

文章编号: 1003-1421(2026)09-0067-09

引用格式: 陈希荣, 韩振江, 苟星原, 等. 低空经济视域下新型空铁联运模式的构建与应用——以浙江省为例[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(9): 67-75.

CHEN Xirong, HAN Zhenjiang, GOU Xingyuan, et al. Construction and Application of a New Air-Rail Intermodal Transport Model from Perspective of Low-Altitude Economy: A Case Study of Zhejiang Province[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(9): 67-75.

# 低空经济视域下新型空铁联运模式的构建与应用 ——以浙江省为例

陈希荣<sup>1, 2</sup>, 韩振江<sup>1, 2</sup>, 苟星原<sup>1</sup>, 戴随喜<sup>1</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 线路运输设计院, 陕西 西安 710043; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室, 陕西 西安 710043)

**摘 要:** 在低空经济上升为国家战略新兴产业的背景下, 传统铁路线路接入机场的空铁联运模式向“铁路+低空”新型模式拓展成为必然趋势。研究立足浙江省“民航强省”与低空经济发展高地建设需求, 重新定义低空经济视域下空铁联运的核心内涵, 从政策驱动、技术互补、场景需求等方面分析其发展的必要性与可行性; 从系统工程视角构建“需求-网络-调度-评价”4层模型体系, 涵盖基于Logit离散选择模型与重力模型的需求预测模型、空铁网络拓扑耦合模型、空地协同调度与优化模型, 以及系统效益评价模型, 并以“铁路+低空+文化旅游”典型应用场景为例开展定量实证分析。结果表明, 新型空铁联运模式可使旅游联运时耗缩短42.3%、单位成本下降19.8%、碳排放减少36.2%, 综合效益提升44%。在此基础上, 结合“铁路+低空+应急救援”等应用场景, 提出政策协同、技术创新、设施先行、安全护航的保障路径, 为构建“空铁一体”的综合立体交通体系提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 低空经济; 空铁联运; “铁路+低空”; 应用场景; 基础设施

**中图分类号:** U297 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250707002

## Construction and Application of a New Air-Rail Intermodal Transport Model from Perspective of Low-Altitude Economy: A Case Study of Zhejiang Province

CHEN Xirong<sup>1, 2</sup>, HAN Zhenjiang<sup>1, 2</sup>, GOU Xingyuan<sup>1</sup>, DAI Suixi<sup>1</sup>

(1. Railway Line and Station Design Institute, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**Abstract:** As the low-altitude economy is elevated to the status of a national strategic emerging industry, the traditional air-rail intermodal model, in which railway lines connect directly to airports, is inevitably evolving toward a new “railway+low-altitude aviation” model. In response to

收稿日期: 2025-07-07 修订日期: 2026-06-29

基金项目: 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(KY25-B001)

Zhejiang Province's goal of becoming a leading province in civil aviation and a hub for the low-altitude economy, this study redefined the core concept of air-rail intermodal transportation from the perspective of the low-altitude economy and examined the necessity and feasibility of its development in terms of policy drivers, technological complementarity, and scenario-specific demand. From a systems engineering perspective, a four-layer "demand-network-scheduling-evaluation" modeling framework was developed. It comprised a demand forecasting model based on the Logit discrete-choice model and gravity model, an air-rail network topology coupling model, an air-ground collaborative scheduling and optimization model, and a system-benefit evaluation model. A quantitative empirical analysis was conducted using the typical application scenario of "railway+low-altitude aviation+cultural tourism." The results show that the new air-rail intermodal model can reduce travel time by 42.3%, unit cost by 19.8%, and carbon emissions by 36.2%, while improving overall benefits by 44%. Building on these findings and considering additional application scenarios such as "railway+low-altitude aviation+emergency rescue," this study proposed supporting measures centered on policy coordination, technological innovation, infrastructure development, and safety assurance, thereby providing theoretical support and practical guidance for developing an integrated, multidimensional air-rail transportation system.

**Keywords:** Low-Altitude Economy; Air-Rail Intermodal Transportation; Rail+Low-Altitude; Application Scenario; Infrastructure

## 0 引言

2023年中央经济工作会议明确将低空经济列为战略性新兴产业，2024年政府工作报告首次写入“低空经济”，标志着其从区域探索上升为国家战略<sup>[1]</sup>。传统空铁联运以“铁路进机场”为主，侧重枢纽机场与高速铁路的物理衔接。而在低空经济视域下，新型空铁联运转向“机场进场站”，通过“铁路+低空”模式整合轨道交通与低空出行、物流资源，形成“地面骨干网络+空中灵活覆盖”的立体化交通生态。

浙江省作为共同富裕示范区与数字经济先行区，早在2020年就开始规模化探索无人机城市市场商业运行，2024年出台《关于高水平建设民航强省打造低空经济发展高地的若干意见》，率先探索空铁联运新模式。2024年12月，全国首个“低空+高铁”跨城联运物流场景在浙江落地，实现了杭州至台州、绍兴的跨城快件2 h左右送达，其实践经验对全国具有示范意义<sup>[2-3]</sup>，浙江省低空经济已迈入“政策制定—产业发展—场景落地”全链条加速阶段。尽管在低空经济快速发展的背景下，新型空铁联运应用前景广阔，但目前国内关于空铁联运的研究主要集中在高铁和机场的衔接及运输组织优化等方面，关于“铁路+低空”的新型空铁联运，目前仅有少量应用场景的探索和实践，缺乏理论指导

