成都双枢纽机场系统航班优化配置模型研制及效果

李佳怡，程小慷

（中国民用航空飞行学院机场学院，德阳 618300）

摘要：针对成都双枢纽机场系统的航班资源配置优化问题，构建了一个融合旅客成本、航空公司收益和机场效率的多目标规划模型。通过1 032份旅客问卷数据，设计改进的变邻域搜索算法进行求解，该算法包含3类扰动算子和9种邻域结构。实证研究表明，优化方案使旅客平均出行成本降低8.2%，航空公司收益提升12.7%，双机场协同效率增长9.7%。研究成果为双机场系统的差异化运营提供了决策支持，验证了模型在平衡多方利益、提升系统效能方面的有效性。未来研究可进一步拓展至跨城市机场群的协同优化。

关键词：航空交通运输；航班优化配置；航班时刻；机场群协同发展

中图分类号：U8 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)04－0041－08

随着航空运输产业的持续快速发展，作为关键交通基础设施的民用机场建设规模不断扩大，在主要都市圈及区域航空枢纽尤为显著，多机场协同运营体系已日益成为现代航空网络发展的重要形态。以四川省会城市为例，其双流国际机场与天府国际机场构建的双核枢纽体系，已成为民航运输系统多机场协同发展的代表性实践。依据《成都国际航空枢纽建设规划纲要》，上述两座机场将实施功能互补的协同发展战略，通过差异化业务分工与资源优化配置，显著增强成都航空枢纽的综合服务能力和国际竞争力。

随着成都天府国际机场旅客吞吐量突破5 000万人大关，双机场系统的运营模式面临新一轮的资源优化和航线调整问题。如何合理配置两机场的航班资源，避免资源浪费与过度竞争，提升两机场的整体效能成为亟待解决的关键问题。因此，研究成都双机场系统中的航班资源优化配置，尤其是如何在成都的天府机场与双流机场之间进行有效的航班调度和资源分配，具有重要的现实意义。

在研究成都双枢纽机场航班资源优化配置问题时，相关文献的综述主要涉及三个关键领域：双机场系统、双机场协同发展以及航班优化配置。现有的研究大多数情况讨论的是多机场系统、“一市多场”、机场群等，而其研究成果同样可为探索双机场系统的运营模式提供参考。首先，多机场系统的研究关注于如何高效地管理和调度多个机场的航班资源，确保资源的最大化利用与流量的平衡。其次，多机场协同发展探讨了在多个机场间实现协同工作的机制，尤其是在航班调度、旅客流动与货物运输等方面的协调与优化。最后，航班优化配置的研究则主要集中在如何通过科学的调度和资源分配，提高航班的准点率、降低航班延误和提升空域使用效率。以上三方面的研究成果为双枢纽机场的航班资源优化配置提供了理论支持和实践指导。

目前多机场系统的研究主要关注如何有效地管理和优化多个机场之间的资源分配与协调。现有研究显示，多机场系统的发展已从单纯的基础设施建设转向协同管理与资源优化配置。国外研究（如Richard[1]、Vincenzo等[2]）强调动态规划与市场调节在多机场系统形成中的关键作用，主张通过差异化服务和战略协同提升系统效能；大部分国内研究（如杨学兵[3]、王明杰等[4]）更关注国家战略导向下的枢纽功能互补，指出中国双枢纽机场系统具有政府主导、快速成型的特点，小部分国内研究（如朱佳等[5]）研究多机场系统与航司之间合作进行利益共享，其核心目标都是通过机场群协同发展带动区域经济。尽管多机场系统研究已涉及旅客行为、

收稿日期：2025-08-05

基金项目：中国民用航空飞行学院大学生创新创业大赛基金(X202510624323)

作者简介：李佳怡(2001—)，女，湖南长沙人，硕士研究生，研究方向为机场管理与工程；通信作者程小慷(1970—)，男，贵州遵义人，硕士，教授，研究方向为机场管理与工程。

航线布局等维度，但缺乏对航班资源配置进行系统性整合的微观层面探索。

多机场协同发展的文献主要集中在研究多机场系统内各机场间的相互影响及其协同发展。研究内容涉及旅客出行行为与航线网络演变的关系，探讨了高铁与航空竞争[6]、航司间竞争[7]、票价策略[8]、航线网络选择[9]等因素对机场航线网络的影响。许多学者利用博弈理论[10-11]、动力学建模[12-13]等方法分析了机场、航司与旅客之间的互动，并提出了优化航线网络和机场补贴策略的方案。然而，现有研究面临一些挑战，如多机场同质化竞争问题、旅客决策行为的动态调整以及多机场协同补贴策略的研究不足。总的来说，现有研究为航线网络优化提供了思路，但仍需进一步完善相关研究方法，特别是在多机场协同定位和旅客智能决策方面。

