



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401940

引用格式: 黄晋, 邱瑶瑶, 张磊, 等. 繁忙机场下点融合系统进场排序: 以广州白云机场为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(36): 15708-15715.

Huang Jin, Qiu Yaoyao, Zhang Lei, et al. Flight arrival sorting of busy airport point merge system: a case of Guangzhou Baiyun Airport[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(36): 15708-15715.

## 繁忙机场下点融合系统进场排序: 以广州白云机场为例

黄晋, 邱瑶瑶\*, 张磊, 焦瑶瑶

(中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉 618307)

**摘要** 随着交通量需求的增加, 为了优化进场航班的运行效能和提升安全性, 提出点融合系统(point merge system, PMS)的优先级模型, 根据航班的重要程度(航程是否连续)、航班的载客率以及航班的类型可以确定航班的优先级, 以最小化进场航班的总延误成本及排序边飞行总时间为目标函数, 以排序边唯一, 尾流间隔, 进入点融合系统时间窗, 排序边长度, 位置转换次数为约束, 并以广州白云机场进场程序为例, 采用改进的非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)求得航班落地的最终序列。结果表明: 改进的NSGA-II算法与先到先服务和未改进的遗传算法进行对比, 总延误成本分别降低了4.1%和1.9%, 排序边飞行总时间分别降低了32.5%和21.6%。可见该模型算法能有效地降低延误成本, 减少飞行时间, 从而缓解机场空域压力, 提高飞行效率。

**关键词** 点融合系统(PMS); 排序与调度; 连续下降; 非支配排序遗传算法(NSGA-II)

中图分类号 V355;

文献标志码 A

## Flight Arrival Sorting of Busy Airport Point Merge System: A Case of Guangzhou Baiyun Airport

HUANG Jin, QIU Yao-yao\*, ZHANG Lei, JIAO Yao-yao

(School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**[Abstract]** As the demand for air traffic increases, in order to optimize the operational efficiency and enhance safety of arriving flights, a priority model for the point merge system (PMS) was proposed. The determination of each flight's priority was based on its importance, taking into account factors such as the continuity of the flight, passenger load, and flight type. The objective function aimed to minimize the total delay cost and the total sorting edge flying time of arriving flights. Constraints encompassed unique sorting edges, wake turbulence separation, entry time window for the point merge system, sorting edge length, and the number of position transitions. Guangzhou Baiyun Airport's arrival procedures were exemplified, and the final sequence of landing flights was obtained using an improved non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). The results show that the improved NSGA-II algorithm, compared to first-come-first-served and unimproved genetic algorithms, respectively decreased the total delay cost by 4.1% and 1.9%, and the total flight time by 32.5% and 21.6%. It is concluded that this model effectively reduces delay costs, decreases flying time, thereby alleviating airport airspace pressure, and enhancing flight efficiency.

**[Keywords]** point merge system (PMS); sorting and scheduling; continuous descent; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

随着全国民航运输业的快速发展, 航空交通运输需求快速增加, 机场在进离场方面日益繁忙。连续下降运行(continuous descent operation, CDO)被视为提升终端区交通流运行效率和改善环境效益的核心技术。相较于传统的梯级下降程序, CDO的独特之处在于飞机在降落前阶段, 通过尽量保持较高

高度, 以低阻力构型和最小发动机推力的方式实现持续下降。这一创新性的方法旨在有效减少终端区内的航空器的空中等待时间, 提高运行效率, 同时最小化环境影响。通过在降落前阶段灵活调整飞行高度和推力, CDO不仅为空中交通流提供了更为顺畅的运行方式, 还为减少燃料消耗、降低污染

收稿日期: 2024-03-18; 修订日期: 2024-10-14

基金项目: 民航安全能力建设项目(FY2024MHBZ-12)

第一作者: 黄晋(1973—), 男, 汉族, 四川广汉人, 硕士, 教授。研究方向: 航空运行安全和飞行程序设计。E-mail: 271217582@qq.com。

\*通信作者: 邱瑶瑶(2000—), 女, 汉族, 河南商丘人, 硕士研究生。研究方向: 交通运输规划与管理。E-mail: 1652209297@qq.com。

物的排放和噪声污染提供了有力支持。点融合系统是支持 CDO 的配套系统,在目前的空管系统中,通常按照先到先服务 (first come first serve, FCFS) 的原则安排航班的降落顺序,然而在航班密度较高时,采用这种方式会导致飞行效率降低,在空中产生潜在的飞行安全隐患,同时会增加管制员的工作负荷。近年来,有不少学者将点融合系统与传统进场排序模型结合起来研究。在传统的进场排序方面, Sama 等<sup>[1]</sup>研究了在繁忙的航站楼控制区实时优化起飞和降落操作。提出了混合整数线性规划公式,研究了实际的各种性能指标之间的权衡,同时考虑了具有高精度的安全约束。Prakash 等<sup>[2]</sup>提出了数据分割算法,以优化解决隔离和混合运行模式下单跑道上的飞机排序问题。该问题通过 0-1 混合整数规划建模,并考虑了几个实际约束。张军峰等<sup>[3]</sup>采用分支定界法进行航班的优化排序和调度并考虑了四维航迹预测。吴维等<sup>[4]</sup>考虑相邻跑道干扰的进离场航班排序多目标优化模型,与传统模型进行对比并给出了优化方案。温馨等<sup>[5]</sup>设计优先级,以航班总延误成本最小为目标建立多跑道航班排序模型,并利用改进蚁群算法求解。向征等<sup>[6]</sup>从航空器、管制员、机场 3 个方向进行资源平衡建立了舵机女终端区航空器进场协调排序模型,并利用改进的遗传算法进行求解。