和支撑。由此可见，聚焦低空经济视域下新型空铁联运模式的构建与应用具有重要的战略意义和现实意义。为此，研究从新型空铁联运的核心内涵出发，分析发展新型空铁联运模式的必要性和可行性，构建新型空铁联运需求预测模型、空铁网络拓扑耦合模型、空地协同调度与优化模型、系统效益评价模型，并对浙江省典型应用场景进行分析，为其他城市的实践提供有益的参考。

## 1 低空经济视域下空铁联运的内涵重构

### 1.1 概念演进与核心特征

传统空铁联运以“航空枢纽+高铁网络”为核心，通过物理衔接实现“双高”运输优势互补。典型场景如上海虹桥机场与高铁站的无缝换乘，高速铁路网主要服务于国内中短途旅客运输，而枢纽机场的航空运输则侧重于国内长途运输和国际运输，从而发挥“双高”的速度优势，拓展航空运输和铁路运输各自的辐射圈。而低空经济视域下的新型空铁联运，突破了“机场高铁”的“点对点”衔接模式，构建起“铁路场站+低空起降点”的网络融合体系，主要包含以下三大特征。一是联运模式创新。从“铁路进机场”拓展为“机场进场站”，即低空飞行器(无人机、直升机、电动垂直起降飞行器(eVTOL)等)的停机坪直接接入铁路客站、货站，实现“铁路干线运输+低空末端集散”的无缝对接。

二是服务主体扩展。参与主体从民航机场、铁路系统扩展至低空经济企业(如无人机运营商、通用航空企业),形成“铁路网+低空空域网”的协同运营模式。三是应用场景多元。覆盖客运(城际通勤、旅游接驳)、货运(末端配送、应急物流)、作业(线路巡检、灾害救援)等多元场景,满足“门到门”“点到点”的个性化需求<sup>[3-6]</sup>。

## 1.2 发展基础

2021年,低空经济被写入《国家综合立体交通网规划纲要》;2023年中央经济工作会议首提“低空经济”并将其列入战略性新兴产业;2024年全国各地积极探索、加快布局,我国低空产业发展呈现良好态势,展现出巨大潜力,市场规模突破5 000亿元<sup>[7]</sup>。目前,全国已有30个省(区、市)将低空经济写入政府工作报告,26个省(区、市)和82个城市出台专项发展规划或政策文件,成立了45家低空经济国资平台企业,预计2026年市场规模将突破万亿元<sup>[7]</sup>。浙江省作为低空经济发展前沿阵地,截至2024年10月已投用通用机场25座,拥有无人机起降点312个,每万人拥有5G基站数达34.2个,居全国首位,为“铁路+低空”融合奠定了坚实的产业基础。政策层面,国家《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确“推进空铁联运等先进运输组织模式”,浙江《高水平建设民航强省 打造低空经济发展高地行动方案(2024—2027年)》提出“遴选若干个设区市开展公铁水空多式联运枢纽试点,根据考核评价结果给予定额奖励”,双重政策红利加速交通资源整合;技术层面,北斗导航(厘米级定位)、数字孪生(空域可视化)、智能超表面(通信增强)等技术的成熟,有效破解了低空飞行器与铁路系统协同调度、安全管控等核心难题,从产业支撑、政策引导、技术保障3个方面共同赋能新型空铁联运模式落地<sup>[8-12]</sup>。

## 1.3 新型空铁联运模式的必要性与可行性分析

新型空铁联运模式是顺应综合立体交通体系发展趋势、提升交通网络综合效能的重要方向,其必要性主要体现在以下方面:①政策驱动需求。国家持续推进低空经济和现代综合交通体系建设,明确推动低空交通与既有交通方式融合发展。近年来,浙江省、深圳市等地积极开展“低空+轨道”融合

探索,为空铁联运发展提供了政策支持和实践基础。②交通融合需求。铁路具有大容量、高效率 and 强稳定性优势,但在末端覆盖和灵活接驳方面存在局限;低空飞行器具备快速直达和机动灵活特点。通过构建“铁路干线+低空接驳”的多层级交通网络,可实现优势互补,提升交通系统覆盖能力、运行效率和服务韧性。③场景拓展需求。随着物流配送、应急救援、商务出行等领域对高时效交通服务需求增长,空铁联运具备广泛应用空间。低空运输可有效提升末端配送效率、增强应急响应能力,并满足高时效客运需求,推动交通服务模式创新。

当前,新型空铁联运模式已具备政策、技术和市场等方面的发展基础,具备进一步推广应用条件。①政策环境支撑。低空经济和综合立体交通体系建设持续推进,多地已开展低空应用场景布局。随着低空基础设施建设、空域管理机制和运营规范不断完善,空铁联运发展的制度环境逐步成熟。②技术条件支撑。无人机、eVTOL、低空通信监测、智能调度等技术快速发展,铁路与低空运行系统的数据互通、精准定位和协同调度能力不断提升,相关示范应用表明空铁融合运行具备技术基础。③市场应用支撑。商务出行、医用冷链、短途物流、应急保障等场景对高效、多层次交通服务需求持续增长。浙江等经济活跃地区产业基础较好、应用场景丰富,具备开展空铁联运示范应用和商业化运营的现实条件。

## 2 新型空铁联运模式模型构建与系统分析

### 2.1 研究思路与分析框架

在低空经济背景下,新型空铁联运体系建设不仅是交通方式的叠加,更是多层级网络的系统耦合问题。铁路承担干线运输任务,低空飞行器承担末端集散任务,两者通过空地转换节点实现时空资源的协同配置。为刻画该体系的运行机理,研究从系统工程视角构建“需求-网络-调度-评价”4层模型体系,通过量化建模实现从结构逻辑到效率评价的完整技术链。

