

中文引用格式:任杰,曲仕茹,王莉莉,等. 考虑多利益相关方需求的机场群航班时刻优化[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 98-106.

英文引用格式:REN Jie, QU Shiru, WANG Lili, et al. Optimization of flight slot for airport group considering needs of multiple stakeholders[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 98-106.

考虑多利益相关方需求的机场群航班时刻优化^{*}

任杰^{1,2} 讲师, 曲仕茹² 教授, 王莉莉¹ 教授, 张家梁¹, 孙志远¹

(1 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300;

2 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0159

资助项目:中央高校自然科学基金一般项目(3122024042)。

【摘要】 为提升运营效率,保障飞行安全,综合考虑航空公司、空管部门、时刻协调单位和机场等多方需求,以机场容量、终端区走廊口容量及安全需求为约束,构建多目标航班时刻优化模型,实现机场群航班时刻分配的均衡与效率提升,并通过京津冀机场群中北京首都机场、北京大兴机场和天津滨海机场的实际航班数据验证模型的有效性。结果表明:优化后的航班时刻分布更加均衡,高峰时段航班数量减少7%,航空公司平均航班调整量降低18.2%,机场群航班调整总量减少10.4%;北京首都机场优化后提升了高峰时段的容量利用效率,冗余率由2.9%提高至8.3%;北京大兴机场优化后航班时刻更加均衡,冗余率由1.6%提高至6.5%;天津滨海机场优化后航班量控制在容量范围内,提高了安全裕度,冗余率由-13.9%提高至8.3%。模型可有效合理调配航班时刻,显著提升运行安全水平与资源利用效率。

【关键词】 利益相关方; 机场群; 航班时刻优化; 机场容量; 走廊口; 京津冀; 运行安全

Optimization of flight slot for airport group considering needs of multiple stakeholders

REN Jie^{1,2}, QU Shiru², WANG Lili¹, ZHANG Jialiang¹, SUN Zhiyuan¹

(1 School of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China,

Tianjin 300300, China; 2 School of Automation, Northwestern

Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: To enhance operational efficiency and ensure flight safety, a multi-objective flight slot optimization model was developed by comprehensively considering the requirements of airlines, air traffic control authorities, slot coordination authorities, and airports, subject to airport capacity, terminal waypoint capacity, and safety requirements. The model aimed to achieve balanced and efficient slot allocation within airport clusters, and its effectiveness was validated using actual flight data from Beijing Capital International Airport, Beijing Daxing International Airport, and Tianjin Binhai International Airport in the Beijing-Tianjin-Hebei airport cluster. The results show that the optimized slot distribution becomes more balanced, with peak-hour flight numbers reduced by 7%, the average adjustment per airline

decreased by 18.2%, and the total adjustment across the airport cluster reduced by 10.4%. At Beijing Capital Airport, capacity utilization efficiency during peak hours is improved, with redundancy increasing from 2.9% to 8.3%. At Beijing Daxing Airport, slot distribution becomes more balanced, with redundancy increasing from 1.6% to 6.5%. At Tianjin Binhai Airport, the optimized flight volume is maintained within capacity limits, improving safety margins, with redundancy rising from -13.9% to 8.3%. The model effectively enables the rational allocation of flight schedules, significantly enhancing operational safety and resource utilization efficiency.

Keywords: stakeholders; airport group; flight slot optimization; airport capacity; terminal waypoint; Beijing-Tianjin-Hebei region; operational safety

0 引 言

随着民航运输需求的持续增长,机场群已成为区域航空网络运行的重要单元,其运行效率与飞行安全已成为关键挑战。相比单一机场运行,机场群内各机场运行高度关联,高峰时段的航班集中不仅导致终端区走廊口容量的频繁超限,还会加剧航班延误和冲突风险。因此,开展面向机场群的多目标航班时刻优化研究,既有助于缓解区域航空资源紧张、提升整体运行安全裕度和效率,又能够兼顾航空公司、机场和空管等多方利益平衡,对推动民航高质量发展和区域协同治理具有重要意义。

目前,航班时刻分配主要采用市场模式、行政模式和混合模式 3 种。全球大多数国家遵循国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)发布的 *Worldwide Airport Slot Guidelines* 规则,最早的航班时刻优化模型由 ZOGRAFOS 等^[1]于 2012 年提出,该模型以最小化航班时刻总调整量为目标函数,考虑了航班时刻唯一性、机场容量滚动约束以及最小过站时间限制等条件。此后,国内外学者针对航空公司公平性和机场群协调问题,基于该模型提出了多种改进方案。例如:文献[2]提出了针对机场容量资源拥堵的缓解策略,构建了双目标动态规划优化模型,以最小化最大时刻调整量和航班时刻总调整量为目标,平衡需求与机场容量间的差距,减少因航班时刻不匹配而导致的拥堵与延误。文献[3]进一步在 ZOGRAFOS 等^[1]模型基础上,考虑了航空公司公平性,提出了考虑公平因素的综合容量利用与调度模型(Integrated Capacity Utilization and Scheduling Model with Equity Considerations, ICUSM-E),通过 ε 约束法和行生成法将公平性目标转化为 ε 约束条件求解。文献[4]则针对中转航班的衔接时间优化问题,建立了以最小化繁忙机场平均衔接时间为目标的优化模型,并采用飞蛾扑火算

