

DOI:10.11918/202410045

# 枢纽机场港湾区航空器编组推出优化方法

寇伟彬<sup>1</sup>, 曹悦<sup>2</sup>, 张世杰<sup>1</sup>, 刘畅<sup>3</sup>

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 北京工业大学 城市交通学院, 北京 100083;  
3. 中国铁路经济规划研究院有限公司 运输研究所, 北京 100038)

**摘要:** 为改善机场港湾区航空器传统推出模式下推出效率低与机位资源利用率不充分的问题, 提出考虑尾流吹袭影响的机场港湾区航空器编组推出方法。考虑港湾区机坪特殊结构、港湾区航空器推出方式与航空器尾流吹袭的影响, 确定港湾区航空器编组推出的流程与模式, 定义航空器“极限推出间距”的概念, 建立不同场景下航空器尾流吹袭影响范围与影响程度的量化约束条件。综合考虑编组策略、推出策略与牵引策略的前提下, 建立考虑最小化航空器编组时间与推出时间的港湾区航空器编组推出优化模型。由于模型为复杂非线性规划模型, 求解难度较大, 开发两阶段线性迭代算法进行求解。最后以天津滨海国际机场实例开展案例分析, 划分港湾区分区并标定模型中的特定参数, 优化结果表明: 较传统单一推出模式, 现状年与2030规划年优化后的编组推出策略使所有航空器的总推出时间分别下降17.48%与33.56%, 进一步考虑航班量减少50%与增加50%的两种场景, 可以得出航空器编组推出的优化效果随航空器推出架次的增加不断提升。研究成果将对大型枢纽机场港湾区航班推出效率的改善与机坪容量的提升提供决策支持。

**关键词:** 航空运输; 机场港湾区; 航空器编组; 牵引车辆调度; 线性化算法; 编组推出

中图分类号: V355.2; U8

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)11-0124-10

## Optimization method of aircraft grouping pushback in hub airport harbor apron areas

KOU Weibin<sup>1</sup>, CAO Yue<sup>2</sup>, ZHANG Shijie<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>3</sup>

(1. School of Traffic Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
2. College of Metropolitan Transportation, Beijing University of Technology, Beijing 100083, China;  
3. Department of Transportation Research, China Railway Economic and Planning Research Institute Co., Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** To address the inefficiencies of pushback operation and the inadequate utilization of stand resources under traditional pushback mode in airport harbor areas, a grouping-based aircraft pushback method considering wake turbulence is proposed. Considering the special apron layout of harbor areas, the pushback modes of aircraft, and the effects of wake turbulence, the process and pattern for grouping-based aircraft pushback operations are established. The concept of "ultimate pushback spacing" is defined, and quantitative constraints are formulated for the scope and severity of wake turbulence impacts under different scenarios. By integrating grouping strategies, pushback strategies, and towing strategies, an optimization model for grouping-based aircraft pushback in harbor apron areas is developed, aiming to minimize the total aircraft grouping and pushback times. Due to the complexity of the nonlinear programming model, a two-stage linear iterative algorithm is designed to solve it. Finally, a case study based on Tianjin Binhai International Airport is conducted. The harbor area is divided into different zones, and specific parameters in the model are calibrated. The optimization results indicate that compared to the traditional single pushback mode, the optimized grouped pushback strategy reduces the total pushback time of all aircrafts by 17.48% in the current year and by 33.56% in the planed year 2030. Furthermore, under two additional scenarios that flights are reduced by 50% and increased by 50% respectively, it is indicated that the optimization effect of grouped pushback method consistently improves with growing number of aircrafts. The findings provide decision-making support for enhancing flight pushback efficiency and apron capacity in the harbor areas of large hub airports.

**Keywords:** air transport; airport harbor area; aircraft grouping; traction vehicle scheduling; linearization algorithm; grouping pushback

收稿日期: 2024-10-21; 录用日期: 2024-11-28; 网络首发日期: 2025-08-04

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250801.1720.012>

基金项目: 国家自然科学基金(52402413); 中国民航大学科研启动金(2020KYQD43)

作者简介: 寇伟彬(1990—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师

通信作者: 寇伟彬, wbkou@cauc.edu.cn

当前许多大型枢纽机场由于在规划设计之初未充分的考虑航空器场面运行与推出效率,因此在建成后由于航站楼特殊的构型而产生了众多的港湾机坪区域。受大湾区物理构型及航空器尾流吹袭的影响,为保障安全性,目前大多数机场的港湾区采用传统单一航空器推出方式(后文简称传统方式),即同一时间区间内一次只能有一架航空器推出,进而导致港湾区航空器推出普遍存在推出效率低、延误概率高、排队拥堵等问题,并已成为制约整个飞行区场面高效运行的瓶颈<sup>[1]</sup>。因此,提升枢纽机场港湾区航空器推出效率具有重要的现实意义。

在既有研究中,提升机坪容量是改善机坪运行效率的重要手段,国内外学者在利用机位占用时间计算机坪容量的基本模型基础上,研究分析停机坪容量的影响因素设置,包括航班延误与机型比例<sup>[2]</sup>、峰谷航班数量<sup>[3]</sup>、机翼长度<sup>[4]</sup>、机位分配<sup>[5]</sup>等,采用数学分析与模拟仿真等方法<sup>[6-7]</sup>量化上述因素,并在设置多元约束条件的前提下建立并优化机位容量评估模型,而后在此基础上通过包络线分析<sup>[8]</sup>、集成 DEMATEL-ISM 模型<sup>[9]</sup>等方法评估分析港湾区运行效率的提升效果。姜雨等<sup>[10]</sup>考虑机坪保障车辆因素对机坪容量的影响,分析保障车辆的运行模式,通过对保障车辆进行双阶段调度提高机坪容量。包丹文等<sup>[11]</sup>分析不确定事件对机坪容量产生影响,设计考虑机坪分区的混合策略运行机制,减少牵引车辆运行与响应时间,以此提高机坪容量。此外,还有学者通过牵引计划与航班推出调度优化的方式来提升机坪的运行效率<sup>[12]</sup>。

