



航空学报  
*Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*  
ISSN 1000-6893, CN 11-1929/V

## 《航空学报》网络首发论文

题目：基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度  
作者：张军峰，游录宝，杨春苇，胡荣  
收稿日期：2020-06-22  
网络首发日期：2020-08-18  
引用格式：张军峰，游录宝，杨春苇，胡荣. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J/OL]. 航空学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200817.1011.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：张军峰，游录宝，杨春苇，等. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 324439. ZHANG J F, YOU L B, YANG C W, et al. Arrival Sequencing and Scheduling based on Multi-objective Imperialist Competitive Algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 324439 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2020.24439

# 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度

张军峰\*, 游录宝, 杨春苇, 胡荣

南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016

**摘要：**为兼顾空管、机场、航司以及民众的不同诉求，提出了基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度方法，达到平衡交通需求与进场管理的目的。首先，借鉴机器调度领域研究成果，梳理与精简进场排序与调度的评价指标，并结合运行约束构建多目标进场排序与调度模型。接着，引入非支配排序，设计多目标帝国竞争算法，给出衡量帕累托解集优劣的评价指标。最后，采用通用数据集与长沙黄花机场实际运行数据实施案例仿真与验证。结果表明，一方面本文提出的多目标帝国竞争算法，相对于带精英策略的非支配排序遗传算法以及多目标模拟退火算法而言，解集更占支配地位、分布更均匀、收敛性更好，求解的效率也更高；另一方面本文提出的方法能有效实现进场排序与调度，即便以标准间隔的1.8倍实施仿真，总延误时间、总飞行时间和最大飞行时间，相对于实际运行分别降低了41.2%，11.4%和8.6%。

**关键词：**空中交通管理；进场管理；多目标优化；帝国竞争算法；点融合系统

中图分类号：V355      文献标识码：A      文章编号：1000-6893 (2021) XX-XXXX-XX

空中交通需求的持续增长与可用空域资源的长期受限，给空中交通管理（Air Traffic Management, ATM）带来了新的机遇与挑战。以我国繁忙机场的终端区运行为例，完全依赖于管制员指令引导的方式，容易导致管制工作负荷激增、机场运行效率降低、环境影响问题突出。因此，如何有效地优化和调度时空资源，成为空中交通管理领域的研究热点，而进场排序与调度是该领域的典型问题。

进场排序与调度旨在不违反安全间隔的条件下，结合运行约束，合理高效地为进场航空器分配着陆跑道，提供最优着陆次序与时间，以期达

到提升跑道容量、减少延误、缓解管制工作负荷的目的<sup>[1]</sup>。历经近30年，进场排序与调度的研究涵盖了静态优化<sup>[2]</sup>与动态优化<sup>[3]</sup>，确定型优化<sup>[4]</sup>与随机型优化<sup>[5]</sup>、单阶段优化<sup>[6]</sup>（直接优化着陆时间）与两阶段优化<sup>[7,8]</sup>（先确定着陆次序再优化着陆时间）、是否提供相应管制建议<sup>[9]</sup>（即优化时间的可达性）等方面，其求解工具或算法包括：CPLEX<sup>[1,7]</sup>、分支定界<sup>[5]</sup>、动态规划<sup>[6]</sup>、模拟退火<sup>[10]</sup>、遗传算法<sup>[13]</sup>、粒子群算法<sup>[12]</sup>等。

对于进场排序与调度问题，各利益相关方秉持不同的诉求：空管立足运行安全，航司着眼效率优先，机场注重容量增强，民众关切准点运行与环境影响。因此，近年来进场排序与调度的研

收稿日期：2020-06-22；退修日期：2020-07-16；录用日期：2020-07-30；网络出版时间：  
网络出版地址：  
基金项目：国家自然科学基金 (U1933117)；南京航空航天大学研究生创新基地（实验室）开放基金 (kfjj20190718)  
\*通讯作者. E-mail: zhangjunfeng@nuaa.edu.cn

究重点由单目标优化逐步转向多目标优化。Hong等<sup>[13]</sup>以总飞行时间和序列变化次数最小化为目标,基于混合整数线性规划对着陆次序和时间进行优化。Sama等<sup>[14]</sup>研究了具有不同目标函数的进场排序与调度问题,并考察了不同性能指标的解决方案之间的差异。Zhang等<sup>[15]</sup>采用基于帕累托支配的多目标模拟退火算法(MOSA),解决了在考虑连续航班运行的条件下,最大化跑道运行能力和最小化飞行延误的进场排序问题。带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)在多目标进场排序与调度研究中应用广泛:Mokhtarimousavi等<sup>[16]</sup>考虑了跑道容量、地面成本和环境成本,基于NSGA-II实现进场排序与调度的多目标优化;马等<sup>[17]</sup>面向延误时间、延误架次和运行公平性的目标,利用NSGA-II求解多目标进场排序与优化;刘等<sup>[18]</sup>在综合考虑空管、航空公司和机场三方的利益需求下,提出一种时隙交换方法,并基于NSGA-II解决不同交通密度情况下的进场排序与调度问题。

上述多目标优化兼顾了诸多利益相关方的诉求,也丰富了进场排序与调度研究的内涵。然而,仍存在两方面问题亟待解决:1)诸多优化目标之间是否存在冗余,优化目标选择能否找到依据;2)如何评价多目标优化的解集,能否在常用的NSGA-II之外寻求更为精准和高效的多目标优化求解算法。本文拟通过将进场排序与调度问题等效于机器调度问题,借鉴机器调度领域的研究成果,为多目标进场排序与调度的目标选择提供依据;进一步,引入非支配排序,基于近年来广泛应用的帝国竞争算法<sup>[19]</sup>,设计多目标帝国竞争算法(Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm, MOICA),解决进场排序与调度问题;最后,基于通用数据集与实际运行数据构建仿真验证的场景,一方面考虑帕累托最优解集的评价指标,对比分析本文提出的MOICA与进场排序与调度领域广泛使用的NSGA-II及MOSA,另一方面考察MOICA在实际管制运行中的优化效能。

## 1 多目标进场调度模型构建

### 1.1 问题等效

进场航空器的排序与调度问题可视为机器调度问题<sup>[20,21]</sup>:跑道为机器,进场航空器为工件,其进入终端空域的时间等效于工件的出现时间,

航空器的最早、最晚以及计划到达时刻,分别与工件提交时间、最后期限以及交付时间一一对应,而尾流间隔约束则与顺序决定的准备时间相当。为后续阐述方便,相关变量如表1所示。

表1 变量定义表

Table 1 Variable Definition

变量	单机调度	ALP
$I$	工件集合	进场航空器集合
$a_i$	出现时间	航空器进入终端时间
$r_i$	提交时间	航空器最早着陆时间
$d_i$	最后期限	航空器最晚着陆时间
$\delta_i$	交付时间	航空器预计着陆时间
$s_{ij}$	准备时间	尾流间隔
$C_i$	工件完成时间	航空器优化着陆时间
$F_i = C_i - a_i$	工件流动时间	航空器飞行时间
$L_i = C_i - \delta_i$	工件延迟时间	航空器延迟时间
$T_i = \max(C_i - \delta_i, 0)$	工件延误时间	航空器延误时间
$q_{ij}$	加工次序	着陆次序

