

文章编号: 2097-5899(2026)09-0001-08

中图分类号: U294.1

文献标识码: A

DOI: 10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202510270001

引用格式: 张波, 何玲, 杨晨, 等. 考虑动态运价的航空高铁联合快运网络路径优化[J]. 铁路物流, 2026, 44(9): 1-8.

ZHANG Bo, HE Ling, YANG Chen, et al. Route Optimization of Air-Rail Intermodal Express Networks Considering Dynamic Pricing[J]. Railway Logistics, 2026, 44(9): 1-8.

考虑动态运价的航空高铁联合快运网络 路径优化

张波¹, 何玲², 杨晨², 黄志鹏³, 王宇³, 苗宇森³, 李金莲³

(1. 中国铁路兰州局集团有限公司 客运部, 甘肃 兰州 730030; 2. 中国铁路兰州局集团有限公司 兰州
车站, 甘肃 兰州 730030; 3. 兰州交通大学 交通运输学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对航空高铁联合快运网络中因班次延误、节点失效等突发事件引发的路径中断与运力失衡问题, 提出一种融合动态运价的路径优化方法。通过建立容量竞争驱动的运价弹性模型, 量化突发事件导致的局部运力短缺与运价波动关联机制, 构建以总运输时间和成本协同最小化的多目标优化模型。设计基于模拟退火算法的动态响应框架, 用于实时监测网络扰动、更新运输容量与运价, 并实现路径方案的快速重构。算例结果表明, 容量饱和路段运价涨幅可达50%, 促使算法选择替代路径; 联合运输任务完成率显著优于单一运输方式。研究证实多式联运通过资源互补可有效提升网络抗扰动能力, 为动态环境下快运路径决策提供参考。

关键词: 航空高铁联合运输; 动态运价; 路径优化; 模拟退火算法; 容量竞争

0 引言

电子商务与全球供应链发展对高效物流提出更高要求。航空运输在长距离快运中具有速度优势, 高速铁路(以下简称“高铁”)则以高频次、高准点率和强天气适应性主导中短途市场。空铁联运通过资源互补, 可提升网络覆盖与运输效率, 尤其适合高附加值、强时效性货物运输。然而, 班次延误、节点中断等突发事件频发, 不仅破坏原定路径可行性, 更引发局部运力失衡, 导致运价动态波动。

针对班次延误这一经常出现的场景, Marzuoli等^[1]采用多种交通方式协同进行航班恢复, 并提出实施建议。Scozzaro等^[2]基于火车站和机场的容量、航班最小周转时间等现实约束, 调整航班和火车时刻, 减少旅客总延误时间。董巧丽等^[3]基于空铁联运模式, 提出一种

恢复网络, 重新规划航班的路线以最小化损失。陆溪等^[4]构建空铁时空拓扑网络, 以经济损失最小为目标建立旅客行程恢复模型, 搜索可行路径。上述研究在面对突发情况时没有考虑运输价格的变化, 目前考虑动态运价的空铁联运研究主要在旅客的异质性^[5-6]、航空与高铁双方的收益管理^[7]及乘客和空铁联运运营商^[8-9]方面, 对于航空高铁联合快运网络的运价分析少有文献涉及。

当前, 关于空铁联运路径优化的研究已取得一定进展。实际运输过程中, 货物属性差异、供需关系变化等都会引起运输价格的动态变化, 因此本研究分析由突发事件引起的运价变化对运输路径选择的影响。所考虑的突发事件包括班次延误、班次取消、节点失效等, 此类扰动不仅直接破坏原有路径的可行性, 更会引发局部运力供需失衡, 导致运输价格随容量竞争而动态波动。

收稿日期: 2025-10-27

通信作者: 黄志鹏(1983—), 男, 河南长葛人, 兰州交通大学交通运输学院副教授。

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(24JRRA847); 甘肃省高校教师创新基金项目(2025A-055)

1 考虑容量竞争的动态运价

在货物运达时间窗约束基础上, 引入突发事件驱动的动态运价机制, 将路径优化扩展至“时间—成本—扰动响应”多维决策空间。核心逻辑在于: 班次延误或节点失效挤压局部路段容量, 触发运价随容量占用率动态波动。这种波动是网络受冲击后资源再分配的必然结果——高负载路段运价上涨驱动算法探索替代路径, 而路径变更反向调节全网容量分布, 形成动态均衡。

1.1 与容量相关的运价

在运输网络中, 与容量相关运价的核心逻辑是运价与运输资源可用容量的动态绑定关系。具体而言, 某一运输段的运价并非固定, 而是由其当前剩余货运容量与市场需求共同决定。当突发事件导致局部运输能力下降时, 可用容量减少会引发供需失衡, 进而通过价格信号调节资源配置。

