

# 基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

韩维, 崔荣伟, 苏析超, 张勇

引用本文:

韩维, 崔荣伟, 苏析超, 等. 基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2751-2759.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523

# 您可能感兴趣的其他文章

# Articles you may be interested in

# 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

超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time 控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681

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

# 工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time 控制与决策. 2021, 36(5): 1127-1136 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036

# 带峰值能耗约束流水线调度的协同群智能优化

Cooperative memetic optimization for flowshop scheduling with peak power consumption constraint 控制与决策. 2021, 36(10): 2350-2358 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0429

# 基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

韩 维1, 崔荣伟1, 苏析超2+, 张 勇3

(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;3. 海军航空大学 参谋部,山东 烟台 264001)

**摘 要:** 舰载机甲板作业调度问题是一类具有 NP-hard 特性的资源受限多项目调度问题. 首先,分析舰载机甲板 作业调度问题的工序流程约束和各类资源约束,构建舰载机甲板作业调度混合整数规划模型. 然后,基于基本引 力搜索算法,提出双种群模糊引力搜索算法用于模型求解. 算法采用基于作业时序修正的优先数编码,并采用双 种群交替迭代结构,将基于个体的双向对齐技术扩展到种群层面,基于串行调度生成机制产生调度方案. 为了提 高算法性能,采用边界修正策略修正越界粒子编码,在引力计算阶段,采用模糊逻辑控制策略进行参数自适应控 制. 最后,通过案例仿真和算法对比验证了双种群模糊引力搜索算法的有效性,所提出的算法适合求解大规模的 舰载机甲板作业调度问题.

关键词:甲板作业调度;舰载机;引力搜索算法;模糊逻辑控制;项目调度;边界修正

中图分类号: V271.4+92 文献标志码: A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2020.0523

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**引用格式:** 韩维,崔荣伟,苏析超,等. 基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2751-2759.

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

HAN Wei<sup>1</sup>, CUI Rong-wei<sup>1</sup>, SU Xi-chao<sup>2†</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>

(1. Aeronautical Foundation College, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Aeronautical Operations College, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 3. University Staff, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: The flight deck operations scheduling problem is considered as a NP-hard resource-constrained multi-project scheduling problem (RCMPSP). Firstly, the precedence constraints and resource constraints are analyzed, and the mathematical programming model is established. Then, based on the basic gravitational search algorithm, the dual population fuzzy gravitational search algorithm (DPFGSA) is proposed for solving the model. In the algorithm, the dual population structure and random-key encoding modified by starting/ending time of operations are adopted, and the serial scheduling generation scheme is used to conduct the mapping from encodings to feasible schedules. In order to improve the performance of the algorithm, the boundary correction strategy is adopted to modify the transboundary agent encoding, and the fuzzy logic control strategy is used to perform parameter adaptive control. Simulation results show that the DPFGSA outperforms some other state-of-the-art algorithms for designed cases. The DPFGSA is suitable for solving large-scale flight deck operations scheduling problem.

**Keywords:** flight deck operations scheduling; carrier-based aircraft; gravitational search algorithm; fuzzy logic control; project scheduling; boundary correction strategy

# 0 引 言

舰载机甲板作业保障能力是制约舰载机出 动架次率和航母编队作战效能的关键因素.对舰 载机甲板作业流程和资源分配进行合理的规划调 度,制定高效可行的调度方案,这对于提升舰载机舰 面保障能力具有重要意义<sup>[1]</sup>. 舰载机甲板作业调度 问题是一类具有 NP-hard 特性的资源受限多项目调 度问题 (resource constrained multi-project scheduling problem, RCMPSP). RCMPSP 问题规模较大, 以遗传 算法<sup>[2-3]</sup>、差分进化算法<sup>[4]</sup>、分布估计算法<sup>[5]</sup>等为代

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-07-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(61671462);泰山学者建设工程专项项目;武器装备预先研究项目.

责任编委: 王凌.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通讯作者. E-mail: suxich@126.com.

表的智能算法在该问题上得到了应用.