在点融合研究方面, Liang 等<sup>[7]</sup>开发一个具有点合并的自主系统,该系统可以在繁忙的航站楼区域对到达飞机进行排序,合并和间隔管理。Hong 等<sup>[8]</sup>考虑飞机飞行时间的不确定性,提出了一种基于混合整数线性规划的多点合并系统排序调度算法,并验证了算法的性能。Liang 等<sup>[9]</sup>设计了一种先进的点融合航线,称为多层点融合 (multi-layer point-merge, ML-PM),它可以自动解决密集交通流存在的所有潜在冲突。Dönmez 等<sup>[10]</sup>提出了具有平行点融合系统的终端区的单目标和多目标规划模型,以最小化总燃油消耗、总飞行时间和总延误(包括滑行进/出时间)为目标,并考虑了包括独立和依赖的跑道运行混合进离场序列。王建忠等<sup>[11]</sup>研究了点融合系统中的进场四维航迹规划的问题,以总延误时间,着陆调整次序最小为目标建立模型,然后使用了遗传算法求解。夏正洪等<sup>[12]</sup>针对在点融合程序下的空管工作流程进行分析,并对设计的点融合程序在雷达模拟机上进行验证。王宁等<sup>[13]</sup>针对点融合系统进场程序的复杂情况,提出 0-1 整数规划的多跑道进场航班排序优化模型。并选取含精英策略的非支配遗传算法求解。白鹏等<sup>[14]</sup>使用点融合技术优化终端区进场程序,设置了两个评价指标,

采用专家评价法进行权重分配,并建立优化排序模型。朱晓波等<sup>[15]</sup>对点融合进场程序和传统区域导航进场程序分别进行仿真,并将两种模式下的冲突次数和运行时间进行对比。上述关于点融合系统的研究虽然丰富了航空器排序的理论,但均忽略了机场的繁忙高峰时段与一些航空器进场中的实际因素,即未考虑航空器的优先级。

鉴于此,以进场航空器为研究对象,结合优先级的思想提出了一种点融合系统进场方法,将优先级转化为延误系数,以适应繁忙机场航班高密度的情况,同时提出利用基于父代线性排名的 NSGA-II 算法求解,从而更好地为点融合系统的排序提供一定的理论参考。

## 1 点融合系统

点融合系统的最早出现在 2006 年,由欧洲控制实验中心<sup>[16]</sup>提出,它是一种基于性能导航的技术。其空域结构是由融合点与排序边所围成的近似扇形的空域,经典的点融合系统是由一个融合点和两条相反方向的排序边组成,如图 1 所示,其垂直剖面如图 2 所示。融合点是一个空间经纬度坐标,它的主要功能是汇聚来自不同方向的交通流量,实现航空器的整流,当航空器通过该点的瞬间,意味着离开点融合系统。排序边是以融合点为圆心的圆弧。靠近融合点的为内排序边,远离融合点的为外排序边。排序边具备吸纳航班延误的能力,同时也反映了整个点融合系统在处理飞行时间方面的效能。当排序边上的航空器与前机达到安全间隔就管制员就会向该航空器发布直飞融合点的指令。同时管制员可以灵活地缩短或延长航空器的飞行时间,从而有效地控制航空器之间的间隔,这有助于应对航班延误和不断变化的飞行条件。在离开排序边转向融合点时,航空器将进入连续下降运行。点融合系统将飞行管理系统的水平导航功能同雷达引导结合,与传统的进场方法相比,它可以优化多进场点的航班排序及间隔管理,简化管理指令,降低管制员与飞行员之间的交互频率,从而减轻管制员和飞行员的工作负担,为进场预留更多的安全时间余度。

## 2 问题描述及建模

以进场航班为研究对象对繁忙机场高峰时段下的航班进行排序,做以下假设:①飞机在进入点融合系统后会保持同一速度;②在点融合系统排序边上根据管制员给出指令按顺序进行直飞融合点;③对于点融合系统关闭的情况,不予考虑。