上述研究多关注提升机坪的总体容量与服务能力,然而对于枢纽机场港湾区,传统方式的局限使得航空器推出过程并不能最大限度的发挥机坪的服务能力,因此部分学者在开展采用流程优化<sup>[13]</sup>、推出过程模拟仿真<sup>[14]</sup>、推出效率动态评估<sup>[15]</sup>等方法的前提下,进一步提出了港湾区航空器编组推出的理念,即在保障安全的前提下采用多架航空器先编组、再集中推出的方式以提升机坪运行效率。唐小卫等<sup>[16]</sup>考虑将不能同时推出航空器编为同组设置共用停止点,建立航空器运行时间最短为目标的停止点优化模型,得出最优推出点坐标。杨太阳等<sup>[17]</sup>通过量化港湾区结构参数及相关因子后,设置判别式,通过滑动时间窗与频谱分析算法得出编组方案。李润等<sup>[18]</sup>提出同进同出的港湾区运行模式,对运行规则相似的航空器进行编组,优化港湾区航空器规则,使航空器能够同时推出。上述研究多基于经验提出航空器编组推出模式步骤、运行规则等进行优化,缺少通过系统的数学建模给出最优编组方案、推出计

划等运行调度的具体方案。此外,研究中缺少对港湾区运行核心安全因素尾流吹袭影响的量化建模分析,因此很难在精确刻画尾流吹袭影响的前提下根据不同的场景提出科学的推出方案。

本研究从天津滨海国际机场港湾区航空器编组推出优化出发,分析尾流吹袭影响模式,定义航空器“极限推出间距”的概念,建立多种场景下航空器尾流吹袭量化分析模型,考虑港湾区航空器推出作业过程中的牵引车保障能力与调度计划的限制,建立基于编组策略的港湾区航空器推出优化模型,并通过实际案例验证模型对港湾区运行效率提升作用。

## 1 问题的描述与建模

### 1.1 问题描述

航空器编组推出是指将航空器按间隔距离、航班计划表等因素编入不同编组,并根据前序牵引车辆所在位置指派牵引车辆服务编组内航空器,实现作业过程中航空器同时空推出,最终通过建立最优化模型给出最优的编组计划、推出计划及牵引作业计划,提升整体港湾区航空器推出效率,航空器编组推出流程示意如图 1 所示,以牵引车 1 为例,牵引车从牵引车临时停车点出发,  $T_1$  时刻牵引车辆服务编组 1 中的 4 号航空器,等待编组 1 中航空器全部推出港湾区后的  $T_2$  时刻,牵引车辆行驶抵达下一编组中距离航空器 4 最近的航空器 3 号,行驶过程用时  $t_{jk}$ ,牵引 3 号航空器推出机位,等待该编组内航空器全部推出机位后,此时若牵引车辆无服务对象,则行驶回牵引车辆临时停车点进行停放。

### 1.2 港湾区航空器尾流吹袭影响量化分析

在机场港湾区内,航空器由牵引车牵引至机坪滑行道,当驾驶员发动发动机产生后推力离开机坪时,发动机会向后在一定范围内产生存在异物碎片的排气(尾流吹袭)并影响范围内的其他航空器或特种车辆<sup>[19]</sup>,如图 2 所示,航空器“慢车”推出时尾流吹袭尾部范围影响可达  $30.5 \text{ m}$ <sup>[20]</sup>,同时民航局颁布的如《运输机场机坪运行管理规则》等规范中均对航空器地面运行及尾流吹袭作了严格规定<sup>[21-22]</sup>。为量化航空器尾流吹袭的影响进而保障航空器编组推出的安全性,根据航空器停放的机头朝向、在机坪上滑行方向以及尾流吹袭影响的差异性<sup>[17]</sup>,本研究将港湾区划分为 3 个区域,如图 3 所示,分区 1 和分区 3 表示港湾区两侧机位,分区 2 表示港湾区尽头机位。根据不同分区航空器编组推出过程的运行特征,确定不同编组方式下的 4 种尾流吹袭场景,建立尾流吹袭影响量化表达式。

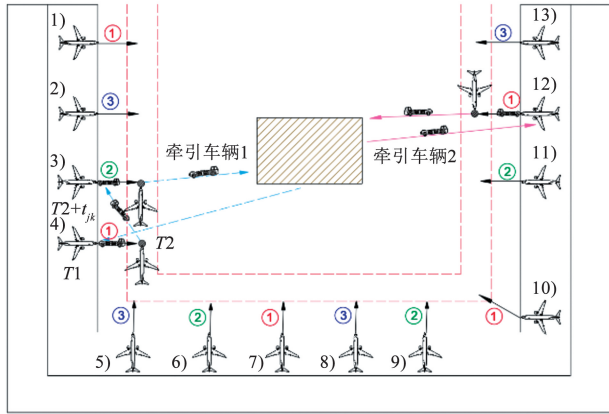
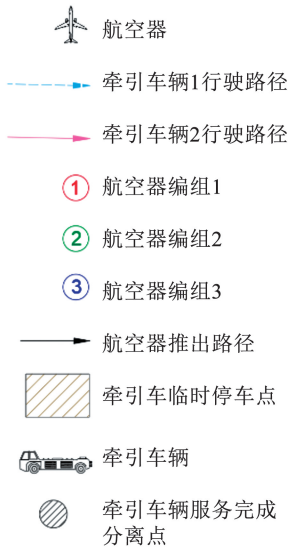


图 1 航空器编组推出流程示意

Fig. 1 Aircraft formation roll out process diagram

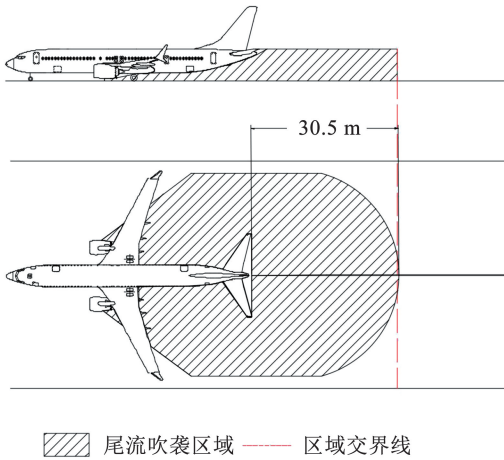


图 2 尾流吹袭影响区域示意

Fig. 2 Schematic of the area affected by the wake blowout

1. 2. 1 场景 1(同分区同向推出)