航空运输资源配置的学术研究主要聚焦于两大核心领域：航线网络设计与航班时刻管理。在航线网络方面，普遍运用定量建模与综合评价相结合的方法论体系，重点探讨网络拓扑结构的经济性评估与空间布局优化，其中多机场协同环境下的网络设计问题备受关注。就航班时刻管理而言，现有研究主要围绕航空公司运营收益最大化[14]、成本最小化[15]、机场设施使用效率提升[16]以及航班延误最小化[17]四个优化目标展开。虽然航线网络规划理论已发展得相对完善，且多机场系统的相关研究日益增多，但针对特定双枢纽机场系统的网络规划研究仍存在明显不足，现有成果多以定性探讨为主。在时刻资源配置领域，当前研究多局限于延误控制这一单一维度，缺乏对机场功能差异化定位与旅客出行需求特征的系统性考量。

当前学术界对双枢纽机场系统的研究仍存在若干亟待完善之处，主要体现在以下三个维度：其一，针对双枢纽机场体系特有的航线网络设计与时刻资源分配的专项研究较为匮乏；其二，既有文献多聚焦于通过票价调控机制来引导旅客分流，却忽视了航空公司在不同机场运营成本差异这一关键因素；其三，现有航班优化研究往往未能系统整合机场功能定位与多方利益相关者的诉求。基于此研究缺口，本文构建了一个面向双机场系统的多目标协同优化框架，首次将旅客选择行为、航空公司运营成本结构与机场功能定位进行系统整合，创新性地设计了基于动态扰动的变邻域搜索算法。通过引入三类差异化扰动算子（航班重调度、出发航班交换、到达航班交换）和九种精细化邻域结构，实现从航班时刻调配到旅客流优化的多层次协同优化。

1 问题描述

随着航空运输需求的不断增长，双机场系统逐渐成为许多大城市机场规划和发展的趋势。成都作为一个典型的双枢纽机场城市，面临如何合理配置双机场系统的航线和航班时刻资源的问题。为了实现旅客高效便捷的出行，并在此基础上提高航空公司收益和机场运行效率，合理的航班资源优化配置变得尤为重要。

本文旨在综合考虑旅客、机场和航司三方利益，提出多目标优化模型以优化双枢纽机场系统内航线的开通与航班时段频次的安排。具体目标是：提高旅客出行的效率和便捷性，满足其出行偏好，降低其出行成本；增大航空公司运营收益，通过合理的航线和航班配置提升航班利用率；增大双机场的运行效率，在保证服务质量的前提下，实现运营的经济效益。

为了简化问题建模，确保模型具有可操作性和求解的可行性，本文做出以下几项假设。

（1）每个机场的运营能力是固定的，即每个机场在给定的时段内只能处理有限数量的航班，可以采用机场公布出来的机场容量。

（2）每个航班的起飞和降落时刻在双机场系统内不会发生冲突，即每个航班在两个机场之间的时间间隔已经充分考虑，以避免航班调度上的矛盾。

（3）航班频次的增加能够提高航空公司的运营收益，且每个航班的收入和成本在同一条航线上的变化趋势是相似的。

（4）旅客的出行偏好可以通过某种方式量化，且旅客更倾向于选择他们偏好的机场出发和到达，出行便捷性对其选择有较大影响。

（5）在短期内航班时段的变化对旅客需求的影响是渐进的，市场需求在每个时段内可以视为稳定。

（6）在模型求解过程中，外部因素（如天气、政策变化等）不会影响航班的配置和运营。

（7）不考虑航空公司之间的竞争关系。

（8）外部机场至双机场的航班计划保持不变，而往返两城市的航班可以自由安排。

2 数学规划模型

构建机场航班优化配置模型，涉及旅客成本模

型、航空公司收益模型和机场效率模型三个关键模型。通过构建这三个模型,旨在实现优化航班安排,从而最大化航空公司和机场的收益,并降低旅客的成本。最终的目标是通过优化航班的配置,使得旅客的出行成本最低、航空公司的收益最大化,并且确保机场运行效率保持在合适范围。具体的目标函数通过在三个模型之间引入相关系数来综合衡量。