### 1.2 目标选择

对于机器调度而言,常用目标函数包括:最小化完成时间和( $\min(\sum C_i)$ )、最小化最大完成时间( $\min(\max C_i)$ )、最小化流动时间和( $\min(\sum F_i)$ )、最小化最大流动时间( $\min(\max F_i)$ )、最小化延误时间和( $\min(\sum T_i)$ )、最小化最大延误时间( $\min(\max T_i)$ )。其中,由于各个航空器进入终端空域的时间为固定值,因此 $\min(\sum C_i)$ 与 $\min(\sum F_i)$ 等效。相应地,在进场排序与调度领域:

最小化最大完成时间( $\min(\max C_i)$ ),表明最后优化一架航空器尽早着陆,意味着跑道运行容量的最大化,该目标是机场的关注点;

最小化流动时间和( $\min(\sum F_i)$ ),表明进场航空器在终端空域的运行时间总和最小化,也即管制员要付诸精力的总时间最小化,该目标从一个侧面反映管制员的工作负荷,从另一个侧面反映航空器的整体运行效益;

最小化最大流动时间( $\min(\max F_i)$ ),表明最小化进场航空器在终端空域飞行的最长时间,意味着对各个航空公司的航空器实施公平的调度;

最小化延误时间和 $(\min(\sum T_i))$ ，表明最小化进场航空器集的整体或平均延误，体现空管系统运行效率，也满足公众对于准点出行的诉求；

最小化最大延误时间 $(\min(\max T_i))$ ，表明最小化进场航空器的最大延误，体现对航空器实施公平调度。

针对双目标优化 $(\min(\max T_i), \min(\sum T_i))$ 最优解的存在性、解的界以及相关算法，已进行了深入研究<sup>[22]</sup>。假设 $S^{bi}$ 是一个 $(\alpha, \beta)$ 调度策略， $T_{\max}^{\text{OPT}}$ 与 $\sum T_i^*$ 是该问题的最优调度，如果 $S^{bi}$ 是最小化问题的 $\alpha$ -近似调度，同时也是最小化问题的 $\beta$ -近似调度，那么 $T_{\max}^{S^{bi}} < \alpha T_{\max}^{\text{OPT}}$ 且 $T_{\Sigma}^{S^{bi}} < \beta \sum T_i$ 。简言之，当以 $\min \sum T_i$ 为目标进行优化时， $\max T_i$ 会被一个上界所限制，因此最小化延误时间和最优调度也可以保证同时优化最小化最大延误时间，也即仅考虑 $\min(\sum T_i)$ 优化问题，能够兼顾 $\min(\max T_i)$ 优化问题。

考虑双目标优化 $(\min(\max C_i), \min(\sum C_i))$ ，可以提出如下推论： $\min(\sum C_i)$ 的最优调度 $S^*\{\Sigma\}$ 也是 $\min(\max C_i)$ 的最优调度 $S^*\{\max\}$ 之一，即 $C_{\max}(S^*\{\max\}) = \max(C(S^*\{\Sigma\}))$ 。

■ 证明如下：

首先，设 $C_{\max}(S^*\{\max\}) > \max(C(S^*\{\Sigma\}))$ 。因为 $C_{\max}(S^*\{\max\}) = \max(C(S))$ ，定义 $S$ 为任意一个调度，而 $S^*\{\Sigma\}$ 为 $S$ 的其中一种情况，所以假设 $C_{\max}(S^*\{\max\}) > \max(C(S^*\{\Sigma\}))$ 不成立。

其次，设 $C_{\max}(S^*\{\max\}) < \max(C(S^*\{\Sigma\}))$ 。此情况下，定义最优调度 $S^*\{\Sigma\}$ 的最后两架航空器分别为 $k$ 和 $l$ ，航空器 $l$ 的着陆时间可能为 $r_l$ 或者 $C_k^* + s_{kl}$ ，即 $C_l^{S^*\{\Sigma\}} = \max\{r_l, C_k^{S^*\{\Sigma\}} + s_{kl}\}$ ：

若 $C_l^{S^*\{\Sigma\}} = r_l$ ，则 $\max(C(S^*\{\Sigma\})) = r_l$ ，此时 $r_l < \max(C(S^*\{\max\}))$ ，显然假设是不成立的。

若 $C_l^{S^*\{\Sigma\}} = C_k^{S^*\{\Sigma\}} + s_{kl}$ ，则 $\max(C(S^*\{\Sigma\})) = C_k^{S^*\{\Sigma\}} + s_{kl}$ 。由此推断对于倒数第二架航空器也存在结论 $C_{\max}(S^*\{\max\} \setminus l) < \max(C(S^*\{\Sigma\} \setminus l))$ 。以此类推，有推论 $\sum C(S^*\{\max\}) < \sum C(S^*\{\Sigma\})$ 存在，但是与 $S^*\{\Sigma\}$ 是 $\min \sum C_i$ 的最优调度相违背，故原假设不成立。

最后，证得推论成立。 ■

由于 $\min(\sum C_i)$ 等效于 $\min(\sum F_i)$ ， $\min(\sum T_i)$ 能够兼顾 $\min(\max T_i)$ ， $\min(\sum C_i)$ 可以确保 $\min(\max C_i)$ ，于是考虑多目标优化：

$\min(\sum F_i)$ 、 $\min(\max F_i)$ 、 $\min(\sum T_i)$ ，能够满足各利益相关方的不同诉求。

### 1.3 模型构建

基于上述分析，多目标进场优化排序与调度问题可以描述为：对于给定 $n$ 架进场航空器，当满足着陆时间窗约束、尾流间隔约束、着陆次序的最大位置转换约束等，以最小化进场航空器终端区内的总飞行时间、最小化最大飞行时间、最小化进场航空器的总延误时间为目标，优化进场航空器的着陆序列及时间。构建数学模型如下：

$$\min \sum_{i=1}^I T_i \quad (1)$$

$$\min \sum_{i=1}^I F_i \quad (2)$$

$$\min \max F_i \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad r_i \leq C_i \leq d_i \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$q_{i,j} + q_{j,i} = 1 \quad i > j \quad (5)$$

$$C_i \geq C_j + q_{ij}s_{ij} - q_{ji}(d_j - r_i) \quad i \neq j \quad (6)$$

$$T_i \geq C_i - \delta_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$0 \leq T_i \leq d_i - \delta_i \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$F_i = C_i - a_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$k_{\text{CPS}} \leq \text{MPS} \quad (10)$$

其中，式(4)为进场航空器着陆时间的时间窗限制；式(5)表示着陆次序；式(6)确保了进场航空器前后机之间的尾流间隔约束；式(7)与式(8)表示进场航空器的延误时间定义及约束；式(9)表示进场航空器在终端空域的飞行时间；式(10)表示着陆次序调配需要满足的最大位置转换约束。

## 2 多目标进场调度算法设计

### 2.1 帝国竞争算法

帝国竞争算法(Imperialist Competitive Algorithm, ICA)<sup>[19]</sup>是一种社会政治进化算法，该算法将初始解集视为若干个帝国(Emp.)，每个帝国由一个殖民国家(Imp.)与若干个殖民地(Col.)组成，其中殖民国家代表该帝国内最优的解，通过成本值( $\text{Cost}_i = f(\text{Country}_i)$ )确定。对于最小化问题，其算法简要流程如下所示：