引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA) 是 Rashedi 等<sup>[6]</sup> 于 2009 年受万有引力定律启 发而提出的一种新型群智能优化算法. GSA 通过粒 子间引力的相互作用交流信息,其概念简单,容易 实现且算法收敛性好. Saeid-Khabisi 等<sup>[7]</sup>、González 等<sup>[8]</sup>以及Qian等<sup>[9]</sup>在GSA中加入模糊逻辑控制,显 著改善了算法性能. Zhao 等<sup>[10]</sup>将差分进化算法中的 交叉、变异操作用于粒子位置更新上,提出了自适 应混合引力搜索差分进化算法(self-adaptive gravitational search algorithm and differential evolution, SGSADE). 在调度问题上, Pei等<sup>[11]</sup>在GSA中加入邻 域搜索和精英保留机制,提出了改进引力搜索算法 (modified gravitational search algorithm, MGSA), 研 究两级供应链协同调度问题. Biswas 等[12]将GSA用 于异构计算系统的工作流调度. Gouthamkumar 等<sup>[13]</sup> 将分解算子嵌入GSA中,提出一种基于分解的引 力搜索算法(disruption based gravitational search algorithm, DGSA)用于求解短期水火电调度优化问 题.

从以上文献来看,GSA 算法在调度优化领域具 有较好的应用价值,但目前还未将其应用于 RCMPSP 问题上.相比于一般的 RCMPSP 问题,舰载机甲板作 业调度问题保障工序多,资源约束复杂,尤其是考虑 各种保障单元的工位转移时间后,调度优化的难度加 大.上述文献虽然从不同的角度提出了多种 GSA 的 改进策略,但受算法搜索能力的限制,这些算法难以 经过有限的迭代次数在大范围的解空间中搜索得到 满意解.

本文基于基本GSA,提出一种双种群模糊引力 搜索算法(dual population fuzzy gravitational search algorithm, DPFGSA)用于求解舰载机甲板作业调度 问题.算法采用左右种群交替迭代结构,利用串行调 度生成机制产生调度方案,并采用边界修正策略和模 糊逻辑控制策略提高算法寻优能力.案例仿真表明, 该算法具有良好的寻优能力和稳定性.

# 1 问题描述

舰载机甲板作业调度问题的优化目标是在满足 工序流程约束、资源约束和转移时序约束的前提下, 最小化机群保障完工时间 $C_{\text{max}}$ . 设待保障机群为集 合 $I = \{1, 2, ..., n\}$ ,单机 $i(i \in I)$ 的保障任务由一系 列具有流程约束的保障工序 $J_i$ 组成,如图1所示.

图1中,各节点数字表示单机保障工序编号.其 中:编号为1的工序表示单机虚拟开始工序,编号为



图1 单机通用化保障流程AON图

21的工序为单机虚拟结束工序,编号为2~20的工序 为实工序.虚拟工序的保障不需要消耗任何保障资 源,工期为0,其作用是将单机保障所有工序整合在一 起.箭线表示工序流程约束,箭尾节点工序为箭头节 点工序的紧前工序.保障任务的最早开始时间为其 系留至停机位 $p_i$ 完毕时间 $Ex_i$ ,飞机可在同一停机位 完成所有工序保障,飞机 $i(i \in I)$ 在时刻t同时进行 的保障工序集记为 $A_{it}$ .集合 $J = \{(i,j)|i \in I, j \in J_i\}$ 表示机群保障工序,工序(i,j)应在其紧前工序集  $P_{ij}$ 中所有工序完成之后开始保障,工期为 $d_{ij}$ ,保障 工位为 $W_{ij}$ .每道工序至多涉及4类保障资源,分别是 机务保障人员、勤务保障设备、工位空间和供给类资 源,资源类型集合分别为Kp、Ke、Ks、Kw.工序保障的 开始时间为其所需各类资源同时满足保障需求的时 间.

1) 机务保障人员约束. 各保障人员的保障范围 覆盖整个舰载机机群, 第k ( $k \in Kp$ ) 类保障人员集合 为 $Lp_k = \{1, 2, ..., |Lp_k|\},$ 工序(i, j) 对第k 类人员需 求数量为 $rp_{ijk}$ , 人员从当前保障工位 $W_{ij}$  转移至下一 处保障工位 $W_{eg}$ 所需转移时间为 $\Delta P^k_{ijeg}$ .

