文章编号：1003-1421(2026)11-0091-17
引用格式：邹鹤敏，郭戬，姜庆阳，等. 基于分层决策的城市轨道交通列车计划运行图生成方法[J]. 铁道运输与经济，2026，48(11)：91-107.
ZOU Hemin，GUO Jian，JIANG Qingyang，et al. Generation Method for Scheduled Train Working Diagrams in Urban Rail Transit Based on Hierarchical Decision-Making[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：91-107.

基于分层决策的城市轨道交通列车计划运行图生成方法

邹鹤敏[1,2]，郭　戬[1,2,3]，姜庆阳[1,2,3]，彭赛荣[1,2,3]，吴佳敏[1,2]

(1.广州铁科智控有限公司 系统研发中心，广东 广州　510000；2.广东省智慧交通系统工程技术研究中心 系统研发部，广东 广州　510000；3.中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所，北京　100081)

摘　要：在城市轨道交通行业，为使正线列车在部分线路中断的情况下自动持续运营，提出一种灵活生成不同环境下计划运行图的方法。其核心思想是组织站台股道和区间轨道数据，根据车站标准停车时间、区间运行时间、折返时间，结合实际运营场景，以指定时间为步长自动构建计划节点。提出分层决策机制，第1层局部决策，完成单列车单步计划决策；第2层整体决策，解决多列车计划协同冲突。汇总所有有效计划节点形成计划运行图。使用广州地铁7号线数据试验分析，结果表明，部分区域故障无法行车时，该方法可高效生成指定时间范围内的新计划运行图，减少人员干预，提高调度效率，降低故障影响，实现行车调度自动化、智能化。

关键词：城市轨道交通；行车调度；计划运行图；分层决策；持续运营
中图分类号：U292.4　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250724001

Generation Method for Scheduled Train Working Diagrams in Urban Rail Transit Based on Hierarchical Decision-Making

ZOU Hemin[1,2]，GUO Jian[1,2,3]，JIANG Qingyang[1,2,3]，PENG Sairong[1,2,3]，WU Jiamin[1,2]

(1. System R&D Center, Guangzhou Railway Sciences Intelligent Controls Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China; 2. System R&D Department, Guangdong Intelligent Transportation System Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510000, Guangdong, China; 3. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In the urban rail transit industry, in order to enable mainline trains to operate automatically and continuously in cases of partial line disruption, a method for flexibly generating scheduled train working diagrams in different environments was proposed. The core idea was to organize the data of platform tracks and section tracks based on actual operational scenarios, combined with standard station dwelling time, section running time, and turnaround time, to automatically construct plan nodes with a specified time step. A hierarchical decision-making mechanism was proposed. The first level made local decisions to complete the single-step plan decision for a single train; the

收稿日期：2025-07-24　　**修订日期**：2026-06-17
基金项目：广州铁科智控有限公司基金项目(KYA24006)；广州市科学技术局重点领域研发专题项目(2024B01W0056)

second level made overall decisions to resolve coordination conflicts of multi-train plans. All valid plan nodes were aggregated to form a scheduled train working diagram. Experimental analysis using the data of Guangzhou Metro Line 7 shows that when trains cannot operate due to partial area failures, this method can efficiently generate new scheduled train working diagrams within a specified time range, reduce human intervention, improve dispatching efficiency, reduce the impact of failures, and realize the automation and intelligence of train dispatching.

Keywords: Urban Rail Transit; Train Dispatching; Scheduled Train Working Diagram; Hierarchical Decision-Making; Continuous Operation

0　引言

随着城市轨道交通行业的技术发展，各城市地铁线网愈发庞大复杂，多列车协同调度充满挑战。计划运行图是轨道交通运营组织的关键依托，现阶段计划运行图编制流程繁杂[1]；一旦运营过程中出现设备故障，人工调度过程繁琐低效。因此，针对运营突发故障场景，实现运行图灵活自动化生成，是行业亟需解决的核心问题。

近年来，高速铁路、城际铁路、地铁等领域关于计划运行图的相关研究很多，包括对编图工具的优化、计划运行图一体化研究以及对既有计划运行图的调整和优化。例如：许凤志[2]在计划运行图一体化研究中提出基于计划运行图的乘务派班调整及优化，通过贪心算法和构建模型2种方法对比了不同场景下的调整结果；吴智等[3]以乘客出行成本、列车开行成本、客流需求匹配为目标构建一体化多目标模型，采用改进的免疫克隆算法求解多目标模型；赵天胤等[4]提出以降低运营和调度成本，输送尽可能多的旅客为目标，构建基于离散时空网络的综合优化列车开行方案和新增列车运行线的整数线性规划模型，采用基于拉格朗日松弛的启发式算法求解；Tian等[5]在时空网络模型的基础上，引入基于客流分配信息，结合拉格朗日松弛法采用遗传算法求解；陈泽斌[6]提出基于灵活编组和跳停策略的运行图动态调整；董秋含等[7]、宁健等[8]总结了现有计划运行图优化的常用模型、算法求解及算法缺陷，指出了模型算法与实际应用层面的差距。参照既有研究成果可以看出，关于城市轨道交通列车计划运行图的研究多关注降低成本、匹配客流量[9]、降低换乘[10]、节能微调运行图[11]、多目标一体化等，此类研究都是线路状态无故障时对既有计划运行图的调整和优化。

肖晨等[12]提出突发事件下，通过构建以候车时长最短为目标的模型调整计划运行图，其描述的场景与本研究相似，但解决方案不同，其本质还是对计划运行图的调整。运营期间由于故障导致线路通行状态发生变化时，根据当前线路状态即时灵活生成计划运行图的方案甚少。

1　问题描述与分析

地铁运营期间，由于设备故障，例如供电臂失电、轨道占用、区间火灾等突发情况，导致线路单边运行中断时，传统应对方法是通过人工调度行车，使正线列车持续运营，但人工调度方式繁琐易错，人工选择的方案也未必是最优方案。假设某线路包含车站A—H，分上下行2个方向，线路示意图如图1所示，下行线D2站台股道由于故障中断行车，E2处的列车停滞不前，F2处的列车需要选择立即折返或者反向绕行通过故障区域，F2处的列车和B1处的列车涉及使用C1—E1区段的优先级问题。调度员需要不断权衡以上问题，并持续调度操作，直至下行线恢复正常运行。该方式效率低下，对乘客出行影响较大。

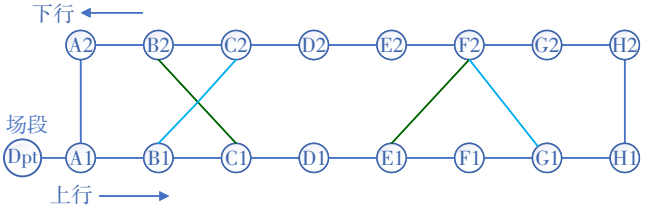


图1　线路示意图

Fig.1　Schematic diagram of line

为使正线列车最大限度保持故障前的运力持续服务，提高行车调度自动化水平，提出一种即时自动生成计划运行图的方法。该方法不是对既有计划运行图的调整，而是从无到有地生成一张新的计划运行图，旨在保持线上列车持续高效服务，降低故

障对乘客的出行影响。其核心思想是结合列车位置、线路状态、站台股道停站时间、各区间正常运行耗时、折返时间等数据，探索列车当下的可行动作(例如：向前或者折返)；通过分层决策机制[13]，第1层决策获取单列车最佳动作，第2层决策解决多列车协同作业冲突，确保线路部分区域无法通行的情况下，非故障区域列车持续运营。

为解决研究提出的问题，先对区域划分、动作、动作约束等定义进行说明。

(1) 区域划分。结合线路场景，构建包含正线站台股道和区间轨道的全局图。假设某线路包含车站A—H，除邻接区间轨道以外还存在一些渡线[14]，通过渡线，列车可跨线别运行。通过渡线绕行示意图如图2所示。

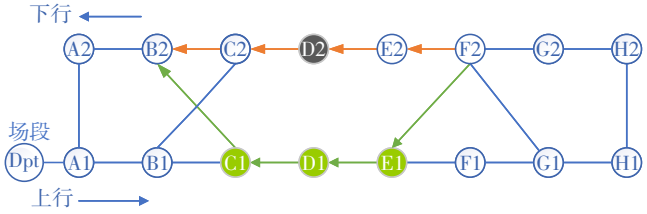


图2　通过渡线绕行示意图

Fig.2　Schematic diagram of detour via crossovers

根据线路场景，结合线路中的八字渡线和故障位置，定义正常区域、故障区域、瓶颈区和临界点。

故障区是列车无法行驶的区域，是指包含了故障节点的最小八字渡线包裹的范围；瓶颈区支持列车单边双向运行[15]；临界点是瓶颈区域与正常区域的分界点，列车在该位置时，可选择直达瓶颈区，也可选择折返。故障区域的界定比较灵活，因为实际故障节点可能只有一两个，而被八字渡线包裹的范围会覆盖实际故障点，八字渡线包裹的非实际故障节点可以根据其折返性能划为正常节点。

区域说明如图3所示，线路因D2节点故障而中断行车。其中，包含实际故障节点D2的最小八字渡线包裹的位置是C2到E2，由于C2与临界点B1邻接，实际无故障且有折返能力，可扩大可行驶区域范围，保留C2为正常区域，E2节点虽为正常状态且与临界点邻接，但无折返能力，列车进入E2后无法前进，反而影响行车组织，故将其划为故障区域。

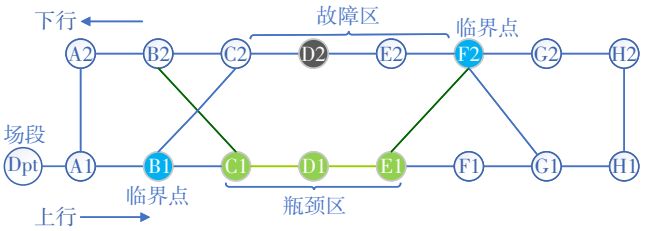


图3　区域说明

Fig.3　Region description

(2) 动作及其类型。定义列车从一个站台股道到另一邻近站台股道称为一个动作，一个动作的耗时包含列车区间运行时间和到达目标站台股道后的停车时间。

列车动作类型有6种，包括：向前、向后、跨线向前、邻站折返、同一车站不同站台间折返(以下简称“同站折返”)、保持不动。向前是指保持原来的线别往前一步；向后是指保持原有线别向后一步；跨线向前指保持原来的方向，跨线往前一步；邻站折返是指改变方向和线别，即跨线向后一步；同站折返是指从一个站的某个站台股道经过专用折返线运行到该站另一个线别的站台股道。