如图 4 所示,编组内航空器位于同一分区且推出方向一致,该状态下尾流吹袭所造成的影响即为

前架次航空器对后架次航空器的尾流影响范围,尾流吹袭的影响约束为

$$\begin{aligned}
 (x_{ij}x_{ik}) \cdot P1_{jk} &\leq H_{jk}, \\
 P1_{jk} &= D_{jk} + L_j, \\
 \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N, j \neq k
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

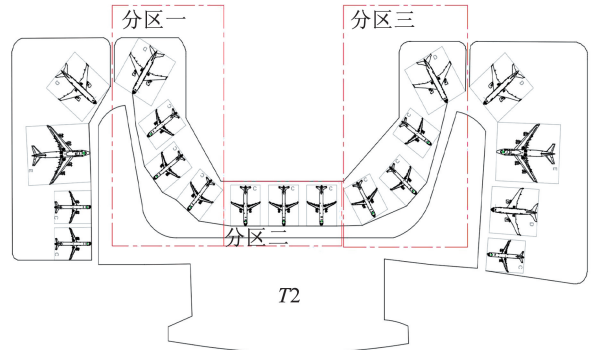


图 3 港湾区分区示意

Fig. 3 Schematic diagram of the U-shaped zone

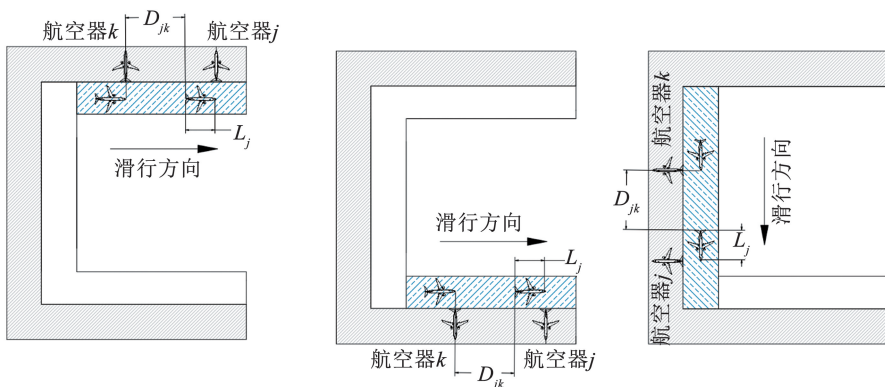


图 4 同分区同向推出示意

Fig. 4 Schematic diagram of the same partition in the same direction

1.2.2 场景 2(相邻分区同向推出)

如图 5 所示, 编组内航空器位于港湾区内的异侧相邻的不同分区内, 且后序航空器滑行会经过前序航空器的滑行路径同向滑行, 前序架次航空器的尾流会影响后续架次航空器, 该情景下航空器尾流吹袭影响为

$$\begin{aligned} (x_{ij}x_{ik}) \cdot P2_{jk} &\leq H_{jk}, \\ P2_{jk} &= D_{jk} + L_j + \frac{1}{2}W_k, \\ \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N, j \neq k \end{aligned} \quad (2)$$

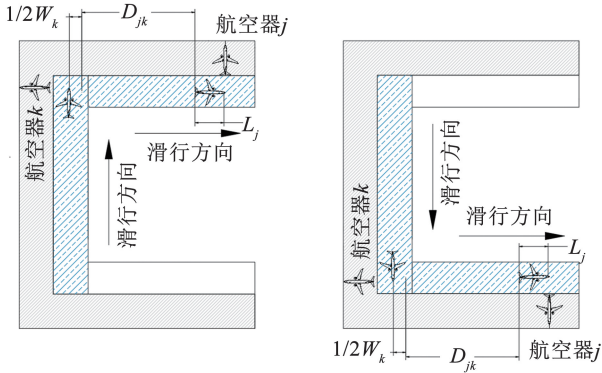


图 5 相邻分区同向推出示意

Fig. 5 Schematic diagram of simultaneous rollout of adjacent partitions

1.2.3 场景 3(相邻分区异向推出)

如图 6 所示, 编组内航空器位于港湾区内相邻

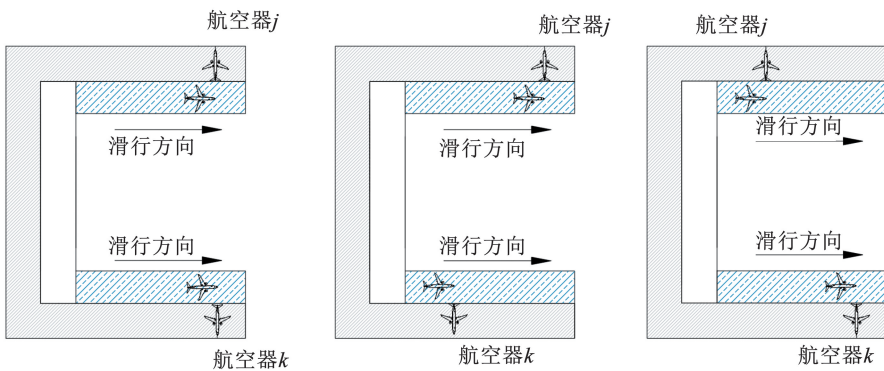


图 7 间隔分区推出示意

Fig. 7 Schematic diagram of the interval partition rollout

1.3 模型假设

模型的假设条件如下: 1) 同机位类型航空器撤离轮挡至滑行离开港湾区时间相同; 2) 每辆牵引车服务每架航空器的流程一致; 3) 每架航空器指派且仅指派一辆牵引车对其进行牵引推出服务; 4) 若下一编组不使用牵引车, 则牵引车自行行驶到临时停放点。

1.4 模型建立

模型中存在的所有变量与参数如表 1 所示。建

的不同分区内, 且后序滑行器不经过前序航空器的滑行路径逆向滑行, 该状态下尾流吹袭所造成的影响即为前架次航空器对后架次航空器的尾流影响范围, 航空器尾流吹袭影响为

$$\begin{aligned} (x_{ij}x_{ik}) \cdot P3_{jk} &\leq H_{jk}, \\ P3_{jk} &= D_{jk} + L_j + W_k, \\ \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N, j \neq k \end{aligned} \quad (3)$$

