

俞名扬, 朱琳, 刘志钢. 列车故障救援方案优化仿真研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(8): 151-157. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240825

列车故障救援方案优化仿真研究

俞名扬, 朱琳, 刘志钢

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 随着城市轨道交通的发展, 地铁运营企业从注重线网规模扩大向注重服务质量提升转变, 而突发事件的发生会极大影响服务质量。列车故障救援是一种典型的突发事件, 对其展开优化仿真研究, 可以提升管理水平和服务质量。本文建立了事件处置效率、线路运营效益和服务水平综合优化仿真模型, 考虑安全性、列车折返和一般运行约束, 设计了列车故障救援方案优化仿真系统, 包含运行图管理、列车运行控制、故障设定、故障处置以及列车运营调整等5个模块, 涉及救援列车选择、列车存放点选择和列车运营调整等调度员关键决策功能。基于现实运营线路对仿真优化模型展开验证, 计算结果表明: 列车故障救援仿真优化模型可以有效提升列车故障处置效率。

关键词: 城市轨道交通; 列车故障救援; 运营调整; 仿真

中图分类号: U298.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)08-0151-07

Research on optimization and simulation of train fault rescue plan

YU Mingyang, ZHU Lin, LIU Zhigang

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

Abstract: With the development of urban rail transit, subway operating enterprises have shifted from focusing on expanding the scale of the network to improving service quality, and the occurrence of emergencies can greatly affect service quality. Train fault rescue, as a typical emergency, can be optimized and simulated to improve management level and service quality. This article establishes a comprehensive optimization simulation model for event handling efficiency, line operation efficiency, and service level. Considering safety, train turnaround, and general operation constraints, a train fault rescue plan optimization simulation system is designed. The system includes five modules: train diagram management, train operation control, fault setting, fault disposal, and train operation adjustment. It involves key decision-making functions for dispatchers, such as selecting rescue trains, selecting train storage points, and adjusting train operation; Finally, based on the actual operating routes, the simulation optimization model was validated, and the calculation results showed that the train fault rescue simulation optimization model can effectively improve the efficiency of train fault handling.

Key words: urban rail transit; train fault rescue; operational adjustments; simulation

0 引言

城市轨道交通协会公布的数据显示, 截至2022年底, 全国共有55个城市开通城市轨道交通运营线路超过300条, 运营线路超过1万公里, 其中地铁运营线路超过8000公里^[1]。随着城市轨道交通运营规模的扩大, 对运营管理水平和服务质量提出了更高要求。城市轨道交通系统运转的过程极其复杂, 一旦发生突发事件, 造成的社会影响很大。针对故

障状态下的列车运行状况, 采用现实模拟的方法不太实际, 需要通过仿真的方式来获取数据, 进而优化列车故障救援方案。既有的仿真技术包括元胞自动机仿真、离散事件仿真、Petri网仿真以及多智能体仿真等。

元胞自动机是一种离散计算模型, 为模拟复杂系统和执行复杂计算提供了一个简单而灵活的平台^[2]。王先明^[3]利用元胞自动机模型建立了移动闭塞制式下的城市轨道交通模型, 研究快慢车比例

作者简介: 俞名扬(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 城市轨道交通安全管理, 突发事件应急处置研究; 刘志钢(1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 轨道交通运营管理优化及安全技术, 轨道交通人因工程。

通讯作者: 朱琳(1985-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 城市轨道交通人因工程, 运营管理。Email: zlgcd1014@163.com

