文章编号:1673-0291(2026)03-0001-12 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250189

考虑旅客选择行为的航班供需适配优化研究

李艳华[1],赵柯焱[1],周志青[2],阳 杰[1],张世悦[1]
(1.北京交通大学 交通运输学院,北京 100044;2.中国航空器材集团有限公司,北京 101312)

摘 要:针对缓解航班供给与旅客需求的错配问题,提出了一种考虑旅客选择行为的航班供需适配优化模型.基于519份有效选择实验数据,采用多项Logit(Multinomial Logit, MNL)模型刻画了商务旅客与休闲旅客在时刻选择、票价、机型和飞行时长等因素中的异质性偏好,并将这些偏好转化为时隙层面的差异化航班需求,以精确反映市场对航班供给的行为响应.首先,结合航班时刻、机型配置、飞机维修等多重约束,构建一个双目标优化模型,旨在优化航班时刻分配与机型配置,减少市场需求满足偏差与运营成本.其次,为求解该模型,采用贪婪-遗传混合算法,结合遗传算法的全局搜索能力与贪婪策略的局部修复和优化能力,确保优化过程的高效性与解的质量.最后,以A航空公司某周航班计划的实例进行分析.研究结果表明:优化方案能够显著改善航班供需匹配,减少34.3%的市场需求满足偏差,并降低12.1%的运营成本;优化后的航班资源利用率提高,特别是在高需求时段,航班计划对旅客需求的承接能力得到明显改善;优化模型充分考虑了航班时刻、机型与旅客需求之间的关系,确保了航班计划的经济性和可操作性.结合旅客选择行为的航班供需适配优化模型在提升航班资源的使用效率和市场响应能力方面具有重要应用价值.

关键词:航空运输;航班供需适配;旅客选择行为;多项Logit模型;一体化航班计划
中图分类号:U852.1 **文献标志码**:A

Study of flight supply-demand alignment optimization considering passenger choice behavior

LI Yanhua[1], *ZHAO Keyan*[1], *ZHOU Zhiqing*[2], *YANG Jie*[1], *ZHANG Shiyue*[1]
(1.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2.China Aviation Supplies Holding Company, Beijing 101312, China)

Abstract: To alleviate the mismatch between flight supply and passenger demand, this paper proposes an optimization model for flight supply-demand alignment that incorporates passenger choice behavior. Based on 519 valid choice experiment observations, a Multinomial Logit (MNL) model is employed to characterize the heterogeneous preferences of business and leisure passengers regarding departure time, ticket price, aircraft type, and flight durations. These preferences are translated into differentiated flight demands at the time-slot level to accurately reflect the market's behavioral responses to flight supply. First, considering multiple constraints such as flight schedule, aircraft assignment, and aircraft maintenance, a bi-objective optimization model is constructed. This model aims to optimize

收稿日期:2025-12-23;**修回日期**:2026-03-12
基金项目:国家自然科学基金(U2333206)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2333206)
第一作者:李艳华(1969—),女,河南汝南人,教授,博士,博士生导师.研究方向为航空经济、航空运输规划管理.**email**:yh.li@bjtu.edu.cn.
通信作者:赵柯焱(1998—),男,河南平顶山人,博士生.**email**:keyanzhao@bjtu.edu.cn.

引用格式:李艳华,赵柯焱,周志青,等.考虑旅客选择行为的航班供需适配优化研究[J].北京交通大学学报,2026,50(3):1-12.
LI Yanhua, ZHAO Keyan, ZHOU Zhiqing, et al.Study of flight supply-demand alignment optimization considering passenger choice behavior[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(3): 1-12.(in Chinese)

flight schedule allocations and aircraft assignments to minimize both the deviation in market demand fulfillment and operational costs. Second, a hybrid Greedy-Genetic Algorithm (GGA) is adopted to solve the model. By combining the global search capability of a Genetic Algorithm (GA) with the local repair and optimization abilities of a greedy strategy, this approach ensures optimization efficiency and high solution quality. Finally, a case study based on a one-week flight schedule from Airline A is conducted. The results indicate that the optimization scheme significantly improves the match between flight supply and demand, reducing the deviation in market demand fulfillment by 34.3% and lowering operational costs by 12.1%. Furthermore, flight resource utilization is enhanced, and the flight plan's capacity to accommodate passenger demand is notably improved, particularly during high-demand periods. By comprehensively accounting for the relationships among flight schedules, aircraft types, and passenger demand, the optimization model ensures both the economic viability and operational feasibility of the flight plan. Overall, the proposed optimization model, which integrates passenger choice behavior, holds substantial application value for enhancing the utilization efficiency of flight resources and market responsiveness.

Keywords: air transportation; flight supply-demand alignment; passenger choice behavior; Multinomial Logit (MNL) model; integrated flight planning

在以市场为导向的航空运输体系中,航班计划的核心目标是实现运力供给与旅客需求之间的有效适配.航班计划覆盖航线网络、时隙分配、机型指派和飞机排班等关键环节,其结果直接决定航空公司运力供给的时空配置与服务水平[1].然而,航空需求具有显著的波动性与异质性,不同旅客在出发时刻、价格、旅行时间、服务可靠性等方面呈现差异化偏好,若在计划阶段忽视需求侧的行为反应,往往导致供给刚性与需求波动的错配,造成航班利用率低、运营成本高、旅客体验差等现象.

如何将旅客出行选择行为与航空公司运力供给决策深度融合,成为航班计划优化研究中的关键挑战之一.在需求侧方面,文献[2-4]构建了从交通方式选择、机场群竞争到航班运行决策的多层次分析框架,揭示了多方式交通竞争与机场空间布局对旅客出行的系统性影响.在航班选择层面,文献[5-6]进一步将连续时间偏好纳入多项Logit(Multinomial Logit, MNL)模型,采用周期函数刻画旅客对出发时刻的偏好.文献[7-8]对票价、服务水平与航班正点率等多属性对选择行为的影响进行了验证.在供给侧方面,航班计划优化主要围绕时刻分配、机型指派与飞机排班展开.在时刻优化方面,文献[9-10]分别从机场和航空公司视角,围绕效率、公平性与拥堵缓解等目标开展建模分析.文献[11]侧重于收益最大化与运营鲁棒性.文献[12-13]明确纳入了飞机定检维修的时空约束.文献[14]针对异常运营条件下的恢复调度与维修资源重分配进行了研究.在此基础上,文献[15]开展了从"时刻-机型"局部整合到"时刻-机型-排班"全链路一体化的研究.在求解方法方面,文献[16-18]对列生成及元启发式算法进行了应用,验证了遗传算法在解决大规模复杂优化问题上的适应性.

尽管已有研究尝试将旅客时刻选择偏好引入航班时刻优化或需求响应分析中,但大多仍聚焦于单一环节,少有进一步将旅客行为响应与机型指派、飞机排班及维修约束纳入统一优化框架.这种局部优化难以从航班计划全链路角度反映市场需求的时空动态变化,也限制了优化结果在实际运行层面的可实施性.

针对以上研究不足,本文提出一种将旅客出行选择行为与航班时刻、机型指派及飞机排班决策联合考虑的航班供需适配优化框架.通过量化旅客对出发时刻的连续偏好,并将其嵌入航班时刻、机型指派和飞机排班的联合优化中,旨在提升航班计划对市场需求的适配能力,降低航空公司运营成本.针对航班计划优化中多目标、强约束的特征,设计了基于贪婪修复与启发式搜索相结合的贪婪-遗传混合算法,以实现高效的全局搜索与局部优化.通过实例验证模型在改善供需适配水平、降低运营成本方面的有效性,为航空公司航班计划编制提供理论视角和决策支持.

1 旅客航班选择行为调查与分析

本文采用选择实验法(Stated Preference, SP)构建了接近真实购票场景的多维情境,以刻画旅客在票价、起飞时刻、飞行时长和机型等因素综合作用

下的航班选择行为.在实验设计方面,采用均匀设计法生成各航线的平行航班组合,既保证了属性水平在其可行区间内的均匀分布,又能控制问卷长度和实验成本.随后,基于随机效用理论构建选择行为分析模型,研究旅客每日出行时刻的选择偏好.