建立与容量占用相关的运输价格变动函数如式(1)所示。

$$b(x) = b_0 \left(1 + \lambda \cdot \frac{1 - e^{-\gamma \cdot \frac{z}{z_{\max}}}}{1 - e^{-\gamma}} \right) \quad 0 \leq z \leq z_{\max} \quad (1)$$

式中: $b(x)$ 为当前货运价格, 元/(t·km); z 为当前班次的装载货物量, t; b_0 为基础货运价格, 元/(t·km); λ 为运价上涨最大幅度; γ 为价格弹性系数, 反映运价对供需关系的响应强度; $z_{\max}$ 为当前班次的最大承载量, t。

式(1)的运输价格变动函数通过指数函数将运价与容量占用动态绑定, 能够有效避免过度占用, 且指数函数能够更精准地刻画供需关系的非线性动态, 尤其是在容量接近饱和时的边际价格加速上涨现象。

1.2 引起容量竞争的突发事件

本研究考虑的突发事件主要为4类: 节点运力调整、路线运力调整、单班次延误、多班次延误。节点运力调整表示节点在某时段内完全失去运输能力, 所有始发班次取消; 路段运力调整表示特定班次因货物挤压(紧急货物运输占用)或设备故障, 导致可用货运空间下降; 单班次延误只表示特定班次因机械故障、天气等原因延误 Δt , 但不影响后续班次; 多班次延误考虑线路完全中断的情况, 线路完全中断表示节点 i 到节点 j 的物理通道堵塞, 导致所有班次在时段 $[T_1, T_2]$ 内取消; 不同类型突发事件的影响范围与持续时间也存在区别, 突发事件类型影响维度差异如表1所示。

表1 突发事件类型影响维度差异

Tab.1 Differences in impact dimensions across unexpected event types

事件类型	影响范围	持续时间	可恢复性	解决方法
节点运力调整	全局	长	低	节点移除、流量重分配
路线运力调整	局部	中	中	容量约束动态收紧
单班次延误	微观	短	高	时间窗右移
多班次延误	局部	中	中	路径拓扑重构

2 模型构建

2.1 问题假设

突发事件发生后, 由于运输网络部分失效, 其他路线的运力资源趋于紧张, 局部供需关系失衡, 进而引发货运容量的竞争。在此情况下, 货物运价从固定价格机制转变为随供求关系动态调整的模式。为简化运算, 考虑假设如下。①各货运任务在各时刻的具体位置和运输状态均已知。②各突发事件的影响范围和影响时间均已知。

2.2 参数说明

参数定义如表2所示。

2.3 目标函数

在考虑运价变化的货物动态运输路径优化问题中, 模型的目标函数由总运输时间和总运输成本这2个关键指标构成, 以实现不确定环境下, 货物运输效率与经济性的协同优化。

(1) 总运输时间 C_1' 如式(2)所示。其中, 运输任务到达某一节点的时间 at_j^g , 由该任务从上一个节点出发的时间加上两节点间的运输时间计算得到。两节点间的运输时间 $t_{ij}^{k,m}$, 由基础运输时间和班次延误时间组成。

$$C_1' = \sum_{g \in G} \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} (at_j^g - st_i^g) \quad (2)$$

$$at_j^g = \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M'} x_{ij,k,m}' \cdot (st_{ij}^{k,m} + t_{ij}^{k,m}) \quad (3)$$

$$\forall j \in N', g \in G$$

$$t_{ij}^{k,m} = \frac{d_{ij}^k}{v^k} + dt_{ij}^{k,m} \quad \forall i, j \in N', k \in K, m \in M' \quad (4)$$

(2) 总运输成本 C_2' 为所有货运任务的运输成本总和, 由货物运输成本 C_{21}' 和各节点上的货物转运成本 C_{22}' 共同决定。其中, 货物的运输费率 $c_{ij}^{k,m}$ 与其运输方式和运输班次的容量竞争情况相关, 其具体计算公式如式(6)所示。