6种动作类型中，“保持不动”不作为列车主动可选动作，只作为被动调整动作。不是每个列车都有5种动作可选，需结合实际场景中的渡线提供可选动作。以图3为例，下行节点F2有4条边，共4种可选动作：向前(F2→E2)、跨线向前(F2→E1)、邻站折返(F2→G1)、向后(F2→G2)。上行节点H1有2条边，共2种可选动作：向后(H1→G1)、同站折返(H1→H2)。

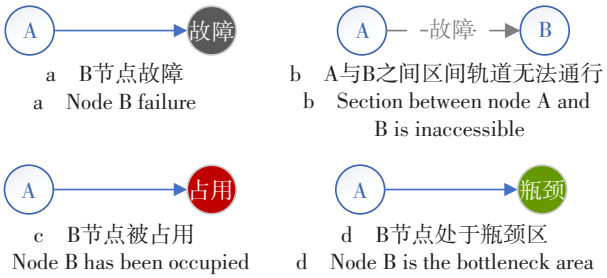
(3) 动作约束。列车根据自身所在的位置和环境选择一个合适的动作时，该动作需要满足一定的约束条件。动作约束如图4所示，约束条件主要包括4种：目标节点是否属于故障区域(如图4a)；2个节点之间的区间轨道是否无法通行(如图4b)；计划停留在目标节点的时间范围内，目标节点是否被其他列车占用(如图4c)；目标节点处于瓶颈区(如图4d)。

2　自动生成计划运行图方法

2.1　单步动态计划生成模型

2.1.1　模型假设

(1) 故障范围内的列车不再运行，其他列车不



a　B节点故障
a　Node B failure

b　A与B之间区间轨道无法通行
b　Section between node A and B is inaccessible

c　B节点被占用
c　Node B has been occupied

d　B节点处于瓶颈区
d　Node B is the bottleneck area

图4　动作约束
Fig.4　Action constraints

受故障影响，能以正常速度在可行区域行驶，列车运行耗时采用线路运营中默认的停站时间和区间运行时间。

（2）鼓励正线列车经过瓶颈区贯通运行。

（3）正常区域内的列车不向后运行。

（4）忽略列车启动和停车过程中的速度变化，列车在区间匀速运行。

2.1.2　参数定义及说明

参数定义及说明如表1所示。

2.1.3　模型设计

单列车遍历所有可行的动作获取对应动作的奖励值的过程称为动作探索。动作探索需结合运营场景渡线、列车当前运行方向、列车当前位置、全局图的占用节点、故障节点、瓶颈区域、临界点等信息进行判断。从动作探索的结果中获取奖励值最大的动作。

列车在t时刻位于节点N_t，经过动作a_t可达目标邻接点N_{t+1}，N_{t+1}空闲，通往目标节点的区间空闲需满足如下公式。

$$C(N_t,\ a_t,\ N_{t+1})>0 \tag{1}$$

获取N_t经过动作a_t到下一个节点的区域变化状态$S(N_t,\ a_t)$，当$S(N_t,\ a_t)$的值对应“进入瓶颈区”时，需要判断经过瓶颈区的列车数量不得超过上限ΔN，即

$$PTN(DA(a_t))<\Delta N \tag{2}$$

根据动作a_t的类型、$S(N_t,\ a_t)$、奖惩矩阵获取奖惩值，从所有动作探索结果中获取奖励值最大的动作，其处理公式如下。

$$\operatorname{argmax}_{a_t\in A(N_t)}R(S(N_t,\ a_t),\ a_t)>0 \tag{3}$$

最优动作的奖励值大于0才是可行动作，如果小于0，说明是一个不支持的动作。得到最优可行动作后，根据该动作a_t生成计划节点，计划节点包含：起止站，到达目标节点的时间，从目标节点的发车时间，计划运行方向等。故第i列车第j个计划节点表达如公式(4)所示。

$$P_{i,j}=(N_{i,j-1},\ N_{i,j},\ T^{\mathrm{arr}}_{i,j},\ T^{\mathrm{dept}}_{i,j},\ D_{i,j})$$
$$i>0,\ j>0 \tag{4}$$

其中，到达目标节点的时间是上一个节点的发车时间加区间运行时间，目标节点的发车时间是到达时间加停站时间，计算公式分别如公式(5)—(6)所示。

$$T^{\mathrm{arr}}_{i,j}=T^{\mathrm{dept}}_{i,j-1}+\tau\cdot TS(N_{i,j-1},\ N_{i,j}) \tag{5}$$

表1　参数定义及说明
Tab.1　Parameter definitions and descriptions

符号	符号说明
N	站台股道节点集合
N_t	t时刻列车所在站台股道节点
$N_{i,j}$	第i列车第j个计划目标节点
A	动作集合，包括保持不动、向前、跨线向前、同站折返、邻站折返、向后
$A(N_t)$	列车在N_t位置可选动作集合
$S(N_t,\ a_t)$	列车从N_t执行动作a_t对应的区域变化集合，区域变化状态包含：在故障区域、在正常区域、进入瓶颈区、同向离开瓶颈区、反向离开瓶颈区、在瓶颈区、回场段
$R(S(N_t,\ a_t),\ a_t)$	根据动作类型和动作对应的区域变化获取奖惩值
P	列车计划集合
$P_{i,j}$	第i列车，第j个计划
Q_i	第i列车的计划列表
M	所有列车计划列表集合
D	方向，值为1或2，1表示上行，2表示下行
$D_{i,j}$	第i列车第j个计划的方向
$DA(a_t)$	获取动作a_t的方向
$T^{\mathrm{arr}}_{i,j}$	第i列车第j个计划的到达时间
$T^{\mathrm{dept}}_{i,j}$	第i列车第j个计划的发车时间
$TS(N_{i,j-1},\ N_{i,j})$	第i列车从一个节点到目标节点$N_{i,j}$区间运行时长，s
$TP(N_{i,j})$	第i列车在目标节点$N_{i,j}$停站时长，s
$C(N_t,\ a_t,\ N_{t+1})$	从N_t经动作a_t到N_{t+1}的区间和N_{t+1}占用状态，1表示空闲，0表示占用
ΔN	瓶颈区一个方向连续通车数量上限，常数
ΔT	最小行车间隔，s，常数
ΔTE	期望的行车间隔，s，常数
$PTN(dir)$	获取瓶颈区指定方向(dir为上行或下行)的通车数量
ts	区间延时，s，常数
tp	站台延时，s，常数
τ	列车到前方站台距离与站间距离的比值

$$T_{i,j}^{\text{dept}} = T_{i,j}^{\text{arr}} + TP(N_{i,j}) \tag{6}$$

每列车都有一个初始计划，到站时间是当前时间，发车时间是到站时间加当前节点的标准停站时长，如果列车在区间，发车时间还需要加上列车在区间运行耗时。

对各列车单步生成的计划节点进行评估和调整，生成的计划节点不能同时占用同一个目标节点；2个计划之间的间隔至少相差ΔT，否则均造成计划冲突。计划冲突判断方法如公式(7)所示。

$$\exists i \neq j,\ \exists k,\ l,\ \text{使得}(N_{i,k} = N_{j,l}) \wedge ([T_{i,k}^{\text{arr}} - \Delta T,\ T_{i,k}^{\text{dept}}] \cap [T_{j,l}^{\text{arr}} - \Delta T,\ T_{j,l}^{\text{dept}}] \neq \varnothing) \tag{7}$$

存在目标节点占用冲突时，需要回退当前计划并对上一步计划作延时处理，第i列车最新生成的计划$P_{i,k}$回退时，上一步计划$P_{i,k-1}$处理公式如下。

$$P_{i,k-1} = \left(N_{i,k-2},\ N_{i,k-1},\ T_{i,k-1}^{\text{arr}} + ts,\ T_{i,k-1}^{\text{dept}} + ts + tp,\ D_{i,k-1}\right) \tag{8}$$

如果行车间隔小于最小追踪间隔ΔT时，对当前列车i计划$P_{i,k}$进行调整即可，假如与其发生行车间隔的计划为$P_{j,l}$，其调整方法如下。

$$P_{i,k} = \left(N_{i,k-1},\ N_{i,k},\ T_{j,l}^{\text{dept}} + \Delta T,\ T_{j,l}^{\text{dept}} + \Delta T + TP(N_{i,k}),\ D_{i,k}\right) \tag{9}$$

如果用户有期望的行车间隔，也可以按照期望的行车间隔ΔTE进行调整，其调整方法如下。

$$P_{i,k} = \left(N_{i,k-1},\ N_{i,k},\ T_{j,l}^{\text{dept}} + \Delta TE,\ T_{j,l}^{\text{dept}} + \Delta TE + TP(N_{i,k}),\ D_{i,k}\right) \tag{10}$$

至此，完成线上所有列车的一步计划生成。

2.2　自动生成计划运行图流程

突发故障或紧急事件时，该故障或事件的耗时未知，故指定一个时长，计算指定时长内每列车每一步计划，其核心是单列车的路径探索和多列车的整体协同。

2.2.1　路径探索

根据公式(3)完成单列车下一步动作的筛选过程即局部决策，该过程与常见的运行图调整方案的主要区别在于，其不仅是对计划的时间调整，更是在线路部分中断的情况下对路径方案的探索，该过程需使用奖惩矩阵辅助完成。奖惩矩阵描述了一个动作发生导致的区域变化与对应动作类型的奖惩值。

不同的运营策略可以使用不同的奖惩矩阵。对于某区域双边轨道同时故障，可使用鼓励折返的策略联合其他交通工具接驳的方案。某区域单边轨道故障时，可使用大小交路[16]混跑策略保持全线贯通[17]，也可以使用小交路+穿梭模式策略，充分利用瓶颈区。

大小交路混跑策略下奖惩矩阵参考值如表2所示，提供了鼓励列车绕大交路运行的大小交路混跑策略下的奖惩矩阵参考值。瓶颈区没有对向来车时，为保持全线贯通，列车优先选择进入瓶颈区。

表2　大小交路混跑策略下奖惩矩阵参考值

Tab.2　Reference values for reward and punishment matrix under mixed operation strategy of large and small loops

区域状态/动作	向前	跨线向前	邻站折返	同站折返	向后	保持不动
非瓶颈区	5	−5	1	1	−5	0
瓶颈区入口	5	5	1	1	−5	0
瓶颈区出口(同向)	5	−5	5	−5	−5	0
瓶颈区出口(反向)	−5	−5	5	−5	−5	0
瓶颈区中段	5	−5	−5	−5	5	0

小交路+穿梭模式下奖惩矩阵参考值如表3所示，该策略鼓励一列车在瓶颈区穿梭运行，其余列车绕小交路运行。

表3　小交路+穿梭模式下奖惩矩阵参考值

Tab.3　Reference values for reward and punishment matrix under small loops + shuttle mode

区域状态/动作	向前	跨线向前	邻站折返	同站折返	向后	保持不动
非瓶颈区	5	−5	1	1	−5	0
瓶颈区入口	1	5	5	1	−5	0
瓶颈区出口(同向)	−5	−5	−5	−5	5	0
瓶颈区出口(反向)	5	−5	−5	−5	−5	0
瓶颈区中段	5	−5	−5	−5	5	0

