

融合差异化定价策略的空铁联运接续方案优化研究

陈浩东*, 陈钉均

西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年3月19日; 录用日期: 2025年5月7日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

为提升空铁联运的服务水平与运营收益, 本文借鉴“服务集成商”理念, 将空铁联运运输企业定义为整合高铁与航空资源的协调主体。提出了一种融合差异化定价策略的接续方案优化方法, 在优化列车与航班时刻表的同时, 协同优化联运产品定价, 以提高旅客吸引力并增加运营收益。以京广综合运输通道为背景进行实例分析, 结果表明: 优化后的空铁联运运营收益提升了48.4%, 旅客量增加了45.7%, 同时减少了无效接续导致的列车与航班时刻表调整成本, 验证了所提优化方法的有效性。

关键词

空铁联运, 接续方案, 差异化定价, 旅客出行选择, Logit模型, 弹性需求, 模拟退火算法, 运营收益

Research on Optimization of Air-Rail Intermodal Transport Connection Scheme Integrating Differentiated Pricing Strategy

Haodong Chen*, Dingjun Chen

School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 19th, 2025; accepted: May 7th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

In order to improve the service level and operating income of air-rail intermodal transportation, this paper draws on the concept of “service integrator”, and defines the air-rail intermodal transportation enterprise as the coordination subject of integrating high-speed rail and aviation

*通讯作者。

resources. An optimization method of connection scheme integrating differentiated pricing strategy is proposed. While optimizing the train and flight schedules, the pricing of intermodal products is collaboratively optimized to improve passenger attractiveness and increase operating income. Taking the Beijing-Guangzhou comprehensive transportation corridor as an example, the results show that the optimized air-rail intermodal operation income increases by 48.4%, the passenger volume increases by 45.7%, and the adjustment cost of train and flight schedule caused by invalid connection is reduced, which verifies the effectiveness of the proposed optimization method.

Keywords

Air-Rail Intermodal Transport, Connection Scheme, Differential Pricing, Passenger Travel Choice, Logit Model, Elastic Demand, Simulated Annealing Algorithm, Operation Profit

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前,人们对快捷、高效的交通服务需求日益增加,多式联运作为协调多种交通方式、满足多种需求的综合解决方案,在国内外得到了广泛关注。高铁与航空运输的快速发展催生出了一系列空铁联运产品的推出,其通过有效衔接高铁与航空,结合两者在不同运距下的优势,不仅有效扩展了原先独立运营下的服务范围,也丰富了旅客的出行选择,进一步促进了区域间的联系。

目前,国内外围绕空铁联运展开了一系列相关研究。Givoni等[1]强调前往机场的铁路行程是空铁联运整体服务的一部分,而不仅仅是提供前往机场的交通服务。通过实例验证,发现这种方式能够更好地利用航空运力。Ke等[2]在定义有效接续时间的基础上,分别以最大化有效接续数量、最大化被接续航班数量、最小化旅客换乘惩罚为目标构建了数学模型,以提高高铁与航空时刻表的同步性。Jiang等[3]建立了以最小化空转铁旅客在枢纽车站等待时间为目标的数学模型,从而减少旅客在乘坐飞机抵达机场后的滞留情况。梅正男等[4]构建了以最大化“空转铁”、“铁转空”双向空铁联运衔接能力及最小化航班时刻表偏移量为目标的混合整数规划模型,提高了接续质量。Sun等[5]建立了一个演化博弈模型,以优化民航与高铁在旅客票价和碳交易价格下的互动决策过程。蒋琦玮等[6]将空铁联运中的运营商视为独立于高铁与航空之外的运营主体,提出了基于灵敏度分析的启发式算法,设计了“一票制”空铁联运定价策略。Yuan等[7]基于空铁联运旅客购票数据,运用广义有序逻辑回归模型从票务相关属性、高铁航空运营相关属性和换乘相关属性三个维度,识别影响不同旅客群体换乘行为的关键因素。杨凯名等[8]将空铁联运视为拥有独立定价权的第三方运输方式,提出一种适应旅客弹性需求的动态递归定价方法。

综上,既有研究大多将两者分开独立进行研究,较少考虑两者对旅客出行需求的共同影响。基于此,本文借鉴“服务集成商”理念,将空铁联运运输企业视为具有独立运营权的运营商参与到运输市场的竞争中,通过准确描述在不同接续方案和票价水平下的旅客出行需求量及出行选择,综合全面地优化空铁联运接续方案与票价水平,以提升联运产品的竞争力,实现服务水平和运营收益的同步提升。

2. 问题分析

2.1. 旅客出行选择行为

在一条运输通道中,多种客运产品相互竞争,旅客通常依据自身需求选择效用最大的客运产品。由

于不同客运产品在出行时间、出行费用和出行便捷性等方面存在差异, 这些因素成为影响旅客出行选择的关键。深入分析空铁联运与其他直达运输方式在竞争层面所产生的差异化服务, 进而可以更有效地优化空铁联运服务水平。