目标函数可表示为

$$\max Z=-\alpha C+\beta F+\gamma B \tag{1}$$

式中:C 为旅客总成本;F 为航空公司收益;B 为机场效率;α、β、γ 为对应的权重系数,α、β、$\gamma\geqslant 0$。

2.1 旅客成本模型

旅客成本模型的目的是在航班配置中衡量旅客的出行成本。旅客的出行成本主要包括票价、时间成本、地面交通成本以及可能的延误成本等因素。为了精确计算旅客成本,将旅客分为商务旅客与休闲旅客,并设置不同的时间成本转换系数(元/h)a_1、a_2 进行计算。

旅客的总成本 C 可以表示为

$$C=\sum_{i\in p}k_iI_i+a_1\sum_{i\in p}d_iI_i+a_2\sum_{i\in p}d_iI_i \tag{2}$$

式中:i 为可以选择的机场集合的机场;k_i 为旅客到达 i 机场的地面交通费用;d_i 为旅客到达 i 机场的时间;I 为常数,若旅客选择的机场为 i,则 I_i 取 1,否则取 0。

2.2 航空公司收益模型

航空公司收益模型的目标是最大化航空公司的收益,这一目标通常与航班的座位价格、航班的载客量、航班的运营成本等因素密切相关。航空公司收益主要来源于票务收入和附加收入(如行李费、餐饮费等),具体收益 F 可以表示为

$$F=(p-c-w+b)N-sf-k \tag{3}$$

式中:p 为航空公司制定的平均票价;c 为每位旅客的边际成本;w 为航空公司为每位旅客向机场支付的服务费用;b 为机场给航空公司的补贴;N 为该航线的总客流;s 为起降成本;f 为飞行频率;k 为航空公司向机场支付的航线经营费用。

2.3 机场效率模型

机场效率是衡量双机场系统运行绩效的核心指标。机场希望通过合理的航班配置,最大化其效率及收益。机场效率 B 可以表示为

$$B=\frac{1}{2}\sum_{i=1}\eta_i+\gamma\eta_{i\mathrm{syn}} \tag{4}$$

式中:η_i 为单机场数据包络分析(data envelopment analysis,DEA)效率值;η_{syn} 为协同效率;i_{syn} 为系统内部 i 机场。

2.4 线性加权

双枢纽机场系统的航班资源优化配置实质上可以看作多目标优化问题。针对此类问题的求解,现有研究主要形成两种方法论路径:一是通过目标转换技术将多目标问题转化为单目标问题求解,常用方法包括线性加权法、ε-约束法及极小极大法等;二是直接求解 Pareto 前沿解集。鉴于航班优化配置问题对决策方案明确性的要求,本文采用第一种思路,选择基于改进 SAW(simple additive weighting)法的线性加权方法进行求解。

经典 SAW 方法作为线性加权法的典型代表,其求解过程包含两个关键步骤:目标函数归一化处理,通过极差标准化消除量纲影响;加权聚合,根据决策偏好进行线性组合。针对本文的三大目标(旅客成本最小化、航空公司收益最大化、机场效率最大化),采用 SAW 实施流程:首先分别求解各单目标优化问题,获得理想值与非理想值,再进行缩放,基于对多目标优化问题中各目标函数重要性的综合评估,本文采用定性与定量相结合的分析方法确定权重系数。最终确定各目标的权重分配如下:旅客出行成本最小化权重系数 $\alpha=0.2$,航空公司收益最大化权重系数 $\beta=0.3$,机场运行效率最大化权重系数 $\gamma=0.5$。

2.5 约束条件

综合考虑双枢纽机场的特点和运行规划要求,约束条件如下。

$$\sum_{i\in A_1}\sum_{j\in A_2}\sum_{r\in R}x_{ijfr}\leqslant 1,\forall f\in F \tag{5}$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{j\in A_2}x_{ijfr}+\sum_{f\in G}U_{fi}o_{fr}\leqslant N_{ir},\forall i\in A_1,r\in R \tag{6}$$

$$\sum_{i\in A_1}U_{fi}=1,\forall f\in G \tag{7}$$

$$\sum_{i\in A_1}\sum_{j\in A_2}\sum_{r\in R}y_{kijfr}=I^e_{ki},\forall i\in A_1,\forall k\in Q \tag{8}$$