表2 参数定义
Tab.2 Parameter definitions

符号	说明
G	货运任务集合
O	始发城市集合
D	终到城市集合
K	运输方式集合
P'	突发事件发生后, 可使用的中转城市集合
N'	突发事件发生后, 所有城市节点集合, $N' = O \cup P' \cup D$
M'	突发事件发生后的运输班次集合
st_i^g	货运任务 g 从始发城市 i 的出发时间
d_{ij}^k	节点 i 到节点 j 使用运输方式 k 的运输距离, km
v^k	运输方式 k 的平均运输速度, km/h
c^{tr}	换装接续的转运费率, 元/t
q^g	货运任务 g 的货运量, t
c^k	运输方式 k 的基础运输费率, 元/(t·km)
$cap_{ij}^{k,m}$	节点 i 到节点 j 通过运输方式 k 的第 m 个班次运输的载重限制, t
t_p^{tr}	货物在中转城市 p 的换装接续时间, h
ET^g	货运任务 g 可接受的最早到达时间
LT^g	货运任务 g 可接受的最晚到达时间
$t_{ij}^{k,m}$	突发事件发生后, 货物通过运输方式 k 的第 m 个班次从节点 i 到节点 j 的运输时间, h
$dt_{ij}^{k,m}$	突发事件发生后, 运输方式 k 的第 m 个班次在从节点 i 到节点 j 的运输过程中产生的延误时间, h
$c_{ij}^{k,m}$	突发事件发生后, 从节点 i 到节点 j 运输方式 k 的第 m 个班次的运输费率, 元/(t·km)
$st_{ij}^{k,m}$	突发事件发生后, 从节点 i 到节点 j 的运输方式 k 的第 m 个班次的出发时间
at_j^g	突发事件发生后, 货运任务 g 到达节点 j 的时间
$x_{ij,k,m}^g$	突发事件发生后, 如果货运任务 g 选择通过运输方式 k 的第 m 个班次从节点 i 到节点 j , 则 $x_{ij,k,m}^g = 1$, 否则 $x_{ij,k,m}^g = 0$
$y_{p,kl}^g$	突发事件发生后, 如果货运任务 g 在节点 i 从运输方式 k 转变为运输方式 l , 则 $y_{p,kl}^g = 1$, 否则 $y_{p,kl}^g = 0$

$$C'_2 = C'_{21} + C'_{22} = \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} \left[\sum_{i \in N'} \sum_{j \in N'} \sum_{m \in M'} x_{ij,k,m}^g c_{ij}^{k,m} q^g d_{ij}^k \right] + \left(\sum_{p \in N'} \sum_{l \in K} y_{p,kl}^g c^{tr} q^g \right) \quad (5)$$

$$c_{ij}^{k,m} = c^k \left(1 + \lambda \cdot \frac{1 - e^{-\gamma \cdot \frac{\sum_{g \in G} x_{ij,k,m}^g q^g}{cap_{ij}^{k,m}}}}{1 - e^{-\gamma}} \right) \quad (6)$$

$$\forall i, j \in N', k \in K, m \in M'$$

(3) 目标函数 C' 如式(7)所示。其中, ω_1, ω_2 分别为总运输时间和总运输成本的权重系数; φ_1, φ_2 为数量级平衡系数^[10], 确保2个子目标函数之间的数量级可比较。

$$\min C' = \omega_1 \varphi_1 C'_1 + \omega_2 \varphi_2 C'_2 \quad (7)$$

2.4 约束条件

(1) 班次衔接约束, 要求货运任务从中转节点 p 出发前往下一节点 j 的时间必须大于等于其到达节点 p 的时间加上换装接续时间。

$$\sum_{j \in N'} \sum_{l \in K} \sum_{m \in M'} x_{pj,l,m}^g \cdot st_{pj}^{l,m} \geq at_p^g + \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} y_{p,kl}^g \cdot t_p^{tr} \quad (8)$$

$$\forall p \in N', g \in G$$

(2) 时间窗约束, 要求货运任务送达终到城市 j 的时间必须严格落在时间窗 $[ET^g, LT^g]$ 范围内。

$$ET^g \leq at_j^g \leq LT^g \quad \forall j \in D, g \in G \quad (9)$$

(3) 容量限制约束, 要求任一班次的货物运输量均不得超过其额定载重限制, 防止因超载引发运输延误或成本增加等。

$$\sum_{g \in G} x_{ij,k,m}^g \cdot q^g \leq cap_{ij}^{k,m} \quad \forall i, j \in N', k \in K, m \in M' \quad (10)$$

(4) 先进先出约束, 要求当多个货运任务采用同一运输方式从节点 i 运送至节点 j 时, 先到达节点 i 的货物必须优先安排运输, 不得延后。

$$(at_i^g - at_i^h) \sum_{m \in M'} \sum_{s \in M'} x_{ij,k,m}^g \cdot x_{ij,k,s}^h (st_{ij}^{k,m} - st_{ij}^{k,s}) \geq 0 \quad (11)$$

$$\forall i, j \in N', k \in K, g, h \in G$$

(5) 路径唯一性约束, 要求同一货运任务在任意两节点间只能通过1种运输方式的1个班次完成运输, 即货运任务的不可拆解性。

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M'} x_{ij,k,m}^g \leq 1 \quad \forall i, j \in N', g \in G \quad (12)$$