Logit 模型在理论上对旅客出行选择行为有较强的说服力, 可以有效拟合出行选择与运输方式服务特性之间的关系。因此, 选择 Logit 模型描述旅客出行选择行为, 旅客选择的客运产品的出行成本计算方法如式(1)所示:

$$U = \beta_1 \times T_1 + \beta_2 \times T_2 + E \quad (1)$$

式中, T_1 为出行时间, T_2 为出行便捷性, E 为出行费用, $\beta_1, \beta_2 > 0$ 分别为出行时间和出行便捷性的价值系数。基于效用理论, 旅客总会选择出行效用最大的出行产品, 即出行成本最小的出行产品。假设旅客可以选择的出行产品集为 A , 则旅客选择出行产品 i 的概率 p_i 计算方法如式(2)所示, 进一步可得出 Logit 模型如式(3)所示。

$$p_i = p(U_i < U_j; i \neq j; i, j \in A) \quad (2)$$

$$p_i = \frac{e^{-U_i}}{\sum_{j \in A} e^{-U_j}}, i \in A \quad (3)$$

式中, $0 \leq p_i \leq 1$, $\sum_{i \in A} p_i = 1$ 。在确定运输通道内的客流需求总数 Q 时, 可以得出选择出行方案 i 的旅客数量为

$$q_i = Q \times p_i, i \in A \quad (4)$$

同时, 运输通道内的旅客需求总数不是一成不变的, 随着出行成本的降低, 某些潜在的出行需求会转变为实际的出行需求。因此, 引入旅客弹性需求函数, 计算公式为

$$Q = Q_0 \times \exp \left[-\eta \left(\frac{\bar{C}}{C_0} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中, Q_0 为初始客流总数, Q 为出行成本变化后的客流总数, $\eta > 0$ 为弹性系数, \bar{C}_0 为初始平均出行成本, \bar{C} 为优化后的平均出行成本。平均出行成本计算公式为

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i \in A} U_i}{a} \quad (6)$$

式中, a 为运输通道内的出行产品总数。

2.2. 接续方案优化问题

提高空铁联运换乘服务质量的关键在于优化列车与航班的接续方案, 即确定列车与航班在换乘枢纽的到达和出发时刻, 使两种方式的接续时间更合理, 这些时间的确定需要通过调整列车和航班时间表的方式实现。接续时间指列车和航班在联运枢纽的到发时间差。既有研究[7]表明, 接续时间超出合理阈值将导致旅客换乘效用显著下降。若接续时间低于阈值, 旅客换乘紧张, 甚至可能无法完成换乘过程, 错过后续航班; 若接续时间高于阈值, 旅客需要在枢纽机场候机楼等待较长时间才能搭乘后续航班, 降低旅客出行满意度。

根据换乘枢纽的换乘条件, 引入接续时间窗概念[2], 分别设定列车与航班接续时间的最大值 t_{\max} 与最小值 t_{\min} , 当接续时间 t 满足判定 $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ 时则为有效接续。旅客出于便捷性的考虑, 只会在实现有

效接续的空铁联运产品中进行选择。列车与航班的初始接续情况如图 1(a)所示, 列车 1 与航班 1 的接续时间在时间窗 $[t_{\min}, t_{\max}]$ 中, 则列车 1 与航班 1 为有效接续; 列车 1 与航班 2 的接续时间超过了最大换乘时间 t_{\max} , 为无效接续。此时, 若调整列车或者航班的时刻表, 可以改善列车与航班的接续关系。调整后的列车与航班的接续时间如图 1(b)所示, 调整列车 1 的到达时间和航班 2 的出发时间, 在保持列车 1 与航班 1 有效接续的前提下, 增加了列车 1 与航班 2 的有效接续。

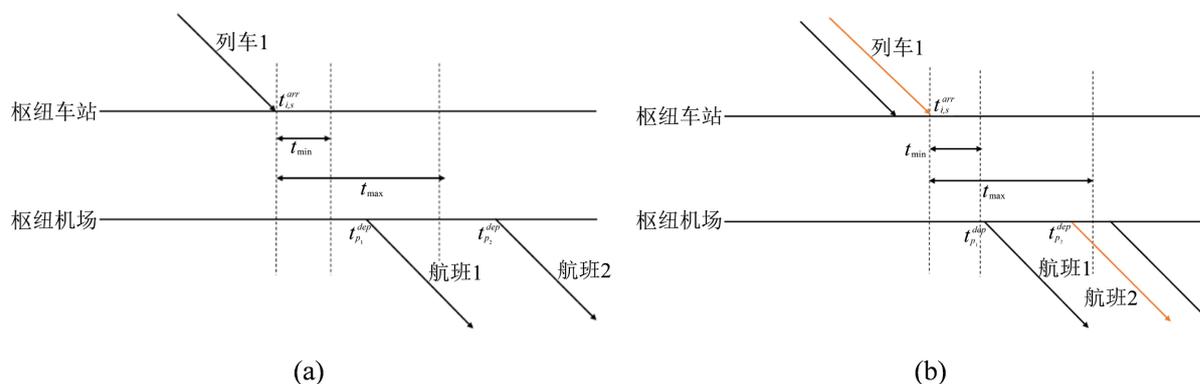


Figure 1. Comparison before and after adjustment of continuation situation: (a) Connection between train and flights; (b) The connection between train and flights after adjustment