2) 勤务保障设备约束. 第 $k(k \in Kp)$  类保障设备 集合为 $Le_k = \{1, 2, \dots, |Le_k|\}$ . 保障设备仅可对其管 路覆盖范围内舰载机提供保障,若第k类第l个保障 设备可覆盖停机位p,则令 $\lambda_{kl}^{p} = 1$ ,否则 $\lambda_{kl}^{p} = 0$ .工 F(i, j)对第k类设备需求数量为 $re_{ijk}$ ,各舰载机机体 通常只有一个保障设备接口,若保障工序对保障设备 有需求,则需求数量仅为1,即 $re_{iik} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in$  $J, \forall k \in \text{Ke.}$  保障设备从当前保障工位 $W_{ij}$ 转移至下 一处保障工位 $W_{eq}$ 所需转移时间为 $\Delta E_{ijeq}^{k}$ .保障设 备可划分为共享式设备 $Ke_s$ 和独占式设备 $Ke_u$ , Ke = KesUKeu. 共享式设备是指一个设备可同时满足同 一架飞机多道工序的保障,例如供电站所提供电源可 同时保障加油和通电检查等工序,在共享式设备保障 期间,同机其余对该类设备有需求的工序可直接分配 在该保障设备上. 独占式设备是指一个设备任意时 刻只能为一道工序提供保障,加油站等属于独占式设 备.

3) 工位空间约束. 主要考虑工位空间对于机务 保障人员数量的限制. 部分保障工位 (如飞机座舱) 由于空间受限,仅可容纳一定数量的人员同时进行 作业. 若工序 (i, j) 对第 $k (k \in Ks)$ 类工位空间有需 求,则令  $r_{s_{ijk}} = 1$ ,否则  $r_{s_{ijk}} = 0$ . 飞机  $i (i \in I)$  第  $k (k \in Ks)$ 类工位空间机务人员最大容纳量为 $n_{s_{ik}}$ .

4)供给类资源约束.受甲板供给类资源供给量 的限制,第 $k(k \in Kw)$ 类供给类资源可同时提供保障 的最大工序数量为Lw<sub>k</sub>.rw<sub>ijk</sub> = 1表示工序(i, j)对 第 $k(k \in Kw)$ 类供给类资源有需求,否则rw<sub>ijk</sub> = 0.

定义决策变量如表1所示.

决策变量	说明
$S_{ij}$	工序 $(i, j)$ 的开始时间, $\forall (i, j) \in J$
$E_{ij}$	工序 $(i, j)$ 的结束时间, $E_{ij} = S_{ij} + d_{ij}, \forall (i, j) \in J$
Xp <sub>ijkl</sub>	若工序 $(i, j)$ 由第 $k(k \in Kp)$ 类第 $l(l \in Lp_k)$ 个保障 人员保障,则 $Xp_{ijkl}$ 的值为1,否则为0
Xe <sub>ijkl</sub>	若工序 $(i, j)$ 由第 $k(k \in \text{Ke})$ 类第 $l(l \in \text{Le}_k)$ 个保障 设备保障,则 $\text{Xe}_{ijkl}$ 的值为1,否则为0
$\mathrm{Zp}^{kl}_{ijeg}$	若第 $k(k \in \text{Kp})$ 类第 $l(l \in \text{Lp}_k)$ 个保障人员完成工 序 $(i, j)$ 保障后转移至工序 $(e, g)$ 保障,则 $\text{Zp}_{ijeg}^{kl}$ 的 值为1,否则为0
$\operatorname{Ze}_{ijeg}^{kl}$	若第 $k(k \in \text{Ke})$ 类第 $l(l \in \text{Le}_k)$ 个保障设备完成工 序 $(i, j)$ 保障后转移至工序 $(e, g)$ 保障,则 $\text{Ze}_{ijeg}^{kl}$ 的 值为1,否则为0

舰载机甲板作业调度问题可用以下混合整数规 划模型描述:

min  $C_{\max}$ . (1)

s.t.

 $S_{i1} \geqslant \operatorname{Ex}_i, \ \forall i \in I;$  (2)

$$S_{ij} \ge S_{ih} + d_{ih}, \ \forall (i,h) \in P_{ij}, \ \forall (i,j) \in J;$$
(3)

$$\sum_{i \in I} \sum_{(i,j) \in A_{it}} \operatorname{rw}_{ijk} \leqslant \operatorname{Lw}_k, \ \forall k \in \operatorname{Kw}, \ \forall t > 0; \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_{it}} \operatorname{rs}_{ijk} \sum_{k'\in \operatorname{Kp}} \operatorname{rp}_{ijk'} \leqslant \operatorname{ns}_{ik},$$

$$\forall i \in I, \ \forall k \in \mathrm{Ks}, \ \forall t > 0; \tag{5}$$

$$\sum_{(i,j)\in J} \sum_{k\in \mathrm{Ke}} \sum_{l\in \mathrm{Le}_k} \mathrm{Xe}_{ijkl} \cdot (1-\lambda_{kl}^{p_i}) = 0, \ \forall i \in I; \ (6)$$

