

【交通物流 / Transportation Logistics】

基于安全约束的大型高铁站到发线运用调整优化

张毅¹, 李季涛¹, 王军²

1) 大连交通大学交通工程学院, 辽宁大连 116028; 2) 中国铁路沈阳局集团有限公司金州站, 辽宁大连 116600

摘要: 为解决列车晚点时大型高铁站到发线运用计划的调整问题, 以衔接动车所的大型高铁站为研究对象, 基于接发车进路占用机理, 综合考虑车站行车与调车作业特点以及进路分段解锁特性, 构建多目标优化模型. 该模型以最小化列车总晚点时间和到发线占用偏离原计划程度为目标, 并引入了行调作业冲突疏解、分段解锁条件下进路冲突疏解等安全约束. 针对模型的多目标特性, 设计一种融合快速非支配排序策略的多目标离散型鲸鱼优化算法. 以某衔接动车所的大型高铁站为例进行实验验证, 结果表明, 在3列列车长时间晚点的不利情况下, 算法可收敛至6组Pareto最优解, 均能在保障行车安全的前提下实现良好的调整效果, 为大型高铁站晚点情况下的到发线运用调整提供有效决策支持.

关键词: 交通运输规划与管理; 大型高铁站; 列车晚点; 到发线运用调整; 安全约束; 多目标优化; 鲸鱼优化算法

中图分类号: U292.8

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.04473

Optimization of arrival and departure track utilization in large high-speed railway stations based on safety constraints

ZHANG Yi¹, LI Jitao¹, and WANG Jun²

1) School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning Province, P. R. China

2) Jinzhou Railway Station, China Railway Shenyang Group Co. Ltd., Dalian 116600, Liaoning Province, P. R. China

Abstract: To address the issue of adjusting track assignment plans for arrivals and departures at large high-speed railway stations during train delays, this study investigates the occupation mechanism of the arrival and departure tracks for electric multiple unit (EMU) trains in major high-speed railway stations. By taking into full account the characteristics of train operations, shunting activities, and segmented route release mechanisms, a multi-objective optimization model is constructed. The model aims to minimize both the total delay time of trains and the deviation from the original schedule for delayed trains, while incorporating safety constraints such as the uniqueness of train occupation of station resources, safety interval time for arrival and departure tracks, resolution of train scheduling conflicts, and resolution of train route conflicts under segmented unlocking conditions. To solve the multi-objective problem in the arrival and departure track adjustment model, a fast non-dominant sorting whale optimization algorithm (FNSWOA) is designed. An experimental case study on a major high-speed railway station connected to an EMU depot demonstrates the algorithm's effectiveness. Under the adverse condition of significant delays for three

Received: 2024-07-01; **Revised:** 2024-12-16; **Accepted:** 2025-01-23; **Online (CNKI):** 2025-04-07

Foundation: Natural Science Foundation Program of Liaoning Province (2023-MS-273)

Corresponding author: Professor LI Jitao (to_ljitaotao@djtu.edu.cn)

Citation: ZHANG Yi, LI Jitao, WANG Jun. Optimization of arrival and departure track utilization in large high-speed railway stations based on safety constraints [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(4): 473-481. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



trains, the algorithm converges to six sets of Pareto-optimal solutions. All solutions ensure operational safety while achieving favorable adjustment results, providing effective decision support for track assignment adjustments during delays in large high-speed railway stations.

Key words: transportation planning and management; large high-speed railway stations; train delay; adjustment of the use of arrival and departure lines; safety constraints; multi-objective optimization; whale optimization algorithm

大型高铁站具有衔接方向多、接发车密集及作业类型复杂等特点. 受制于车站接发车设备资源的有限性, 在车站衔接方向上一旦存在列车晚点情况, 初始晚点列车易与其他正点列车产生安全冲突, 引发列车晚点传播. 因此, 需对到发线运用计划进行及时调整, 以尽快恢复正常行车秩序.

列车晚点情况下到发线运用调整问题常采用最优化方法通过调用求解器或设计启发式算法进行求解. ZENG 等^[1]在保证列车占用到发线合理性的基础上, 以减少列车总延误时间和旅客不便性为目标, 构建混合整数规划模型, 并设计遗传退火混合算法求解; 任禹谋等^[2]考虑到发线运用计划调整分段的衔接关系, 引入滚动时域的动态调整策略, 并采用遗传算法求解; 廉志斌等^[3]综合考虑列车等级及类型等特点, 提出列车晚点下权重设置方法, 以晚点最小和实际方案偏离原方案程度最小为目标构建多目标优化模型, 同时采用线性加权法将模型归一成单目标优化问题, 并设计遗传算法求解; JÁNOŠÍKOVÁ 等^[4]在考虑乘客便捷性基础上, 以最小列车晚点时长和最大列车占用到发线分配合理性为优化目标, 构建混合整数调整优化模型; 马骊等^[5]以列车站内作业过程为决策对象, 考虑咽喉区道岔组均衡利用率等设备因素, 构建编制与调整两个层面的列车进路分配优化模型, 采用交互式线性和通用优化求解器(linear interactive and general optimizer, LINGO)的分支定界算法求解; 丁舒忻等^[6]构建混合整数规划模型, 以最小化列车晚点为第 1 优化目标, 采用分层序列法进行求解; 彭其渊等^[7]考虑到发线与咽喉区制约关系, 构建混合整数线性规划模型, 设计带“前探”策略的分支定界算法, 调用 CPLEX 求解器进行求解; 张英贵等^[8]将到发线、咽喉区进路及区间视为加工对象, 构建复合排序模型, 设计模拟退火算法求其优化解; 王宇晴等^[9]从列车运行图与到发线运用协同调整的角度出发, 构建多目标优化模型, 运用分层序列思想设计鸽群算法进行求解; 查伟雄等^[10]考虑列车运行图和车站到发线运用调整之间的制约关系, 提出考虑列车运行图偏离程度最小和到发线偏离原计划程度最小的双