法求解。文献[5]通过引入基尼系数重新定义公平性,构建了双目标航班时刻优化模型,并利用改进的多目标遗传算法求解。文献[6]提出一个综合考虑机场容量和空域容量约束的多目标优化模型,旨在优化机场群整体资源配置并提升运行效率,并通过粤港澳机场群的实际航班数据验证模型有效性。文献[7]进一步平衡了航班时刻调整成本与航班延误成本,利用 AirTop 仿真软件计算优化前后的航班延误,并通过粤港澳大湾区机场群数据进行实例验证。

尽管现有研究在 IATA 规则和机场容量约束下深入探讨了单机场或机场群航班时刻优化问题,但大多忽略了与航班时刻优化相关的多利益相关方的需求,这在一定程度上限制了航班时刻分配的全面性与公平性,影响了整体利益的最大化^[8-12]。因此,笔者拟以机场群为研究对象,综合考虑机场容量、终端区走廊口容量限制及多利益相关方需求,构建多目标航班时刻优化模型,将机场容量和终端区走廊口容量限制作为约束条件,避免高峰时段流量超负荷导致的航班冲突风险。同时,通过航班时刻优化调整实现流量均衡分布,以期实现安全与效率的辩证统一,降低高峰时段的流量压力和延误风险,为航班时刻分配提供科学依据和实用支持。

1 基于多利益主体协同的航班时刻分配问题

在国内航班时刻协调流程中,时刻协调部门与航空公司确认历史时刻,并确定下一航季机场协调参数。作为航班运营的主体,航空公司期望占据有利的航班时刻以在市场竞争中获取优势。机场通过向航空公司提供基础设施和相关服务,力求最大化利用机场资源。空管部门则主要负责在保障飞行安全前提下提升运行效率。若航班时刻分配不合理,可能导致高峰时段流量超限和走廊口的航班拥堵,进一步增加航班冲突风险和管制员工作负荷,甚至

影响安全。因此,多利益相关方的需求主要集中在安全保障、运行效率及空域资源合理分配等方面。

2 机场群航班时刻优化模型

2.1 目标函数

2.1.1 考虑各利益相关方综合利益的目标

航班时刻的调整量越小,对原计划扰动整体运行的影响越小,亦能提升运行的稳定性和安全裕度。因此,以所有航班时刻的总调整量最小为目标:

$$\min Z_1 = \min \sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a \quad (1)$$

式中: Z_1 为所有航班时刻的总调整量; $\min; a$ 为某个机场; A 为机场群内的机场集合, $\forall a \in A$; m 为某个航班; M 为所有航班集合, $\forall m \in M$; t 为优化后航班 m 的分配时刻; T 为可分配的航班时刻集合, $\forall t \in T$; t_m 为航班 m 的申请时刻; $x_{t,m}^a$ 为决策变量,若航班 m 在机场 a 被分配到时刻 t , 则为 1, 否则为 0。

2.1.2 考虑时刻协调单位利益的目标

时刻协调部门(如中国民用航空局航班时刻管理委员会)的职责是确保有限的航班时刻资源得到合理分配,以满足航空公司和机场需求,同时提高运行效率。最小化最大航班时刻调整量有助于更好地满足各方需求,并控制极端情况对航空公司或运行系统造成较大冲击,建立如下目标:

$$\min Z_2 = \min(\max |t - t_m|) \quad (2)$$

式中 Z_2 为最大航班时刻调整量, $\min$ 。

2.1.3 考虑航空公司利益的目标

航空公司关注调整量的相对公平性,公平性越高,其参与协调的积极性越强,运营计划也更具确定性。为体现航空公司公平性,建立如下目标:

$$\min Z_3 = \min(X_n - \mu_1) \quad (3)$$

$$X_n = \sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a, \forall n \in N \quad (4)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a}{|N|} \quad (5)$$

式中: X_n 为航空公司 n 的航班时刻调整总量, $\min$; μ_1 为航空公司 n 的航班时刻调整量平均值, $\min$; Z_3 为航空公司 n 的航班时刻调整总量 X_n 与全部航空公司航班时刻调整量平均值 μ_1 之间的差值, $\min$ 。 n 的航班时刻调整总量越接近平均值,表示该航空公司越被公平对待。

