

面向负载均衡的高铁路网列车开行方案优化方法

吴兴堂^{1,2} 杨明坤² 王洪伟³ 周敏² 吕金虎¹ 董海荣²

摘 要 针对当前高速铁路运营过程中存在的运输需求与运力资源不匹配现象,面向负载均衡原理研究了路网条件下运能可适配的高速铁路旅客列车开行方案优化与评估方法.首先,针对路网条件下列车开行方案优化,构建以提升经济效益、社会效益和网络负载均衡为目标的非线性混合整数规划模型,并设计基于遗传算法和粒子群算法的两阶段混合搜索求解算法.在此基础上,考虑开行列车在高速铁路网中的抗干扰能力,建立了面向网络化运营场景的开行方案综合评估指标体系,揭示了故障场景下高速铁路网络性能的演化规律.最后,以实际高速铁路线路数据和运营数据为场景进行仿真实验,本文提出方法在保证运输需求和路局收益的同时能够有效地提升 8.66% 网络整体负载均衡性,增强发生故障时网络的抗干扰能力.

关键词 高速铁路网, 开行方案, 负载均衡优化, 网络鲁棒性

引用格式 吴兴堂, 杨明坤, 王洪伟, 周敏, 吕金虎, 董海荣. 面向负载均衡的高铁路网列车开行方案优化方法. 自动化学报, 2022, 48(2): 492–503

DOI 10.16383/j.aas.c210612

Load-balancing Oriented Line Plan Optimization for a High-speed Railway Network

WU Xing-Tang^{1,2} YANG Ming-Kun² WANG Hong-Wei³ ZHOU Min² LV Jin-Hu¹ DONG Hai-Rong²

Abstract By considering the current mismatch between traffic demand and transportation resources in high-speed railways, a load-balancing oriented line plan optimization and evaluation method of the high-speed railway is developed to adapt to the traffic demand. Specifically, a multi-objective non-linear hybrid programming model aiming to improve the economic benefit, social benefit, and network load balance is established to optimize the network line plan. Besides, a two-stage hybrid search algorithm based on genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm is designed to solve the problem. Moreover, a comprehensive evaluation method of line plan for networked operation scale considering the operational issues and the network resilience is proposed. Finally, the structure data and the real operational date of a sub-network of China's high-speed railway are adopted to verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the method proposed in this paper can effectively improve 8.66% overall load balance of the network and the network resilience while satisfying the travel demands of passengers.

Key words High-speed railway network, line plan, load balance optimization, network robustness

Citation Wu Xing-Tang, Yang Ming-Kun, Wang Hong-Wei, Zhou Min, Lv Jin-Hu, Dong Hai-Rong. Load-balancing oriented line plan optimization for a high-speed railway network. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(2): 492–503

高速铁路凭借其安全快速、正点率高、舒适性好等特点,已逐渐发展成为综合交通运输体系的骨干力量和国民经济的重要组成.根据《中国国家铁路集团有限公司 2020 年统计公报》,2020 年全国共投产高速铁路新线 2 521 公里,截至 2020 年底,全

国铁路路网密度已经达到 152.3 公里/万平方公里,高铁运营里程超过 3.8 万公里,占比世界高铁总里程约 2/3,100 万以上人口大城市高铁覆盖率达到 95%,全年的高铁动车组旅客发送量约为 15.17 亿^[1].对比世界上高速铁路发展较为先进的国家如日本、法国和德国等,我国已经成为世界上高铁里程最长、运输密度最高、成网运营场景最复杂的国家^[2].

旅客列车开行方案是高速铁路运营组织的重要环节,同时也是运行图编制和调整的基础和前提.开行方案确定了列车开行的起讫点、运行路径、停站方案、车底运用等内容,决定了运行图中各站间开行列车的密度以及列车运行的线路条件,影响高速铁路行车作业质量、铁路部门运营效益和运输资源利用率.因此,对开行方案的优化研究已经吸引了国内外广大学者的关注. Fu 等^[3] 研究以天为周期的旅客列车开行方案,建立双层规划模型,并设计

收稿日期 2021-07-03 录用日期 2021-10-18

Manuscript received July 3, 2021; accepted October 18, 2021

国家自然科学基金(61925302, U1834211)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61925302, U1834211)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191

2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044 3. 北京交通大学国家轨道交通安全评估研究中心 北京 100044

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191 2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 3. National Research Center of Railway Safety Assessment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

启发式搜索算法, 确定列车开行频率以及不同模式组合下的停站方案. Gattermann 等^[4]研究了开行路径备选集的生成问题, 分析了不同的路径备选集对开行方案的解的影响. Yue 等^[5]研究了高速铁路列车停站方案和运行图协同优化问题, 使用拉格朗日松弛法将该数学模型化简为线性规划问题, 并通过列生成算法进行求解. Han 等^[6]以开行方案的周期性、跨线列车数量、跨线列车运营里程和固定停站模式为优化目标, 建立了多目标整数规划模型. Canca 等^[7]以最大化铁路部门收益为目标, 计算了路网建设、车底购买、列车开行和车辆管理等成本, 设计了一种自适应大邻域搜索算法进行求解. Park 等^[8]综合考虑了铁路部门运营成本和旅客的出行时间, 建立高速铁路旅客列车开行方案优化模型, 确定每条线路的列车开行频率, 同时考虑多种停站模式组合. Jamili 等^[9]针对工作日和节假日不同时期的客流差异, 研究了基于非站站停模式的城市轨道交通运营方案, 设计了鲁棒性停站方案优化方法. Fu 等^[10]研究了高速铁路列车停站方案优化问题, 将节点进行等级划分, 以保持停站方案的规则性、连通性和快速性为目标, 建立两阶段混合整数规划模型. Chen 等^[11]提出了车站间可达性和可达性程度的概念, 考虑铁路部门的经济效益和旅客的出行便捷性建立列车开行方案多目标优化模型. 佟璐^[12]提出了基于客流起讫点的备选路径集与合理路径集的生成方法, 以最大化旅客出行效益为优化目标将客流分配到列车服务网络上. 苏焕银等^[13-14]考虑了旅客出行的时变需求, 以旅客出行时间和列车运行时间为目标, 建立 Stackelberg 博弈模型. 黄鉴^[15]以最大化运输收益和最小化列车运行路径广义阻抗为优化目标, 采用网络划分方法, 建立了考虑客流预测和开行方案的综合优化模型. 张新^[16]分析了影响高速铁路区段通过能力的因素, 并将提高区段通过能力作为总目标引入开行方案编制流程中. 综上所述, 现有对旅客列车开行方案的研究大多是针对列车运行径路方案、列车停站方案和客流分配方案中的部分进行优化, 而考虑三者综合优化的研究较少, 但三者之间密切相关、相互影响, 列车运行径路方案直接影响列车停站方案, 同时不同的停站方案会吸引不同的客流量. 在优化目标方面, 大多数学者都是从线路视角进行研究, 主要包括铁路部门运输效益、运输成本、使用列车数量等, 而从网络视角对开行方案进行研究则较少. 因此, 结合我国高速铁路网特征, 综合列车运行径路方案、列车停站方案和客流分配方案, 对面向路网、考虑整体资源利用率的开行方案优化方法进行研究具有一

定的意义.