层规划模型; 张伯男等^[11]考虑轨道电路分段解锁特点, 细分列车进站逻辑流程, 提升到发线的调整精度; 郝炜宁等^[12]考虑特殊作业情景下禁止接发车的情况, 将安全约束抽象为逻辑资源, 实现列车作业特定安全需求. 此外, 还有研究围绕到发线运用冲突识别^[13]和列车晚点预测^[14]展开, 为列车晚点情况下的到发线调整问题提供理论参考.

既往研究主要以高铁客运站为研究对象, 安全约束多为常规性约束, 对衔接动车所的大型高铁站特定安全约束研究较少; 针对分段解锁条件下列车进路冲突疏解也有待进一步探讨. 衔接有动车所的大型高铁站承担大量始发、终到列车的出、入所工作, 兼具行车与调车两类作业. 本研究考虑行调作业冲突疏解及分段解锁条件下进路冲突疏解等安全约束, 构建多目标优化模型, 并设计引入快速非支配排序的多目标鲸鱼算法, 在保证求解效率和质量的基础上, 为此类大型高铁站到发线运用调整方案提供决策支持.

1 问题描述

1.1 动车组列车接发车进路占用机理

到发线运用计划规定了在本站作业列车的到发线占用情况, 高铁站多采用中国列车运行控制系统 3 级 (China train control system-3, CTCS-3) 为基础的一次占用, 分段解锁”进路信号开放形式, 即列车经过一段轨道电路区段后, 该轨道电路区段即可解锁, 从而安排其他列车进路^[15]. 客运站列车类型根据作业性质分为停站通过列车、不停站通过列车、终到列车、始发列车及折返列车 5 类, 始发、终到等不载客列车的出、入所作业为调车作业; 其他类型旅客列车均可视为接、发车行车作业. 以折返旅客列车 G16 / G17 为例, 列车占用站内进路时间如图 1.

在图 1 中, 列车 G16 / G17 的接、发车进路信号开放时间为 T_i^{ob} 、 T_i^{ob} , 结束占用时间为 T_i^{re} 、 T_i^{de} ; 列车进站时刻为 T_i^e , 到达时刻为 T_i^r ; 列车出发时刻为 T_i^d . 其中, T_i^e 至 T_i^r 与 T_i^d 至 T_i^{de} 时间段为列车在咽喉

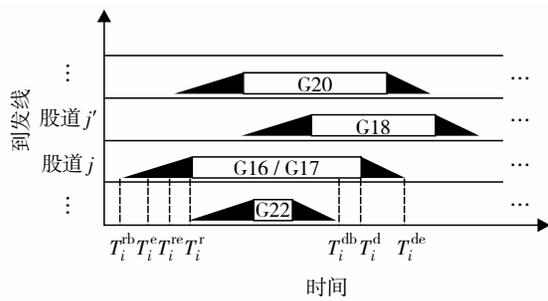


图1 G16/G17列车占用站内进路时间

Fig. 1 Occupancy time of station internal routes of train G16/G17.

区进路的走行时间, 该时间内轨道区段可随列车出清而解锁. 对于调车作业环节其提前开放进路信号的时间可忽略不计.

1.2 晚点情况下列车冲突风险

初始晚点的动车组列车受车站设备资源限制, 容易与后续正点列车发生冲突, 从而造成晚点传播. 列车冲突在时间和空间上主要体现为: 咽喉区接发车进路冲突、到发线安全使用间隔冲突、列车晚点情况下追踪间隔时间冲突及《车站行车工作细则》(以下简称《站细》)规定的其他冲突. 若配备有动车所的大型高铁站同时具备行车与调车两类作业时, 为防止行调作业冲突, 保证旅客列车行车作业安全, 规定与接发旅客列车进路没有隔开设备或脱轨器的线路, 在旅客列车接车和发车前后的一段时间内, 不允许向能进入接发列车进路的方向调车, 这一时间段称为停调时机^[15]. 为疏解上述冲突, 车站调度员需根据初始晚点列车情况及车站原到发线

运用计划和设备信息, 调整现有到发线运用计划, 在确保安全的同时, 尽可能减少对正常行车秩序的影响.

2 模型构建

2.1 模型假设

本研究模型假设: ① 已知车站布局、线路设备和《站细》规定的各项作业时间标准; ② 大型高铁站的接发列车信息已知; ③ 动车所能力不受限制; ④ 初始晚点列车不会发生进一步晚点; ⑤ 列车经过进路中每个轨道区段的时间相同.

2.2 模型参数说明

在调整到发线运用计划时, 需统筹考虑列车占用到发线和咽喉区的走行进路. 本模型的决策变量及其说明见表1, 其他到发线运用调整优化模型参数见表2.