$$E_{ij} + \Delta P_{ijeg}^k \leqslant S_{eg} + BM \cdot (1 - Zp_{ijeg}^{kl}),$$
  
$$\forall k \in Kp, \ \forall l \in Lp_k, \ \forall (i,j), \ (e,g) \in J;$$
(7)

$$E_{ij} + \Delta E_{ijeg} \leqslant S_{eg} + BM \cdot (1 - 2e_{ijeg}),$$
  

$$\forall k \in Ke_u \bigwedge (\forall k \in Ke_s, i \neq e),$$
  

$$\forall l \in Le_k, \ \forall (i,j), \ (e,g) \in J;$$
(8)

$$\sum_{\substack{(i,j)\in A_{it} \\ (ij)\in A_{it}}} \operatorname{re}_{ijk} \cdot \operatorname{sgn}\left(\sum_{\substack{(i,j)\in A_{it} \\ (i,j)\in A_{it}}} \operatorname{Xe}_{ijkl} \cdot \operatorname{sgn}\left(\sum_{\substack{(i,j)\in A_{it} \\ (i,j)\in A_{it}}} \operatorname{re}_{ijk}\right), \\ \forall i \in I, \ \forall k \in \operatorname{Ke}_{s}, \ \forall l \in \operatorname{Le}_{k};$$
(9)

$$\sum_{l \in \mathcal{L}p_k} \mathcal{X}p_{ijkl} = \mathrm{rp}_{ijk}, \ \forall (i,j) \in J, \ \forall k \in \mathcal{K}p;$$
(10)

$$\sum_{l \in \mathrm{Le}_k} \mathrm{Xe}_{ijkl} = \mathrm{re}_{ijk}, \ \forall (i,j) \in J, \ \forall k \in \mathrm{Ke};$$
(11)

$$\operatorname{Zp}_{ijeg}^{kl} \leqslant \operatorname{Xp}_{ijkl} \cdot \operatorname{Xp}_{egkl},$$

$$\forall (i,j), (e,g) \in J, \ \forall k \in \mathrm{Kp}, \ \forall l \in \mathrm{Lp}_k; \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Ze}_{ijeg}^{kl} &\leqslant \operatorname{Xe}_{ijkl} \cdot \operatorname{Xe}_{egkl}, \\ &\forall (i,j), (e,g) \in J, \, \forall k \in \operatorname{Ke}, \, \forall l \in \operatorname{Le}_k; \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}\mathbf{p}_{ijkl}, \mathbf{X}\mathbf{e}_{ijk'l'}, \mathbf{Z}\mathbf{p}_{ijeg}^{kl}, \mathbf{Z}\mathbf{e}_{ijeg}^{k'l'} &= \{0, 1\}, \\ \forall k \in \mathbf{K}\mathbf{p}, \ \forall l \in \mathbf{L}\mathbf{p}_k, \ \forall k' \in \mathbf{K}\mathbf{e}, \\ \forall l' \in \mathbf{L}\mathbf{e}_{k'}, \ \forall (i, j), (e, g) \in J. \end{aligned}$$
(14)

其中:式(1)表示目标函数为最小化机群保障完工时 间,为满足机群波次出动周期要求,保障完工时间需 小于甲板作业周期C<sup>d</sup><sub>max</sub>.式(2)~(14)为模型约束条 件.式(2)表示单机保障作业开始时间不得早于舰载 机到达保障停机位并系留完毕时间;式(3)表示保障 作业工序的工序流程约束;式(4)表示供给类资源约 束,在任意时刻各供给类资源保障工序总数量不能超 过该资源最大供给量;式(5)表示工位空间约束,任意 时刻单机保障工序的工位空间所容纳的机务保障人 员数量不能超过额定数量;式(6)是勤务保障设备覆 盖范围约束;式(7)限定了保障人员在相邻保障工序 之间转移时序关系,BM为一足够大正数;式(8)限定 了独占式保障设备以及不保障同一架舰载机的共享 式设备在相邻保障工序之间转移时序关系;式(9)针 对共享式设备,确保同一时刻单架飞机对同种共享式 设备有需求的不同工序均分配在同一设备上,避免多 台共享式保障设备同时保障单架飞机;式(10)和(11) 表示机务保障人员和勤务保障设备的分配量与需求 量相等;式(12)和(13)表示决策变量之间的关系;式 (14)为0-1决策变量的属性约束.