高速铁路网络可视为由基础设施层、列车流运行层与客流出行层三层结构耦合而成的复杂网络系统^[17]. 基础设施层由车站和线路连接组成, 是开行列车和运输旅客的载体, 约束了列车流和客流在路网上的传输; 列车流运行层体现列车在路网上的开行方式, 受限于路网基础设施和车底资源等条件, 但同时又必须满足客流的出行需求, 列车的开行带动客流在路网上运输, 这三层结构既相互制约又相互影响. 列车流运行层中开行的列车可以看做是基础设施层上的负载, 客流出行层中的客流视为列车流运行层上的负载^[18]. 因此, 高速铁路网具备双重负载, 对运输需求和运力资源进行匹配是一种负载均衡的过程.

高速铁路的快速发展使得客流需求量增长迅猛, 旅客对出行的需求已不仅限于目的地的可达, 而对高铁服务水平和出行质量有了更高的要求, 旅行时间、换乘便捷性、乘车舒适度等都成为旅客选择出行方式时的制约因素. 同时, 随着高速铁路网的逐步形成, 旅客在同一起讫点之间的可选出行路径增多, 径路方案与停站方案呈现多样化特征, 影响运营特性的因素和制约运营效益的条件也在增多, 从而使得高速铁路运输组织难度加大. 当前铁路部门在设计开行方案时主要依赖于人工经验, 耗时长、自动化水平较低、设计人员工作强度大, 因此自动化的开行方案设计方法研究亟待展开. 此外, 我国的高速铁路网作为一种异质性网络, 尚存在着路网空间分布不均衡、网络拓扑结构复杂、不同区域旅客出行需求差异大、不同车站作业强度相差大等特点. 因此, 对有限的运力资源进行合理调度, 实现运输需求与运力资源的匹配具有重要研究意义.

本文针对高速铁路网络化运营条件下开行方案优化方法与评估体系展开研究. 首先提出负载均衡指标来表征网络中不同节点作业强度的差异性, 以经济效益、社会效益和运营效益为目标构建多目标优化模型, 并设计两阶段求解算法对该模型进行求解; 进一步结合运输指标与网络指标构建开行方案综合评估指标体系. 基于中国高速铁路网络数据仿真验证表明基于负载均衡优化后的开行方案能够提高运输组织与客流需求、路网条件和运输资源的匹配性, 为我国高速铁路网的发展以及网络运营组织优化提供理论基础和依据.

1 开行方案优化模型

1.1 决策变量

x_{ij}^{kt} : 0-1 变量, $x_{ij}^{kt} = 1$ 表示从始发站 i 到终到

站 j 之间的路径 l_{ij}^k 的第 t 列车开行, 否则 $x_{ij}^{kt} = 0$;

y_{iju}^{kt} : 0-1 变量, $y_{iju}^{kt} = 1$ 表示从始发站 i 到终到站 j 之间路径 l_{ij}^k 的第 t 列车在 u 站停车, 否则 $y_{iju}^{kt} = 0$;

q_{ijp}^{kt} : 连续变量, 表示从始发站 i 到终到站 j 之间路径 l_{ij}^k 的第 t 列车在区间 p 上承载的客流量.

1.2 目标函数

1) 经济效益

经济效益主要体现在铁路部门运营高速铁路所带来的收益, 该收益由两部分组成, 包括运营收入和运营成本. 其中, 运营收入通常指的是客票收入, 直接影响因素包括票价率和列车开行里程^[19]. 由于票价率通常是取决于线路本身建造成本和地方经济水平等客观因素, 故本文仅讨论由列车开行里程决定的客票收入部分. 具体的运营收入可表示为

$$I = \sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_{l_{ij}^k}} (\theta \times d_p \times x_{ij}^{kt} \times q_{ijp}^{kt}) \quad (1)$$

其中, S^{ori} 是始发车站集合, S^{ter} 是终到车站集合, N 是每个始发终到站间的备选路径数量, T 是列车集合, l_{ij}^k 是从始发站 i 到终到站 j 之间的第 k 条可选路径, $P_{l_{ij}^k}$ 是路径 l_{ij}^k 中的区间集合, θ 表示每人每公里的平均票价率, d_p 是区间 p 的距离,

高速铁路的运营成本包括固定成本和可变成本, 本文仅考虑与客流量和运输计划紧密相关的可变成本部分. 可变成本是高速铁路运营成本中的主要组成, 可以通过改变列车径路方案和停站方案来调整其大小. 可变成本包含列车开行成本和停站作业成本, 其中列车开行成本由始发终到站间的开行距离和单位开行成本决定, 停站作业成本由列车停站作业次数决定. 具体的运营成本计算方式为

$$C = \sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} \left(c_1 \times d_{l_{ij}^k} \times x_{ij}^{kt} + \sum_{u \in U_{l_{ij}^k}} c_2 \times y_{iju}^{kt} \right) \quad (2)$$

其中, c_1 是列车在区间行驶每公里的平均开行成本, c_2 是列车的单位停站服务成本, $d_{l_{ij}^k}$ 是路径 l_{ij}^k 的距离. 式 (2) 的第 1 项是列车开行成本, 第 2 项是列车停站作业成本.

综合分析可得, 铁路部门运营总收益可表示为

$$P = I - C =$$

$$\sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_{l_{ij}^k}} (\theta \times d_p \times x_{ij}^{kt} \times q_{ijp}^{kt}) - \sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} \left(c_1 \times d_{l_{ij}^k} \times x_{ij}^{kt} + \sum_{u \in U_{l_{ij}^k}} c_2 \times y_{iju}^{kt} \right) \quad (3)$$

2) 社会效益

社会效益主要表现为旅客的出行满意度. 影响旅客出行满意度的最主要因素是旅行时间, 任何一个理性的旅客总是希望从出发站到目的站的乘车时间越短越好. 本文所考虑的旅客总旅行时间包括列车在途时间和列车停站时间. 其中, 列车在途时间与列车开行速度和旅客旅行距离相关, 列车停站时间与旅行中列车停站次数相关. 具体的计算公式为

$$T = \sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_{l_{ij}^k}} \left(\frac{d_p}{v_t} \times x_{ij}^{kt} + \sum_{u \in U_p} \mu \times y_{iju}^{kt} \right) \times q_{ijp}^{kt} \quad (4)$$

其中, v_t 是列车 t 的平均行驶速度, μ 是列车在停靠站的平均停站时间.

3) 网络整体运营效益

为研究高速铁路网运输需求和运力资源的匹配程度, 首先提出了节点负载压力 (LP_u) 指标, 用以表征车站作业强度与车站作业能力的匹配程度. 其中, 车站作业能力 (LN_u) 由车站到发线数量表示; 车站作业强度 (VS_u) 由在车站 u 有停站作业任务的列车数量总和表示, 即列车服务频率, 具体的计算方式为

$$VS_u = \sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} y_{iju}^{kt}, \quad \forall u \in S \quad (5)$$

其中, S 表示所有车站的集合.