表1 到发线运用调整模型决策变量及其说明

Table 1 Decision variables for the application of adjustment models in the delivery line

决策变量	说明
t_{ij}	列车 i 是否占用到发线 j , 占用 $t_{ij} = 1$; 否则 $t_{ij} = 0$
r_{ij}^w	列车 i 占用到发线 j , 是否选择第 w 条接车进路, 选择 $r_{ij}^w = 1$; 否则 $r_{ij}^w = 0$
p_{ij}^k	列车 i 占用到发线 j , 是否选择第 k 条发车进路, 选择 $p_{ij}^k = 1$; 否则 $p_{ij}^k = 0$
T_i^{sr}	列车 i 实际到达时刻
T_i^{sd}	列车 i 实际发车时刻

表2 到发线运用调整优化模型参数及其说明

Table 2 Adjustment and optimization of model parameters for the use of arrival and departure lines

符号	说明	符号	说明
L	列车集合, 其中, 元素编号为 i ; 总数为 n . L 包括通过列车集合 L_z (i_z 为通过列车编号, $i_z \in L_z, L_z \subseteq L$)、出库调车作业列车集合 L_d (i_d 为调车作业列车编号, $i_d \in L_d, L_d \subseteq L$) 和需进行上水作业列车集合 L_s (i_s 为上水列车编号, $i_s \in L_s, L_s \subseteq L$)	$e_{ii'}$	列车 i 与 i' 走行进路所包含的轨道电路区段数量, $e_{ii'}$ 为两进路结束冲突的最后一段轨道电路区段顺序号
G	到发线集合, 到发线编号为 j , 总数为 m , $j \in G$. 其中, 正线集合 $G_p \subseteq G$; 上水线路集合 $G_s \subseteq G$	T_{stop}	接车作业产生停调时机时间范围
R_w	连接到发线 j 的咽喉区接车进路集合, 接车进路编号为 w . R_w^S 和 R_w^X 分别表示上、下行接车进路集合	T'_{stop}	发车作业产生停调时机时间范围
P_k	连接到发线 j 的咽喉区发车进路集合, 发车进路编号为 k , P_k^S 和 P_k^X 分别表示上、下行发车进路集合	T_u	列车追踪间隔时间
h_i^c	分段解锁条件下进路发生冲突的轨道电路区段解锁时间	T_d	调车作业时间
T_y	大型高铁站上、下行咽喉区走行时间, T_S 和 T_X 分别为上、下行咽喉区进路走行时间, $T_S, T_X \subseteq T_y$	T_{safe}	到发线安全使用间隔

2.3 目标函数

1) 到发线运用计划调整后的所有列车总晚点时间 z_1 最小, 即

$$\min z_1 = \sum_{i=1}^n (T_i^{sr} - T_i^r) + \sum_{i=1}^n (T_i^{sd} - T_i^d) \quad (1)$$

2) 调整后到发线运用计划与原计划偏离程度最小, 即

$$\min z_2 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n q_{ij} t_{ij} \quad (2)$$

其中, z_2 为调整计划偏离计划程度的权值; q_{ij} 为晚点列车偏离原到发线方案的惩罚值. 为减小列车占用到发线偏离原计划程度, 减少因到发线变更产生的旅客额外走行时间, 设晚点列车实际占用到发线为原到发线, 即为 0; 占用相邻到发线为 5; 占用间隔 1 到发线为 10; 间隔 2 到发线为 15; 间隔 3 到发线及以上为 100.

2.4 安全约束

1) 列车实际占用到发线时刻不得早于图定方案, 即

$$T_i^{sr} \geq T_i^r, T_i^{sd} \geq T_i^d \quad (3)$$

2) 晚点列车停站时间满足图定停站时间, 即

$$T_i^{sr} - T_i^{sd} = T_i^r - T_i^d \quad (4)$$

3) 同一到发场的同方向到达、出发旅客列车需满足最小列车追踪间隔时间, 即

$$C_{i' i} |T_{i'}^{sr} - T_i^{sr}| \geq C_{i' i} T_u, \quad i, i' \in L \quad (5)$$

$$C_{i' i} |T_{i'}^{sd} - T_i^{sd}| \geq C_{i' i} T_u, \quad i, i' \in L \quad (6)$$

其中, 若 i 和 i' 到发场相同且同向, $C_{i' i} = 1$; 否则, $C_{i' i} = 0$.

4) 1 列列车仅占用 1 条到发线, 即

$$\sum_{j=1}^m t_{ij} = 1, \quad \forall i \in L, \forall j \in G \quad (7)$$

5) 占用同一到发线的相邻两列车需满足最小到发线安全间隔时间, 即

$$t_{ij} t_{i'j} (T_{i'}^{sr} - T_i^{sd}) \geq t_{ij} t_{i'j} T_{safe}, \quad \forall i, i' \in L, i' > i, \forall j \in G \quad (8)$$

6) 每 1 列车仅允许选择 1 条接、发车进路, 即

$$\sum_{j=1}^m t_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{w=1}^p r_{ij}^w = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^q p_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in L \quad (9)$$

7) 需进行上水作业的列车应接入具备相应设备的到发线, 即

$$\sum_{i \in L} \sum_{j \in G} t_{ij} = a \quad (10)$$

其中, a 为上水列车总数.

8) 通过列车只能从正线通过, 即

$$\sum_{j \in G_p} t_{i,j} = 1, \quad i_z \in L_z \quad (11)$$

9) 旅客列车在接车和发车前的停调时机范围内不允许进行进路冲突的调车作业 (指出库调车), 即

$$g_{i_d} (T_i^r - T_{i_d}^r) \geq g_{i_d} T_{stop}, \quad \forall i \in L, i > i_d, \forall i_d \in L_d \quad (12)$$

$$g_{i_d} (T_i^r - T_i^r) \geq g_{i_d} T_d, \quad \forall i \in L, i_d > i, \forall i_d \in L_d \quad (13)$$

$$\varphi'_{i_d} g_{i_d} (T_i^d - T_{i_d}^d) \geq \varphi'_{i_d} g_{i_d} T'_{stop}, \quad \forall i \in L, \forall i_d \in L_d \quad (14)$$

$$\varphi'_{i_d} g_{i_d} (T_i^r - T_{i_d}^d) \geq \varphi'_{i_d} g_{i_d} T_d, \quad \forall i \in L, \forall i_d \in L_d \quad (15)$$

由于入库调车为动车所方向, 本约束仅涉及调车方向为到发场的出库调车, 其中, 若 i 的出发时间晚于 i_d 的到达时间, $\varphi'_{i_d} = 1$, 否则 $\varphi'_{i_d} = 0$. g_{i_d} 为判断行调冲突的 0-1 变量, 若发生冲突 $g_{i_d} = 1$, 否则 $g_{i_d} = 0$.