另外，局部决策除了满足公式(1)和公式(2)外，还要考虑运营结束时间，如果动作发生的时间超过运营结束时间，优先选择回场段动作。

2.2.2　整体协同

局部决策筛选出来的动作一般都是单列车当前状态下的最优动作，但并不是所有单列车的最优解汇总就能得到整体最优解，所以对正线上所有列车当前的动作进行整体评估，考虑多列车同时动作时是否存在冲突。主要考虑目标站台股道占用情况、接发车顺序、列车最小追踪间隔[18]等因素。存在冲突时，需对冲突动作进行调整，确保整体计划可行。

（1）站台股道占用冲突。若列车目标站台股道相同，检查2列车是否存在共同占用站台股道的时间，即冲突时间。节点占用时间冲突场景1如图5所示，节点占用时间冲突场景2如图6所示，2列车存在共同占用B站台股道冲突时间。

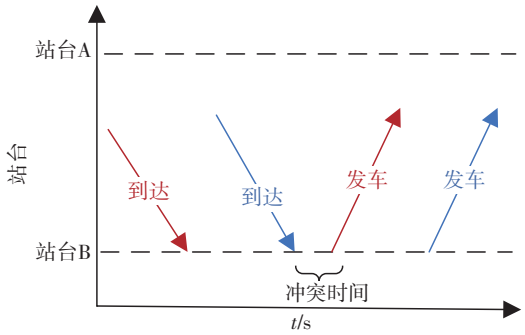


图5　节点占用时间冲突场景1

Fig.5　Node occupancy time conflict scenario 1

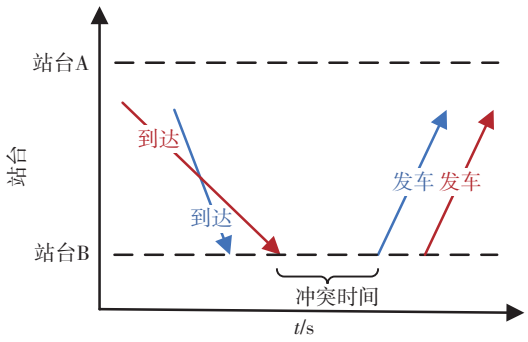


图6　节点占用时间冲突场景2

Fig.6　Node occupancy time conflict scenario 2

为避免站台股道占用冲突，只能保留一列车的动作，其他与之冲突的动作都要回退。回退方法参照公式(8)。

（2）接发车顺序错乱冲突。图6所示场景除有站台股道占用冲突之外，还存在接发车顺序错乱冲突。假设站台A到站台B之间没有越行轨道，红色箭头表示列车1从A站台股道到B站台股道的到达和发车时间，蓝色箭头表示列车2从A站台股道到B站台股道的到达和发车时间。图6表示列车2在A—B区间越行到列车1之前，构成接发车顺序错乱。调整方法参考公式(9)。列车2到达B站台时间应该从蓝色实线调整成蓝色虚线，发车时间按调整后的到达时间和停车时间顺延，调整效果(蓝色虚线)如图7所示。

（3）行车间隔冲突。最小追踪间隔是列车在移

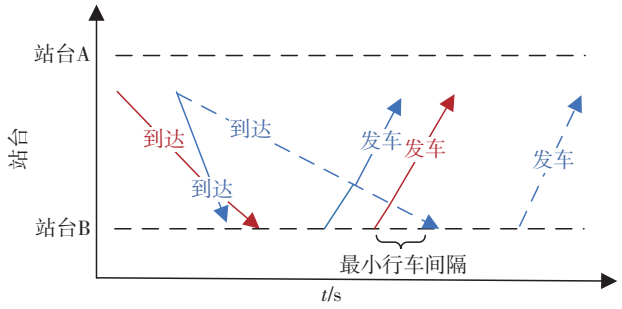


图7　调整效果(蓝色虚线)

Fig.7　Adjustment effect (blue dashed line)

动闭塞区段同方向运行时，2列车之间保持的最小安全间隔时间。线路设备故障时，假如某个区域列车比较密集，为确保行车安全，列车之间的行车间隔必须大于线路最小追踪间隔ΔT，若出现行车间隔小于最小追踪间隔的情况，可适当调整后车区间运行时间或者站台停站时间。调整方法参考公式(9)。在实际生产过程中，为避免生成的计划运行图太过密集，可参考公式(10)，使用一个期望行车间隔ΔTE代替最小行车间隔ΔT，使生成的计划运行图更均匀。

第i列车的k个计划表示如下。

$$Q_i = \{P_{i,1}, P_{i,2}, \cdots, P_{i,k}\} \tag{11}$$

汇总n列车的计划后，最终计划M表达式为

$$M = \{Q_1, Q_2, \cdots, Q_n\} \tag{12}$$

2.2.3　自动生成

列车在区间运行的时间与站间距离有关，列车在每个节点的停车时间也不是固定的，但都在30 s以上，因此以30 s为步长，对全线列车自动生成计划进行处理。自动生成计划运行图步骤如下。

步骤1：初始化线路图相关数据构建全局图。

步骤2：输入故障位置、临界点、瓶颈区、列车位置和方向，根据列车位置为每列车生成首个评估节点。

步骤3：设置该环境下计划总时间$total$，单位s，初始化步长$step$ = 30 s，i_step = 0。

步骤4：根据i_step判断循环是否结束，如果结束，跳转到步骤10，否则转步骤5。

步骤5：对每列车的可选动作进行条件检查，为每列车选择一个得分最高的动作，并保存该动作对应的奖惩值、起止时间、动作耗时等信息到对应列车的评估列表。

步骤6：检查全线列车是否满足基本冲突检测，如果存在目标节点冲突时，记录冲突节点，保留最先到达目标节点的列车动作，其他的冲突动作全部撤销，回退到上一个状态，然后进入步骤7，否则，直接转步骤7。

步骤7：检查所有列车的最后一个动作是否存在接发车顺序错乱。如果存在某列车与前车接发车顺序错乱，对该动作进行时间补偿，保证该列车与前车接发车顺序正常，然后进入步骤8，否则直接转步骤8。

步骤8：检查全线列车是否满足最小追踪间隔。如果存在列车的追踪间隔不满足最小追踪间隔时，计算时间差，并调整上一个动作的区间运行时间和站台停车时间，即对上一个动作进行时间补偿后进入步骤9，否则直接转步骤9。

步骤9：根据列车动作更新全局图状态，*i_step*自增30 s，进入下一个循环步骤4。

步骤10：根据评估列表中每个节点的时间信息输出计划，流程结束。

自动生成计划运行图流程图如图8所示。

调度员要结合实际运营场景和故障点，设定故障区域，指定瓶颈区域和临界点，灵活计算不同故障场景下的计划运行图。本方法不统计奖惩总和，因为本方法的目标不是让列车到达某个目的地，而是运营结束前，保持列车处于服务状态，所以只要确保全线贯通，各动作可行无冲突即可。

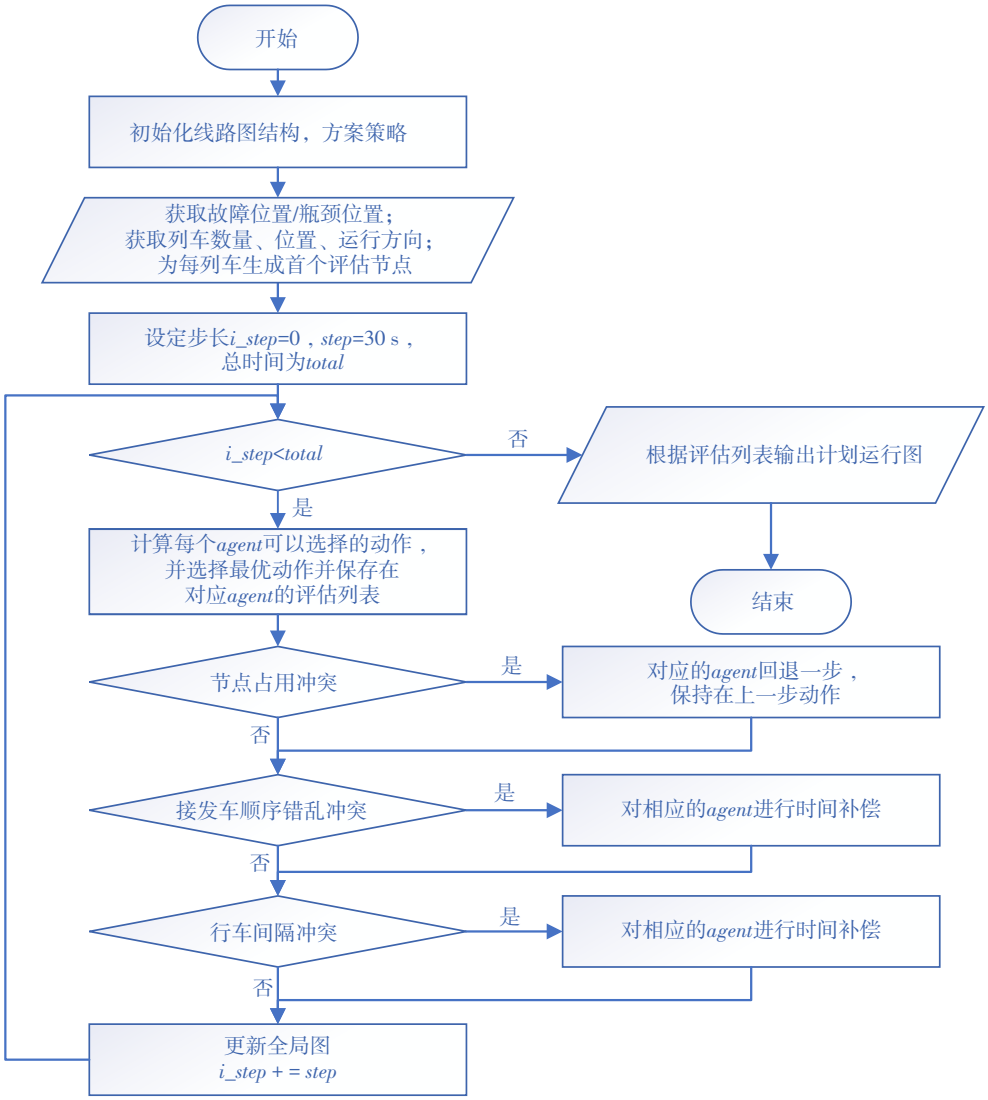


图8　自动生成计划运行图流程图

Fig.8　Flowchart of automatic generation process for scheduled train working diagram