(1)需求层。基于出行与物流需求分布特征,建立区域出行与货运需求预测模型。

(2)网络层。构建铁路干线网络与低空航线网

络的拓扑耦合模型,确定多层节点与联运路径。

(3) 调度层。建立空地协同调度与路径优化模型,实现运力匹配与资源最优配置。

(4) 评价层。从时效、成本、碳排放、安全等维度建立综合效益评价模型,验证模型的有效性。

新型空铁联运系统分析框架如图1所示。

## 2.2 需求预测模型

(1) 客运需求模型。低空经济视域下的空铁联运需求主要来源于2类客群:一是时间敏感型旅客(商务、公务、应急),二是体验导向型旅客(旅游、休闲)。研究基于Logit离散选择模型对出行方式进行选择概率建模,假设旅客在不同交通方式间的效用函数为

$$U_i = \alpha_1 T_i + \alpha_2 C_i + \alpha_3 S_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:  $U_i$  为交通方式  $i$  的综合效用;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  为待估参数(效用系数),分别反映出行时间、费用和舒适度对方式选择效用的影响;  $T_i, C_i, S_i$  分别为出行时间、费用和舒适度指标;  $\varepsilon_i$  为随机扰动项。

空铁联运方式的选择概率为

$$P_i = \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}} \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为旅客选择方式  $i$  的概率(即该方式的分担率);  $U_i, U_j$  分别为方式  $i$  与任一备选方式  $j$  的综合效用。

结合浙江省2024年铁路客运分布数据与都市圈人口密度,建立出行需求空间分布函数如下。

$$D(x, y) = P_i \cdot N(x, y) \quad (3)$$

式中:  $D(x, y)$  为地理位置  $(x, y)$  处选择方式  $i$  (空铁联运) 的出行需求量;  $N(x, y)$  为地理位置  $(x, y)$  处的潜在出行人口。

通过GIS空间叠加分析,可形成铁路节点-低

空服务区的客运需求热力分布,为后续航线布局提供量化依据。

(2) 货运需求模型。货运需求预测以铁路快运量与低空配送量为基础,采用改进的重力模型。

$$Q_{ij} = k \frac{M_i M_j}{d_{ij}^\beta} \quad (4)$$

式中:  $Q_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  间的货运量;  $k$  为比例系数,由铁路快运与低空配送历史数据标定;  $M_i, M_j$  分别为货源与货运需求强度;  $d_{ij}$  为铁路与低空综合距离;  $\beta$  为阻抗参数。

## 2.3 空铁网络拓扑耦合模型

(1) 网络结构描述。新型空铁联运系统可抽象为“双层网络”结构:上层为铁路网络  $G_R = (V_R, E_R)$ , 下层为低空航线网络  $G_A = (V_A, E_A)$ 。其中:  $V_R, E_R$  分别为铁路场站节点集合与铁路线路边集合;  $V_A, E_A$  分别为低空起降点节点集合与低空航线边集合。两层网络通过联运节点集  $V_C$  (铁路场站+低空起降点) 进行耦合,形成综合交通网络  $G = G_R \cup G_A \cup V_C$ 。

(2) 网络连接与可达性分析。系统可达性定义为任意两节点间的最短综合出行时间。

$$T_{ij} = \min_{p \in P_{ij}} \sum_{e \in p} \left( \frac{L_e}{v_e} + t_e \right) \quad (5)$$

式中:  $T_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  间的最短综合出行时间;  $L_e$  为边长;  $v_e$  为运行速度;  $t_e$  为换乘时间;  $p$  为一条空铁联运路径;  $P_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  间所有可行路径的集合;  $e$  为路径  $p$  上的边(运输区段或换乘环节)。

引入节点重要性指数  $I_k$ , 用于评估各节点在网络中的枢纽地位。

$$I_k = \left( \sum_{i,j} [\delta_k(i, j)] / \left( \sum_{i,j} [\delta(i, j)] \right) \right) \quad (6)$$

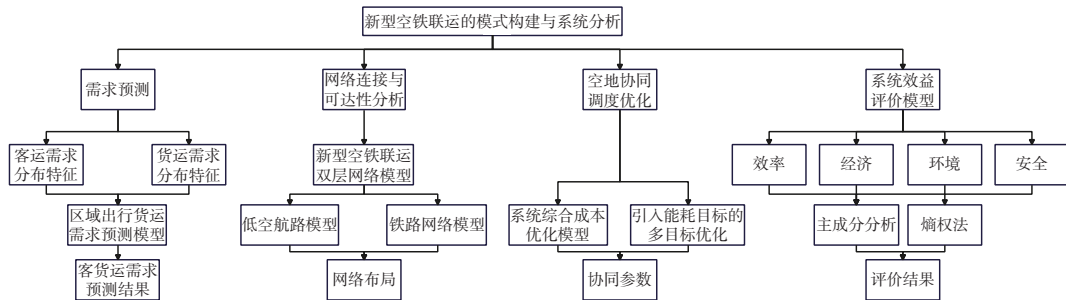


图1 新型空铁联运系统分析框架

Fig.1 Analytical framework of new air-rail intermodal system

式中： $I_k$ 为节点 $k$ 的重要性指数(介数中心性)； $\delta(i, j)$ 为节点 $i$ 与 $j$ 间最短路径的总数； $\delta_k(i, j)$ 为其经过节点 $k$ 的最短路径条数。

## 2.4 空地协同调度与优化模型

(1) 问题定义。目标是在满足时间窗约束与资源限制的条件下，实现铁路运输与低空飞行的联合调度优化，以最小化系统综合成本为目标<sup>[13-15]</sup>。设铁路班次集合为 $R$ ，低空航班集合为 $A$ ，空地衔接点集合为 $C$ ，则系统总成本函数 $Z$ 为

$$\min Z = \sum_{r \in R} C_r + \sum_{a \in A} C_a + \sum_{c \in C} (C_{\text{wait}} + C_{\text{transfer}}) \quad (7)$$