对任意车站而言, 在车站作业能力一定的情况下, 车站的列车服务频率占总列车服务频率的比例越高, 则该车站的负载压力越大, 表明车站作业越繁忙、能力利用率越高; 当车站作业强度一定时, 车站的到发线数量占所有车站到发线数总量的比例越小, 则该车站的负载压力越大, 表明车站作业繁忙、能力利用率较高. 综上, 节点负载压力与车站作业强度成正比, 与车站作业能力成反比, 节点负载压

力的定义为

$$LP_u = \frac{\frac{\sum_{u \in S} VS_u}{\sum_{u \in S} LN_u}}{\frac{\sum_{u \in S} VS_u}{\sum_{u \in S} LN_u}}, \quad \forall u \in S \quad (6)$$

节点负载压力指标可以直接反映车站作业的繁忙程度与能力利用率, 进而刻画车站运输需求与运输能力的匹配程度. 对实际的高铁运营而言, 各车站的负载压力不宜过大也不宜过小. 过大的负载压力会造成车站工作强度过大、超负荷作业; 过小的负载压力表明车站的能力利用不足、难以发挥作用. 过大或过小的负载压力都表明车站的运输需求与运输能力匹配程度较低, 从而造成路网整体运输资源使用效率降低.

为分析整个高速铁路网络的负载均衡性, 首先将计算得到的节点负载压力进行归一化处理, 处理方式

$$LPN_u = \frac{LP_u - LP_{\min}}{LP_{\max} - LP_{\min}}, \quad \forall u \in S \quad (7)$$

根据归一化后的节点负载压力 (LPN_u), 计算整个网络的平均负载压力 ($ALPN$) 和负载压力标准差 (SD). 网络的平均负载压力的计算式为

$$ALPN = \frac{\sum_{u \in S} LPN_u}{N} \quad (8)$$

负载压力标准差的计算式为

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{u \in S} (LPN_u - ALPN)^2}{N - 1}} \quad (9)$$

负载压力标准差可以反映网络中节点负载压力的离散程度, 标准差越大说明各车站的负载压力差异越大, 标准差越小说明各车站的负载压力差异越小. 根据节点负载压力标准差和网络平均负载压力, 可计算网络负载均衡度 (LB), 计算式为

$$LB = (1 - SD) \times 100\% \quad (10)$$

本文采取线性加权法将多目标优化问题转换为单目标优化问题, 加权后的优化目标为

$$\min Z = (\omega_1 \times W - \omega_2 \times c_3 \times T + \omega_3 \times LB)^{-1} \quad (11)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为多目标函数的权重值.

1.3 约束条件

1) 车底资源约束

车底资源约束限制了开行方案设计中任意始发

终到站间开行的列车数量之和不得超过最大可使用列车数量.

$$\sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} x_{ij}^{kt} \leq N_t \quad (12)$$

其中, N_t 是可使用列车数量上限.

2) 客流需求约束

旅客列车开行方案必须以满足旅客基本出行需求为前提, 即任意 OD (Origin-destination) 对间开行的所有列车的载客量之和不得小于该 OD 对的客流需求.

$$\sum_{i \in S^{\text{ori}}} \sum_{j \in S^{\text{ter}}} \sum_{k=1}^N \sum_{t \in T} q_{ijp}^{kt} \geq Q_p, \quad \forall p \in P \quad (13)$$

其中, Q_p 是区间 p 的客流需求量.

3) 载客能力约束

列车的最大载客量是由列车类型和编组方案决定的, 在实际运输过程中, 列车在任意时刻任意区段所承载的总旅客数量都不得超过该列车的最大承载能力.

$$\sum_{p \geq e} q_{ijp}^{kt} \leq C_t, \quad \forall i \in S^{\text{ori}} \quad (14)$$

$$j \in S^{\text{ter}}, k = 1, \dots, N, t \in T, e \in E_{ij}^k$$

其中, C_t 是列车 t 的最大载客量.

4) 上座率约束

列车上座率是指购票上车的旅客数量与列车定员的比率, 体现了列车的席位利用率. 上座率过低, 会造成车底资源利用的浪费, 从而影响列车运营收益; 上座率过高, 会造成旅客出行舒适度降低, 进而影响旅客出行满意度. 因此, 设计开行方案时需限制上座率在合理的范围内.

$$a_{\min} \leq \frac{1}{C_t} \sum_{p \in E_{ij}^k} q_{ijp}^{kt} \leq a_{\max} \quad (15)$$

$$\forall i \in S^{\text{ori}}, j \in S^{\text{ter}}, k = 1, \dots, N, t \in T$$

其中, a_{\min} 是最小上座率, a_{\max} 是最大上座率.

5) 其他约束

任意开行列车的载客量满足非负约束 (16). 此外, 根据模型特点可知, x_{ij}^{kt} 和 y_{iju}^{kt} 均属于 0-1 变量, 满足约束 (17) 和 (18).

$$q_{ijp}^{kt} \geq 0, \quad \forall i \in S^{\text{ori}}, j \in S^{\text{ter}} \quad (16)$$

$$k = 1, \dots, N, t \in T, p \in P_{ij}^k$$

$$x_{ij}^{kt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in S^{\text{ori}}, j \in S^{\text{ter}} \quad (17)$$

$$k = 1, \dots, N, t \in T$$

$$y_{iju}^{kt} \in \{0, 1\}, \forall i \in S^{\text{ori}}, j \in S^{\text{ter}}$$

$$k = 1, \dots, N, t \in T, u \in U_{ij}^k \quad (18)$$

2 求解算法设计

本文所提出的多目标优化模型属于非线性混合整数规划问题, 该模型具备非线性、多目标且决策变量维度高等特点, 优化问题的求解规模非常大. 为了降低求解维度、减小搜索空间从而提升解的质量, 本节设计了基于遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 和粒子群优化算法 (Partical swarm optimization, PSO) 的两阶段混合搜索算法, 将该复杂优化问题分解为两阶段进行求解. 其中, 第 1 阶段确定列车开行路径方案, 第 2 阶段确定列车的停站方案及对应的客流分配方案. 第 1 阶段的解作为第 2 阶段的输入, 第 2 阶段求得的结果返回给第 1 阶段作为路径方案的评价标准. 两阶段混合搜索算法的流程图如图 1 所示.

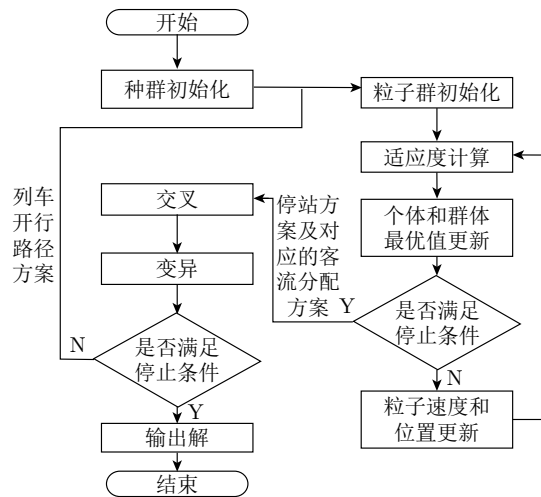


图 1 两阶段混合搜索算法流程图

Fig.1 Flow chart of the two-stage hybrid algorithm

第 1 阶段使用遗传算法生成列车开行路径方案, 其中涉及到的参数如表 1 所示.

具体步骤如下:

步骤 1. 初始化. 将决策变量 x_{ij}^{kt} 进行编码, 由

表 1 GA 参数列表
Table 1 Parameter list of GA

参数	定义
$genLength$	基因长度
$popSize$	种群数量
$gaMaxGen$	最大迭代次数
p	变异概率

于 x_{ij}^{kt} 属于 0-1 变量, 故采取二进制编码的形式. 染色体基因的长度等于 x_{ij}^{kt} 的长度, 即具备始发能力的车站数、具备终到能力的车站数、每个始发终到站间可选路径数与可开行列车数的乘积. 若 $x_{ij}^{kt} = 1$, 则染色体对应位置的基因为 1, 否则为 0.

