

控制与决策

Control and Decision

基于IABC算法的舰载机着舰调度

刘玉杰, 万兵, 苏析超, 郭放

引用本文:

刘玉杰, 万兵, 苏析超, 郭放. 基于IABC算法的舰载机着舰调度[J]. *控制与决策*, 2022, 37(7): 1810–1818.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1767>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2751–2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

基于操作风险的双模式传感器管理方法

A dual-mode sensor management method based on operational risk

控制与决策. 2020, 35(12): 2993–2998 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541>

离散蝙蝠算法在三阶段装配流水线调度问题的应用

Discrete bat algorithm in three-stage assembly flowshop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(9): 2267–2278 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0054>

基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

基于地标特征和元学习方法推荐最适用优化算法

Recommending best suitable metaheuristic based on landmarking feature and meta-learning approach

控制与决策. 2021, 36(5): 1223–1231 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0993>

基于IABC算法的舰载机着舰调度

刘玉杰¹, 万兵¹, 苏析超², 郭放^{1†}

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东烟台 264001; 2. 海军航空大学航空作战勤务学院, 山东烟台 264001)

摘要: 舰载机有序、高效着舰是确保舰载机舰面保障计划如期进行的必要前提, 为提高舰载机着舰效率并减轻传统人工着舰排序的负担, 研究一种舰载机着舰调度算法. 首先, 以加权着舰完成时间和为优化目标, 构建舰载机着舰调度的数学模型; 其次, 提出一种改进的人工蜂群算法用于模型求解, 算法在基本人工蜂群算法的基础上引入遗传算法中的交叉算子、精英策略以及一系列自适应局部搜索策略, 以增强算法的全局搜索性能, 提高算法收敛速度; 最后, 通过着舰调度案例仿真和算法对比表明, 改进的人工蜂群算法具备更强的优化性能和更好的鲁棒性, 可以求解大规模舰载机着舰调度问题, 具有工程实际应用价值.

关键词: 舰载机; 着舰调度; 人工蜂群算法; 交叉; 精英策略

中图分类号: V355.2

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1767

引用格式: 刘玉杰, 万兵, 苏析超, 等. 基于IABC算法的舰载机着舰调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1810-1818.

Scheduling of landing for carrier-based aircraft based on improved artificial bee colony algorithm

LIU Yu-jie¹, WAN Bing¹, SU Xi-chao², GUO Fang^{1†}

(1. School of Basic Science for Aviation, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Aeronautical Operations College, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: The orderly and efficient landing of carrier-based aircrafts is a necessary prerequisite to ensure that the deck operation support plan is carried out as scheduled. In order to improve the landing efficiency of carrier-based aircrafts and reduce the burden of traditional manual landing scheduling, a landing scheduling algorithm for carrier-based aircrafts is studied. Firstly, the mathematical model of landing scheduling for a carrier-based aircraft is constructed with the weighted landing time sum as the optimization objective. Secondly, an improved artificial bee colony algorithm is proposed to solve the model. Based on the basic artificial bee colony algorithm, the crossover operation, the elite strategy and a series of adaptive local search strategies are introduced to enhance the global search performance of the algorithm and improve the convergence speed of the algorithm. Finally, the case study and algorithm comparison verify, the effectiveness of the proposed scheduling model, and show that the improved artificial bee colony algorithm has stronger optimization performance and better robustness, which can solve the large-scale carrier aircraft landing scheduling problem, having practical engineering application value.

Keywords: carrier-based aircraft; landing scheduling; artificial bee colony algorithm; crossover; elite strategy

0 引言

据美海军统计, 在能见度较好的白天, 舰载机首次着舰成功率大约只有 70%, 在能见度不好的情况下着舰成功率可能更低^[1]. 因此, 优化舰载机着舰序列, 制定出合理的复飞应对策略, 对于确保舰载机着舰安全性和提高着舰效率具有重要意义. 近年来, 一些学者针对舰载机着舰调度问题已进行了部分研究. 林华等^[2]针对舰载机着舰排序问题, 比较了先来

先服务、基于最早到达时刻和滑动时间窗 3 种常用排序规则在舰载机着舰调度问题中的表现效果, 通过仿真表明滑动时间窗排序方法具有较好的优化效果, 但文献中的 3 种方法均是基于预计到达时刻, 并不适用于舰载机呈编队到达情况. 刘爱东等^[3]提出着舰调度人员应该综合考虑确定因素和随机因素的影响, 并通过引入模拟退火算法进行局部搜索来改进粒子群优化算法, 进而对着舰风险成本进行优化, 以降低着

收稿日期: 2020-12-17; 录用日期: 2021-04-21.

基金项目: 武器装备预先研究项目.

责任编辑: 阳春华.

[†]通讯作者. E-mail: guofang575856@163.com.

舰风险. 考虑到着舰过程中可能存在的复飞情况, 夏国清等^[4]结合舰载机着舰调度过程中的排序特性, 基于排队论建立了舰载机着舰调度的反馈排队模型, 综合考虑了舰载机到达率、甲板处理能力和舰载机复飞率的影响, 可以评估舰载机的回收效率. Wu等^[5]则提出重新参与排序和复飞后直接着舰两种舰载机复飞后加入着舰航线的策略, 但是复飞的舰载机确定不具有随机性. 以上各项研究在一定条件下能找到较好的着舰策略, 但由于舰载机着舰作业的危险性、着舰流程存在复飞、着舰跑道单一等相对于陆地机场着陆过程存在的特殊性, 以及求解过程中的NP-hard特性, 舰载机着舰是航母波次作业周期中的重要一环, 着舰效率直接影响航母的作战效能. 此外, 该调度问题约束较为复杂且规模较大, 因此仍存在一定优化空间, 有必要贴近舰载机着舰实际, 从全局和局部两方面对舰载机着舰调度问题进一步优化.