(6) 中转次数约束, 要求货物在中转节点只能转运1次。

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M'} y_{p,kl}^g \leq 1 \quad \forall p \in P', g \in G \quad (13)$$

(7) 转运约束, 要求转运只发生在不同运输方式更换时, 同一运输方式之间班次的转换不叫转运。

$$y_{p,kk}^g = 0 \quad \forall p \in P', k \in K, g \in G \quad (14)$$

(8) 环路限制约束, 要求每个货运任务只能被配

送至1个节点1次, 避免运输路径中出现环路现象。

$$\sum_{i \in N'} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M'} x'_{ij,k,m} \leq 1 \quad \forall j \in N', g \in G \quad (15)$$

(9) 流量平衡约束, 要求任一中间节点的流入量严格等于其流出量, 避免路径断裂或资源浪费。

$$\sum_{i \in N'} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M'} x'_{ij,k,m} - \sum_{p \in N'} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M'} x'_{jp,k,m} = \begin{cases} 1 & j \in D \\ -1 & j \in O \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\forall g \in G \quad (16)$$

(10) 运输连续性约束, 要求运输方式的转换必须发生在中转节点处, 且转换后必须严格衔接新的运输方式。

$$\sum_{i \in N'} \sum_{m \in M'} x'_{ip,k,m} + \sum_{j \in N'} \sum_{m \in M'} x'_{pj,l,m} \geq 2y'_{p,l} \quad (17)$$

$$\forall p \in N', k, l \in K, g \in G$$

3 算法设计

空铁联运路径优化问题兼具高纬度组合爆炸、非线性非凸约束及多目标冲突的复杂性, 导致传统精确算法难以适用。而模拟退火算法通过单解迭代机制与概率突跳特性, 在有限的时间内能生成高质量可行解, 对于求解空铁联运网络中的路径优化问题具有很好的适应性。

初始解为前述研究只考虑运达时间窗约束的路径优化结果, 在此基础上, 考虑突发事件对路径优化的影响, 突发事件包括班次延误、班次取消、节点失效、容量下降等。优化过程中, 当有突发事件发生时, 如果运输任务还未开始, 则重新优化该任务的整个路径; 如果运输任务已经开始运输, 则以该任务到达的下一个节点为起点重新开始路径优化选择, 若下一个节点为运输任务终点, 则不需要对该运输任务路径重新进行优化。

即使突发事件不直接影响某运输任务原始路径, 但原始路径路段可能会因容量占用变化引起运输价格变动, 当前时段可能会存在比原始路径更优的路径, 因而当前时段所有未完成的运输任务都需要重新优化路径。

考虑突发事件引起的运输价格动态变化的路径优化步骤如下。

步骤1: 初始解。初始解采用前述工作最终优化得到的路径结果。

步骤2: 事件动态监测。事件按照先后顺序发生, 设定事件触发阈值, 实时监测路网状态。当检测到节

点或路径失效时, 立即锁定受影响的任务集合及中断位置。

步骤3: 约束的动态更新。修正受阻路段邻接矩阵、重新计算受影响班次剩余容量, 弹性调整受影响任务的时间窗约束。

步骤4: 任务状态解析。分类处理, 归档已完成路径, 冻结中断任务当前资源占用, 将未执行任务重新纳入调度队列。

步骤5: 解空间重构。结合局部修复(调整中断任务路径)与全局重构(重组班次计划)生成混合邻域, 通过约束剔除不可行解。

步骤6: 自适应优化。动态更新路段有效容量与实时运输价格, 执行模拟退火算法进行邻域搜索优化。

步骤7: 方案集成验证。将新方案与原计划未受影响部分融合, 校核时空约束与资源容量, 通过滚动时段机制循环执行直至任务完结。

4 算例求解

4.1 数据输入

基于只考虑货运任务运达时间窗的空铁联运路径优化结果, 设定与动态运价相关的参数, 价格弹性系数 γ 值取2, 运价最大上涨幅度 λ 值取0.5, 数量级平衡系数经过试算验证^[10], φ_1 取 10^{-1} , φ_2 取 10^{-5} , ω_1 和 ω_2 均取0.5。模拟退火算法参数设置为: 初始温度 $t_0 = 100^\circ\text{C}$, 最低温度 $T_f = 10^{-6}^\circ\text{C}$, 降温系数 $\alpha = 0.96$, 采用几何降温策略 $T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$, 外循环最大迭代次数为1 000, 内循环次数为20。当连续迭代200次未改进最优解时, 则触发动态重启策略以重置搜索状态。当总迭代次数超过预设阈值时则终止算法并输出。算例分析考虑以下10个突发事件, 突发事件如表3所示。表3中, 事件类型, 1表示节点运力调整, 2表示路线运力调整, 3表示单班次延误, 4表示多班次延误; 运输方式, 1表示高铁, 2表示航空, 3表示空铁联运。