10) 分段解锁条件下列车进路冲突疏解, 即

$$o_{i' i}^{wk} p_{i' j}^k r_{i' j}^w (T_{i'}^{db} - T_i^e) \geq o_{i' i}^{wk} p_{i' j}^k r_{i' j}^w h_c^r, \quad k \in P_k, w \in R_w \quad (16)$$

$$o_{i' i}^{w' w'} r_{i' j}^{w'} r_{i' j}^w (T_{i'}^{rb} - T_i^e) \geq o_{i' i}^{w' w'} r_{i' j}^{w'} r_{i' j}^w h_c^r, \quad w, w' \in R_w \quad (17)$$

$$o_{i' i}^{kk'} p_{i' j}^{k'} p_{i' j}^k (T_{i'}^{db} - T_i^d) \geq o_{i' i}^{kk'} p_{i' j}^{k'} p_{i' j}^k h_c^r, \quad k, k' \in P_k \quad (18)$$

$$o_{i' i}^{kw} r_{i' j}^w p_{i' j}^k (T_{i'}^{rb} - T_i^d) \geq o_{i' i}^{kw} r_{i' j}^w p_{i' j}^k h_c^r, \quad k \in P_k, w \in R_w \quad (19)$$

$$\beta_{i' i}^{w' w'} r_{i' j}^{w'} r_{i' j}^w = \beta_{i' i}^{wk} p_{i' j}^k r_{i' j}^w = \beta_{i' i}^{kk'} p_{i' j}^{k'} p_{i' j}^k = \beta_{i' i}^{kw} r_{i' j}^w p_{i' j}^k = 0 \quad (20)$$

$$h_c^r = \begin{cases} \frac{T_y}{e_{i' i}^v} e_{i' i}^v, & w \neq k, w' \neq w, k' \neq k, o_{i' i} = 1 \\ 0, & w \neq k, w' \neq w, k' \neq k, o_{i' i} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$T_y = \begin{cases} T_s, & r_{ij}^w \in R_w^s, p_{ij}^k \in P_k^s, w' = w, k' = k, o_{i' i} = 1 \\ T_x, & r_{ij}^w \in R_w^x, p_{ij}^k \in P_k^x, w' = w, k' = k, o_{i' i} = 1 \end{cases} \quad (22)$$

其中, 在分段解锁条件下列车进路冲突疏解 0-1 变量中, $o_{i' i}^{w' w'}$ 、 $o_{i' i}^{wk}$ 、 $o_{i' i}^{kw}$ 和 $o_{i' i}^{kk'}$ 分别表示列车 i 和 i' 存在接接、接发、发发和发接进路空间冲突, 且列车 i' 的对应接发车进路的开始占用时间晚于列车 i 进入咽喉区的走行开始时间, 若符合则为 1, 否则为 0; $\beta_{i' i}^{w' w'}$ 、 $\beta_{i' i}^{wk}$ 、 $\beta_{i' i}^{kk'}$ 和 $\beta_{i' i}^{kw}$ 分别表示列车 i 和 i' 存在接接、接发、发接和发发进路空间冲突, 且列车 i' 的接发车进路的开始占用时间在列车 i 的接发车进路的开始占用时间与进入咽喉区的走行开始时间区段内,

若符合条件则为1, 否则为0; $\forall i, i' \in L, i \neq i', \forall j, j' \in G$. 式(1)至(22)共同构成到发线运用调整优化模型.

3 算法设计

3.1 快速非支配排序策略的多目标鲸鱼优化算法

到发线运用计划调整问题本质上属于非确定性多项式难(non-deterministic polynomial hard, NP-hard)问题, 多采用启发式算法求解. 鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)^[16]通过模拟座头鲸的泡泡网捕食行为, 进行最优解(猎物)搜索, 具有参数少和全局搜索能力强等特点. 本模型含有两个相互制约的目标函数, 设计引入快速非支配排序策略的多目标鲸鱼优化算法(fast non-dominated sorting multi-objective whale optimization algorithm, FNSWOA)求解其Pareto前沿, 以获得不同偏好下到发线运用调整计划.

3.1.1 泡泡网捕食策略

泡泡网捕食策略包括收缩包围策略和螺旋上升2类策略, 其中, 收缩包围策略根据随机向量系数 $|A|$ 的值又分为随机搜索和向当前最优鲸鱼个体游动2种行为, 螺旋上升策略是鲸鱼个体捕食的另一行动方式, 该机制增强了鲸鱼个体寻优的灵活性, 避免了过早收敛, 鲸鱼在捕食时以50%的概率选择收缩包围策略或螺旋上升策略.

3.1.2 鲸鱼优化算法的快速非支配排序

借鉴第2代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)中快速非支配排序思想, 对每个鲸鱼个体的两个目标值进行快速非支配排序, 使算法快速收敛于1个Pareto前沿.

