

【交通物流 / Transportation Logistics】

高原铁路列车运行图与维修天窗协调优化研究

邓智文^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 田志强^{1,2}, 董傲冉^{1,2}, 李和璧^{1,2}

1) 兰州交通大学交通运输学院, 甘肃兰州 730070; 2) 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 甘肃兰州 730070

摘要: 针对高原铁路列车运行图与维修天窗之间的冲突问题, 对高原铁路列车运行图与维修天窗进行协调优化。综合考虑列车服务水平约束、列车运行约束、列车运行图均衡性约束及维修天窗时间约束, 建立列车总旅行时间最小和维修天窗开设总时长最大的多目标混合整数规划模型。设计基于分层序列的多目标求解算法, 运用Python编程调用杉数求解器(Cardinal optimizer, COPT)求解模型, 并以高原铁路某区段为案例, 验证模型有效性。结果表明, 在考虑列车服务水平和列车运行图均衡性等约束前提下, 本模型能够兼顾列车总旅行时间最短和维修天窗开设时长最长。基于最优解绘制的列车运行图表明, 列车运行图与维修天窗的协调优化结果更符合高原铁路实际旅客运输生产作业需要。研究结果为铁路运营管理部门进一步优化列车运行图编制与维修天窗开设提供科学依据。

关键词: 高原铁路; 列车运行图; 维修天窗; 列车运行约束; 均衡性; 混合整数规划; 分层序列法; COPT求解器

中图分类号: U292.4⁺1; O221.4

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.02216

Coordinated optimization research of train diagram and maintenance window on plateau railway

DENG Zhiwen^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, TIAN Zhiqiang^{1,2}, DONG Aoran^{1,2}, and LI Hebi^{1,2}

1) School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

2) Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: In response to the conflict between the train diagram on the plateau railway and maintenance window, a coordinated optimization of the train diagram and maintenance window for the plateau railway trains is conducted. Considering constraints such as train service level, train operation, train diagram equilibrium, and maintenance window time, a multi-objective mixed integer programming model is established to minimize the total travel time of trains and maximize the total duration of maintenance windows. A multi-objective solution algorithm based on layered sequences is designed, and Python programming is utilized to invoke the Cardinal optimizer (COPT) solver to solve the model. Taking a section of the plateau railway as a case study, the effectiveness of the model is verified. The results indicate that the proposed coordinated optimization model for the train diagram on the plateau railway and maintenance window, under the consideration of constraints such as train service level and train diagram equilibrium, can simultaneously minimize the total travel time of trains and maximize the duration of maintenance windows. The train diagram based on the optimal solution shows that the coordinated optimization results of the train

Received: 2024-05-18; **Accepted:** 2024-10-15; **Online (CNKI):** 2024-12-25

Foundation: National Natural Science Foundation of China (72161023, 71761023); Open Subject Project of Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control (GYSHZ2302)

Corresponding author: Associate professor LIU Bin (liubin0909@mail.lzjtu.cn)

Citation: DENG Zhiwen, LIU Bin, TIAN Zhiqiang, et al. Coordinated optimization research of train diagram and maintenance window on plateau railway [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(2): 216-225. (in Chinese)



diagram and the maintenance window are more in line with the actual passenger transport production operation needs of the plateau railway. The research findings provide a scientific basis for railway operation management departments to further optimize train diagram and maintenance window arrangements.

Key words: plateau railway; train diagram; maintenance window; train operation constraints; equilibrium; mixed integer programming; hierarchical sequencing method; Cardinal optimizer (COPT) solver

列车运行图是铁路运输系统的核心内容, 优化运行图编制对于提高高原地区的铁路运输效率十分重要. 在高原高寒的环境下, 由于维修环境恶劣和维修作业复杂, 对铁路维修天窗的要求也越来越高. 铁路运输的核心重点还在于提高列车服务乘客的水平. 因此, 列车运行图的均衡性是评价其质量的主要指标, 直接影响着车站通过能力和运营调度, 列车运行图与维修天窗的协调优化对于高原铁路的发展建设和旅客满意度的提高具有重要意义.

在列车运行图编制和优化方面, BARRENA 等^[1]使用分支定界算法求解有动态需求的列车运行图编制与优化问题; 周文梁等^[2]建立客运专线列车运行图优化模型, 将列车始发时间域和维修天窗作为约束条件绘制运行图; 王劲^[3]对高速铁路列车运行图和停站方案的一体化编制问题进行研究; 张新等^[4]建立列车停站方案与运行图协同编制模型, 并以京沪高铁为研究对象进行案例分析. 在维修天窗的开设和优化方面也在进行广泛研究, 如 LIDÉN 等^[5]建立了综合考虑列车运行和路网维修计划的混合整数规划模型; VAN AKEN 等^[6]在给定周期运行图中插入施工天窗, 并提出基于周期事件规划理论的调整优化模型; 徐长安等^[7]提出天窗与夜间高铁开行模式组合优化模型. 在维修天窗与列车运行图的协同优化方面, DAO 等^[8]以列车运行受影响最小和线路维修作业总成本最小为目标, 建立维修天窗研究模型; ZHANG 等^[9]则以最小化天窗维修延误成本为出发点, 设计启发式算法在微观层面协同优化运行图和天窗; 张哲铭等^[10]建立双目标混合整数规划模型, 最小化列车总运行时间, 并将维修天窗的实际开设时长与理想时长的总偏差降至最低; 石贇等^[11]构建考虑跨线列车的高速铁路运行图与综合维修天窗一体优化的多目标整数规划模型, 并采用基于二维排序编码的 NSGA-II 算法进行求解; 袁博等^[12]采用整数规划方法, 建立动卧开行日列车运行图与维修天窗协调优化模型. 在列车服务水平的研究方面, 马驹等^[13]综合考量高速铁路运输服务水平内容, 并提供详细的指标量化分析方法; 石敏涵^[14]综合考虑运输效率和服务水平等多个因素, 进行城

际铁路列车运行图协同优化研究. 在列车运行图均衡性方面, 石晶等^[15]以相邻和相间间隔时间方差为指标, 描述和计算列车分布及顺序均衡性; 鲍晶晶等^[16]运用偏差离差建立均衡性指标矩阵; 在高原铁路方面, 彭小倩^[17]结合高寒地区长大坡道条件下高速铁路的特点, 提出综合维修工区布局方法和天窗开设方案; 祝越^[18]通过研究高寒长大坡道客货共线铁路运输组织模式及通过能力, 解决高原高寒地区逐渐增长的客货运需求与铁路运能不足的问题.