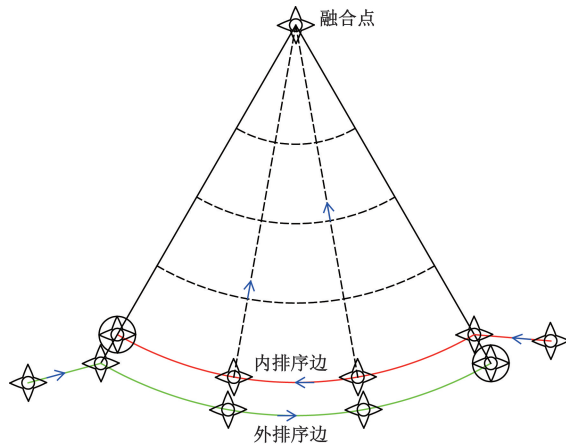


图1 经典点融合水平飞行轨迹

Fig. 1 Classic point fusion horizontal flight trajectory

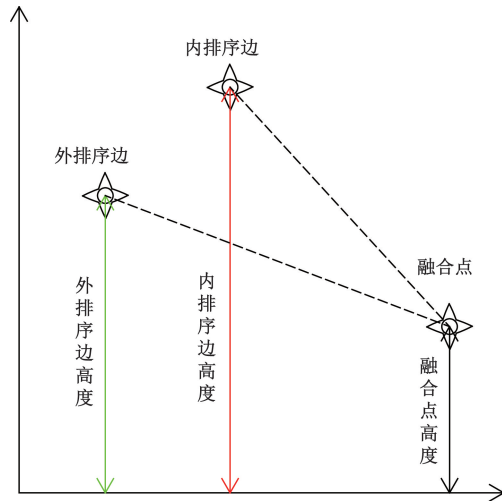


图2 经典点融合垂直剖面

Fig. 2 Classic point fusion vertical profile

## 2.1 优先级的设置

在航班运行的过程中,不同重要程度、不同机型以及不同载客量的航班所带来的延误损失是不同的,为使排序模型更具有实用性,应该考虑各航班不同的优先性。为各个航班设置相应的优先级。优先级越高,排序越靠前,从而实现更早的着陆。然而,考虑到优先级较高的航班可能伴随着较高的延误成本,必须将优先级转化为相应的惩罚系数,以对这些优先级高的航班施加适当的延误。这一调整的目的在于确保优先级较高的航班顺利运行。通过平衡优先级和延误之间的关系,可以更有效地优化航班排序,以提高整体运行效率。进场航班用  $f_i$  表示。

按照重要程度对每个航班选取3个特征参数,包括:航班的重要性(航程是否连续)用  $C_{f_i}$  表示,航班机型用  $N_{f_i}$  表示,航班载客率用  $W_{f_i}$  表示。每个参数下数值越小,代表优先级越高。如按照实际意义

连续航程航班要比非连续航程航班的优先级高即  $C_{f_i} = 1$  时要比  $C_{f_i} = 2$  时的优先级要高。

$$C_{f_i} = \begin{cases} 1, & \text{航班 } f_i \text{ 为连续航程} \\ 2, & \text{航班 } f_i \text{ 为非连续航程} \end{cases} \quad (1)$$

$$N_{f_i} = \begin{cases} 1, & \text{航班 } f_i \text{ 为重型机} \\ 2, & \text{航班 } f_i \text{ 为中型机} \end{cases} \quad (2)$$

$$W_{f_i} = \begin{cases} 1, & \text{航班 } f_i \text{ 载客率为拥挤} \\ 2, & \text{航班 } f_i \text{ 载客率为正常} \\ 3, & \text{航班 } f_i \text{ 载客率为空闲} \end{cases} \quad (3)$$

根据文献[17]可得到航班优先级指数的计算公式为

$$R_{f_i} = \frac{(P_{f_i} - 1)(P_{f_i} - 2)(P_{f_i} - 3)}{6} + \frac{(2P_{f_i} - C_{f_i} - 2)(C_{f_i} - 1)}{2} + N_{f_i} \quad (4)$$

式(4)中:  $P_{f_i} = C_{f_i} + N_{f_i} + W_{f_i}$ 。

例如,一架飞机为连续航程,重型航班且为载客率为拥挤的航班则  $R_{f_i} = 1$ ,优先级指数越小航班越先被安排落地。由于先落地的航班比较重要一旦延误,其延误成本要更大,为了使目标函数具有可靠性,则给优先级指数小的航班增加一个较大的惩罚系数。

惩罚系数的计算公式为

$$\mu_{f_i} = 1 + \frac{1}{R_{f_i}} \quad (5)$$

## 2.2 选取目标函数

### 2.2.1 最小化总延误成本

由于引入航班的优先级,其主要影响延误时间,因此需要增加一定的惩罚系数,将总延误时间改为总延误成本进行考虑,如式(6)所示。

$$\min \sum_{i=1}^n \mu_{f_i} (T_{f_i, o_r, p_L} - T_{f_i, o_r, p_L}^{\text{ETA}}) \quad (6)$$

式(6)中:  $T_{f_i, o_r, p_L}$  为航班  $f_i$  调度后的实际着陆的时间;下标  $p_L$  为着陆点;  $o_r$  为排序边,  $r=1$  表示航班位于点融合系统的外排序边,  $r=2$  表示航班位于点融合系统的内排序边;  $T_{f_i, o_r, p_L}^{\text{ETA}}$  为航班  $f_i$  预计着陆时间。

### 2.2.2 最小化通过点融合系统排序边总飞行时间

由于通过点融合系统的总飞行时间主要是排序边飞行时间的不同,因此考虑通过排序边的总飞行时间,如式(7)所示。

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^2 X_{f_i, o_r} [T_{f_i, o_r, p_r} - T_{f_i, o_r, p_g}^{\text{ETA}}] \quad (7)$$

式(7)中:  $T_{f_i, o_r, p_r}$  为航班  $f_i$  在排序边运行结束后准备转弯的时间;  $T_{f_i, o_r, p_g}^{\text{ETA}}$  为进入排序边的时间;下标  $p_r$  为转向点;下标  $p_g$  为排序边的进入点。