$$\sum_{f\in G}w_{kfi}=I^a_{ki},\forall i\in A_1,\forall k\in Q \tag{9}$$

$$\sum_{i\in A_1}\sum_{j\in A_2}\sum_{f\in F}y_{kijfr}=g_{kr},\forall r\in R,k\in P \tag{10}$$

$$Z_k=r,if\ g_{kr}=1,\forall r\in R,k\in P \tag{11}$$

$$\sum_{i\in A_1}\sum_{j\in A_2}\sum_{f\in G}h^a_{kj}q_{fj}w_{kfi}=1,\forall k\in Q \tag{12}$$

$$C\geqslant 0 \tag{13}$$

$$F \geqslant 0 \tag{14}$$

$$B \geqslant 0 \tag{15}$$

$$N \leqslant N_{\max} \tag{16}$$

构建的机场网络中共有 n 个机场，$A_1=\{1,2,\cdots,n_1\}$表示本地机场的集合，$A_2=\{n_1+1,n_1+2,\cdots,n\}$表示外地机场的集合，$F=\{1,2,\cdots,m_1\}$表示所有$m_1$ 个出发航班的集合，$G=\{1,2,\cdots,m_2\}$表示所有m_2 个到达航班的集合。旅客分为出发旅客和到达旅客，用 $P=\{1,2,\cdots,I_1\}$表示 I_1 个出发旅客，$Q=\{1,2,\cdots,I_2\}$表示 I_2 个到达旅客。另外，$R=\{1,2,\cdots,t\}$表示航班时段的集合。

式(5)规定每个出发航班必须且只能被分配至一个特定的起降机场和运行时间段；式(6)确保各本地机场在每个时段的实际客流量不超过其设计机场容量；式(7)是为了保证所有到达航班只有唯一的到达机场；式(8)和式(9)保证每位出行旅客具有确定的出发机场(对于出发旅客 e)和到达机场(对于到达旅客 a)；式(10)～式(12)表示每位出发旅客只有一个目的地机场，每位到达旅客只能乘坐一个航班；式(13)～式(15)考虑到旅客出行成本 C、航空公司收益 F、机场效率 B 的非负性，这三个值是不小于 0 的；式(16)表示客流量 N 受到需求量 $N_{\max}$的限制。

$x_{ijfr}=1$ 表示本地机场 i 在时段 r 去往外地机场 j 的航班 f 存在，否则取 1；$U_{fi}=1$ 表示航班 f 到达机场 i，否则为 0；$o_{fr}=1$ 表示航班 f 到达时段为 r，否则为 0；$I_{ki}^{e}=1$ 表示出发旅客 k 的出发机场为 i，否则为 0；$w_{kfi}=1$ 表示到达旅客 k 乘坐 f 航班到达机场 i，否则为 0；$I_{ki}^{a}=1$ 表示到达旅客 k 的到达机场为 i，否则为 0；$g_{kr}=1$ 表示出发旅客 k 的出行时段为 r；Z_k 表示出发旅客 k 的出行时段；$h_{kj}^{a}=1$ 表示出发旅客 k 的目的地为 j 机场，否则为 0；$q_{fj}=1$ 表示到达航班从 j 机场出发，否则为 0。

3 实例分析

双流机场和天府机场作为四川省的两个主要航空枢纽，构成了一个典型的双枢纽机场系统，具有独特的地理优势和市场潜力。双流机场作为成都的主要国际机场，承担着大量的国内外航线，已经具备了较强的运营能力和市场影响力；而天府机场作为新建机场，具备着较为宽松的航班容量和发展空间，且其建设的战略定位明确，旨在缓解双流机场的压力并满足日益增长的航空运输需求。因此，双流机场和天府机场的协同运营在优化航班时刻安排和航线开通方面具有重要的实践意义。

在这一背景下，通过构建多目标优化模型来合理安排航班时段频次和航线布局，不仅能有效提升旅客的出行效率和便捷性，符合市场需求，也能够最大化航空公司和机场的收益。特别是在双枢纽系统的框架下，如何平衡两个机场之间的资源配置、优化航线网络布局，避免重复航线的开通和运营冲突，成为需要重点解决的问题。通过该模型的应用，可以帮助航空公司提升航班利用率，减小成本，同时为机场提供合理的收益预测与补贴政策，以确保其运营的可持续性和经济效益。因此，双流机场与天府机场的双枢纽体系正是一个理想的案例，适合采用此优化模型进行综合分析和优化。