人工蜂群 (artificial bee colony, ABC) 算法由 Karaboga 等^[6]在 2007 年提出, 源于对蜂群采蜜过程的模拟. 由于构造简单、参数较少, 具有较强的寻优能力, 且较好地体现了探索与开发的良好结合, ABC 算法在单机调度^[7-8]、并行机调度^[9-10]、混合流水车间调度^[11-12]、作业车间调度^[13-14]和开放车间调度^[15]、车辆路径规划^[16]、虚拟机调度^[17]等经典调度问题上得到了广泛应用. 然而, 基本 ABC 算法在求解 NP-hard 问题时仍存在收敛速度较慢、易于陷入局部最优解的不足. 鉴于此, 本文结合舰载机着舰流程特点

建立舰载机着舰调度模型, 为进一步提高算法的优化能力, 减少陷入局部最优解的可能性, 在标准 ABC 的架构上提出一种改进的 ABC 算法用于模型求解. 算法引入遗传算法中的交叉算子和全局精英策略, 增强全局寻优能力、加快算法收敛速度. 此外, 采用面向精英蜜源的自适应局部搜索策略, 以较大概率对优良蜜源进行进一步局部搜索. 通过典型着舰调度案例的优化求解, 验证了所提出算法的优越性.

1 问题描述

通常情况下, 固定翼舰载机有 3 类着舰模式: 第 I 类适合白天或目视条件下着舰; 第 III 类适合夜间或仪表条件下着舰; 第 II 类是前两类的混合模式, 使用条件介于两者之间^[18]. 本文主要研究第 III 类着舰模式.

舰载机执行作战任务后返航、着舰, 主要过程如图 1 所示. 第 III 类着舰模式下舰载机进近着舰过程如图 2 所示.

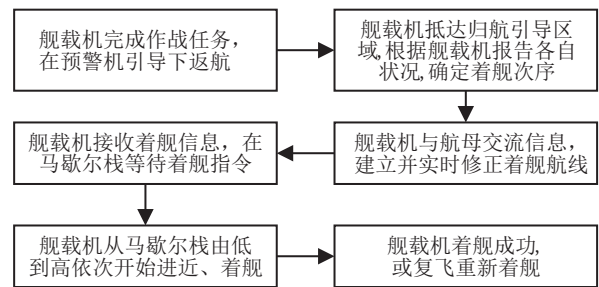


图 1 舰载机回收过程

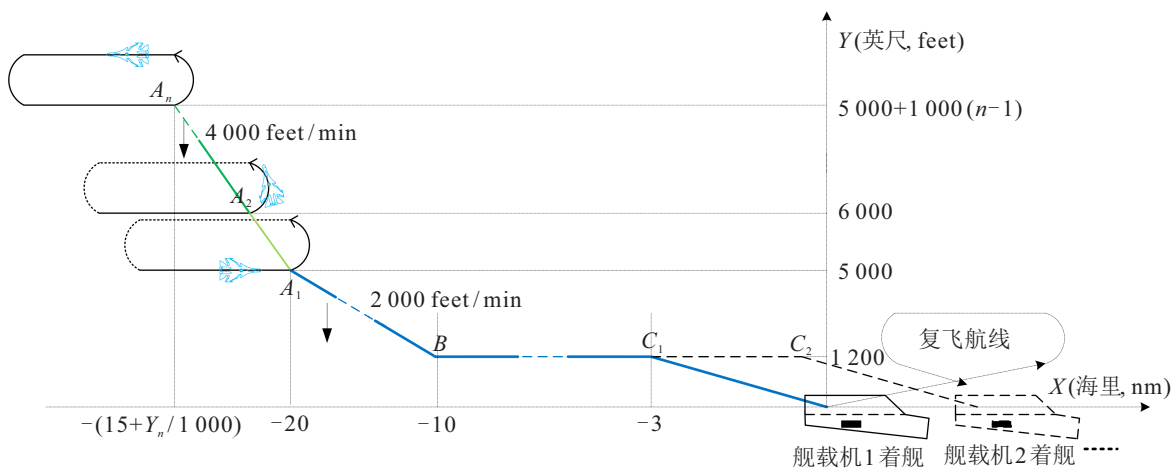


图 2 第 III 类着舰模式下舰载机编队进近着舰航路

图 2 中, 由 n 架舰载机组成的舰载机编队在马歇尔栈等待着舰, $A_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 为第 k 架舰载机等待航线上的马歇尔点, 舰载机接收着舰指令后, 均从对应的马歇尔点开始进近. 与马歇尔点对应, $C_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 为舰载机由平飞转入下滑着舰的

点, 称为下滑点. 各等待航线上的马歇尔点距离航母的距离 L_{A_k} 满足 $L_{A_k} = 15 + H_k/1000$, 其中 H_k 为等待航线的高度^[19]. 接收到着舰指令后, 在马歇尔栈等待的舰载机按照预定的时间以 4 000 feet/min 的下滑率下滑到马歇尔点, 然后以 2 000 feet/min 的下滑率

下滑到B点.此后,舰载机保持平飞.

舰载机在转入下滑前,需要减速到着舰速度,对正着舰航向,放下襟翼,检查起落架、尾勾状态.此外,飞行员需要向着舰引导员报告舰载机油量,以根据舰载机重量调整拦阻索.若舰载机尾勾成功勾住拦阻索,则舰载机减速停下后滑行至位于舰艏的临时停机

区,如图3所示.否则,舰载机需要复飞进入复飞航线进行下一次着舰尝试.由于舰载机滑向临时停机区的时间较短,前一架飞机滑行过程不会对后续飞机着舰过程造成影响.当同一批次所有舰载机均成功着舰并滑行至临时停机区后,它们将由牵引车牵引到停机区进行机务保障或进入机库进行维修、停放.