**步骤1：**初始化。随机产生初始国家集合 $N$ ，根据成本值选取殖民国家，分配殖民地，组建帝国；



**步骤 2:** 同化。帝国中的殖民地在一定概率下向殖民国家靠拢；

**步骤 3:** 革命。帝国中的殖民国家及殖民地在一定概率下发生突变；

**步骤 4:** 帝国内竞争。更新帝国内殖民国家与殖民地的成本值，成本值最小的成为新的殖民国家；

**步骤 5:** 帝国间竞争。更新各帝国势力值，将最弱帝国的最弱殖民地转移到最强帝国中；

**步骤 6:** 帝国消亡。若某帝国中所有殖民地都被掠夺，则此殖民国家沦为殖民地，该帝国消亡；

**步骤 7:** 验证终止条件。若满足，输出最优殖民国家，否则重复步骤 2 到 6，直到满足终止条件。

帝国竞争算法的优点在于：通过帝国内竞争和帝国间竞争，加强深度搜索和广度搜索，从而提升了邻域搜索和全局优化的能力。

## 2.2 多目标帝国竞争算法

将帝国竞争算法引入进场排序与调度的多目标优化，相较于传统帝国竞争算法，其特点在于：(1) 解集的初始化与更新策略；(2) 面向多目标优化的成本函数的构建；(3) 面向多目标优化的帝国势力的衡量。假设多目标帝国竞争算法(MOICA)的最大迭代次数  $i_{\max}$ ，种群数量为  $n_{pop}$ ，殖民国家数量  $n_{imp}$ ，MOICA 的算法流程图如图 1 所示。

### (1) 初始化帝国

对于进场航空器排序与调度问题，各航空器的优化着陆时间构成一个初始解，即一个国家。生成初始解集时，需要满足时间窗约束  $(r_i, d_i)$ ，本文拟采用线性插值实现解集初始化，如式(11)所示。

$$C_i = \xi d_i + (1 - \xi) r_i \quad i \in I \quad (11)$$

式中： $\xi \in [0, 1]$ 。

由于面向多目标优化，常规的基于目标函数构建成本函数的方式并不可行。鉴于此，本文采用非支配排序与拥挤距离实现成本函数的构建，具体包括：

- a) 基于初始化的解集计算目标函数值，并针对所得的目标值进行快速非支配排序；

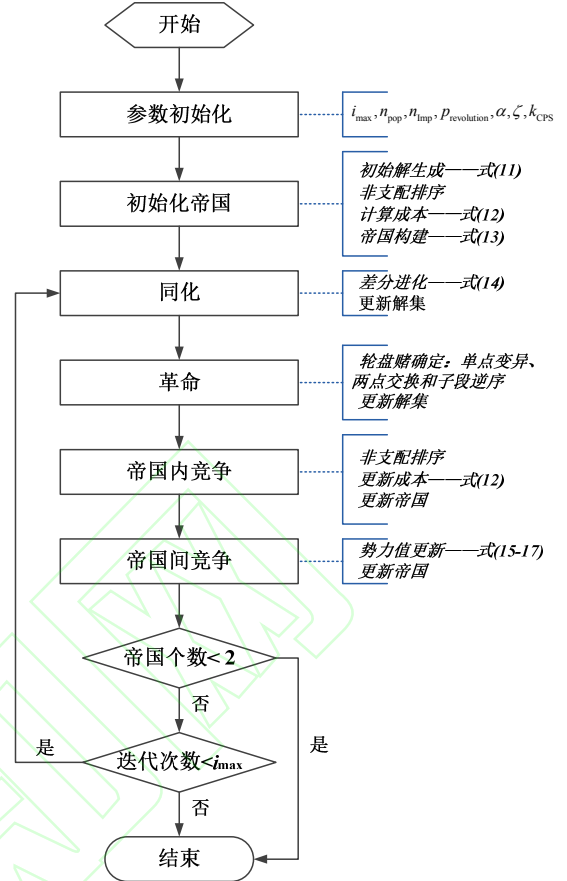


图 1 多目标帝国竞争算法流程示意图

Fig. 1 Flowchart of Multi-objective ICA

- b) 基于初始化的解集计算目标函数值，并针对所得的目标值进行快速非支配排序；
- c) 基于层级关系  $R_k^{\text{rank}}$  与拥挤距离  $D_k^{\text{crowd}}$  构建成本函数，如式(12)所示；

$$Cost_k = \frac{R_k^{\text{rank}} + D_k^{\text{crowd}}}{\sum_{l \in H} D_l^{\text{crowd}}} \quad k \in n_{pop} \quad (12)$$

其中  $H$  表示层级关系值与  $R_k^{\text{rank}}$  相等的解集合，对于边界解，其拥挤距离为  $\max_{l \in H} (D_l^{\text{crowd}}) + a$ ， $a \geq 1$ 。

- d) 初始化殖民国家，优先从帕累托前沿(Pareto front, PF)中选取殖民国家，若 PF 中解的个数小于设定的帝国个数，则从下一层级中依次选择成本值小的解作为补充。
- e) 初始化殖民地，采用轮盘赌的方式，利用式(13)将殖民地分配给殖民国家；

$$P_k = \frac{\exp \left\{ -\alpha [Cost_k / \max_{k \in n_{pop}} (Cost_k)] \right\}}{\sum_{k \in n_{pop}} \exp \left\{ -\alpha [Cost_k / \max_{k \in n_{pop}} (Cost_k)] \right\}} \quad (13)$$

其中,  $\alpha$  为选择系数。

如此完成了初始化帝国的工作, 每个帝国, 即进场排序与调度的初始解集的子集, 包含一个 PF 解和若干个初始解。

## (2) 同化

同化过程是帝国内殖民地向殖民国家靠拢的过程, 也即进场排序与调度的可行解向帕累托最优解学习的过程。本文采用差分进化的方式, 如式(14)所示, 实现帝国内的同化。

$$Col. \leftarrow Col. + \beta \cdot rand \cdot (Imp. - Col.) \quad (14)$$

式中,  $\beta$  表示差分进化系数,  $rand$  为随机数。

## (3) 革命

为防止迭代过程中陷入局部最优解, 对殖民地进行革命操作, 文中主要采用单点变异、两点交换和子段逆序三种算子进行革命。

单点变异算子中, 随机选择一个进场航空器, 按式(11)分配新的优化着陆时间; 两点交换算子中, 随机交换两个航空器的优化着陆时间; 子段逆序算子中, 随机选择一部分航空器的优化降落序列, 并逆序。值得注意的是, 在实施上述操作需要考虑最大位置转换约束 MPS 以及相应的尾流间隔, 以确保革命后的解仍是可行解。

## (4) 帝国内竞争

基于同化和革命的解集更新, 计算目标函数值, 再次进行快速非支配排序操作, 利用式(12)更新国家的成本值。进一步, 比较帝国内殖民国家与殖民地的成本, 若殖民地的成本优于对应的殖民国家时, 那么优秀殖民地成为新的殖民国家, 原来殖民国家沦为殖民地。

## (5) 帝国间竞争

帝国间竞争是各个帝国间殖民地再分配的过程, 势力弱小的帝国将被势力强大的帝国逐步吞并, 直至消亡。帝国势力值计算过程如下所述:

$$Emp_j.Cost = Imp_j.Cost + \mu \cdot \frac{\sum_{k \in Emp_j} Col_k.Cost}{|Emp_j|} \quad (15)$$

$$Emp_j.Cost \leftarrow \lambda \cdot \max_{j=1}^{n_{imp}} (Emp_j.Cost) - Emp_j.Cost \quad (16)$$

$$P_{Emp_j} = Emp_j.Cost / \sum_{j=1}^{n_{imp}} (Emp_j.Cost) \quad (17)$$

在此过程中, 式(15)综合帝国内殖民国家与殖民地的成本计算帝国总成本, 其中  $\mu$  表示势力值系数,  $|Emp_j|$  表示帝国中殖民地的数目; 随后, 按照式(16)和(17)实现势力值的量纲统一,