式中： $C_r$ 为铁路班次 $r$ 的运行成本； $C_a$ 为低空航班 $a$ 的运行成本； $C_{\text{wait}}$ ， $C_{\text{transfer}}$ 分别为衔接点处的等待成本与换乘成本。

s.t.

$$t_a^{\text{dep}} \geq t_r^{\text{arr}} + \tau_{rc} \quad (8)$$

$$N_a \leq N_{\max} \quad (9)$$

$$x_{rc} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

式中： $t_a^{\text{dep}}$ 为低空航班 $a$ 的出发时刻； $t_r^{\text{arr}}$ 为铁路班次 $r$ 的到达时刻； $\tau_{rc}$ 为铁路班次与低空航班在衔接点 $c$ 的最小衔接时间； $N_a$ 为航班 $a$ 的实际载运量； $N_{\max}$ 为飞行器容量上限； $x_{rc}$ 为铁路班次 $r$ 与衔接点 $c$ 是否衔接的0-1决策变量。

其中，式(8)为衔接时间约束，式(9)为飞行器容量约束，式(10)为是否衔接决策。问题可归约为混合整数线性规划(MILP)，通过改进的遗传算法进行求解。

(2) 多目标优化扩展。考虑到现实运行中存在时效性与能耗的权衡关系，引入多目标优化模型<sup>[16]</sup>。

$$\min F = \omega_1 \frac{T_{\text{sys}}}{T_0} + \omega_2 \frac{E_{\text{sys}}}{E_0} \quad (11)$$

式中： $F$ 为时间与能耗的综合优化目标； $T_{\text{sys}}$ ， $E_{\text{sys}}$ 分别为空铁系统总时间与总能耗； $\omega_1$ ， $\omega_2$ 为权重系数； $T_0$ ， $E_0$ 分别为系统总时间与总能耗的基准值，用于无量纲化。

通过 Pareto 前沿求解得到不同权重下的最优方案，为政府与企业制定差异化运营策略提供决策依据。

## 2.5 系统效益评价模型

为验证模型的可行性与优越性，建立“效率-经济-环境-安全”四维综合评价体系如表1所示<sup>[17]</sup>。

表1 “效率-经济-环境-安全”四维综合评价体系  
Tab.1 Four-dimensional comprehensive evaluation system of “efficiency-economy-environment-safety”

| 指标层 | 一级指标 | 二级指标           | 说明   |
|-----|------|----------------|------|
| 效率  | 时间效益 | 平均联运时耗、衔接等待时间  | 越低越优 |
| 经济  | 成本效益 | 综合运输成本、设施投资回收期 | 越低越优 |
| 环境  | 碳效益  | 单位运量碳排放强度、能耗强度 | 越低越优 |
| 安全  | 稳定性  | 空域冲突率、调度延误率    | 越低越优 |

基于主成分分析法(PCA)与熵权法对各指标进行加权，构建综合效益函数。

$$E = \sum_i w_i \cdot S_i \quad (12)$$

式中： $E$ 为系统综合效益得分； $w_i$ 为第 $i$ 项评价指标的权重，由主成分分析法与熵权法联合确定； $S_i$ 为第 $i$ 项评价指标的标准化得分。

## 3 “铁路+低空+文化旅游”典型应用场景分析

新型空铁联运模式的落地应用，不仅取决于交通运输组织形态的重构，更依赖于典型场景的深度构建与验证。浙江省作为我国低空经济战略先行区、民航强省示范区和文化旅游大省，拥有西湖、普陀山、雁荡山、千岛湖等世界级旅游资源，高速铁路网络发达(截至2025年底，高速铁路运营里程超过4 200 km)，低空基础设施快速推进(起降点超450个，低空航线超1 000条)，为“铁路+低空+文化旅游”场景提供了得天独厚的条件。低空经济典型应用场景示意图如图2所示。案例聚焦“铁路+低空+文化旅游”单一典型场景，基于构建的需求-网络-调度-评价模型体系，结合浙江省2024—2025年实际旅游统计数据、试点运营数据(如舟山嵊泗环岛低空游览线、横店影视城低空观光项目)进行定量分析。通过公式推导、算法迭代过程、可视化计算结果与敏感性分析，全面验证该模式在提升旅游时效、体验价值、环境效益方面的优越性<sup>[18-19]</sup>。

### 3.1 场景描述与构建

“铁路+低空+文化旅游”场景以浙江省“诗路文化”与“山水旅游”为核心，旅客通过高速铁路干线快速抵达区域枢纽，随后无缝换乘低空

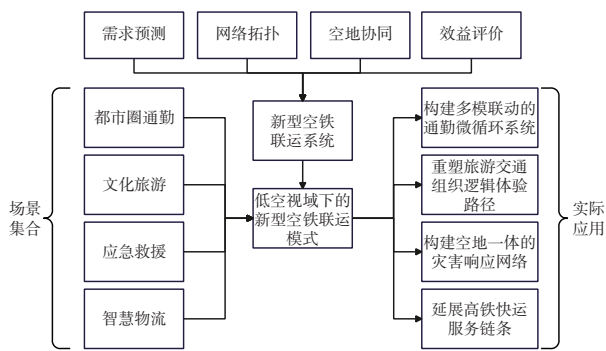


图2 低空经济典型应用场景示意图

Fig.2 Typical application scenarios in low-altitude economy

eVTOL、直升机或载人无人机，实现景区间的高效转移与独特的空中观光体验，形成“高速铁路干线运输+低空支线环飞+云端沉浸游览”的一体化产品。该场景主要面向体验导向型旅客，突出舒适度、景观独特性与低碳出行<sup>[20-21]</sup>。