# 2 引力搜索算法

在GSA中,粒子的位置代表问题的一个解,粒子 质量代表适应度. 设种群中共有N个粒子,粒子p用 向量 $X_p = (x_p^1, x_p^2, ..., x_p^d, ..., x_p^n), p \in \{1, 2, ..., N\}$ 表示. 其中:n为维数,在该问题中即为编码长 度; $x_p^d$ 表示粒子p在第d维空间中的坐标. 在第iter次 迭代中,粒子q在第d维空间对粒子p的引力为

$$F_{pq}^{d}(\text{iter}) = G(\text{iter}) \frac{M_{p}(\text{iter}) \times M_{q}(\text{iter})}{R_{pq}(\text{iter}) + e} (x_{q}^{d} - x_{p}^{d}).$$
(15)

其中:G(iter)为万有引力常数,即

$$G(\text{iter}) = G_0 \times \exp\left(-\alpha \frac{\text{iter}}{T}\right);$$
 (16)

T为最大迭代次数;  $G_0$ 、 $\alpha$ 为常数;  $R_{pq}(t)$ 表示粒子p和粒子q在第iter次迭代时的欧氏距离; e为一个小的常量, 后续仿真中, 取e = 0.01;  $M_p(\text{iter})$ 为粒子p的质量, 由其适应度 $f_p(\text{iter})$ 计算得到. 在该问题中, 粒子适应度 $f_p(\text{iter})$ 由其编码对应的机群保障完工时间 $C_{\text{max}}(p,\text{iter})$ 表示,  $C_{\text{max}}(p,\text{iter})$ 越小, 个体适应度越高.  $M_p(\text{iter})$ 由下式计算得到:

$$m_p(\text{iter}) = \frac{C_{\max}(p, \text{iter}) - \text{worst(iter})}{\text{best(iter)} - \text{worst(iter)}}, \qquad (17)$$

$$M_p(\text{iter}) = \frac{m_p(\text{iter})}{\sum_{q=1}^{N} m_q(\text{iter})}.$$
(18)

对于本文求解全局最小值问题, best(iter)、worst(iter) 分别定义为

$$best(iter) = \min_{1 \le p \le N} C_{max}(p, iter),$$
  
worst(iter) = 
$$\max_{1 \le p \le N} C_{max}(p, iter).$$
 (19)

第iter次迭代中,粒子p在第d维空间上受到的合力为

$$F_q^d(\text{iter}) = \sum_{q \in \text{Kbest(iter)}, q \neq p} \text{rand}_q F_{pq}^d.$$
 (20)

其中:rand<sub>d</sub>表示[0,1]范围内的随机数;Kbest(iter)为 第 iter 次迭代中,按照粒子质量从高到低排序的前 |Kbest(iter)|个粒子,其为iter 的减函数,即

$$\text{Kbest(iter)} = \left\lceil (1 - \text{iter}/(T + e)) \right\rceil \times N. \quad (21)$$

在万有引力的作用下,粒子p在第d维空间上的 加速度为

$$a_p^d(\text{iter}) = \frac{F_p^d(\text{iter})}{M_p(\text{iter})}.$$
(22)

粒子位置更新策略为

$$\begin{cases} v_p^d(\text{iter}+1) = \text{rand}_p \times v_p^d(\text{iter}) + a_p^d, \\ x_p^d(\text{iter}+1) = x_p^d(\text{iter}) + v_p^d(\text{iter}+1). \end{cases}$$
(23)

GSA通过计算万有引力、计算加速度、更新粒子 位置以及计算各粒子质量的迭代过程不断探索最优 解.

# 3 双种群模糊引力搜索算法

从问题描述来看,相比于一般的RCMPSP,舰载 机甲板作业调度问题的难点主要体现在以下几个方 面:1)可更新资源种类多,而且各类资源的约束互不 相同;2)工序数量多,尤其是随着舰载机保障数量的 增加,问题规模急剧增长;3)需要考虑保障人员以及 保障设备在不同工位间的转移.Hartmann等<sup>[14]</sup>通过 研究大量的仿真实验指出,求解大规模RCMPSP的 最成功的方法是元启发式算法.本文基于基本GSA, 通过借鉴Debels等<sup>[15]</sup>提出的双种群构架,提出一种 双种群模糊引力搜索算法用于问题求解.