3.1.3 退火准则

为防止算法中后期出现早熟现象, 引入模拟退火算法中Metropolis准则, 即

$$p_r = \begin{cases} 1, & \Delta f \leq 0 \\ e^{-\frac{\Delta f}{T_p}}, & \Delta f > 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$T_p(t+1) = \eta T_p(t) \quad (24)$$

其中, p_r 为接受当前解的概率; Δf 为新旧个体目标函数差值; η 为降温系数; T_p 为当前温度; t 为迭代次数. 多目标鲸鱼优化算法流程可通过扫描论文右下角二维码查看补充材料图S1.

3.2 泡泡网捕食策略的离散化

3.2.1 鲸鱼个体的编码形式

将每条鲸鱼个体 $X(t)$ 视为1个完整到发线运用计划, 对计划中的每列列车, 编码除包含列车占用到发线这一显性信息外, 还包括其车次、到发时刻、接发车进路、上下行、列车类型、进路占用时间、停调时机占用时间、车场及上水等9类隐性信息, 以实现约束检查与方案寻优, 其编码形式如图2.



图2 鲸鱼个体编码形式

Fig. 2 Whale individual coding form.

3.2.2 收缩包围策略离散化处理

当 $|A| \geq 1$ 时, 鲸鱼个体可随机选择当前种群中的其他个体进行编码交换, 设计交换机制如图3. 可见, 在初始晚点列车之前的列车占用到发线不受影响, 调整计划中对于鲸鱼个体新位置采取随机选择多个编码进行交换. $|A| < 1$ 时的原理与 $|A| \geq 1$ 相同, 只需将 $X_{rand}(t)$ 替换为 $X^*(t)$.

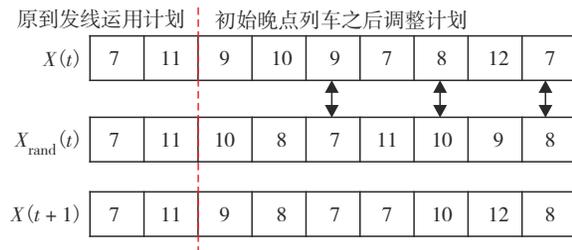


图3 收缩包围策略交换机制

Fig. 3 Contraction and encirclement strategy exchange mechanism.

3.2.3 螺旋上升策略离散化处理

鲸鱼个体向当前种群猎物位置进行螺旋上升运动, 设计其交换机制如图4. 其中, R 为 $[0, 1]$ 的随机数; p 为 $[0, 1)$ 的定值.

3.2.4 违反安全约束处理策略

到发线调整策略均针对鲸鱼个体编码中到发线信息进行变动, 而后依次检查每个约束, 若正在被检查的鲸鱼群中存在违背该约束的个体, 需推迟个

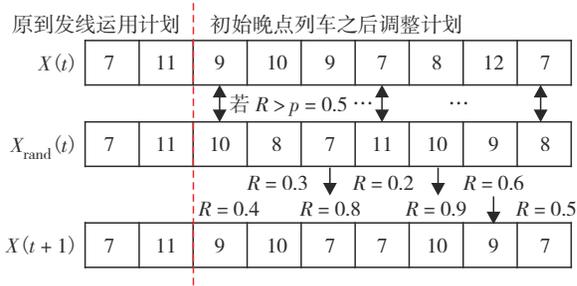


图4 螺旋上升策略交换机制

Fig. 4 Spiral-up strategy exchange mechanism.

体的到发时刻编码信息，并重复检查直至群体完全满足该约束条件。满足条件后检查下个约束，重复上述操作直至所有约束检查完毕。

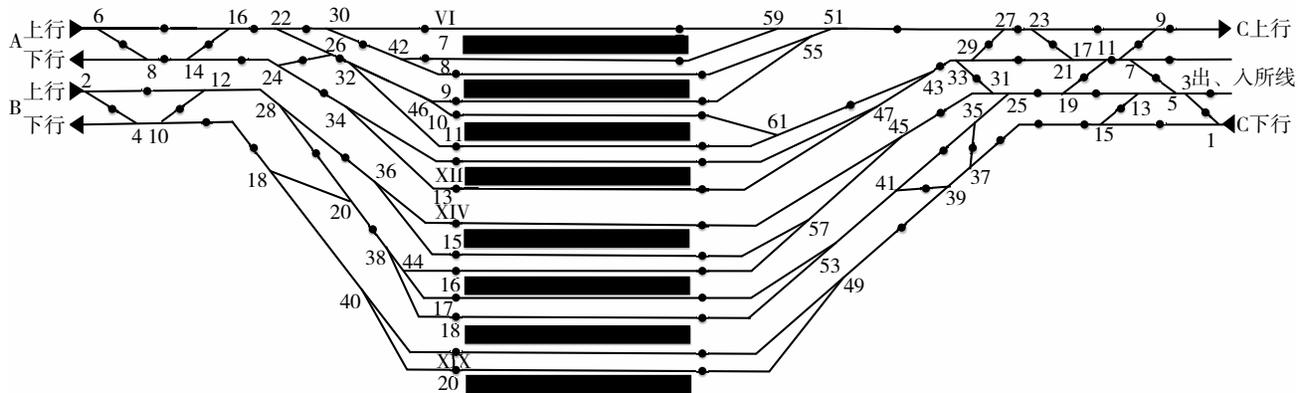


图5 站场拓扑图及轨道电路划分

Fig. 5 Station topology diagram and track circuit division.