2.1.4 考虑机场利益的目标

机场作为资源提供方,其调整负担也应在群体中公平分布。构建机场公平性目标如下:

$$\min Z_4 = \min(Y_n - \mu_2) \quad (6)$$

$$Y_a = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a, \forall a \in A \quad (7)$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a}{|A|} \quad (8)$$

式中: Y_a 为机场 a 的航班时刻调整总量, $\min$; μ_2 为机场群全部机场班时刻调整量平均值, $\min$; Z_4 为机场 a 的航班时刻调整总量 Y_a 与机场群全部机场班时刻调整量平均值 μ_2 间的差值, $\min$ 。

机场 a 的航班时刻调整总量越接近平均值,该机场越被公平对待。此外,空管部门虽不直接参与航班时刻分配,但航班时刻分配的合理性直接影响管制员的工作负荷。通常,机场容量和终端区走廊口容量是基于对机场飞行区布局、管制员工作负荷以及空域复杂程度的综合科学评估所得。因此,将机场容量限制和终端区走廊口容量限制作为模型的约束条件,间接保障空管部门的利益。综上,建立多目标函数如下:

$$Z = \min(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) \quad (9)$$

2.2 约束条件

2.2.1 航班时刻唯一性约束

每个航班只能被安排在某一机场的一个唯一时刻,即:

$$\sum_{t \in T} x_{t,m}^a = 1, \forall a \in A, \forall m \in M \quad (10)$$

2.2.2 机场滚动容量约束

为避免机场在任一时间段超容量运行,设置 15 min 和小时容量约束,即:

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{t,m}^a \leq c_{a1}, \forall a \in A, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{t,m}^a \leq c_{a2}, \forall a \in A, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (12)$$

式中: c_{a1} 为机场 a 的 15 min 容量限制,架次; c_{a2} 为机场 a 的小时容量限制,架次。

2.2.3 走廊口容量约束

为确保终端区流量不超载,避免空域冲突,设置走廊口 15 min 和小时容量约束,即:

$$\sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{t,m}^a \leq c_{u1}, \forall a \in A, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{t,m}^a \leq c_{u2}, \forall a \in A, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (14)$$

式中: $c_{\mu 1}$ 为走廊口 μ 的 15 min 容量限制,架次; l_a 为飞机从 a 机场离场至走廊口 μ 或从走廊口 μ 进场至机场 a 所需的飞行时间,采用历史数据中位数带入计算; $c_{\mu 2}$ 为走廊口 μ 的小时容量限制,架次。

2.2.4 过站时间约束

衔接航班对的过站时间需满足最大和最小限制:

$$R_{mm'}^{\min} \leq \sum_{t \in T} (X_{t,m}^a - X_{t,m'}^a) \leq R_{mm'}^{\max}, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (15)$$

式中: $R_{mm'}^{\min}$ 为衔接航班对 (m, m') 的最小过站时间, min; $R_{mm'}^{\max}$ 为衔接航班对 (m, m') 的最大过站时间, min。

综上,模型通过容量限制、过站时间、最大调整量和安全裕度目标,构建运行安全的软约束和硬边界。在确保效率基础上,增强系统对冲突、拥堵和突发航班调整的防御能力,提升安全可控性。

2.3 模型求解策略

目标 1:最小化所有航班时刻的总调整量,以满足大多数利益相关方的需求。其他目标通过增加上界约束转换为约束条件。

目标 2:最小化最大调整量。通过增加上界约束,转换为每个航班时刻调整量不能超过所允许的航班调整量最大值约束值 $t_{\max}$,即:

$$\min(\max |t - t_m|) \rightarrow \max |t - t_m| \leq t_{\max}, \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (16)$$

目标 3:航空公司公平性。通过增加上界约束,转换为基于最大调整量的航空公司公平性可接受度需求上限的约束,即:

$$\sum_{m \in M_n} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a - \frac{\sum_{m \in M_n} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a}{|N|} \leq t_{\max} \varepsilon_1, \forall n \in N \quad (17)$$

式中 ε_1 为航空公司公平性可接受度参数。

目标 4:机场群公平性问题。与目标 3 同理,通过增加上界约束,转换为基于最大调整量的机场公平性可接受度需求上限的约束,即:

$$\sum_{m \in M_a} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a - \frac{\sum_{m \in M_a} \sum_{t \in T} |t - t_m| x_{t,m}^a}{|A|} \leq t_{\max} \varepsilon_2, \forall a \in A \quad (18)$$

式中 ε_2 为机场公平性可接受度参数。

经与时刻协调部门沟通,将航空公司公平性可接受度参数 ε_1 设为 0.15,表示航空公司的总调整

量与平均值的差异不超过最大调整量的 15%。同样将机场公平性参数 ε_2 设为 0.10。此外,根据行业实践和航空公司可接受度,设定最大允许时刻偏移量为 60 min。