#### 3.1 算法流程

算法中包含两个种群, 左种群 PopL 和右种群 PopR. 左种群个体更新粒子位置后, 采用右向对齐串 行调度生成机制产生右调度方案 S<sup>R</sup>, 以右调度方案 中各工序的开始时间修正 PopR 中各粒子编码. 右种 群与左种群相反, 各粒子更新粒子位置后, 采用左向 对齐串行调度生成机制产生左调度方案 S<sup>L</sup>, 以左调 度方案中各工序的结束时间修正 PopL 中各粒子编 码, 算法流程如图2所示.



#### 图 2 双种群模糊引力搜索算法流程

算法具体执行步骤如下:

step 1:输入保障任务,包括待保障机群、各机保 障流程、各工序工期、各工序对资源需求情况、人员 与设备在工位间的转移时间以及各类资源状态.

step 2:初始化PopL各粒子的位置及速度.

step 3:执行 update PopR.

step 3.1:采用右向对齐串行调度生成机制,对左 种群个体解码,得到各粒子适应度,利用式(17)、(18) 计算粒子质量.

step 3.2:根据迭代次数、种群多样性以及α的历 史值,利用模糊逻辑控制策略产生参数α,然后根据 式(16)计算万有引力常数.

step 3.3: 根据式(15)、(20) 依次计算左种群各粒

step 3.4:采用右向对齐串行调度生成机制,对左种群个体解码,产生右调度方案 S<sup>R</sup>,保留历史最优解.以右调度方案 S<sup>R</sup>中各工序的开始时间修正右种群 PopR个体编码.

step 4:执行 update PopL. 粒子位置更新方式与 update PopR 相同,不同之处在于采用左向对齐串行 调度生成机制对 PopR 个体解码,产生左调度方案 *S<sup>L</sup>* 后,以 *S<sup>L</sup>* 中各工序的结束时间修正左种群 PopL 个体 编码.

step 5:判断是否达到最大迭代次数,若是,则终止 算法,输出调度方案;否则,转step 3.

算法中设置了左右两个种群,将种群个体的进 化过程分成了左向对齐调度阶段和右向对齐调度阶 段.双向对齐调度有助于时序的微调优化以进一步 压缩保障完工时间.通过引入双种群构架,使得算法 在以下两个方面得到改进:

1) 经典的双向对齐技术 (double justification, DJ) 面向个体调度方案进行<sup>[16-17]</sup>, 针对种群中某个体交 替进行左向和右向调度, 直至其适应度不再改变或到 达一定迭代次数, 但因其消耗大量的计算资源, 往往 只针对种群部分精英个体实施. 引入双种群构架后, 可以将面向个体的双向对齐调度扩展到面向种群的 双向对齐调度, 通过双种群的相互迭代, 既节省了计 算资源, 同时也将双向对齐技术应用到种群所有个 体, 增强了算法的寻优能力.

2) 通过双向对齐调度的交替迭代,个体编码的修 正方式也在产生调度方案的工序开始与结束时间之 间调整,增大了种群个体编码的多样性,有助于克服 单一方向对齐调度导致的算法早熟收敛问题.

#### 3.2 编码

编码用于表示工序调度的优先级. 记舰载机*i*的 第*j*道工序(*i*,*j*)的优先数为 $x_{ij}$ ,舰载机*i*的各工序 编码可用向量 [ $x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{i|J_i|}$ ]表示,按照舰载机 编号,顺次将各舰载机的工序优先数连接成|J|维向 量,该向量即为一个粒子编码. 对于左种群 PopL,产 生右调度方案  $S^R$ 后,以调度方案中各工序开始时 间修正右种群 PopR个体编码,即右种群个体编码为  $X_R = [S_{11}, S_{12}, \ldots, S_{n|J_n|}]$ . 对于右种群 PopR,产生 左调度方案  $S^L$ 后,以调度方案中各工序结束时间修 正左种群 PopL个体编码,即左种群个体编码为 $X_L =$ [ $E_{11}, E_{12}, \ldots, E_{n|J_n|}$ ].相对于任务列表编码和传统 随机键编码,这种编码方案能实现个体编码与调度方 案的一一对应,缩小算法的搜索空间.