针对高原铁路的功能定位和客流特点, 本研究以列车总旅行时间最小及维修天窗开设总时长最大为目标函数, 建立多目标混合整数规划数学模型, 并基于分层序列法进行求解. 以高原铁路某区段为例, 运用 Python 编程调用杉数求解器 (Cardinal optimizer, COPT) 进行算法实现, 得到最优列车运行图编制方案, 并验证了模型的有效性.

1 问题描述

1.1 高原铁路列车运行图与维修天窗协调优化

图1为先编制列车运行图、后安排维修天窗, 只能在列车运行空隙安排维修天窗的分步优化方案; 图2的协同优化方案通过调整 T_2 的发车时刻和 T_1 的停站时间, 使 T_1 越行 T_2 , 增大列车运行空隙时间, 进而增大维修天窗时长. 与分步编制列车运行图与维修天窗的方法相比, 协调优化方法同时调整列车到发时刻与维修天窗的开始和结束时刻, 得到整体最优的列车运行图与维修天窗开设方案.

1.1.1 高原铁路天窗开设时长与时段

在高原地区, 工作环境恶劣和长大坡道多是天

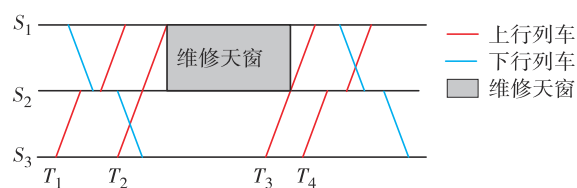


图1 列车运行图与维修天窗分步优化

Fig. 1 (Color online) Optimization of train diagram and maintenance window distribution.

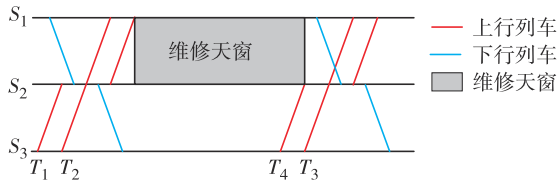


图2 列车运行图与维修天窗协同优化

Fig. 2 (Color online) Coordination optimization of train diagram and maintenance window.

窗开设时长的主要影响因素. 彭小倩^[17]的研究结果表明, 高原铁路天窗时长至少为 4 h. 因此, 为了保证维修天窗的安全性, 本研究提出在天窗总时长不小于 4 h 的前提下, 尽可能延长天窗时间, 以协调运输组织和维修天窗之间的关系, 解决运输与维修之间的矛盾.

相关部门通常将高原铁路列车的运行时段设定在 07:00 至 22:00. 若天窗开设时段不合理, 可能会占用大段有效发车时间, 严重限制旅客列车的到发时间. 因此, 本研究将高原铁路列车维修天窗开设时段设定为当日 22:00 至次日 07:00.

1.1.2 高原铁路天窗设置形式

V 形天窗按照上下行分开设置, 每个区间的天窗时间与相邻区间存在一定错位, 具有以下特点: ① 1 线行车和 1 线封锁维修同时进行; ② 对每个区间的通过能力影响大致相当; ③ 若线路较长, 可能会导致部分区间的天窗设置在夜间, 而其他部分在白天.

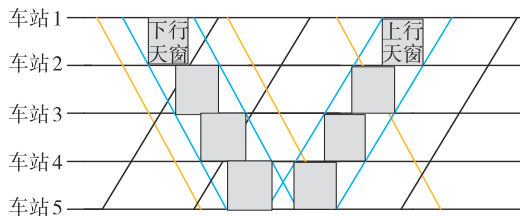


图3 V形天窗

Fig. 3 (Color online) V-shaped maintenance windows.

以川藏铁路拉林段为例, 现行高原铁路列车时刻表在 1 d 内仅有 2 班列车, 且列车运行时间较长, 行车密度和列车速度均较低. 采用 V 形天窗可以组织 1 线维修和 1 线行车同时进行, 降低对通过能力的影响; 若线路较长, 可能导致部分区间的天窗设置在夜间, 高原铁路长大隧道较多, 维修多在隧道内进行, 天窗设置在夜间或白天对维修安全和效率的影响差别不大. 可见, V 形天窗利用率高、维修作业更安全, 且通过能力能够满足运输需求, 因

此, 本研究建议高原铁路采用 V 形天窗设置形式.

1.2 高原铁路服务水平

高原地区地形复杂、气候恶劣, 且道路交通条件欠发达, 旅客到站之后的后续出行计划(如换乘、前往酒店或旅游等)受列车到发时间的影响较大. 旅客对于服务水平的评判很大程度上受列车出发和到达时间的影响, 若列车安排在凌晨或晚上到发, 则会影响旅客对列车服务水平的满意度. 因此, 本研究设定列车最佳出发时间域为 07:00 至 22:00.

1.3 高原铁路列车运行图均衡性

均衡性是评价高原铁路列车运行图的重要指标, 提高列车运行图均衡性可以避免列车集中到发, 进而提高车站应对突发情况的能力. 现阶段中国高原铁路仍处于建设阶段, 列车行车密度和列车速度较低. 长远来看, 随着高原铁路运营里程和路网规模的逐渐扩大, 列车运行图均衡性将会对车站通过能力、列车运行图稳定性及运营调度等指标产生直接影响. 针对高原铁路的特殊性, 将单日列车运行图分为高峰和平峰时段, 列车类型分为动车组列车、普通旅客列车和货物列车, 确定相关参数及权重, 最后计算出列车的均衡性指标, 并将其转化为约束条件.