收稿日期: 2023-04-21

和发车间隔对线路列车运行的影响;蔡晶^[4]建立了3种不同闭塞方式下的元胞自动机模型,研究不同因素对列车延误的影响;Kelvin N S等^[5]创造性地提出了Ludo元胞自动机(LCA),以此来提高仿真的准确性和高效性;米超^[6]基于元胞自动机模型进行列车运行仿真,并提出了一种实时预测调度算法,可根据实时情况生成调度优化决策方案。离散事件仿真可以规避元胞自动机的弊端,但较少应用在城市轨道交通列车运行方面,Zhang等^[7]建立了北京地铁车站换乘模型,研究车站换乘效率与换乘乘客数量、列车运行间隔之间的关系;黄丹芮^[8]应用离散事件仿真方法,对地铁线路客流建立排队网络模型;孙永亮^[9]采用离散事件仿真,建立了乘客在车站通道、楼梯等地铁服务设施排队接受服务的全过程仿真模型,对列车发车间隔进行优化;Hu等^[10]考虑了乘客到达地铁车站通道的随机性,建立了PH/PH(n)/C/C排队模型,对地铁通道设计展开研究;Hassannayebi E等^[11]建立了离散仿真模型,考虑了乘客需求变化、随机运行时间和能力约束,从而得到列车运行间隔。Petri网以事件发生逻辑为基础进行建模,现已成为离散事件系统建模与仿真的重要工具,杨锐等^[12]结合颜色Petri网和赋时Petri网的优势,改进了Petri网工具,建立了列车运行仿真模型;王陆晞^[13]利用Petri网对综合交通枢纽建模,并对列车区间运行计划和站内调度计划进行验证;Milinkovic S等^[14]在研究列车延误问题的过程中,提出了一种模糊Petri网模型对列车运行延误情况进行模拟;Ciufudean C等^[15]提出了一种离散事件模型来控制铁路运输,并分别建立了运输计划制定、运输路线规划以及运输风险规避3个Petri网模型。多智能体系统具有自主性、分布性、协调性,具有很强的鲁棒性和可靠性,问题求解效率较高,是近年来应用于列车仿真的一项重要技术,李斯^[16]利用多智能体仿真对高铁重大事故救援过程进行仿真,从而为事故救援提供指导意见,提升了事故处置效率;董皓等^[17]基于多智能体理论,分别以乘客、列车、网络和突发事件为研究对象,建立了4种多智能体模型,并研究了列车延误状态下的客流处置情况;Li等^[18]利用多智能体对运行的高速列车建模,并制定了一种列车追踪运行策略;Li等^[19]考虑高峰期突发事件的频繁性,提出了一种基于并行计算的多智能体模型的离散事件仿真方法,以有效评估突发事件的影响;Lu等^[20]以减少总延误时间为目标,构建了列车运行调整智能体模型,并提出了一种基于规则的运营调整策略。

目前的列车运行仿真研究主要集中在正常情况下列车运行、非正常情况下列车运行功耗或高铁救援,城市轨道交通故障救援场景下的运营调整仿真较少,同时运营调整策略实施,在既有研究中没有系统化、量化的标准,策略的实施还较为依赖于传统经验,所以利用相应平台设计列车运行仿真程序时,需要进一步考虑生产情况和现实需求。本文研究立足于地铁运营实际场景,设计现实需求条件下的列车故障救援仿真系统。

1 问题描述

本文列车运行场景可以描述为初始状态下各列车按照列车运行图规定时间、顺序在线路上下行双向循环运行;在正常运行过程中,某列车突发故障无法动车,需要组织列车故障救援工作,从列车发生故障时刻起,故障列车后方列车无法越过故障列车继续运行,直至故障列车被移除;若故障发生在区间,除同一区间的后方列车需要立即停车外,其余后方列车停靠就近车站;若故障发生在车站,除后方区间列车需要立即停车外,其余后方列车停靠就近车站;救援连挂车运行时,后方追踪列车必须保证一站一区间的运行安全间隔;涉及逆向救援时,在救援连挂车离开目标车站前,正向列车不得越过目标车站。对于列车的运营调整,包括部分列车在故障地点两端适当位置组织变更交路运行。本文将对以上列车故障处置和运营调整过程进行仿真,获取列车故障救援处置时间、救援连挂车运行时间及其它列车在线路上各站到发时刻数据。

本文的研究对象包括线路和列车。首先对线路进行定义,线路区分上下行运行方向,每个方向的线路都是设置单线,线路终端站设置折返线供列车折返,假设线路上有 n 个车站,每个车站都分为上下行两个站台,由于站台长度相对于线路区间长度而言很短,所以将站台看成一个点,同时不考虑线路坡度等具体情况。