步骤 2. 适应度计算. 第 1 阶段每条染色体适应度的值 $f(x_i)$ 由第 2 阶段决定, 将染色体的基因作为第 2 阶段的输入值, 在第 2 阶段求得目标值后反馈给第 1 阶段用以评估该条染色体的优劣.

步骤 3. 个体选择. 个体选择是指从父代染色体中筛选出用于交叉的个体. 本算法中采用轮盘赌选择法进行父代染色体选择, 根据个体适应度计算每个个体被遗传到下一代群体中的概率 $P(x_i)$ 与累计概率 q_i , 再进行随机选择. 其中, $P(x_i)$ 与 q_i 的计算式为

$$P(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \quad (19)$$

$$q_i = \sum_{j=1}^i P(x_j) \quad (20)$$

步骤 4. 染色体交叉. 交叉是指将个体选择得到的两个父代个体的染色体特定位置的基因进行交换, 从而生成新的个体产生下一代的过程.

步骤 5. 染色体变异. 变异是指以一定的概率对染色体特定位置的基因进行改变从而产生新个体的过程. 变异可以使群体的进化过程具备一定的随机搜索能力, 同时也保持了群体多样性, 防止算法陷入局部最优.

步骤 6. 终止条件判断. 如果群体的迭代次数已经达到了预设的最大迭代次数或者是解达到了精度要求, 则结束迭代, 否则继续执行步骤 2.

第 2 阶段使用粒子群算法求解客流分配方案和对应的列车停站方案, 算法涉及的参数如表 2 所示.

表 2 PSO 参数列表
Table 2 Parameter list of PSO

参数	定义
$parSize$	粒子群数量
$psoMaxGen$	最大迭代次数
α, β	学习因子

具体步骤如下:

步骤 1. 初始化. 以第 1 阶段确定的列车开行径路方案 x_{ij}^{kt} 为输入参数, 用粒子来刻画客流分配方案. 每个粒子具备两个属性: 速度 v_i 和位置 p_i , 其中

粒子的位置即对应一个候选解, 代表粒子移动的方向; 粒子的速度代表了粒子移动的快慢. 根据得到的客流分配方案, 确定列车停站方案.

步骤 2. 适应度计算. 适应度函数为该优化模型的总优化目标, 即式 (11), 每个粒子找到的最优解标记为该粒子的个体极值 P_{best} , 个体极值中的最优值标记为全局最优解 G_{best} .

步骤 3. 更新粒子状态. 粒子的速度和位置的更新方式分别如式 (21) 和 (22) 所示.

$$v_i = \omega v_i + c_1 r_1 (P_{\text{best}}^i - p_i) + c_2 r_2 (G_{\text{best}} - p_i) \quad (21)$$

$$p_i = p_i + v_i \quad (22)$$

其中, ω 是惯性因子; c_1 和 c_2 分别是个体学习因子和社会学习因子; r_1 和 r_2 是在 $[0, 1]$ 范围内的随机数.

根据更新的粒子状态, 可确定对应的停站方案.

步骤 4. 终止条件判断. 如果种群的迭代次数已经达到了预设的最大迭代次数或者解的精度达到了要求, 进入步骤 5, 否则继续执行步骤 2.

步骤 5. 返回第 1 阶段. 将本次粒子群算法求得的适应度最优值及对应的客流分配方案和停站方案反馈给第 1 阶段, 作为第 1 阶段所确定的列车开行路径方案的适应度值.

3 开行方案综合评估指标体系

本节建立面向网络化运营场景的开行方案综合评估指标体系, 结合运输特性和网络特性, 分别从能力指标、技术指标、旅客满意度指标与网络鲁棒性指标四方面进行研究. 针对网络鲁棒性的研究, 进一步设置随机节点失效和特定节点失效场景, 研究故障场景下高速铁路网络性能的演化规律.

3.1 运输特性评估

3.1.1 能力指标

1) 旅客周转量

旅客周转量是指运送的旅客人数和运送距离的乘积, 通常以人公里作为计算单位, 可以反映在一段时间内的旅客运输工作总量. 该指标的计算式为

$$M_p = \sum_{t=1}^N \sum_p q_{tp} \times l_{tp} \quad (23)$$

其中, q_{tp} 表示列车 t 在运行路径中的区段 p 的载客量, l_{tp} 表示列车 t 在运行路径中的区段 p 的距离.

2) 客座周转量

客座周转量是指列车在满座情况下运输的旅客人公里数, 即等于列车最大载客量和始发终到站之

间的总运行距离的乘积, 计算式为

$$M_s = \sum_{t=1}^N C_t \times D_t \quad (24)$$

其中, C_t 表示列车 t 的定员人数, D_t 表示列车 t 在始发终到站之间的总走行距离.

3) 空座位走行距离

空座位走行距离是指列车开行过程中所有无旅客乘坐的座位所通过的区段长度之和, 可由客座周转量和旅客周转量之差来表示. 空座位走行距离越小, 表示列车资源的虚糜程度越低, 同时对运输资源的利用率越高. 该指标从绝对距离的角度对资源利用率进行了表征, 具体计算式为

$$L_{\text{empty}} = \sum_{t=1}^N \left(C_t \times D_t - \sum_p q_{tp} \times l_{tp} \right) \quad (25)$$

4) 客座利用率

客座利用率是指列车运输的旅客周转量和客座周转量的比值, 通过客座席位的实际完成人公里数与满座情况下完成人公里数之比来表示, 该指标从相对占比的角度体现运输资源的利用率, 计算式为

$$\lambda = \frac{M_p}{M_s} \times 100\% \quad (26)$$

3.1.2 技术指标

1) 列车需求数量

列车需求数量直接影响高速铁路的运营成本, 如果列车需求数量过少, 可能造成旅客出行的选择多样性无法满足; 若列车需求数量过多, 则会造成运营成本增加、运营收益降低. 同时, 由于各路局列车保有量有限, 列车的使用可能会对后续列车接续计划产生一定的影响.

2) 列车平均走行距离

列车平均走行距离是指每一列车在始发终到站之间运行的平均公里数. 计算式为

$$\bar{L}_{\text{train}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N D_t \quad (27)$$

其中, D_t 是指列车 t 开行路径的总距离.

3) 列车总开行时间

列车总开行时间是指开行方案中所有列车从始发站到达终到站的开行时长之和. 计算式为

$$T_{\text{all}} = \sum_{t=1}^N \frac{D_t}{v_t} \quad (28)$$

3.1.3 旅客满意度指标

1) 列车总停站次数

本文所定义的列车总停站次数是指列车在运行

路径中除去始发终到站后在中间站的停站作业数量. 停站次数与旅客的出行时间相关, 列车停站次数过多会造成旅客出行总时长的增加, 从而导致旅客出行满意度的下降; 停站次数过少, 则可能造成列车开行成本增大, 运输资源利用率不高. 列车停站次数可根据停站方案统计得出.

2) 停站方式数量

停站方式数量能够反映列车停站方案的多样性. 在同一个起讫点之间, 停站方式越多运营多样性越强, 表明旅客出行的可选择性越多, 从而高速铁路运营的抗干扰能力越强.