设列车运行图第 r 个高峰时段的时间范围为 $T_{g,r}$; n_r 为 r 高峰时段的列车数; $t_{g,r,k}^d$ 为高峰时段 r 内 l 速度等级列车 i 在 k 站的出发时刻, 上标 d 表示出发; $x_{g,r,k}^d$ 为高峰时段 r 内相邻两列车在 k 站的发车间隔, 即 $x_{g,r,k}^d = t_{(i+1)g,r,k}^d - t_{ig,r,k}^d$. 当 $x_{1g,r,k}^d = x_{2g,r,k}^d = \dots = x_{n_rg,r,k}^d$ 时, 列车发车间隔为均匀分布.

计算 $x_{ig,r,k}^d$ 的均值 $E_r^l = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} x_{ig,r,k}^d = \frac{T_{g,r}}{n_r}$, 引入偏

差离差 $S_r^{l,k} = \frac{1}{n_r} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_r} (x_{ig,r,k}^d - E_r^l)^2}$. 当 $S_r^{l,k} = 0$ 时, 列车的发车间隔时间是绝对均衡的; $S_r^{l,k}$ 越小, 列车的发车间隔越均衡.

图 4 为列车发车间隔示意图. 可见, 由于 $S_r^{l,k}$ 仅与 $x_{ig,r,k}^d$ 有关, 所以图 4(a) 和图 4(b) 发车间隔的偏差离差相同, 而相邻两组发车间隔的差不同, 且相差较大, 这就导致图 4(a) 列车铺画的均衡性比图 4(b) 要好. 如图 4(a) 中的第 3、4 个发车间隔的差 $x_{a4,k}^d - x_{a3,k}^d$ 远小于图 4(b) 中对应发车间隔差 $x_{b4,k}^d - x_{b3,k}^d$. 若将这一要素考虑在内, 需要引入列车出发

相间间隔 $y_{i_{g,r},k}^d = x_{(i+1)_{g,r},k}^d - x_{i_{g,r},k}^d$, 即相邻两组列车发车间隔的差. 出发相间间隔 $y_{i_{g,r},k}^d$ 的均值为 $E_r' = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} y_{i_{g,r},k}^d = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} (x_{(i+1)_{g,r},k}^d - x_{i_{g,r},k}^d)$. 引入偏差离散 $R_r^{l,k} = \frac{1}{n_r} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_r} |y_{i_{g,r},k}^d - E_r'|}$, $R_r^{l,k}$ 越小, 列车的出发相间间隔越均衡.

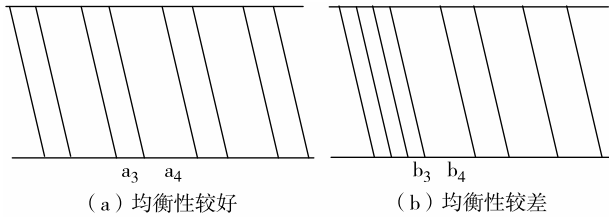


图4 列车发车间隔示意

Fig. 4 Schematic of (a) equilibrious and (b) disequilibrious train departure intervals.

2 模型构建

2.1 符号说明

模型中的参数符号与变量符号定义分别见表1和表2.

表1 参数符号说明

Table 1 Explanation of parameter symbols

符号	说明
$I_{g,r}^l, I_{p,v}^l$	高(平)峰 $r(v)$ 时段 l 速度等级列车集合
I_u, I_o	上行和下行列车集合, 上行列车 $i_u \in I_u$, 下行列车 $i_o \in I_o$
I	所有列车集合, $I = I_{g,r}^l \cup I_{p,v}^l = I_u \cup I_o$
K	车站集合, 车站 $k \in K$
W	维修天窗集合, 维修天窗 $w \in W$
N	列车数量
m	车站数量
$\delta_{i,k}$	列车 i 在车站 k 的最小停站时间
$\sigma_{k,k+1}^i$	列车 i 在 $(k, k+1)$ 的最短运行时间
T^{ad}	相邻列车之间的追踪时间间隔
T^{aa}	相邻列车在车站的最小到达时间间隔
T^{dd}	相邻列车在车站的最小出发时间间隔
$\gamma_{\max}, \gamma_{\min}$	车底周转时间的最大值和最小值

续表

符号	说明
t_{rs}	维修天窗作业的最早开始时刻
t_{re}	维修天窗作业的最晚结束时刻
$T_w^{\min}$	最小天窗时间
T_{ww}	列车与天窗开始和结束时刻的安全间隔
f_i^l, f_i^u	列车 i 停站次数上、下限
$P_{1,m}$	由始发站至终点站的客流量
A	列车的定员人数
$\tau_{1,m}$	列车在始发站至终点站之间的平均客座率
t_{zs}, t_{ze}	列车最佳出发时间域的开始和结束时刻
$T_{g,r}, T_{p,v}$	列车运行图第 $r(v)$ 个高(平)峰时段的持续时间
n_r, n_v	列车在高(平)峰时段内的列车数量
$T_g^{\min}, T_p^{\min}$	高(平)峰时段相邻列车最小发车间隔时间
$T_{gg}^{\min}, T_{pp}^{\min}$	高(平)峰时段相邻列车最小出发相间间隔时间
$\theta_{\max}, \theta_{\min}$	高峰时段列车数占总列车数比例的最大值和最小值
M	极大正数
b	$[0, 0.1]$ 的极小正数

表2 变量符号说明

Table 2 Explanation of variable symbols

符号	说明
$t_{i,k}^a$	列车 i 在车站 k 的到站(接车)时刻
$t_{i,k}^d$	列车 i 在车站 k 的发车时刻
t_w^{start}	维修天窗作业 w 的开始时刻
t_w^{end}	维修天窗作业 w 的结束时刻
$S_{i,k}$	若列车 i 在车站 k 停车, $S_{i,k} = 1$, 否则取 0
$q_{i,j,k}$	若车站 k 内列车 i 在列车 j 之前出发, $q_{i,j,k} = 1$, 否则取 0
$\lambda_{i,w}$	若车站 k 内列车 i 在天窗 w 之前, $\lambda_{i,w} = 1$, 否则取 0
θ	高峰时段列车对数占总列车对数的比例