对于列车而言,每个站台同一时间只可供一列车停靠,单条折返线同一时间也只可供一列车折返,其在线路上运行一个周期的具体过程可以描述为列车从车站 V_1 上行站台出发,到达车站 V_n 上行站台后,利用折返线折返至 V_n 下行站台,然后运行至车站 V_1 下行站台,从而完成一个周期运行。列车间的追踪运行,正常情况下,根据列车运行图规定时刻在线路上追踪运行;非正常情况下,按照规定的最小追踪间隔或特殊条件下安全行车间隔追踪运行。

2 列车故障救援仿真模型

2.1 符号定义

i :列车索引; i^+ :救援连挂车索引; $i^!$:救援连挂车后方首列车索引; j :车站索引; U, V :分别为列车和车站集合; $a_{i,j}$:列车*i*实际到达车站*j*时刻; $A_{i,j}$:列车*i*计划到达车站*j*时刻; $d_{i,j}$:列车*i*实际从车站*j*出发时刻; $D_{i,j}$:列车*i*计划从车站*j*出发时刻; Δt :出清轨道电路时间; $t_{j,j+1}$:列车*i*实际从车站*j*出发的时刻; $t_{折}$:列车折返时间; $T_{图}$:图定运行间隔; T_{min} :最小追踪间隔; $t_{停}$:实际停站时间; $T_{停}$:计划停站时间; $T_{停}^{min}$:最小停站时间; $T_{停}^{max}$:最大停站时间; T_d^{max} :最大晚点; I :图定发车间隔; N :受影响的区段总数。

2.2 目标函数

列车故障救援仿真模型的目标函数考虑了列车故障救援事件处置效率、线路运营效益以及服务水平三方面的影响。列车故障救援事件处置效率,包括列车故障处置和救援连挂车运行两个阶段的用时;线路运营效益方面,在故障区段,选择最大晚点时间来直观反映列车故障救援对列车运营的影响,在非故障区段,则考虑列车运行调整后的到发间隔均衡,即列车运行均衡性;对服务水平的影响,考虑受影响区段内车站站台乘客候车时间变化,用乘客平均等待时间来衡量。因此,综合目标函数如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \min Z = & \alpha T_{效率} + \beta T_{晚点}^{max} + \gamma T_{均衡} + \delta T_{wait}^{avg} = \\ & \alpha (T_{处置} + T_{运}) + \beta T_{晚点}^{max} + \\ & \gamma \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a_{i+1,j} - a_{i,j} - I)^2 + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (d_{i+1,j} - d_{i,j} - I)^2 \right] + \\ & \delta \frac{\sum_j \sum_i (d_{i,j} - d_{i-1,j})}{N} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 为相应子优化目标的权重系数。

采用专家打分法确定权重系数,最终得到 $\alpha = 0.410, \beta = 0.377, \gamma = 0.167, \delta = 0.046$ 。

2.3 约束条件

2.3.1 安全性约束

正常情况下,列车运行需满足最小追踪间隔要求,式(2):

$$a_{i+1,j} - d_{i,j} \geq T_{min} \quad (\forall i \in U, \forall j \in V, T_{min} \geq 0) \quad (2)$$

救援连挂车运行过程中,后续追踪列车必须与

其保持一站一区间的运行间隔,式(3):

$$\begin{aligned} d_{i^!,j} - d_{i^+,j+1} & \geq t_{j,j+1} + \Delta t \\ (\forall i \in U, \forall j \in V, t_{j,j+1} & \geq 0, \Delta t \geq 0) \end{aligned} \quad (3)$$

同时,正向运行列车与救援连挂车间运行时间需满足式(4):

$$\begin{aligned} d_{i^!,m-1} & \geq a_{i^+,n} + t'_{m,n} + \Delta t \\ (i^+ \setminus i^! \in U, m, n \in V, t'_{m,n} & \geq 0, \Delta t \geq 0) \end{aligned} \quad (4)$$

2.3.2 列车折返约束

列车折返过程中,需要考虑和对向列车运行时刻之间的关系,式(5):

$$\begin{aligned} a_{i,j} + t_{停} + t_{折} & \geq d'_{k,j} + \Delta t \\ (i, k \in U, j \in V, t_{停}, t_{折}, \Delta t & \geq 0) \end{aligned} \quad (5)$$

