parking Line Setting on Failure Rescue

PENG Lei, WANG Xiaochao, LIU Zhiyuan, YANG Zihan

**Abstract** Parking line is used as the auxiliary line for parking the urban rail transit faulty train after a train failure, and its setting has an important impact on the selection of failure rescue schemes and rescue delays. With quantitative analysis, the metro train failure rescue schemes are summarized into 5 types, and corresponding calculation models are constructed. Metro train lines are divided into several sections. The impact of parking line setting plan on failure rescue is quantitatively analyzed by statistically counting the optimal rescue scheme delay time of each section. Taking the Fuzhou-Changle Airport rail transit line as an example, the quantitative analysis method is tested, and the original parking line plan is optimized on this basis, thus rescue delay is reduced. Test

results prove that the proposed quantitative analysis method can effectively reflect the impact of parking line setting on the effect of metro train failure rescue and can assist the optimization of metro train parking line setting.

**Key words** urban rail transit; parking line; faulty train rescue; quantitative analysis; rescue delay

**First-author's address** Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

随着城市轨道交通的发展,城市轨道交通列车的准时性和安全性成为乘客和运营商共同关注的问题。然而,列车故障时有发生。该如何选择快速、高效、安全的故障救援方案,使故障列车尽快退出运营正线,使故障影响最小化,是众多研究关注的热点课题。

既有研究的关注点大多集中在停车线设置方案,即在工程投资与故障救援影响两者之间进行权衡,并根据工程案例对不同停车线配置方案进行对比分析<sup>[1-4]</sup>、建立布局模型<sup>[5]</sup>等。综上,既有研究多采用定性分析的方法,且缺乏对全线路各个位置发生故障可能性的全面考量。

本文针对以往研究中缺乏对停车线设置方案定量分析的情况,拟通过总结列车故障救援方案种类、构建列车故障救援模型和全线救援延误计算模型的方法,进行城市轨道交通列车停车线设置方案对故障救援影响的定量分析,并将本文提出的定量分析方法在工程案例中进行测试验证。

## 1 城市轨道交通列车故障救援方案分析

通过对国内外救援案例的总结进行分析<sup>[6-8]</sup>,发现城市轨道交通列车(以下简为“城轨列车”)故障救援方案有3个核心要素:救援列车、救援方向和故障列车存放地点。这3个要素的不同组合形成了

\* 国家自然科学基金项目(71621001)

\*\* 通信作者

不同的城轨列车故障救援方案。

在救援列车的选择上共有后序列车、前序列车和对向列车 3 种方式可以考虑。运营中的城轨列车发生故障后,一般会后将后序列车在后方车站扣停,在进行救援时由后序列车进行清客救援最节省时间。因此,国内城轨列车在现场多选用后序列车作为救援列车。然而,采用前序列车或对向列车进行正向救援时为牵引连挂方式,相较于后序列车推送故障列车救援,救援速度更快,在长距离救援情况下更具有优势。

在救援方向的选择上,现场多以正向救援为主,在城轨列车发生故障后距离后方停车线较近,或刚出两端折返站时会考虑反向救援。然而,反向救援时会与后序列车产生冲突,救援距离有限。在此基础上,额外考虑对向救援,其救援方向与反向救援一致,但将故障列车通过渡线转移到对向线路,虽然增加了对对向线路的影响,但大大延长了反向救援距离。需要说明的是当前序列车或对向列车作为救援列车时仅考虑正向救援。这是由于对于前序列车或对向列车只有进行正向救援,用牵引代替推送才能降低延误,进行反向或对向救援反而会会增加延误<sup>[9]</sup>。

对于故障列车存放地点的选择,本文只考虑城轨列车停车线及车辆段。其中,对于停车线,按照其类型和与线路相对位置将其划分为:贯通式单列位停车线、贯通式双列位停车线、尽头式单列位停车线和尽头式双列位停车线。

基于上述分析,本文对多种救援方案按照救援路径的不同进行了精简分类,将城轨列车故障救援方案归纳为 5 种类型:后序列车正向救援,后序列车反向救援,后续列车对向救援,前序列车正向救援及对向列车正向救援;并与不同的故障列车存放点组合形成多种不同的列车故障救援方案,如图 1 所示。其中后序列车对向救援和对向列车正向救援会影响对向线路运营,对运营组织的要求较高,实际运营中可以按实际需要进行选择。