2.2 目标函数

1) 列车运行图优化目标. 列车总旅行时间为列车 i 在终点站的到达时刻减去其在始发站的出发时刻, 构建动车组、普通旅客和货物列车旅行总时间最小的目标函数, 将 3 个速度等级列车的总旅行

时间分别分配 a_1 、 a_2 及 a_3 的权重后进行加权求和；将动车组列车和普通旅客列车按高峰和平峰时段分为两组，分别计算总旅行时间，即

$$\min Z_1 = \sum_{i_{g,r}^L \in I_{G,R}^L, i_{p,v}^L \in I_{P,V}^L} a_1 \left[(t_{i_{g,r}^L, m}^a - t_{i_{g,r}^L, 1}^d) + (t_{i_{p,v}^L, m}^a - t_{i_{p,v}^L, 1}^d) \right] + \sum_{i_{g,r}^L \in I_{G,R}^L, i_{p,v}^L \in I_{P,V}^L} a_2 \left[(t_{i_{g,r}^L, m}^a - t_{i_{g,r}^L, 1}^d) + (t_{i_{p,v}^L, m}^a - t_{i_{p,v}^L, 1}^d) \right] + \sum_{i_{g,r}^L \in I_{G,R}^L, i_{p,v}^L \in I_{P,V}^L} a_3 (t_{i_{g,r}^L, m}^a - t_{i_{g,r}^L, 1}^d) \quad (1)$$

2) 维修天窗优化目标. 在保证 4 h 维修天窗最低开设要求的前提下，尽可能地使维修天窗的开设总时间最长，即

$$\max Z_2 = \sum_{w \in W} (t_w^{\text{end}} - t_w^{\text{start}}) \quad (2)$$

2.3 约束条件

1) 服务水平约束.

列车停站次数约束. 对于每列车而言，该列车在沿途车站的总停站需控制在合理范围内，即

$$f_i^l \leq \sum_{k \in K} S_{i,k} \leq f_i^u, \forall i \in I \quad (3)$$

区段可达强度约束. 为保证始发站至终点站这一区段出行旅客的便捷性，在始发站和终点站停车的列车数量应达到某一值，以确保列车开行数量与客流需求相匹配. 由于目前我国高原铁路客流量较少，高原铁路列车停站次数较少，直达列车较多，本研究在可达强度约束中仅考虑始发和终到车站停车强度，即

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} S_{i,1} \geq \left\lceil \frac{P_{1,m}}{A\tau_{1,m}} \right\rceil \\ \sum_{i \in I} S_{i,m} \geq \left\lceil \frac{P_{m,1}}{A\tau_{m,1}} \right\rceil \end{cases} \quad (4)$$

列车出发时间域约束. 为保证旅客到站之后的后续行为正常进行，列车需要在最佳出发时间域内出发，即

$$t_{zs} \leq t_{i,k}^d \leq t_{ze}, \forall i \in I, k \in K \quad (5)$$

2) 列车运行约束.

列车在车站的接、发车时刻之差应不小于最小停站时间，即

$$t_{i,k}^d - t_{i,k}^a \geq \delta_{i,k} - M(1 - S_{i,k}), \forall i \in I, k \in K \quad (6)$$

列车在区间的运行时间应不小于列车在该区间的最短运行时间，即

$$t_{i,k+1}^a - t_{i,k}^a \geq \sigma_{i,k+1}^i, \forall i \in I, k \in K \quad (7)$$

先后开行的两列车在区间内的追踪间隔时间应

不小于列车最小追踪间隔时间，即

$$t_{i,k}^a + T^{\text{aa}} - t_{j,k}^a \geq T^{\text{ad}} - M(1 - q_{i,j,k-1}) \quad (8)$$

$$t_{i,k}^d + T^{\text{dd}} - t_{j,k}^d \geq T^{\text{ad}} - M(1 - q_{i,j,k}) \quad (9)$$

$$\forall i, j \in I, k \in K$$

$$q_{i,j,k} + q_{j,i,k} = 1, \forall i, j \in I, k \in K \quad (10)$$

相邻两列车在到达同一车站或从同一车站出发时，需满足车站最小到达和出发时间间隔约束，引入列车顺序变量用于判断前后两列车的顺序关系，严格约束了列车在车站到发的顺序，即

$$t_{j,k}^a - t_{i,k}^a \geq T^{\text{aa}} - M(1 - q_{i,j,k-1}), \forall i, j \in I, k \in K \quad (11)$$

$$t_{j,k}^d - t_{i,k}^d \geq T^{\text{dd}} - M(1 - q_{i,j,k}), \forall i, j \in I, k \in K \quad (12)$$

列车车底周转时间约束. 同一车底的上行与下行列车之间的列车出发间隔需要满足最大和最小的车底周转时间，即

$$\gamma_{\min} \leq t_{i_o,k}^d - t_{i_u,k}^a \leq \gamma_{\max}, \forall i_u \in I_u, i_o \in I_o, k \in K \quad (13)$$

3) 列车运行图均衡性约束.