3　应用效果分析

实例验证使用设备为Intel Core i7，3.60 GHz处理器与16 GB内存的计算机，设备操作系统为Windows。

以广州地铁7号线场景为例，该线路共28个站，站码编号从8到36，其中车站8、车站16、车站31连接场段，7号线线路拓扑图如图9所示。

测试时，设置最小追踪间隔180 s，在正线相同位置设置26列车，在不同的线路条件下自动生成2 h内的计划运行图。未说明的情况下默认使用大小交路混合策略。7号线车站停车时间及区间运行时间信息如表4所示。其中，右侧2列代表本次测试列车初始位置。

灵活是本方法的重要特点，其宗旨是使线上可行驶区域列车持续提供服务。灵活主要体现在故障

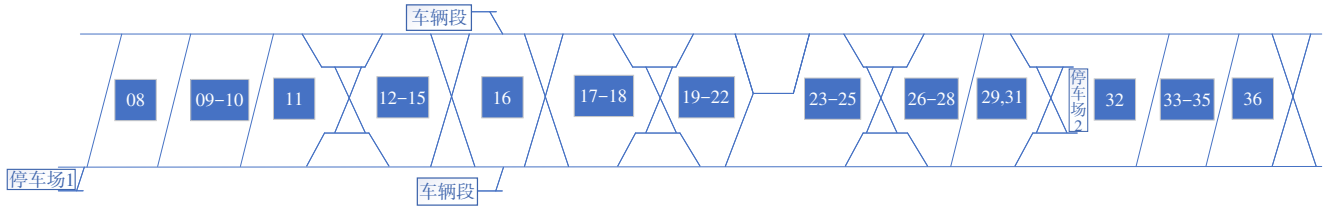


图9　7号线线路拓扑图

Fig.9　Topology diagram of Line 7

表4　7号线车站停车时间及区间运行时间信息

Tab.4　Station dwelling time and section running time information for Line 7

序号	上行节点	下行节点	车站代码	上行站间距离/m	上行区间耗时/s	下行区间耗时/s	上行停站时间/s	下行停站时间/s	上行列车服务号	下行列车服务号
1	082	081	08	2 274	151	120	75	50		
2	092	091	09	2 188	147	151	45	45	2	1
3	102	101	10	1 309	93	147	32	32		
4	112	111	11	1 987	126	93	32	32	3	
5	122	121	12	1 634	109	126	35	35		
6	132	131	13	1 473	106	109	32	32		4
7	142	141	14	1 528	103	106	32	32		
8	152	151	15	1 418	98	103	32	32	6	5
9	162	161	16	1 120	89	98	60	60		
10	172	171	17	1 908	126	100	35	35		7
11	182	181	18	2 172	170	139	32	32	8	
12	192	191	19	1 639	116	152	35	35	10	9
13	202	201	20	2 116	141	121	50	50		11
14	212	211	21	2 370	170	141	45	45	12	13
15	222	221	22	2 338	160	161	40	40	14	
16	232	231	23	3 780	276	153	32	32		
17	242	241	24	3 263	170	248	50	50	16	15
18	252	251	25	2 332	128	170	35	35	18	17
19	262	261	26	1 664	94	128	35	35		
20	272	271	27	1 873	108	94	35	35	20	19
21	282	281	28	1 473	88	108	45	45		
22	292	291	29	2 846	151	88	40	40	22	21
23	312	311	31	1 865	101	151	40	40		
24	322	321	32	1 811	109	101	35	35	24	23
25	332	331	33	2 673	145	109	35	35		
26	342	341	34	1 299	80	145	45	45		
27	352	351	35	933	73	80	40	40		25
28	362	361	36	—	120	73	50	50	26	

位置不同、存在低速行驶列车、运营时间不同、奖惩策略不同。

3.1　故障位置不同

不论故障位置在何处，结合实际场景，均可生成计划运行图。模拟供电臂失电，设置故障区分别是下行线车站 12—16 之间(后续试验默认故障区域)，该区域存在 2 列车；下行线车站 26—31 之间，该区域存在 3 列车。以上 2 个故障位置 ΔN 均为 1。不同故障区域生成的运行图效果如图 10 所示。故障区域为下行线车站 12—16 之间时，服务号为 4，5 的列车保持在故障位置，不再服务；故障区域为下行线车站 26—31 之间时，服务号为 19，21，23 的列车保持在故障位置，不再服务。所有效果图横坐标代表时间，共 7 200 s，即 2 h，纵坐标代表各车站代码，生成的计划运行图随故障位置变化而变化。为展现故障区域列车位置，所有运行图效果均在横轴负数区域中绘制了故障区域列车所在车站。

3.2　存在低速行驶列车

列车故障致其速度无法达到正常水平时，只能低速行驶。假设某列车在车站 24 的下行线故障，该列车只能低速行驶，为不影响后续列车运行，该低速行驶列车需要快速进入存车线或者回场段。存在低速行驶列车计划运行图效果如图 11 所示。低速行驶列车下线之前后面的 2 列车以最小追踪间隔紧跟其后，这种效果通过人工调整运行图的方法是难以精准实现的。

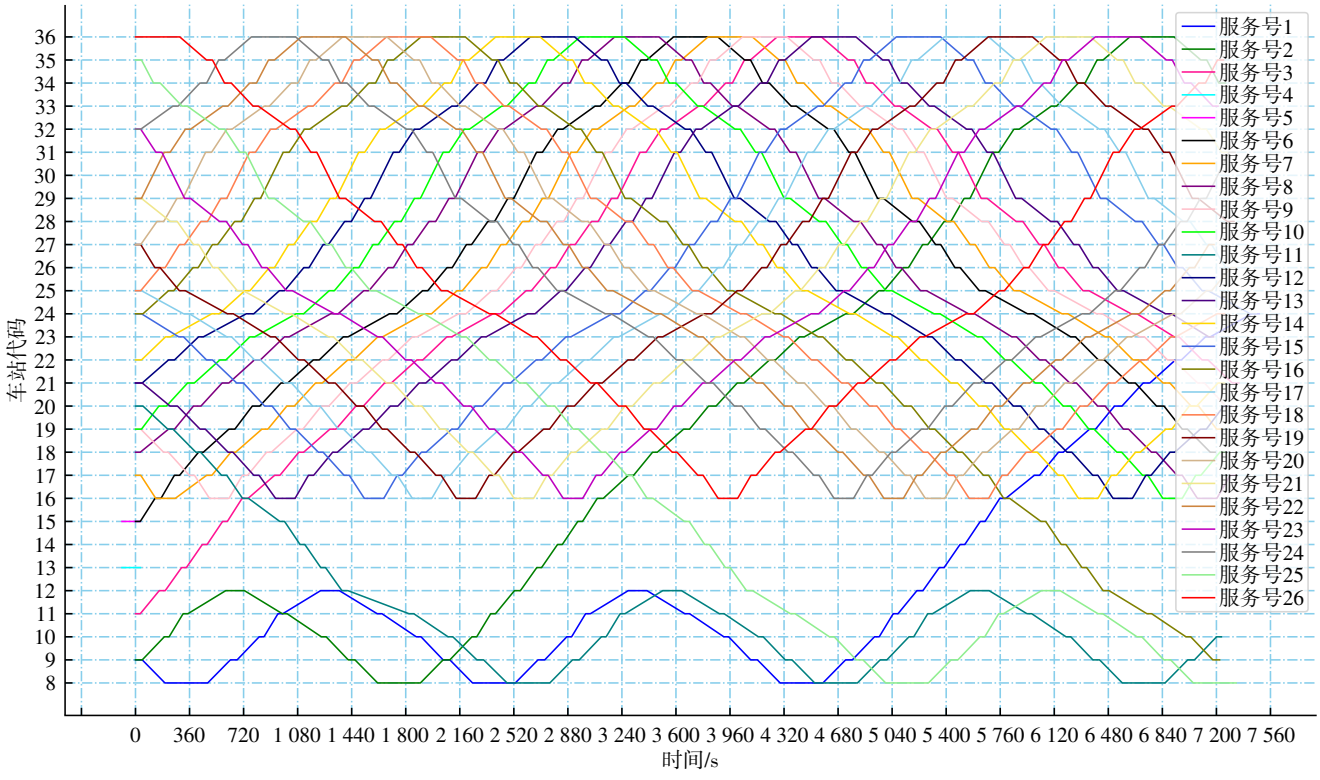
3.3　运营时间不同

假设刚开始运营时线路设备故障，正线正常区域列车需以最大运力运行，列车不会回场段，生成的计划运行图如图 10a 所示，但如果运营结束前 2 h 以内线路设备故障，则需在运营结束后，让列车尽快回场段。运营结束后优先回场段计划运行图效果如图 12 所示。假设当前时间为 21:57，结束运营时间为 23:00，距离运营结束还有 63 min，所有列车在 23:00 之后就近回场段。图 12 与图 10a 的主要差异就是故障发生的时间不同。