## 3.3 解 码

解码是指利用调度生成机制实现个体编码向 调度方案的映射,进而评价个体优劣. RCMPSP问题 的调度生成机制主要有串行调度生成机制 (serial scheduling generation scheme, SSGS)和并行调度生成 机制 (parallel scheduling generation scheme, PSGS)两 类<sup>[18]</sup>. PSGS 的搜索空间是解空间的一个子集,不能 保证搜索到最优解,因此本文采用 SSGS 解码. 右种 群 PopR 采用左向对齐 SSGS 生成调度方案,即按照 流程顺序从前向后依次为各工序安排一个尽可能早 的开始时间. 左种群 PopL 与之相反,采用右向对齐 SSGS 生成调度方案,即按照流程顺序从后向前依次 为各工序安排一个尽可能晚的结束时间.

对于左向对齐SSGS,定义已调度工序集*S*<sub>g</sub>和可 调度工序集*D*<sub>g</sub>,其过程如图3所示.在调度的第*g*个 阶段,首先确定当前阶段可调度工序集*D*<sub>g</sub>为紧前工 序均已完成调度的工序集合,然后选择可调度工序集 中优先级最高(工序对应优先数最小)的工序作为当 前阶段的待调度工序(*u*,*v*).待调度工序的决策包含 3个层面:1)设定待调度工序的开始、结束时间;2)为 待调度工序分配保障人员;3)为待调度工序分配保 障设备.



#### 图 3 左向对齐 SSGS 调度过程

首先,时间变量t初始化为待调度工序的紧前工 序的最晚完成时间,以1个时间单位为步长向后递推 搜索,直到该时刻有充足的保障人员以及保障设备满 足待调度工序的保障需求,且该时刻满足工位空间约 束和供给类资源约束.设定该工序的开始时间为满 足各项保障资源需求的时刻. 其次,为该待调度工序分配保障人员.对于在该 时刻可以执行待调度工序保障任务的所有保障人员, 计算其累计转移距离,按照累计转移距离由小到大的 顺序为该工序分配保障人员.

再次,为该待调度工序分配保障设备.对于在该 时刻可以执行待调度工序保障任务的所有保障设备, 计算其覆盖范围内剩余工序的累计作业时间,按照剩 余工序累计作业时间从小到大的顺序为该工序分配 保障设备,其中,若对共享式设备有需求且当前时刻 存在该类设备保障本飞机,则将工序直接分配至该设 备.

最后,将该工序加入到已调度工序集.

右向对齐SSGS的不同点在于:1)当前阶段可调 度工序集为紧后工序已完成调度的工序集合;2)工 序对应优先数越大,工序的调度优先级越高;3)时间 变量初始化为待调度工序的紧后工序的最早开始时 间,以1个时间单位为步长向前搜索,直至找到满足 待调度工序资源保障需求的最晚时刻,将其设定为待 调度工序的完成时间.

#### 3.4 边界修正策略

基于本文的编码方案,工序编码均为保障工序的 开始、结束时间,数值应处于下界0与上界机群保障 完工时间之间.由于机群保障完工时间需要在解码 之后才能得到,这里利用甲板作业周期C<sup>d</sup>max</sub>作为编 码上界.一般而言,甲板作业周期要大于机群保障完 工时间,这样做既可以保证粒子编码对应的调度方 案的机群保障完工时间满足机群波次出动周期要求, 又不至于使搜索空间变小而导致丢失最优解.种群 位置更新后,各粒子不同维度上的编码可能会越过 边界,这会导致算法搜索空间变大,造成不必要的计 算资源浪费.为了提高算法的搜索效率,需要对编码 越界的粒子进行边界修正.具体而言,若粒子位置更 新后,编码数值小0,则将其修正为0;若粒子位置更新 后,编码数值大于*C*<sup>d</sup><sub>max</sub>,则将其修正为*C*<sup>d</sup><sub>max</sub>.

#### 3.5 模糊逻辑控制策略

对于一个具体的算法,为提高其收敛速度和解的 质量,通常的做法是通过控制参数来实现算法的探 索 (exploration)与开发 (exploitation)之间的平衡.在 算法进行的初期,应以对解空间的探索为主;在后期, 个体编码都集中在最优解附近,此时应提高算法对最 优个体邻域的开发能力.另外,探索和开发能力也与 种群的多样性有关.对于GSA而言,式(16)中的参数 α数值会显著影响引力常数G的数值,进而影响算法 性能. α数值减小,引力常数G增大,此时粒子间的万 有引力增大,粒子获得加速度增大,粒子位置变化幅 度较大,有助于提高算法的探索能力;反之则有助于 提高算法的开发能力.很多文献<sup>[7]</sup>都试图通过控制α 的取值实现GSA的探索能力与开发能力的平衡.本 文利用模糊逻辑控制策略,根据算法的迭代次数、种 群的多样性以及α的历史值来确定α的取值.