3 机场群优化模型实证验证

3.1 京津冀机场群典型参数选取

京津冀机场群是我国四大国际性综合交通枢纽集群之一,包含北京首都机场(ZBAA)、北京大兴机场(ZBAD)、天津滨海机场(ZBTJ)和石家庄正定机场(ZBSJ)。选取预飞行计划管理系统中京津冀机场群《2021 年冬春国内计划》典型运行日(2021 年 11 月 17 日)全天航班时刻数据,该日 4 个机场各时段的航班数据统计如图 1 所示。从统计结果看出,ZBSJ 的航班量远低于其他 3 个机场,且航班变化趋势也与其他 3 个机场不同,因此,聚焦于 ZBAA、ZBAD 和 ZBTJ 等 3 个机场,并选取当日 9:00—13:00 高峰运行时段的数据(包含离场航班和进场航班)进行实例验证,求解优化模型并分析结果。

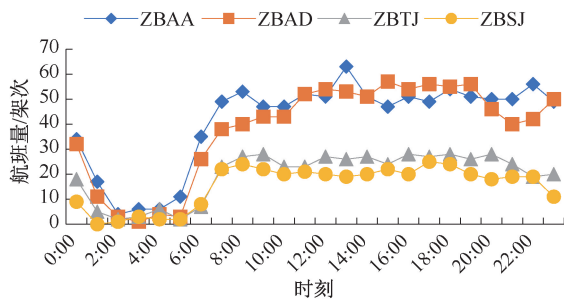


图 1 京津冀机场群各机场航班统计

Fig. 1 Hourly flight statistics for each airport in the Beijing-Tianjin-Hebei airport group

3.1.1 航空公司占比分析

由该日京津冀机场群各航空公司的航班占比统计情况可知:航班占比较大的航空公司包括国航(CA)、东航(MU)、南航(CZ)、中联航(KN)、海航(HU)、天航(GS)、奥凯(BK)和川航(3U),其他航空公司航班占比较小($\leq 1\%$)且分布均匀。为简化计算,将上述 8 家航空公司作为主要研究对象,其他航空公司归为其他航空,如图 2 所示。

3.1.2 走廊口容量约束

北京终端区包含 ZBAA、ZBAD 和 ZBTJ 等 3 个机场,其离场走廊口包括 RUSDO、IDKEX、BOTPU、PEGSO、ELKUR、OMDEK、IGMOR 等 7 个,进场走廊口包括 DUGEB、GUVBA、AVBOX、BLEAX、ELAPU

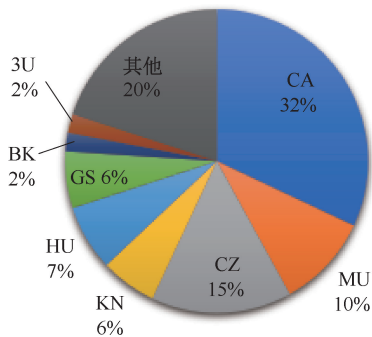


图2 京津冀机场群各航空公司航班占比统计

Fig.2 Flight share statistics of airlines in the Beijing-Tianjin-Hebei airport group

等5个。表1和表2分别列出了通过调研民航华北空管局得到2021年11月份北京终端区各离场和进场走廊口的容量数据,作为模型走廊口容量约束。

表1 离场走廊口容量

Table 1 Departure waypoints capacity				
机场		走廊口	小时容量/架次	15 min 容量/架次
离场	ZBAA	RUSDO	15	3
		BOTPU/IDKEX	20	5
		ELKUR	26	6
	ZBAD	OMDEK	28	7
		PEGSO	16	4
		ELKUR	26	6
	ZBTJ	OMDEK	20	5
		PEGSO/BOTPU	16	4
		IGMOR	20	5

表2 进场走廊口容量

Table 2 Arrival waypoints capacity				
机场		走廊口	小时容量/架次	15 min 容量/架次
进场	ZBAA	DUGEB	18	4
		GUVBA	7	1
		AVBOX	35	8
	ZBAD	BLEAX	24	6
		ELAPU	6	1
		AVBOX	35	8
	ZBTJ	AVBOX	20	5
		GUVBA	10	2
		DUMAP	10	2

3.1.3 机场容量约束

所用京津冀机场群中 ZBAA、ZBAD 和 ZBTJ 的机场协调参数(表3)来源于民航华北地区管理局于2021年发布的官方公布数据。将表3数据作为模型的机场容量约束。

表3 京津冀机场群容量

Table 3 Beijing-Tianjin-Hebei airport group capacity		
机场	公布小时容量/架次	公布 15min 容量/架次
ZBAA	70	17
ZBAD	62	15
ZBTJ	36	7

3.1.4 飞行时间

使用飞机自机场至走廊口的飞行时间和自走廊口至机场的飞行时间,基于调研民航华北空管局得到的2021年11月北京终端区雷达历史飞行轨迹数据计算得到的中位数,分别见表4和表5。