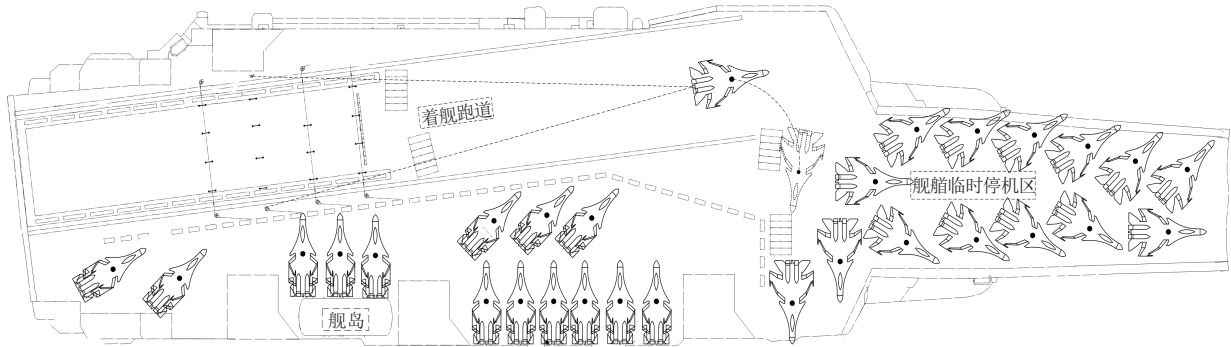


图3 尼米兹级航母舰载机着舰时甲板示意图

2 模型建立

2.1 调度模型参数及决策变量定义

为建立舰载机着舰调度模型,定义参数变量如下: I 为待着舰舰载机集合; $i, l(i, l \in I)$ 为待回收舰载机编号; I_m 为第 m 次调度中待回收的舰载机集合; S_m^A 为第 m 次调度中已经加入着舰航线的舰载机集合; S_m^C 为第 m 次调度中已经着舰的舰载机集合; $q(m)$ 为触发第 m 次重调度的舰载机编号; $\Delta T_{s_{il}}$ 为舰载机 i 先于 l 着舰,两者之间的尾流间隔时间; ΔT_c 为甲板清场时间; $\Delta T_{w_{\min}}$ 和 $\Delta T_{w_{\max}}$ 分别为舰载机在复飞航线上所需时间的最小值和最大值,舰载机在复飞航线上的时间通常为相对固定值,当其重新加入着舰航线与后续舰载机的着舰航线冲突时,有一定的调整余地以解决冲突; N_s 为复飞后重调度决策次数; f_i 为舰载机 i 由剩余燃油量决定的着舰优先级; int_i 为舰载机 i 由战损程度决定的优先级; p_i 为舰载机 i 由后续作战任务决定的优先级; w_i 为舰载机 i 着舰的综合权重.

此外,定义如下决策变量: LT_{im} 为舰载机 i 在第 m 次调度中的着舰完成时间, $i \in I_m$; TA_{km}^i 为舰载机 i 在第 m 次调度中离开马歇尔点 A_k 的时刻, $\forall i \in I - S_m^C$; TC_{km}^i 为舰载机 i 在第 m 次调度中到达下滑点 C_k 的时刻;变量 $x_{ilm}(i, l \in I_m, m = 0, 1, \dots, N_s)$ 直接决定舰载机的着舰顺序,其取值为

$$x_{ilm} = \begin{cases} 1, & \text{在第}m\text{次调度中舰载机}i\text{先于舰载机}l\text{着舰;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

2.2 着舰排序评价指标分析

舰载机在着舰序列中的位置通常由一些重要因素决定,本文主要考虑舰载机剩余燃油量、战损程度和后续作战任务参与情况.由于3个因素的数值大小差距悬殊且单位不同,对其进行归一化处理以保证每个影响因素重要性相同,具体实现过程如后文给出的式(1)~(3)所示,然后根据各因素的重要性不同为其赋予一定的权重.

2.2.1 舰载机剩余燃油量

剩余燃油量是舰载机空中续航时间的主要决定因素,为确保舰载机有充足的续航时间,以应对复飞、逃逸等突发情况,而成功着舰剩余燃油量不能太少;另外,舰载机重量只有在一定范围内才允许着舰,着舰时舰载机过重会增加舰载机发生事故的概率,威胁舰载机和航母的安全,这便要求舰载机的剩余燃油量不能太多.因此,进入返航引导区的舰载机剩余燃油量 $F_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 需满足 $F_{\min} < F_i < F_{\max}$.在满足条件情况下,剩余油量越少,着舰优先级应该越高,所以由剩余燃油量决定的着舰优先级可以表示为

$$f_i = 1 - (F_i - F_{\min}) / (F_{\max} - F_{\min}). \quad (1)$$

2.2.2 舰载机战损程度

舰载机是航母战斗群作战的直接参与者,也是最易受到敌方攻击的作战力量.通常,若舰载机战损程度过大(不能保持平稳飞行),则不能在航母上着舰回收,需转到陆上机场回收.以舰载机完整度 $\text{IN}_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 表示舰载机战损程度,该值由飞行员估计给出,以整5计数.由舰载机战损程度决定的着舰优

优先级可以表示为

$$\text{int}_i = 1 - (\text{IN}_i - \text{IN}_{\min}) / (1 - \text{IN}_{\min}). \quad (2)$$

2.2.3 舰载机后续作战任务参与期望

舰载机着舰后,需在停机区完成机身部件检查、加油、挂载武器、充氧、充氮、对准惯性导航系统等系列甲板保障后,才能再次弹射起飞参与后续着舰任务^[20].如图3,后着舰的舰载机更接近停机区,较先着舰的舰载机能够先接受如上所述的甲板保障,因此参加后续着舰任务期望高的舰载机应该后着舰.舰载机参与后续作战任务期望表示调度人员期望该舰载机参加后续作战任务的可能性,记为 $P_i (P_{\min} < P_i < P_{\max})$,由其决定的着舰优先级可以表示为

$$p_i = 1 - (P_i - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}). \quad (3)$$

为综合体现上述3个指标对舰载机着舰优先级的影响,取其加权和表示舰载机的着舰优先级,有

$$w_i = \mu_1 f_i + \mu_2 \text{int}_i + \mu_3 p_i. \quad (4)$$

其中 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 为上述3个评价指标的权重,满足 $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$.

2.3 着舰调度模型

舰载机着舰调度优化问题的本质是在保证舰载机着舰安全的前提下,提升舰载机着舰速度,其模型可以描述为:待保障机群 $I = \{1, 2, \dots, n\}$,在满足各类约束条件的前提下,以最小化目标函数的着舰顺序依次着舰.为充分考虑舰载机着舰安全和着舰速度,以加权着舰完成和为优化目标建立着舰调度数学模型如下:

$$\min F = \sum_{i=1}^n w_i \text{LT}_{im}, m = 0. \quad (5)$$

$$\text{s.t. TA}_{km}^l \geq x_{ilm} \cdot (\Delta \text{TS}_{il} + \text{TA}_{km}^i), \quad \forall i, l \in I - S_m^C, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (6)$$

$$\text{TC}_{km}^l \geq x_{ilm} \cdot (\Delta \text{TS}_{il} + \text{TC}_{km}^i), \quad \forall i, l \in I - S_m^C, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (7)$$