图 1. 接续情况调整后对比图: (a) 列车与航班的接续情况; (b) 调整后列车与航班接续情况

引入 0-1 决策变量 $C_{i,p}$ 表示列车 i 是否与航班 p 成功接续, 如果是则为 1; 否则为 0。计算公式为

$$t_{\min} - M(1 - C_{i,p}) \leq t_p^{\text{dep}} - t_i^{\text{arr}} \quad \forall i \in I, \forall p \in P, s = st \quad (7)$$

$$t_{\max} + M(1 - C_{i,p}) \geq t_p^{\text{dep}} - t_i^{\text{arr}} \quad \forall i \in I, \forall p \in P, s = st \quad (8)$$

式中, $t_{i,s}^{\text{arr}}$ 表示列车 i 到达车站 s 的时间, t_p^{dep} 表示航班 p 的出发时间, M 为足够大的正数, st 表示换乘枢纽中的车站。

空铁联运接续方案优化有助于提升联运接续质量, 提高空铁联运服务水平。然而, 接续方案的优化可能降低非联运旅客的出行体验, 同时影响列车与航班既有运输计划的稳定性, 增加运输企业的运营成本。因此, 在优化接续方案时, 应权衡列车和航班在换乘枢纽时空接续调整所带来的效益与成本, 实现收益驱动的接续方案优化。

2.3. 差异化定价分析

差异化定价策略是指企业根据不同的市场需求、消费者群体以及产品特性等因素, 对同一类产品或服务制定不同价格的策略。与传统的单一价格策略相比, 差异化定价能够更好地满足不同消费者的需求, 提高企业的市场份额和盈利能力。

在空铁联运产品定价中, 运输服务的多样性为差异化定价提供了广阔的空间。例如, 在图 1(b)中, 同样是接续成功的空铁联运产品, 但列车 1 与航班 1 的接续时间较列车 1 与航班 2 的接续时间更短, 时间敏感型的旅客更愿意去选择前者, 因为它能带来更好的“无缝接续”体验。此时, 运输企业可以提高前者的票价, 可以带来更多的收益, 或者降低后者的票价, 从而吸引更多价格敏感型的旅客。这种定价灵活性使得运输企业能够针对不同的运输服务水平, 制定更具有竞争力的票价策略。因此, 在优化接续方案时融入定价策略, 可确保接续方案设计与票价方案设计的同步进行, 以满足空铁联运运输企业的实际运营需求。

3. 融合差异化定价策略的空铁联运接续方案优化模型

3.1. 问题描述

融合差异化定价策略的空铁联运接续方案优化是一个兼顾空铁联运运输企业与旅客双方利益的决策问题。本文基于一个包含直达运输与空铁联运的运输市场背景, 针对高速铁路途经一个接续枢纽机场的场景构建“铁转空”的联运优化模型。在已知初始时刻表的前提下, 通过调整列车与航班时刻表, 改变其在接续枢纽的到发时间, 以提高接续服务质量。同时, 为新增或接续质量提高的联运产品制定相应的价格, 并结合弹性客流的分配结果, 权衡优化所带来的客票收入与时刻表调整成本, 从而达到提高运输企业收益的目的。

3.2. 模型假设

为保证模型构建的严谨性, 作以下假设: 一是作为研究对象的任意列车与航班之间都可能产生有效接续; 二是初始列车与航班时刻表已知; 三是列车与航班的有效接续时间窗已知; 四是空铁联运运输企业拥有自主定价权, 即在定价范围内可自由定价; 五是除空铁联运外的其他直达运输的产品服务属性保持不变; 六是旅客只选择一种出行产品进行出行, 且总是选择出行效用最大的出行产品。

3.3. 目标函数

对于空铁联运运输企业而言, 其运营目标是实现收益最大化。运营收益为客票收入与运营成本的差额。客票收入为各联运产品的价格 $f_{i,p}$ 与相应客流量 $q_{i,p}$ 的乘积之和。运营成本由固定成本和可变成本组成, 其中固定成本主要与列车和航班的开行相关, 采用单位旅客运输成本 $c_{i,p}$ 来表示固定成本。本文考虑的可变成本为调整列车 i 与航班 p 时刻表所带来的影响, 采用与调整量正相关的惩罚项表示可变成本。因此, 以空铁联运运营收益最大化为优化目标, 目标函数可表示为:

$$\max Z = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} (f_{i,p} - c_{i,p}) \times q_{i,p} \times C_{i,p} - n \times \left(\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} |t_{i,s}^{arr} - G_{i,s}^{arr}| + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} |t_{i,s}^{dep} - G_{i,s}^{dep}| + \sum_{p \in P} |t_p^{dep} - K_p^{dep}| \right) \quad (9)$$