同时,列车完成折返后,还需要停车组织乘客上车,式(6):

$$d_{i,j} - a_{i,j} > 2t_{停} + t_{折} \quad (i \in U, j \in V, t_{停}, t_{折} > 0) \quad (6)$$

2.3.3 一般运行约束

列车的一般运行约束包括在相邻两站的到发时刻逻辑关系、最大晚点时间以及停站时间限制,如式(7)~式(9):

$$a_{i,j+1} - d_{i,j} \geq t_{j,j+1} \quad (i \in U, j \in V, t_{j,j+1} \geq 0) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq a_{i,j} - A_{i,j} \leq T_d^{max} \text{ or } 0 \leq d_{i,j} - D_{i,j} \leq T_d^{max} \\ (i \in U, j \in V, T_d^{max} \geq 0) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_{停}^{min} \leq d_{i,j} - a_{i,j} = t_{停} \leq T_{停}^{max} \\ (i \in U, j \in V, T_{停}^{max} > T_{停}^{min} \geq 0) \end{aligned} \quad (9)$$

3 列车故障救援仿真设计

3.1 仿真总体功能

本文设计的列车运行仿真功能主要包括以下模块:

1) 运行图管理模块

运行图管理模块可支持列车运行图基础数据的导入和导出。在仿真开始前,导入初始列车运行图,即可进入列车运行控制模块;仿真结束后,经过故障模拟的列车实际运行数据,将由列车运行控制模块传递给运行图管理模块,输出实际列车运行图。

2) 列车运行控制模块

列车运行控制模块主要对列车的运行时刻数据进行控制并记录。在正常情况下,列车运行控制模块按照初始列车运行图规定的列车到发时刻数据进行记录;在出现故障的情形下,该模块会根据故障处置的阶段以及运营调整策略,对相关列车的到发时刻数据进行调整并记录。

3) 故障设定模块

故障设定模块决定故障列车以及故障发生的位置、时间。故障一旦设定,将会立即进入故障处置模块,同时故障的设定也会影响列车运行控制模块。

4) 故障处置模块

故障处置模块是整个仿真系统的核心之一,该模块主要包含救援列车选择、列车存放点选择以及特殊救援方式判断。故障设定模块设定好故障后,就会转入故障处置模块进行处置,故障处置过程会影响列车运行秩序,从而反馈给列车运行控制模块,同时在故障处置的过程中,涉及到相应的列车运

营调整,列车运营调整策略的实施也会反过来影响故障处置效率,和列车运营调整模块形成相互影响关系。

5) 列车运营调整模块

列车运营调整模块也是整个仿真系统的核心之一,列车运营调整策略包括扣车、变更交路、赶点、运休等。该模块会根据故障处置的阶段以及线路列车运行秩序的变化,采取适当的运营调整策略,从而改变既有的列车运行计划。

仿真总体功能模块架构如图1所示。

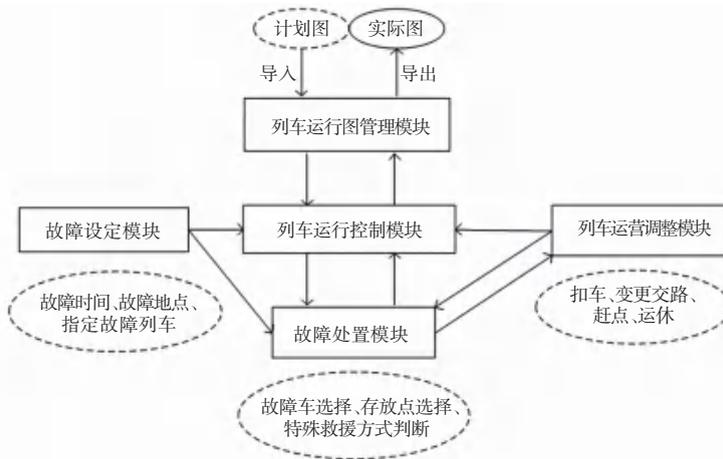


图1 仿真总体功能架构图

Fig. 1 Overall functional architecture of simulation

3.2 仿真基本步骤

列车故障救援条件下的列车运行仿真遵循以下基本步骤:

步骤1 导入计划运行图;

步骤2 设置故障场景。故障场景的设置包括列车车次、故障时刻等信息;

步骤3 列车运营调整。列车运营调整贯穿列车故障救援处置的全过程,是处置作业中的重要一环;

列车运营调整策略包括扣车、变更交路、赶点、运休等措施。故障发生开始,为了确保故障车后方追踪运行列车安全,需要对部分列车进行扣车,在途列车选择适当折返站变更运行交路,为缓解线路拥堵,安排部分列车运休;救援连挂车动车后,安排后续列车在确保安全运行间距的条件下,调整部分列车的发车时间,进行赶点运行。

步骤4 救援列车选择。综合考虑时效、安全、服务质量等因素,选择最合适的救援列车;

步骤5 列车存放点选择。一般来说,线路上

会存在多个故障列车存放点可供选择,选择列车存放点后,意味着救援连挂车运行路径确定,此时转入第四步,继续进行列车运营调整;

步骤6 输出数据。输出的数据包括两部分,一部分是各个关键节点的列车实际运行图;另一部分是列车实际到发时刻数据,对于输出的列车实际到发时刻数据,转入第七步进行模型求解;

步骤7 模型求解。利用仿真数据和求解算法,对构建的仿真模型进行求解;

步骤8 对比分析。对多个列车存放点选择方案目标函数求解结果进行对比分析,得到最优列车存放点。

4 实例分析

4.1 案例基础

本文选取上海地铁5号线主线进行仿真验证,该线路共设置车站15个,车场3个,分别为车场A、B、C,3个车场分别与车站1、6、15正线连接。线路的工作日早高峰时段为早上的7:00—9:00,高峰时

段列车的发车间隔为 3 min, 上线列车 34 列; 平峰时段列车的发车间隔为 6 min, 上线列车 18 列。列车折返采用折返线或渡线站后折返方式, 折返时间为 3 min; 采用站前折返方式, 折返时间为 2 min^[21]。线路上相邻车站间的间距、列车在区间运行的时间以及列车在各站的停站时间等信息见表 1。

表 1 线路运营信息
Table 1 Line operation information

车站索引	停站时分/s	区间间距/m	区间运行时分/s
1	30	1 588	140
2	30	1 075	99
3	30	2 757	234
4	30	2 560	218
5	30	2 167	187
6	30	969	91
7	30	1 486	132
8	30	1 996	173
9	30	2 747	233
10	30	2 741	232
11	30	2 342	201
12	30	1 898	165
13	30	1 217	111
14	30	1 653	145
15	30		

4.2 列车故障救援仿真

(1) 设置故障。高峰期线路上运行列车共 34 列, 设置故障列车车次为“34”, 故障时间为“08:50:32”, 此时处于下行车站 12-11 区间。企业预案规定车场 C 作为故障列车存放点, 但考虑线路实际情况, 列车正向运行路径上的车场 B, 可能运营指标更

优, 可作为备选存放点, 因此本文选择车场 B、C 作为存放点进行仿真。故障设置完成后, 线路上当前时刻部分列车运行位置信息如图 2 所示, 其中行线 1 代表上行线, -1 代表下行线; 站台为整数则代表列车处于车站, 为小数则代表列车处于区间。

车次号	站台	行线	车次号	站台	行线
34	11.502 0	-1	17	5.326 2	1
1	9.369 1	-1	18	4.591 7	1
2	10.7890	-1	19	3.910 3	1
3	12.303 0	-1	20	3.141 0	1
4	13.315 0	-1	21	2.000 0	1

图 2 故障时刻列车运行位置信息

Fig. 2 Train operation position information at fault time

(2) 首次运营调整。首次运营调整中, 安排部分列车变更交路, 同时部分列车进行相应运营预调整。

(3) 救援列车选择。故障发生后, 可供选择的救援列车见表 2, 绝对救援距离是指当前列车与故障列车的相对位置距离, 根据就近原则, 选择列车 3 作为救援列车。