## 2 停车线对故障列车救援影响定量分析

### 2.1 城市轨道交通列车故障救援模型

为进行定量分析,需要构建每种救援方案的救援模型,计算延误时间。延误时间分为一次延误和二次延误 2 个部分。延误计算用到的参数如表 1 所示。

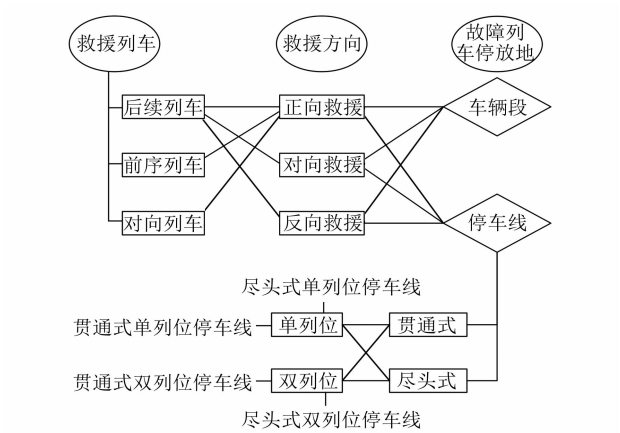


图 1 不同的故障列车存放地点组合形成多种不同的列车故障救援方案

Fig. 1 Multiple train failure rescue schemes formed from combination of different faulty trains and parking spots

表 1 延误时间计算参数表  
Tab. 1 Delay time calculation parameters

参数	含义
$l_{\text{故后}}$	故障列车离后方站的距离
$l_{\text{故前}}$	故障列车离前方站的距离
$l_{\text{清停}}$	清客站距离停放地点的距离
$l_{\text{清渡}}$	清客站到渡线的距离
$l_{\text{前清故}}$	前序列车清客站到故障列车的距离
$l_{\text{故停}}$	故障列车离停放地点的距离
$l_{\text{故渡}}$	故障列车离渡线的距离
$l_{\text{渡停}}$	渡线到停放地点的距离
$v_{\text{推送}}$	连挂后救援列车推送的旅行速度
$v_{\text{牵引}}$	连挂后救援列车推进的牵引速度
$v_{\text{旅行}}$	正常情况下的旅行速度
$v_{\text{接近}}$	救援列车接近故障列车的旅行速度
$h_1$	正常情况下的列车追踪间隔
$h_2$	后序列车与救援列车之间的追踪间隔
$T_{1,l}$	救援方案路径选择类型 $l$ 的一次延误时间
$T_{2,k}$	由停放地点类型 $k$ 确定的二次延误时间
$t_{\text{判断}}$	发生事故时司机的自查判断时间
$t_{\text{连挂}}$	救援列车和故障列车的连挂时间
$t_{\text{清客}}$	列车在车站的清客时间

分别对后序列车正向救援、后序列车反向救援、后续列车对向救援、前序列车正向救援以及对向列车正向救援的流程进行分析,得到 5 种救援方案的一次延误计算公式。

1) 后序列车正向救援方案:

$$T_{1,1,1} = t_{\text{判断}} + t_{\text{清客}} + l_{\text{故后}} / v_{\text{接近}} + t_{\text{连挂}} + l_{\text{故停}} / v_{\text{推送}} + t_{\text{清客}} - l_{\text{故停}} / v_{\text{旅行}} - h_1 + h_2 \quad (1)$$

2) 后序列车反向救援方案:

$$T_{1,1,2} = t_{\text{判断}} + t_{\text{清客}} + l_{\text{故后}} / v_{\text{接近}} +$$

$$t_{\text{连挂}} + l_{\text{故障}}/v_{\text{牵引}} + t_{\text{清客}} \quad (2)$$

3) 后序列车对向救援方案:

$$T_{1,1_3} = t_{\text{判断}} + t_{\text{清客}} + l_{\text{故障}}/v_{\text{接近}} + t_{\text{连挂}} + l_{\text{故障}}/v_{\text{载客推送}} + t_{\text{清客}} + (l_{\text{清渡}} + l_{\text{渡停}})/v_{\text{空车牵引}} - (l_{\text{故障}} + l_{\text{清渡}} + l_{\text{渡停}})/v_{\text{空车牵引}} - \frac{3}{2}h_1 + 2h_2 \quad (3)$$