高(平)峰时段相邻列车最小发车间隔时间约束为

$$x_{i_{g,r}^L, k}^d = t_{j_{g,r}^L, k}^d - t_{i_{g,r}^L, k}^d \geq T_g^{\min} \quad (14)$$

$$x_{i_{p,v}^L, k}^d = t_{j_{p,v}^L, k}^d - t_{i_{p,v}^L, k}^d \geq T_p^{\min}$$

$$\forall i_{g,r}^L, j_{g,r}^L \in I_{g,r}^L, \forall i_{p,v}^L, j_{p,v}^L \in I_{p,v}^L, k \in K \quad (15)$$

高(平)峰时段相邻列车最小出发相间间隔时间约束为

$$y_{i_{g,r}^L, k}^d = x_{j_{g,r}^L, k}^d - x_{i_{g,r}^L, k}^d \geq T_{gg}^{\min} \quad (16)$$

$$y_{i_{p,v}^L, k}^d = x_{j_{p,v}^L, k}^d - x_{i_{p,v}^L, k}^d \geq T_{pp}^{\min}$$

$$\forall i_{g,r}^L, j_{g,r}^L \in I_{g,r}^L, \forall i_{p,v}^L, j_{p,v}^L \in I_{p,v}^L, k \in K \quad (17)$$

高(平)峰时段相邻列车发车间隔时间和出发相间间隔时间的偏差需满足非负约束，同时不能超过极小值 b ，即

$$0 \leq S_{i,k}^L, S_{i,k}^L \leq b \quad (18)$$

$$0 \leq R_{i,k}^L, R_{i,k}^L \leq b \quad (19)$$

高峰时段内列车对数占总列车对数的比例约束为

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad (20)$$

4) 维修天窗约束.

天窗最小时间约束. 高原铁路中的维修任务繁重且复杂，可利用资源有限，对维修安全性要求较高，所以维修天窗开设时间需要满足一定时长要求，即

$$t_w^{\text{end}} - t_w^{\text{start}} \geq T_w^{\min}, w \in W \quad (21)$$

高原铁路的维修天窗通常安排在夜间，可能出

现持续时间超过 24 h 的情况, 即

$$t_w^{\text{end}} - t_w^{\text{start}} + 1\,440 \geq T_w^{\text{min}}, w \in W \tag{22}$$

时间域约束. 维修天窗的开始和结束时间应在天窗开设的时间域范围内, 即

$$t_w^{\text{start}} \geq t_{ws} \tag{23}$$

$$t_w^{\text{end}} \leq t_{we} \tag{24}$$

天窗与列车安全间隔约束: 列车的出发时刻与天窗结束时刻、到达时刻与天窗开始时刻都必须保持足够的安全间隔, 即

$$t_{i,k+1}^a \leq t_w^{\text{start}} + M(1 - \lambda_{i,w}) - T_{ww} \tag{25}$$

$$t_{i,k}^d \geq t_w^{\text{end}} + M\lambda_{i,w} + T_{ww}, w \in W, i \in I, k \in K \tag{26}$$

2.4 算法设计

本研究采用分层序列法对模型进行求解, 具体算法步骤如下. ① 输入列车服务水平参数、列车运行参数、列车运行图均衡性参数以及维修天窗参数; ② 对模型中两个目标函数按照求解优先顺序 $Z_1 > Z_2$ 进行排序, 在满足客流需求前提下, 根据列车满载率变化确定列车开行对数的范围, 每组开行方案对应 1 组解; ③ 输入模型的目标函数 Z_1 和约束条件; ④ 运用 Python 编程调用 COPT 求解器求解以 Z_1 为目标的单目标优化模型, 得到最小总旅行时间 Z_1^{min} , 并将其转化为约束条件 $\min Z_1 \leq Z_1^{\text{min}}$; ⑤ 输入模型的目标函数 Z_2 和约束条件; ⑥ 检验模型是否满足约束条件 $\min Z_1 \leq Z_1^{\text{min}}$, 若是, 转步骤 ⑦; 否则, 转步骤 ④; ⑦ 在列车总旅行时间最小的前提下, 运用 Python 编程调用 COPT 求解器求解以 Z_2 为目标函数的单目标优化模型, 得到最大维修天窗开设总时长 Z_2^{max} ; ⑧ 计算每组开行方案对应的目标函数 Z_1 和 Z_2 , 得到每组开行方案的最优解 Z_1^{min} 和 Z_2^{max} ; ⑨ 根据求得的最优解确定列车到发时刻集合以及维修天窗的开设时间, 结合列车及线路参数输出并绘制列车运行图.

3 案例分析

3.1 基本情况

本研究以川藏高原铁路 A—U 区段进行案例分析, 表 3 和表 4 分别为列车速度等级和铁路区间最小运行时间.

当 3 种速度等级列车满载率均最高时, 为了满足客流量和货运量, 需开行 24 对动车组列车, 15 对普通旅客列车和 8 对货物列车. 表 5 为不同 a_1 、 a_2 及 a_3 取值下, 该开行方案所对应目标函数 Z_1 的变

表3 列车速度等级

Table 3 Train speed classification

列车速度等级	平均旅时/min	平均旅速/(km·h ⁻¹)
动车组	179	165.6
普通旅客列车	240	110.1
货物列车	271	85.9

表4 铁路区间最小运行时间

Table 4 Minimum running time between railway sections

区间	区间最小运行时间/min	区间	区间最小运行时间/min
A—B	4	K—L	8
B—C	6	L—M	8
C—D	5	M—N	11
D—E	8	N—O	12
E—F	12	O—P	7
F—G	4	P—Q	9
G—H	15	Q—R	10
H—I	13	R—S	11
I—J	8	S—T	6
J—K	6	T—U	14

表5 Z_1 中 3 种速度等级列车的权重

Table 5 Weights for three speed classes of trains in objective function Z_1

a_1	a_2	a_3	Z_1/min
0.40	0.50	0.10	7 252.8
0.45	0.45	0.10	7 322.4
0.45	0.40	0.15	7 070.4
0.50	0.30	0.20	6 888.0
0.55	0.25	0.20	6 957.6
0.55	0.30	0.15	7 209.6
0.60	0.30	0.10	7 531.2

化情况. 可见, 当 $a_1 = 0.5$, $a_2 = 0.3$ 及 $a_3 = 0.2$ 时, 目标函数 Z_1 最优, 故采用这组值进行案例分析.