表3中设计的10个突发事件, 构建了全面的、多维度的压力测试体系, 充分体现系统性、差异性和现实关联性。事件类型覆盖了节点运力调整、路线运力调整、单班次延误和多班次延误4类基础场景, 包含了北京、沈阳等中心性较高节点的运力中断(突发事件1/4/6), 也涉及广州—重庆等跨区域干线运力波动(突发事件3), 同时模拟了青岛—昆明单班次延误(突发事件9)与上海—深圳多班次延误(突发事件2)等不同颗粒度的班次异常, 有效映射了设备故障、极端天

表3 突发事件
Tab.3 Unexpected events

事件 编号	事件 类型	起点	终点	运输 方式	运输 能力/t	时间窗 左/h	时间窗 右/h
1	1	北京		3	0	10	30
2	4	上海	深圳	1	—	13	16
3	2	广州	重庆	3	0	18	42
4	1	沈阳		2	30	24	36
5	2	成都	大连	2	0	18	21
6	1	武汉		2	0	14	26
7	2	西安	昆明	1	0	10	12
8	1	重庆		2	20	30	42
9	3	青岛	昆明	2	—	32	38
10	2	长沙	南京	1	15	9	21

气等真实场景。其次，在空间布局上重点聚焦于北京、上海、重庆等七大核心枢纽，贯穿纵向(成都—大连)、横向(西安—昆明)及对角线(长沙—南京)3类战略通道，同步测试高铁、航空及空铁联运的协同响应能力。

表4 静态下受突发事件直接影响的运输任务

Tab.4 Transportation tasks directly impacted by unexpected events under static conditions

突发事件	相关任务	相关路段	是否受影响	不受影响原因
1	5	北京→高铁(第1天-第14班)→哈尔滨	是	—
	26	北京→高铁(第1天-第27班)→济南	是	—
	39	北京→航空(第2天-第4班)→海口	否	发车时间在事件结束后
2	2	上海→高铁(第1天-第5班)→深圳	否	发车时间在事件发生前
3	3	广州→高铁(第1天-第12班)→重庆	否	发车时间在事件发生前
4	19	沈阳→航空(第1天-第4班)→长沙	否	运力虽然下降，但仍高于运输任务量
	41	沈阳→航空(第2天-第2班)→昆明	否	—
5	23	成都→航空(第1天-第10班)→沈阳	否	本路段虽从成都出发，但不是不可通行路段
6	22	武汉→航空(第1天-第6班)→上海	否	发车时间在事件发生前
	43	武汉→航空(第1天-第8班)→深圳	是	—
	46	武汉→航空(第1天-第3班)→沈阳	是	—
	49	武汉→航空(第2天-第4班)→沈阳	否	发车时间在事件结束后
7	8	西安→高铁(第1天-第1班)→昆明	否	发车时间在事件发生前
8	17	重庆→高铁(第2天-第11班)→贵阳	是	—
9	20	青岛→航空(第2天-第1班)→贵阳	否	本路段虽从青岛出发，但不是不可通行路段
10	12	长沙→高铁(第1天-第9班)→南京	否	运力虽然下降，但仍高于运输任务量

注：表中仅列出受到突发事件影响的路段，并非都是相关运输任务的始发地或目的地。

4.2 求解

求解50个运输任务的路径优化过程，实现路径的动态优化。求解过程中实时更新运输任务的运输状态、路径的占用情况及路段的容量占用，便于选择更优的路径。采用模拟退火算法进行求解，得到考虑突发事件的联运路径优化迭代如图1所示，其中各突发事件按照事件发生的左时间窗的先后顺序。

路径求解结果详情为：起点城市→运输方式(班次)→中间节点→运输方式(班次)→终点城市。静态下突发事件对初始解中部分运输任务的路径产生直接影响，静态下受突发事件直接影响的运输任务如表4所示。表4所考虑的静态为不考虑突发事件发生时间的先后顺序，也不考虑突发事件对其他运输任务的间接影响。从受影响的运输任务可以看出，中心性较高的节点发生突发事件时，受影响的任务数要高于普通节点。此外，不同地理位置的节点受突发事件影响的程度也不同。因此，中心性高的节点更应重视突发事件的影响，避免对整体运输网络产生较大影响。