3) 直达列车数

直达列车数是指在开行路径中除了始发站和终到站外不存在停站作业的列车数量. 直达列车数越多, 旅客乘车的时间越短, 出行的便捷度越高. 直达列车通常开行在短距离交路中, 而长距离交路往往采用交错停站或站站停的模式.

3.2 网络特性评估

运输特性评估可以反映在无突发事件或故障状态下高速铁路运营性能的优劣, 但无法刻画开行方案在应对突发事件时的抗干扰能力. 为研究突发事件对路网运营特性的影响, 本节采用复杂网络理论中的 Space L 建模方法将开行方案映射成列车服务网络模型. 该建模方法是以车站作为节点 v_i , 同一趟车次的列车在开行路径上连续停靠的两个车站之间构成一条边 e_{ij} , 建模示意图如图 2 所示.

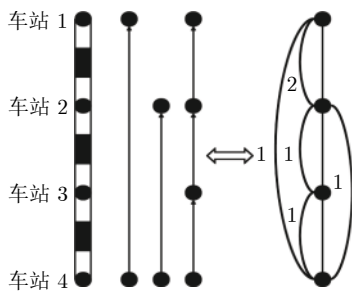


图 2 列车服务网络建模示意图

Fig.2 Schematic of train service network modelling

列车服务网络是由开行方案映射而成, 开行方案给定, 列车服务网络即可确定. 突发事件通常会使得高速铁路网中的车站或者线路发生故障, 对应到网络模型中可表示为节点或者边的失效. 一旦发生了突发情况, 失效的节点或边随即会从列车服务网络中移除, 同时会影响与失效节点或边相连的其他边或节点. 对于任何可能发生的突发事件, 对他们会对网络结构产生的直接影响进行建模并分析其对整个系统稳定性的影响有利于铁路运输部门确定调

整策略. 同时, 通过对比突发事件发生前后列车服务网络的性能差异, 可以评估开行方案的鲁棒性优劣, 进而为开行方案的设计、优化与调整提供科学依据.

为了研究开行方案的鲁棒性, 本节首先提出两种移除策略来模拟列车服务网络中节点的随机失效和特定失效场景. 两种移除策略分别为:

1) 随机移除策略. 该策略是以随机的概率从网络中选择失效节点.

2) 基于节点负载压力的移除策略. 该策略是以列车服务网络中节点负载压力的大小为依据, 依次从网络中移除负载压力最大的节点.

在遭受网络攻击时, 列车服务网络中边的数目会减少, 对应到实际运营环境中表示能够维持运输能力的列车开行区段数量下降. 同时, 由于列车开行区段受到破坏, 对应的列车开行计划必然受到影响, 能够正常运营作业的列车数量减少. 为了表征列车服务网络在遭受到攻击后性能的变化, 本节提出网络可达率 (Node reachability ratio, NRR) 和服务损失率 (Service loss ratio, SLR) 指标来刻画列车服务网络的鲁棒性能.

1) 网络可达率. 该指标表示在遭受到攻击后, 列车服务网络中可连通节点对间的边数目占最大连通图的边数目之比, 计算方法为

$$NRR = \frac{N_r}{N(N-1)} \quad (29)$$

其中, N_r 表示列车服务网络在遭受攻击后的边数量, N 表示列车服务网络在遭受攻击前的总节点数量.

2) 服务损失率. 该指标定义为网络在遭受攻击后受影响的列车数量占受攻击前的开行列车数量之比, 计算方法为

$$SLR = \frac{T_{\text{after}} - T_{\text{before}}}{T_{\text{before}}} \quad (30)$$

其中, T_{before} 表示列车服务网络在遭受攻击前可正常开行的列车数量; T_{after} 表示列车服务网络在遭受攻击后能够正常开行的列车数量.

若随着移除的节点的增多, 网络可达率和服务损失率下降越快, 则表明网络的鲁棒性越低; 反之则表明网络的鲁棒性越高.

4 算例仿真

本节基于我国实际的高速铁路网场景, 对基于负载均衡的开行方案优化方法的有效性和优异性进行验证, 并采用开行方案综合评估指标体系对比未考虑网络负载均衡的开行方案与考虑网络负载均衡的开行方案的特性.

为便于后续建模分析, 本节首先对仿真基于的

高速铁路网络进行说明, 并给出以下前提条件:

- 1) 对实验的高速铁路网络, 本节仅考虑具备旅客作业业务的车站, 不考虑线路所或者不办理动车组客运业务的车站;
- 2) 本实验以城市为单位, 将同一个城市中的多个车站合并为一个节点, 如北京南站和北京西站合并为北京站, 合并后的车站股道数量取被合并车站股道数量的均值;
- 3) 由于实际运营过程中列车总是成对运行, 因此本节仅研究下行的旅客列车开行方案, 上行的旅客列车开行方案可同理得出。

4.1 输入数据

本节选取具备代表性的北京局管辖内的局域高速铁路网进行仿真求解, 建立以京津城际线、京沪高铁线中北京至天津段、京广高铁线中北京至保定段、霸徐线、津霸客专以及既有线北京至霸州西段组成的高速铁路子网络, 以下简称北京-天津-保定高速铁路网络为 BTBN (Beijing-Tianjin-Baoding network). 该网络的线路示意图如图 3 所示, 处理后的北京-天津-保定高速铁路子网络的路网结构及各站间距离如图 4 所示。



图 3 北京-天津-保定高速铁路线路示意图
Fig.3 High-speed railway line of BTBN

在该网络算例中, 各个车站的编号及股道信息如表 3 所示, 初始开行方案如图 5 所示 (数据来源: <https://www.12306.cn>). 为便于后续计算分析, 本节涉及到的列车开行速度取平均值 300 公里/小时, 列车最大载客量按两列车重联的标准 1100 人/车进行计算. 北京-天津-保定高速铁路网中具备始发终到能力的车站集合为 $S^{\text{ori}} = \{s_0, s_3, s_5\}$, $S^{\text{ter}} = \{s_0, s_3, s_5\}$.

4.2 仿真分析

通过算法的参数敏感性分析, 设置各个参数如表 4 所示, 算法的收敛过程及经过优化后得到的开行方案 (以下简称优化方案) 分别如图 6 和图 7 所示. 初始方案和优化方案的各个子目标计算结果如表 5 所示. 分析可知, 优化方案在网络负载均衡度

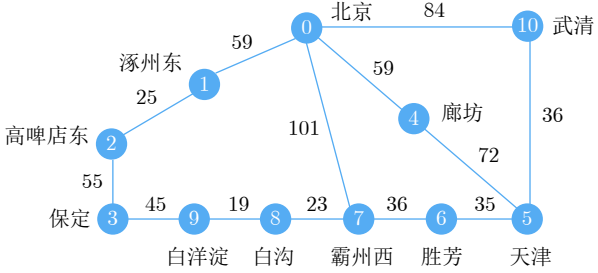


图 4 北京-天津-保定高速铁路路网结构示意图
Fig.4 Network model of the BTBN high-speed railway

表 3 北京-天津-保定高速铁路车站信息
Table 3 Station information of BTBN

车站名称	车站编号	车站股道数
北京	0	22
涿州东	1	4
高碑店东	2	4
保定	3	8
廊坊	4	4
天津	5	16
胜芳	6	4
霸州西	7	4
白沟	8	6
白洋淀	9	4
武清	10	2