1.1　选择实验设计与数据收集

实验设计遵循属性可见、情境可辨、组合均匀的原则,确保选择集的多样性与科学性,选取了票价、起飞时刻、飞行时长和机型4个关键属性,且所有属性水平均基于实际航班信息确定.其中,起飞时刻从真实航班时刻表中均匀抽取;飞行时长以航线的平均时长为基础,按5 min步长插值;机型按中型和大型区分,以体现舒适性差异;票价则依据不同时段的市场价格带进行设定.为控制实验规模并降低不同属性间的相关性,采用均匀设计法生成各航线的平行航班集合.每组选择集包含8个备选航班,受访者在给定出行目的(商务或休闲)下选择最优航班,最终问卷调查结果见表1.

表1　问卷调查结果汇总

Tab.1　Summary of questionnaire results

航线	航班	起飞时刻	飞行时长/min	机型	票价/元	商务选择人数	休闲选择人数
1	1	6:30	205	中	980	56	100
	2	9:00	215	中	1 230	183	49
	3	10:55	225	大	1 360	142	47
	4	13:00	235	大	1 160	44	142
	5	14:30	200	中	1 450	64	17
	6	16:00	210	中	1 290	8	59
	7	19:00	220	大	1 410	9	3
	8	21:00	230	大	910	13	102
2	1	7:30	135	大	720	71	125
	2	9:30	145	大	810	98	164
	3	10:55	155	中	970	147	108
	4	12:30	165	中	1 180	101	12
	5	13:30	130	大	1 030	51	29
	6	16:30	140	大	1 090	34	32
	7	18:30	150	中	1 010	12	10
	8	20:30	160	中	890	5	39
3	1	9:05	85	大	1 170	64	49
	2	9:50	95	大	980	113	223
	3	11:30	105	中	1 260	139	34
	4	14:30	115	中	1 380	108	19
	5	16:00	80	大	1 060	47	66
	6	18:20	90	大	1 470	29	6
	7	20:05	100	中	930	5	71
	8	22:40	110	中	870	14	51

通过问卷星平台线上发放问卷,回收有效样本537份,剔除无效样本后剩余有效问卷519份,问卷回收有效率为96.65%.有效样本中,年龄结构以22~56岁人群为主,男女比例约为6:7;62.43%的受访者年均乘机次数≥2次,8.29%的受访者年均乘机次数≥8次,具有较丰富的航空出行经验.根据同一受访者在商务与休闲情境下的选择行为分析,商务旅客更倾向于选择工作时段的航班,而休闲旅客则偏向于晚间或夜间航班,且对低票价航班的偏好更为明显.这些偏好差异为后续群体划分建模提供了有力的实证依据.

1.2　选择偏好模型构建

在建立旅客航班选择模型之前,需要对问卷调查中获得的原始变量进行统一编码.飞行时长 ft_i 转换为对应的总分钟数;起飞时刻 t_i 以距当天0:00的分钟数表示,例如06:30记为390 min;机型 K_i 采用虚拟变量编码,中型机记为1,大型机记为0,以反映相对舒适性差异;票价 PR_i 取原始票面价格,并在估计阶段进行尺度缩放以改善数值稳定性;选择结果 y_{pi} 为0-1变量,若旅客类型 p 在给定情境下选择了航班 i,则 $y_{pi}=1$,否则 $y_{pi}=0$.在此基础上,构建效用函数和MNL模型,对旅客的航班选择行为进行定量刻画.

不同航班对旅客具有不同程度的吸引力，这种吸引力可通过效用函数进行量化．离散选择模型通过合理构建旅客的效用函数，推导出每个航班的选择概率及客运分担率．旅客类型p选择航班i的总效用U_{pi}为

$$U_{pi}=\beta_{p1}\mathrm{ft}_i+\beta_{p2}K_i+\beta_{p3}\mathrm{PR}_i+V_{pi}^{T}(t_i)+\varepsilon_{pi} \quad (1)$$

式中：U_{pi}表示旅客类型p选择航班i的总效用；$V_{pi}^{T}(t_i)$表示旅客p对于航班i的出发时刻的效用；β_{p1}、β_{p2}和β_{p3}为待估参数；ε_{pi}是随机误差项．

采用正弦-余弦基函数捕捉时刻对旅客选择偏好的影响，$V_{pi}^{T}(t_i)$为

$$V_{pi}^{T}(t_i)=\beta_{p4}\sin\left(\frac{2\pi t_i}{1\,440}\right)+\beta_{p5}\sin\left(\frac{4\pi t_i}{1\,440}\right)+\beta_{p6}\cos\left(\frac{2\pi t_i}{1\,440}\right)+\beta_{p7}\cos\left(\frac{4\pi t_i}{1\,440}\right) \quad (2)$$

式中：β_{p4}～β_{p7}表示旅客航班选择偏好曲线的待估参数．

在航班选择模型中，旅客选择某一特定航班的概率取决于该航班的效用与同一出行场景所有可选择航班效用的相对大小．假设随机误差项ε_{pi}服从Gumbel分布，则旅客p选择航班i的概率P_{pi}为

$$P_{pi}=\frac{\mathrm{e}^{V_{pi}}}{\sum_i \mathrm{e}^{V_{pi}}} \quad (3)$$

$$V_{pi}=\beta_{p1}\mathrm{ft}_i+\beta_{p2}K_i+\beta_{p3}\mathrm{PR}_i+V_{pi}^{T}(t_i) \quad (4)$$

采用极大似然估计法对模型进行参数估计，被解释变量为旅客类型p样本在不同航线出行下对平行航班i的选择结果，根据模型设定，构建似然函数为

$$\ln L(\beta)=\sum_p\sum_i y_{pi}\ln P_{pi} \quad (5)$$

1.3　参数估计与结果分析

采用极大似然法分别对商务和休闲旅客样本估计MNL模型，结果见表2．

表2　MNL模型参数估计值

Tab.2　Estimates of MNL model parameters

变量	参数	商务旅客MNL			休闲旅客MNL		
		估计值	标准误	P值	估计值	标准误	P值
ft_i	β_{p1}	−0.000 8**	0.003	0.015	−0.003 0***	0.001	0.013
K_i	β_{p2}	−0.328 0***	0.082	0.000	0.082 0***	0.040	0.040
PR_i	β_{p3}	0.000 2	0.000	0.280	−0.003 4***	0.000	0.000
$\sin\left(\frac{2\pi t_i}{1\,440}\right)$	β_{p4}	0.521 0***	0.139	0.000	0.201 0*	0.110	0.070
$\sin\left(\frac{4\pi t_i}{1\,440}\right)$	β_{p5}	−0.211 0*	0.112	0.060	−0.133 0	0.094	0.160
$\cos\left(\frac{2\pi t_i}{1\,440}\right)$	β_{p6}	−1.287 0***	0.220	0.000	−0.372 0**	0.130	0.010
$\cos\left(\frac{4\pi t_i}{1\,440}\right)$	β_{p7}	0.036 0	0.101	0.720	0.198 0**	0.078	0.010

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%显著性水平下显著．

由表2可知：①模型拟合效果良好，商务和休闲旅客群体的对数似然分别为−4 195.8与−4 332.1，McFadden ρ^2为0.112与0.089，满足SP调研数据的统计要求．②在显著性方面，商务旅客的票价系数不显著（P值为0.280），表明该群体对价格敏感度较低，更看重时间效率；休闲旅客的票价系数在1%水平下显著为负（−0.003 4），表明其对价格高度敏感．③机型系数在商务样本中显著为负，表明相较于中型机，商务旅客更偏好大型机以获得更好的舒适性．