在实际求解过程中，需实时更新运输任务的状态(未开始/运输中/已完成)，实时更新各路段班次的容量

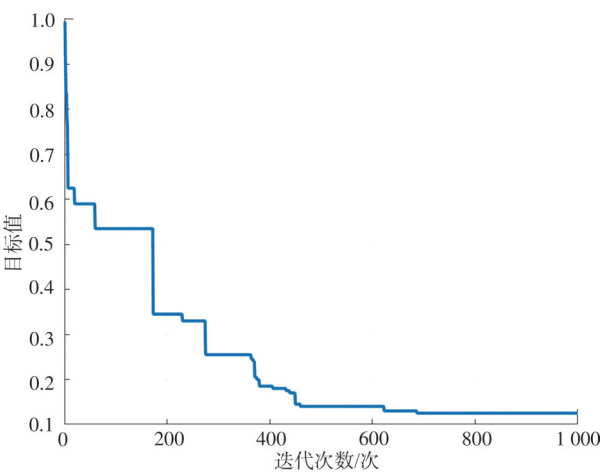


图1 考虑突发事件的联运路径优化迭代

Fig.1 Iteration of intermodal transport route optimization considering unexpected events

占用，容量占用变化会引起运输价格的变化，而未受到直接影响的运输任务可能会存在比原始路径更优的路径，也需要进行实时更新。突发事件影响下部分运输任务的路径优化结果如表5所示。通过对比，路径受到影响的运输任务有5，17，25，26，34，41，43，46，原因包括原路径某路段运力下降无法承担任务的运输、因天气原因航班无法正常运行、突发事件造成节点高铁站所有班次延迟等。此外，无法在要求时间内完成的任务有39和48。

4.3 结果分析

不同突发事件影响的范围不一样，路径容量变化

不一样，运价变动的程度也不一样。不同突发事件引起的运输时间、成本变动如表6所示，展示了考虑2种运输方式联运下，不同突发情况对完成任务数、运输平均时间和平均成本的影响。从表6可以看出，受到突发事件的影响，规定时间内能够完成的任务数量有所减少。同时，因部分路径容量占用上升，运输成本上涨，平均运输成本都比原始运输成本高，运输时间也有所增加。

以突发事件8(重庆节点运力调整)为例，原始路径中重庆—贵阳段的高铁班次因运力下降导致容量占用率迅速上升。根据式(1)的动态运价模型，当容量占用率超过80%时，运价涨幅开始显著加速；在容量接近饱和(占用率 $\geq 95\%$)的情况下，该路段运价最大涨幅达到50%。在此价格信号驱动下，模拟退火算法主动选择替代路径，将原运输任务17的运输路径由“石家庄→航空(第1天-第2班)→重庆→高铁(第2天-第11班)→贵阳”调整为“石家庄→高铁(第1天-第1班)→贵阳”，避免了高运价路段。这表明动态运价机制能够有效引导路径选择向容量相对充裕的路段转移，提升网络整体韧性。

由于运输价格由固定价格转变为与容量相关的动态变化的运价，因而不同运输任务的运输成本、运输时间相继发生变化。各运输任务运输成本对比如图2所示，各运输任务运输时间对比如图3所示，展示了各运输任务原始运输成本和时间与受突发事件影响后的对比情况。

表5 突发事件影响下部分运输任务的路径优化结果

Tab.5 Route optimization results for selected transportation tasks under unexpected events

任务编号	起点	终点	运输量/t	路径详情
1	北京	上海	12	北京→高铁(第1天-第10班)→上海
2	上海	深圳	15	上海→高铁(第1天-第5班)→深圳
3	广州	重庆	21	广州→高铁(第1天-第12班)→重庆
4	乌鲁木齐	海口	23	乌鲁木齐→航空(第2天-第1班)→海口
5	拉萨	哈尔滨	25	拉萨→航空(第1天-第1班)→成都→航空(第1天-第3班)→哈尔滨
...	...	...	...	...
46	武汉	长春	7	武汉→高铁(第1天-第1班)→长春
47	贵阳	深圳	17	贵阳→航空(第1天-第3班)→广州→高铁(第1天-第46班)→深圳
48	西宁	贵阳	18	—
49	昆明	沈阳	6	昆明→高铁(第1天-第3班)→武汉→航空(第2天-第4班)→沈阳
50	兰州	广州	25	兰州→高铁(第1天-第18班)→西安→航空(第1天-第10班)→广州