模型中所涉及的参数取值为: A—U 单方向客流量和货运量分别为 39 120 人次/d 和 384 t/d; 动车组列车和普通旅客列车定员人数分别为 1 100 人/列和 1 500 人/列, 客座率为 0.6~0.8; 货物列车货运量为 60 吨/列, 货运满载率为 0.4~0.8; 动车组列车

和普通旅客列车的停站次数分别为 2 次和 6 次, 最小停站时间分别为 2 min 和 5 min; 列车最小追踪间隔时间为 5 min; 车站最小到达和出发时间间隔均为 5 min; 车底周转时间最小为 15 min, 最大为 420 min. 该高原铁路区段有两个高峰时段, 分别为 07:00—10:00 和 17:00—20:00; 高(平)峰时段相邻列车最小发车间隔时间和高(平)峰相邻列车最小出发相间间隔时间均为 10 min; 高峰时段列车数占总列车数比例取值范围为 0.6~0.7. 上行和下行的维修天窗开设时间窗均为 22:00(当日)—07:00(次日), 维修天窗最小开设时间为 240 min, 天窗与列车的安全间隔时间为 10 min.

3.2 结果分析

本研究模型在 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU@2.20 GHz, 内存 16 GBytes 计算机上, 运用 Python 编程调用 COPT 进行求解. 在满足客流需求前提下, 根据列车满载率变化来确定列车开行对数范围, 从中选取 7 种列车开行方案进行案例分析, 并对高原铁路进行运行图编制与优化. 将模型的目标函数和约束条件代入程序, 分别输入各类模型参数, 最后输出 1 个数据集合, 并根据数据集合绘制列车运行图.

高原铁路开行方案、目标函数 1 中 7 种不同方案下 3 种速度等级列车的总旅行时间计算结果见表 6.

以下对目标函数 2 进行结果分析. 随着高峰时段列车对数占总列车对数比例 θ 的增大, 平峰时段列车对数所占比例 $1-\theta$ 不断减少. 当 $\theta > 0.7$ 时, 平峰时段列车数过少, 对天窗总时长影响很小, 无

表 6 七种列车开行方案以及 3 种速度等级列车、 Z_1 的总旅行时间

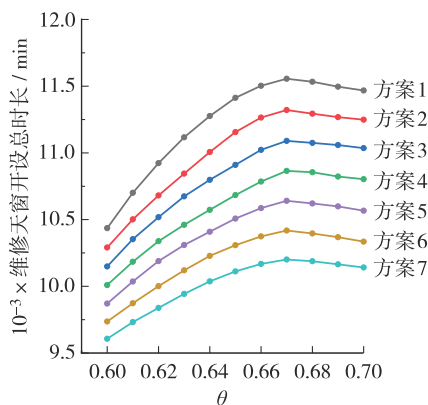
Table 6 Seven train operation plans and total travel time for trains of three speed classes and Z_1

方案	开行方案/对 ¹⁾	总旅行时间/min			
		动车组列车	普通旅客列车	货物列车	Z_1
1	24, 15, 8	8 592.0	7 200.0	2 160.0	6 888.0
2	25, 16, 9	8 950.0	7 680.0	2 482.0	7 275.4
3	26, 17, 10	9 308.0	8 160.0	2 788.0	7 659.6
4	27, 18, 11	9 666.0	8 640.0	3 080.0	8 041.0
5	28, 19, 12	10 024.0	9 120.0	3 386.0	8 425.2
6	29, 20, 13	10 382.0	9 600.0	3 678.0	8 806.6
7	30, 21, 14	10 740.0	10 080.0	3 984.0	9 190.8

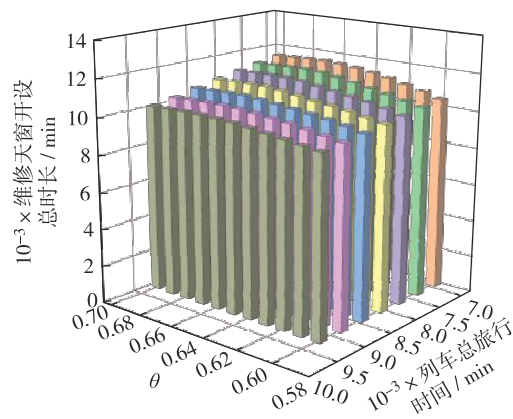
¹⁾ 开行方案中的 3 个数字依次为动车组列车、普通旅客列车及货物列车的开行对数.

法满足客流需求, 且高峰和平峰时段相邻列车的发车间隔不满足最小发车间隔时间, 因此, 本研究中 θ 的取值范围为 $[0.6, 0.7]$.

图 5(a) 表示 7 种开行方案下, 不同 θ 值对应的维修天窗总旅行时间及其变化情况; 图 5(b) 表示当 θ 在 $[0.6, 0.7]$ 内变化时, 不同列车总旅行时间所对应维修天窗开设总时长的取值及其变化情况. 可见, ① 当 θ 不变时, 随着列车开行对数增多, 列车运行所占用的时间窗增大, 使得维修天窗的时间窗被压缩, 维修天窗开设总时长减少. ② 当列车开行对数确定、 $\theta \in [0.60, 0.67]$ 时, 随着 θ 的增大, 高峰时段列车对数增多, 平峰时段列车对数减少,



(a) 不同 θ 取值下, 7 种方案对应的维修天窗开设总时长



(b) 不同 θ 取值下, 不同列车总旅行时间对应的维修天窗开设总时长

图 5 目标函数 2 结果分析

Fig. 5 (Color online) Objective function 2 result analysis. (a) Under different values of θ , the total duration of maintenance window openings corresponding to the seven schemes. (b) Under different values of θ , the total maintenance window opening duration corresponding to the total travel time of different trains.

高峰时段相邻两列车之间的出发间隔时间被压缩, 平峰时段相邻两列车之间的出发间隔时间变大. 因此, 平峰时段列车运行占用的时长减少, 维修天窗开设的时间窗扩大, 开设时长增大. 而当 $\theta \in (0.67, 0.70]$ 时, 平峰时段开行列车数进一步减少, 其下降幅度越来越小, 因此, 对天窗的影响也越来越小, 维修天窗开设总时长不再发生明显变化, 且有小幅下降的趋势. ③当 $\theta = 0.67$ 时, 维修天窗开设总时长最大, Z_2 最优, 故选择 $\theta = 0.67$.