4) 前序列车正向救援方案:

$$T_{1,1_4} = t_{\text{判断}} + t_{\text{清客}} + l_{\text{前清故}}/v_{\text{接近}} + t_{\text{连挂}} + l_{\text{故障}}/v_{\text{推送}} + t_{\text{清客}} - l_{\text{故障}}/v_{\text{旅行}} - h_1 + h_2 \quad (4)$$

5) 对向列车正向救援方案:

$$T_{1,1_5} = t_{\text{判断}} + l_{\text{清渡}}/v_{\text{旅行}} + l_{\text{故障}}/v_{\text{接近}} + t_{\text{连挂}} + l_{\text{故障}}/v_{\text{牵引}} + 2t_{\text{清客}} - l_{\text{故障}}/v_{\text{旅行}} - h_1/2 + h_2 \quad (5)$$

对于双列位停车线和车辆段,可以同时容纳救援列车和故障列车停放,不存在二次延误。因此这 3 种类型的停放点二次延误均为 0,如式(6)所示。

$$T_{2,k} = 0, k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

通过对推送救援和牵引救援的流程分析得到单列位停车线的二次延误计算公式为:

当救援列车推送故障列车进入时,

$$T_{2,4} = t_{\text{摘钩换端}} + t_{\text{返回}} + t_{\text{换端}} \quad (7)$$

当救援列车牵引故障列车进入时,

$$T_{2,4} = t_{\text{摘钩}} + t_{\text{进入}} \quad (8)$$

但是对于尽头式单列位停车线禁止救援列车牵引故障列车进入,因为救援列车无法回到正线。

至此,对于任意一个救援方案  $j$ ,设其救援方案路径选择类型为  $l_j$ ,停放位置类型为  $k_j$ ,则其延误时间  $d_j$  计算为:

$$d_j = T_{1,l_j} + T_{2,k_j} \quad (9)$$

本文利用 Opentrack 仿真软件对上述计算模型进行了检验。其仿真与计算结果对比如表 2 所示。检验结果表明,该救援延误时间计算模型具有较高计算精度。

表 2 仿真与计算结果对比

救援方式	仿真平均延误时间/s	计算平均延误时间/s	相对误差/%
后序列车正向救援	1 379.00	1 391	0.87
后序列车反向救援	1 356.00	1 365	0.66
后序列车对向救援	929.00	1 020	9.80
前序列车正向救援	922.00	965	4.66
对向列车正向救援	922.57	966	4.71

2.2 全线救援延误时间计算模型

为探究停车线设置对于全线故障救援的影响,

本研究采用将线路离散化的方法来计算线路整体的救援延误时间,分别计算列车在线路上各个区段发生故障时的救援延误时间。

具体而言就是将上下行线路分别按照相等的间隔进行划分,得到线路区段划分集合。由于区段长度较短,单个区段的故障救援延误时间可由列车在该区段中点发生故障时的最短延误时间表示。之后对所有区段的延误时间进行加权求和获得整体救援延误时间。

考虑到不同区段发生故障的概率不同,可以根据以往故障数据以及客流量大小,对不同区段的延误时间权重进行标定。线路整体救援延误时间的计算公式如下:

$$T = d_i \sum_{i \in I} w_i \quad (10)$$

$$d_i = \min\{d_{i,j}, j \in J\} \quad (11)$$

式中:

$T$ ——线路整体的救援延误时间;

$I$ ——线路划分区段的集合;

$J$ ——救援方案的集合;

$w_i$ ——区段  $i$  的延误时间权重;

$d_{i,j}$ ——区段  $i$  在选择救援方案  $j$  下的延误。

3 案例分析

本文以福州地铁滨海快线为例,测试本文提出的停车线设置方案定量分析方法。此外在遵守 GB 50157—2013《地铁设计规范》中应每隔 5~6 个车站设置停车线,每隔 2~3 个车站设置渡线的规定的前提下,本文结合线路情况和定量分析结果,对线路原停车线设置方案进行优化,并对优化前后的停车线设置方案进行对比分析。

福州地铁滨海快线线路(福州站至长乐机场站)总长约为 63.30 km,最大站间距为 9.96 km,线路配线图如图 2 所示,各站原停车线设置方案如表 3 所示。车辆段和停车场在救援过程中不会产生二次延误,因此视为双列位停车线处理。