表6 不同突发事件引起的运输时间、成本变动

Tab.6 Variations in transportation time and cost across different unexpected events

	原始	事件1	事件2	事件3	事件4	事件5	事件6	事件7	事件8	事件9	事件10
完成任务数/个	50	48	48	48	48	48	48	50	48	48	50
平均时间/h	6.9	11.2	12.4	13.1	12.1	13.1	13.2	10.1	12.2	12.2	9.6
平均成本/万元	7	10.1	10.1	10.1	9.6	10.1	9.9	9.1	10.1	10.5	8.7

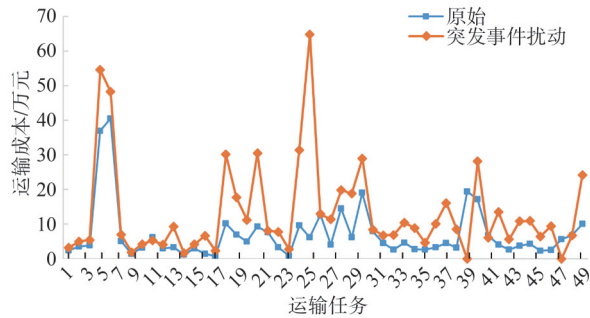


图2 各运输任务运输成本对比

Fig.2 Transportation cost comparison for each transportation task

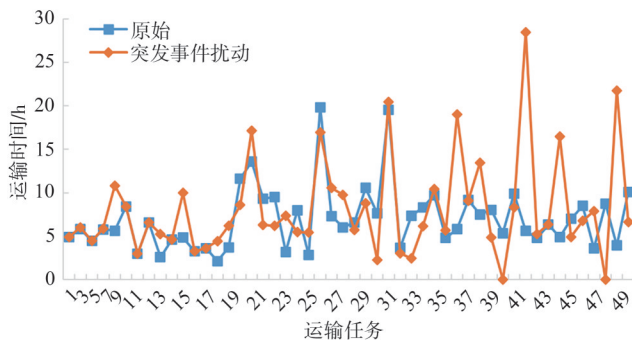


图3 各运输任务运输时间对比

Fig.3 Transportation time comparison for each transportation task

由图2、图3可知，突发事件对路径容量的影响，引起的运输价格变动在提高了运输成本的同时，运输时间也随之变动。所采用的与容量相关的运价机制，在不考虑突发事件参与的情况下，各运输任务的运输成本和时间变化幅度在可控范围内，不会出现数值激增的情况，也不会出现个别运输任务无法完成的情况。

但图2、图3中考虑由突发事件引起运输价格变动的情况下，个别数值变化较大，这是因为在考虑突发事件的情况下，存在原定班次不可通行的情况，需要重新优化路径，部分可替代性较低的班次容量占用上升，造成运输价格上升或者增加等待时间。

突发事件下不同运输方式任务完成情况如表7所示，对航空、高铁与空铁联运方式考虑突发事件时能够完成的运输任务数做了对比。由表7可知，在考虑突发事件的情况下，空铁联运完成的任务数减少2个；航空完成的任务数减少8个；高铁完成的任务数减少4个。从运输任务减少的数量来看，空铁联运面对突发事件的调节能力远高于单一运输方式。3种运输方式面对突发事件的网络稳定性：空铁联运>高铁>航空。由于完成任务的数量差别较大，因而平均时间和成本不进行对比分析。

5 结论

(1) 聚焦运输网络容量波动与运价弹性的耦合机制，构建了动态运价响应下的路径优化模型，通过引入容量占用率—运价弹性系数关联机制，揭示了突发事件扰动下运输价格动态调整对路径选择策略的影响规律。

(2) 中心性指标高的节点因其在网络拓扑中的关键枢纽地位，在容量波动中表现出更强的敏感性，这一现象验证了复杂网络理论中关键节点脆弱性特征。

(3) 航空—高铁联合运输网络通过多模态资源互补与路径冗余设计，其抗扰动能力高于单一运输网络，展现出显著的系统稳定性优势。

表7 突发事件下不同运输方式任务完成情况

Tab.7 Task completion by different transportation modes under unexpected events

	原始	事件1	事件2	事件3	事件4	事件5	事件6	事件7	事件8	事件9	事件10
空铁联运	50	48	48	48	48	48	48	50	48	48	50
航空	48	45	43	40	40	40	41	47	40	40	48
高铁	43	41	41	40	40	40	40	43	39	39	43