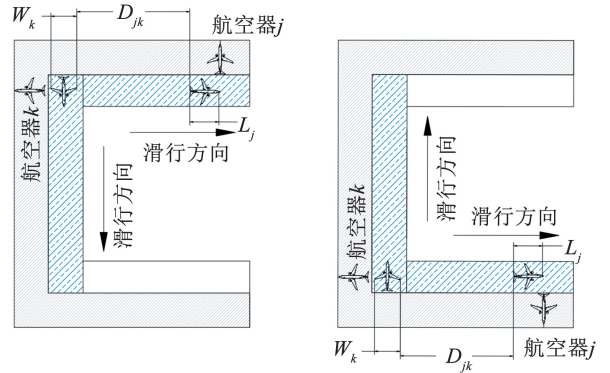


图 6 相邻分区异向推出示意

Fig. 6 Schematic diagram of the different pushout of adjacent partitions

1.2.4 场景 4(间隔分区推出)

如图 7 所示, 编组内航空器位于港湾区内的不相邻的不同分区内, 该编组场景下两架航空器编组推出时不会互相影响。

立基于编组策略的港湾区航空器推出与牵引作业计划联合优化模型, 优化目标考虑航空器完成编组、推出的整个过程中, 航空器编组推出与牵引车作业的总时间最短<sup>[23]</sup>, 得到模型如下:

$$\min z = \sum_{i \in G} (\max_{j \in N} (x_{ij} \text{serv}_j)) + \sum_{i \in G, \forall j \in G_i, k \in G_{i+1}} (Y_{jk} t_{jk}) \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i \in G} x_{ij} = 1, \forall j \in N \quad (5)$$

表 1 模型变量与参数

Tab.1 Model variable and parameter

类型	符号	含义
集合	$N, j, k \in N$	航空器编号集合, 其中 $j, k$ 表示航空器编号
	$G, i \in G$	编组序号集合, 其中 $i$ 表示编组序号
	$N_i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$	编组 $i$ 中航空器编号集合
决策变量	$x_{ij}$	0~1 变量, 表示编组 $i$ 中是否存在航空器 $j$
	$Y_{jk}$	0~1 变量, 表示牵引车服务完航空器 $j$ 后是否服务航空器 $k$
	$serv_j$	航空器 $j$ 撤离挡板至滑出港区所需的总时间
	$Pn_{jk}$	场景 $n$ 下的航空器 $j$ 与 $k$ 考虑尾流吹袭的极限推出间距
	$t_{jk}$	牵引车辆服务完航空器 $j$ 的分离点到航空器 $k$ 所在机位所需时间
	$t_j$	航空器 $j$ 离港的最早时间
	$l_j$	航空器 $j$ 离港的最迟时间
	$x_j$	航空器 $j$ 所在位置的横坐标
	$y_j$	航空器 $j$ 所在位置的纵坐标
	$S_{jk}$	航空器 $j$ 与 $k$ 之间的安全距离间隔
参数	$f_i$	编组 $i$ 中的航空器架次数量
	$Q_{i,i+1}$	编组 $i$ 中航空器数量是否大于编组 $i+1$ 中航空器数量
	$D_{jk}$	航空器的 $j$ 尾流吹袭影响范围的最大半径
	$L_j$	航空器 $j$ 的机身长度
	$W_k$	航空器 $k$ 的机翼宽度
	$H_{jk}$	航空器 $j$ 与航空器 $k$ 机位停止点间的距离
	$E_{jk}$	航空器 $j$ 与航空器 $k$ 之间的距离
	$C$	机场港区中牵引保障车数量
	$M$	表示一个足够大的数

$$\max_{j \in N} (x_{ij} t_j + serv_j) x_{ij} \leq l_j, \forall i \in G \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} \leq C, \forall i \in G \quad (7)$$

$$f_i - f_{i+1} \leq M Q_{i,i+1}, \forall i \in G \quad (8)$$

$$f_{i+1} - f_i \leq M(1 - Q_{i,i+1}), \forall i \in G \quad (9)$$

$$Q_{i,i+1} \leq \sum_{k \in G_{i+1}} Y_{jk} \leq 1, \forall i \in G, \forall j \in G_i \quad (10)$$

$$1 - Q_{i,i+1} \leq \sum_{j \in G_i} Y_{jk} \leq 1, \forall i \in G, \forall k \in G_{i+1} \quad (11)$$

式(5)表示航空器  $j$  仅能够分配到一个编组中进行推出, 防止同架航空器重复编组; 式(6)表示编组内航空器最晚推出时间需早于航空器最早需离港时间; 式(7)表示编组  $i$  内航空器推出的数量需少于保障车辆数量; 式(8)与式(9)赋予 0~1 变量  $Q_{i,i+1}$  含义, 使其表示编组  $i$  中存在航空器数量大于或小于编组  $i+1$  中航空器数量; 式(10)表示在前序编组中航空器数量大于后序航空器中编组数量的情况下保证后序航空器所使用牵引车均由前序编组中的航空器进行指派; 式(11)表示前序编组中航空器数量小于后序航空器中编组数量的情况下保证前序编组

中航空器使用的牵引车均被指派到后序编组中保障航空器的推出作业。

## 2 算法实现

式(1)~(4)和式(6)中均存在非线性结构, 若直接对该非线性规划问题进行求解难度较大, 因此本文运用线性迭代的思想, 通过多次线性换元与线性迭代等方式将非线性规划问题转化为线性规划问题进行求解。

### 2.1 第 1 阶段线性化

式(1)中包含非线性化结构  $x_{ij} x_{ik}$  属于两个 0~1 变量的乘积, 利用 0~1 变量  $c1_{jk}$  代替  $x_{ij} x_{ik}$  并构造辅助条件如下:

$$c1_{jk} \leq x_{ij}, \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (12)$$

$$c1_{jk} \leq x_{ik}, \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (13)$$

$$c1_{jk} \geq x_{ij} + x_{ik} - 1, \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (14)$$

当  $x_{ij} = 1, x_{ik} = 1$ , 根据式(12)、(13)有  $c1_{jk} \leq 1$ , 根据式(14)有  $c1_{jk} = 1$ , 即  $c1_{jk} = 1$ ; 当  $x_{ij} = 1, x_{ik} = 0$ ,  $x_{ij} = 0, x_{ik} = 1$  时, 根据式(12)、(13)有  $c1_{jk} \leq 0$ , 根据式(14)有  $c1_{jk} \geq 0$ , 即  $c1_{jk} = 0$ ; 当  $x_{ij} = 0, x_{ik} = 0$  时, 根据