根据参数估计结果绘制航班时刻偏好曲线，如图1所示．由图1可知：商务旅客在凌晨时段效用为负，早高峰时段快速上升并于10:00至11:00达到峰值，随后逐步回落并在22:00后再度转为负效用，符合该类型旅客对工作友好时段的强集中偏好与对晚间出行的适当回避；休闲旅客在1:00至4:00时段的效用值略低于0，其他大多数时段保持正效用，晚间时段的效用显著高于商务旅客；商务旅客的峰值更高、振幅更大，且在8:00至12:00的“黄金时段”更为集中；休闲旅客的曲线更平滑，并在晚间仍保持较长时段的正效用．

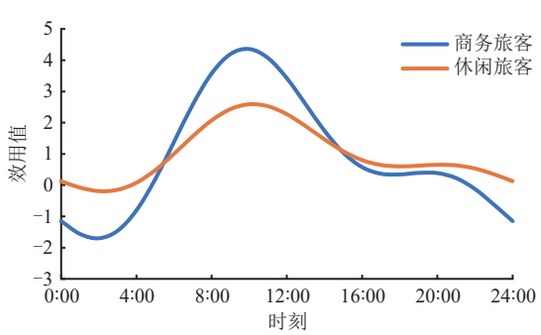


图1　航班时刻偏好曲线

Fig.1　Flight schedule preference curves

2　航班计划一体化模型构建

2.1　问题描述及模型假设

航班计划一体化编制问题主要围绕航空公司如何合理安排航班时刻、机型指派与飞机排班三大核心任务.研究重点是基于航空公司已有的飞机机队、航班时刻资源和航线市场需求,在考虑航班客流量、飞机维修要求及飞机排班等约束条件的前提下,构建多维度航班计划优化模型.航空公司在编制航班计划时,面临航线市场的旅客需求、机队资源利用、航班时刻分配等多种影响因素,通过综合考虑上述约束,以优化资源配置、降低航班运营成本并提升资源利用效率.

为便于后续建模,本文做出假设:航线网络、机队规模与上周期末状态已知并作为本周的期初条件;机场的跑道、停机位和地面服务能力能满足航班运行需求;飞机的性能参数与维修周期在研究期内固定不变;旅客的航班时刻选择偏好可通过效用值量化;各航线市场的旅客构成比例在计划周期内相对稳定,可由历史同季节、同星期的订票结构估计.

2.2　网络流模型建立

航班计划一体化问题可抽象为时空扩展的多商品网络流模型.以机场及其航班时刻状态构成时空节点,以航班执行、地面衔接和维修活动构成网络弧,以飞机资源作为在网络中流动的“商品”,从而描述飞机在计划周期内的动态调度过程.在此基础上,可进一步构建航班时刻、飞机排班和维修安排等约束,并形成一体化优化模型.

2.3　约束条件

通过综合考虑旅客需求匹配、航班时刻资源、飞机排班连续性与维修要求等多维度约束,需设置约束条件以保证模型的可行性.

2.3.1　航班时刻约束

航班时刻约束主要涉及航班需求与运力平衡、航班时刻唯一性、时刻资源可用性、航班频率及机场等级匹配等要求.

约束 1:旅客需求与座位容量约束.单个航班的旅客需求应满足该航班所分配机型的座位容量,其表达式为

$$\mathrm{Att}_{ip}=A_{ip}/A_{mp}^{0} \tag{6}$$

$$\mathrm{Dem}_{mpw}=\rho_p\mathrm{Dem}_{mw} \tag{7}$$

$$q_{ip}=\mathrm{Att}_{ip}\mathrm{Dem}_{mpw} \tag{8}$$

$$\sum_p q_{ip}\leqslant\sum_k \mathrm{Cap}_k x_{iwtk} \tag{9}$$

式中:Att_{ip}表示航班i对旅客类型p的相对吸引力;A_{ip}表示航班i对于旅客类型p的吸引力,由MNL模型中的效用函数得出,即$A_{ip}=e^{u_{ip}}$;A_{mp}^{0}表示航线市场m上其他航班对于旅客类型p的总吸引力;Dem_{mpw}表示航线市场m在星期w时旅客类型p的需求数量;ρ_p为各航线市场同历史周期的旅客构成比例;Dem_{mw}表示航线市场m在星期w时旅客需求数量;q_{ip}为航班i中旅客类型p的客流量;Cap_k表示飞机k的可用座位数.

约束 2:航班时刻唯一性与可用性约束.每个航班在一个研究周期内只能被安排一个起飞时刻,且该时刻必须位于航空公司在相应机场的时刻资源窗口内,其表达式为

$$\sum_t x_{iwtk}=X_i^w \tag{10}$$

$$\sum_t x_{iwtk}\mathrm{DAuth}_{\mathrm{ap}_i}^{wt}=X_i^w \tag{11}$$

$$\sum_t x_{iwtk}\mathrm{AAuth}_{\mathrm{ap}_i}^{wt+\mathrm{ft}_i}=X_i^w \tag{12}$$

式中:X_i^w表示航班i在星期w是否执行;x_{iwtk}表示航班i是否在星期w的时间片t由飞机k执行;$\mathrm{DAuth}_{\mathrm{ap}}^{wt}$和$\mathrm{AAuth}_{\mathrm{ap}}^{wt}$分别表示航空公司在机场ap是否拥有星期$w$时刻$t$起飞和降落的时刻资源.

约束 3:航班频率约束.确保每条航线在计划周期内的航班频率与航空公司既定的航线计划一致,其表达式为

$$\sum_t\sum_i\sum_k x_{iwtk}=\mathrm{Freq}_{mw} \tag{13}$$

式中:Freq_{mw}表示星期w航线市场m上的航班频率.

约束 4:机场等级匹配约束.保证航班的执飞机型与机场起降等级要求相匹配,其表达式为

$$\sum_k x_{iwtk}L_{\mathrm{dap}_i}^{k}=1 \tag{14}$$

$$\sum_k x_{iwtk}L_{\mathrm{aap}_i}^{k}=1 \tag{15}$$

式中:L_{ap}^{k}表示机场ap是否满足飞机k起降等级要求,是为1,否则为0;dap_i表示航班i的起飞机场;aap_i表示航班i的降落机场.

2.3.2　飞机排班约束

飞机排班约束用于确保每个已执行航班均能由唯一飞机承接,且相邻航班在时间与空间上可连续衔接.

约束 1:飞机指派约束.每个航班必须由唯一的一架飞机执飞,其表达式为

$$\sum_k\sum_j \mathrm{xx}_{ijk}+\sum_k\sum_{\mathrm{ma}}\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}=1 \tag{16}$$

式中:xx_{ijk}表示飞机k在航班i执飞后是否接续航班j;$\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}$表示飞机$k$是否在航班$i$后前往维修基地ma.

约束 2：飞机初始位置约束．保证飞机在计划周期开始时必须从其初始驻留机场起飞，其表达式为

$$\sum_{i}\sum_{\mathrm{ap}}\mathrm{xx}_{Oik}s_{O\mathrm{ap}}\mathrm{op}_{k\mathrm{ap}}+\sum_{\mathrm{ma}}\sum_{\mathrm{ap}}\mathrm{xy}_{O\mathrm{ma}k}s_{O\mathrm{ap}}\mathrm{op}_{k\mathrm{ap}}\geqslant 1 \quad (17)$$

式中：$\mathrm{op}_{k\mathrm{ap}}$表示计划周期开始时飞机$k$是否初始驻留在机场 ap；$s_{O\mathrm{ap}}$表示初始航班的起飞机场$O$是否为 ap.

约束 3：航班串时间与空间衔接约束．相邻航班需满足时间间隔和空间位置的衔接，其表达式为

$$\mathrm{dt}_i^w+\mathrm{ft}_i+\mathrm{trt}_k-\mathrm{dt}_j\leqslant N(1-\mathrm{xx}_{ijk}) \quad (18)$$

$$\sum_{k}\mathrm{xx}_{ijk}\leqslant\sum_{\mathrm{ap}}d_{i\mathrm{ap}}s_{j\mathrm{ap}} \quad (19)$$

式中：dt_i^w表示航班i在星期w的起飞时刻；trt_k表示飞机k的地面准备时间；N表示一个无穷大的参数，表示足够大的时间差；$d_{i\mathrm{ap}}$表示航班i的降落机场是否为 ap.