$$\text{LT}_{km}^l \geq x_{ilm} \cdot (\Delta \text{TS}_{il} + \text{LT}_{km}^i), \quad \forall i, l \in I - S_m^C, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (8)$$

$$\text{LT}_{lm} \geq x_{ilm} \cdot (\Delta \text{Tc} + \text{LT}_{im}), \quad \forall i, l \in I_m, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (9)$$

$$\text{TC}_{km}^{q(m)} \in [\text{LT}_{q(m)(m-1)} + \Delta \text{Tw}_{\min}, \text{LT}_{q(m)(m-1)} + \Delta \text{Tw}_{\max}], \quad m = 1, 2, \dots, \text{Ns}; \quad (10)$$

$$\sum_{l \in I_m} x_{ilm} \leq 1, \quad \forall i \in I_m, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (11)$$

$$\sum_{l \in I_m} x_{ilm} \leq 1, \quad \forall i \in I_m, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (12)$$

$$x_{ilm} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, l \in I_m, m = 0, 1, \dots, \text{Ns}; \quad (13)$$

$$x_{ilm} = x_{il(m-1)}, \quad \forall i, l \in S_m^A, i \neq q(m), l \neq q(m), m = 1, 2, \dots, \text{Ns}. \quad (14)$$

其中:式(6)~(8)分别为马歇尔点、下滑点和着舰点的尾流间隔约束,避免由前机发动机排出的尾气被后续舰载机的发动机吸入而引起飞行事故;式(9)表示甲板清场时间约束,在此期间成功着舰的舰载机减速至停止,甲板工作人员从舰载机尾勾取下阻拦索,随后检查着舰跑道;式(10)为复飞舰载机加入着舰航线下滑点C满足的时间约束,对于在复飞航线的舰载机而言,其复飞着舰航线可能与后续舰载机的着舰航线冲突,这种情况下首先在复飞航线的舰载机会调整其复飞航线时间以解决冲突,否则后续舰载机需要复飞;式(11)~(14)为决策变量需要满足的约束条件.

3 改进人工蜂群算法

3.1 传统人工蜂群算法

传统人工蜂群算法的组成包括引领蜂、跟随蜂和侦察蜂,蜜源与引领蜂一一对应,每个蜜源的位置代表一个调度方案.在其迭代优化过程中,标准的优化流程如下.

step 1: 蜜源和参数初始化.

step 2: 为每个蜜源分配一只引领蜂,由式(15)执行局部搜索,在领域产生一个新蜜源位置,并计算其适应度值,若高于原蜜源位置则原位置被新位置替代,有

$$V_{ij} = X_{ij} + \Phi(X_{ij} - X_{kj}), \quad i \neq k. \quad (15)$$

其中: V_i 为产生的新蜜源; X_k 为随机选取的一个个体; j 为随机选取的维度; $\Phi \in [-1, 1]$ 为均匀分布的随机数,决定了扰动的幅度.

step 3: 跟随蜂根据蜜源适应度值,利用式(16)通过轮盘赌机制进行概率选择,再利用式(15)执行局部搜索,同step 2,有

$$p_i = \frac{\text{fit}_i}{\sum_{j=1}^{\text{BN}} \text{fit}_j}. \quad (16)$$

其中: fit_i 为当前蜜源位置适应度值, p_i 为该位置被选择的概率.

step 4: 根据蜜源停留次数启动侦察蜂随机搜索新蜜源.

step 5: 判断迭代终止条件,满足则输出最优解,否则转入step 2继续迭代.

3.2 改进ABC算法求解舰载机着舰调度问题

3.2.1 编码和解码

舰载机着舰调度问题中,选取舰载机在着舰序列中的位置为优化变量,采用十进制小数编码,蜜源个体 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 表示一个着舰调度方案,其中 $x_i \in [0, 1]$ 表示对应蜜源维度位置对应舰载机着舰优先级,值越小代表优先级越高. 解码采用穿行调度生成机制^[21],根据优先级安排舰载机着舰.

3.2.2 引领蜂阶段

式(15)仅在蜜源个体单维度上进行局部搜索,缺乏探索的全局性,易陷入局部最优解. 对此,在原有基础上增加遗传算法中的交叉算子,随机选择另一个蜜源,任选一维度执行交叉操作,提高全局搜索能力,如图4所示.

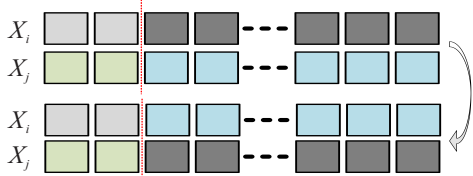


图4 交叉算子示意图

3.2.3 跟随蜂阶段

经典ABC算法中,跟随蜂的本质是以较大的概率对优良蜜源进行进一步搜索. 基于此,在该阶段增加面向精英蜜源的自适应局部搜索策略,以提高算法的探索能力. 针对舰载机着舰调度问题的特点,采用对换两架舰载机在着舰序列中的位置和序列中相邻着舰舰载机批次交换着舰顺序两种局部搜索策略.

1) 对换两架舰载机在着舰序列中的位置. 如图5所示,随机选择蜜源个体中的两个维度位置互相交换,则解码后两维度位置对应的舰载机交换着舰次序.

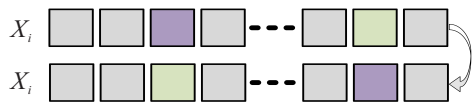


图5 两架舰载机对换着舰位置

2) 相邻着舰舰载机批次交换着舰顺序. 如图6所示,随机选择单个蜜源个体中连续 N_i 数量批次的维度位置互相交换,则解码后相应位置舰载机批次交换着舰顺序.

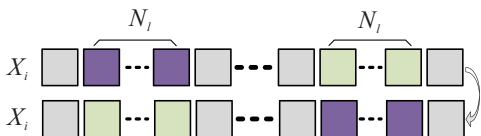


图6 相邻着舰舰载机批次交换着舰顺序

3.2.4 侦察蜂阶段

在基本ABC算法中,如果一个蜜源经过Limit次数未得到优化,则放弃该蜜源,同时该处的采蜜蜂转变成侦察蜂,利用混沌初始化,随机搜索新蜜源. 为提高算法收敛速度,在此阶段引入精英策略,即以蜜源中适应度值最优的前 N_e 个蜜源替换蜜源中适应度值最劣的 N_e 个蜜源.