## 2.3 约束条件

### 2.3.1 排序边唯一约束

每架飞机只能在内外排序边的其中一个边上飞行。在下述实例中,根据广州白云机场点融合进场图,OLPAB方向的在内排序边,由IRTAT方向的在外排序边。 $X_{f_i, o_r}$ 为0-1变量,当航班在排序边上飞行时取1,不在时,取0,如式(8)所示。

$$\sum_{r=1}^2 X_{f_i, o_r} = 1 \quad (8)$$

### 2.3.2 尾流间隔约束

在进入排序边后使用优先级确定所有进场航空器的着陆次序。进场航空器需要配备相应的尾流间隔。在排序边时需要相应的尾流间隔,由于本文中,航空器保持相应的速度,所以需要考虑在点融合系统的进入点时的尾流间隔,在管制员按照相应的优先级向航空器先后发出“Direct to”指令直飞融合点的阶段也需要考虑相应的尾流间隔,因此,这个阶段只需要考虑融合点处的尾流间隔。

$$|X_{f_j, o_r} T_{f_j, o_r, p_e} - X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r, p_e}| \geq \Delta T_{f_i, f_j, p_e} \quad (9)$$

$$|X_{f_j, o_r} T_{f_j, o_r, p_m} - X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r, p_m}| \geq \Delta T_{f_i, f_j, p_m} \quad (10)$$

式中: $\Delta T_{f_i, f_j, p_e}$ 为两个航班在点融合系统进入点处的最小安全时间间隔; $\Delta T_{f_i, f_j, p_m}$ 为两个航班在点融合系统融合点处的最小安全时间间隔;下标 $p_e$ 为进场点;下标 $p_m$ 为融合点。

### 2.3.3 进入点融合系统的时间约束

$$X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r, p_e}^E \leq X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r, p_e} \quad (11)$$

$$X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r, p_e} \leq X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r, p_e}^L \quad (12)$$

式中: $T_{f_i, o_r, p_e}^E$ 为进入点融合系统的最早时间; $T_{f_i, o_r, p_e}^L$ 为进入点融合系统的最晚时间。

根据文献[8],此时航班飞行速度在-5%~10%调整,最早到达时间为预计到达点融合系统的0.95倍,最晚到达时间为预计到达点融合系统的1.1倍。 $T_{f_i, o_r, p_e}^{ETA}$ 航班 $f_i$ 的预计进入点融合系统的时刻。整理后的约束如式(13)和式(14)所示。

$$X_{f_i, o_r} (T_{f_i, o_r, p_e} - 0.95 T_{f_i, o_r, p_e}^{ETA}) \geq 0 \quad (13)$$

$$X_{f_i, o_r} (T_{f_i, o_r, p_e} - 1.1 T_{f_i, o_r, p_e}^{ETA}) \leq 0 \quad (14)$$

### 2.3.4 排序边长度约束

$$X_{f_i, o_r} T_{f_i, o_r} \leq T_{o_r} \quad (15)$$

式(15)中: $T_{f_i, o_r}$ 为航班 $f_i$ 在排序边上的飞行时间; $T_{o_r}$ 为航班在排序边上飞行的最大时间,由排序边的长度除以速度算得。

### 2.3.5 位置交换约束

在航班实际的排序过程中,如果对航班序列进行大规模的调整不仅会提高在的飞行冲突而且会增加管制员的工作负荷。在建立模型的过程中,鉴

于上述原因,需要对航班的交换次数进行限制,有必要引入约束位置交换(constraint position shifting, CPS)的概念,这一概念旨在限制航空器调度前后的位置交换范围,确保优化调度后的位置变化在可控的范围内。用来保证对航班调度的公平性,与先到的先服务相比也保证了优化调度结果的可操作性。规定最大约束位置交换次数不超过3,如式(16)所示。

$$|Y_{f_i} - Y_{f_i}^0| \leq 3 \quad (16)$$

式(16)中: $Y_{f_i}$ 为航班改变次序后的顺序; $Y_{f_i}^0$ 为航班的初始次序。

## 3 算法设计

### 3.1 算法描述

基于点融合的进场排序问题是非确定性多项式问题,确定航空器的着陆顺序的计算量是一个阶乘数,具有高度的复杂相关,对于这种问题的求解方式大多数是集中在启发式算法,采用NSGA-II算法对该问题进行求解,与传统的遗传算法相比,使用了拥挤度的概念,并且使用了快速非支配排序<sup>[18]</sup>,其优点是:降低了算法的复杂程度;避免了优良个体在选择过程中丢失;确保了目标空间中的种群均匀分布,从而使得种群个体的多样性得到保证,是解决多目标优化问题的算法之一,在选择时采用基于线性排名的父代选择方式进行改进,从而加快了求解速度。算法流程如图3所示。

### 3.2 决策变量编码方法

染色体编码采用自然数编码的方式,本文决策变量为序列数,每条染色体对应的适应度函数值存储在染色体中最后的位置。染色体模型如图4所示,其中1, 2, ..., 22为航班的序列,23, 24为适应度函数即目标函数值。

### 3.3 初始种群

非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)算法的解集很大程度上取决于对初始种群,通过生成0~3的随机数对固定顺序位置进行增减用以确定种群中存在的所有可行解。这将会大大增加初始解的生成速度从而提高计算效率。种群个数设置为20个。

### 3.4 快速非支配排序和拥挤距离计算

快速非支配排序和拥挤距离的计算是NSGA-II算法中的重要步骤,快速非支配排序的基本思想是通过比较解之间的支配关系,将解划分成不同的前沿层次。支配关系是指一个解在所有目标函数上至少与另一个解一样好,而在某个目标上优于另一个解。通过对所有解的比较引导算法向最优帕累