表3 A场下行方向列车到发时刻表

Table 3 Train arrival and departure timetable of yard A downward direction

车次	作业	到达	出发	编号	作业	到达	出发	编号	作业	到达	出发
G1	出库	06:13	07:20	G13	出库	07:45	08:29	G25	出库	09:42	10:13
G3	出库	06:35	08:00	G15	出库	08:16	08:38	G27	通过列车	10:38	10:38
G5	出库	07:03	07:32	G17	出库	08:19	09:13	G29	出库	10:50	11:17
G7	出库	07:03	08:13	G19	出库	08:26	08:53	G31	通过列车	10:56	10:56
G9	出库	07:28	07:48	G21	通过列车	08:49	08:49	G33	通过列车	11:26	11:26
G11	通过列车	07:36	07:36	G23	通过列车	09:31	09:31	G35	通过列车	11:48	11:48

表4 A场上行方向列车到发时刻表

Table 4 Train arrival and departure timetable of yard A upward direction

车次	作业	到达	出发	编号	作业	到达	出发	编号	作业	到达	出发
G2	立折-检	06:32	07:06	G14	通过列车	09:32	09:32	G26	通过列车	10:58	10:58
G4	立折	07:28	08:23	G16	立折-检	09:45	10:22	G28	通过列车	11:06	11:06
G6	停站列车	08:02	08:07	G18	立折-水	10:06	11:09	G30	入库	11:31	11:50
G8	立折	08:50	09:19	G20	通过列车	10:10	10:10	G32	立折-水	11:48	12:10
G10	入库	09:15	09:47	G22	停站列车	10:27	10:30	G34	立折	11:53	12:38
G12	立折	09:27	09:53	G24	立折	10:36	11:02	G36	立折-检	12:00	12:29

4 算例分析

4.1 算例描述

算例选取某衔接动车所的大型高铁站。该站规模为8台15线，上行衔接A和B两方向，下行衔接C方向，配备有下行方向动车运用所，分A和B两个方向到发场，其站场拓扑图及进路轨道区段划分情况如图5。A场列车到发时刻表见表3和表4，其中，“水”代表上水车；“检”代表检测车。设到发线安全间隔为6 min，接、发车停调时机分别为5 min和3 min，上、下行咽喉行走时间为3 min，接车作业时间为6 min，发车作业时间为3 min，调车

作业时间为3 min, 追踪间隔时间为4 min. 为增加求解难度, 对A场设置初始晚点列车为G7晚点40 min, G13晚点70 min及G8晚点30 min.

本模型算法基于Python编程实现, 设置鲸鱼群数量50, 迭代次数为100代, $T_p = 1\ 000\ ^\circ\text{C}$, $\eta = 0.95$. 为防止算法在某个目标函数中过分偏离, 设置最终第1支配序列晚点时间不超过100 min, 偏离

程度不超过50, 算法前、后期迭代情况如图6.

在Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz和8.00 Gbytes的RAM上平均用时约55.8 s, 在算法前期, 鲸鱼群体倾向于全局搜索; 后期鲸鱼种群逐渐向当前最优的猎物位置游动, 最终收敛于6组最优Pareto解, 证明改进多目标鲸鱼优化算法能在可接受时间内, 取得较好的优化效果.

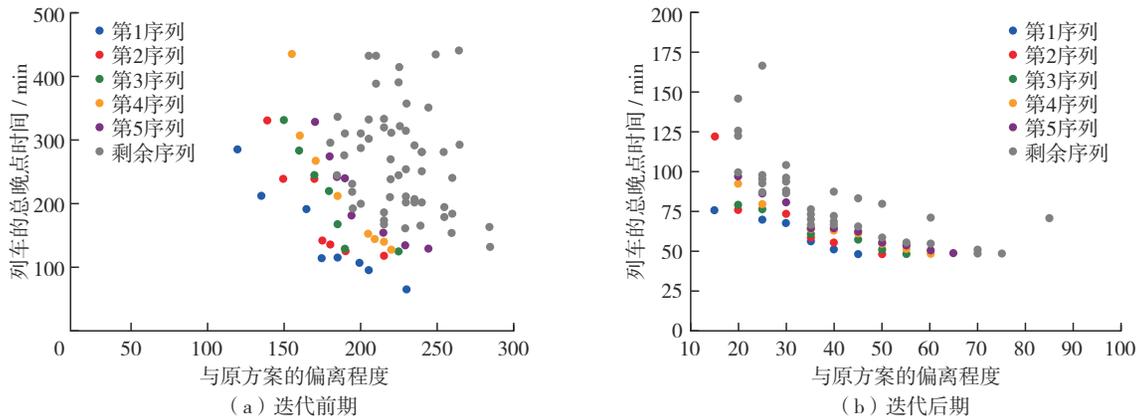


图6 算法前、后期迭代情况

Fig. 6 (a) Initial and (b) final iteration conditions of the algorithm.

4.2 算例分析

以偏离程度最小、晚点程度最大的Pareto解为例, 其图定到发线运用计划如图7, 列车晚点情况下到发线运用调整计划如图8. 其中, 黄色矩形表

示初始晚点列车; 蓝色矩形表示调整后连带晚点列车; 黑色矩形表示原图定列车. 本次调整只涉及A到发场, 对B到发场无影响.