其中式(16)的作用在于防止势力为零的情况, 本文  $\lambda$  取值为 1.2。

## 2.3 多目标优化解的评价

如何评价多目标进场排序与调度优化解集的优劣, 选择兼顾各利益相关方诉求的优化方案, 也是值得深入研究的问题。本文拟从帕累托最优解的收敛性和多样性两个角度出发, 通过如下四个指标<sup>[23]</sup>评估本文提出的多目标帝国竞争算法。

### (1) 覆盖率 (C-metric, CM)

覆盖率是衡量帕累托解集收敛性的指标, 如式(18)所示:

$$C_{CM}(PF_A, PF_B) = \frac{|\{b \in PF_B | \exists a \in PF_A : a \succ b\}|}{|PF_B|} \quad (18)$$

其中  $PF_A, PF_B$  分别为两组 Pareto 最优解集。分子表示解集  $B$  受解集  $A$  支配的解的个数, 分母表示解集  $B$  中所有解个数。若  $C_{CM}(PF_A, PF_B) = 1$ , 说明解集  $B$  完全受解集  $A$  所支配, 即解集  $B$  收敛性比  $A$  差。

### (2) 空间分布 (Spacing, SP)

空间分布是评估帕累托解集广泛程度的指标, 如式(19)所示:

$$C_{SP}(PF) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{|PF|} (\bar{d} - d_k)^2}{|PF| - 1}} \quad (19)$$

其中  $d_k$  表示各个解到其他解的最小欧式距离,  $\bar{d}$  为均值。该指标是度量解集中各解到其他解最小距离的标准差, 值越小, 说明空间分布越均匀。

### (3) 超体积 (Hyper volume, HV)

超体积是评估帕累托解集收敛性和多样性的综合指标, 如式(20)所示:

$$C_{HV}(PF) = \delta\left(\bigcup_{k=1}^{|PF|} V_k\right) \quad (20)$$

其中  $\delta(\cdot)$  表示勒贝格测度, 用来测量体积,  $V_k$  表示第  $k$  个点与参考点围成的区域超体积。超体积值越大, 表明解集越好。

### (4) 平均理想距离 (Mean ideal distance, MID)

平均理想距离衡量帕累托解集和理想点之间距离的指标, 如式(21)所示:

$$C_{MID}(PF) = \frac{\sum_{k=1}^{|PF|} \sqrt{\sum_{m=1}^3 \left( \frac{f_k^m}{\max(f_k^m) - \min(f_k^m)} \right)^2}}{|PF|} \quad (21)$$

其中  $f_k^m$  表示第  $k$  个非支配解的第  $m$  个目标值, 本文的进场排序与调度问题的优化目标共三个; 本文由于面向最小化问题, 可以将坐标原点设置为理想点。

### 3 仿真验证

仿真验证从两个角度展开, 一方面利用进场排序与调度研究领域常用的基准案例——OR 数据集 (<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/airlandinfo.html>), 考察提出的 MOICA 算法的效果, 并与多目标进场排序与调度常用的 NSGA-II 算法及 MOSA 进行对比; 另一方面采用实际运行数据, 验证 MOICA 算法的适用性。

MOICA 算法通过 Matlab2014b 编程实现, 运行环境为: Windows10 操作系统, Corei7-7700 处理器、3.6GHz 主频和 8GB 内存的微机。

#### 3.1 OR数据验证

##### 3.1.1 运行场景

OR 数据集中关于进场排序与调度共有 13 组案例, 航空器架次从 10 架到 500 架不等。由于第 1 组到第 8 组案例不满足进场排序与调度的尾流间隔三角不等式, 故采用第 9 组到 13 组数据, 分别有 100/150/200/250/500 架次航空器,

表 2 仿真数据集信息表

Table 2 Simulation data information

数据规模	代号	架次	$K$
小数据集	airland #13.1	49	1.382
	airland #13.2	48	1.306
	airland #13.3	57	1.218
	airland #13.4	50	1.562
	airland #13.5	45	1.062
	airland #13.6	51	0.945
	airland #13.7	49	1.345
	airland #13.8	52	1.065
	airland #13.9	50	1.128
	airland #13.10	49	1.085
大数据集	airland #09	100	1.370
	airland #10	150	1.412
	airland #11	200	1.362
	airland #12	250	1.341

第 9 组至第 12 组数据, 构成大规模数据集; 拆分第 13 组数据, 构成小规模数据集, 拆分的依据在于——进场航空器进入终端空域的时间具有波次效应。进一步, 为了反映进场航空器的交通需求特性, 引入压缩因子:

$$K = \left( \max_{i \in I} (\delta_i) - \min_{i \in I} (\delta_i) \right) / (n\bar{s}) \quad (22)$$

其中,  $\delta_i$  为航空器预计着陆时间,  $\bar{s}$  为平均尾流间隔。压缩因子  $K$  越小, 说明进场需求越高, 进场排序与调度的难度越大。

具体的数据集信息如表 2 所示, 数据集中 airland #13.1 参数信息详情如图 2 所示, 其中蓝色方框表示航空器进入终端空域时间, 黑色星号表示着陆时间窗, 红色圆圈表示预计着陆时间。

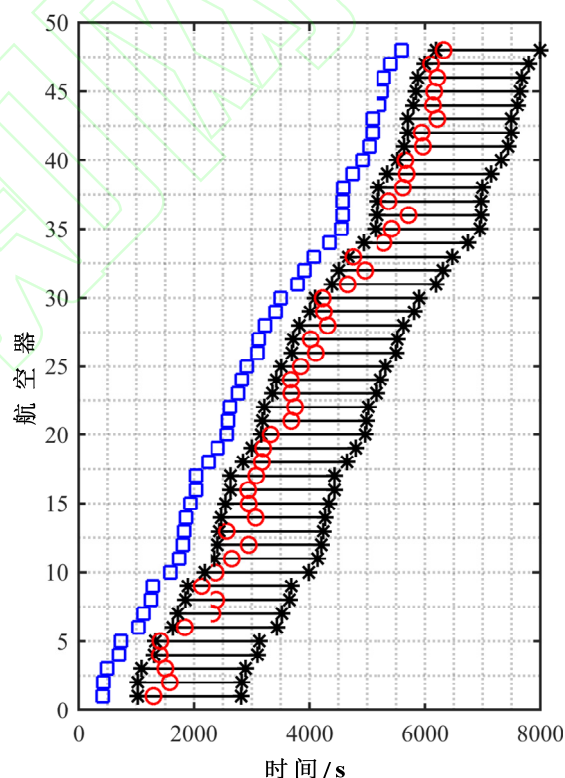


图 2 仿真场景示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulation scenario

实验中: MOICA 算法应用于大规模数据集时,  $i_{\max} = 250$ ,  $n_{\text{pop}} = 100$ ,  $n_{\text{imp}} = 7$ ; 应用小规模数据集时,  $i_{\max} = 150$ ,  $n_{\text{pop}} = 75$ ,  $n_{\text{imp}} = 5$ ; 革命概率选为 0.35, 选择系数 0.9, 同化系数 2, 势力值系数  $\mu = 0.2$ 。NSGA-II 中交叉概率 0.7, 变异概率 0.02。MOSA 中初始温度 1000, 冷却系数 0.98。