综合分析 Z_1 和 Z_2 的计算结果可知, 若决策者更注重列车总旅行时间和列车开行成本, 则应尽可能使开行列车对数减少, 方案1的总旅行时间最短, 为 6 888 min; 若决策者更注重列车维修天窗开设总时长和维修天窗的安全性, 则应尽可能增大维修天窗的总时长, 当 $\theta = 0.67$ 时, 方案1的维修天窗开设时长最长, 为 11 556 min. 因此, 若决策者同时考虑列车总旅行时间和维修天窗总时长, 应选择方案1, 即开行 24 对动车组列车, 15 对普通旅客列车和 8 对货物列车. 对开行方案1中3种速度等级列车的总旅行时间、上下行天窗的总时间以及高峰时段列车数占总列车数比例进行计算, 得到最优解如

下: 动车组列车总旅行时间为 8 592 min, 普通旅客列车总旅行时间为 7 200 min, 货物列车总旅行时间 2 160 min, 上行天窗总时间为 5 580 min, 下行天窗总时间为 5 976 min, 高峰时段列车数占总列车数比例为 0.67. 根据该最优解确定的列车时刻表和相关参数所绘制的列车运行图见图6.

由图6可见, 列车主要集中在 07:00 至 22:00 开行, 天窗在每个区段按 V 形天窗形式铺画. 对列车运行图结构特征进行分析, 发现该高原铁路区段列车开行分高峰时段和平峰时段, 高峰时段列车运行线铺画紧密, 平峰时段列车运行线铺画分散, 列车出现分段集中铺画的情况; 高峰时段列车数占总列车数的比例为 0.67, 能够充分满足客流需求和列车运行图的均衡性; 不同速度等级列车运行线分开铺画, 在满足列车运行图均衡性的前提下, 将对通过能力的影响降至最小; 3 种速度等级列车均满足最小停站时间、最小追踪间隔时间等列车运行约束及参数, 单列车的总旅行时间达到最小; 维修天窗在满足 4 h 最低要求和不影响线路通过能力的前提下, 开设总时长达到最大. 这些特征为进一步验证模型的有效性提供保障, 表明本模型是有效可行的.

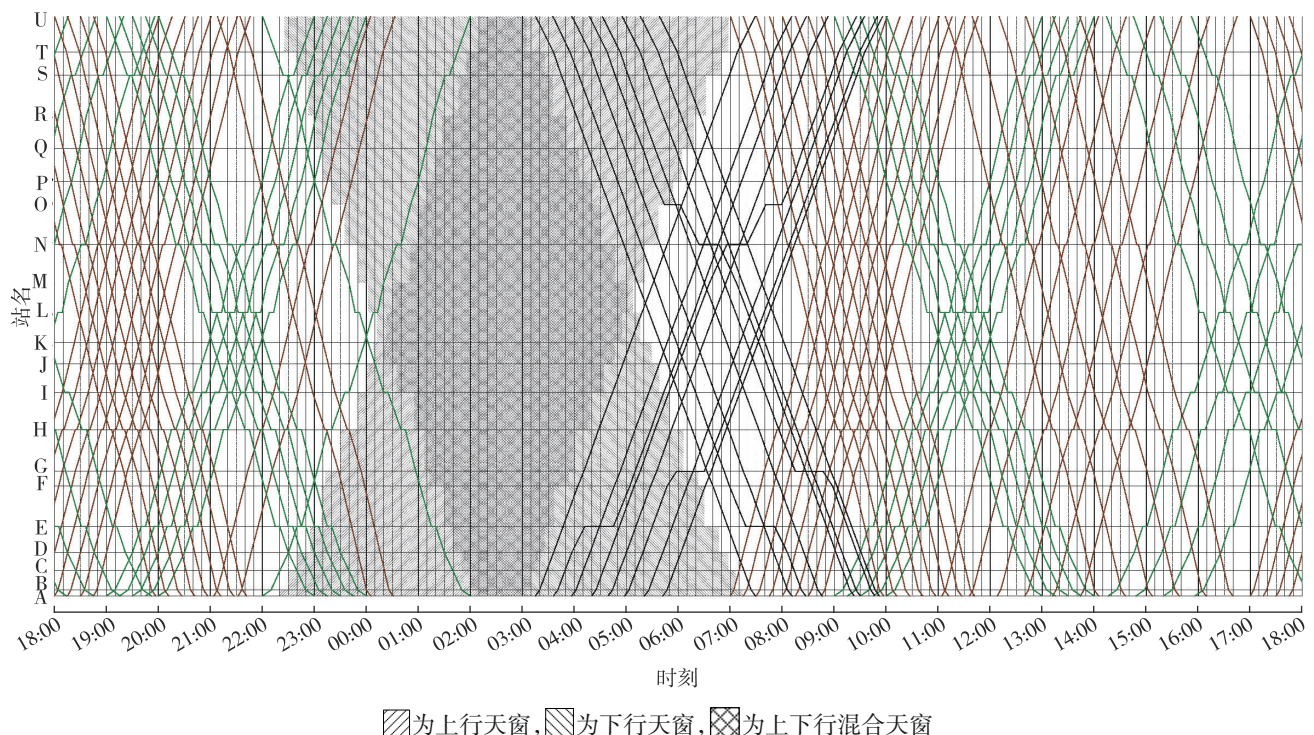


图6 方案1列车运行图

Fig. 6 (Color online) Plan 1 train diagram. represents the uplink maintenance windows, represents the downlink maintenance windows, and represents the uplink and downlink mixed maintenance windows.