3.2.5 改进ABC算法流程

基于上述算法改进,给出求解舰载机着舰调度问题的改进ABC算法流程,算法采用最大着舰调度方案生成次数 N_{max} 为迭代终止条件,如图7所示.

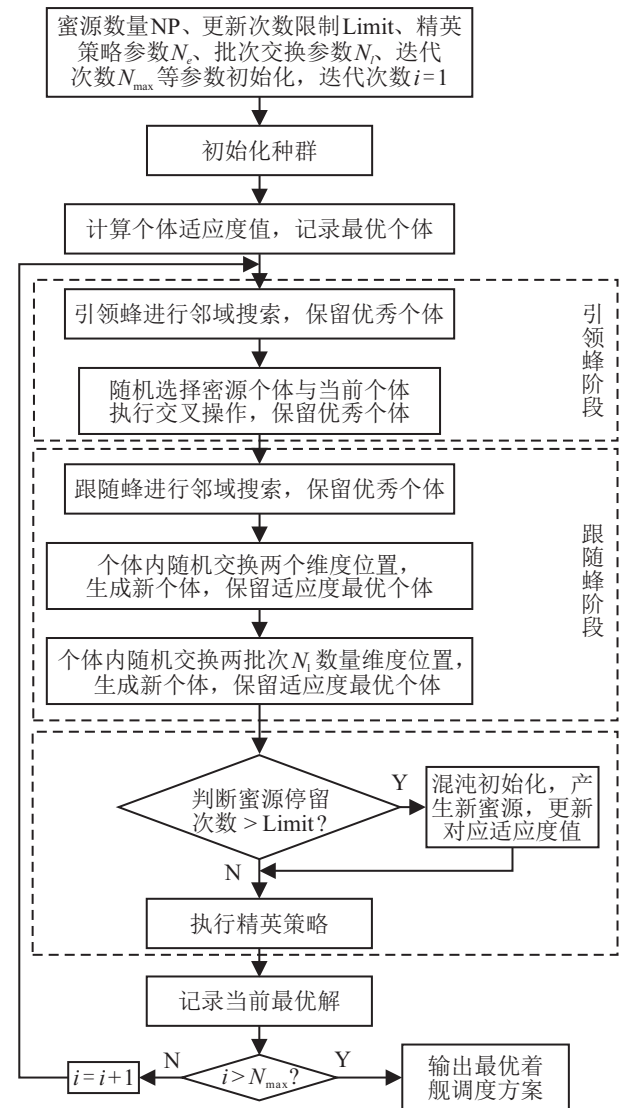


图7 改进ABC算法流程

4 着舰调度案例仿真

为验证算法在大规模着舰调度问题中的性能,基于尼米兹级航母,选取某波次28架F/A-18E/F舰载机着舰任务进行调度仿真.

由F/A-18E/F,进近速度 $V_{pa} = 140$ 节、失速速度 $V_s = 114$ 节^[16],着舰速度取两者均值,可计算出舰

载机着舰相应阶段时间. 因为F/A-18E/F为小型飞机, 尾流间隔时间 $\Delta T_{s_{il}}$ 取 94 s ^[3]. 甲板清场时间 ΔT_c 取 80 s .

剩余油量参数: $F_{\min} = 600\text{ L}$, $F_{\max} = 2000\text{ L}$; 完整度参数: $I_{\min} = 60$, $I_{\max} = 100$; 后续任务优先级参数: $P_{\min} = 0$, $P_{\max} = 6$; 3种评价指标权重: $\mu_1 = 0.2$, $\mu_2 = 0.6$, $\mu_3 = 0.2$.

结合文献[3], 可得到案例中使用的舰载机信息如表1所示.

表1 案例中使用的舰载机信息

名称	编号	类型	剩余燃油量/L	完整度 (%)	任务优先级	ω_i
F/A-18E/F	1	小	1200	100	3	0.21
F/A-18E/F	2	小	1000	90	2	0.43
F/A-18E/F	3	小	1600	90	3	0.31
F/A-18E/F	4	小	1000	80	3	0.54
F/A-18E/F	5	小	1500	70	3	0.62
F/A-18E/F	6	小	1400	100	4	0.15
F/A-18E/F	7	小	900	80	2	0.59
F/A-18E/F	8	小	1800	90	2	0.31
F/A-18E/F	9	小	1600	80	3	0.46
F/A-18E/F	10	小	1500	95	5	0.18
F/A-18E/F	11	小	1100	100	1	0.30
F/A-18E/F	12	小	1400	85	5	0.34
F/A-18E/F	13	小	1200	90	4	0.33
F/A-18E/F	14	小	1000	95	5	0.25
F/A-18E/F	15	小	1300	100	5	0.13
F/A-18E/F	16	小	1000	80	4	0.51
F/A-18E/F	17	小	1500	100	5	0.10
F/A-18E/F	18	小	1200	100	3	0.21
F/A-18E/F	19	小	1800	100	2	0.16
F/A-18E/F	20	小	1400	100	1	0.25
F/A-18E/F	21	小	1100	100	4	0.20
F/A-18E/F	22	小	1200	100	3	0.21
F/A-18E/F	23	小	1600	100	2	0.19
F/A-18E/F	24	小	1300	90	2	0.38
F/A-18E/F	25	小	1100	100	5	0.16
F/A-18E/F	26	小	1400	60	4	0.75
F/A-18E/F	27	小	1500	100	3	0.17
F/A-18E/F	28	小	1200	90	3	0.36

为进一步体现改进ABC算法的性能, 选取求解类似问题的油少先着舰规则(FLFS)^[2]、改进粒子群优化算法(IPSO)^[3]、基本ABC算法^[6]、改进遗传算法(IGA)^[22]和教与学优化算法(TLBO)^[23]进行对比. 各算法参数设置如下:

本文改进ABC算法中, 蜜源数量 $NP = 30$, 自适应局局部搜索参数 $N_l = 3$, 精英个体数量 $N_e = 2$, 停留次数限制 $Limit = 100$;

IGA算法中, 种群规模 $P = 30$, $P_{c_1} = 0.95$, $P_{c_2} = 0.5$, $P_{m_1} = 0.1$, $P_{m_2} = 0.05$;

TLBO算法中, 学生数量 $S = 30$;

IPSO算法中, 粒子数量 $M = 30$, 加速因子 $c_1 = c_2 = 0.1$, 惯性权重 $\omega = 1$;

基本ABC算法中, 蜜源数量 $NP = 30$, 停留次数

限制 $Limit = 100$.