3.1.2 结果分析

首先, 针对所有数据集进行 MOICA 和 NSGA-II 及 MOSA 的仿真验证, 同时利用多目标优化解的评价指标进行对比, 具体如表 3 所示。由于元启发式算法(如 SA, GA, ICA)的优化结果与参数以及初始化息息相关, 表 3 的结果基于 20 次独立仿真的均值进行对比。

由表3可知: 对于14组仿真数据集, 覆盖率指标 ( $C_{CM}$ ), MOICA 全面优于 NSGA-II 与 MOSA; 空间分布指标( $C_{SP}$ ), MOICA 最优, MOSA 较劣; 超体积指标( $C_{HV}$ ), MOICA在12组

数据集中占优; 平均理想距离( $C_{MID}$ ), MOICA在13组数据集中占优。通过计算各组数据在各类指标下的均值可见, MOICA的帕累托最优解相对于NSGA-II与MOSA而言, 解集更占支配地位( $C_{CM}$ )、解集的分布更均匀( $C_{SP}$ )、解集的收敛性更好( $C_{HV}$ )、解集的质量更高( $C_{MID}$ )。进一步分析MOICA解集非占优的情况发生在小规模数据集#13.1/ #13.4/ #13.7, 原因在于上述数据集的压缩因子 $K_d$ 较大, 对应进场需求低, 排序与调度难度较小。此时, NSGA-II与MOSA也能获得较优解。对于最复杂数据集#13.6, 本文提出的MOICA表现更好。

表3 OR数据集仿真结果对比表  
Table 3 Comparing results of OR data

数据	$C_{CM}$			$C_{SP}$			$C_{HV}$			$C_{MID}$		
	MOICA	NSGAII	MOSA	MOICA	NSGAII	MOSA	MOICA	NSGAII	MOSA	MOICA	NSGAII	MOSA
OR #9	1	0	0	0.094	0.361	0.341	0.036	0.019	0.023	1.627	1.634	1.664
OR #10	1	0	0	0.273	0.833	0.157	0.031	0.031	0.013	1.611	1.614	1.638
OR #11	1	0	0	0.201	0.643	0.410	0.020	0.018	0.017	1.619	1.652	1.672
OR #12	1	0	0	0.266	0.458	0.361	0.023	0.018	0.018	1.605	1.657	1.666
OR #13.1	1	0	0	0.040	0.418	0.142	0.034	0.035	0.011	1.571	1.586	1.596
OR #13.2	1	0	0	0.024	0.327	0.630	0.026	0.014	0.010	1.594	1.601	1.62
OR #13.3	1	0	0	0.021	0.258	0.155	0.037	0.014	0.012	1.609	1.616	1.621
OR #13.4	1	0	0	0.029	0.293	0.142	0.051	0.041	0.010	1.537	1.521	1.561
OR #13.5	1	0	0	0.005	0.124	0.061	0.022	0.018	0.010	1.587	1.609	1.617
OR #13.6	1	0	0	0.092	0.250	0.182	0.045	0.019	0.016	1.610	1.682	1.629
OR #13.7	1	0	0	0.007	0.288	0.203	0.031	0.058	0.012	1.579	1.587	1.621
OR #13.8	1	0	0	0.098	0.607	0.221	0.029	0.025	0.023	1.595	1.604	1.662
OR #13.9	1	0	0	0.019	0.309	0.019	0.035	0.034	0.016	1.585	1.637	1.621
OR #13.10	1	0	0	0.033	0.098	0.091	0.031	0.030	0.012	1.602	1.616	1.606
均值	1	0	0	0.085	0.376	0.226	0.032	0.027	0.015	1.595	1.615	1.628

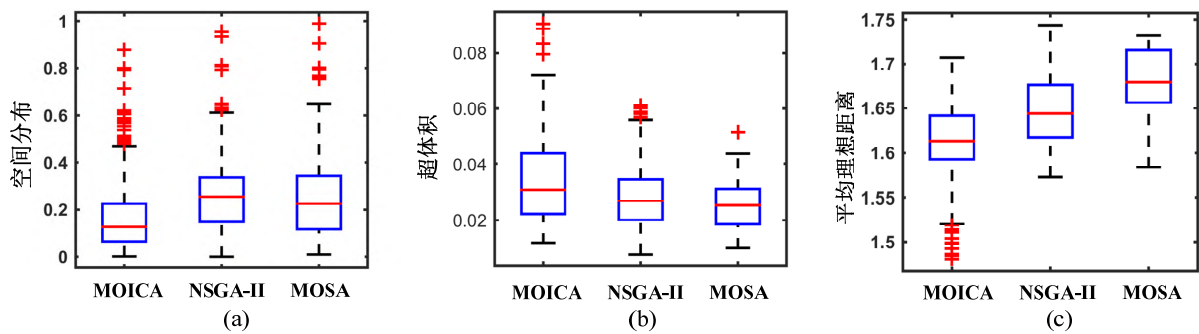


图3 多目标优化解评价指标的四分位图

Fig. 3 Quartile map of Pareto front



其次,选取数据组 OR #9,应用 MOICA、NSGA-II 与 MOSA 分别进行 500 次独立实验。针对仿真结果计算指标:空间分布、超体积、平均理想距离,并将 500 组评价指标以四分位图的方式显示仿真结果,如图 3 所示。

由图 3 可知:OR #9 数据的 500 次独立实验结果进一步验证了,相对于 NSGA-II 与 MOSA 而言,MOICA 的优越性。覆盖率指标未列入,原因在于 MOICA 帕累托解集均占支配地位。

最后,为了考察多目标优化算法的运算效率,图 4 提供了不同数据集的 CPU 时间示意图,无论是本文提出的 MOICA,还是对比的 NSGA-II,小规模数据集的迭代次数设为 150 次,大规模数据集的迭代次数设为 250 次。

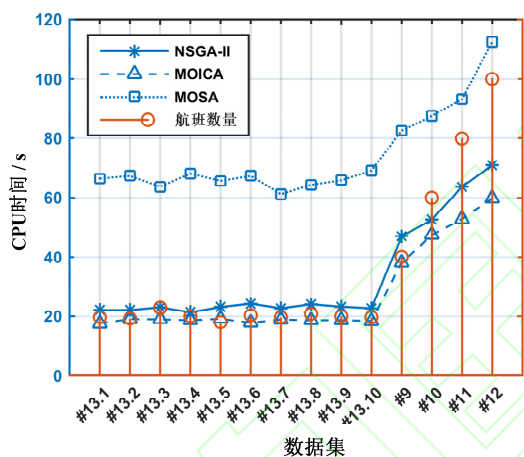


图4 多目标优化运行时间对比图

Fig. 4 Comparing results of CPU time

由图 4 可知:一方面,本文提出的 MOICA 其算法效率均优于 NSGA-II 与 MOSA;另一方面,多目标优化算法的运行效率主要依赖于迭代次数和航空器架次,当迭代次数一致时(如大规模数据集,  $i_{\max} = 250$ ),数据集规模越大其优化时间越长。

### 3.2 实际数据优化分析

#### 3.2.1 仿真场景构建

本文以长沙黄花机场进场运行为例,图 5 显示了 2019 年 12 月 26 日 8:00-2019 年 12 月 27 日 8:00 共计 233 条进场航空器的综合航迹,长沙机场共有五个进港点(BEM, LLC, LIG, OVT, DPR)。