3.4　奖惩策略不同

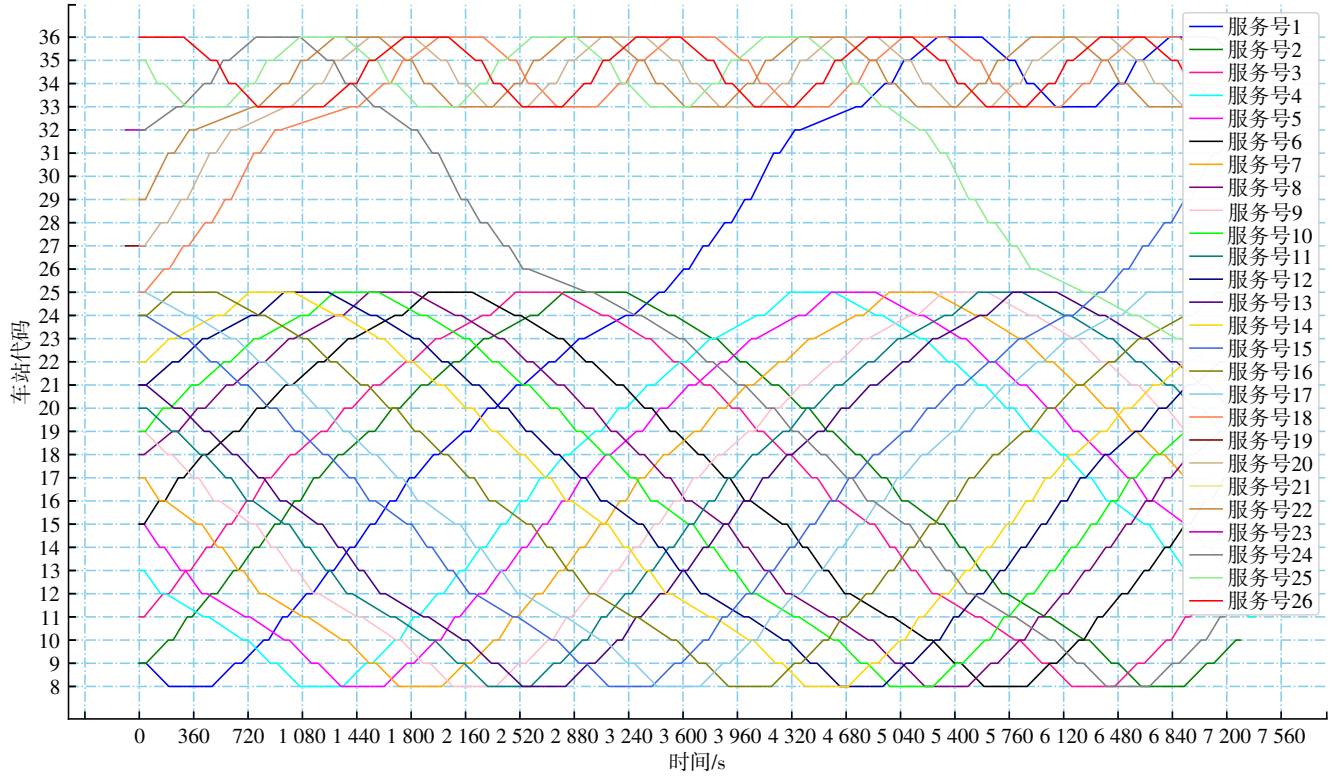
3.4.1　大小交路混跑策略

使用大小交路混跑策略，列车到达临界点且运行条件满足时，优先选择进入瓶颈区以保持线路贯



a　下行线车站12—16站故障

a　Failure of downline stations 12—16

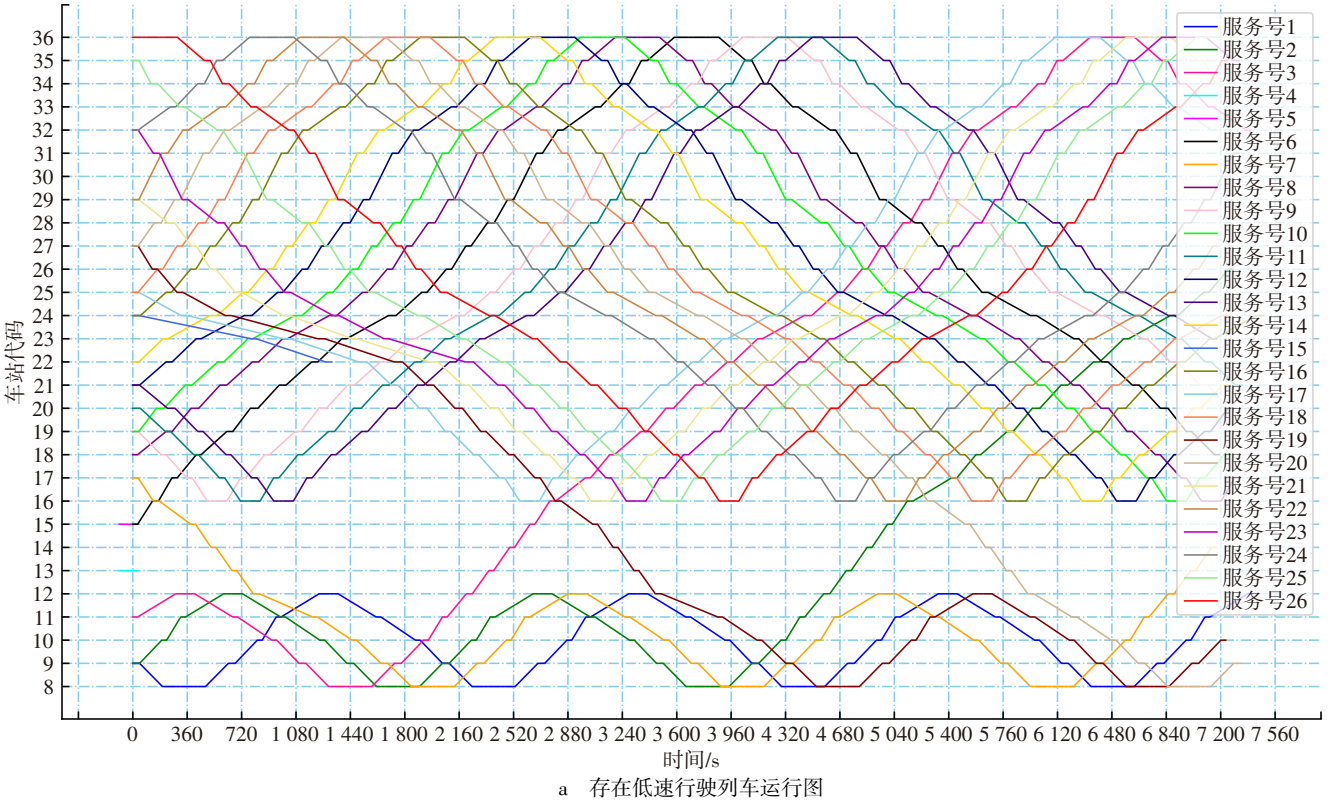


b　下行线车站26—31站故障

b　Downline stations 26—31 failure

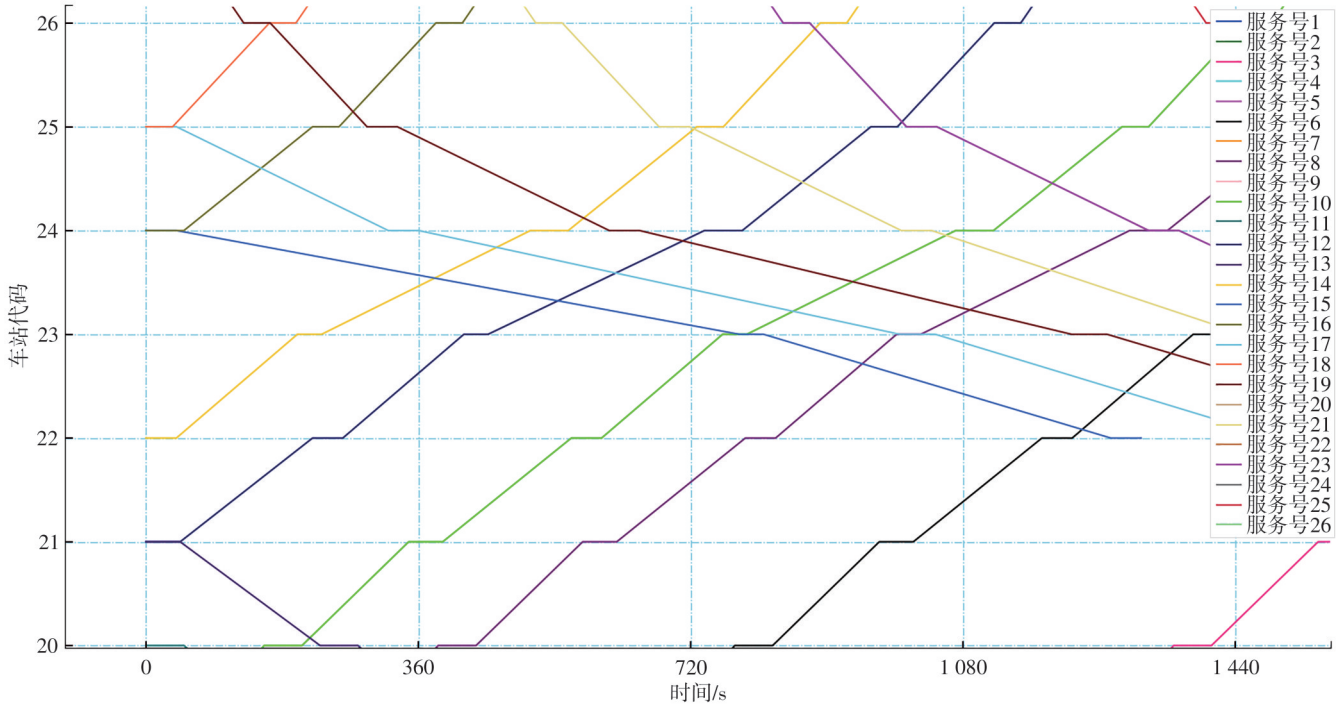
图10　不同故障区域生成的运行图效果

Fig.10　Effect of scheduled train working diagrams generated in different fault areas



a　存在低速行驶列车运行图

a　Scheduled train working diagram of existing low-speed train



b　服务号15，17，19的间隔标注

b　Interval annotation of service No. 15, 17, and 19

图11　存在低速行驶列车计划运行图效果

Fig.11　Effect of scheduled train working diagram in the presence of low-speed trains

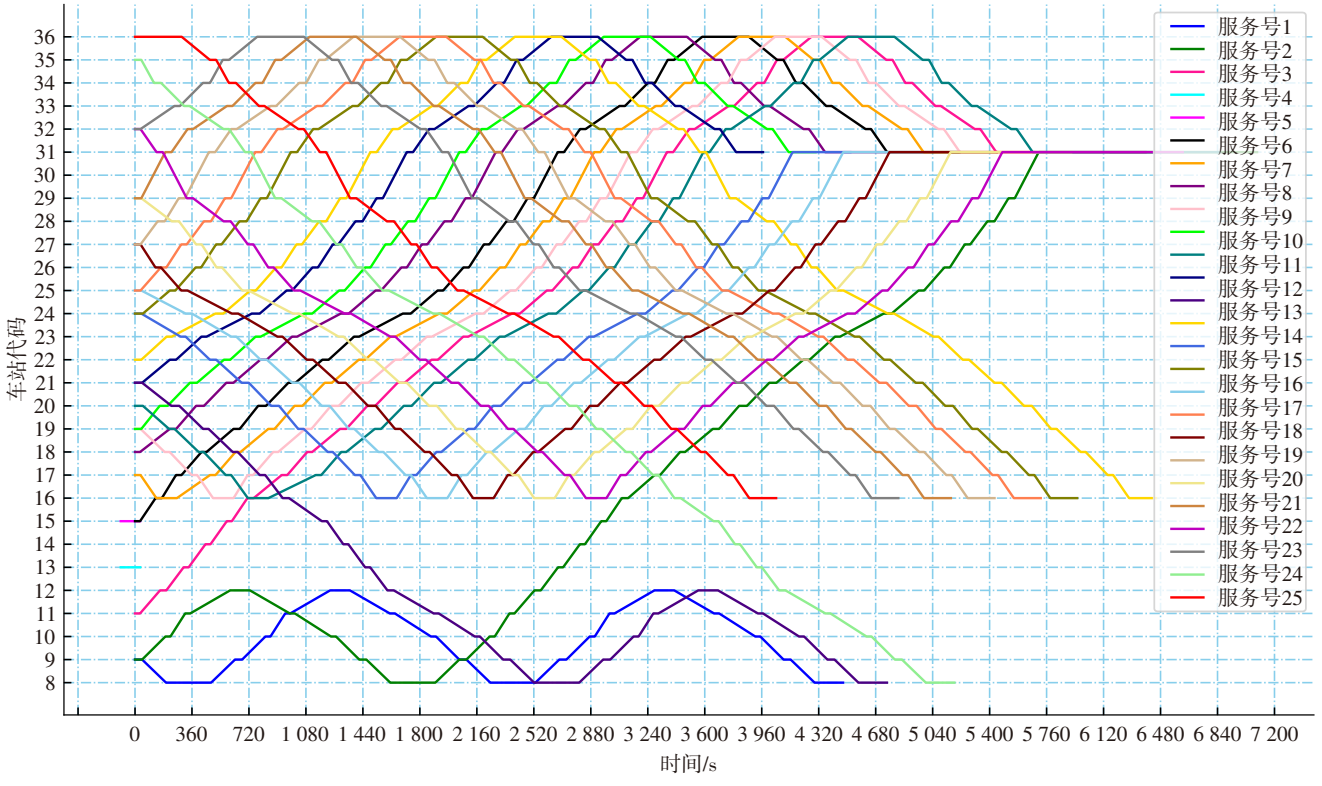


图12　运营结束后优先回场段计划运行图效果

Fig.12　Effect of scheduled train working diagram for priority return to depot after operation