迭代次数均设为600, 在配置为Intel® Core™i7处理器、16 GB RAM的笔记本电脑上利用Anaconda Spyder 4.0编程实现舰载机着舰调度案例的改进ABC算法以及上述5个对比算法, 分别独立运行10次, 结果见表2. 各算法10次运行中最优解对应收敛过程如图8所示. 记第1架舰载机离开马歇尔栈时刻为零时刻.

表2 改进ABC算法与其他算法对比结果

仿真次数	IABC	IGA	TLBO	IPSO	ABC
1	13 632	14 940	14 314	14 165	15 832
2	13 579	14 795	14 250	13 948	15 420
3	13 697	14 613	14 535	13 918	16 145
4	13 666	14 747	14 588	14 179	15 365
5	13 665	14 942	14 318	14 001	15 703
6	13 756	14 807	14 704	13 898	15 482
7	13 632	14 839	14 108	14 158	15 657
8	13 637	14 787	14 259	14 168	15 896
9	13 744	14 395	14 674	14 185	15 775
10	13 582	14 718	14 550	13 812	15 599
平均值	13 659.0	14 758.3	14 430.0	14 043.2	15 687.4
标准差	56.95	152.53	193.99	135.35	225.41

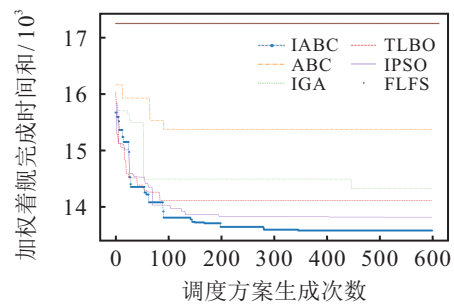


图8 算法最优解收敛曲线

对比各算法仿真结果可以发现, 改进ABC算法平均结果明显优于其余算法, 优化性能更加突出, 且算法求解波动最小, 具有较强的鲁棒性.

此外, 由图8收敛曲线可见, 改进ABC算法同样具有较好的收敛速度, 约350次调度方案生成即可达到最优. 基本ABC算法和TLBO算法虽然收敛速度快, 但易陷入局部最优解. 改进PSO算法与改进ABC算法在理论上具有一定的相似性, 但其主要集中于搜索全局性方面的改进, 局部搜索能力不足, 因此寻优效率会降低. 对于FLFS规则, 由于文中剩余燃油量的权重较低, 其表现性能最差.

由改进ABC算法求解得到的舰载机着舰调度时序方案如图9所示. 图中: 横轴为着舰过程时间轴, 纵轴为舰载机编号, 4段矩形框中的整数为纵轴对应舰载机在着舰顺序中的位置, 5个小数从左至右分别为纵轴对应舰载机离开等待航线时刻、经过马歇尔点 A_1 时刻、转平飞时刻、转下滑时刻和着舰时刻.

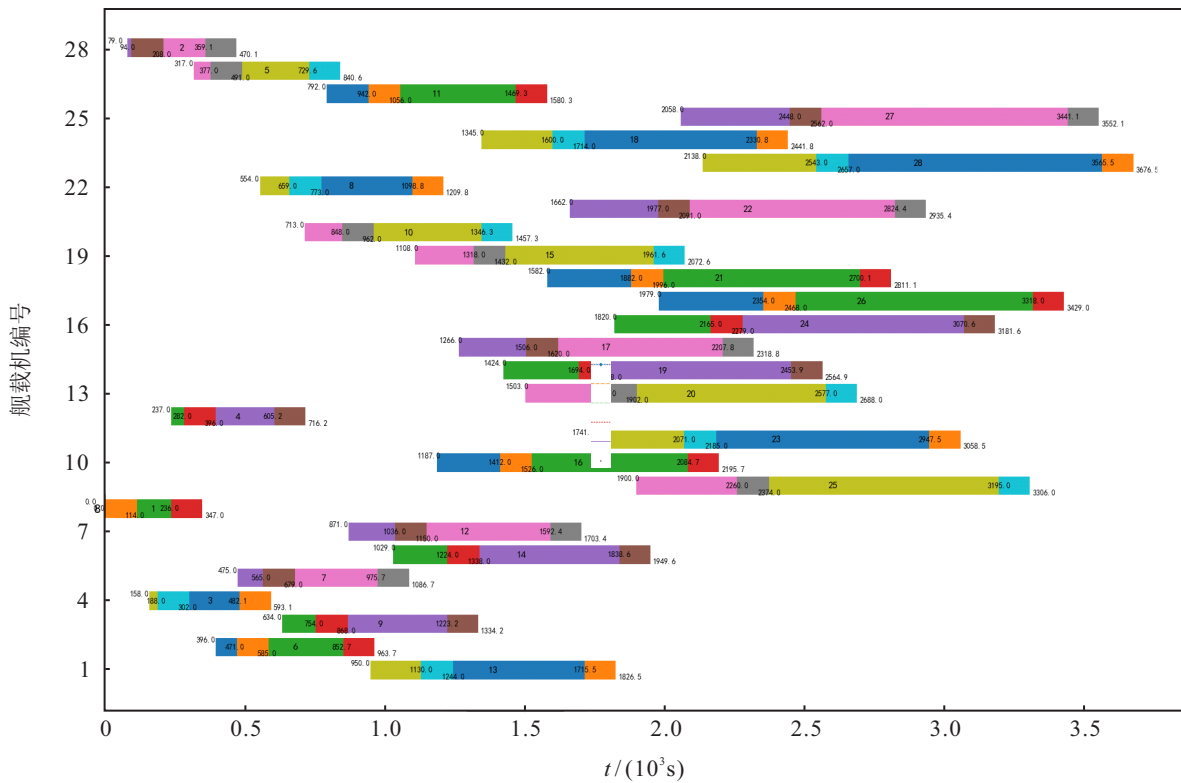


图9 舰载机着舰调度方案时间序列

为进一步验证改进ABC算法在不同调度规模下的优化性能,另外构造11架小规模、20架中等规模(表1中前11架和20架)、50架和100架大规模着舰调度案例.各算法参数设置保持不变,得到调度案例目标函数统计参数:最优解(Bes.)、最劣值(Wor.)、平均值(Avg,取整数)和标准差(Std.),如表3所示.