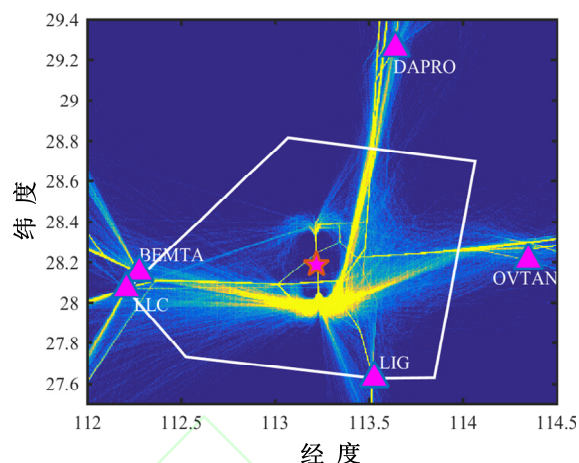


图5 长沙黄花机场进场运行航迹示意图

Fig. 5 Schematic diagram of arrival tracks to ZGHA

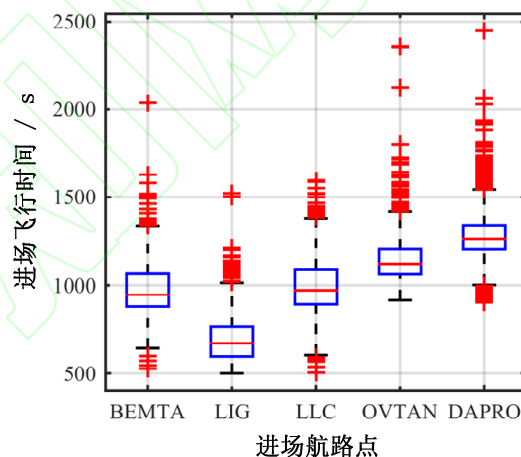


图6 进场航空器飞行时间四分位图

Fig. 6 Quartile map of arrival flight time

通过分析雷达综合航迹,获取每一个进场航空器的进入终端空域的时刻  $a_i$ 。本文主要考虑北向运行的进场排序与调度,选取 2019 年 12 月所有北向运行的雷达综合航迹,统计分析经由每个进港点的飞行时间  $F_i^{\text{Entry}}$ ,得到飞行时间四分位图如图 6 所示。于是,航空器最早着陆时间  $r_i$ ,预计着陆时间  $\delta_i$  与最晚着陆时间  $d_i$  分别定义为:  

$$r_i = a_i + F_{25\%}^{\text{Entry}}, \quad \delta_i = a_i + F_{50\%}^{\text{Entry}}, \quad d_i = a_i + F_{100\%}^{\text{Entry}},$$
其中  $F_{xx\%}^{\text{Entry}}$  表示经由不同进港点的航空器对应百分比的飞行时间(基于图 6 获取)。不同类型航空器(重型机-H,中型机-M,轻型机-L)的尾流安全间隔如表 4<sup>[22]</sup>所示,考虑运行中的不确定因素,本文后续仿真尾流间隔设定为标准间隔的 1.2 倍、1.5 倍和 1.8 倍。

表4 尾流间隔标准

Table 4 Wake spacing standard

前机 \ 后机	距离间隔/km			时间间隔/s		
	H	M	L	H	M	L
H	8	10	12	99	133	196
M	6	6	10	74	107	131
L	6	6	6	74	80	98

### 3.2.2 仿真结果分析

利用本文提出的 MOICA 实现长沙机场的进场排序与调度优化,选取 23:00-00:30 内的 21 架进场航空器作为优化对象,相关参数的设定同 4.1 节的大规模数据集。

在本次的实例仿真中,尾流间隔分别选取表 4 对应标准的 1.2 倍、1.5 倍和 1.8 倍实施验证,其总延误时间,总飞行时间和最大飞行时间的优化结果如表 5 所示。

由表 5 可知,利用 MOICA 实现进场的排序与调度可以有效地提升运行效率与效益,兼顾空

管、航司、机场、民众的不同诉求。即便是将尾流间隔限制扩大到现行标准的 1.8 倍,相对于管制实际运行结果,总延误时间可以降低 41.2%、总飞行时间可以减少 11.4%、最大飞行时间可以缩短 8.6%。

进一步,为考察实际着陆序列与优化着陆序列的变化情况,图 7 以时序图的形式,展示了 1.5 倍标准间隔设置下,各进场航空器在不同进港点的出现时间(黑色圆圈所示)与序列、各进场航空器的预计着陆时间(绿色三角所示)与序列、各进场航空器的优化着陆时间(蓝色菱形所示)与序列、各进场航空器的实际着陆时间(红色方框所示)与序列。

由图7可知,1.5倍的间隔标准与实际管制运行时的安全间隔相仿,引入MOICA的优势在于通过调整着陆次序,最大可能地逼近设置的尾流安全间隔,从而实现总延误时间、总飞行时间以及最大飞行时间的减少。至于管制员在实际运行中未能应用最佳着陆序列的原因,可以通过不同时间点进场航空器态势加以解释,如图8所示。

表5 实际案例仿真验证结果表

Table 5 Actual case simulation verification results table

目标	实际	1.2 倍标准		1.5 倍标准		1.8 倍标准	
总延误时间 / s	7628	1123	85.3%	2062	73.0%	4488	41.2%
总飞行时间 / s	28295	21464	24.1%	22469	20.6%	25076	11.4%
最大飞行时间 / s	1936	1371	29.2%	1531	20.9%	1770	8.6%