参考文献:

- [1] MARZUOLI A, BOIDOT E, COLOMAR P, et al. Improving Disruption Management with Multimodal Collaborative Decision-Making: A Case Study of the Asiana Crash and Lessons Learned[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(10): 2699–2717.
- [2] SCOZZARO G, BUIRE C, DELAHAYE D, et al. Optimizing Air-Rail Travel Connections: A Data-Driven Delay Management Strategy for Seamless Passenger Journeys[EB/OL]. [2025–10–20]. https://engagektn.eu/wp-content/uploads/2024/01/SIDs_2023_paper_29-final.pdf.
- [3] 董巧丽, 王圣璐, 孙 芳. 空铁联运模式下不正常航班恢复的列生成算法[J]. 航空科学技术, 2024, 35(9): 111–118.
DONG Qiaoli, WANG Shenglu, SUN Fang. Irregular Flight Recovery Based on Column Generation Algorithm in the Air-Rail Intermodal Mode[J]. Aeronautical Science and Technology, 2024, 35(9): 111–118.
- [4] 陆 溪, 邵 荃. 基于空铁联运的延误旅客行程恢复方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12150–12155.
LU Xi, SHAO Quan. Itinerary Recovery Method for Delayed Passengers Based on Air-Rail Combined Transport[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 12150–12155.
- [5] JIANG Y L, YU S N, GUAN W, et al. Ground Access Behaviour of Air-Rail Passengers: A Case Study of Dalian ARIS[J]. Travel Behaviour and Society, 2021, 24: 152–163.
- [6] 张 慧, 王 兵, 杨飞宇, 等. 基于出行选择的旅客联程运输服务定价[J]. 铁道学报, 2024, 46(11): 12–20.
ZHANG Hui, WANG Bing, YANG Feiyu, et al. Pricing of Combined Transport Based on Passenger Choice Behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(11): 12–20.
- [7] 马继辉, 王瀛帆, 姜秀山, 等. 基于博弈论的空铁联运收益分配模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(4): 23–29.
MA Jihui, WANG Yingzhi, JIANG Xiushan, et al. Revenue Distribution Models of Air-Rail Intermodal Transport Based on Game Theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(4): 23–29.
- [8] HUAN N, YAMAMOTO T, YAO E J. Seamless Air-HSR Intermodal Solution: Behavioural Model-Based Scheduling of Airline Timetable and Airfare[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 176: 103821.
- [9] 林贵华, 裴红波, 邹远洋. 基于伯特兰德模型的航空企业与高铁的博弈分析[J]. 系统工程学报, 2020, 35(3): 325–339.
LIN Guihua, PEI Hongbo, ZOU Yuanyang. Analysis on Games between Airlines and High Speed Rail Based on Bertrand Model[J]. Journal of Systems Engineering, 2020, 35(3): 325–339.
- [10] LI M W, LEI Y Z, YANG Z Y, et al. An Optimization Method for Maintenance Routing and Scheduling in Offshore Wind Farms Based on Chaotic Quantum Harris Hawks Optimization[J]. Ocean Engineering, 2024, 308: 118306.

(责任编辑: 李丹丹)

Route Optimization of Air-Rail Intermodal Express Networks Considering Dynamic Pricing

ZHANG Bo¹, HE Ling², YANG Chen², HUANG Zhipeng³, WANG Yu³, MIAO Yusen³, LI Jinlian³

(1. Passenger Transport Department, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China; 2. Lanzhou Railway Station, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China; 3. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study addresses unexpected event-induced route interruptions and capacity imbalances such as service delays and node failures in air-rail intermodal express networks by proposing a dynamic pricing-integrated route optimization method. First, a pricing elasticity model based on capacity competition was developed to quantify the correlation between local capacity shortages and pricing fluctuations during emergencies. Subsequently, a multi-objective optimization model was constructed to simultaneously minimize total transportation time and cost. Furthermore, a dynamic response framework based on the simulated annealing algorithm was designed for real-time network disruption monitoring, dynamic transport capacity and pricing updates, and rapid routing scheme reconstruction. Case study results show that pricing on capacity-saturated segments can rise by up to 50%, prompting the algorithm to select alternative routes. The intermodal transport task completion rate significantly exceeds that of single-mode transport. This research demonstrates that intermodal transport effectively enhances network disturbance resilience through resource complementarity, providing references for express route decisions in dynamic environments.

Keywords: Air-HSR Intermodal Transport; Dynamic Pricing; Route Optimization; Simulated Annealing Algorithm; Capacity Competition