约束 4：飞机使用限制约束．为确保飞机安全运行，限制周期内每架飞机的总执飞航班次数与执飞时间不超过飞机的最大起降次数与最大飞行时长，其表达式为

$$\sum_{i}\sum_{j}\mathrm{xx}_{ijk}\leqslant c_{\max k} \quad (20)$$

$$\sum_{i}\sum_{j}\mathrm{ft}_j\mathrm{xx}_{ijk}+\mathrm{fd}_k\leqslant t_{\max k} \quad (21)$$

式中：$c_{\max k}$和$t_{\max k}$分别表示研究周期内飞机k的最大起飞次数和最大累计飞行时长；fd_k表示计划周期开始时飞机k的累计飞行时长．

2.3.3 飞机维修约束

飞机维修约束确保飞机维修活动与航班执行之间具有时空连贯性，并满足维修基地与维修时间窗要求．

约束 1：维修衔接逻辑约束．确保飞机在维修任务与航班任务之间的时空连贯性，其表达式为

$$\sum_{j}\mathrm{xx}_{ijk}+\sum_{\mathrm{ma}}\mathrm{xz}_{i\mathrm{ma}k}=\sum_{j}\mathrm{xx}_{ijk}+\sum_{\mathrm{ma}}\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k} \quad (22)$$

$$\sum_{i}\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}=\sum_{i}\mathrm{xz}_{i\mathrm{ma}k} \quad (23)$$

$$\sum_{\mathrm{ma}}\mathrm{xz}_{i\mathrm{ma}k}\leqslant\sum_{j}\sum_{\mathrm{ma}}\mathrm{xy}_{j\mathrm{ma}k} \quad (24)$$

式中：$\mathrm{xz}_{i\mathrm{ma}k}$表示飞机$k$是否从维修基地 ma 出发执行航班$i$.

约束 2：维修时间与基地约束．飞机必须在维修基地工作时间内进行维修．飞机在维修基地进行维修时，其前一个执飞航班的目的地应为维修基地所在机场，且执飞的下一航班出发机场应为维修基地所在机场，其表达式为

$$\mathrm{dt}_i^w+\mathrm{ft}_i+\mathrm{mt}_k-\mathrm{et}_{\mathrm{ma}}\leqslant N(1-\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}) \quad (25)$$

$$\sum_{k}\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}\leqslant\sum_{\mathrm{ap}}d_{i\mathrm{ap}}\mathrm{ml}_{\mathrm{ma}} \quad (26)$$

$$\sum_{k}\mathrm{xz}_{i\mathrm{ma}k}\leqslant\sum_{\mathrm{ap}}s_{i\mathrm{ap}}\mathrm{ml}_{\mathrm{ma}} \quad (27)$$

式中：mt_k表示飞机k的维修时间；$\mathrm{et}_{\mathrm{ma}}$表示维修基地 ma 的关闭时间；$\mathrm{ml}_{\mathrm{ma}}$表示维修基地 ma 是否位于机场 ap.

约束 3：维修频率约束．保证每架飞机在计划周期内至少进行一次维修，其表达式为

$$\sum_{i}\sum_{\mathrm{ma}}\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}\geqslant 1 \quad (28)$$

2.3.4 决策变量约束

所有决策变量均为 0-1 变量，即$\mathrm{xx}_{ijk}\in\{0,1\}$，$\mathrm{xy}_{i\mathrm{ma}k}\in\{0,1\}$，$\mathrm{xz}_{i\mathrm{ma}k}\in\{0,1\}$，$x_{iwtk}\in\{0,1\}$.

2.4 目标函数

2.4.1 市场需求函数

该目标函数刻画旅客选择行为影响下，航班计划承接客量与潜在需求的偏差．最小化该目标能提升航班计划的适配能力，其表达式为

$$\mathrm{Min}Z_1=\left|\sum_{m}\sum_{i}\sum_{w}\sum_{t}\sum_{p}\sum_{k}q_{ip}x_{iwtk}-\sum_{m}\sum_{p}\sum_{w}\mathrm{Dem}_{mpw}\right| \quad (29)$$

2.4.2 航班运营成本函数

根据文献[19-20]提出的航班运营成本估算函数，航线市场m由机型k执飞的单次成本Ope_{mk}为

$$\mathrm{Ope}_{mk}=(\gamma_1\mathrm{dis}_m+\gamma_2)(\mathrm{Cap}_k+\gamma_3)\gamma_4 \quad (30)$$

式中：dis_m表示航线市场m的航程距离；Cap_k表示机型k的座位数；γ_1、γ_2、γ_3和γ_4为财务与运行数据校准参数．

该目标函数衡量计划周期内所有航班的总运营成本，反映了航空公司在时刻资源和机队资源约束下尽可能降低运营支出的需求．计划周期内所有航班的总运营成本最小化目标为

$$\mathrm{Min}\,Z_2=\sum_{m}\sum_{w}\sum_{t}\sum_{k}\sum_{i}\mathrm{Ope}_{mk}x_{iwtk} \quad (31)$$

3 算法设计

3.1 贪婪-遗传混合算法原理

针对航班计划一体化模型多目标、强约束及解空间庞大的特征，提出了贪婪-遗传混合算法(Greedy-Genetic Algorithm, GGA)进行求解．若采用传统精确算法，易受问题规模和约束复杂度限制；单一启发式算法虽具有一定求解效率，但难以同时兼顾全局搜索能力与局部可行性修复能力．因此，本文在遗传算法框架基础上引入基于问题结构的贪婪修复与局部改良机制，以提升算法在复杂约束条件下的求

解质量与稳定性.

在算法设计思路上,遗传算法负责对解空间进行全局搜索,通过种群进化保持解集的多样性,并逐步逼近Pareto前沿;贪婪策略则利用航班计划问题本身的结构特征,对进化过程中产生的不可行个体或质量较差个体进行快速修复和局部优化.相比模拟退火-遗传等混合元启发式算法,采用"贪婪修复+遗传搜索"的组合,主要是考虑到航班计划一体化问题中存在大量时刻资源冲突、容量不匹配和飞机串联断裂等结构性约束.贪婪修复能够根据冲突类型直接调整时刻、机型或航班串衔接关系,更有利于快速恢复解的可行性;相比之下,模拟退火策略更依赖邻域扰动、温度控制和接受准则,在本问题中通常需要频繁进行可行性检验,计算开销相对较高.

在编码方式上,将一份完整的航班计划表示为染色体向量$\boldsymbol{X}$,其中基因$x_{iwtk}\in\{0,1\}$表示航班i是否在星期w、时间片t由机型为k的飞机执行.任一$\boldsymbol{X}$对应一组具体的航班-机型-时刻-飞机指派方案.采用罚函数思想处理不可行解,将各类约束违反程度综合记为惩罚项$P(\boldsymbol{X})\geqslant 0$,个体的评价向量$F(\boldsymbol{X})$为

$$F(\boldsymbol{X})=\left(Z_1(\boldsymbol{X}),Z_2(\boldsymbol{X}),P(\boldsymbol{X})\right)\tag{32}$$

式中:$Z_1(\boldsymbol{X})$为市场需求满足偏差;$Z_2(\boldsymbol{X})$为运营成本;$P(\boldsymbol{X})$为惩罚项.

惩罚项$P(\boldsymbol{X})$随约束违反程度单调增加,可通过对供需不平衡、时刻资源超限、飞机串联断裂及维修时间窗冲突等情况分别计算惩罚值并加总得到.采用双目标优化框架,通过非支配排序维持Pareto前沿解集,并结合拥挤度机制保持多样性.在迭代过程中,遗传算子负责扩大搜索范围,贪婪修复算子则针对不可行解和局部劣解进行定向调整,推动解集演化.