通，如果瓶颈区上行或下行列车连续通过数量超过限定值 ΔN，列车转而选择其他可行动作。大小交路模式如图 13 所示，该模式下列车绕小交路运行，瓶颈区空闲且符合 ΔN 限制条件时，列车可通过瓶颈区贯通运行。

在大小交路模式下，通过对上下行连续通过数量 ΔN 的限制，生成计划运行图，大小交路方案自动生成计划图效果如图 14 所示。不约束 ΔN 时，下行列车的数量远多于上行列车数量，此时上行的乘客候车时间较长。约束 ΔN 时，列车上下行通过数量维持稳定。

不同的 ΔN 对计划运行图有一定影响，列举指定时间范围内不同 ΔN 时瓶颈区的运力、最大行车间隔、平均候车时长和乘客换乘率数据，结果分析如表 5 所示。其中，瓶颈区运力统计了指定时间内运行列次数量；最大行车间隔统计了瓶颈区内中间车站邻近 2 条计划线之间的到达时间间隔；平均候车时长是瓶颈区所有列车的平均行车间隔；乘客换乘率计算公式如下。

$$Rate = \left(2 \cdot SumNum - TmpNum\right)/2 \cdot SumNum \cdot 100\% \tag{13}$$

式中：$SumNum$ 表示正常情况下瓶颈区通过的列车总数，列；$TmpNum$ 表示故障情况下经过瓶颈区列车数量，列。

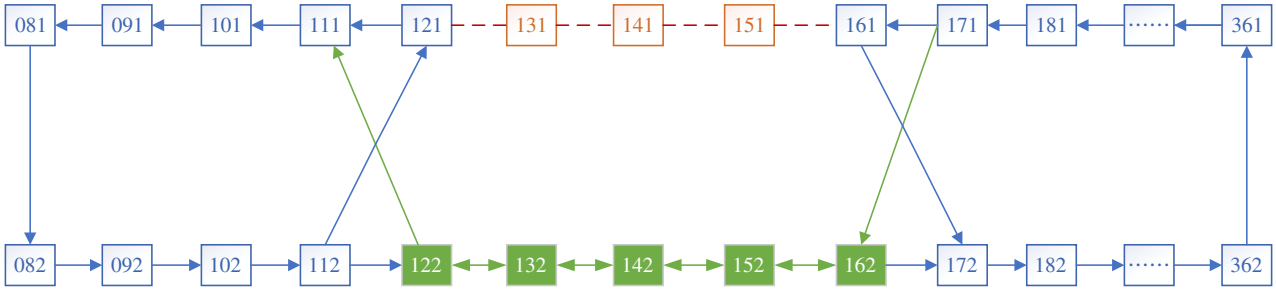
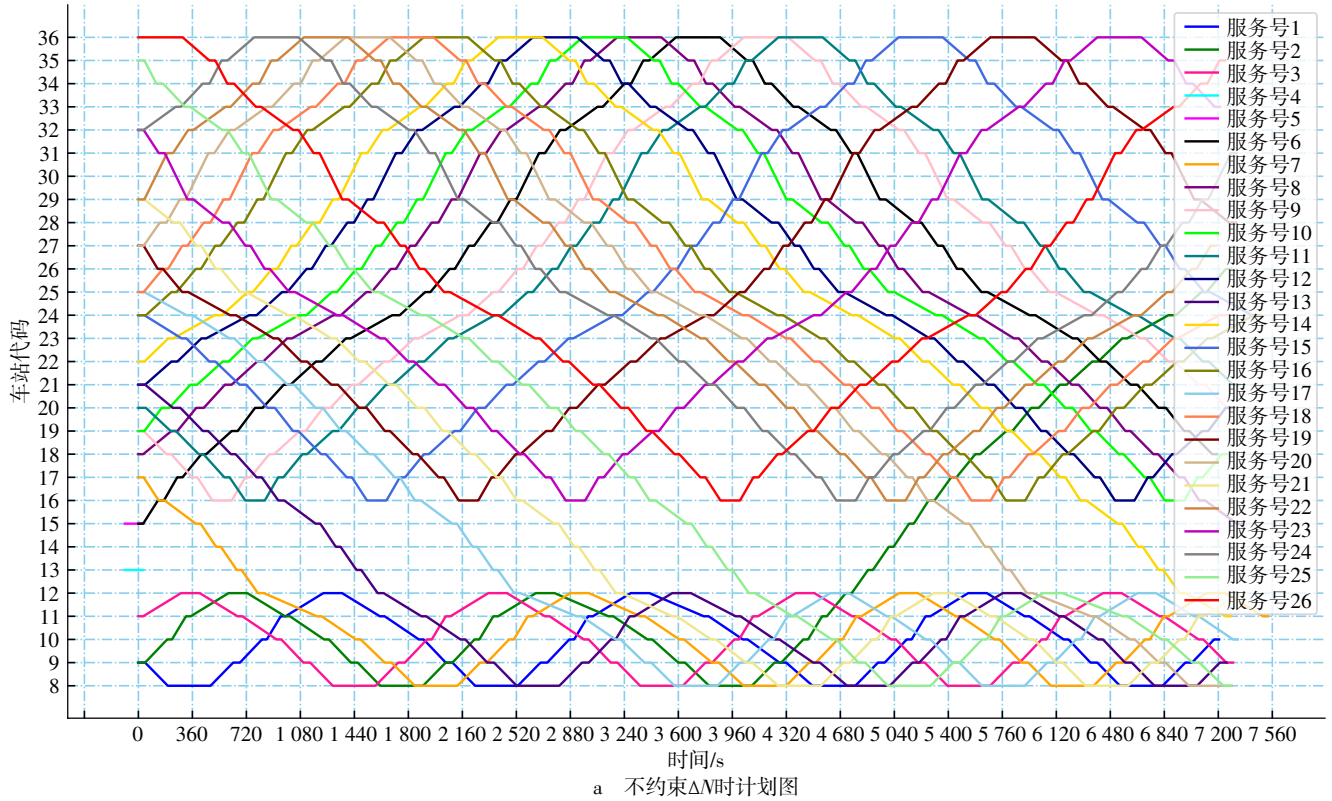


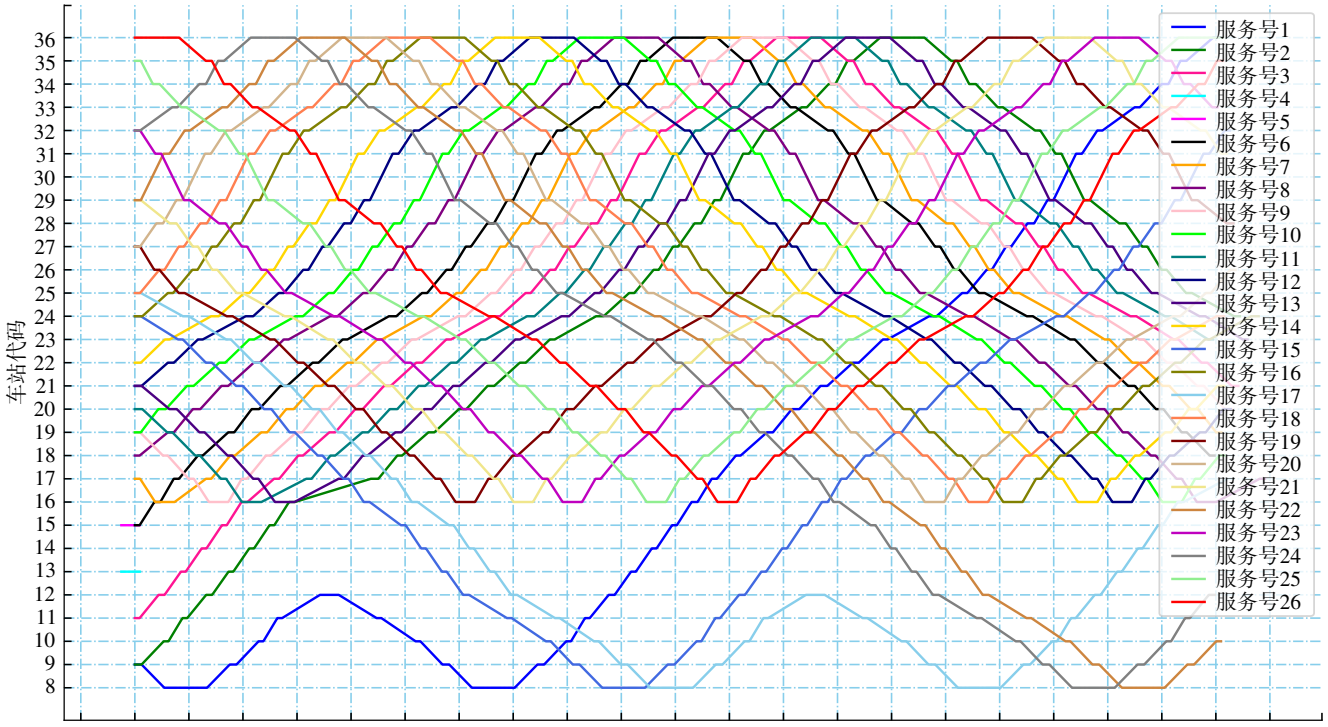
图 13　大小交路模式

Fig.13　Large and small loop operation mode



a　不约束ΔN时计划图

a　Scheduled train working diagram without constraining ΔN



b　ΔN等于2时计划图

b　Scheduled train working diagram when ΔN equals 2

图14　大小交路方案自动生成计划图效果

Fig.14　Effect of automatically generated scheduled train working diagram for large and small loop operation scheme