为得到在原停车线设置方案下该线路的整体救援延误时间,需要对整条线路进行离散化处理,在该案例中以 240 m 为单位划分区段,整条线路共划分为 258 个区段。之后以每个区段中点位置发生列车故障(列车失去动力)所造成的延误时间代表该区段故障列车救援的延误时间。假设每个区段权重都设为 1/258,可以计算得到原停车线设置方

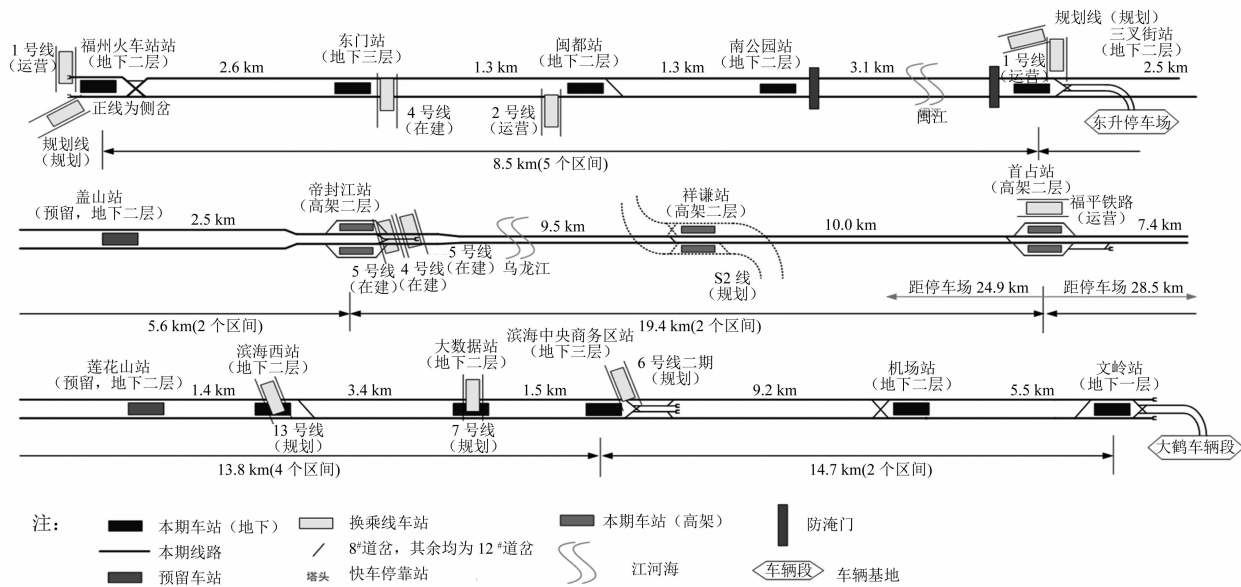


图 2 福州地铁滨海快线线路配线图

Fig. 2 Auxiliary line diagram for Fuzhou-Changle Airport rail transit line

表 3 各站停车线设置原方案和优化方案

Tab. 3 Original plan and optimized plan for parking line setting of each station

车站名称	福州火车站	塔头站	闽都站	国货路站	三叉街站	盖山路站	帝封江站	祥谦站	首占站	滨海西站	大数据站	滨海新城站	机场站	大鹤站
原方案	双	-	渡	-	双	-	单	-	单	渡	无	单	渡	双
优化方案	双	-	渡	-	双	渡	-	渡	渡	渡	渡	双	渡	双

注：“双”表示双列位停车线；“单”表示单列位停车线，“渡”表示渡线；“-”表示无相关配线。

案下线路整体救援延误时间指标为 26.79 min。该指标代表线路整体的平均救援延误时间。

图 3 展示了福州地铁滨海快线在原停车线设置方案下各区段对应的最短救援延误时间分布情况（横轴上箭头按由高到低依次代表双列位停车线、单列位停车线、渡线、无相关配线）。由图 3 可以看出上、下行方向均在帝封江站—祥谦站，祥谦站—首占站，首占站—滨海西站，滨海新城站至机场站

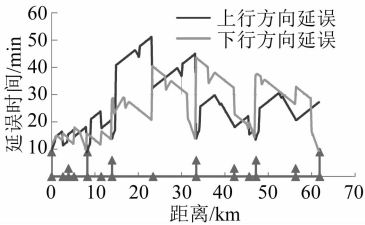


图 3 福州地铁滨海快线原停车线设置方案下各区段最短救援延误时间

Fig. 3 Shortest rescue delay time of each interval in the original parking line setting plan of Fuzhou Metro Line F1 (Binhai Express)