3.1 参数设定

本文采用混合式数据采集方法，通过数字化平台与实体问卷相结合的调研形式系统获取研究数据。具体实施过程如下：网络调研阶段于 2025 年第二季度初(4 月 1—13 日)进行，通过专业调研平台定向推送问卷，目标群体限定为过去 6 个月内在成都双枢纽机场(天府国际机场/双流国际机场)有过至少 2 次航空出行记录的旅客，共覆盖样本量 1 500 人；实地调研采用分层抽样法，第一阶段(4 月 27 日—5 月 4 日)在天府国际机场 T1、T2 航站楼出发厅按1∶1∶1比例选取早、中、晚三个时段开展，第二阶段(5 月 7—12 日)在双流国际机场 T1、T2 航站楼采用相同方法实施，调研对象均为办理值机手续前的出行旅客。

共回收问卷 1 231 份，其中电子问卷 926 份，纸质问卷 305 份。采用严格的数据质量控制标准：首先剔除回答时间少于 120 s 的样本；其次排除存在明显逻辑矛盾的应答；最后去除关键信息缺失的无效问卷。经上述筛选后，共获得有效问卷 1 032 份，有效回收率为 83.83%。采用 Cronbach's α 系数检验问卷信度，测得 $\alpha=0.872$，表明问卷具有较高的内部一致性，符合社会科学研究的信效度标准。问卷核心数据包括：旅客出行目的(商务出行占比为 37.2%，非商务出行占比为 62.8%)；地面交通特征(平均接驳时间 52 min，标准差±18 min；平均费用 47 元，标准差±23 元)；航班偏好选择因素(准点率关注度 4.6/5.0，价格敏感度 3.8/5.0)。

在机场运行参数方面，根据民航局公布数据，天府机场与双流机场的高峰小时容量分别为 72 架

次/h和60架次/h。通过采集2025年4月完整运行数据,得到两机场分时段容量余量分布:天府机场早高峰(08:00—10:00)平均余量12架次/h,晚高峰(18:00—20:00)平均余量8架次/h;双流机场相应时段余量分别为9架次/h和6架次/h。机场效率指标采用DEA方法计算,输入变量包含跑道使用率、机位周转率和旅客吞吐效率,输出变量为航班正点率和资源利用率。

外地机场设为北京首都/大兴机场、上海浦东/虹桥机场、广州白云机场三大枢纽群,各机场运行参数均采用民航局官方公布的2024年夏秋航季数据,所有机场均可运营大小机型。

3.2 模型求解

研究双机场系统航班优化配置,需要根据旅客成本、航空公司运营成本以及机场效率综合确定系统内各机场的航线及航班频率,模型解空间涵盖以下核心参数:航班基本信息f、运行时段划分r、起降机场o(区分本地i与外地机场j)、旅客构成分析k(区分公务旅客与非公务旅客)以及旅客量m。如图1所示。

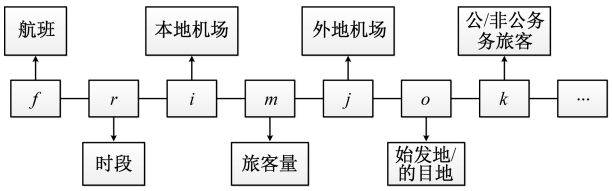


图1 解的表示方法

3.3 算法设计

针对双机场系统航班优化问题的NP-hard特性,设计一种改进的变邻域下降搜索算法(variable neighborhood descent,VND)。如图2所示,该算法采用多邻域协同搜索机制,通过动态切换不同的邻域结构来增强全局探索能力,从而有效避免陷入局部最优解。

采用基于优先级的贪婪算法生成初始解,首先构建航班优先级评价体系,综合考虑旅客运输量、收益能力和准点表现三个维度,计算每个航班的综合优先度:$\rho_f=0.4\frac{N_f}{N_{\max}}+0.4\frac{R_f}{R_{\max}}+0.2\frac{1}{D_f+1}$。然后按优先级降序排列航班序列,依次将每个航班分配至目标函数值最优的机场-时段组合,目标函数定义为:0.7×负载率+0.3×(1−拥堵指数)。当出现容量冲突时,启动基于线性规划松弛的应急分配机制,通过临时调整部分航班时段来保证解的可行性。测试结果表明,该策略生成的初始解质量较随机初始化提升12.2%。