3.4. 约束条件

3.4.1. 运行相关约束

1) 列车始发时间窗约束。每趟列车 i 在始发站 $s(start)$ 的出发时间 $t_{i,s(start)}^{dep}$ 必须在规定的时间范围 $[d_{i,s(start)}, d'_{i,s(start)}]$ 内。计算公式为

$$d_{i,s(start)} \leq t_{i,s(start)}^{dep} \leq d'_{i,s(start)} \quad \forall i \in I \quad (10)$$

2) 列车区间运行约束。列车 i 在其沿线铁路运行区间 $(s, s+1)$ 的到达时间 $t_{i,s+1}^{arr}$ 由出发时间 $t_{i,s}^{dep}$ 、区间运行时间 $r_{i,(s,s+1)}$ 、停车附加时间 $\alpha_{i,s}$ 和发车附加时间 $\beta_{i,s}$ 决定, 其中区间运行时间需满足在一定范围 $[r_{i,(s,s+1)}, r'_{i,(s,s+1)}]$ 内。计算公式为

$$t_{i,s+1}^{arr} - t_{i,s}^{dep} \geq r_{i,(s,s+1)} + B_{i,s} \cdot \beta_{i,s} + B_{i,s+1} \cdot \alpha_{i,s+1} \quad \forall i \in I, s \in S/s(end) \quad (11)$$

$$t_{i,s+1}^{arr} - t_{i,s}^{dep} \leq r'_{i,(s,s+1)} + B_{i,s} \cdot \beta_{i,s} + B_{i,s+1} \cdot \alpha_{i,s+1} \quad \forall i \in I, s \in S/s(end) \quad (12)$$

3) 列车安全间隔约束。为保证行车安全, 相邻列车 i 到达同一车站 s 的时间应满足一定时间间隔标准, 包括到达时间间隔 δ_s^{dep} 和到达时间间隔 δ_s^{arr} , 计算公式为

$$t_{j,s}^{dep} - t_{i,s}^{dep} + M \cdot (1 - l_{i,j,s}) \geq \delta_s^{dep} \quad \forall i, j \in I, i \neq j, s \in S/s(end) \quad (13)$$

$$t_{i,s}^{dep} - t_{j,s}^{dep} + M \cdot l_{i,j,s} \geq \delta_s^{dep} \quad \forall i, j \in I, i \neq j, s \in S/s(end) \quad (14)$$

$$t_{j,s+1}^{arr} - t_{i,s+1}^{arr} + M \cdot (1 - l_{i,j,s}) \geq \delta_s^{arr} \quad \forall i, j \in I, i \neq j, s \in S/s(end) \quad (15)$$

$$t_{i,s+1}^{arr} - t_{j,s+1}^{arr} + M \cdot l_{i,j,s} \geq \delta_s^{arr} \quad \forall i, j \in I, i \neq j, s \in S/s(end) \quad (16)$$

4) 列车停站时间约束。列车 i 在车站 s 是否停站由 0-1 变量 $B_{i,s}$ 决定, 其停靠时间应满足在一定范围 $[\chi_{i,s}, \chi'_{i,s}]$ 内, 计算公式为

$$B_{i,s} \cdot \chi_{i,s} \leq t_{i,s}^{dep} - t_{i,s}^{arr} \leq B_{i,s} \cdot \chi'_{i,s} \quad \forall i \in I, s \in S/s(start), s(end) \quad (17)$$

5) 列车运行顺序约束。任意两列车在任意区间的顺序关系唯一, 计算公式为

$$l_{i,j,s} + l_{j,i,s} = 1 \quad \forall i, j \in I, i \neq j, s \in S \quad (18)$$

6) 列车时刻表偏离约束。为了减小列车时刻表调整对其他运输组织阶段的影响, 任意列车 i 到达运行终点站 $s(end)$ 时的实际时间 $t_{i,s(end)}^{arr}$ 与原计划时间 $G_{i,s(end)}^{arr}$ 的偏离值不可大于规定值 ε_i , 计算公式为

$$|t_{i,s(end)}^{arr} - G_{i,s(end)}^{arr}| \leq \varepsilon_i \quad \forall i \in I \quad (19)$$

7) 航班时刻表偏离约束。航班 p 在枢纽机场的实际离港时间 t_p^{dep} 与计划离港时间 K_p^{dep} 的偏离值不可大于规定值 ϕ_p , 计算公式为

$$|t_p^{dep} - K_p^{dep}| \leq \phi \quad \forall p \in P \quad (20)$$

8) 航班过站保障约束。飞机在结束上一个航班计划 p^- 后, 需要一定过站作业时间 $\varphi_{p^-,p}$ 在机场完成过站的一系列工作以保障后续航班 p 的顺利, 同时航班离港时间不得耽误后续航班计划 p^+ 。计算公式为

$$t_p^{dep} - t_{p^-}^{arr} \geq \varphi_{p^-,p} \quad \forall p \in P \quad (21)$$

$$t_p^{dep} \leq t_{p^+}^{dep} - \varphi_{p,p^+} - t_p \quad \forall p \in P \quad (22)$$