表 2 可供选择救援列车

Table 2 Optional rescue train

车次号	列车位置	绝对救援距离	行线
3	12.303	1 740.3	-1
2	10.789	1 755.7	-1

(4) 列车存放点选择。输入相应救援车及救援连挂车运行参数后, 得到相应列车运行图, 故障车及救援连挂车运行线用红色线标记。

(5) 二次运营调整。确定救援连挂车运行方案后, 更改其它扣停列车出发时间, 对预调整方案进行确认, 无需调整的列车按原计划执行, 二次调整后得到最终列车运行图如图 3、图 4 所示。

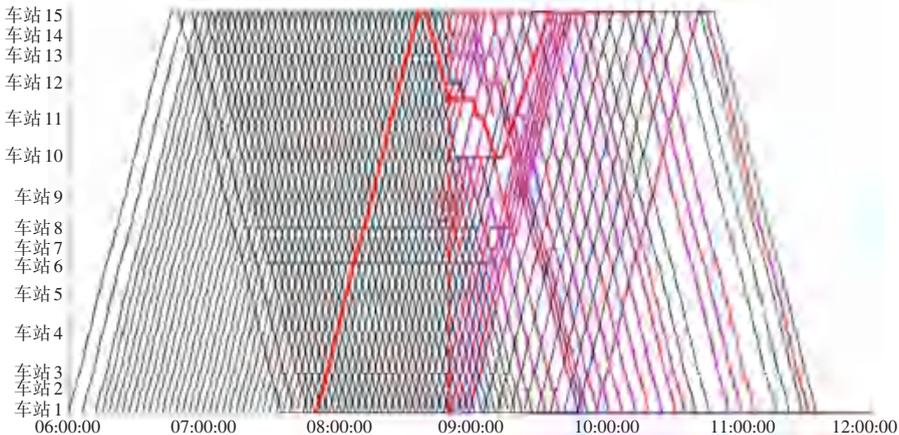


图 3 二次运营调整后列车运行图(车场 C)

Fig. 3 Train diagram after secondary operation adjustment (Parking lot C)

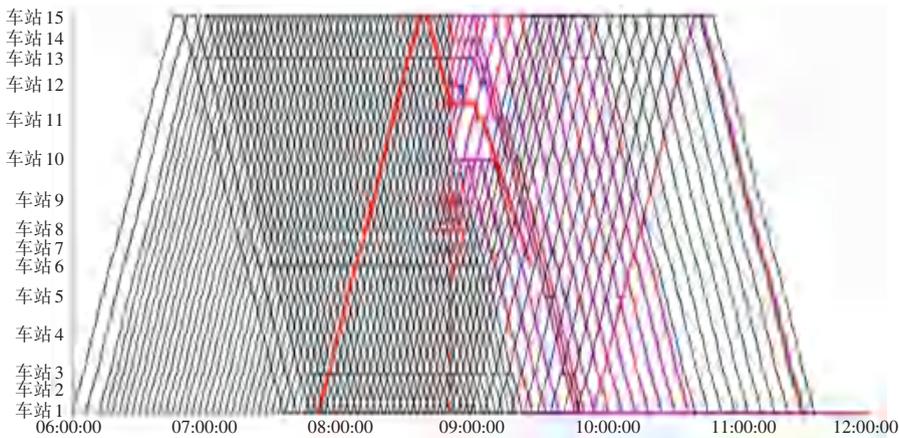


图4 二次运营调整后列车运行图(车场B)

Fig. 4 Train diagram after secondary operation adjustment (Parking lot B)

4.3 仿真结果计算

对仿真得到的列车运行数据进行分析计算,得

到仿真目标函数值见表3。

表3 仿真目标函数值

Table 3 Simulation objective function value

序号	列车存放点	$T_{效率}$		$T_{晚点}^{max}$	$T_{均衡}$	T_{wait}^{avg}	Z
		$T_{处置}$	$T_{运行}$				
1	车场 C	11.17	33.52	22.30	4 534.83	4.67	783.97
2	车场 B	11.17	25.22	19.80	3 411.72	5.20	592.16