3.2　贪婪-遗传混合算法流程

贪婪-遗传混合算法的执行流程图见图2.

贪婪-遗传混合算法共包括6个步骤.

步骤1:初始化阶段.基于贪婪策略构造一部分可行度较高的初始解,优先为高需求时段的航班分配适当座位容量和可用时刻;同时随机生成若干个体,合并形成初始种群$\mathrm{Pop}^{(0)}$.

步骤2:适应度评估与非支配排序.对每个$\boldsymbol{X}\in\mathrm{Pop}^{(g)}$计算目标函数与惩罚项,并据此进行非支配排序和拥挤度计算.

步骤3:遗传变异.采用锦标赛选择方式选取父代个体;通过航班串交叉算子对飞机执行序列进行拼接与交换;再通过时刻微调、机型替换或飞机串联

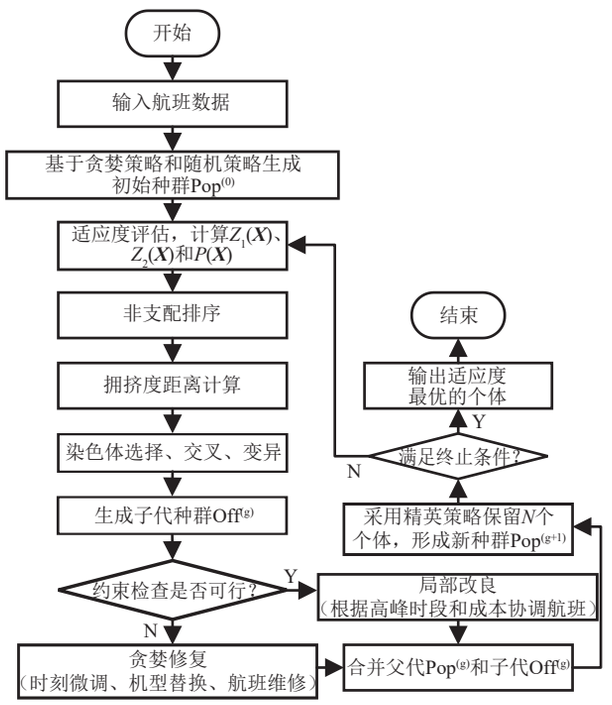


图2　贪婪-遗传混合算法流程图

Fig.2　Greedy-genetic hybrid algorithm flowchart

扰动等变异操作,生成子代种群$\mathrm{Off}^{(g)}$.

步骤4:贪婪修复与局部优化.对$\mathrm{Off}^{(g)}$中违反约束的个体应用贪婪修复算子.基于MNL模型得到的航班吸引力和单位成本构建综合评分函数,对调整操作进行排序并优先实施评分较高且不产生新冲突的方案.

步骤5:合并与更新.将父代种群$\mathrm{Pop}^{(g)}$与修复后的子代种群$\mathrm{Off}^{(g)}$合并,重新进行非支配排序选取前N个个体作为新一代种群$\mathrm{Pop}^{(g+1)}$.

步骤6:终止判定.若迭代代数达到预设上限或前沿改善幅度低于阈值,则算法收敛,输出非支配解集;否则返回步骤2继续迭代.

4　实例分析

4.1　数据及模型参数选取

本文以A航空公司2023年8月某周每日6:00至24:00的5 665个航班作为实例数据,数据来源于全球航班数据在线分析平台(Official Aviation Guide,OAG),以15 min作为一个时间片,每天划分为72个时间片,共计504个时间片.A航空公司运营的航线市场周需求信息和机队规模分别见表3和表4.

4.2　算法收敛及求解效果对比分析

为了评价算法的收敛性与分布性能,选取反世代距离(Inverted Generational Distance,IGD)作为评价指标.IGD是一个综合性能的评价工具,能够反

表 3 A 航空公司航线市场周需求信息(部分)

Tab.3 Weekly demand information of airline A's route markets (partial)

出发机场	到达机场	旅客需求量	航程距离/km	飞行时长/min	航班频率	日期
CAN	PVG	2 316	1 202	146	10	周一
CAN	TFU	3 180	1 165	146	17	周一
PKX	CAN	6 298	1 814	198	25	周一
CAN	TFU	3 305	1 165	150	17	周二
PKX	TFU	2 330	1 492	182	12	周二
TFU	PKX	2 284	1 492	156	12	周二
CAN	TFU	3 239	1 165	146	17	周三
PKX	TFU	2 090	1 492	182	11	周三
TFU	PKX	2 142	1 492	155	11	周三
CAN	TFU	3 313	1 165	150	17	周四
PKX	TFU	2 303	1 492	200	12	周四
TFU	PKX	2 303	1 492	156	12	周四
CAN	TFU	3 317	1 165	146	17	周五
PKX	TFU	2 158	1 492	182	11	周五
TFU	PKX	2 158	1 492	156	11	周五
CAN	TFU	3 266	1 165	150	17	周六
PKX	TFU	2 330	1 492	182	12	周六
TFU	PKX	2 330	1 492	156	12	周六
CAN	TFU	3 441	1 165	149	18	周日
PEK	CAN	5 166	1 880	200	18	周日

表 4 A 航空公司机队数据

Tab.4 Fleet data for airline A

机型	座位数	架数	维修机场	机型	座位数	架数	维修机场
B737	160	387	CTU	B777	311	28	CTU
A320	158	351	CTU	B787	293	14	CTU
A330	280	57	PEK	B747	350	10	PEK
A350	312	30	PEK	—	—	—	—

映真实Pareto前沿面上个体与算法所得解集之间的平均最小距离,其值越小表明算法性能越好.IGD的计算式为

$$\mathrm{IGD}=\frac{1}{|Q^*|}\sum_{y^*}\min d\left(y^*,x\right) \tag{33}$$

式中:Q^*表示真实Pareto最优前沿集合,Q表示算法获得的解集合;$d\left(y^*,x\right)$表示解y^*到集合Q中最近解x的距离.

在相同算法参数条件下,分别选取遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、贪婪算法(Greedy Algorithm, GR)、模拟退火-遗传算法(Simulated Annealing Genetic Algorithm, SA-GA)和贪婪-遗传混合算法对模型进行求解.为保证结果的稳定性,对各算法均独立运行100次并取平均值,不同算法的IGD收敛曲线和平均求解时间如图3所示.

由图3可知:①4种算法的IGD值均随迭代次数增加而逐步下降并最终趋于稳定,但在收敛速度、求解精度和计算时间方面存在明显差异.②相比GA和GR,两种混合算法均表现出更快的收敛速度和更高的求解质量,其中GGA约在第40次迭代后趋于稳定,明显早于GA、GR和SA-GA,其最终IGD值为0.224 40,表明GGA在逼近Pareto前沿和保持解集分布均匀性方面表现最好.③从平均求解时间看,GR、GGA、SA-GA和GA分别为170 s、242 s、318 s和463 s.虽然GR耗时最短,但其求解精度最差;GA耗时最长,且收敛质量仍不及两种混合算法;SA-GA在一定程度上改善了GA的求解效果,但计算时间仍明显长于GGA.综合来看,GGA在收敛速度、求解精度和计算时间之间取得了更优平衡,更适合求解模型中的航班计划一体化优化问题.