9) 接续成功约束。空铁联运出行路径是否完成取决于列车与航班的接续情况, 基于到空铁换乘节点的换乘条件, 当接续时间 $t_p^{dep} - t_{i,st}^{arr}$ 处于一定范围 $[t_{\min}, t_{\max}]$ 时, 列车与航班接续成功, 空铁联运出行路径可行, 此时 0-1 变量 $C_{i,p}$ 为 1。计算公式为

$$t_{\min} - M(1 - C_{i,p}) \leq t_p^{dep} - t_{i,st}^{arr} \quad \forall i \in I, \forall p \in P, s = st \quad (23)$$

$$t_{\max} + M(1 - C_{i,p}) \geq t_p^{dep} - t_{i,st}^{arr} \quad \forall i \in I, \forall p \in P, s = st \quad (24)$$

3.4.2. 定价相关约束

1) 定价与接续一致性约束。对空铁联运产品定价的前提是列车与航班实现了有效的接续。计算公式为

$$0 \leq f_{i,p} \leq C_{i,p} \times M \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (25)$$

2) 定价区间约束。空铁联运产品的价格 $f_{i,p}$ 不得低于单位旅客运输成本 $c_{i,p}$, 也不可超过最高定价标准 $f_{i,p}^{\max}$ 。计算公式为

$$c_{i,p} \leq f_{i,p} \leq f_{i,p}^{\max} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (26)$$

3) 差异化定价约束。接续时间较短的联运产品应具有更高的价格水平, 而接续时间较长的产品价格相对较低, 从而引导旅客合理选择并优化运输企业的收益结构。计算公式为

$$(f_{i,p'} - f_{i,p}) \times (TS_{i,p'} - TS_{i,p}) \leq 0 \quad \forall i, i' \in I, \forall p, p' \in P \quad (27)$$

$$TS_{i,p} = (t_p^{dep} - t_{i,st}^{arr}) \times C_{i,p} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (28)$$

3.4.3. 旅客出行选择约束

1) 旅客广义出行成本。旅客选择出行产品 r 的广义出行成本 U_r 与出行时间、出行费用以及出行便捷性有关。根据前文的旅客出行选择模型可知, 在车时间 T_r 代表出行时间, 票价 f_r 反映出行费用, 而接续时间 TS_r 衡量出行的便捷性。计算方法如式(29)所示, 其中 κ 为旅客在车时间价值系数, λ 为旅客接续时间价值系数, 根据前文对旅客出行选择影响因素的分析, $\lambda > \kappa$ 。

$$U_r = \kappa \cdot T_r + f_r + \lambda \cdot TS_r \quad \forall r \in R \quad (29)$$

2) 弹性需求函数。基于旅客广义出行成本 U_r 可计算出平均广义出行成本 \bar{U} , 并构建弹性需求函数, 描述市场客流需求 Q 随平均广义出行成本变化而弹性变化的关系。计算公式为

$$\bar{U} = \frac{\sum_{r \in R} U_r}{m} \quad (30)$$

$$Q = Q_0 \times \exp \left[-\eta \left(\frac{C}{C_0} - 1 \right) \right] \quad (31)$$

3) 空铁联运产品客流量。当列车 i 与航班 p 实现有效接续后, 其组合形成的联运产品会参与到运输市场竞争中, 此时 $(i, p) \in R$ 。根据前文构建的旅客出行选择模型可知, 空铁联运产品 (i, p) 的客流量等于当前运输市场弹性需求 Q 乘以旅客选择产品 (i, p) 的概率 $p_{i,p}$ 。公式(32)描述了旅客选择某一联运产品 (i, p) 的概率, 公式(33)则表示该联运产品 (i, p) 的客流量。

$$p_{i,p} = \frac{e^{-U_{i,p}}}{\sum_{r \in R} e^{-U_r}} \quad (i, p) \in R \quad (32)$$

$$q_{i,p} = Q \times p_{i,p} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (33)$$

3.4.4. 变量相关约束

$$t_{i,s}^{arr}, t_{i,s}^{dep}, t_p^{dep}, f_{i,p}, q_{i,p} \in Z^+ \quad \forall i \in I, \forall p \in P, \forall s \in S \quad (34)$$

4. 算法设计

本文构建的优化模型中存在非线性的目标函数与约束条件, 如差异化定价约束, 使用商业求解器如 Cplex、Gurobi 难以求解, 尽管模型在一定程度上可以近似线性化, 但这种处理方式往往会显著增加辅助变量和约束条件的数量, 从而降低求解效率。

基于模拟退火框架的启发式算法因其在全局优化和计算效率方面的优势, 被广泛应用于接续相关优化及差异化定价策略的研究中。该算法根据 Metropolis 准则, 在较高温度时接受较劣解, 避免算法陷入局部最优解, 能够有效处理本文所涉及的优化问题。因此, 本文设计了一种基于模拟退火框架的优化算法, 用于求解融合差异化定价策略的空铁联运接续方案优化模型。算法具体步骤如下:

第 1 步: 初始化。设置初始温度 T_0 , 终止温度 T_{end} , 温度下降率 θ , 令当前温度 $T = T_0$, 迭代次数 $n = 1$, 转第 2 步。

第 2 步: 生成初始解。将参与空铁联运的列车与航班的既有时刻表作为初始解中的时刻表部分。对时刻表进行接续判定, 对接续成功的联运产品制定价格, 选择真实的联运价格为初始解中的产品价格部

分。令当前解 $X = X_0$ ，计算基于当前解的出行网络中旅客平均出行成本 \bar{U} ，利用弹性需求函数 $Q(\bar{U})$ 更新运输通道内的客流需求 Q 。基于更新后的客流需求 Q ，根据 Logit 模型将旅客分配到出行网络中的各条出行路径 r 上，得到每条路径分配的客流量 q_r ，转第 3 步。

第 3 步：计算初始解的目标函数值。基于初始解 X_0 计算目标函数值 $Z(X_0)$ ，令当前最优解 $X^* = X_0$ ，最后目标函数值为 $Z^* = Z(X_0)$ ，转第 4 步。

第 4 步：生成接续方案与差异化票价方案邻域解。通过邻域解生成策略，产生当前解的邻域解 X_n ，并基于邻域解计算当前出行网络中旅客平均出行成本 C ，利用弹性需求函数 $Q(C)$ 更新运输通道内的客流需求 Q 。基于更新后的客流需求 Q ，根据 Logit 模型将旅客分配到出行网络中的各条出行路径 r 上，得到每条路径分配的客流量 q_r 。

第 5 步：计算邻域解的目标函数值。基于邻域解 X_n 计算目标函数值 $Z(X_n)$ ，转第 6 步。

第 6 步：邻域解的检查和解的更新。计算邻域解目标值和当前最优解的差值 $\Delta Z = Z(X_n) - Z(X^*)$ ，如果 $\Delta Z > 0$ ，则更新当前解和最优解 $X = X_n, Z = Z(X_n), X^* = X_n, Z^* = Z(X_n)$ 。反之则进行接受准则判定，即如果 $\exp[\Delta Z/T] > \text{Random}(0,1)$ ，那么更新当前解， $X = X_n, Z = Z(X_n)$ 。令 $n = n + 1$ ，转第 7 步。

第 7 步：迭代次数检验。检查当前温度下的迭代次数是否达到了最大次数，若 $n \geq L_{\max}$ ，那么进行降温操作 $T = T \times \theta$ ，转第 8 步，否则转第 4 步。

第 8 步：算法终止条件检验。算法终止的条件：若温度降至最低温度，即 $T \leq T_{\text{end}}$ ，则算法终止；或者在迭代过程中，如果目标函数值 Z 保持不变的次数达到设定的次数 Z_{\max} ，则算法终止，转第 9 步。否则， $n = 1$ ，转第 4 步。

第 9 步：结果输出。输出最优解 X^* 和最优目标函数值 Z^* 。

5. 实验分析

5.1. 实验数据

本文选取京广综合运输通道作为案例背景，以石家庄作为空铁联运枢纽城市进行研究，研究的旅客对象为某天京广综合运输通道内从北京出发到达广州的旅客，假设初始客流需求量为 5000 人。收集当天通道内的客运产品信息，其中参与空铁联运的列车与航班时刻表信息如下表 1、表 2 所示。

Table 1. Timetable information of participating in air-rail intermodal trains

表 1. 参与空铁联运的列车时刻表信息

| 车次 | 北京西站出发时间 | 正定机场站到达时间 |
|-------|----------|-----------|
| G6703 | 6:09 | 7:22 |
| G335 | 7:26 | 8:36 |
| G1579 | 8:32 | 9:39 |
| G7812 | 9:30 | 10:40 |
| G625 | 9:30 | 10:40 |
| G571 | 13:37 | 14:47 |
| G627 | 14:36 | 15:54 |
| G629 | 17:42 | 18:36 |
| G6717 | 18:29 | 19:47 |
| G6723 | 19:28 | 20:32 |
| G6733 | 21:11 | 22:17 |

Table 2. Schedule information of participating in air-rail intermodal flight schedule
表 2. 参与空铁联运的航班时刻表信息

| 航班号 | 计划出发时间 | 计划到达时间 |
|--------|--------|--------|
| MF7000 | 8:00 | 11:10 |
| CZ3150 | 11:35 | 14:35 |
| CZ3132 | 15:45 | 18:50 |
| MF7074 | 17:20 | 20:10 |
| CZ2136 | 20:10 | 23:20 |
| 9C8900 | 11:25 | 14:30 |

在本文设计实验中, 参考既有研究[9] [10], 模型参数如下表 3 所示。

Table 3. Model parameters
表 3. 模型参数

| 参数 | 参数值 | 参数 | 参数值 |
|-----------------|------|------------------|--------|
| w_{st}^{\min} | 90 | n | 10 |
| w_{st}^{\max} | 180 | $c_{i,p}$ | 934.5 |
| ε_i | 30 | $f_{i,p}^{\max}$ | 2930.5 |
| ϕ_p | 30 | κ | 38.9 |
| Q | 5000 | λ | 50 |