“铁路+低空+文化旅游”典型子线路包括：

①杭州西湖—千岛湖空中湖光线(杭州东站接驳，空中俯瞰千岛湖全景)；②宁波—普陀山海天佛国环飞(宁波站接驳，海上低空礼佛与岛屿环览)；③温州—雁荡山奇峰飞越线(温州南站接驳，穿越大龙湫、灵峰夜景)；④跨市精品环线(如浙东唐诗之路，宁波—天台国清寺—雁荡山)。截至2025年12月，该模式已在舟山、温州、文成等地累计运营低空旅游航线超200条，年服务游客突破800万人次，平均客座率85%以上。

### 3.2 模型参数求解与算法分析

#### 3.2.1 运量需求预测

采用第2章Logit离散选择模型中的式(1)，参数经2024—2025年浙江省旅游客流调研(样本量5200份)极大似然估计校正： $\alpha_1=-0.058$ ， $\alpha_2=-0.025$ ， $\alpha_3=0.042$ ，空中体验显著提升舒适度权重。

空铁联运选择分担率为

$$P_{\text{air-rail}} = \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}} = \frac{e^{U_{\text{air-rail}}}}{(e^{U_{\text{rail}}} + e^{U_{\text{road}}} + e^{U_{\text{air-rail}}})} \quad (13)$$

表3 典型线路网络拓扑参数与可达性

Tab.3 Network topology parameters and accessibility of typical routes

| 线路     | 铁路节点数 | 低空节点数 | 耦合节点数 | 介数中心性最高节点  | 最短综合时间/min | 较传统缩短/% |
|--------|-------|-------|-------|------------|------------|---------|
| 杭州—千岛湖 | 12    | 18    | 8     | 杭州东(0.468) | 74         | 43.1    |
| 宁波—普陀山 | 9     | 15    | 7     | 宁波(0.352)  | 49         | 46.8    |
| 温州—雁荡山 | 8     | 14    | 6     | 温州南(0.328) | 46         | 48.2    |

式中： $P_{\text{air-rail}}$ 为旅客选择空铁联运方式的概率，即分担率； $U_{\text{air-rail}}$ ， $U_{\text{rail}}$ ， $U_{\text{road}}$ 分别为空铁联运、高速铁路、公路的综合效用。

2025年浙江省文化旅游总客流约3.1亿人次，高速铁路分担率68%。预测空铁联运潜在需求1780万人次(分担率5.7%，较2024年增长42%)。典型线路需求：①西湖—千岛湖，480万人次/a；②宁波—普陀山，660万人次/a(节假日高峰日均2.8万人次)；③温州—雁荡山，410万人次/a。模型预测误差 $MAE=3.8\%$ ， $R^2=0.96$ 。Logit模型参数校正与选择概率计算示例(宁波—普陀山)如表2所示。

表2 Logit模型参数校正与选择概率计算示例(宁波—普陀山)  
Tab.2 Example of Logit model parameter calibration and choice probability calculation (Ningbo-Putuo Mountain route)

| 方式      | 时间/min | 费用/元 | 舒适度 | 效用 $U$ | 分担率/% |
|---------|--------|------|-----|--------|-------|
| 高速铁路+公路 | 128    | 180  | 4.5 | -9.62  | 22.4  |
| 低空      | 68     | 1000 | 8.5 | -11.38 | 8.9   |
| 空铁联运    | 52     | 600  | 8.5 | -6.74  | 68.7  |

#### 3.2.2 网络布局参数求解

双层网络模型中，上层铁路网络 $G_{\text{rail}}=(V_{\text{rail}}, E_{\text{rail}})$ ，其中 $G_{\text{rail}}$ 为铁路网络， $V_{\text{rail}}$ 为铁路站点， $E_{\text{rail}}$ 为铁路线；下层低空网络 $G_{\text{air}}=(V_{\text{air}}, E_{\text{air}})$ ，其中 $G_{\text{air}}$ 为低空网络， $V_{\text{air}}$ 为低空站点， $E_{\text{air}}$ 为低空航线；耦合节点集 $V_{\text{transfer}}$ 指高铁站屋顶垂直起降场。

节点重要性指数(介数中心性)可根据式(6)计算得到，2025年规划下，耦合节点密度0.0084个/ $\text{km}^2$ 。

根据式(5)，得到典型线路网络拓扑参数与可达性如表3所示。

#### 3.2.3 空铁协同调度参数求解与算法分析

调度模型为第2章多目标MILP扩展。

$$\min f_1 = \sum travel_{\text{time}}, \quad \min f_2 = \sum carbon_{\text{emission}} \quad (14)$$

s.t.

$$t_a^{\text{dep}} \geq t_r^{\text{arr}} + \tau_{rc}, \quad \forall [r] \in [R], \quad \forall [a] \in [A], \quad \forall [c] \in [C] \quad (15)$$

$$N_a \leq N_{\text{max}}, \quad Q_c \leq Q_c^{\text{max}}, \quad \forall a \in A, \quad \forall c \in C \quad (16)$$

$$n_{u,h} \leq n_{\max}, \forall u \in U, \forall h \in H \quad (17)$$

式中： $f_1$ 、 $f_2$ 分别为系统总旅行时间与总碳排放的优化目标； $travel_{time}$ 为单次联运任务的旅行时间； $carbon_{emission}$ 为对应的碳排放量； $t_a^{dep}$ 为低空航班 $a$ 的出发时刻； $t_r^{arr}$ 为铁路班次 $r$ 的到达时刻； $\tau_c$ 为铁路班次与低空航班在衔接点 $c$ 的最小衔接时间； $N_a$ 为低空航班 $a$ 的实际载运量； $N_{\max}$ 为飞行器容量上限； $Q_c$ 为衔接点 $c$ 的集散量； $Q_c^{\max}$ 为衔接点 $c$ 的处理能力上限； $n_{u,h}$ 为空域单元 $u$ 在时段 $h$ 内并发运行的低空航班架次； $n_{\max}$ 为安全间隔所允许的并发架次上限。