式(12)、(13)有 $c1_{jk} \leq 0$ , 根据式(14)有 $c1_{jk} \geq 0$ , 即 $c1_{jk} = 0$ 。因此 $x_{ij}x_{ik}$ 的非线性结构可以用 $c1_{jk}$ 及对应的约束条件代替。将线性化后结果代入式(1)后, 可得

$$c1_{jk}Pn_{jk} \leq H_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (15)$$

式中 $Pn_{jk}$  ( $n=1,2,3$ ) 表示第 $n$ 个场景下的尾流吹袭极限推出间距。

## 2.2 第 2 阶段线性化

经过第 1 阶段线性化, 式(15)中包含非线性结构 $c1_{jk}Pn_{jk}$ 属于 $0 \sim 1$ 变量与整数变量乘积, 引入辅助连续非负变量 $c2_{jk}$ 与任意实数 $M$  ( $M \geq 0$ ), 并构造辅助条件。

$$Pn_{jk} - M(1 - c1_{jk}) \leq c2_{jk} \leq Pn_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (16)$$

$$c2_{jk} \leq Mc1_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (17)$$

当 $c1_{jk} = 1$ 时, 根据式(16)有 $Pn_{jk} \leq c2_{jk} \leq Pn_{jk}$ , 所以有 $c2_{jk} = Pn_{jk}$ ; 当 $c1_{jk} = 0$ 时, 根据式(17)有 $c2_{jk} \leq 0$ , 所以 $c2_{jk} = 0$ 。同时由于 $c2_{jk} \geq 0$ , 有 $c1_{jk} \geq 1$ 。因此 $P1_{jk}c1_{jk}$ 的非线性结构辅助约束条件代替, 将线性化后结果代入式(17)后如式(18)所示。

$$c2_{jk} \leq H_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (18)$$

此时该约束条件已转化为线性化约束, 同理按照上述方法对非线性结构类似的式(2)、(3)进行线性化。式(4)中包含非线性结构 $x_{ij}serv_j$ 与 $Y_{jk}t_{jk}$ 属于 $0 \sim 1$ 变量与整数变量的乘积, 同理式(1)线性化过程, 可得

$$\min z = \sum_{i \in N} (\max_{j \in N} (z1_{ij})) + \sum_{i \in G} z3_i \quad (19)$$

此外, 式(19)中包含非线性化结构 $\max_{j \in N} (z1_{ij})$ , 利用连续非负变量 $z2_i$ 代替该结构, 引入辅助变量 $u_j$ 与实数 $M$  ( $M \geq 0$ ), 构造辅助条件:

$$z1_{ij} \leq z2_i, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (20)$$

$$z2_i \leq z1_{ij} + (1 - u_j)M, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (21)$$

$$\sum_{j \in N} u_j \geq 1, u_j \in \{0, 1\} \quad (22)$$

当 $u_j = 1$ 时, 根据式(20)有 $z1_{ij} \leq z2_i$ , 又因式(21)可知 $z2_i \leq z1_{ij}$ , 所以此时 $z2_i = z1_{ij}$ 。当 $u_j = 0$ 时, 根据式(20)有 $z2_i \leq M$ , 即只有限制条件 $z1_{ij} \leq z2_i$ 。因此 $\max_{j \in N} (z1_{ij})$ 的非线性结构可以用 $z2_i$ 及对应的约束条件代替, 将线性化后结果代入式(19)后如式(24)所示。

$$\min z = \sum_{i \in G} z2_i + \sum_{i \in G} z3_i \quad (23)$$

最后, 同理对式(6)进行线性化, 经线性化后整个模型均转化为线性模型, 如下所示。

$$\min z = \sum_{i \in G} z2_i + \sum_{i \in G} z3_i, \forall j \in G, \forall k \in G_{i+1} \quad (24)$$

$$serv_j - M(1 - x_{ij}) \leq z1_{ij} \leq serv_j, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (25)$$

$$z1_{ij} \leq Mx_{ij}, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (26)$$

$$z1_{ij} \leq z2_i \leq z1_{ij} + (1 - u_j)M, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (27)$$

$$\sum_{j \in N} u_j \geq 1, u_j \in \{0, 1\} \quad (28)$$

$$t_{jk} - M(1 - Y_{jk}) \leq z3_i \leq t_{jk}, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (29)$$

$$z3_i \leq MY_{jk}, \forall i \in G_i, \forall k \in G_{i+1} \quad (30)$$

$$c2_{jk} \leq H_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (31)$$

$$x_{ij} + x_{ik} - 1 \leq c1_{jk} \leq x_{ij}, \forall i \in G, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (32)$$

$$Pn_{jk} - M(1 - c1_{jk}) \leq c2_{jk} \leq Pn_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (33)$$

$$c2_{jk} \leq Mc1_{jk}, \forall j \in N, \forall k \in N \quad (34)$$

$$s4_{ij} \leq l_j, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (35)$$

$$t_j - M(1 - x_{ij}) \leq s1_{ij} \leq t_j, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (36)$$

$$s1_{ij} \leq Mx_{ij}, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (37)$$

$$s1_{ij} + serv_j \leq s2_i \leq s1_{ij} + serv_j + (1 - u_{1j})M, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (38)$$

$$\sum_{j \in N} u1_j \geq 1, u1_j \in \{0, 1\} \quad (39)$$

$$s2_{ij} - M(1 - x_{ij}) \leq s4_{ij} \leq s2_i, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (40)$$

$$s4_{ij} \leq Mx_{ij}, \forall i \in G, \forall j \in N \quad (41)$$

线性化后的模型可直接用 Gurobi 商用求解器直接进行求解。

## 3 实例分析

### 3.1 实例背景

本文选取天津滨海国际机场作为案例, 选取东二区、东三区、东四区港湾区内某天 36 个离港航班数据作为港湾区航空器编组推出优化的实例研究对象, U 型区机位示意如图 8 所示。表 2 为航班计划安排表, 包含航班机位及时间信息, 案例中牵引车在机位之间的行驶速度取  $10 \text{ m/s}^{[24]}$ , 机场机位之间牵引车辆的滑行方式按机场规定车辆路径确定。