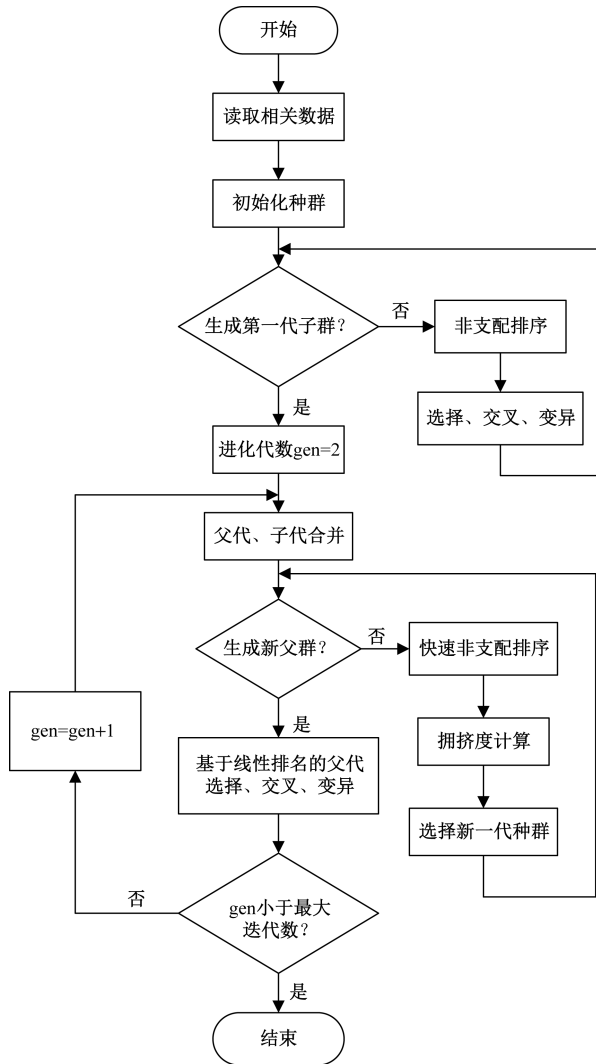


图3 NSGA-II算法流程

Fig. 3 NSGA-II algorithm process

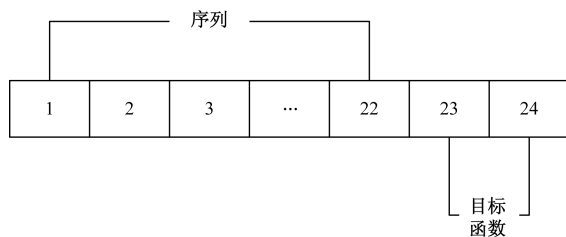


图4 染色体模型

Fig. 4 Chromosome model

托解集的方向进行。通过计算拥挤距离来维持种群的多样性,拥挤距离表示个体之间的拥挤程度,测量相同层级个体之间的距离。拥挤距离与目标函数值有关。在同一层次的个体中,使用拥挤度来进一步排序和选择个体。

### 3.5 NSGA-II的进化操作

选择操作借鉴了自然选择的思想,利用“优胜劣汰”的法则,其主要目标是确保在进化的过程中

仅有最适应环境的个体被保留,使其得以传递到下一代,从而避免解的收敛效果不佳的情况发生。采用基于线性排名的父代选择方式,在线性选择排名中,将种群的个体按照适应值从小到大,在NSGA-II中是先对等级进行降序排序,在对拥挤距离进行升序排序。排名越低(适应值越大),选择概率越高。然后按照式(17)中的线性函数来分配每个个体的选择概率。

$$p_i = \frac{1}{N} \left[ \eta^- + (\eta^+ - \eta^-) \frac{i-1}{N-1} \right] \quad (17)$$

式(17)中: $i=1,2,\dots,N$ ;  $\eta^+$ 、 $\eta^-$ 为指定的常数。

交叉是模拟生物进化过程中染色体的交叉换位现象,通过两个染色体的交换组合,用于生成新个体可以提高算法的搜索能力。变异是模拟生物基因的变异,与交叉操作一样,都用于产生新个体,采用随机选择某一基因为变异对象,交换次序。通过持续进行交叉和变异操作,可以有效提升种群个体之间的差异性和多样性,从而使其能够更广泛地探索搜索解空间。通过这些遗传操作,种群的探索能够更加全面、灵活,从而提高搜索算法的效率和性能。需要注意的是在交叉过程中同样限制位置数交换不能超过最大位置交换数。对每次生成的序列进行最大位置交换约束的判断,最终以达到设置的最大迭代次数200作为终止条件。

## 4 算法仿真

选取繁忙机场广州白云机场利用广播式自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)在2023年11月某日高峰时段21:00—23:00选取22架航班分析数据。为了简化计算根据21:10:00为基准进行时间的转化。以下有关时间的数据单位均为秒。广州白云机场点融合系统进场图如图5所示,有两条经过点融合系统的航段分别为IRTAT-GG802-GG806-GG820和OLPAB-GG814-GG819-GG820。GG802-GG806和GG814-GG819为两条排序边,航班在两条排序边中的任意位置都可直飞融合点GG820,外排序边长度为50 km,内排序边50 km,IRTAT至排序边的距离为10 km,OLPAB至排序边的距离为24 km。从外排序边飞向融合点的距离为65 km,从内排序边飞向融合点的距离为55 km。结合航图中对速度的限制,以及路径的长度,可以估算出航班的落地时间。