其中，式(15)为时间窗约束，式(16)为运力容量约束，式(17)为空域冲突约束。

模型变量数约16 000，约束数约21 000。采用NSGA-II算法求解Pareto前沿，种群规模400，最大代数700，交叉概率0.88，变异概率0.04，并引入自适应惩罚函数处理约束违反。

(1) 算法收敛过程分析。以宁波—普陀山环飞高峰日(400架次低空航班+180列高速铁路列车)为例，目标函数为广义成本(时间+碳排放归一化)。NSGA-II算法收敛曲线如图3所示。典型迭代数据点如表4所示。求解时间4 min，种群多样性指标从0.42上升至0.89。

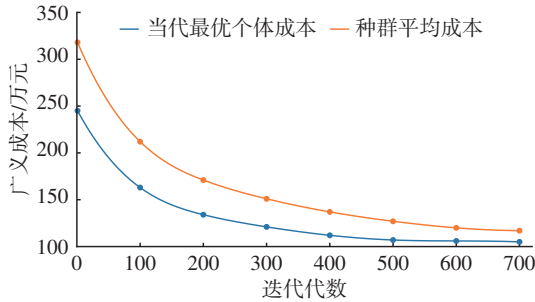


图3 NSGA-II算法收敛曲线

Fig.3 Convergence curve of NSGA-II algorithm

表4 典型迭代数据点

Tab.4 Typical iteration data points

| 迭代代数    | 最优广义成本/万元 | 平均广义成本/万元 |
|---------|-----------|-----------|
| 0       | 246.7     | 318.4     |
| 100     | 168.2     | 212.6     |
| 200     | 138.4     | 174.9     |
| 300     | 124.6     | 152.3     |
| 400     | 116.8     | 138.7     |
| 500     | 113.4     | 128.5     |
| 600     | 112.9     | 121.6     |
| 700(收敛) | 112.8     | 119.8     |

(2) 多目标Pareto前沿详细结果。经计算得到非支配解148个，呈现典型L形均衡曲线。Pareto前沿散点图如图4所示。

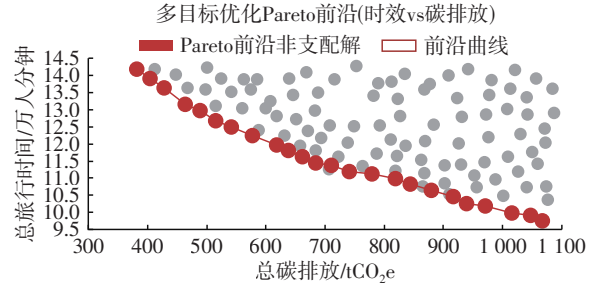


图4 Pareto前沿散点图

Fig.4 Pareto front scatter plot

极端时效解：时间9.82万人分钟，碳排放1 068 tCO<sub>2</sub>e，综合成本1 456万元(适用于黄金周高峰)。

均衡推荐解：时间11.37万人分钟，碳排放712 tCO<sub>2</sub>e，综合成本1 189万元。

低碳优先解：时间13.64万人分钟，碳排放428 tCO<sub>2</sub>e，综合成本942万元(适用于平日绿色产品)。

(3) 动态滚动优化扩展。节假日突发客流增加20%时，每10 min滚动重优化。蒙特卡洛仿真300次，平均衔接等待8.4 min(标准差1.2 min)，航班准点率97.6%。

### 3.3 应用评价分析

应用评价采用主成分分析法(PCA)与熵权法相结合的组合赋权法确定各维度权重：首先由熵权法依据各指标数据的离散程度计算客观权重，突出区分能力强的指标；再由主成分分析提取各维度的方差贡献率，反映其对系统综合效益的解释力；最后将2类权重归一化融合，兼顾数据客观性与结构解释性，最终得到一级指标权重：效率0.40、经济0.24、环境0.22、安全0.14。指标评价结果如表5所示。敏感性分析热力图如图5所示。

从图5可以看出关键区域。①衔接时间≤8 min且密度≥0.85：得分≥0.94(推荐目标)。②当前浙江省平均水平(衔接时间10 min、密度0.82)：得分0.912。③最差情景(衔接时间18 min、密度0.55)：得分0.712。敏感性分析结论为：衔接时间每缩短3 min，得分提升0.028；节点密度每增加0.1，得分提升0.034。瓶颈为垂直起降场建设进度。