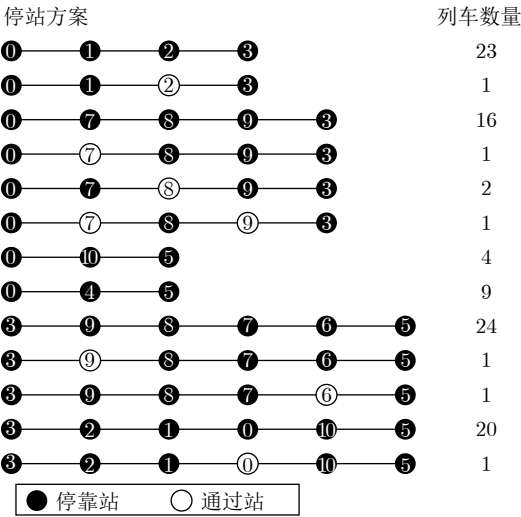


图 5 初始方案
Fig.5 Original line plan

上相较于初始方案提升了 8.66%, 表明优化后的开行方案能够较好地均衡高速铁路运营过程中各个车站的负载压力. 同时, 优化方案的路局收益比初始方案增加了 36.79%, 而旅客总乘车时间增多了 30.07%, 该结果表明优化方案是通过增加旅客乘车时间来扩

表 4 参数取值
Table 4 Parameters value

参数	取值
<i>popSize</i>	50
<i>gaMaxGen</i>	300
<i>p</i>	0.005
<i>psoMaxGen</i>	500
α	2
β	2
<i>parSize</i>	50

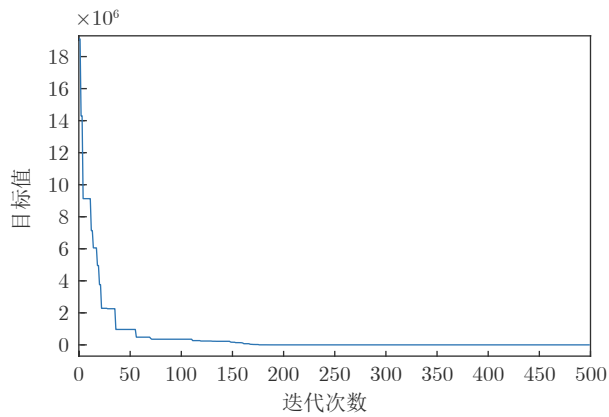


图 6 算法收敛过程
Fig.6 Algorithm convergence process

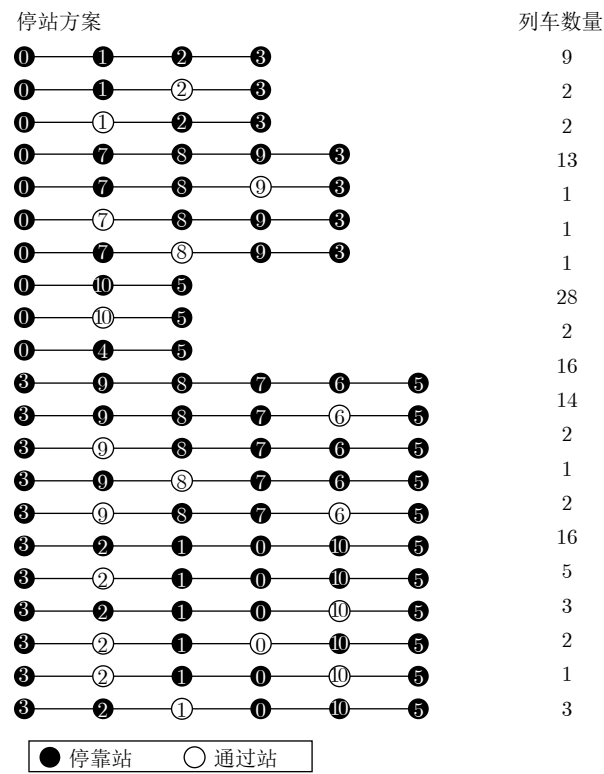


图 7 优化方案
Fig.7 Optimized plan

表 5 初始方案和优化方案计算结果
Table 5 Results of original plan and oprimized plan

指标	初始方案	优化方案
路局收益 (元)	4 345 102.8400	5 943 671.7200
旅客总乘车时间 (小时)	49 886.0800	64 888.9533
网络负载均衡度	0.6801	0.7390

大路局收益, 从而进一步论证了路局效益和旅客乘车时间之间存在着博弈关系.

为了更全面地对比分析初始方案和优化方案的性能差异, 采用开行方案综合评估指标体系分别研究初始方案和优化方案的特性. 首先, 对初始方案和优化方案的运输特性进行计算, 结果如表 6 所示.

表 6 开行方案运输特性评价方法对比结果
Table 6 Comparison results of transportation evaluation method of line plan

指标属性	具体指标	初始方案	优化方案
能力指标	旅客周转量 (人·公里)	12156 035	16474 979
	客座周转量 (人·公里)	20033 200	23391 500
	空座位走行距离 (人·公里)	7877 165	6916 521
	客座利用率 (%)	60.68	70.43
技术指标	列车需求数量 (对)	104	125
	列车平均走行距离 (公里)	175.115	170.248
	列车总开行时间 (小时)	60.71	70.94
	列车总停站次数	300	287
旅客满意度指标	停站方式数量	13	21
	直达列车数量	0	2

对比结果表明, 在能力指标方面, 优化方案的旅客周转量和客座利用率都高于初始方案, 优化方案的空座位走行距离缩短了将近 12.20%, 客座利用率提升了约 16.07%. 在技术指标方面, 优化方案开行的列车数量要多于初始方案, 列车总旅行时间增加了近 16.85%, 列车平均走行距离缩短了约 2.78%. 在旅客满意度指标方面, 优化方案的列车总停站次数减少了 4.33%, 列车停站方式数量增加了 61.54%, 并且直达列车数量增多. 通过分析可得, 优化方案在对开行列车的能力利用上要优于初始方案, 空座位走行距离较短且客座利用率提升明显, 运输资源的虚糜较少, 说明负载均衡的开行方案能够较好地提高高速铁路运输资源利用率. 对比技术指标计算结果可得, 优化方案对开行列车的需求增加, 列车的总开行时间也增大, 从而会带来比初始方案更大的运营成本. 此外, 初始方案与优化方案均采用交错停站的停站模式, 但优化方案的停站方式数量要显著多于初始方案, 不同的停站模式决定了列车开行路径沿线的客流吸引力不同. 同一起讫

点间停站方式数量越多, 旅客出行的可选择性越强, 在发生突发事件的情况下高速铁路运营的抗干扰能力也越强. 列车停站次数与旅客出行时间相关, 停站次数的增多会造成旅客停站等待时间增长, 从而降低旅客出行满意度. 通过对比可以发现, 优化方案的列车总停站次数要少于初始方案, 说明优化方案在停站次数方面的性能要优于初始方案. 对于北京和天津之间的旅客出行需求, 优化方案设置了两列从北京直达天津的旅客列车, 通过开行直达列车可以较好地提高两站间出行的便捷程度. 综合上述分析, 在运输特性方面优化方案要优于初始方案.

为研究列车服务网络在遭受不同突发事件情况下的鲁棒性, 分别采取随机移除策略和基于节点负载压力的移除策略两种方式设置失效场景. 图 8 和图 9 分别展示了基于随机移除策略的网络可达率和服务损失率随着移除节点数量增加的变化情况.