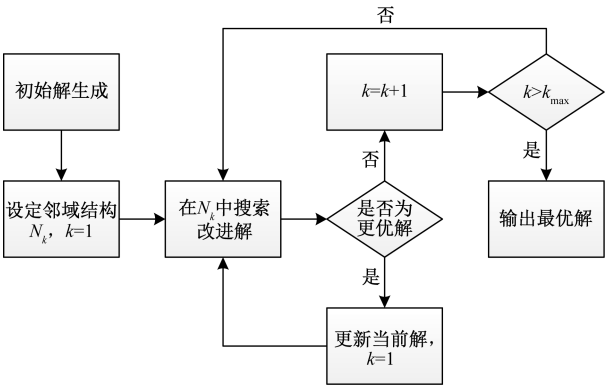


图2 算法流程

3.4 扰动过程

为有效避免算法陷入局部最优解,设计了3类具有差异化的扰动算子,通过不同维度的解空间探索实现搜索能力的动态平衡。

$H_1(x)$(航班重调度):随机选取15%的出发航班,对每个选中航班执行以下操作:将其原始出发机场和起飞时段更换为系统中其他符合条件的机场和时段。新机场和时段的选取需满足目标机场在该时段的剩余容量要求,确保解的有效性。这种扰动方式通过改变航班的时空分布特征,实现解空间的广域探索。

$H_2(x)$(出发航班交换):针对飞往同一外地机场的出发航班集合,随机选择10%的航班对(要求总选择数为偶数),将这些航班对的出发机场和起飞时段进行互换。交换过程中严格监控各机场的容量限制,若交换后超出容量约束,则重新选择航班对。该算子通过保持航班流向不变的前提下调整资源分配模式,实现中观层面的结构优化。

$H_3(x)$(到达航班交换):从具有相同出发机场的到达航班中,随机选取12%的航班组成偶数个交换对,将这些航班对的目的地机场进行互换。执行过程中需确保航班衔接合理性,避免出现旅客中转时间不足等情况。此类扰动主要优化机场间的运力协调关系,提升系统整体协同性。

所有扰动操作均设有约束检查机制,确保解的有效性。三种扰动分别从时空维度、流量分布维度和网络协调维度实现解空间的多样化探索。

3.5 局部搜索

针对航班配置问题的特性,基于变邻域下降算法设计了9种具有针对性的邻域结构,通过多层次、

多角度的局部搜索策略实现解的精细化改进。

$N_1(x)$(机场交换)：随机选取两个出发(或到达)航班，互相交换它们的出发(或到达)机场。该操作保持航班时刻不变，重点优化机场间的运力分配平衡。

$N_2(x)$(时刻交换)：对随机选取的两个出发航班实施起飞时段互换操作，该过程严格遵循机场时段容量限制，主要优化航班时刻分布特征。

$N_3(x)$(出发旅客交换)：在目标机场相同的始发航班组中，随机选择两个航班实施部分旅客交换，通过重构旅客-航班对应关系提升整体客座率水平。

$N_4(x)$(到达旅客交换)：针对始发地相同的到达航班组，实施旅客交叉分配策略，重点优化到达航班的旅客分布均衡度。

$N_5(x)$(旅客重分配)：随机移除某航班的若干旅客，再将这些旅客逐个重新分配到使系统总成本增加最小的其他航班。该操作实现旅客资源的渐进式优化配置。

$N_6(x)$(航班出发调整)：随机选择一个出发航班，系统评估所有可能的机场-时段组合，将其调整至能使目标函数改善最大的配置方案。

$N_7(x)$(航班到达调整)：随机选取一个到达航班，通过枚举所有可行到达机场，选择使系统收益提升最大的机场作为新的到达点。

$N_8(x)$(航班削减)：在保障运输需求的前提下，按随机原则取消特定始发航班，并将其旅客合理分流至同方向其他航班，有效解决运力过剩问题。

$N_9(x)$(航班新增)：当检测到某方向运力紧张时，在满足最小载客量要求下新增一个航班，从现有航班中调配部分旅客至新航班，优化整体运输效率。

4　结果分析

采用变邻域搜索算法进行模型求解，设定最大迭代次数阈值为 20 次。经过计算实验，优化方案的对比结果如图 3～图 6 所示。

4.1　旅客成本

通过对优化前后解的对比分析发现，算法改进后的航班配置方案在旅客成本控制方面表现出显著优势。改进前方案中旅客平均出行成本为 883 元/人次，而优化后方案将该指标降低至 810 元/人次，降幅达到 8.2%。