表4 离场航班自跑道至走廊口的飞行时间

Table 4 Departure flight time from runway to waypoints				
机场		方向	走廊口	时间/min
离场	ZBAA	中南	RUSDO	20
		西北、西南	BOTPU/IDKEX	15
		华东	ELKUR	25
	ZBAD	中南	OMDEK	20
		西北、西南	PEGSO	20
		华东	ELKUR	20
	ZBTJ	中南	OMDEK	15
		西北、西南	PEGSO/BOTPU	15
		华东	IGMOR	15

表5 进场航班自走廊口至跑道的飞行时间

Table 5 Arrival flight time from waypoints to runway				
机场		方向	走廊口	时间/min
进 场	ZBAA	中南	DUGEB	25
		西北、西南	GUVBA	25
		华东	AVBOX	25
	ZBAD	中南	BLEAX	20
		西北、西南	ELAPU	30
		华东	AVBOX	15
	ZBTJ	中南	AVBOX	15
		西北、西南	GUVBA	15
		华东	AVBOX	15

3.2 结果分析

3.2.1 各利益相关方综合利益分析

从优化前后机场群容量负载情况、单机场运行负载平衡和走廊口负载调整3个方面分析。

1) 机场群容量负载情况。图3和图4分别为优化前后京津冀机场群中各机场的单位小时航班时刻总量。由图3可知;ZBTJ 的小时容量为36架次,而优化前09:00—10:00和11:00—12:00时段的航班时刻总量分别为38和41架次,超出机场容量限制。

由图4可知:优化后该机场在所有时间段的航

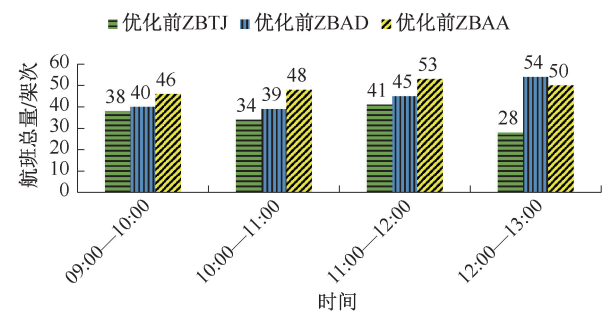


图 3 优化前各机场单位小时航班时刻总量

Fig. 3 Total number of flights per hour at each airport before optimization

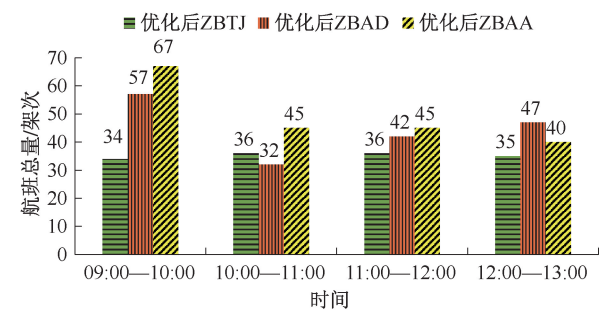


图 4 优化后各机场单位小时航班时刻总量

Fig. 4 Total number of flights per hour at each airport after optimization

班量均控制在容量范围内,平均调整量控制在 4 架次左右,占比约 10.5%,显著缓解运行压力并增强安全裕度。

2) 单机场运行负载平衡。由于 ZBTJ 优化前存在航班时刻超容量的情况,优化前后差异显著,因此以该机场为例,分析其进场、离场及综合进离场的航班时刻分布,分别如图 5—图 7 所示。

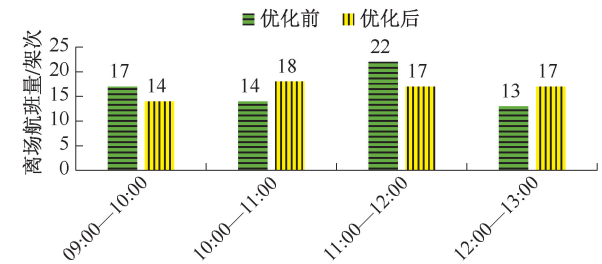


图 5 ZBTJ 离场航班优化前后对比

Fig. 5 ZBTJ departure flights before and after optimization

由图 5—图 7 可知:优化前航班集中分布于 09:00—12:00,形成堆叠高峰;而优化后系统自动填补了 12:00—13:00 的空闲容量,实现航班负载在时间维度上的再均衡,有助于减轻管制员负担、降低冲突风险,提升运行安全性。