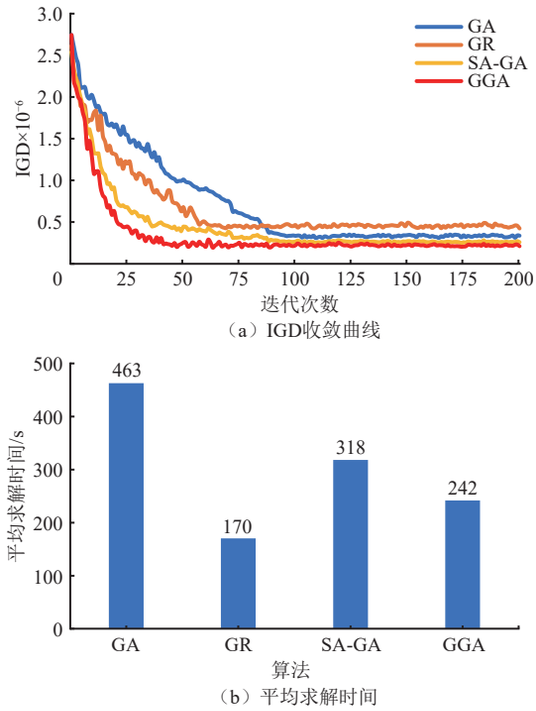


图 3 不同算法的IGD收敛曲线与平均求解时间

Fig.3 IGD convergence curves and average solution time for different algorithms

4.3 结果分析

选取GGA对A航空公司的运营航班进行优化求解,并选择最优解中的一个优化方案进行分析,优化前后各目标函数值如表5所示.

表 5 航班计划一体化模型优化结果

Tab.5 Optimization results for integrated flight planning model

优化目标	优化前	优化后	优化幅度/%
1:市场需求满足偏差/万人	4.32	2.84	34.3
2:航班运营总成本/亿元	7.25	6.37	12.1

优化后A航空公司的部分航班计划见表6,某日航班甘特图如图4所示.

由表5可知:通过对A航空公司航班计划进行

一体化编制,市场需求满足偏差从4.32万人降至2.84万人,优化幅度达到34.3%,显著提高了航班供给与旅客需求之间的匹配度;航班运营总成本由7.25亿元减至6.37亿元,降低了12.1%,说明优化后的航班计划能够有效降低整体运营成本.

由表6和图4可知:在航程较长的航班主要选择由较大型的飞机完成飞行任务,而短途航线则倾向于由中小型飞机如A320和B737承担,说明模型充分考虑了航程与飞机容量之间的匹配,以优化运营成本和效率;优化后的航班时间呈现出均衡分布的特征,体现了模型对飞机资源的高效利用,通过密集的航班安排提高了飞机的使用率,确保了航空公司资源的高效配置;在优化后的航班计划中,合理考虑了航程、飞机容量与成本的关系,通过高效的航班调度和飞机资源配置,实现了航班的高效运营与成本控制.

表6　优化后A航空公司航班计划(部分)

Tab.6　Optimized flight plan for airline A (partial)

飞机编号	航线	日期	起飞时间	航程/km	航班成本/万元
A330-10	TFU-PEK	周一	10:00	1 545	16.68
A320-1	CAN-TFU	周一	7:00	1 165	9.21
B737-1	CAN-PEK	周一	16:30	1 880	13.39
B747-4	CAN-PVG	周二	9:45	1 202	16.33
A330-10	CAN-PEK	周二	14:00	1 880	13.29
A350-2	TFU-CAN	周二	23:00	1 165	14.63
B787-1	PKX-TFU	周三	9:15	1 492	16.79
B787-4	CAN-TFU	周三	11:15	1 165	13.15
B737-25	PEK-CKG	周三	13:45	1 461	10.99
A320-80	CAN-CKG	周四	8:45	964	8.07
B787-1	TFU-PKX	周四	13:15	1 492	16.79
B737-27	TFU-PKX	周四	15:30	1 492	11.16
A320-34	CAN-CKG	周五	7:00	964	8.07
B737-25	TFU-SZX	周五	11:00	1 260	9.83
B747-2	KMG-PEK	周五	22:45	2 092	14.61
A330-11	TFU-SZX	周六	9:15	1 260	14.30
B737-7	TFU-SZX	周六	11:15	1 260	9.83
A320-301	TFU-PKX	周六	12:30	1 492	11.08
B747-5	KMG-PVG	周日	12:15	1 963	13.87
A320-168	CAN-CKG	周日	15:00	964	8.07

由图5可知:①绝大多数航线的运营成本均得到了显著降低,特别是在PEK-CAN、CAN-PKX和PEK-SZX等航线上,优化后的成本分别下降了29.94%、24.89%和19.45%.这说明优化方案通过合理调整航班时刻、机型配置和排班安排,有效提高了资源利用率,降低了空载率,从而显著减少了运营成本.②在其他航线如CKG-SZX、CAN-CKG和TFU-SZX等,虽然优化幅度相对较小(约9%),但依然表明优化在提升航班资源使用效率和减少冗余成本方面起到了积极作用.③PVG-SZX航线在优化后出现了轻微的成本增加(−4.14%),这与机型或时刻资源分配给了更有价值的航线有关,但从航班计划整体运行效果来看,个别航线的成本小幅度增加是可以接受的,优化后的调整仍有助于提高整体航班运营效率.④在大多数航线上,优化后市场需

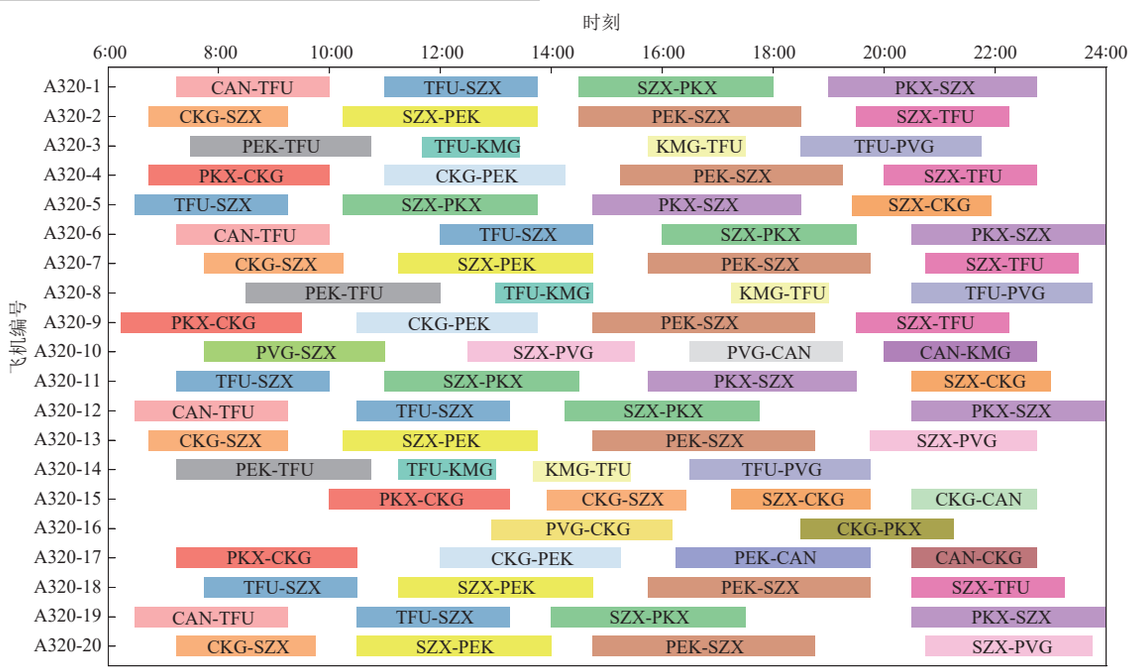
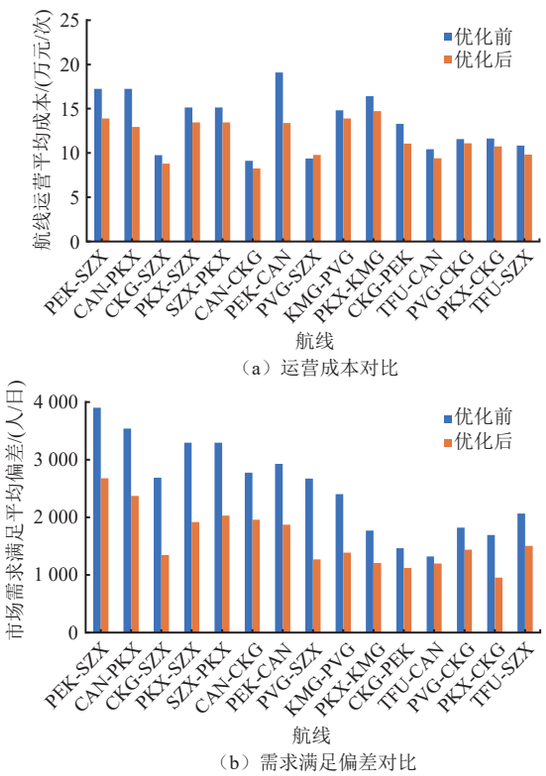