通过对比可以发现,将列车存放点调整至车场B,则目标函数值整体提升24%。在各个子优化目标中,除乘客平均等待时间外,其余均优于既有方案,从而验证了仿真模型的有效性。

5 结束语

列车故障救援仿真系统不仅可以真实、准确地模拟列车故障救援的过程,还可以通过设定相应优化目标函数,对既有的列车故障救援方案进行优化,不断提升运营管理水平和服务质量。本文在对列车故障救援过程展开描述的基础上,选择列车故障救援事件处置效率、线路运营效益以及服务水平三方面运营指标,建立综合优化目标函数,考虑列车运行相关约束,构建列车故障救援仿真模型,确定仿真基本步骤并进行仿真程序实现。设置救援列车选择、故障列车存放点选择以及列车运营调整功能,真实还原列车故障救援场景下调度员决策环节,直观显示决策结果。最后,利用真实地铁运营线路展开仿真分析,结果表明该仿真模型具有一定优化效果,可以有效提升故障救援处置效率。后续可以在此仿真系统

的基础上,开发列车故障救援处置辅助决策工具或调度员培训系统,不断提升调度员应急处置能力。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2022年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2023(4):13-15.
- [2] TONGUZ O K, VIRIYASITAVAT W, BAI F. Modeling urban traffic; a cellular automata approach [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(5):142-150.
- [3] 王先明. 基于元胞自动机的轨道交通建模及仿真分析[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [4] 蔡晶. 基于元胞自动机的轨道交通建模及其仿真研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.
- [5] KELVIN N S, GUKHOOL O, HOORPAH D. A Ludo Cellular Automata model for microscopic traffic flow [J]. Journal of Computational Science, 2016, 16:114-127.
- [6] 米超. 基于列车运行仿真的调度研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- [7] ZHANG Qi, HAN Baoming. Modeling and simulation of transfer performance in Beijing Metro Stations [C]//Proceedings of 2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, 2010:1888-1891.
- [8] 黄丹芮. 基于离散事件仿真优化的城市轨道交通车站客流联动控制系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [9] 孙永亮. 基于离散事件仿真的城市轨道交通列车发车间隔优化

- [D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [10]HU Lu, JIANG Yangsheng. A PH/PH(n)/C/C state-dependent queuing model for metro station corridor width design [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 50(3): 273-295.
- [11]HASSANNAYEBI E, SAJEDINEJAD A, MARDANI S. Urban rail transit planning using a two-stage simulation-based optimization approach [J]. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2014, 49:151-166.
- [12]杨锐,牟瑞芳,闫海峰. 列车运行计划仿真模型研究[J]. *中国铁道科学*,2017,38(6):125-133.
- [13]王陆晔. 基于Petri网的列车运行计划可行性与换乘舒适度双目标建模与仿真[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [14]MILINKOVIC S, MARKOVIC M, VESKOVIC S, et al. A fuzzy Petri net model to estimate train delays[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory: International Journal of the Federation of European Simulation Societies*,2013,33:144-157.
- [15]CIUFUDEAN C, BUZDUGA C. Petri net model for energy sparing in railway traffic [C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, Bulgaria;IEEE, 2016:839-842.
- [16]李斯. 高速铁路运营过程多智能体救援仿真研究[D]. 大连:大连交通大学,2017.
- [17]董皓,康会峰,廖琦,等. 基于多智能体的城市轨道交通列车延误仿真模型及应用[J]. *都市轨道交通*,2016,29(3):42-46.
- [18]LI Shukai, YANG Lixing, GAO Ziyou. Coordinated cruise control for high-speed train movements based on a multi-agent model[J]. *Transportation Research, Part C. Emerging Technologies*, 2015, 56:281-292.
- [19]LI Y, YANG X, WU J, et al. Discrete-event simulations for metro train operation under emergencies: A multi-agent based model with parallel computing [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2021, 573: 125964.
- [20]LU Fei, ZHANG Zhihui. Method for subway operation adjustment based on Multi-agent [C]// *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics. IEEE*, 2009:1189-1193.
- [21]段龙杰. 上海地铁列车折返能力分析与测算[J]. *山东交通科技*,2020(1):27-29.