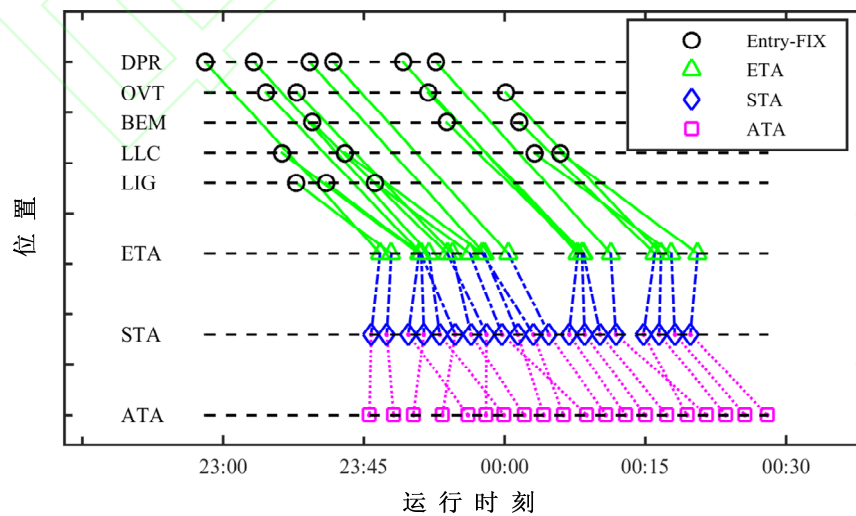


图7 进场航空器着陆时序对比示意图

Fig.7 Comparing results of landing sequence and time

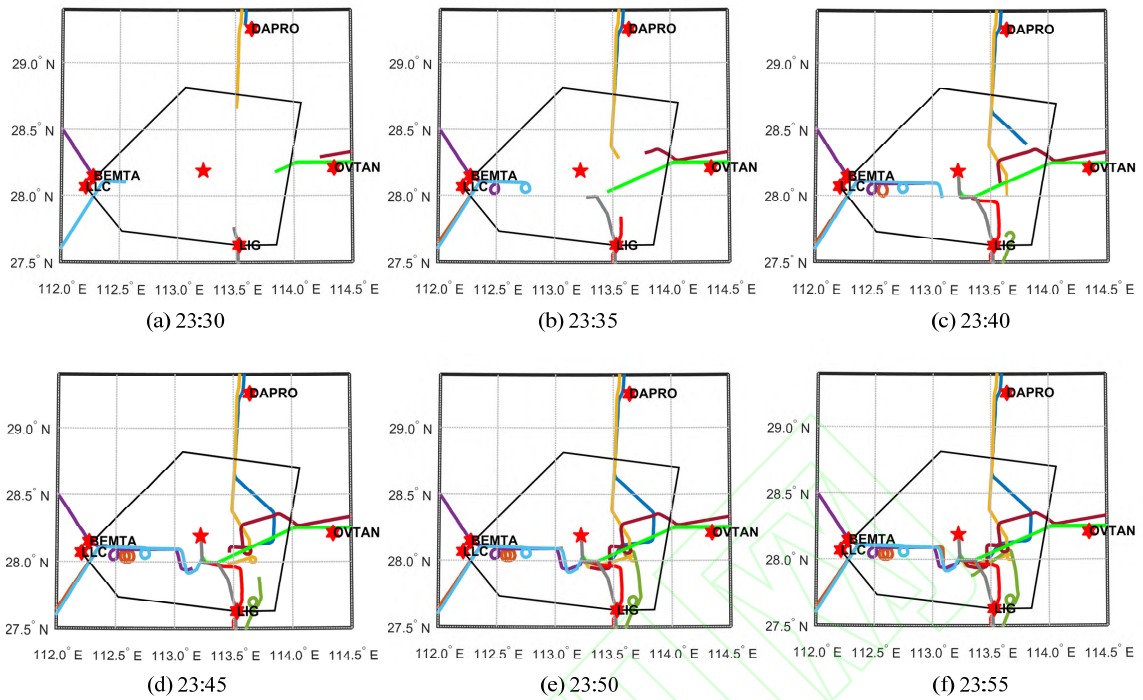


图8 进场航空器不同时刻的态势示意图

Fig.8 Situation diagram of arrival aircraft at different times

图 8 展示了从 23:30 到 23:55 这段时间内, 10 架进场航空器的运行态势。航空器的选择是基于图 7 的分析。

由图 7 可知, 进场航空器可以粗略分为三个“波次”, 第一波共有 12 架; 第二波共有 4 架; 第 3 波也是 4 架。前 12 架中, 可以忽略第一架与最后一架着陆的航空器(均由 DPR 进港), 因此余下 10 架的构成为: 2 架次 DRP 进港, 1 架次 BEM 进港, 2 架次 LLC 进港, 3 架次 LIG 进港, 以及 2 架次 OVT 进港。管制员对于西向进港(LLC/BEM)航空器的调配策略是等待; 对于北向(DPR)和南向(LIG)进港航空器使用向东侧偏离策略; 至于东向进港(OVT)航空器则向北侧调配。23:35 和 23:40 时, 管制员发现着陆需求较为旺盛, 于是分别按既定策略引导进场航空器作机动飞行。此时, 管制员引导主要依赖经验, 兼之飞行员具体操控航空器时对管制员指令的依从度无法预知, 最终导致无法充分利用终端空域以及跑道的容量。因此, MOICA 可以为管制员提供着陆序列与时间的决策支持, 至于如何给定确切的管制指令, 本文拟借助于点融合系统(Point Merge System, PMS)实现。

基于统计分析获取飞行时间或者采用四维航迹预测<sup>[24]</sup>, 能够实现进场运行“可见”目标; 采用本文提出的 MOICA 兼顾各利益相关方的诉求开展排序与调度, 可以实现进场运行“可优”目标; 如何基于优化的着陆序列与时间向管制员提供决策支持, 方能实现进场运行“可达”目标。为此, 本文拟通过 PMS 解决优化结果“可达”的问题。图 9 提供了引入 PMS 后的进场程序, 以及基于该程序和 1.2 倍间隔标准优化结果的进场航空器运行示意图(注: 1.5 倍间隔标准的配备需要通过引入标准等待实现)。

由图9可见, PMS的引入具备如下优势: 1) 进场排序与调度优化结果的可达, 根据优化着陆序列与时间反推PMS程序结构下的航空器四维航迹, 为管制员提供决策建议; 2) 管制决策建议简单有效, 将传统的管制指令简化为排序支路上的转弯, 降低了管制工作负荷; 3) 由于管制引导仅发生在排序支路上, 提升了飞行员的态势感知与情境意识; 4) 飞行轨迹更为规整有序, 有效降低了终端空域进场运行的复杂性。值得注意的是, 由于引入PMS导致预计到达时间与着陆时间窗变化, 因此表5的相关结论需要另行计算。

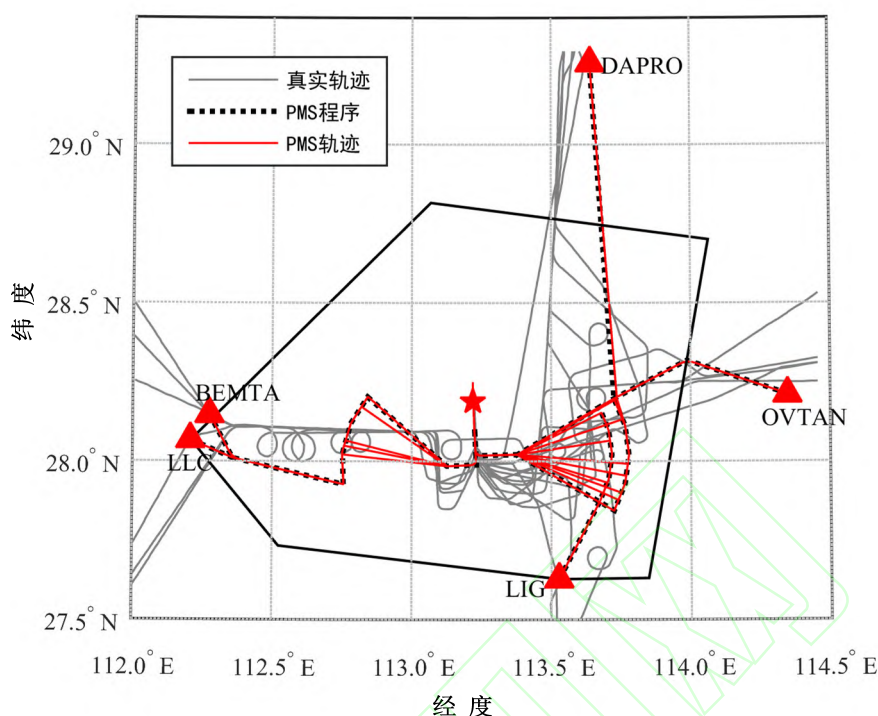


图 9 引入PMS的进场排序与调度运行示意图

Fig.9 Schematic diagram of arrival scheduling operation by using PMS

#### 4 结论

1) 借鉴机器调度领域的研究成果, 梳理和删减进场排序与调度问题所对应的目标函数, 最终确定三个指标: 最小化总延误时间、最小化总飞行时间、最小化最大飞行时间。从理论角度分析和证明, 上述目标能够同时满足空管、航司、机场以及民众的不同诉求。