前文中已经规定在点融合系统之内的航班飞行速度不变,航班的飞行轨迹按照点融合程序航图执行,从而可以精确让实际间隔逼近安全间隔,所以通过点融合系统排序的航班的安全间隔设为最

小安全间隔,根据最小安全间隔文献[19]以进场航图中的平均速度230节可换算出在进场航图中的最小安全时间间隔如表1所示。

采用点融合程序的进场方式改变了原有的进场结构,对点融合程序的进场方式进行仿真,得出点融合程序的先到先服务相关数据,计算得到的数据如表2所示。

根据以上数据利用排序模型,分别利用未改进的遗传算法与改进的NSGA-II进行求解,初始种群均设置为20,迭代次数均为200次,最大偏移量设置为3。对改进的NSGA-II加强种群压力数值为 $\eta^+ = 1.9$ ,  $\eta^- = 0.1$ 。两种方法求得航班的最佳序列及目标函数数据如表3、表4所示。由表4可知,通过优化后得到的结果明显好于先到先服务与遗传算法的求解结果。

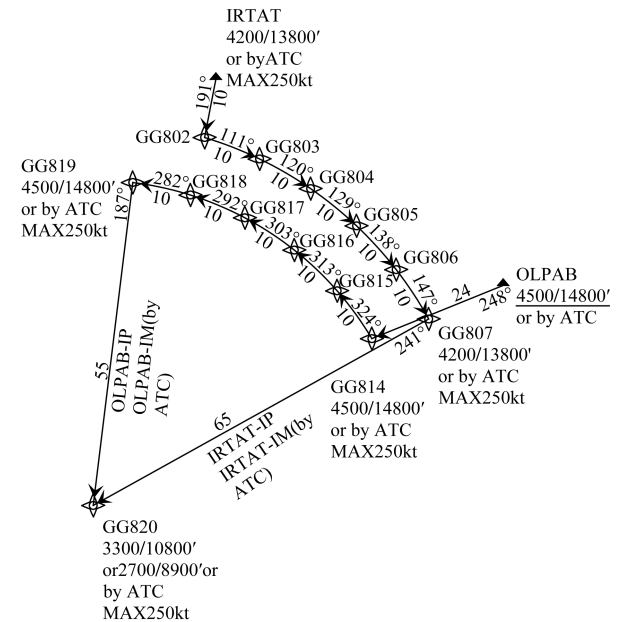


图5 广州白云机场点融合程序

Fig. 5 Guangzhou Baiyun Airport point merge program

表1 两机最小安全时间间隔

Table 1 Minimum safety time interval between two machines

前机	后机		
	重型机	中型机	轻型机
重型机	63 s	78 s	94 s
中型机	47 s	47 s	78 s
轻型机	47 s	47 s	47 s

表2 FCFS 航班数据及目标值

Table 2 FCFS flight data and target values

序号/序列	机型	航班连续性	上客率	ETA/s	$T_{f_i, o_r, p_e}$ /s	排序边	目标1	目标2
1	B737	非连续	正常	3 900	77	OLPAB	0	120
2	A320	非连续	拥挤	3 600	107	IRTAT	0	171
3	B737	连续	拥挤	2 700	232	OLPAB	0	59
4	B737	非连续	正常	3 600	398	OLPAB	0	0
5	A321	非连续	拥挤	1 500	403	IRTAT	1 361	76
6	B737	连续	拥挤	2 400	480	OLPAB	402.7	12
7	B737	非连续	正常	2 400	526	IRTAT	445.2	47
8	B737	非连续	拥挤	2 700	606	OLPAB	128.9	0
9	A320	连续	拥挤	3 000	811	OLPAB	0	0
10	A321	非连续	空闲	4 800	814	IRTAT	184.0	78
11	ARJ21	非连续	拥挤	4 800	864	IRTAT	0	74
12	B787	非连续	正常	1 800	957	OLPAB	1 537.9	0
13	A320	非连续	正常	5 100	1 080	OLPAB	0	0
14	A321	连续	拥挤	3 300	1 087	IRTAT	142.7	74
15	A321	非连续	空闲	-1 500	1 285	IRTAT	5 217.1	0
16	A350	非连续	拥挤	4 500	1 485	OLPAB	0	0
17	ARJ21	非连续	空闲	5 100	1 710	OLPAB	0	0
18	A321	非连续	拥挤	4 500	1 734	IRTAT	0	57
19	B737	非连续	拥挤	5 100	1 867	IRTAT	0	0
20	A350	非连续	正常	3 900	2 008	IRTAT	398.3	0
21	A320	非连续	拥挤	5 700	2 062	IRTAT	0	24
22	B737	非连续	拥挤	5 100	2 090	OLPAB	0	9