表3 不同调度规模下算法性能对比

规模	指标	IABC	IGA	IPSO	TLBO	ABC
11	Bes.	3288	3316	3288	3288	3353
	Avg.	3305	3346	3331	3333	3457
	Wor.	3338	3367	3398	3384	3568
	Std.	15.3	15.9	28.9	28.8	67.8
20	Bes.	7625	7888	660	7707	7799
	Avg.	7669	7963	7820	7761	7958
	Wor.	7731	8054	7945	7835	8102
	Std.	39.1	52.0	89.2	44.6	104.5
28	Bes.	13579	14395	14108	13812	15365
	Avg.	13659	14758	14430	14043	15687
	Wor.	13756	14942	14704	14185	16145
	Std.	57.0	152.5	194.0	135.3	225.4
50	Bes.	49918	53207	51359	51469	49941
	Avg.	49459	53893	52248	52319	50832
	Wor.	49850	54285	53215	53531	51858
	Std.	232	306624	635	600	
100	Bes.	211621	226874	222144	222426	222329
	Avg.	215165	231673	227243	226799	225864
	Wor.	217797	234296	231967	229862	229196
	Std.	1733	2350	3230	2094	1847

由表3可见:在各类着舰调度规模下,改进ABC算法均能以较小的波动收敛到最优解,鲁棒性均优于其他算法;而在小规模调度案例中,因规模较小,IPSO和TLBO也能取得与改进ABC算法相同的最优解;随着着舰调度任务规模的增大,改进ABC算法的优越性趋向明显,并且各算法的鲁棒性随任务规模的扩大而降低.

5 着舰成功率影响分析

为贴近工程应用,提出一种舰载机复飞应对策略,研究舰载机着舰成功率对着舰完成时间的影响,并基于小规模11架舰载机着舰调度案例进行仿真验证,其中舰载机着舰成功率设置如下:[1.000, 0.975, 0.950, 0.925, 0.900, 0.875, 0.850, 0.825, 0.800, 0.775, 0.750, 0.725, 0.700, 0.675, 0.650, 0.625, 0.600].着舰实施过程中,舰载机根据优化后的着舰序列依次着舰,当舰载机着舰失败时,复飞经过复飞航线重新进入着舰航向并再次着舰.当其重新加入着舰航线与后续舰载机的着舰航线冲突时,调度人员指挥复飞航线上的舰载机在一定范围内对复飞航线时间进行一定的调整,以试图解决冲突,若仍无法解决则指挥后续着舰舰载机复飞,复飞航线上的舰载机优先着舰.着舰过程中的调度策略实施流程如算法1所示.

算法1 舰载机复飞航线与后续着舰舰载机着舰航线冲突解决过程.

输入: 最优着舰调度时序方案, 包括着舰序列、开始进近时刻、下滑时刻、着舰时刻和着舰成功率序列;

初始化: 调度次数 $m = 1$, 成功着舰舰载机集合 $success = []$.

1: while $success < I$ do

2: if 舰载机 i 成功着舰 then

3: 将舰载机 i 加入到集合 $success$ 中

4: else

5: $m = m + 1$

6: if TC_{km}^i 与后续着舰舰载机冲突 then

7: if 通过调整 TC_{km}^i 能够解决冲突 then

8: 将舰载机 i 加入到集合 $success$ 中

9: else

10: 对后续着舰舰载机进行重新调度, 包括后续冲突飞机复飞, 让复飞航线上的舰载机先着舰, 以及调整尚未进近舰载机开始进近时间;

11: 将舰载机 i 加入到集合 $success$ 中

12: end if

13: end if

14: end if

15: $i = i + 1$

16: end while

17: 记录着舰完成时间.

每个着舰成功率下运行该算法 5 000 次, 得到如图 10 所示的着舰完成时间在不同着舰成功率下的箱线图. 从图中可以看出, 平均着舰完成时间(绿色虚线)和完成时间中位数(橙色实线)随着舰成功率的降低总体呈线性上升趋势, 并具有一定的阶段性. 这是因为随着舰载机着舰成功率的降低, 因着舰失败而复飞的舰载机数量的期望增大, 加之其可能导致后续着舰舰载机复飞, 使得舰载机编队完成着舰所需时间增长. 绿色菱形点表示异常值, 着舰完成时间落在这些点的情况发生概率较低, 主要分布于箱线图上、下两边缘之间.