由表5可以看出，不约束通行数量时，运力较大，ΔN越小越好平衡行车间隔。调度员可以根据需关注的指标或者经验设置合适的ΔN。

表5　结果分析

Tab.5　Result analysis

分析指标	正常情况	不限制ΔN	ΔN=1	ΔN=2	ΔN=3
运力/列次	18	7	6	9	12
最大行车间隔/min	6	78	46.4	55.6	76.3
平均候车时长/min	6	15	20	13.3	10
乘客换乘率/%	0	77.8	83.3	75	66.7
计算耗时/ms	953	947	791	772	756

3.4.2　小交路+穿梭模式策略

为充分利用瓶颈区，调度员也可使用小交路+穿梭模式，即局部决策时鼓励使用小交路动作。指定一列车在瓶颈区来回穿梭，其余列车按小交路运行，小交路+穿梭模式如图15所示。这种方式可保持瓶颈区利用率高、运力大、行车间隔最优。

小交路+穿梭模式计划图如图16所示。这种情况与大小交路模式下ΔN等于1时效果相似(见图10a)，显然穿梭模式下列车对瓶颈区的利用率更高，但是穿梭模式下，跨越故障区域的乘客要换乘2次，影响乘客乘车体验，因此2种策略各有利弊。

小交路+穿梭模式与大小交路混跑模式生成计划运行图相关指标对比，穿梭模式结果分析如表6所示，穿梭模式瓶颈区运力相对更高，行车间隔均匀，但穿梭模式下乘客需要通过瓶颈区时，必须换乘。

本方法具有一定的鲁棒性，线路畅通时也能根据列车位置生成对应的计划运行图，线路畅通时计划图如图17所示。

3.5　实例效果

实际生产运营中，某线路供电臂失电造成线路部分区域单边中断运行，从线路故障到恢复运营耗时1 h40 min左右。调度员通过人工调度行车，实现单边双向行车2列次，两侧小交路分别行车3列次和5列次，中断行车39 min，清客8列。某线路拓扑图如图18所示，当时故障范围在车站26—29上行线。

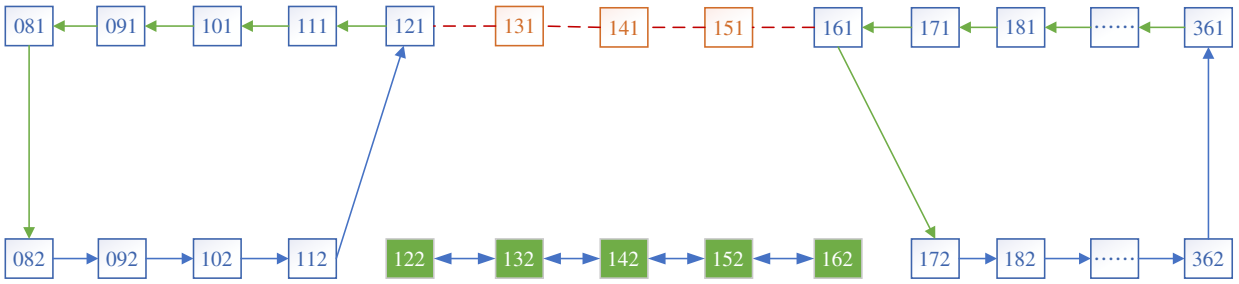


图 15　小交路+穿梭模式

Fig.15　Small loops + shuttle mode

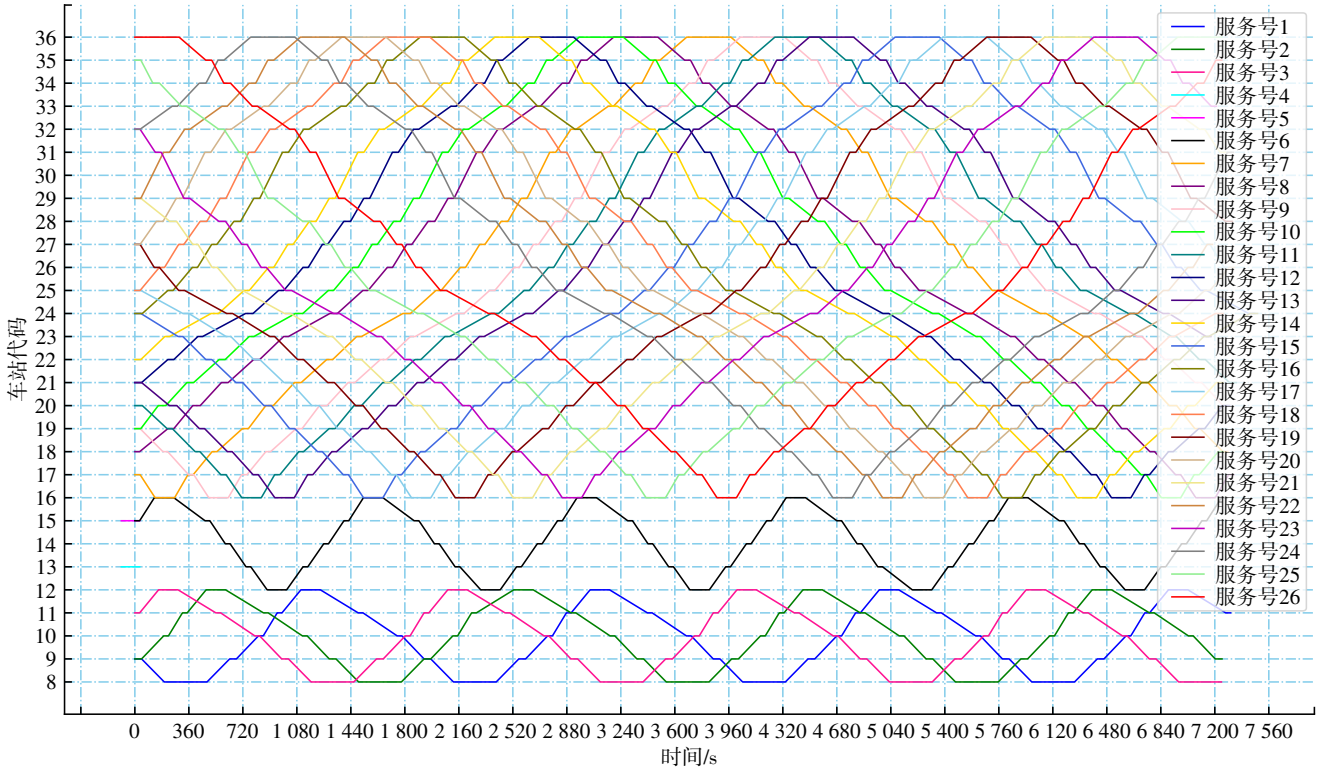


图 16　小交路+穿梭模式计划图

Fig.16　Scheduled diagram of small loops + shuttle mode

表 6　穿梭模式结果分析

Tab.6　Shuttle mode result analysis

分析指标	正常情况	ΔN=1	穿梭模式
运力/列次	18	6	10
最大行车间隔/min	6	46.4	25.3
平均候车时长/min	6	20	12
乘客换乘率/%	0	83.3	100
计算耗时/ms	953	791	859

根据故障位置，延用人工调度方案，采用小交路+穿梭模式方案生成计划运行图，线上均匀分布 15 列车运行。突发故障时，小交路+穿梭模式实例效果如图 19 所示，列车在车站 24—32 下行穿梭，两侧运用小交路行车。在瓶颈区行车至少 4 列次，两侧小交路行车远多于 5 列次，计算耗时 532 ms。通过本方法可提供更优行车方案，缩短故障时列车停运时间，线上列车按计划运行，减少调度员人工介入，能降低调度员工作复杂度，在提高行车调度自动化、智能化水平的同时，降低故障对乘客的出行影响。

4　结束语

研究提供的方法可根据不同故障位置、是否有低速行驶列车、是否接近运营结束时间等情况动态探索列车的可行计划，使用不同的奖惩策略灵活高效生成相应的计划运行图，使列车在线路设备故障