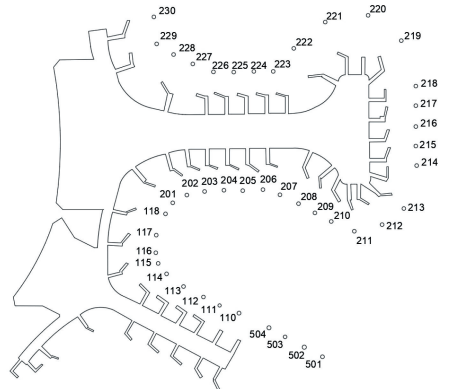


图 8 U 型区机位示意

Fig. 8 Schematic diagram of the U-shape area

表 2 航班计划表

Tab. 2 Flight schedule

航班序号	航空器型号	机位编号	最早推出时间	最迟推出时间	服务时间
1	A321	221	6:10	6:40	3
2	B738	223	6:20	6:50	4
3	B738	224	6:20	6:50	2
4	B738	216	6:20	6:50	5
5	A321	220	6:25	6:55	6
6	B738	229	6:30	7:00	3
7	B738	227	6:30	7:00	4
8	B738	114	6:40	7:10	3
9	B738	117	6:45	7:15	3
∴	∴	∴	∴	∴	∴

表 4 牵引车指派流程

Tab. 4 Tractor assignment

牵引车编号	牵引车航空器序号
①	1→5→14, 13→16, 22→27
②	3→2→11, 15→24
③	6→7→12, 20→18→25→28→29→30→32→35
④	4→17, 33→34→36
⑤	8→9→10→21→19, 23→26

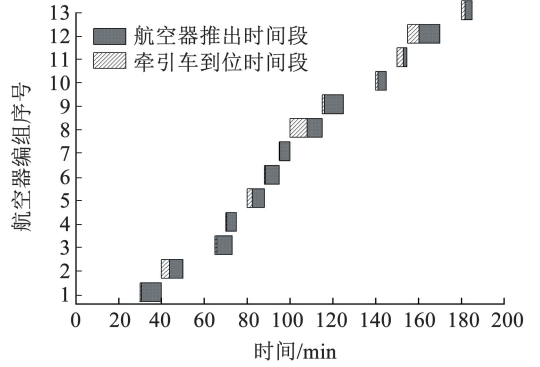


图 9 航空器编组推出时间

Fig. 9 Aircraft launch and traction scheduling timeline

### 3.2 优化结果分析

将上述数据代入模型中运行,得到航空器编组推出方案如表 3 所示,圆圈数字表示牵引车序号,箭头表示航空器牵引推出次序。全部航空器共编为 13 组进行编组推出,派遣 5 辆牵引车。推出牵引车辆的调度方案如表 4 所示,箭头链表示牵引车辆的服务顺序。航空器编组推出时间方案如图 9 所示。

表 3 航空器编组推出方案

Tab. 3 Model optimization formation results

组序	组内航班编号	航空器牵引推出顺序
1	1, 3, 6	—
2	2, 4, 5, 7, 8	①:1→5, ②:3→2, ③:6→7
3	9, 11, 12, 14, 17	②:2→11, ④:4→17, ①:5→14, ③:7→12, ⑤:8→9
4	10	⑤:9→10
5	13, 15, 21	⑤:10→21
6	16, 19, 20, 24	①:13→16, ②:15→24, ⑤:21→19
7	18	③:20→18
8	22, 23, 25	③:18→25
9	26, 27, 28	①:22→27, ②:23→26, ③:25→28
10	29	③:28→29
11	30, 33	③:29→30
12	31, 32, 34	④:33→34, ③:30→32
13	35, 36	③:32→35, ④:34→36

优化结果显示,编组推出方案下所有航空器的总推出时间为 92.78 min,而在传统方案下总推出总时长为 109 min,案例中基于编组策略的航空器推出方案可节省时间 16.22 min,推出效率提高了 17.48%。

为进一步分析未来年随着民航业务量的不断发展,航班量上升时航空器编组推出对大湾区运行效率的提升效果,根据天津滨海国际机场总体规划中对 2030 年航班量的预测结果<sup>[25]</sup>可得航班量将会整体提升 130.97%,将数据代入模型中运行,得到航空器编组推出方案如表 5 所示,其中航空器分为 20 组编组进行推出。推出牵引车辆的调度方案如表 6 所示,未来年航空器编组推出优化结果如图 10 所示。

编组推出方案下航班计划中航空器推出总时间为 104.82 min,而在传统推出方案下推出总时长为 140 min,案例中基于编组策略的航空器推出方案可节省时间 35.18 min,大湾区推出效率提高了 33.56%。

虽然原总体规划中预测未来年天津机场航空业务量会大幅度增加,但是近年来受疫情等外部冲击的影响,未来年机场业务量未必会达到原规划中的增加幅度,甚至可能出现下降的情况。为模拟可能出现的波动情况,进一步选取航空器架次分别减少 50% 与增加 50% 的场景(场景 1、场景 2),模型优化效果如表 7 所示。当航空器架次减少 50% 时,优化效果为 11.48%,当航空器架次增加 50% 时,优化效果为 32.98%。可以看出,随着航空器架次的上升,采用编组推出的总优化效果也随之增加。

表 5 模型优化结果

Tab.5 Model optimization results

组号	航空器编组序号	航空器牵引推出顺序
1	1,7,10,14	—
2	2,3,5,6	①:1→5,②:7→3,③:10→6,④:14→2
3	4,9,12,15,16	④:2→15,②:3→4,①:5→12,③:6→16
4	8,13	⑤:9→8,①:12→13
5	11,18,20	⑤:8→18,①:13→20
6	17,19,21,24	②:11→24,⑤:18→17,①:20→19
7	22,23,31,32	⑤:17→22,①:19→31,③:21→32,②:24→23
8	25,28,35	④:22→28,②:23→25,③:32→35
9	26,27,29,30,33	②:25→29,④:28→27,③:35→30
10	34,39,40,41	⑤:26→40,②:29→39,③:30→34,①:33→41
11	36,37,38,42	③:34→42,②:39→36,⑤:40→37,①:41→38
12	43,44,49,51,53	②:36→43,⑤:37→49,①:38→53,③:42→51
13	45	④:43→45
14	46,48,50,54	④:45→48
15	47,52	④:48→47,③:54→52
16	55,56,58,59	④:47→58,③:52→55
17	57,61,62,63,64	③:55→63,②:56→61,④:58→57,①:59→64
18	60,65	⑤:62→65,①:64→60
19	66	①:60→66
20	67,68	①:66→67