本文设计的模拟退火算法最高温度为 5000°C, 最低温度为 10°C, 降温率为 0.9, 每次降温后的迭代次数马尔科夫链长度为 50, 算法终止条件之一为目标值保持稳定的迭代次数为 200 次。

5.2. 实验结果

根据前文设计的模拟退火算法, 在 16G 内存、Intel i5-1155G7、2.50GHz 的环境下进行编程测试真实案例, 使用 python 编程, 算法运行时长为 2 秒, 得到目标函数迭代结果如图 2 所示。

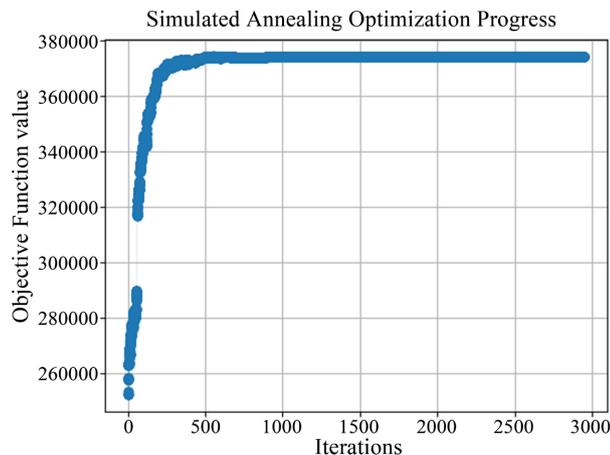


Figure 2. Iteration diagram of objective function
图 2. 目标函数迭代图

由图可以观察在算法迭代初期, 目标函数值快速增加, 在迭代图中出现了相邻迭代次数的目标函数值差过大的情况, 到算法在迭代至约 550 次时, 目标函数值逐渐接近最大值, 随着温度的降低, 算法接受较差解的概率降低, 目标函数值的波动趋于稳定, 实现收敛。最终的目标函数值为 374,440, 相较于最初目标函数值 252,292 增加了 48.4%。

通过调整列车和航班时刻表, 可更改列车到达接续枢纽车站和航班离开接续枢纽机场的时间, 以改善接续质量。在优化结果中, 参与空铁联运的列车和航班在接续枢纽的时刻表偏移量如图 3 所示, 实现有效接续的列车与航班组合的接续时间变化如下图 4 所示。

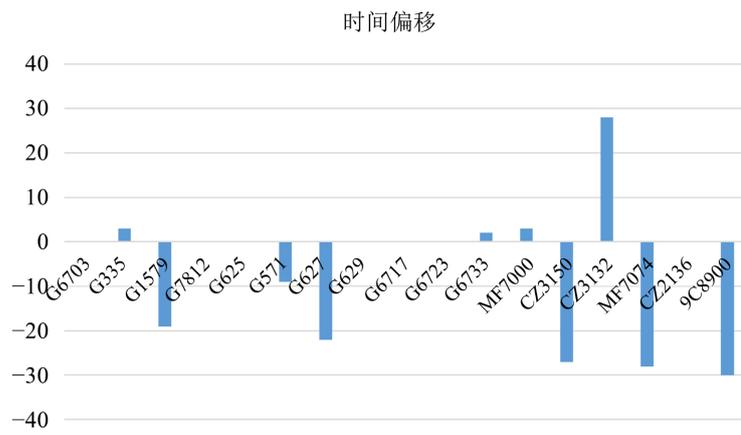


Figure 3. Time offset between train and flight

图 3. 列车与航班的时间偏移量

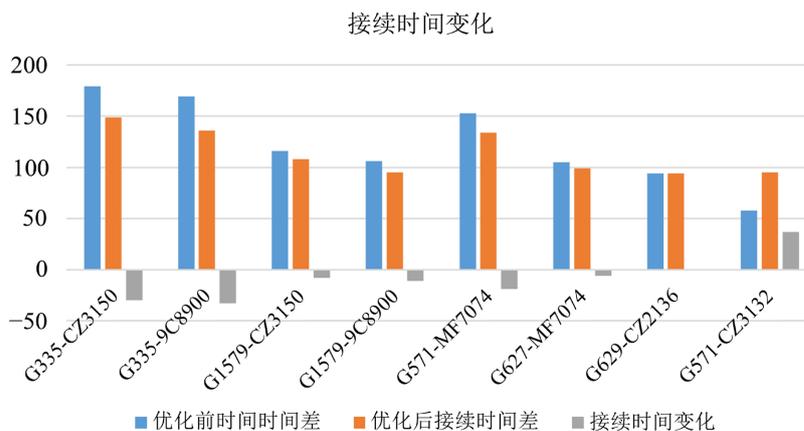


Figure 4. Change of train and flight connection time

图 4. 列车与航班接续时间变化

通过图 3 与图 4 可以观察到, 优化后各联运产品的接续时间都有所改善。同时对于优化后仍未实现有效接续的列车与航班, 其时刻表几乎未发生调整, 该结果验证了本文提出的收益驱动的接续方案优化方法的有效性。