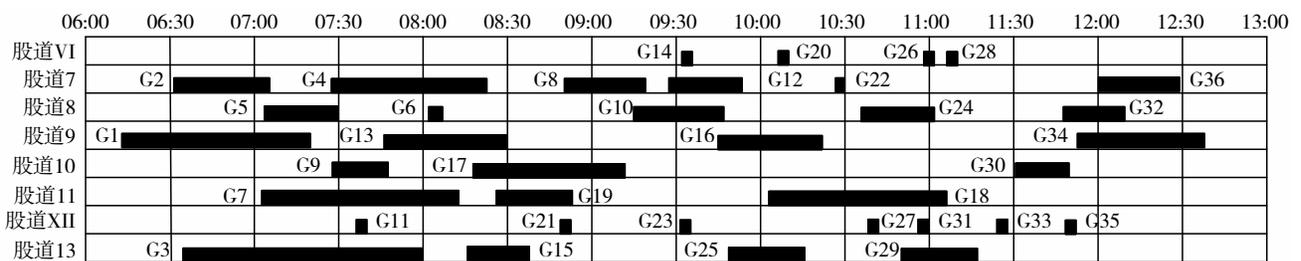


图7 图定列车到发线运用计划

Fig. 7 Scheduled train arrival and departure line operation plan.

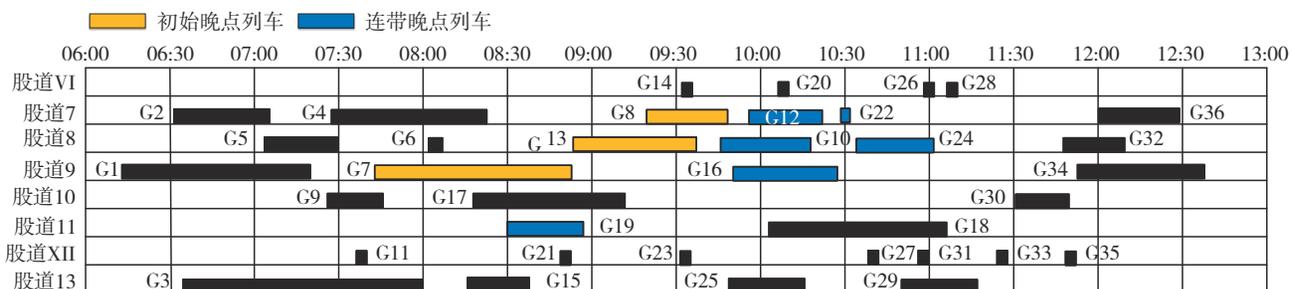


图8 列车晚点情况下到发线运用调整计划

Fig. 8 Adjustment plan for train arrival and departure line operations in case of delays. The yellow and blue bars are for initial and secondary delayed trains, respectively.

在调整计划中, 仅有 G7 和 G13 发生了到发线变化. 初始晚点列车 G7 原占用 11 道, 晚点 40 min 后, 为防止与 G19 到发线占用直接冲突, 从 11 道改 9 道; 初始晚点列车 G13 原占用 9 道, 晚点 70 min 后, 为与 G7 保持到发线安全间隔且避免进一步晚点从 9 道改 8 道.

有 6 列列车受到 G7、G13 及 G8 初始晚点的影响, 发生 2 次晚点共 77 min, 根据违反安全约束处理策略, 此次调整分为两个阶段. 第 1 阶段调整为: G12 为与前车 G8 保持到发线安全间隔, 连带晚点 28 min, 同理, G10 连带晚点 30 min; G19 为与 G7 追踪运行, 晚点 4 min; 同理, G16 为与 G10 追踪运行晚点 4 min; G10 和 G13 存在接发冲突, G13 于 09:39 发车进入上行咽喉, 2 min 后解锁与 G10 接车进路冲突的轨道电路区段, 因此, G10 晚点 2 min; 同理, G12 和 G8 存在接发冲突, G12 晚点 2 min, G22 和 G12 存在接发冲突, G22 晚点 4 min, 但 G19 和 G7 存在发发冲突且无法分段解锁, G19 晚点 2 min.

第 2 阶段调整为: G24 和 G22 存在接接冲突, G24 晚点 1 min. G9 的出库调车作业时间在 G4 的停调时机范围内, 但由于 G9 调车进路与 G4 接车进路有隔开设备, 因此, 不进行调整. 至此所有时间安全约束均已满足.

车站调度员可以根据路网动态调整需求, 选择不同偏好的 Pareto 解, 在 3 列列车同时长时间晚点的情况下, 其余列车连带晚点时间最低可到 48 min, 偏离程度最小仅涉及 2 列列车到发线变化, 达到了优化预期.

结 语

综合考虑列车占用车站资源唯一性、到发线安全间隔、列车追踪间隔、进路冲突疏解及行调冲突疏解等安全约束, 以列车总晚点时间最小和偏离程度最小为目标, 构建到发线运用调整多目标优化模型, 并设计鲸鱼优化算法进行求解. 算例计算结果表明, 在设置 3 列长时间初始晚点列车情况下, 算法在可接受时间内共求得 6 组 Pareto 前沿解, 每组解均可在确保安全约束前提下, 对调整计划起到较好的优化效果. 分段解锁条件下的进路冲突疏解约束可起到一定的列车晚点吸收作用, 在大型高铁站进行调车作业时, 行调冲突安全约束可进一步确保

旅客列车行车安全, 证明模型和算法的有效性, 提高了大型高铁站运输调度效率.

基金项目: 辽宁省自然科学基金计划资助项目(2023-MS-273)

作者简介: 张毅(764147880@qq.com), 大连交通大学硕士研究生. 研究方向: 铁路运输系统优化.

引 文: 张毅, 李季涛, 王军. 基于安全约束的大型高铁站到发线运用调整优化[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(4): 473-481.