图4　优化后A航空公司某日航班甘特图(部分)

Fig.4　Optimized flight Gantt chart for airline A on a certain day (partial)



（a）运营成本对比

（b）需求满足偏差对比

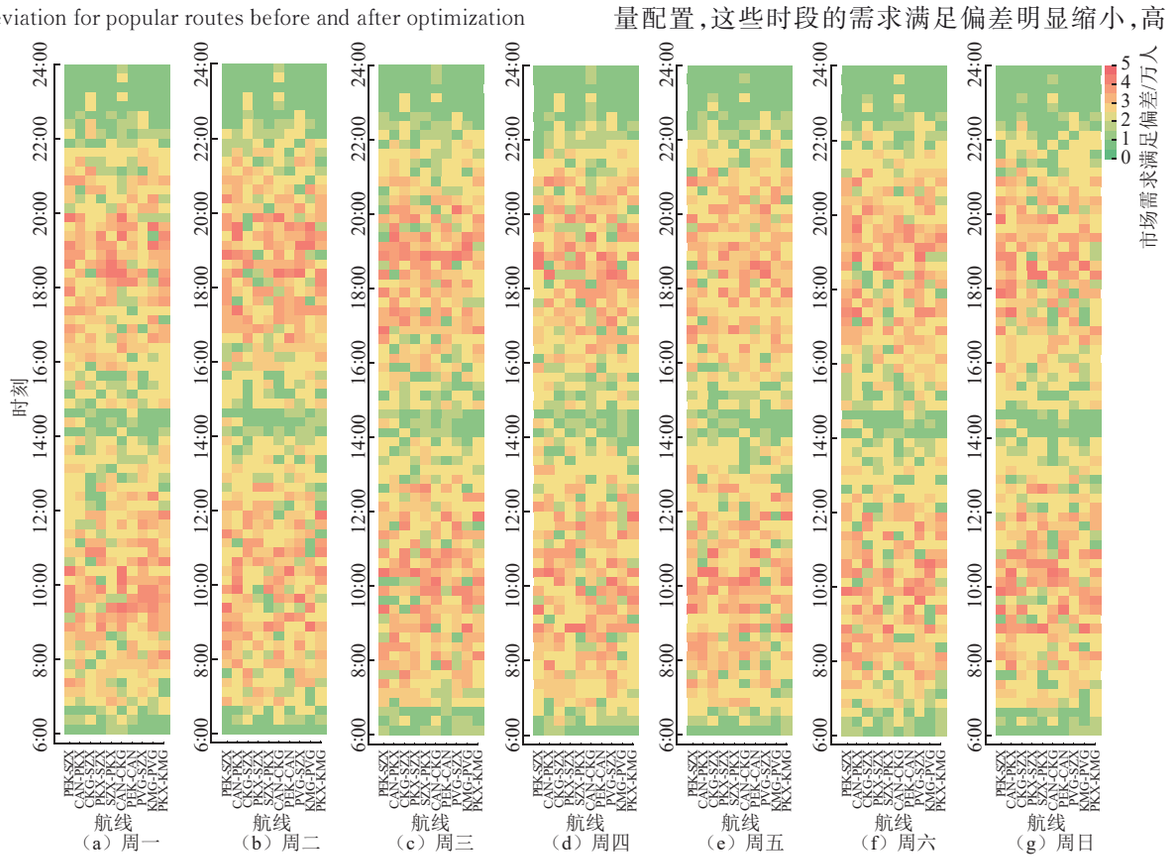
图 5　模型优化前后热门航线运营成本和市场需求满足偏差对比

Fig.5　Comparison of demand operating cost and fulfillment deviation for popular routes before and after optimization

求满足偏差显著缩小，尤其是在 CKG-SZX、PVG-SZX 和 PEK-SZX 等航线上，优化后的偏差分别下降了 49.87%、52.45% 和 31.45%. 这一现象表明，在需求波动较大的航线上，优化方案通过精确调整航班时刻与机型配置，有效提升了航班计划对市场需求的承接能力，并减少了因供给配置不合理造成的资源闲置，进而提升了整体运营效率. ⑤ CAN-PKX、PKX-SZX 和 PEK-CAN 等热门航线的需求满足偏差同样得到了显著改善，优化幅度均超过 30%，充分体现了优化方案在提升供需适配水平方面的积极作用.

为进一步分析不同时段的需求满足偏差变化，绘制了热门航线优化前后的市场需求满足偏差热力图，如图 6 和图 7 所示.

由图 6 和图 7 可知：①优化后各航线在不同时段的需求满足偏差均较优化前有所降低，尤其是在高需求时段改善更为明显. ②优化前，多个时段的偏差较大，特别是在早高峰（8:00 至 11:00）和晚高峰（17:00 至 21:00）时段，旅客需求集中释放，导致航班计划对需求的承接能力不足，进而造成较大的供需不匹配；优化后，通过调整航班时刻分布和航班数量配置，这些时段的需求满足偏差明显缩小，高峰时



（a）周一　（b）周二　（c）周三　（d）周四　（e）周五　（f）周六　（g）周日

图 6　模型优化前热门航线不同时段市场需求满足偏差

Fig.6　Demand fulfillment deviation of popular routes during different time periods before optimization