分析可知, 在移除相同的节点数量下, 优化方案在网络可达率方面的性能要显著优于初始方案, 表示在优化方案下受到破坏的列车运行区段比例要少于初始方案, 说明优化方案能够维持的运输能力

更强. 此外, 对于服务损失率, 在随机移除策略下优化方案的性能始终优于初始方案, 且优化方案的性能变化相对初始方案较平稳. 在移除节点数量为 7 时, 初始方案对应的列车服务网络已处于崩溃状态, 同时优化方案与初始方案的性能差达到了最大值 0.2736, 而优化方案的网络崩溃临界点为移除节点数为 10. 该结果表明负载均衡的开行方案能够较好地保持列车正常开行, 使得发生突发事件时路网中受影响的列车比例降低.

为了分析基于节点负载压力移除策略下列车服务网络的鲁棒性, 首先对网络中各个节点的负载压力进行计算, 得到的排序结果如表 7 所示. 网络可达率和服务损失率随移除节点数量变化的趋势分别如图 10 和图 11 所示. 对比可知, 从整体上而言优化方案的网络可达率要优于初始方案, 且当移除节点数为 10 时, 优化方案和初始方案所对应的列车服务网络均处于崩溃状态, 任意两个车站之间均不可达. 此外, 当移除节点数量少于 4 个时, 初始方案的服务损失率要低于优化方案; 当移除节点数量超过 4 个时, 优化方案的服务损失率要低于初始方案. 该移除策略是以节点负载压力大小为依据, 由大到小依次移除负载压力最大的节点, 由于优化方案在提升网络负载均衡性的过程中, 均衡了各个车站的负载压力, 使得列车服务网络更趋向于同质性网络, 因此, 在依次移除节点的过程中, 优化方案的性能下降相对于初始方案而言较平缓, 在移除节点数量较少的情况下, 优化方案受影响的网络性能要高于初始方案; 当移除节点数量超过临界值后, 初始方案的性能下降迅速, 对比之下优化方案的性能提升明显.

根据综合评估结果可知, 在运输特性方面, 优化方案能够显著提升运输资源的利用率并提高旅客出行满意度, 同时在网络特性方面, 优化方案增强了基于随机移除策略和基于节点负载压力的特定移除策略下网络的鲁棒性, 能够更好地维持运输能力和运营特性. 通过对开行方案进行综合评估, 一方面可以为铁路部门制定科学合理的开行方案提供依据, 另一方面也能够对高速铁路网中的关键节点进行防护, 保障高速铁路日常运营的稳定性.

5 结论

本文在高速铁路成网场景下从网络视角展开了基于负载均衡的高速铁路旅客列车开行方案优化与评估方法研究. 首先针对当前高速铁路运营过程中存在的运输需求与运力资源不匹配现象, 构建以经济效益、社会效益和网络整体资源利用率为目标,

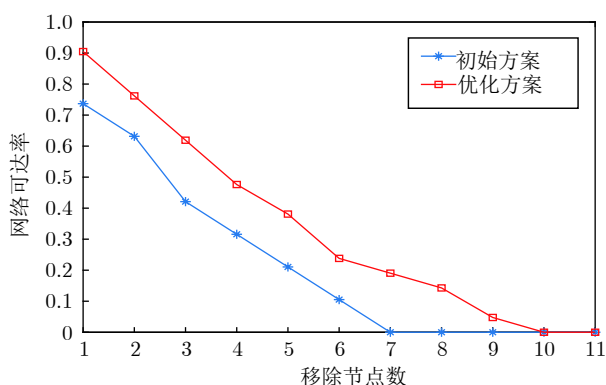


图 8 基于随机移除策略的网络可达率变化图

Fig.8 NRR changes under random attack

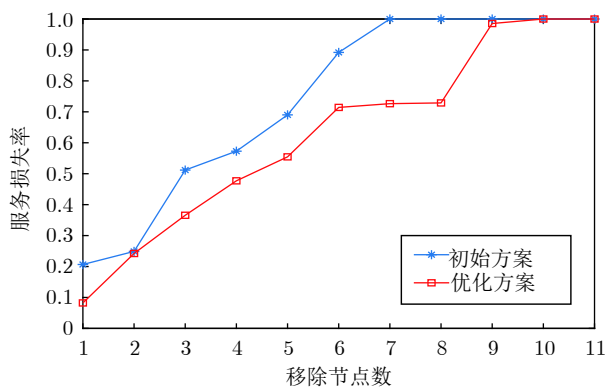


图 9 基于随机移除策略的服务损失率变化图

Fig.9 SLR changes under random attack

表 7 节点负载压力排序结果
Table 7 Sort results of node load-pressure

序号	节点介数	节点负载压力	
		初始方案	优化方案
1	北京	涿州东	武清
2	霸州西	武清	涿州东
3	涿州东	高碑店东	霸州西
4	白沟	霸州西	高碑店东
5	高碑店东	白洋淀	白洋淀
6	白洋淀	白沟	白沟
7	胜芳	胜芳	保定
8	保定东	保定	胜芳
9	天津	北京	廊坊
10	廊坊	廊坊	天津
11	武清	天津	北京

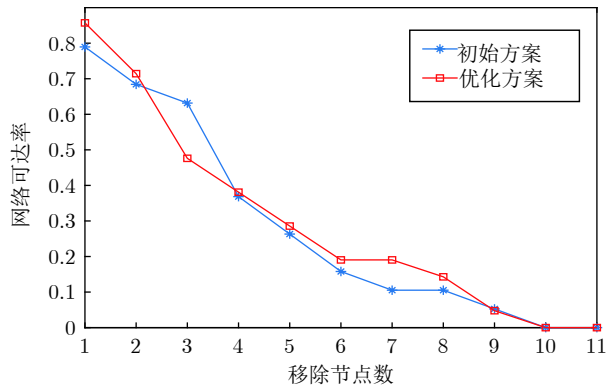


图 10 基于负载压力移除策略的网络可达率变化图
Fig.10 NRR changes under LP-based attack

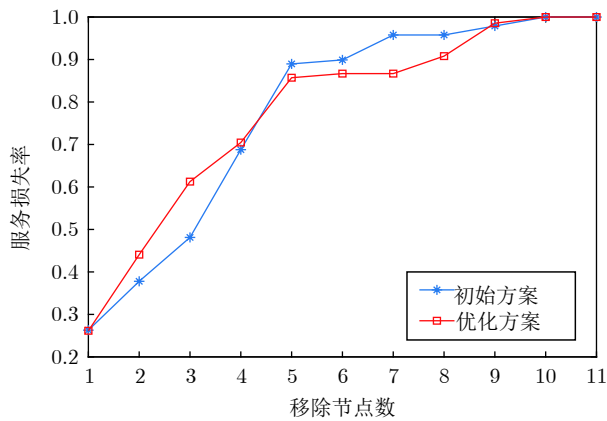


图 11 基于负载压力移除策略的服务损失率变化图
Fig.11 SLR changes under LP-based attack

面向负载均衡的多目标非线性混合整数规划模型优化列车开行方案,并设计了基于遗传算法和粒子群算法的两阶段混合搜索算法进行求解.此外,为对

开行方案的质量进行定量评估,并考虑开行列车在高速铁路网中的抗干扰能力,建立了面向网络化运营场景的开行方案综合评估指标体系,揭示了故障场景下高速铁路网络性能的演化规律,从运营角度和网络结构角度论证了优化方案的优越性.最后以实际高速铁路线路数据和运营数据为场景进行仿真实验,验证了提出的优化方法可以生成一个科学的、综合效益更高的开行方案,在保证运输需求的同时能够有效地提升网络整体负载均衡性,并使得发生故障时网络的抗干扰能力增强.