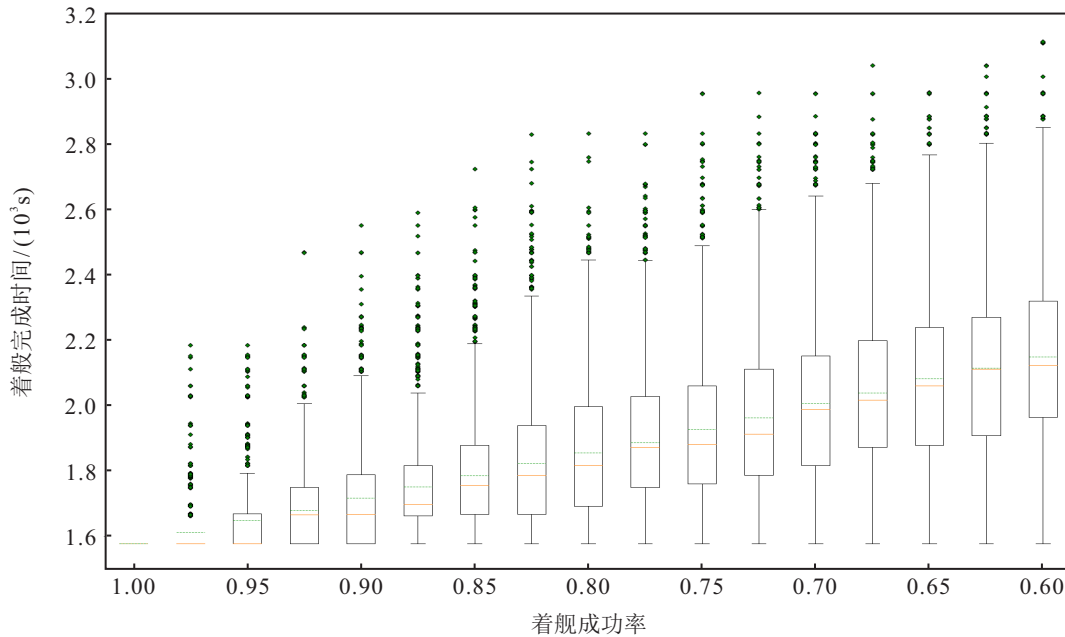


图 10 舰载机着舰完成时间在不同着舰成功率下的箱线图

6 结论

本文针对以加权着舰完成时间和为优化目标的舰载机着舰调度优化问题, 提出了一种改进人工蜂群算法. 算法在原有基础上增加交叉算子, 提升算法全局搜索能力; 引入两机交换和多机批次交换等局部搜索策略以及全局精英样本, 用以改善局部优化能力并提升收敛速度. 通过在不同规模着舰调度任务仿真对比, 突出了改进人工蜂群算法在求解着舰调度问题上的优越性能, 表明其具备工程应用价值. 通过对舰载机着舰成功率的研究, 着舰完成时间在不同着舰成功率下的分布可以为后续舰载机甲板保障计划制

定提供基础, 并且可以发现提高舰载机着舰成功率是改善舰载机着舰效率的重要举措. 未来将重点研究算法在航母编队舰载机着舰调度问题上的应用, 并进一步提升算法的优化性能.

参考文献(References)

[1] Tian J, Zhao T D. Controllability-involved risk assessment model for carrier-landing of aircraft[C]. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Reno, 2012: 1-5.
 [2] 林华, 占明锋, 周丰. 舰载机回收任务的优化调度算法及仿真[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(1): 50-54.
 (Lin H, Zhan M F, Zhou F. Optimization schedule

- algorithm and simulation to recycle planes on carrier[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(1): 50-54.)
- [3] 刘爱东, 桂周. 基于模拟退火的PSO算法在舰载机回收中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(5): 59-62. (Liu A D, Gui Z. Application of particle swarm algorithm based on simulated annealing for carrier aircraft's recovery[J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(5): 59-62.)
- [4] 夏国清, 陈红召, 米青超. 舰载机回收作业的反馈排队模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5): 164-166. (Xia G Q, Chen H Z, Mi Q C. A queueing model with feedback for embarked aircraft's recovery[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(5): 164-166.)
- [5] Wu Y, Sun L G, Qu X J. A sequencing model for a team of aircraft landing on the carrier[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 54(7): 72-87.
- [6] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony(ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.
- [7] Sundar S, Singh A. A swarm intelligence approach to the early/tardy scheduling problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012, 4: 25-32.
- [8] Yurtkuran A, Emel E. A discrete artificial bee colony algorithm for single machine scheduling problems[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(22): 6860-6878.
- [9] Lei D M, Liu M Y. An artificial bee colony with division for distributed unrelated parallel machine scheduling with preventive maintenance[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 141: 106320.
- [10] Lin S W, Ying K C. ABC-based manufacturing scheduling for unrelated parallel machines with machine-dependent and job sequence-dependent setup times[J]. Computers & Operations Research, 2014, 51: 172-181.
- [11] Caldeira R H, Gnanavelbabu A, Joseph Solomon J. Solving the flexible job shop scheduling problem using a hybrid artificial bee colony algorithm[C]. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2020: 833-843.
- [12] Li Y B, Huang W X, Wu R, et al. An improved artificial bee colony algorithm for solving multi-objective low-carbon flexible job shop scheduling problem[J]. Applied Soft Computing, 2020, 95: 106544.
- [13] Zhang R, Song S J, Wu C. A hybrid artificial bee colony algorithm for the job shop scheduling problem[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 141(1): 167-178.
- [14] Lei D M, Guo X P. Scheduling job shop with lot streaming and transportation through a modified artificial bee colony[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(16): 4930-4941.
- [15] Huang Y M, Lin J C. A new bee colony optimization algorithm with idle-time-based filtering scheme for open shop-scheduling problems[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5): 5438-5447.
- [16] Zou W Q, Pan Q K, Tasgetiren M F. An effective discrete artificial bee colony algorithm for scheduling an automatic-guided-vehicle in a linear manufacturing workshop[J]. IEEE Access, 2020, 8: 35063-35076.
- [17] Kruekaew B, Kimpan W. Enhancing of artificial bee colony algorithm for virtual machine scheduling and load balancing problem in cloud computing[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2020, 13(1): 496-510.
- [18] Rudowsky T, Hynes M, Luter M, et al. Review of the carrier approach criteria for carrier-based aircraft — Part I: Final report[R]. Defense Technical Information Center, 2002.
- [19] 姜龙光. 国外航母航空保障系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 299-300. (Jiang L G. Aircraft carrier aviation support system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 299-300.)
- [20] Su X C, Han W, Wu Y, et al. A robust scheduling optimization method for flight deck operations of aircraft carrier with ternary interval durations[J]. IEEE Access, 2018, 6: 69918-69936.
- [21] 苏析超, 韩维, 萧卫, 等. 基于Memetic算法的舰载机舰面一站式保障调度[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2303-2309. (Su X C, Han W, Xiao W, et al. Pit-stop support scheduling on deck of carrier plane based on Memetic algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(10): 2303-2309.)
- [22] 周俊, 江驹, 余朝军, 等. 改进遗传算法在舰载机着舰队列排序中的应用[J]. 电光与控制, 2018, 25(7): 19-23. (Zhou J, Jiang J, Yu C J, et al. Application of improved genetic algorithm to landing sequencing of carrier aircrafts[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7): 19-23.)
- [23] Xu Y, Wang L, Wang S Y, et al. An effective teaching-learning-based optimization algorithm for the flexible job-shop scheduling problem with fuzzy processing time[J]. Neurocomputing, 2015, 148: 260-268.

作者简介

刘玉杰(1983—), 男, 博士生, 从事航空管制的研究, E-mail: 702113039@qq.com;

万兵(1985—), 男, 博士生, 从事舰载机舰面保障的研究, E-mail: wanbing_0908@163.com;

苏析超(1989—), 男, 副教授, 博士, 从事舰载机舰面保障、调度优化和智能计算等研究, E-mail: suxich@126.com;

郭放(1994—), 男, 博士, 从事舰载机舰面保障等研究, E-mail: guofang575856@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)