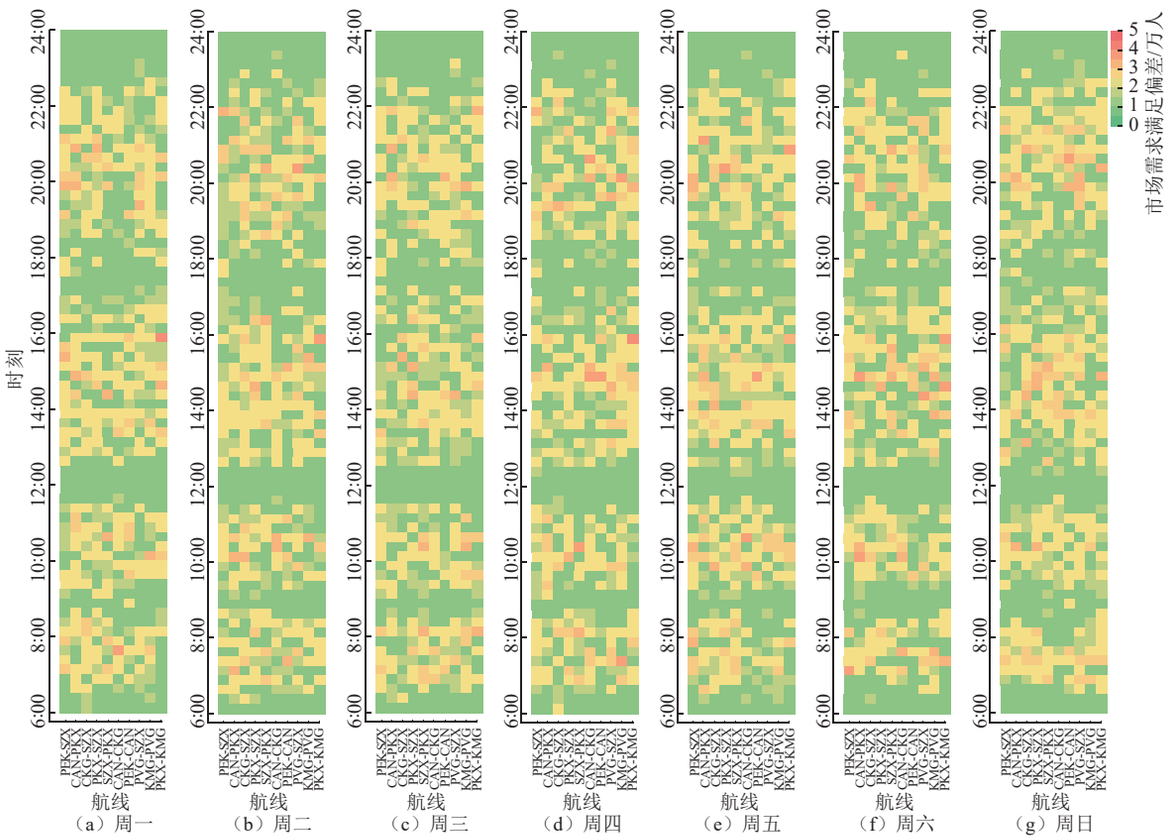


图 7　模型优化后热门航线不同时段市场需求满足偏差

Fig.7　Demand fulfillment deviation of popular routes during different time periods after optimization

段的航班调度更加合理.以PEK-SZX航线为例,优化前该航线在上午8:00至10:00时段的需求满足偏差较大,表明该时段航班计划对集中需求的响应不足,旅客需求未得到充分承接.③通过调整航班时刻并适度增加早高峰时段的航班供给,该航线在相应时段的需求满足偏差得到有效缩小.在18:00至20:00时段,虽然仍存在一定波动,但优化后航班分布更加均衡,航班计划对旅客需求的适配能力有所增强.

5　结论

1）旅客选择偏好具有稳定且显著的异质性.商务旅客在8:00至12:00的工作时段表现出更集中的时刻偏好,且对飞行时长和机型属性更为敏感;休闲旅客对低票价与晚间航班的接受度更高,日内偏好曲线更为平滑.

2）优化后的航班时刻安排与航班频次分布显著改善航班计划对市场需求的适配能力,通过在高需求时段合理配置航班资源,市场需求满足偏差明显缩小,有效提升了航班计划对集中需求的承接水平.

3）将旅客行为偏好嵌入航班计划一体化优化,可显著提升航班计划的适配性与经济性.实例分析表明,优化方案使市场需求满足偏差降低了34.3%,同时运营总成本降低了12.1%,在提升资源利用效率的同时兼顾了成本控制.

4）贪婪-遗传混合算法在处理大规模、强约束的优化问题上具有较强优势.该算法在收敛速度、解的质量及分布性能方面均优于对比算法,能够为航司提供多样化且具备可操作性的航班编排方案.

未来可结合多源大数据和实时需求预测,开展动态航班计划优化,以进一步提升计划编制的精准性与时效性.同时,可探索跨航空公司的协同优化机制,研究时刻共享与资源协同配置对提升整体航空网络调度效率的影响.

参考文献(References):

[1] 姜夏芳.国内航空公司航班计划编制方法研究[J].交通企业管理,2024,39(2):55－57.
JIANG Xiafang. Study on the method of flight schedule for domestic airlines[J]. Transportation Enterprise Management, 2024, 39(2): 55－57.(in Chinese)

[2] 徐爱庆,陈欣,朱金福.基于累积前景理论的机场群旅客出行决策行为分析[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(6):14－21.
XU Aiqing, CHEN Xin, ZHU Jinfu. Passenger travel choice in multiple airport system based on cumulative

prospect theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6): 14－21. (in Chinese)

[3] 程谦, 朱晓宁, 卢万胜. 中长运距城际旅客出行方式选择行为模型: 以高铁、民航为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(7): 39－45.
CHENG Qian, ZHU Xiaoning, LU Wansheng. Travel mode choice behavior model of intercity passengers with medium and long haul: A case study of high-speed railway and air transport[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(7): 39－45. (in Chinese)

[4] 任新惠, 孙一楠, 江红. 航班延误下旅客出行行为异质性研究[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(1): 40－50.
REN Xinhui, SUN Yinan, JIANG Hong. Research on heterogeneity of passenger travel behavior under flight delay[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(1): 40－50. (in Chinese)

[5] KOPPELMAN F S, COLDREN G M, PARKER R A. Schedule delay impacts on air-travel itinerary demand[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(3): 263－273.

[6] WEN C H, HUANG C J, FU C A. Incorporating continuous representation of preferences for flight departure times into stated itinerary choice modeling[J]. Transport Policy, 2020, 98: 10－20.

[7] 李艳华, 阳杰, 周锦, 等. 考虑旅客中转时长和中转服务选择偏好的航班时刻优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(11): 3649－3661.
LI Yanhua, YANG Jie, ZHOU Jin, et al. Flight schedule optimization considering passengers' transit duration and transit service selection preference[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(11): 3649－3661. (in Chinese)

[8] 刘志硕, 林思萌, 李艳华. 基于旅客出行需求的同城机场群航班协同规划方法[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(1): 148－157.
LIU Zhishuo, LIN Simeng, LI Yanhua. Flight collaborative planning method for metropolitan multi-airport systems based on passenger travel demand[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(1): 148－157. (in Chinese)

[9] 王莉莉, 潘越. 基于航班收益最大化的机场航班时刻分配[J]. 飞行力学, 2024, 42(2): 89－94.
WANG Lili, PAN Yue. Airport schedule allocation based on flight revenue maximization[J]. Flight Dynamics, 2024, 42(2): 89－94. (in Chinese)

[10] 胡荣, 张雨橦, 丁嘉豪, 等. 航班时刻配置公平性研究现状与展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(2): 1－15.
HU Rong, ZHANG Yutong, DING Jiahao, et al. Research progress and challenges on equity in flight slot allocation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(2): 1－15. (in Chinese)

[11] 谢可欣, 徐根焰, 苏艺, 等. 飞机维修计划编排问题的研究综述[J]. 运筹与管理, 2023, 32(10): 233－239.
XIE Kexin, XU Genyan, SU Yi, et al. Review of aircraft maintenance scheduling[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(10): 233－239. (in Chinese)

[12] 胥洪, 胡家文, 钟罡. 基于滚动时域控制的飞机维修路径恢复策略[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(1): 164－172.
XU Hong, HU Jiawen, ZHONG Gang. Aircraft maintenance path recovery strategy based on rolling horizon control[J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(1): 164－172. (in Chinese)

[13] WEN X, SUN X T, MA H L, et al. A column generation approach for operational flight scheduling and aircraft maintenance routing[J]. Journal of Air Transport Management, 2022, 105: 102270.

[14] LIU C, CHEN Y R, ZHANG Y Y, et al. Reliable and robust scheduling of airport operation resources by simulation optimization feedback and conflict resolution[J]. Neurocomputing, 2024, 573: 127212.

[15] 张宝成, 冉博文. 大规模飞机排班问题研究综述[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(1): 1－10.
ZHANG Baocheng, RAN Bowen. A review of studies on large-scale aircraft scheduling problems[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(1): 1－10. (in Chinese)

[16] BIROLINI S, ANTUNES A P, CATTANEO M, et al. Integrated flight scheduling and fleet assignment with improved supply-demand interactions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 149: 162－180.

[17] KENAN N, JEBALI A, DIABAT A. The integrated aircraft routing problem with optional flights and delay considerations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 118: 355－375.

[18] ZHAO K Y, LI Y H, REN G J, et al. Identifying critical nodes in airport networks through an advanced topological potential approach[J]. Physics Letters A, 2025, 560: 130949.

[19] SWAN W M, ADLER N. Aircraft trip cost parameters: A function of stage length and seat capacity[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2006, 42(2): 105－115.

[20] XU Y F, ADLER N, WANDELT S, et al. Competitive integrated airline schedule design and fleet assignment[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 314(1): 32－50.