深入分析各成本组分的变化规律发现，改进方

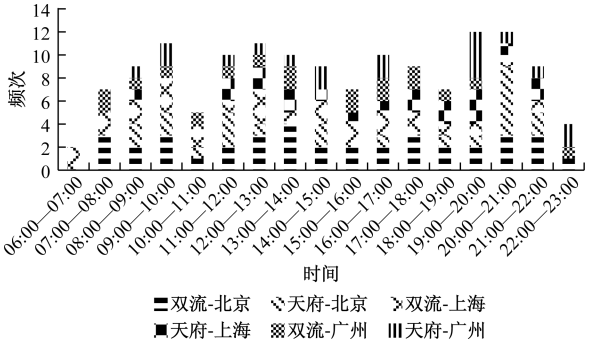


图 3　双机场系统出港航班频率现状

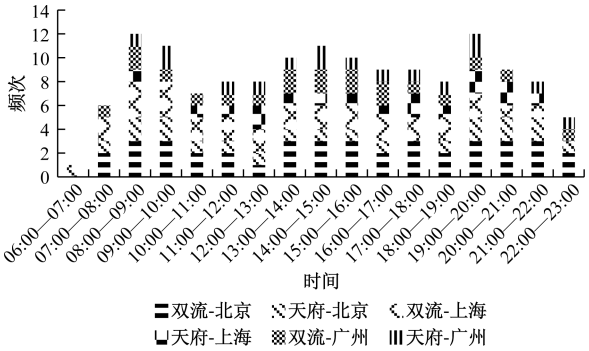


图 4　改进后双机场系统出港航班频率

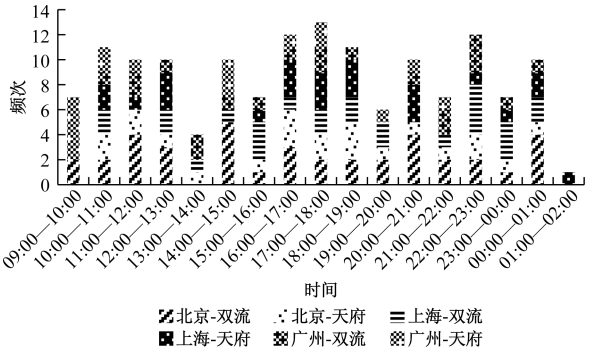


图 5　双机场系统进港航班频率现状

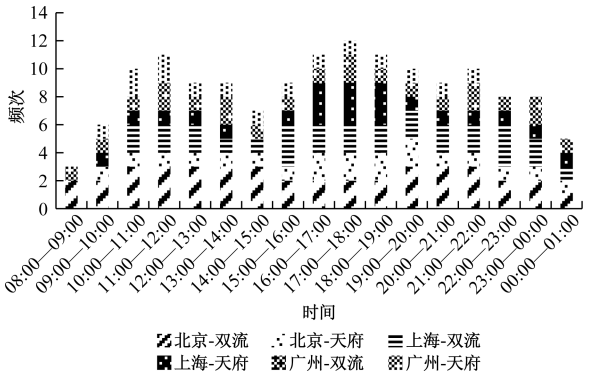


图 6　改进后双机场系统进港航班频率

案对不同类型旅客的成本优化呈现差异化特征。商务旅客的总成本下降幅度(12.1%)明显高于休闲旅客(7.3%),这种差异化的优化策略使系统在整体成本降低的同时,保持了各类旅客满意度的均衡提升。

4.2 航司收益

优化后的航班配置方案对航空公司收益提升产生了显著促进作用。实证数据显示,改进后方案使航空公司较原始方案提升 12.7%。这种收益增长呈现明显的结构性特征:通过提升高价值航线频次,高端舱位(商务/头等舱)收入增长 18.3%;辅营收入因客流量上升增加实现 14.5%的增长。

4.3 机场效率

优化方案的实施对双机场系统运行效率产生了系统性提升。数据显示,改进后方案使两场综合运行效率指数从 0.72 提升至 0.79,增长幅度为 9.7%,表明算法有效促进了机场间的资源互补与协同运作。从时间维度观察,效率优化呈现明显的时段分化特征。早高峰(08:00—09:00)效率指数提升最为显著(11%),这主要通过将部分航班调整至相邻低谷时段(09:00—10:00),使两场资源使用均衡度提升。