这几个长大区间延误较高。这是由于长大区间发生故障时，救援列车需要走行更远的距离才能接近故障列车，这也解释了区间内部为何一般离出发车站越远，延误越大。而从区间的角度看，越接近前方双列位停车线的区间延误越小，这是由于双列位停车线没有二次延误，可以显著减少救援延误时间。

本文按照 GB 50157—2013《地铁设计规范》的相关要求，结合福州地铁滨海快线线路情况，通过人工调整设计了新的停车线设置方案。具体而言，为解决原方案在三叉街站至滨海新城站路段救援延误持续较高的现象，新停车线方案采用了在大数据站处设置双列位停车线，在三叉街站至大数据站路段密集布置渡线的方法。新停车线设置方案下各区段对应的最短救援延误时间分布情况如图 4 所示。该方案将原方案的三个单列位停车线改为了一个双列位停车线并增加了 4 条渡线，对工程造价的改变不大，但通过与原方案相同的定量分析方法可求得新停车线设置方案的整体救援延误时间指标为 23.63 min，较原方案降低了 11.80%。

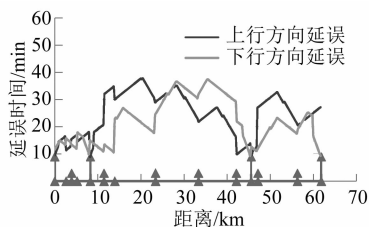


图4 福州地铁滨海快线新停车线设置方案下各区间最短救援延误时间

Fig. 4 Shortest rescue delay time of each interval in the new parking line setting plan of Fuzhou Metro Line F1 (Binhai Express)

新停车线方案为在大数据站附近位置故障的列车提供了较近的故障列车停放位置,降低了故障列车救援过程的一次延误时间,而且通过双列位停车线消除了二次延误,从而使大数据站附近区段的平均救援延误降低。在三叉街站至大数据站路段密集布置渡线可以有效地沟通上、下行方向运行的列车,在列车发生故障时可以提供更多救援方案的选择,增加了救援作业的灵活性,从而使双向的救援延误时间更为均衡,在线路整体上体现为救援延误时间的减少。

## 4 结语

本文总结归纳了列车故障救援方案种类,并通过将线路分段化处理,以各区段救援延误时间的加权平均值衡量停车线设置方案对列车故障救援的影响。基于福州地铁滨海快线的案例分析,证明本文提出的方法不仅可以获得线路整体救援延误情况,同时可以获得全线每个区段救援延误情况,为停车线设计工作提供决策支持。后续研究可以在本文定量分析方法的基础上测试更多的线路案例,分析总结停车线类型和位置对故障列车救援的影响规律。

## 参考文献

[1] 谢小星. 地铁线路停车线及渡线设置探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2006(3): 27.

XIE Xiaoxing. Metro stop line and crossover setting method[J]. Urban Mass Transit, 2006(3): 27.

[2] 王媛. 城市轨道交通行车配线冗余设计研究[J]. 都市轨道交通, 2015(3): 74.

WANG Yuan. Research on redundancy design of track layout for urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015(3): 74.

[3] 徐立国. 上海市城市轨道交通停车线设置探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2006(2): 10.

XU Ligu. On UMT rolling stock stop siding in Shanghai[J]. Urban Mass Transit, 2006(2): 10.

[4] 江永, 叶霞飞. 国外典型大城市轨道交通配线方法和经验[J]. 城市轨道交通研究, 2007(12): 35.

JIANG Yong, YE Xiafei. Track layout methods of typical URT in foreign cities[J]. Urban Mass Transit, 2007(12): 35.

[5] 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(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(5): 79.

[6] 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(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(9): 105.

[7] 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(9): 31.

LI Yuhui. Organization and optimization of urban rail train failure rescue[J]. Railway Transport and Economy, 2011(9): 31.

[8] 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): 43.

QIAN Jiamin. Analysis and discussion on rescue plan for coupled train of Shanghai Rail Transit Line 16[J]. Tunnels and Rail Transit, 2018(1): 43.

[9] 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.

(收稿日期: 2020-07-09)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>