参考文献 / References:

- [1] ZENG Qiongfang, HU Ruihua, ZHANG Yinggui, et al. A genetic simulated annealing algorithm for real-time track reallocation in busy complex railway station [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(1): 7706556.
- [2] 任禹谋, 张琦, 袁志明, 等. 基于滚动时域优化的高速铁路车站到发线动态调整研究[J]. *铁道运输与经济*, 2021, 43(2): 96-102.
REN Yumou, ZHANG Qi, YUAN Zhiming, et al. Research on dynamic adjustment of arrival and departure tracks in high-speed railway station based on rolling horizon optimization [J]. *Railway Transport and Economy*, 2021, 43(2): 96-102. (in Chinese)
- [3] 廉志斌, 帅斌, 许旻昊. 列车晚点下高速铁路车站到发线运用计划调整方法[J]. *铁道运输与经济*, 2022, 44(2): 1-7.
LIAN Zhibin, SHUAI Bin, XU Minhao. Operation plan adjustment of arrival and departure tracks at high speed railway station in condition of train delay [J]. *Railway Transport and Economy*, 2022, 44(2): 1-7. (in Chinese)
- [4] JÁNOŠÍKOVÁ Ľ, KAVIČKA A, BAŽANT M. Optimal operation scheduling and platform track assignment in a passenger railway station [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2014, 228(3): 271-284.
- [5] 马驹, 孙建康, 鲁工圆. 高速铁路车站列车进路分配方案的优化与调整[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(1): 122-130.
MA Si, SUN Jiankang, LU Gongyuan. Optimization and adjustment of train route allocation scheme for high speed railway station [J]. *China Railway Science*, 2018, 39(1): 122-130. (in Chinese)
- [6] 丁舒忻, 张涛, 王荣笙, 等. 高速铁路客运站到发线运用方案调整研究[J]. *铁道通信信号*, 2022, 58(8): 32-36.
DING Shuxin, ZHANG Tao, WANG Rongsheng, et al.

- Research on rescheduling of arrival and departure tracks at high-speed railway passenger station [J]. *Railway Signalling & Communication*, 2022, 58(8): 32-36. (in Chinese)
- [7] 彭其渊, 宁佳, 鲁工圆. 大型高铁客运站到发线运用调整模型及算法[J]. *铁道学报*, 2019, 41(1): 10-19.
PENG Qiyuan, NING Jia, LU Gongyuan. Model and algorithm for train platform scheme rescheduling at large high-speed railway station [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(1): 10-19. (in Chinese)
- [8] 张英贵, 陈元, 雷定猷, 等. 高速铁路车站到发线运用实时调整复合排序模型与算法[J]. *铁道学报*, 2023, 45(9): 34-45.
ZHANG Yinggui, CHEN Yuan, LEI Dingyou, et al. Composite scheduling model and algorithm for real-time adjustment of arrival and departure track utilization in high-speed railway stations [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(9): 34-45. (in Chinese)
- [9] 王宇晴, 查伟雄, 万平. 列车运行调整与到发线运用的协同优化研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(22): 9797-9804.
WANG Yuqing, ZHA Weixiong, WAN Ping. Coordinated optimization of train operation adjustment and arrival departure-track operation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(22): 9797-9804. (in Chinese)
- [10] 查伟雄, 周佳宇, 李剑, 等. 基于到发线优选罚值的高速铁路列车运行调整双层优化模型[J]. *北京交通大学学报*, 2023, 47(6): 13-20.
ZHA Weixiong, ZHOU Jiayu, LI Jian, et al. Two-layer optimization model of train rescheduling for high-speed railway based on preferred penalty value of arrival-departure track allocation [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2023, 47(6): 13-20. (in Chinese)
- [11] 张伯男, 姚向明, 赵鹏, 等. 分段解锁下高速铁路车站到发线运用方案调整研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2025, 22(4): 1432-1442.
ZHANG Bonan, YAO Xiangming, ZHAO Peng, et al. Train platform scheme rescheduling in high-speed railway station with route-lock sectional-release mechanism [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2025, 22(4): 1432-1442. (in Chinese)
- [12] 郝炜宁, 李海鹰, 孟令云, 等. 考虑逻辑资源的高铁枢纽车站作业计划调整方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(11): 4405-4416.
HAO Weining, LI Haiying, MENG Lingyun, et al. Optimal train rescheduling and local rerouting in a hub high-speed railway station considering logical resource [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(11): 4405-4416. (in Chinese)
- [13] 林枫, 郭一唯, 杨晓, 等. 基于高速铁路车站分类的到发线运用冲突识别方法研究[J]. *铁道运输与经济*, 2024, 46(12): 137-144.
LIN Feng, GUO Yiwei, YANG Xiao, et al. Conflict identification method for arrival-departure tracks based on high speed railway station classification [J]. *Railway Transport and Economy*, 2024, 46(12): 137-144. (in Chinese)
- [14] 王圣洁, 刘乾义, 文超, 等. 考虑致因的初始晚点影响列车数预测模型研究[J]. *综合运输*, 2024, 46(2): 105-110.
WANG Shengjie, LIU Qianyi, WEN Chao, et al. Prediction model for the number of trains affected by primary delay considering delay causes [J]. *China Transportation Review*, 2024, 46(2): 105-110. (in Chinese)
- [15] 张毅, 李季涛, 孙婉婷, 等. 考虑行调冲突的大型高铁站到发线运用优化研究[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(3): 111-121.
ZHANG Yi, LI Jitao, SUN Wanting, et al. Optimization of departure and arrival track utilization in large high speed railway stations considering conflicts between train movement and shunting activities [J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(3): 111-121. (in Chinese)
- [16] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51-67.

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】



补充材料