5 结论

(1)通过系统梳理双机场系统、双机场协同发展以及航班优化配置相关研究,分析发现相关领域存在不足。

(2)在建立了融合旅客成本、航空公司收益与机场效率的多目标优化模型,设计了三阶段自适应变邻域搜索算法(包含 3 类扰动算子和 9 种邻域结构)后,算例验证表明算法较传统方法求解速度提升较大。

(3)将理论模型应用于成都双机场案例,实证结果显示,方案实施后旅客总成本降低 8.2%,航空公司日均利润增长 12.7%,两场协同效率提升 9.7%。

本文围绕同城双机场系统航班协同规划问题展开深入研究,通过构建多目标优化模型与改进变邻域搜索算法,实现了旅客需求响应与机场资源优化的协同统一。可为其他双机场系统(如北京、上海)的资源优化提供方法论借鉴。后续将进一步分析双机场系统与双机场系统之间航班优化配置问题,提高模型在复杂场景的适用性。

参考文献

[1] RICHARD N. Management of multi-airport systems[J]. Journal of Air Transport Management Volume, 1995(2): 99-110.

[2] VINCENZOF, PASQUALE M, RAFFAELE S. Airport ownership and financial performance: evidence from Italy [J]. Journal of Air Transport Management, 2014, 40: 163-168.

[3] 杨学兵. 论我国综合机场体系下的北京“双枢纽”建设[J]. 民用管理, 2017(8): 42-45.

[4] 王明杰, 黄晓庆, 邓睿. 双机场对成都城市经济发展的影响研究[J]. 经济研究导刊, 2020(13): 113-118.

[5] 朱佳, 时晓盼, 韩敏. 多机场区域内机场与航司战略合作模式研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(4): 47-52.

[6] 骆嘉琪, 匡海波, 冯涛等. 基于两阶段博弈模型的高铁民航竞合关系研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(1): 150-164.

[7] YUSUKE T, YU M. Price competition of airports and its effect on the airline network[J]. Economics of Transportation, 2014, 3: 45-57.

[8] 周蔷, 王忠群, 龚本刚. 基于航线网络的定价、超售与舱位控制策略研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(1): 126-134.

[9] CHIN P, HUA A L. Coopetition effects among global airline alliances for selected Asian airports[J]. Journal of Air Transport Management, 2022, 101: 102193.

[10] 陈欣, 张珍, 邱瑞等. 基于动态博弈的补贴模式对机场群航线网络结构的影响研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2022, 59(5): 201-207.

[11] 张珍. 基于博弈论的机场群管理模式和航线网络选择策略研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2024.

[12] NOBUAKIM, RISAKO M. Designing the commercial sustainability of unprofitable regional airports using system dynamics analysis[J]. Research in Transportation Business & Management, 2011, 1: 80-90.

[13] 陈海鹏, 王超峰. 基于系统动力学的上海双机场协同发展研究[J]. 科技和产业, 2025, 25(3): 176-182.

[14] 史彦飞. 基于旅客选择行为的航班计划优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[15] 向征, 张义朋, 张文军, 等. 基于管制移交的多机场终端区离港航班时刻优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9628-9633.

[16] 吴刚, 夏洪山, 高强. 机场群运行方式下的航班时刻与频率优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 79-86.

[17] 张兆宁, 刘泽铧. 考虑机场、航空公司与空管需求的机场群离场航班时刻优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(9): 3896-3903.

Optimization of Flight Scheduling in Chengdu's Dual-hub Airport System

LI Jiayi, CHENG Xiaokang

(Airport Academy of Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618300, China)

Abstract: Addressing the flight resource allocation optimization problem in Chengdu's dual-hub airport system, a multi-objective programming model integrating passenger costs, airline revenues and airport efficiency was constructed. Utilizing data from 1 032 passenger questionnaires, an improved variable neighborhood search algorithm was developed, incorporating three types of perturbation operators and nine neighborhood structures. Empirical results demonstrate that the optimized solution reduces average passenger travel costs by 8.2%, increases airline revenues by 12.7%, and enhances dual-airport coordination efficiency by 9.7%. The research outcomes provide decision-making support for differentiated operations in dual-airport systems, validating the model's effectiveness in balancing multi-stakeholder interests and improving system performance. Future research could extend this approach to cross-city airport cluster coordination optimization.

Keywords: aviation transportation; flight schedule optimization; flight slots; coordinated development of airport clusters