通过差异化定价策略, 为实现有效接续的空铁联运产品确定价格。在优化结果中, 空铁联运产品票价如下表 4 所示。通过图 4 与表 4 可以观察到, 接续时间更短的空铁联运产品优化后有更高的票价, 验证了本文提出的差异化定价方法的有效性。

Table 4. Air-rail intermodal product fares**表 4.** 空铁联运产品票价

| 有效接续组合 | 票价(元) | 有效接续组合 | 票价(元) |
|--------------|-------|-------------|-------|
| G335-CZ3150 | 964 | G571-CZ3132 | 1111 |
| G335-9C8900 | 1023 | G571-MF7074 | 1057 |
| G1579-CZ3150 | 1092 | G627-MF7074 | 1101 |
| G1579-9C8900 | 1123 | G629-CZ2136 | 1169 |

5.3. 对比分析

将优化前后的空铁联运方案进行对比分析, 选择目标函数值、平均票价、总客流需求、空铁联运客流量以及有效接续数量等指标衡量优化效果。对比结果如下表 5 所示, 可以观察到优化后, 各项指标都得到了有效提高, 验证了本文提出方法的有效性。

Table 5. Comparison before and after optimization**表 5.** 优化前后对比

| | 目标函数值 | 平均票价 | 总客流需求 | 空铁联运客流量 | 有效接续数量 |
|-----|---------|------|-------|---------|--------|
| 优化前 | 252,292 | 1200 | 5000 | 339 | 7 |
| 优化后 | 374,440 | 1080 | 5102 | 494 | 8 |

6. 研究结论

为提高空铁联运空铁联运的服务水平与运营收益, 提出融合差异化定价策略的空铁联运接续方案优化方法, 主要研究结论如下。

1) 通过引入“服务集成商”概念, 从空铁联运运输企业的视角出发, 协调高铁与航空的时刻表资源, 优化列车与航班在换乘枢纽的接续关系, 并针对有效接续的联运产品制定差异化价格, 在提升旅客服务水平的同时, 提高运输企业的运营收益。

2) 综合考虑出行时间、出行费用及出行便捷性对旅客出行选择行为的影响, 研究通过 Logit 模型和弹性需求函数描述不同服务水平下客流的变化过程, 并将其嵌入空铁联运服务优化中。以空铁联运运输企业运营收益最大化为目标构建非线性整数规划模型, 并设计模拟退火算法进行求解。

3) 以京广综合运输通道为背景进行实例验证。研究结果表明, 优化后的方案有效提升了运营收益 48.4%, 增加了客流量 45.7%, 显著提高了空铁联运的运营效益与旅客吸引力, 验证了本文所提出方法的有效性。

基金项目

四川省科技创新人才项目: 基于客流动态推演的城市轨道交通网络化列车运行计划优化方法及应用(2024JDR0020)。

参考文献

- [1] Givoni, M. and Banister, D. (2007) Role of the Railways in the Future of Air Transport. *Transportation Planning and Technology*, **30**, 95-112. <https://doi.org/10.1080/03081060701208100>
- [2] Ke, Y., Nie, L., Liebchen, C., Yuan, W. and Wu, X. (2020) Improving Synchronization in an Air and High-Speed Rail Integration Service via Adjusting a Rail Timetable: A Real-World Case Study in China. *Journal of Advanced Transportation*, **2020**, Article 5081315. <https://doi.org/10.1155/2020/5081315>

-
- [3] Jiang, Y., Chen, S., an, W., Hu, L., Li, Y. and Liu, J. (2023) Demand-Driven Train Timetabling for Air and Intercity High-Speed Rail Synchronization Service. *Transportation Letters*, **15**, 321-335. <https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2051275>
- [4] 梅正男, 聂磊, 任广建, 等. 基于空铁联运 OD 服务频率优化的航班时刻表调整模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3581-3589.
- [5] Sun, B., Xu, Z. and Wei, M. (2023) Evolutionary Game Model of Civil Aviation and High-Speed Rail Interaction Strategies Based on the Passenger Ticket and Carbon Trading Prices. *Journal of Advanced Transportation*, **2023**, Article 7675900. <https://doi.org/10.1155/2023/7675900>
- [6] 蒋琦玮, 穆鹏程, 姚加林. 基于双层规划模型的空铁联运定价策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12): 3130-3137.
- [7] Yuan, Y., Yang, M., Feng, T., Ma, Y., Ren, Y. and Ruan, X. (2022) Heterogeneity in the Transfer Time of Air-Rail Intermodal Passengers Based on Ticket Booking Data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **165**, 533-552. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.09.022>
- [8] 杨凯名, 景云, 刘嘉琦, 等. 基于收益管理的空铁联运动态定价研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(10): 178-185+193.
- [9] 可钰. 空铁联运接续方案优化理论与方法[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [10] 尹若伊. 基于合理市场分配的空铁联运定价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.