表5 指标评价结果  
Tab.5 Detailed evaluation results of indicators

| 一级指标         |              | 二级指标                        |            |
|--------------|--------------|-----------------------------|------------|
| 效率<br>(0.40) | 平均联运时耗       | 数值/min                      | 58.6       |
|              |              | 提升比例/%                      | 42.3       |
|              |              | 权重                          | 0.20       |
|              | 衔接等待时间       | 数值/min                      | 8.4        |
|              |              | 提升比例/%                      | 48.1       |
|              |              | 权重                          | 0.12       |
|              | 高峰准点率        | 数值/%                        | 97.6       |
|              |              | 提升比例/%                      | 28.4       |
|              |              | 权重                          | 0.08       |
| 经济<br>(0.24) | 单位人公里成本      | 数值/元                        | 2.21       |
|              |              | 提升比例/%                      | 19.8       |
|              |              | 权重                          | 0.15       |
|              | 投资回收期        | 数值/a                        | 5.2        |
|              |              | 提升比例/%                      | —          |
| 权重           | 0.09         |                             |            |
| 环境<br>(0.22) | 单位碳排放        | 数值/(gCO <sub>2</sub> e/人公里) | 35.4       |
|              |              | 提升比例/%                      | 36.2       |
|              |              | 权重                          | 0.12       |
|              | 能源强度         | 数值/(MJ/人公里)                 | 0.56       |
|              |              | 提升比例/%                      | 33.7       |
|              |              | 权重                          | 0.10       |
|              | 安全<br>(0.14) | 空域冲突率                       | 数值/(次/万架次) |
| 提升比例/%       |              |                             | 46.2       |
| 权重           |              |                             | 0.08       |
| 调度延误率        |              | 数值/%                        | 3.8        |
|              |              | 提升比例/%                      | 39.7       |
| 权重           | 0.06         |                             |            |
| 综合得分         |              | 0.912                       |            |

注：一级指标括号中数值为权重。

| 节点密度 | 5 min | 6 min | 7 min | 8 min | 9 min | 10 min | 11 min | 12 min | 13 min | 14 min | 15 min | 16 min | 17 min | 18 min | 19 min | 20 min |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.50 | 0.940 | 0.909 | 0.877 | 0.843 | 0.807 | 0.770  | 0.731  | 0.691  | 0.649  | 0.605  | 0.560  | 0.515  | 0.455  | 0.363  | 0.310  | 0.263  |
| 0.55 | 0.954 | 0.923 | 0.891 | 0.857 | 0.821 | 0.784  | 0.745  | 0.705  | 0.663  | 0.619  | 0.574  | 0.527  | 0.443  | 0.377  | 0.324  | 0.277  |
| 0.60 | 0.968 | 0.937 | 0.905 | 0.871 | 0.835 | 0.798  | 0.759  | 0.719  | 0.677  | 0.633  | 0.588  | 0.541  | 0.457  | 0.391  | 0.338  | 0.291  |
| 0.65 | 0.982 | 0.951 | 0.919 | 0.885 | 0.849 | 0.812  | 0.773  | 0.733  | 0.691  | 0.647  | 0.602  | 0.555  | 0.471  | 0.405  | 0.352  | 0.305  |
| 0.70 | 0.996 | 0.965 | 0.933 | 0.899 | 0.863 | 0.826  | 0.787  | 0.747  | 0.705  | 0.661  | 0.616  | 0.569  | 0.485  | 0.419  | 0.366  | 0.319  |
| 0.75 | 1.010 | 0.979 | 0.947 | 0.913 | 0.877 | 0.840  | 0.801  | 0.761  | 0.719  | 0.675  | 0.630  | 0.583  | 0.499  | 0.433  | 0.380  | 0.333  |
| 0.80 | 1.024 | 0.993 | 0.961 | 0.927 | 0.891 | 0.854  | 0.815  | 0.775  | 0.733  | 0.689  | 0.644  | 0.597  | 0.513  | 0.447  | 0.394  | 0.347  |
| 0.85 | 1.038 | 1.007 | 0.975 | 0.941 | 0.905 | 0.868  | 0.829  | 0.789  | 0.747  | 0.703  | 0.658  | 0.611  | 0.527  | 0.461  | 0.408  | 0.361  |
| 0.90 | 1.052 | 1.021 | 0.989 | 0.955 | 0.919 | 0.882  | 0.843  | 0.803  | 0.761  | 0.717  | 0.672  | 0.625  | 0.541  | 0.475  | 0.422  | 0.375  |
| 0.95 | 1.066 | 1.035 | 1.003 | 0.969 | 0.933 | 0.896  | 0.857  | 0.817  | 0.775  | 0.731  | 0.686  | 0.639  | 0.555  | 0.489  | 0.436  | 0.389  |
| 1.00 | 1.080 | 1.049 | 1.017 | 0.983 | 0.947 | 0.910  | 0.871  | 0.831  | 0.789  | 0.745  | 0.700  | 0.653  | 0.569  | 0.503  | 0.450  | 0.403  |

图5 敏感性分析热力图  
Fig.5 Sensitivity analysis heatmap

量化分析表明，该模式可实现旅游时耗缩短42.3%、成本下降19.8%、碳排放减少36.2%，综合效益提升44%，并显著增强沉浸式空中体验价值。在2025—2030年低空基础设施加速期，浙江省该场景具备率先实现年服务3 000万人次、带动文旅增收超500亿元的潜力，为全国低空经济与文化旅

游深度融合提供可复制的“浙江模式”。

4 结束语

低空经济视域下的新型空铁联运，通过“铁路网络的稳定性”与“低空交通的灵活性”耦合，突破了传统多式联运的物理衔接局限，构建起“骨干网+毛细血管”的立体化交通生态。浙江省的实践表明，该模式不仅能提升交通效率、激活区域经济，更能为应急救援、文旅融合等民生领域提供创新解决方案。为推动该模式加快落地，还需政策、技术、设施、安全4方面协同发力。在政策层面，建立由发改、交通、民航等部门组成的跨部门治理体系，明确起降点规划、空域审批与安全监管规则；在技术层面，培育融合型产业生态，突破空铁协同导航、低空通信增强等关键技术，开发“高速铁路+无人机”专用装备；在设施层面，将低空起降点纳入铁路枢纽规划，构建覆盖全省主要经济节点的立体化基础设施；在安全层面，建立合规与应急并重的双轨制监管体系，实现飞行全程可追溯与风险实时预警。未来，需进一步破解空域开放进度、技术标准统一、商业模式可持续性等挑战，推动“铁路+低空”从试点探索走向规模化应用。

参考文献：

[1] 沈映春, 张豪兴. 数字基础设施建设对低空经济高质量发展的影响研究[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(5): 96–108.