表3 遗传算法相关数据及目标值

Table 3 Genetic algorithm related data and target values

序列	序号	机型	ETA/s	$T_{f_i, o_r, p_e}$ /s	排序边	目标1	目标2
1	1	B737	3 900	77	OLPAB	0	120
3	2	A320	3 600	107	IRTAT	0	218
2	3	B737	2 700	232	OLPAB	0	12
5	4	B737	3 600	398	OLPAB	0	18
4	5	A321	1 500	403	IRTAT	1 251.2	0
7	6	B737	2 400	480	OLPAB	496.1	59
6	7	B737	2 400	526	IRTAT	370.9	0
8	8	B737	2 700	606	OLPAB	128.9	0
9	9	A320	3 000	811	OLPAB	0	0
10	10	A321	4 800	814	IRTAT	184	78
11	11	ARJ21	4 800	864	IRTAT	0	75
12	12	B787	1 800	957	OLPAB	1 537.9	0
14	13	A320	5 100	1 080	OLPAB	0	20
13	14	A321	3 300	1 087	IRTAT	13.5	0
15	15	A321	-1 500	1 285	IRTAT	5 217.1	0
16	16	A350	4 500	1 485	OLPAB	0	0
17	17	ARJ21	5 100	1 710	OLPAB	0	0
18	18	A321	4 500	1 734	IRTAT	0	57
19	19	B737	5 100	1 867	IRTAT	0	0
20	20	A350	3 900	2 008	IRTAT	398.3	0
21	21	A320	5 700	2 062	IRTAT	0	24
22	22	B737	5 100	2 090	OLPAB	0	9

如表5所示,NSGA-II求解的排序模型相对比FCFS的延误成本降低了4.1%,排序边飞行时间降低了32.5%。相对比遗传算法的延误成本降低了1.9%,排序边飞行时间降低了21.6%。

表4 NSGA-II算法相关数据及目标值

Table 4 NSGA-II algorithm related data and target values

序列	序号	机型	ETA/s	$T_{f_i, o_r, p_e}$ /s	排序边	目标1	目标2
2	1	B737	3 900	77	OLPAB	0	163
1	2	A320	3 600	107	IRTAT	0	120
3	3	B737	2 700	232	OLPAB	0	55
5	4	B737	3 600	398	OLPAB	0	18
4	5	A321	1 500	403	IRTAT	1 251.2	0
6	6	B737	2 400	480	OLPAB	386.7	0
7	7	B737	2 400	526	IRTAT	432.4	35
8	8	B737	2 700	606	OLPAB	128.9	0
10	9	A320	3 000	811	OLPAB	0	16
9	10	A321	4 800	814	IRTAT	49.5	0
11	11	ARJ21	4 800	864	IRTAT	0	44
12	12	B787	1 800	957	OLPAB	1 537.9	0
14	13	A320	5 100	1 080	OLPAB	0	20
13	14	A321	3 300	1 087	IRTAT	13.5	0
15	15	A321	-1 500	1 285	IRTAT	5 217.1	0
16	16	A350	4 500	1 485	OLPAB	0	0
18	17	ARJ21	5 100	1 710	OLPAB	0	37
17	18	A321	4 500	1 734	IRTAT	0	0
19	19	B737	5 100	1 867	IRTAT	0	0
20	20	A350	3 900	2 008	IRTAT	398.3	0
21	21	A320	5 700	2 062	IRTAT	0	24
22	22	B737	5 100	2 090	OLPAB	0	9

表5 各算法的目标值

Table 5 Target values for each algorithm

指标	目标1 (延误成本)/s	目标2 (排序边飞行时间)/s
先到先服务	9 818	801
遗传算法	9 598	690
NSGA-II算法	9 416	541

航班利用FCFS、遗传算法、NSGA-II算法的着陆时间如图6所示,虽然3种情况下最后一架航空器的着陆时间相等,但整体上利用NSGA-II算法优化后的每个航班着陆时间大部分都要低于或者持平于FCFS与遗传算法的着陆时间。由图6可知,该排序模型在前16架航班时运行的较好,表明在前16架航班利用NSGA-II算法的点融合排序模型更能提高航班的进场效率。

## 5 结论

提出的点融合系统的优先级排序模型,可以根据航空器的优先级并考虑位置转换约束对航班进行排序,从而获得更加提高空域效率的,更具有实际意义的航班序列。根据多目标函数的线性规划

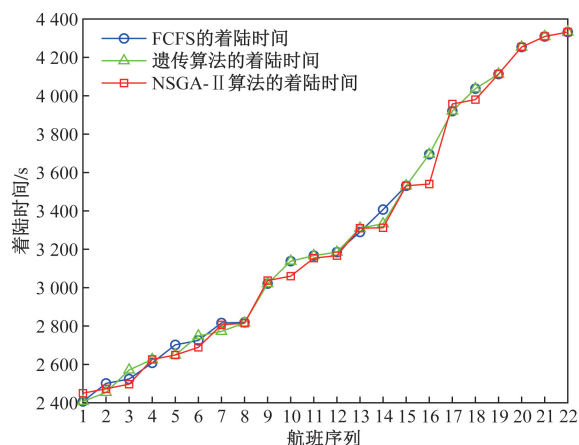


图6 各算法的着陆时间对比

Fig. 6 Comparison of landing times for various algorithms

模型选取改进的NSGA-II算法,并将模型中的变量转化为适合该算法的变量解,设计更为合理的算法。利用改进的NSGA-II算法优化模型得到的结果与FCFS算法、未改进的遗传算法进行对比,验证了该算法在求解点融合系统航班排序问题上能够有效地降低延误成本及排序边飞行时间,同时该排队模型针对广州白云机场前16架飞机的效果较好。