表 6 牵引车指派流程

Tab.6 Tractor assignment

牵引车辆编号	牵引车航空器序号
1	1→5→12→13→20→19→31,33→41→38→53,59→64→60→66→67
2	7→3→4,11→24→23→25→29→39→43,56→61
3	10→6→16,21→32→35→30→34→42→51,54→52→55→63
4	14→2→15,22→28→27,43→45→48→47→58→57
5	9→8→18→17→22,26→40→37→49,62→65

表 7 不同航空器架次优化结果

Tab.7 Optimization results of different aircraft movements

推出方案	min			
	推出总时间 (场景 1)	推出总时间 (现状)	推出总时间 (场景 2)	推出总时间 (2030 年)
编组方案	66.51	92.78	99.27	104.82
传统方案	74	109	132	140

3.3 算法对比分析

为验证线性迭代算法的准确度,引入遗传算法进行求解并开展效果对比分析。图 11 为遗传算法收敛图,设定种群大小为 100,终止进化代数设定为 200,交叉概率设定为 0.8,变异概率设定为 0.1,遗传算法方案下所有航空器的总推出时间为 97.03 min,

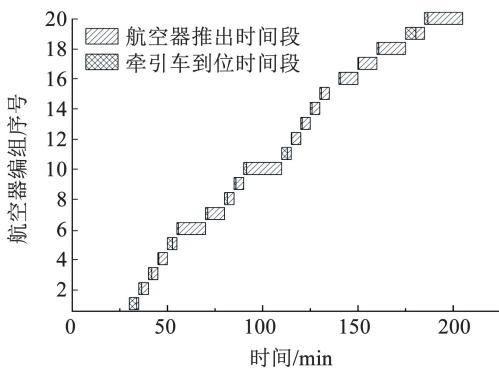


图 10 未来年航空器编组推出优化结果

Fig. 10 Optimization results of aircraft grouping pushback in the future year

线性迭代算法目标函数值更小,因此本文所提出的阶段线性迭代算法相较于传统启发式算法在求解性能上具备优势。

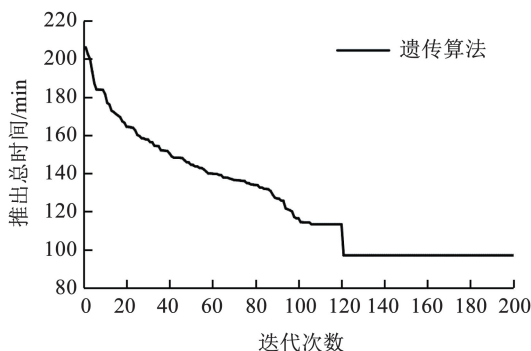


图 11 遗传算法收敛图

Fig. 11 Convergence diagram of genetic algorithm

## 4 结 论

本文基于港湾机坪航空器编组推出的理念,研究航空器编组推出与牵引保障作业的协同调度问题,构建优化模型,并以天津滨海机场为案例开展研究,所得主要结论如下:

1) 定义航空器“极限推出间距”的概念,考虑编组推出过程中推出模式与航空器运行的差异性,建立 4 种推出场景,量化航空器在港湾区推出及滑行过程中尾流吹袭的影响。

2) 综合考虑港湾区航空器编组推出尾流吹袭影响与牵引车辆的保障约束,建立港湾区航空器的编组推出计划的优化模型,并针对模型的非线性结构采用两阶段线性迭代算法进行求解。

3) 以天津滨海国际机场作为实例验证对象,经模型计算后,采用航空器编组推出的模式,港湾区推出效率提高了 17.48%,且在航空器架次分别减少 50%、增加 50% 与增加 130.97% 的场景下,编组方案较传统方案分别提升了 11.48%、32.98% 与 33.56%,优化效果随推出架次的提升而增加。

本研究重点关注枢纽机场港湾区的航空器推出问题,未考虑普通机位以及混合机位的推出,未来的研究可考虑港湾区及普通机位混合场景下的航空器推出优化。

## 参考文献

[1] 姜伟华, 王雅莎, 姜雨, 等. 面向港湾机坪的停机位指派优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(6): 1072  
JIANG Weihua, WANG Yasha, JIANG Yu, et al. Optimization of gate assignment with harbor apron[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 55(6): 1072. DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.014

[2] DE MEUFVILLE R, ODoni A. Airport systems: planning, design and management[M]. New York: McGraw-Hill, 2003: 424  
[3] MIRKOVIC B. Airport apron capacity estimation-model enhancement[J]. Procedia Social and Behavioral Science, 2011(20): 1108  
[4] MIRKOVIC B, TOSIC V. Apron capacity at hub airports—the impact of wave-system structure[J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(7): 1489  
[5] BISHOP K C, HANSMAN J R. Assessment of the ability of existing airport gate infrastructure to accommodate transport category aircraft with increased wingspan for improved fuel efficiency[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology International Center for Air Transportation, 2013  
[6] 寇伟彬, 于凯任, 王佳玉, 等. 韧性导向的机场航空器滑行路径及停机位联合优化[J/OL]. 北京航空航天大学学报. (2024-02-27) [2024-09-02]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0801>  
KOU Weibin, YU Kairen, WANG Jiayu, et al. Resilience-oriented joint optimization of aircraft taxiing route and apron assignment in airport[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. (2024-02-27) [2024-09-02]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0801>  
[7] 熊杰. 枢纽机场近机位分配及其容量计算理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 131  
XIONG Jie. Study on hub airport gates assignment and capacity evaluation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 131  
[8] MIRKOVIC B, TOSIC V. Airport apron capacity: estimation, representation, and flexibility[J]. Journal of Advanced Transportation, 2014, 48(2): 97  
[9] 李明捷, 石荣. 基于集成 DEMATEL-ISM 的机坪容量影响因素分析[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(21): 155  
LI Mingjie, SHI Rong. Analysis of influencing factors of apron capacity based on integrated DEMATEL-ISM[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(21): 155  
[10] 姜雨, 张诗森, 陈名扬, 等. 考虑多车型协同的机坪保障车辆双阶段调度[J/OL]. 北京航空航天大学学报. (2023-09-05) [2024-09-03]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0405>  
JIANG Yu, ZHANG Shimiao, CHEN Mingyang, et al. Two-stage scheduling of apron support vehicles considering multi-vehicle coordination[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. (2023-09-05) [2024-09-03]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0405>  
[11] 包丹文, 陈卓, 姚馨宇, 等. 基于混合策略的机坪车辆主动式实时调度方法[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(3): 251  
BAO Danwen, CHEN Zhuo, YAO Xinyu, et al. Pro-active real-time scheduling approach of apron vehicles based on mixed strategy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(3): 251. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.03.018  
[12] DU J Y, BRUNNER J O, KOLISCH R. Panning towing processes at airports more efficiently[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014(70): 293  
[13] LIU Yonghong, WU Jianjun, TANG Jie, et al. Scheduling optimisation of multi-type special vehicles in an airport[J]. Transportmetrica B: Transport, 2022, 10(1): 954  
[14] 吴浩宁, 郭雁池, 牧彤, 等. 北京新机场站坪滑行道运行模式