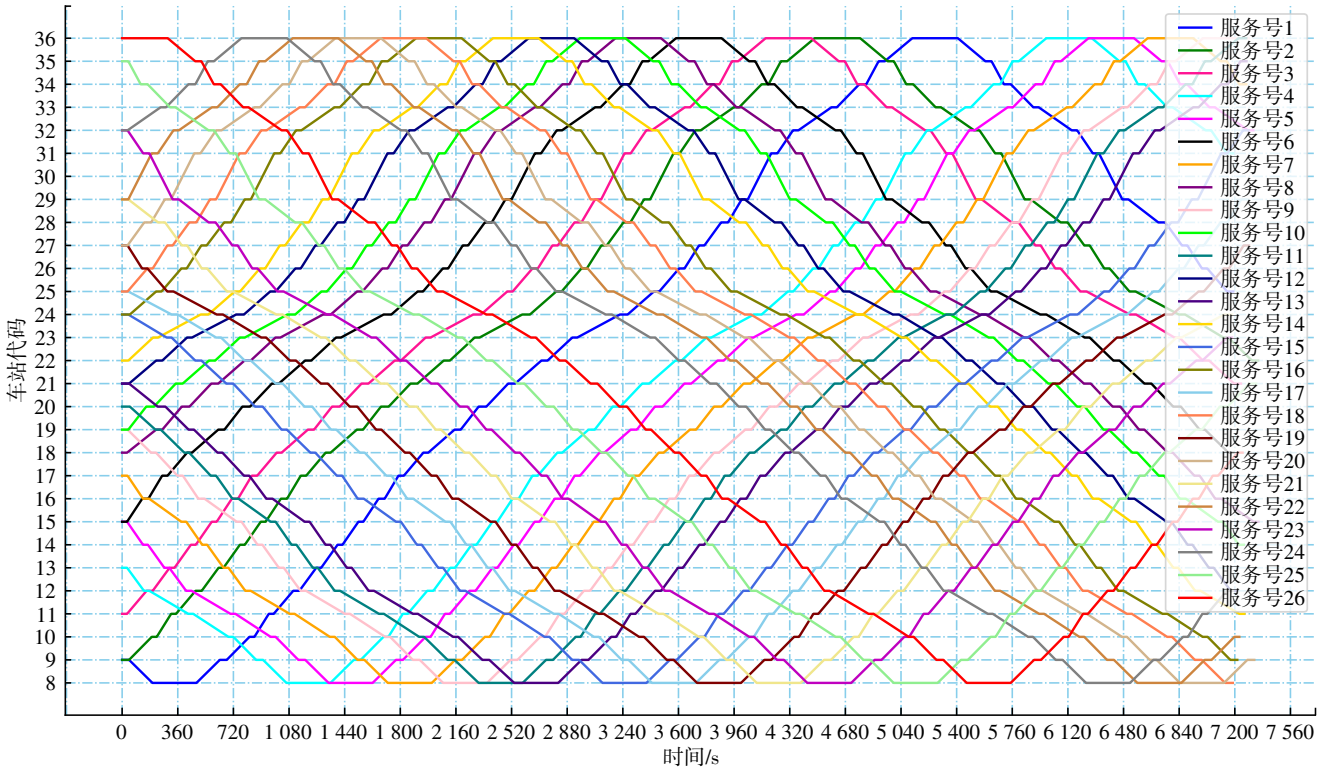


图 17　线路畅通时计划图

Fig.17　Scheduled train working diagram under normal line conditions

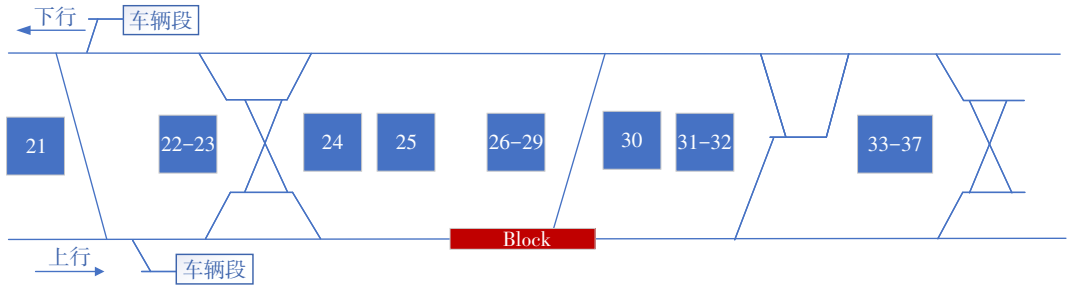


图 18　某线路拓扑图

Fig.18　Topology diagram of a line

的情况下，不必中断运营，且生成的计划运行图与列车当前位置无缝衔接，不存在因使用提前编制的计划运行图导致的列车早晚点问题。该研究可降低行车调度过程中的人工干预，大幅度提高行车调度效率，降低故障影响时间和范围，提升乘客的乘车体验，提高地铁列车服务水平。

参考文献：

[1] 张　菡. 铁路运行图编制系统的现状与思考 [J]. 铁道运输与经济，2015，37 (4)：43–46.

ZHANG Han. Status and Thoughts on TWD Drawing System[J]. Railway Transport and Economy，2015，37(4)：43–46.

[2] 许风志. 面向运行图调整的城市轨道交通乘务排班计划优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[3] 吴　智，翁明棨，刘承希，等. 城际铁路列车开行方案与运行图编制一体化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：115–127.

WU Zhi，WENG Mingqi，LIU Chengxi，et al. Research on Integrated Compilation of Intercity Railway Train Operation Plan and Working Diagram[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：115–127.

[4] 赵天胤，张永祥，王　蔚，等. 考虑客流需求的高速铁路列车运行图加线模型与算法[J]. 西南交通大学学报，2025，60(3)：741–751.

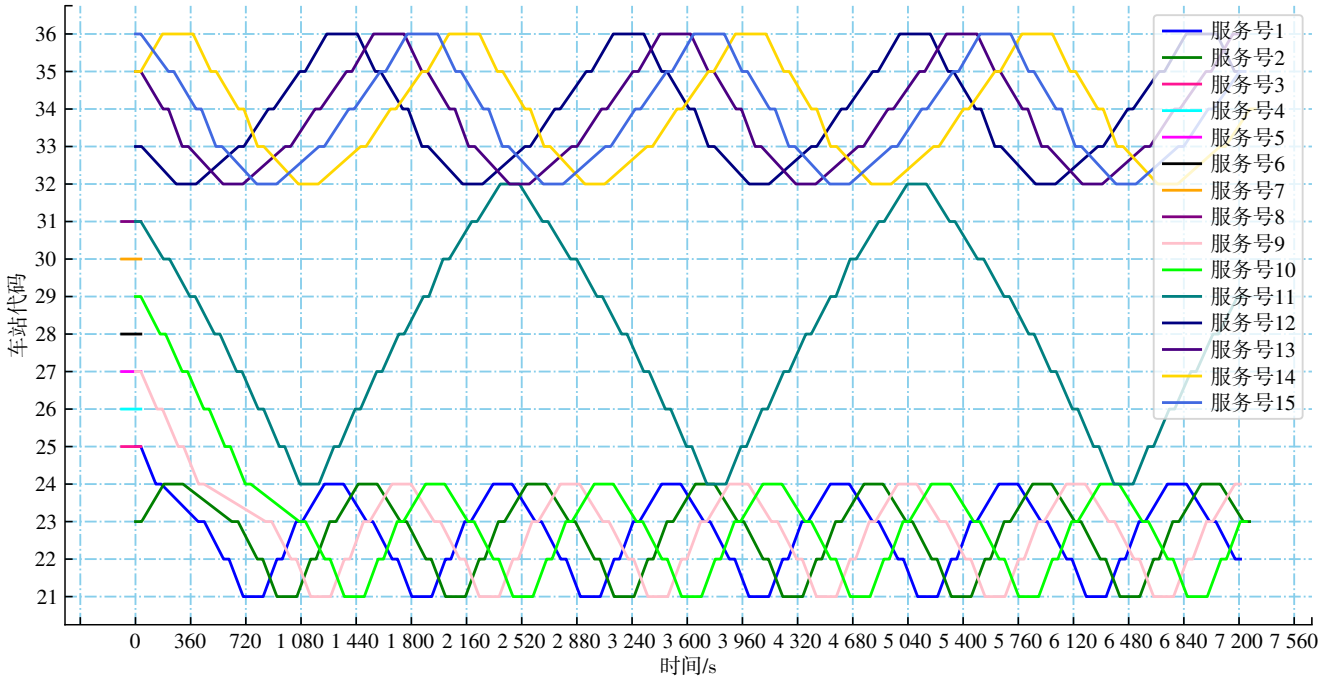


图19　小交路+穿梭模式实例效果

Fig.19　Example effect of small loops + shuttle mode

ZHAO Tianyin, ZHANG Yongxiang, WANG Wei, et al. Optimization Model and Algorithm of Additional Trains Scheduling in High Speed Railway Timetables Considering Passenger Demand[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(3): 741-751.

[5] TIAN X P, NIU H M. Optimizing Train Timetable under Oversaturated Demand Conditions: A Variable-Splitting Lagrangian Approach for Big-*M* Constraints[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(7): 7265-7280.

[6] 陈泽彬. 城市轨道交通列车运行计划动态调整优化方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2024.

[7] 董秋含，唐金金，刘晓宇，等. 城市轨道交通列车运行计划编制与优化研究综述 [J]. 铁道运输与经济，2025，47(4)：48-61，87.
DONG Qiuhan, TANG Jinjin, LIU Xiaoyu, et al. Review of Research on Train Operation Planning and Optimization for Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(4): 48-61, 87.

[8] 宁　健，范家铭，王　鹏，等. 铁路列车运行图优化技术研究综述[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：1-16，29.
NING Jian, FAN Jiaming, WANG Peng, et al. Review of Research on Optimization Technology of Railway Train Working Diagram[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(8): 1-16, 29.

[9] 卢亚菡. 面向不确定需求的城市轨道交通列车运行计划与客流管控协同优化方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2024.

[10] 高天泽，陈军华，徐辉章. 面向换乘体验优化的高速铁路列车运行图调整研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(2)：131-142.
GAO Tianze, CHEN Junhua, XU Huizhang. High Speed Railway Rescheduling Focused on Transfer Experience Enhancement[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(2): 131-142.

[11] 乐　梅，杨　婧，周伯尼，等. 运行图节能优化的数值分析研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2025，22(6)：84-90.
LE Mei, YANG Jing, ZHOU Boni, et al. Numerical Analysis and Study of Energy-Saving Optimization of Train Graph[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2025, 22(6): 84-90.

[12] 肖　晨，王祥进，何跃齐，等. 突发事件下城轨列车运行调整模型及算法分析[J]. 交通与运输，2021，37(5)：66-71.
XIAO Chen, WANG Xiangjin, HE Yueqi, et al. Model and Algorithm of Urban Rail Train Operation Adjustment under Emergencies[J]. Traffic & Transportation, 2021, 37(5): 66-71.

[13] SHARON G, STERN R, FELNER A, et al. Conflict-Based

Search for Optimal Multi-Agent Pathfinding[J]. Artificial Intelligence，2015，219：40-66.

[14] 甘元佳. 城市轨道交通单渡线精细化设计研究[J]. 城市轨道交通研究，2025，28(1)：113-116，124.
GAN Yuanjia. Research on Refined Design of Single Crossover in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit，2025，28(1)：113-116，124.

[15] 贾艳华，丁　伟，李孝普，等. 地铁端头站单线双向运行模式客流疏运分析研究[J]. 中国安全生产科学技术，2023，19(S1)：182-187.
JIA Yanhua，DING Wei，LI Xiaopu，et al. Analysis and Research on Passenger Flow Transportation under Single-Line Bidirectional Operation Mode of Metro Terminal Station[J]. Journal of Safety Science and Technology，2023，19(S1)：182-187.

[16] 王　磊，李思杰，刘志钢，等. 基于供需匹配的城市轨道交通大小交路开行方案优化 [J]. 铁道运输与经济，2023，45(6)：125-131.
WANG Lei，LI Sijie，LIU Zhigang，et al. Optimization of Urban Rail Transit Operation Scheme of Full-Length and Short-Turning Routes Based on Supply and Demand Matching[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(6)：125-131.

[17] 何必胜，石宇航，黄永龙，等. 市域铁路与城市轨道交通贯通运行条件下的列车运行图编制策略研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：86-96.
HE Bisheng，SHI Yuhang，HUANG Yonglong，et al. Strategy for Train Working Diagram Construction under Through Operation of Suburban Railway and Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：86-96.

[18] 闫丽霞，高云波，李云骢. 城市轨道交通移动闭塞列控系统列车追踪间隔研究[J]. 城市轨道交通研究，2020，23(3)：34-37.
YAN Lixia，GAO Yunbo，LI Yuncong. Train Tracking Interval of Moving Block Train Control System in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit，2020，23(3)：34-37.

(责任编辑　魏　然)

(上接第90页)

Heavy Haul Railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2023，23(1)：141-151.

[12] 柳佳音. 基于车流推算的铁路动态运能瓶颈识别方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2023.

[13] 朱芮奇. 基于铁路货运综合管理指挥系统的车流推算模型的优化[D]. 北京：北京交通大学，2023.

[14] 薛　锋，刘泳博，户佐安，等. 基于动态罚函数的铁路车流分配与径路优化模型[J]. 西南交通大学学报，2022(5)：941-948，959.
XUE Feng，LIU Yongbo，HU Zuoan，et al. Railcar Traffic Distribution and Route Optimization Model Based on Dynamic Penalty Function[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2022(5)：941-948，959.

[15] 南通市科睿轨道科技有限公司. 一种铁路实时车流推算方法及设备：202411539618. 5[P]. 2025-02-18.

(责任编辑　汪沁萱)