3) 走廊口负载调整分析。走廊口 ELKUR 作为

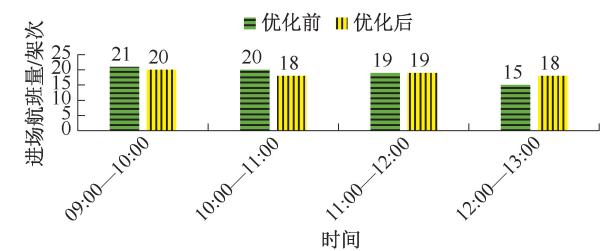


图 6 ZBTJ 进场航班优化前后对比

Fig. 6 ZBTJ arrival flights before and after optimization

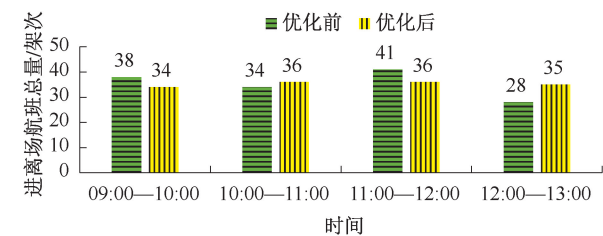


图 7 ZBTJ 进离场总航班优化前后对比

Fig. 7 ZBTJ total flights before and after optimization

ZBAA、ZBAD 和 ZBTJ 的共用进离场走廊口,能同时反映 3 个机场的走廊口航班时刻特点。因此,以 ELKUR 为例分析该航路点进离场航班时刻,结果如图 8 和图 9 所示。

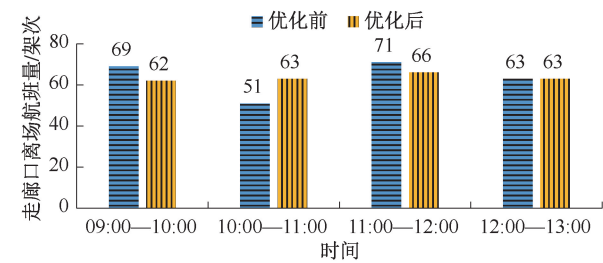


图 8 ELKUR 离场航班时刻优化前后对比

Fig. 8 ELKUR departure flights before and after optimization

由图 8 可知:优化前 09:00—10:00 和 11:00—12:00 时段的离场航班时刻总量超出 ELKUR 最大容量限制,优化后所有时段均未超限,高峰时段航班数量减少 7%,最高时段与最低时段的差值由 20 架次降至 4 架次,降幅达 80%。

由图 9 可知:优化前 10:00—11:00 时段的进场航班时刻总量超出走廊口容量限制。优化后各时段均未超限,最高与最低时段的差值由 18 架次降至 3 架次,降幅达 83.3%。这些变化显著增加了走廊口在高峰期的运行冗余,提升了整体空域的安全容错能力。

3. 2. 2 时刻协调单位视角:效率与波动控制

通过对比未设置和设置最大调整量约束的结果,见表 6,分析时刻协调单位的利益。

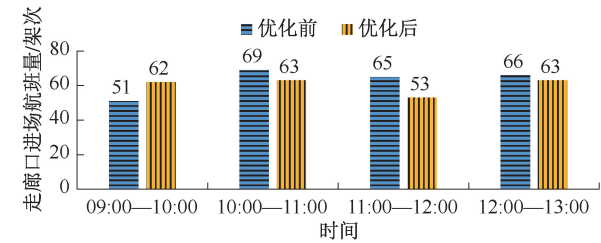


图9 ELKUR 进场航班时刻优化前后对比

Fig.9 ELKUR arrival flights before and after optimization

表6 调整量约束对比

Table 6 Comparison of displacement constraints

未设置最大调整量约束	总调整量/架次	1 252
	最大调整量/架次	22
设置最大调整量约束	总调整量/架次	1 121
	最大调整量/架次	10
调整量减少率/%	10.46	

由表6可知:设置最大调整量约束后,总调整量减少10.46%,最大调整量由22架次降至10架次。表明模型能够在保持整体优化效果的同时,显著降低系统波动性,提升时刻协调操作的稳定性与可控性,符合安全与可执行性并重的运行要求。

3.2.3 航空公司视角:调整公平性分析

考虑航空公司公平性约束结果见表7。

表7 航空公司平均航班调整量

Table 7 Average airline flight displacements

航空公司	不含公平性约束	公平性
KN	0.4	1.1
BK	1.1	1.5
GS	1.4	2.2
HU	1.1	2.8
其他	2.6	2.8

表9 容量冗余率对比分析

Table 9 Comparison of capacity redundancy rates before and after optimization

类型	机场	时段	最大容量/架次	实际航班量(优化前)	冗余率(优化前)/%	实际航班量(优化后)	冗余率(优化后)/%
机场	ZBAA	9:00—10:00	70	68	2.9	64	8.3
机场	ZBAD	10:00—11:00	62	61	1.6	58	6.5
机场	ZBTJ	11:00—12:00	36	41	-13.9(超限)	33	8.3
走廊口	ELKUR	11:00—12:00	26	28	-7.7(超限)	22	15.4
走廊口	AVBOX	10:00—11:00	35	34	2.9	30	14.3
走廊口	OMDEK	09:00—10:00	28	27	3.6	23	17.9