- 仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 214  
WU Haoning, GUO Yanchi, MU Tong, et al. Simulation research on taxiway operation mode of Beijing new airport station [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2016, 16(3): 214. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2016.03.032
- [15] 李明捷, 姚霖昊, 何奕帆. 基于范数灰关联-动态功效系数法的机坪 U 型区空间效率评估[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4336  
LI Minjie, YAO Linhao, HE Yifan. Spatial efficiency evaluation of U-shaped apron area based on norm grey correlation and dynamic efficiency coefficient method [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4336
- [16] 高强, 唐小卫, 朱金福. 停机区推出共用停止点设计优化[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(6): 156  
GAO Qiang, TANG Xiaowei, ZHU Jinfu. Design optimization for the shared stop points at aircraft parking area[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2009, 27(6): 156
- [17] 杨太阳, 欧阳杰. 枢纽机场空侧大湾区运行优化研究[J]. 综合运输, 2023, 45(3): 46  
YANG Taiyang, OU Yangjie. Airside cul-de-sac operational optimization in hub-airport [J]. China Transportation Review, 2023, 45(3): 46
- [18] 李润, 梁其钊. 广州白云机场协同运行效能分析与提质增效措施[J]. 民航管理, 2021(5): 52  
LI Run, LIANG Qizhao. Analysis on collaboration effectiveness and measures to improve quality and efficiency in Guangzhou Baiyun Airport[J]. Civil Aviation Management, 2021(5): 52
- [19] 赵宁宁, 陈越, 李晓晨, 等. 航空器尾流重新分类标准的安全性评估方法[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1277  
ZHAO Ningning, CHEN Yue, LI Xiaochen, et al. Sessment method of the aircraft wake vortex re-categorizing standard[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1277. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0105
- [20] CFM International. Training manual CFM56-7B basic engine: CTC-223 Level 3[S]. West Chester, Ohio:CFM International, 2003
- [21] 中国民用航空局. 输机场机坪运行管理规则; 航规[2022]20号 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2019  
Civil Aviation Administration of China. Management rules for apron operations at transport airports; civil aviation regulations [2022] No. 20[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2019
- [22] 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准: MH 5001—2021 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2021  
Civil Aviation Administration of China. Technical standards for civil airport flight zones; MH 5001—2021 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021
- [23] 寇伟彬, 张世杰, 王佳玉. 绿色低碳导向的航班推出策略与牵引作业计划联合优化[J/OL]. 北京航空航天大学学报. (2024-06-28) [2024-09-02]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0192>  
KOU Weibin, ZHANG Shijie, WANG Jiayu. Joint optimization of green low-carbon oriented flight launch strategy and towing operation plan [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. (2024-06-28) [2024-09-02]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0192>
- [24] 祝恒佳, 齐凯, 王立文, 等. 湿滑道面飞机牵引滑行系统纵向动力学建模与制动性能研究[J/OL]. 航空学报, (2024-03-14) [2024-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240313.1051.006.html>  
ZHU Hengjia, QI Kai, WANG Liwen, et al. Research on longitudinal dynamics modeling and braking performance of the towbarless aircraft taxiing system on wet road [J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. (2024-03-14) [2024-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240313.1051.006.html>
- [25] 民航机场设计研究总局有限公司. 天津滨海国际机场总体规划 (2019 年版) [R]. 天津: 天津滨海国际机场, 2020  
Civil Aviation Airport Design and Research Institute Co., Ltd.. Master plan of Tianjin Binhai International Airport (2019 edition) [R]. Tianjin: Tianjin Binhai International Airport, 2020

## 封面图片说明

封面图片来自本期论文“枢纽机场大湾区航空器编组推出优化方法”, 图片为模拟建立的某枢纽机场大湾区内航空器编组推出的场景示意图。在该场景下设计航空器在保证距离的前提下以多架协同的方式编组推出, 提高大湾区的运行效率。编组推出即针对机场大湾区航空器传统推出模式下推出效率低与机位资源利用率不充分的问题, 在考虑大湾区机坪特殊结构、大湾区航空器推出方式与航空器尾流吹袭的影响下, 提出的一种考虑尾流吹袭影响的机场大湾区航空器编组推出方法。为实现该种推出方法, 在综合考虑编组策略、推出策略与牵引策略的前提下, 建立最小化航空器编组时间与推出时间的大湾区航空器编组推出优化模型。通过实例开展案例分析, 划分大湾区分区并标定模型中的特定参数, 优化结果表明: 较传统单一推出模式, 现状年与 2030 规划年优化后的编组推出策略使所有航空器的总推出时间分别下降 17.48% 与 33.56%。由此验证了编组推出策略对枢纽机场大湾区航班推出效率的改善与机坪容量的提升能够提供支持。

(图文提供: 寇伟彬, 曹悦, 张世杰, 刘畅。中国民航大学交通科学与工程学院)