由于本次研究是聚焦于点融合进场程序和传统进场程序的排序问题,并未考虑航班在点融合系统中的精确的四维航迹,未来的研究中可结合此方面继续研究。

## 参 考 文 献

- [1] Sama M, D'Ariano A, D'Ariano P, et al. Scheduling models for optimal aircraft traffic control at busy airports: tardiness, priorities, equity and violations considerations[J]. Omega, 2017, 67: 81-98.
- [2] Prakash R, Piplani R, Desai J. An optimal data-splitting algorithm for aircraft scheduling on a single runway to maximize throughput[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 570-581.
- [3] 张军峰, 王菲, 葛腾腾. 基于分支定界法的进场航空器动态排序与调度[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(8): 1909-1914.  
Zhang Junfeng, Wang Fei, Ge Tengting. Dynamic sorting and scheduling of incoming aircraft based on branch and bound method[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1909-1914.
- [4] 吴维, 魏明, 叶志坚, 等. 考虑相邻跑道干扰的多目标进离场航班排序优化模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2512-2517.  
Wu Wei, Wei Ming, Ye Zhijian, et al. A multi-objective optimization model for inbound and outbound flight sequencing considering interference from adjacent runways[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2512-2517.
- [5] 温馨, 霍佳震. 基于动态优先级的多跑道混合起降航班调度问题研究[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(2): 1-8.  
Wen Xin, Huo Jiazhen. Research on the scheduling problem of multi runway mixed takeoff and landing flights based on dynamic

- priority[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2021, 26(2): 1-8.
- [6] 向征,袁博轩,刘玥琳. 基于多目标融合及改进遗传算法的终端区进场协同排序[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(29): 13104-13113.  
Xiang Zheng, Yuan Boxuan, Liu Yuelin. Collaborative sorting of terminal area entry based on multi-objective fusion and improved genetic algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(29): 13104-13113.
- [7] Liang M, Delahaye D, Maréchal P. A framework of point merge-based autonomous system for optimizing aircraft scheduling in busy TMA[C]//5th SESAR Innovation Days. Bologna: University of Toulouse II Le Mirail, 2015: 9-12.
- [8] Hong Y, Choi B, Lee K, et al. Dynamic robust sequencing and scheduling under uncertainty for the point merge system in terminal airspace[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(9): 2933-2943.
- [9] Liang M, Delahaye D, Marechal P. Conflict-free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point-merge system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 207-227.
- [10] Dönmez K, Çetek C, Kaya O. Aircraft sequencing and scheduling in parallel-point merge systems for multiple parallel runways[J]. *Transportation Research Record*, 2022, 2676(3): 108-124.
- [11] 王建忠,王超,张宝成. 基于点融合进近的航空器进场4D航迹规划[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(14): 333-337.  
Wang Jianzhong, Wang Chao, Zhang Baocheng. Aircraft approach 4D trajectory planning based on point fusion approach[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(14): 333-337.
- [12] 夏正洪,黄龙杨,王剑辉. 基于点融合技术的机场终端区运行效率[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 1176-1181.  
Xia Zhengong, Huang Longyang, Wang Jianhui. Airport terminal area operation efficiency based on point fusion technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(3): 1176-1181.
- [13] 王宁,翟文鹏. 基于点融合的多跑道进场航班排序[J]. *交通信息与安全*, 2021, 39(6): 108-116.  
Wang Ning, Zhai Wenpeng. Sorting of multiple runway arrival flights based on point fusion[J]. *Traffic Information and Safety*, 2021, 39(6): 108-116.
- [14] 白鹏,陈霖峰,王玺等. 基于点融合的进场程序优化与航空器排序研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(12): 45-52.  
Bai Peng, Chen Linfeng, Wang Xi, et al. Optimization of approach procedures and aircraft sequencing based on point fusion[J]. *Chinese Journal of Safety Sciences*, 2021, 31(12): 45-52.
- [15] 朱晓波,曹银杰,方鹏越,等. 终端区点融合进场程序运行安全和效率仿真评估[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(9): 2984-2992.  
Zhu Xiaobo, Cao Yinjie, Fang Pengyue, et al. Simulation evaluation of safety and efficiency in the operation of terminal area point fusion entry program[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(9): 2984-2992.
- [16] 田勇,梁满佳,徐灿,等. 点融合程序研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(8): 3141-3152.  
Tian Yong, Liang Manjia, Xu Can, et al. Research progress of point fusion program[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(8): 3141-3152.
- [17] 张建同,杨文娟. 基于优先级的进离港航班排序优化问题研究[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(6): 115-121.  
Zhang Jiantong, Yang Wenjuan. Research on priority based optimization of arrival and departure flight sorting[J]. *Operations Research and Management*, 2018, 27(6): 115-121.
- [18] 黄艳国,韩亮,张硕,等. 基于NSGA-II算法的多目标公交调度优化模型[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(19): 295-300.  
Huang Yanguo, Han Liang, Zhang Shuo, et al. A multi-objective public transportation scheduling optimization model based on NSGA-II algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(19): 295-300.
- [19] 张启钱,胡明华,张洪海. 基于RHC-GA的多跑道进离场航班多目标动态优化模型[J]. *交通运输工程学报*, 2015(2): 70-78.  
Zhang Qiqian, Hu Minghua, Zhang Honghai. A multi-objective dynamic optimization model for multi runway inbound and outbound flights based on RHC-GA[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2015(2): 70-78.