References

1 China State Railway Group Co., Ltd. 2020 Statistical Bulletin of China State Railway Group Co., Ltd. [Online]: available: http://www.china-railway.com.cn/wnfw/sjfw/202103/t20210305_113499.html, March 5, 2021
(中国国家铁路集团有限公司. 中国国家铁路集团有限公司2020年统计公报 [Online]: available: http://www.china-railway.com.cn/wnfw/sjfw/202103/t20210305_113499.html, March 5, 2021)

2 Ning Bin, Dong Hai-Rong, Zheng Wei, Xun Jing, Gao Shi-Gen, Wang Hong-Wei, et al. Integration of train control and online rescheduling for high-speed railways: Challenges and future. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(12): 2208–2217
(宁滨, 董海荣, 郑伟, 荀径, 高士根, 王洪伟, 等. 高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望. *自动化学报*, 2019, **45**(12): 2208–2217)

3 Fu H L, Nie L, Meng L Y, Sperry B R, He Z H. A hierarchical line planning approach for a large-scale high speed rail network: The China case. *Transportation Research Part A*, 2015, **75**: 61–83

4 Gattermann P, Harbering J, Schöbel A. Line pool generation. *Public Transport*, 2017, **9**(1): 7–32

5 Yue Y X, Wang S F, Zhou L S, Tong L, Saat M R. Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, **63**: 126–146

6 Han P W, Nie L, Fu H L, Gong Y T, Wang G. A multi-objective integer linear programming model for the cross-track line planning problem in the Chinese high-speed railway network. *Symmetry*, 2019, **11**(5): 670

7 Canca D, De-Los-Santos A, Laporte G, Mesa J A. An adaptive neighborhood search metaheuristic for the integrated railway rapid transit network design and line planning problem. *Computers and Operations Research*, 2017, **78**: 1–14

8 Park B H, Seo Y I, Hong S P, Rho H L. Column generation approach to line planning with various halting patterns — application to the Korean high-speed railway. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2013, **30**(4): 1350006

9 Jamili A, Aghaee M P. Robust stop-skipping patterns in urban railway operations under traffic alteration situation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, **61**: 63–74

10 Fu H L, Nie L, Benjamin R S, He Z H. Train stop scheduling in a high-speed rail network by utilizing a two-stage approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, **2012**: 579130

11 Chen D J, Ni S Q, Xu C A, Lv H X, Wang S M. High-speed

train stop-schedule optimization based on passenger travel convenience. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, **2016**: 8763589

- 12 Tong Lu. Passenger Flow Assignment Theory and Methods of the High-Speed Railway Transport Service Planning [Ph.D. dissertation]. Beijing Jiaotong University, China, 2013.
(佟璐. 高速铁路客运产品设计中的客流分配理论与方法研究 [博士学位论文]. 北京交通大学, 中国, 2013.)
- 13 Su Huan-Yin, Shi Feng, Deng Lian-Bo, Shan Xing-Hua. Time-dependent demand oriented line planning optimization for the high-speed railway. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, **16**(5): 110–116
(苏焕银, 史峰, 邓连波, 单杏花. 面向时变需求的高速铁路列车开行方案优化方法. 交通运输系统工程与信息, 2016, **16**(5): 110–116)
- 14 Shi Feng, Li Yan-Lin, Hu Xin-Lei, Xu Guang-Ming, Shan Xing-Hua. Service level oriented optimization of train operation plan for high speed railway. *China Railway Science*, 2018, **39**(5): 127–136
(史峰, 李彦霖, 胡心磊, 徐光明, 单杏花. 面向服务水平的高速铁路列车开行方案优化. 中国铁道科学, 2018, **39**(5): 127–136)
- 15 Huang Jian. Optimization of Train Operation Plan for Network of Dedicated Passenger Lines Based on Passenger Flow Dynamic Adjustment [Ph.D. dissertation]. Southwest Jiaotong University, China, 2013.
(黄鉴. 基于客流动态调整的客运专线网络列车开行方案优化研究 [博士学位论文]. 西南交通大学, 中国, 2013.)
- 16 Zhang Xin. Theory and Method of Cycle Line Planning for High Speed Railway Based on Capacity Utilization [Ph.D. dissertation]. Beijing Jiaotong University, China, 2019.
(张新. 基于能力利用的高速铁路周期模式列车开行方案优化理论与方法 [博士学位论文]. 北京交通大学, 中国, 2019.)
- 17 Wu X T, Dong H R, Tse C K, Ho I W H, Lau F C M. Analysis of metro network performance from a complex network perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, **492**: 553–563
- 18 Wu Xing-Tang. Characterization of Network Performance and Coupling Optimization of Timetables for Rail Transit [Ph.D. dissertation]. Beijing Jiaotong University, China, 2020.
(吴兴堂. 轨道交通网络特性及时刻表协调优化 [博士学位论文]. 北京交通大学, 中国, 2020.)
- 19 Peng Qi-Yuan, Wen Chao. *Foundation of High Speed Railway Transportation Organization*. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2014. 26
(彭其渊, 文超. 高速铁路运输组织基础. 成都: 西南交通大学出版社, 2014. 26)



吴兴堂 北京航空航天大学博士后. 主要研究方向为轨道交通网络建模, 延误预测和延误传播.

E-mail: wuxingtang@bjtu.edu.cn

(WU Xing-Tang Postdoctor at Beihang University. His research interest covers modeling of rail transit network, delay prediction, and delay propagation.)



杨明坤 北京交通大学硕士研究生. 主要研究方向为高铁网络建模, 延误传播建模.

E-mail: 19120261@bjtu.edu.cn

(YANG Ming-Kun Master student at Beijing Jiaotong University. His research interest covers modeling of high-speed railway network and delay propagation.)



王洪伟 北京交通大学副教授. 主要研究方向为基于通信的列车运行控制系统的车-地通信技术和地铁系统中的协作调度方法.

E-mail: hwwang@bjtu.edu.cn

(WANG Hong-Wei Associate professor at Beijing Jiaotong University. His research interest covers train-ground communication technology in communication base train-ground communication systems and cooperative scheduling approaches in subway systems.)



周敏 北京交通大学副教授. 主要研究方向为高铁智能调度, 行人与疏散动力学和平行系统理论.

E-mail: minzhou@bjtu.edu.cn

(ZHOU Min Associate professor at Beijing Jiaotong University. His research interest covers high-speed railway intelligent dispatching, pedestrian and evacuation dynamics and parallel system theory.)



吕金虎 北京航空航天大学教授. 主要研究方向为智能系统, 协同控制理论与技术, 复杂网络与大数据.

E-mail: jhlu@iss.ac.cn

(LV Jin-Hu Professor at Beihang University. His research interest covers intelligent systems, cooperative control theory and technology, complex networks, and big data.)



董海荣 北京交通大学教授. 主要研究方向为列车运行智能控制与优化, 调度控制一体化. 本文通信作者

E-mail: hrdong@bjtu.edu.cn

(DONG Hai-Rong Professor at Beijing Jiaotong University. Her research interest covers intelligent control and optimization of train operation, integration of scheduling and control. Corresponding author of this paper.)