2) 面向三个目标, 考虑着陆时间窗约束、尾流间隔约束、航空器着陆次序的最大位置转换约束等, 构建进场排序与调度多目标优化模型, 以实现管制工作负荷降低、跑道运行容量增强、航空器正点率提升、各航司调度公平的目的。

3) 基于非支配排序, 设计了多目标帝国竞争算法, 求解多目标进场排序与调度模型的帕累托解。同时, 引入覆盖率指标、空间分布指标、超体积指标和平均理想距离等指标, 衡量帕累托解集优劣。

4) 从两个角度实施仿真验证: 一方面, 利用基准案例 (OR 数据集) 对比多目标帝国竞争算法(MOICA)与多目标遗传算法(NSGA-II)及多目标模拟退火算法(MOSA)的解集质量与求解效

率; 另一方面, 利用实际运行案例考察本文提出方法的有效性, 并引入点融合系统保障优化结果的可行性。

5) 本文主要解决了单跑道进场排序与调度问题, 未来的研究会扩展到多跑道、进离场、以及多机场终端空域的运行场景。

#### 参考文献

- [1] BENNELL J A, MESGARPOUR M, POTTS C N. Airport runway scheduling[J]. Annals of Operations Research, 2013, 204(1): 204-249.
- [2] BEASLEY J E, KRISHNAMOORTHY M, SHARAIHA Y M, et al. Scheduling aircraft landings - the static case[J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 180-197.
- [3] BENNELL J A, MESGARPOUR M, POTTS C N. Dynamic scheduling of aircraft landings[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(1): 315-327.
- [4] GIRISH B S. An efficient hybrid particle swarm optimization algorithm in a rolling horizon framework for the aircraft landing problem[J]. Applied Soft Computing, 2016, 44: 200-221.
- [5] SOLVELING G, CLARKE J P. Scheduling of airport runway operations using stochastic branch and bound



- methods[J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 45: 119-137.
- [6] LIEDER A, BRISKORN D, STOLLETZ R. A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(1): 61-69.
- [7] VADLAMANI S, HOSSEINI S. A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 40: 144-148.
- [8] ZHANG J F, ZHAO P L, YANG C W, et al. A new meta-heuristic approach for aircraft landing problem[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 37(2): 197-208.
- [9] SAMÀ M, D'ARIANO P, PACCIARELLI D. Optimal aircraft scheduling and routing at a terminal control area during disturbances[J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 80(6): 61-85.
- [10] SALEHIPOUR A, MODARRES M, NAENI L M. An efficient hybrid meta-heuristic for aircraft landing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(1): 207-213.
- [11] Hu X B, PAOLO D E. Binary-representation-based genetic algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2008, 9(2): 301-310.
- [12] GIRISH B G. An efficient hybrid particle swarm optimization algorithm in a rolling horizon framework for the aircraft landing problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 44: 200-221.
- [13] SAMÀ M, D'ARIANO A, PACCIARELLI D. Scheduling models for optimal aircraft traffic control at busy airports: tardiness, priorities, equity and violations considerations[J]. *Omega*, 2017, 67: 81-98.
- [14] HONG Y K, CHO N, KIM Y, et al. Multi-objective Optimization for Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling[J]. *Journal of Air Transportation*, 2017, 25(4): 109-114.
- [15] ZHANG J F, ZHENG Z X, ZHAO P L, et al. Multi-objective integrated arrival & departure aircraft sequencing under the influence of sequential flights. [C] *Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)* Herndon, VA, USA 10-12 April 2018.
- [16] MOKHTARIMOUSAVI S, RAHAMI H, KAVEH A. Multi-objective mathematical modeling of aircraft landing problem on a runway in static mode, scheduling and sequence determination using NSGA-II[J]. *Iran University of Science & Technology*, 2015, 5(1): 21-36.
- [17] 马园园,胡明华,张洪海,等. 多机场终端区进场航班协同排序方法[J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2279-2290.
- MA Y Y, HU M H, ZHANG H H, et al. Optimized method for collaborative arrival sequencing and scheduling in metroplex terminal area[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2015, 36(7): 2279-2290 (in Chinese).
- [18] 刘继新,江灏,董欣放,等. 基于空中交通密度的进场航班动态协同排序方法 [J]. *航空学报*, 2020, 41: 323717.
- LIU J X, JIANG H, DONG X F, et al. Dynamic collaborative sequencing method of arrival flights based on air traffic density[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41: 323717 (in Chinese).
- [19] HOSSEINIA S, KHALED A. A survey on the Imperialist Competitive Algorithm metaheuristic: implementation in engineering domain and directions for future research[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 1078-1094.
- [20] GULSAH H, RABADI G, AL-SALEM A, et al. Greedy algorithms and metaheuristic for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2013, 32(1): 39-48.
- [21] 张军峰, 郑志祥, 葛腾腾. 基于复合分派规则的进场航班排序方法[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17 (3): 141-150.
- ZHANG J F, ZHENG Z X, GE T T. Sequencing approach of arrival aircrafts based on composite dispatching[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17 (3): 141-150 (in Chinese).
- [22] ZHANG J F, ZHAO P L, ZHANG Y, et al. Criteria selection and multi-objective optimization of aircraft landing problem[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 82:101734.
- [23] ZANDIEH M, KHATAMI A R, Seyed H A. Rahmati. Flexible job shop scheduling under condition-based maintenance: Improved version of imperialist competitive algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 58: 449-464.
- [24] ZHANG J F, LIU J, HU R, et al. Online four dimensional trajectory prediction method based on aircraft intent updating[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 77: 774-787.

(责任编辑: )

## Arrival Sequencing and Scheduling based on Multi-objective Imperialist Competitive Algorithm

ZHANG Junfeng\*, YOU Lubao, YANG Chunwei, HU Rong

*College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

**Abstract:** A new method of arrival sequencing and scheduling is proposed in this paper, which is based on the multi-objective Imperialist Competitive Algorithm. Such a proposed method could not only simultaneously consider the different demands of air traffic control, airports, airlines, and the public; but also achieve the purpose of balancing traffic demand and arrival management. First, draw on the research achievements in the field of machine scheduling; the evaluation indicators of the arrival sequencing and scheduling are combed and simplified. Besides, a multi-objective arrival sequencing and scheduling model is constructed by combining the operating constraints. Then, a multi-objective Imperialist Competitive Algorithm (MOICA) is presented by introducing the non-dominated sorting strategy, and performance indexes are also provided to evaluate the pros and cons of Pareto solutions. Finally, a set of benchmark instances and the actual operation data of Changsha Huanghua International Airport are used to implement case simulation and verification, compared with the commonly used multi-objective algorithms, like NSGA-II or MOSA. On the one hand, the compared results make sure a dominant position of the proposed MOICA with the uniform distribution, better convergence, and high quality of the solution set. Furthermore, the proposed algorithm is also more efficient. On the other hand, the method proposed in this paper can effectively realize the arrival sequencing and scheduling for the real case. Even the simulation is performed at 1.8 times of the standard interval, the total delay time, total flight time, and maximum flight time could be relative to the actual operation, reduced by 41.2%, 11.4%, and 8.6%, respectively.

**Keywords:** Air traffic Management; Approach management; Multi-objective optimization; Imperialist Competitive Algorithm; Point Merge System

Received: 2020-06-22; Revised: 2020-07-16; Accepted: 2020-07-30; Published online:

URL:

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U1933117); Foundation of Graduate Innovation Center in NUAA (kfjj20190718)

\*Corresponding author. E-mail: zhangjunfeng@nuaa.edu.cn