由表7可知:引入公平性约束后,各航空公司间的平均调整量差异明显缩小,最大平均调整由2.2架次下降至1.8架次,下降18.2%。有助于防止个别航空公司因分配不公造成运行计划剧烈调整,间接支持运行安全与稳定。

3.2.4 机场视角:航班调整均衡性分析

考虑机场公平性约束的结果见表8。

表8 机场平均航班调整量

Table 8 Average number of flight adjustments per airport

机场	不含公平性约束	公平性
ZBTJ	2.26	2.21
ZBAD	0.96	1.70
ZBAA	0.93	1.93

由表8可知:加入机场公平性约束后,最大平均调整值从1.3架次降至0.5架次,下降61.5%,机场间负荷更加均衡,有利于提升机场资源使用效率并减小某一机场运行压力突增对空管造成的负担。

3.2.5 安全裕度量化分析

为量化优化方案对安全的积极影响,引入容量冗余率指标 R_t 。该指标反映了可用容量的富余程度,是衡量运行安全裕度的关键参数,定义为:

$$R_t = \frac{C_t - D_t}{C_t} \times 100\% \tag{19}$$

式中: C_t 为机场或走廊口在时段 t 的容量上限; D_t 为该时段的分配航班量。各机场和走廊容量冗余率见表9。

由表9可知:高峰时段走廊口如ELKUR的容量冗余率由优化前-7.7%提升至优化后15.4%;各机场小时级容量冗余平均提升12.6%,显著增强了系统在突发情况下的运行弹性。从以上结果看出,文

中模型不仅实现了多方利益的协调与效率提升,更通过容量约束平衡、调整量控制与安全裕度优化,显著增强了机场群在高负荷条件下的运行安全性。优化结果显示,在不牺牲运行效率前提下,系统风险可控性与抗

扰动能力均得到提升,验证了安全-效率协同优化的可行性与实用价值。

4 结 论

1) 文中的机场群航班时刻优化模型能够在不突破容量上限的前提下合理重构航班时刻,显著改善高峰时段的流量分布,降低流量集中带来的运行压力与延误风险。同时,在航班调整量、各航空公司与机场之间的分配公平性方面表现良好,提升了资源使用效率与运行协调性。此外,安全裕度的评估表明:优化方案可显著提高系统对突发扰动的承压能力,增强整体运行安全弹性与可控性,体现了安全保障为前提、效率优化为目标的协同优化理念。

2) 从理论方法层面来看,本研究将安全裕度嵌入时刻优化模型,为空中交通流量管理提供了一种新的风险控制视角和决策框架,对丰富航班时刻优化理论具有积极意义。在实践应用层面,研究成果可为繁忙机场群的时刻协调与运行管理提供量化依据和决策支持,有助于提升整体运行效能和安全水平。

3) 未来研究可进一步扩展模型,系统融入基于冲突概率、冲突强度或容量动态变化的安全性评估指标,实时反馈与控制航班时刻微调过程中的系统安全态势。同时,通过引入多维权重机制,结合情境特征灵活调整各方利益优先级,提高模型在实际应用中的适应性和智能性,为我国机场群运行管理提供更科学、高效与安全的决策支持。

参 考 文 献

- [1] ZOGRAFOS K G, SALOURAS Y, MADAS M A. Dealing with the efficient allocation of scarce resources at congested airports[J]. *Transportation Research Part C*, 2012, 21(1):244-256.
- [2] JACQUILLAT A, ODoni A R. An integrated scheduling and operations approach to airport congestion mitigation[J]. *Operations Research*, 2015, 63(6):1390-1410.
- [3] JACQUILLAT A, VAZE V. Interairline equity in airport scheduling interventions[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4):941-964.
- [4] 严宇,熊静. 基于改进飞蛾扑火算法的机场航班时刻衔接优化[J]. *物流科技*, 2020, 43(12):91-94.
YAN Yu, XIONG Jing. Time connection optimization of airport flights based on improved moth-flame optimization algorithm[J]. *Logistics Sci-Tech*, 2020, 43(12):91-94.
- [5] 陈肯,刘杨,钟建华,等. 基于基尼系数的航班时刻优化[J]. *航空计算技术*, 2021, 51(6):4-8.
CHEN Ken, LIU Yang, ZHONG Jianhua, et al. Flight schedule optimization based on gini coefficient[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2021, 51(6):4-8.
- [6] 水笑雨,王艳军,王子明,等. 考虑机场公平性的机场群航班时刻分配[J]. *航空学报*, 2023, 44(8):165-181.
SHUI Xiaoyu, WANG Yanjun, WANG Ziming, et al. Slot allocation of multi-airport system considering airport fairness[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(8):165-181.
- [7] 吴慎之,王子明,杭旭,等. 机场群航班时刻表优化方案研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2022, 20(4):136-146.
WU Shenzhi, WANG Ziming, HANG Xu, et al. Optimization schemes for schedules intervention in a multi-airport system[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2022, 20(4):136-146.
- [8] ANDROUTSOPOULOS K N, MANOUSAKIS E G, MADAS M A. Modeling and solving a bi-objective airport slot scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 284(1):135-151.
- [9] 汪梦蝶. 机场航班时刻资源优化配置研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2023.
WANG Mengdie. Research on configuration of airport flight schedule resources optimization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [10] 胡明华,裔田园,任禹蒙. 基于改进匈牙利算法的机场航班时刻优化研究[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(7):2 040-2 048.
HU Minghua, YI Tianyuan, REN Yumeng. Optimization of airport slot based on improved hungarian algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(7):2 040-2 048.
- [11] 王兴隆,石宗北,纪君柔. 基于时空特征的终端区多机场航班时刻优化[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(11):47-84.
WANG Xinglong, SHI Zongbei, JI Junrou. Optimization of multi-airport flight schedule in terminal area based on