结 语

本研究综合考虑列车服务水平约束、列车运行约束、列车运行图均衡性约束及维修天窗时间约束等,建立列车总旅行时间最小、维修天窗开设总时长最大的多目标混合整数规划模型.在运行图铺画过程中,考虑动车组列车、普通旅客列车和货物列车 3 种速度等级列车,使列车运行图更加贴合实际.设计基于分层序列思想的多目标求解算法,并运用 Python 编程调用 COPT 求解器求解模型.以高原铁路某区段为案例,验证了模型的有效性.结果表明,本模型在满足维修天窗最小开设时长的前提下,能够兼顾列车总旅行时间最小和维修天窗开设时长最大.基于最优解绘制的列车运行图表明,列车运行图和维修天窗的协调优化结果更符合高原铁路实际旅客运输生产作业需要.研究结果对未来高原高寒地区铁路列车运行图的铺画、运输组织模式的选择以及列车服务水平的提高具有一定实际意义,也为铁路运营管理部门进一步优化列车运行图编制与维修天窗开设提供参考.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72161023,71761023);高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室开放课题资助项目(GYYSHZ2302)

作者简介: 邓智文(12231089@stu.lzjtu.edu.cn),兰州交通大学硕士研究生.研究方向:铁路行车调度优化.

引 文: 邓智文,刘斌,田志强,等.高原铁路列车运行图与维修天窗协调优化研究[J].深圳大学学报理工版,2025,42(2): 216-225.

参考文献 / References:

- [1] BARRENA E, CANCA D, COELHO L C, et al. Exact formulations and algorithm for the train timetabling problem with dynamic demand [J]. Computers & Operations Research, 2014, 44: 66-74.
- [2] 周文梁, 史峰, 陈彦. 基于定序优化的客运专线列车运行图铺划方法[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 1-7.
ZHOU Wenliang, SHI Feng, CHEN Yan. A method for drawing train diagram of dedicated passenger line based on fixed order optimization [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] 王劲. 高速铁路列车运行图一体化编制问题的快速精细化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
WANG Jin. High efficiency and high precision research on the integration of high-speed railway train timetabling problem [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [4] 张新, 范家铭, 王宝杰, 等. 面向能力运用的京沪高速铁路列车停站方案与运行图协同优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(10): 1-8.
ZHANG Xin, FAN Jiaming, WANG Baojie, et al. Collaborative optimization of train stop plan and timetable of Beijing-Shanghai high speed railway based on capacity utilization [J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(10): 1-8. (in Chinese)
- [5] LIDÉN T, JOBORN M. An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 74: 327-347.
- [6] VAN AKEN S, BEŠINOVIĆ N, GOVERDE R M P. Designing alternative railway timetables under infrastructure maintenance possessions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 98: 224-238.
- [7] 徐长安, 李晟东, 李斯涵, 等. 高铁夕发朝至列车开行与天窗设置协同优化[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 744-751.
XU Changan, LI Shengdong, LI Sihan, et al. Collaborative optimization for overnight train operation and maintenance window setting of high-speed railways [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(4): 744-751. (in Chinese)
- [8] DAO C, BASTEN R, HARTMANN A. Maintenance scheduling for railway tracks under limited possession time [J]. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, 2018, 144(8): 04018039.
- [9] ZHANG Yongxiang, D'ARIANO A, HE Bisheng, et al. Microscopic optimization model and algorithm for integrating train timetabling and track maintenance task scheduling [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 127: 237-278.
- [10] 张哲铭, 何世伟, 李光晔, 等. 考虑 Pareto 最优的列车运行图与维修天窗协调优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(3): 949-958.
ZHANG Zheming, HE Shiwei, LI Guangye, et al. Coordinated optimization of train timetable and maintenance skylight considering Pareto optimality [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(3): 949-958. (in Chinese)
- [11] 石赞, 牟海波, 黄志鹏, 等. 考虑跨线列车的运行图与天窗一体化模型与算法[J]. 铁道科学与工程学报,

- 2024, 21(5): 1761-1773.
- SHI Yun, MU Haibo, HUANG Zhipeng, et al. Integrated optimization model and algorithm for timetable and maintenance window considering cross-line trains [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(5): 1761-1773. (in Chinese)
- [12] 袁博, 李海鹰, 廖正文. 高速铁路动卧开行日列车运行图与维修天窗协调优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(4): 1309-1319.
- YUAN Bo, LI Haiying, LIAO Zhengwen. Integrated optimization on train timetabling and maintenance time for the operation day of high-speed sleeper trains [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(4): 1309-1319. (in Chinese)
- [13] 马骊, 邓云霞. 高速铁路运输供给服务水平评价[J]. *铁道运输与经济*, 2014, 36(12): 28-32, 47.
- MA Si, DENG Yunxia. Evaluation of service level of high-speed railway transport supply [J]. *Railway Transport and Economy*, 2014, 36(12): 28-32, 47. (in Chinese)
- [14] 石敏涵. 考虑运输效率与服务水平的城际铁路列车运行图协同优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- SHI Minhan. Research on train operation diagram collaborative optimization of intercity railway considering transportation efficiency and service level [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [15] 石晶, 王莹, 韦伟, 等. 高速铁路列车运行图均衡性研究[J]. *综合运输*, 2021, 43(1): 57-62.
- SHI Jing, WANG Ying, WEI Wei, et al. Equilibrium of train diagram of high-speed railway based on data analysis [J]. *China Transportation Review*, 2021, 43(1): 57-62. (in Chinese)
- [16] 鲍晶晶, 徐培娟. 高速铁路列车运行图的均衡性研究[J]. *铁道运输与经济*, 2012, 34(5): 21-26.
- BAO Jingjing, XU Peijuan. Research on equilibrium of high-speed railway train working diagram [J]. *Railway Transport and Economy*, 2012, 34(5): 21-26. (in Chinese)
- [17] 彭小倩. 高寒地区长大坡道条件下高速铁路综合维修机构布局与天窗开设优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- PENG Xiaoqian. Research on the optimization of the layout of the comprehensive maintenance organization and the opening of skylights for high-speed railways under the condition of long ramps in the alpine region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [18] 祝越. 200 km/h 高寒长大坡道客货共线铁路运输组织模式及通过能力匹配研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- ZHU Yue. Research on the organization mode and passing capacity matching of passenger and freight colline railway transportation on 200 km/h alpine and long slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】