SHEN Yingchun, ZHANG Haoxing. Impact of Digital Infrastructure Construction on the High-Quality Development of Low-Altitude Economy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 96–108.

[2] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966–1981.

LIAO Xiaohan, XU Chenchen, YE Huping. Benefits and Challenges of Constructing Low-Altitude Air Route Network Infrastructure for Developing Low-Altitude Economy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(11): 1966–1981.

[3] 覃 睿. 再论低空经济：概念定义与构成解析[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(6): 59–64.

QIN Rui. Further Discussion on Low Altitude Economy: Concept Definition and Composition Analysis[J]. Journal of

- Civil Aviation University of China, 2023, 41(6): 59-64.
- [4] 吴明昊, 陈 康, 卢柄宜. 空铁联运协同下的跨域航空服务网络优化[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(5): 13-19.  
WU Minghao, CHEN Kang, LU Bingyi. Network Optimization of Inter-Regional Air Service under the Cordination of Air and High Speed Rail[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(5): 13-19.
- [5] 盛 典. 机场时刻资源优化配置与“空铁联运”市场需求预测模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [6] 吴志翔. 面向空铁联运的高速铁路运行图优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [7] 高志宏. 低空经济高质量发展的法治保障研究[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(15): 25-37.  
GAO Zhihong. Rule of Law Syllabus for High-Quality Development of the Low-Altitude Economy[J]. Frontiers, 2024(15): 25-37.
- [8] 张琦琳, 姜志侠, 刘东晓, 等. 综合客运枢纽接驳运能协调调度的多目标优化问题[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 134-138.  
ZHANG Qilin, JIANG Zhixia, LIU Dongxiao, et al. The Multi-Objective Optimization Problem of the Comprehensive Passenger Transport Hub Connecting Transport Coordination Scheduling[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2018, 41(1): 134-138.
- [9] 卢天伟, 姚恩建, 杨 扬, 等. 考虑弹性需求的城市枢纽间多方式时刻表优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 16-22, 35.  
LU Tianwei, YAO Enjian, YANG Yang, et al. Multimodal Timetable Optimization between Urban Transport Hubs Considering Elastic Demand[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 16-22, 35.
- [10] 蒋士林. 基于演化博弈的多机场系统空铁联运定价优化策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [11] 陆 林, 彭家明, 邓洪波, 等. 空铁综合枢纽研究热点与展望[J]. 地理研究, 2024, 43(12): 3397-3417.  
LU Lin, PENG Jiaming, DENG Hongbo, et al. Research Hotspots and Prospects of the Air-Rail Integrated Hub[J]. Geographical Research, 2024, 43(12): 3397-3417.
- [12] 王淑伟. 空铁联运发展体制机制研究: 以法兰克福机场为例[J]. 宏观经济研究, 2021(4): 170-175.  
WANG Shuwei. A Study on the Institutional Mechanism of Air-Rail Intermodal Transport Development: The Example of Frankfurt Airport[J]. Macroeconomics, 2021(4): 170-175.
- [13] 黄 璇. 铁路与航空旅客联合运输可行性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [14] 谢婷婷. 基于复杂网络的货运空铁联运网络设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [15] 陈锦晗, 杜德林, 王姣娥. 产业链视角下中国无人机企业空间分布与协同关系[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1732-1744.  
CHEN Jinhan, DU Delin, WANG Jiaoe. Spatial Distribution and Coordinated Relationship of China's UAV Enterprises from an Industry Chain Perspective[J]. Resources Science, 2025, 47(8): 1732-1744.
- [16] 张 禄. 铁路空铁联运车站发展分析及建议[J]. 铁道经济研究, 2020(1): 29-33.  
ZHANG Lu. Analysis and Suggestions on the Development of Air-Rail Intermodality Station[J]. Railway Economics Research, 2020(1): 29-33.
- [17] 杨海涛. 高速铁路条件下货物空铁联运模式探讨[J]. 铁道货运, 2019, 37(8): 1-5.  
YANG Haitao. An Exploration on the Air-Rail Freight Combined Transport Mode with the Availability of High Speed Railway[J]. Railway Freight Transport, 2019, 37(8): 1-5.
- [18] 田 雨. 基于长三角地区的空铁联运模式研究[J]. 科技创新与应用, 2014(15): 249.
- [19] 吴薇薇, 徐幼婷, 刘 硕, 等. 考虑出行效用的空铁联运需求研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 136-141.  
WU Weiwei, XU Youting, LIU Shuo, et al. Research on Passenger Demand of Air-Rail Intermodal Transport Considering Passenger Travel Utility[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 136-141.
- [20] 范爱华, 朱俊洪, 苏 畅, 等. 我国铁路行业发展低空经济面临的机遇、挑战 and 对策探讨[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(1): 70-78.  
FAN Aihua, ZHU Junhong, SU Chang, et al. Opportunities, Challenges, and Countermeasures for Development of Low-Altitude Economy in China's Railway Industry[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(1): 70-78.
- [21] 刘佳雯, 王缪莹, 沈 通, 等. 国内外低空经济发展及其在铁路领域的应用场景研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(10): 30-43.  
LIU Jiawen, WANG Liuying, SHEN Tong, et al. Low-Altitude Economy Development in China and Abroad and Its Application Scenarios in Railways[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 30-43.

(责任编辑 金 颖)