spatiotemporal characteristics[J]. Computer Simulation, 2022, 39(11):47-84.

[12] 李善梅,周相志. 基于 S2S-CNN-GRU 的机场离港航班延误预测[J]. 中国安全科学学报,2023,33(8):93-100.

LI Shanmei, ZHOU Xiangzhi. Prediction of airport departure delay based on S2S-CNN-GRU[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(8):93-100.



作者简介: 任杰 (1983—),男,山东平原人,博士研究生,讲师,研究方向为空中交通流量管理、航班时刻优化。E-mail:jren@cauc.edu.cn。

2026 年《中国安全科学学报》征订启事

Ei Compendex 收录期刊 Scopus 数据库收录期刊

中国科技期刊卓越行动计划入选期刊

安全科学领域高质量科技期刊分级目录 T1 级

美国化学文摘社(CAS)数据库收录期刊

CSCD 核心期刊

全国中文核心期刊

中国科技核心期刊

WJCI 报告 Q2 区期刊

学术性

权威性

应用性

信息性

国内外公开发行人

立足安全科技前沿

服务国家重大需求

本刊竭诚为从事安全生产、应急管理、职业安全与卫生、防灾防损、个体防护等方面的专业人员,为注册安全工程师、科研人员、管理干部、安检人员,为高等院校有关师生,为与安全科学技术有关的专家、学者以及职业安全健康中介机构的评价师等服务。刊登主要内容有:

- 1) 安全科学基础理论和学科建设探讨,国内外安全科学进展及评述,新学科的创建及理论。
- 2) 防尘、防毒、噪声与振动控制、辐射防护、个体防护、锅炉与压力容器、防火防爆、矿业工程、机电等安全工程与职业卫生工程方面的新见解、新理论、新成果。
- 3) 矿业、冶金、建筑、交通、石化工业、能源、航空航天工业、江河海运、公路铁路运输、军工及火炸药产业、机械、水利电力、电子信息产业、有害物质储运、保险等领域的安全与卫生工程实践的新见解、新方法、新成果。
- 4) 安全系统工程、安全人机工程、安全管理科学、安全信息科学、安全人体工程学。
- 5) 安全经济学、安全教育学、安全心理学、安全生理学、安全思维学、安全行为学、安全风险学。
- 6) 应急救援、应急管理、防灾减灾、消防安全的理论与实践研究。
- 7) 安全监察理论及实践,安全伦理学,安全法学,现有安全生产、职业卫生方面的法律、法规、条例及标准研究。
- 8) 新技术应用在能量转换、交通运输、人为排放物质等领域风险辨识、风险评估、风险控制、风险后的平复等理论和实践,风险中人的作用研究,重大危险源的评估理论及实践。
- 9) 企业安全生产管理及企业(行业)安全与健康评价理论的探讨及实践,企业安全文化、职业安全健康管理體系等。
- 10) 安全文化、安全哲学、安全史学、安全社会学的研究与实践。

《中国安全科学学报》(CN 11-2865/X;ISSN 1003-3033;CODEN ZAKXAM),全年 12 期,每月底出刊,大 16 开本,国内每册售价 40.00 元,全年 480.00 元。

【订阅方法】下载征订回执单(见附件),按要求填写清楚后发送至编辑部邮箱。

联系人:秦繁华

电话:86-10-64464783

电子信箱:csstlp@263.net

网址:www.cssjj.com.cn

【银行汇款】户名:中国职业安全健康协会

账号:0200006309026400165

开户行:中国工商银行股份有限公司北京惠新支行