如图4所示,迭代次数iter有3个等级(低、中和高),种群多样性ED有2个等级(低和高), $\alpha$ 的取值有3个等级(低、中和高).算法首先判断iter、ED和 $\alpha$ (iter-1)的等级,然后根据模糊规则(fuzzy rule)确定 $\alpha$ 的取值.模糊规则如表2所示.若无对应模糊规则,则 $\alpha$ 沿用历史值.ED由下式给出:

$$ED = \frac{R^{avg} - R^{min}}{R^{max} - R^{min}},$$
(24)

其中 R<sup>max</sup>、 R<sup>min</sup>、 R<sup>avg</sup> 分别表示种群个体到最优个体的最大、最小和平均欧氏距离.





	o.(itar)		
lter	ED	$\alpha(\text{iter}-1)$	$\alpha(\text{ner})$
低	低	中	低
中	低	高	中
高	高	低	中
高	高	中	高

# 4 案例仿真

本文基于库兹涅佐夫航母甲板环境构建机群保 障仿真案例,利用 Matlab R2014a 编程进行算法对比 以验证本文所提出算法的有效性.

# 4.1 机群保障仿真案例构建

库兹涅佐夫航母可对执行护航(A)、电子战(B)、 预警(C)、地面打击(D)和空中加油(E)任务的舰载机 提供保障. 各机保障流程 AON 图如图1 所示. 保障人员专业类型有特设、航电、军械和机械共4类,依次编号为1~4. 第 *k* 类保障人员的配置数量 |Lp<sub>k</sub>| 由下式给出:

$$|\mathrm{Lp}_k| = \frac{\mathrm{PS} \cdot \sum_{(i,j) \in J} \mathrm{rp}_{ijk} d_{ij}}{C_{\mathrm{max}}^{\mathrm{d}}}, \qquad (25)$$

其中PS为人力资源强度,仿真中取PS = 3.2.

保障设备类型有加油站、电源站、充氧站、充 氮站和液压站共5类,依次编号1~5,其数量分别为 6、12、5、5、6,其中编号为2的电源站属于共享式保障 设备. 各保障设备覆盖保障停机位情况如表3所示.

表3中,停机位所在列的数字表示保障停机位的 编号;"[]"内数字表示属于该类保障设备的可覆盖 对应停机位的固定设备站的序号,如第1行第1列(加 油站)对应的数字"[1]",表示序号为[1]加油站可覆 盖保障停机位1.工位空间仅考虑飞机座舱,保障人 员最大容纳量为1.供给类资源有燃油、电源、氧气、 氮气和液压油共5类,依次编号为1~5,各类保障资 源可同时保障的工序数量分别为9、14、2、4、6.各工 序保障资源需求、各工序工期以及人员和设备在不

停机位	可覆盖该停机位的固定设备站编号								
	加油站	电源站	充氧站	充氮站	液压站				
1	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]				
2	[1]	[2]	[1]	[1]	[1,2]				
3	[1,2]	[3]	[1]	[1]	[1,2]				
4	[2]	[4]	[1,2]	[1,2]	[2,3]				
5	[2]	[5]	[2]	[2]	[3]				
6	[3]	[6]	[2]	[2]	[3]				
7	[3,4]	[7]	[2, 3]	[2, 3]	[4]				
8	[4]	[8]	[3]	[3]	[4]				
9	[4,5]	[9]	[3,4]	[3,4]	[4,5]				
10	[5]	[10]	[4]	[4]	[5]				
11	[5]	[11]	[4]	[4]	[5]				
12	[6]	[12]	[5]	[5]	[6]				

表 3 固定设备站覆盖保障停机位情况

同工位间的转移时间数据规模较大,因篇幅限制未在 文中给出.甲板作业周期*C*<sup>d</sup><sub>max</sub> = 80 min.构建的4组 不同规模的机群保障任务如表4所示.其中:A、B、C、 D、E表示飞机类型;后面的数字表示系留完毕时间 (min).

表 4 机群保障任务

								保障停机	位编号					
保障仕务	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
任务1	A;0	D;0	D;0	B;0	C;0	E;0	_	_	_	_	_	_	_	_
任务2	B;0	C;0	A; 0	A;0	A;0	A; 0	D;7.4	D; 6.4	D;11.7	E; 10.7	_	_	_	_
任务3	B;0	C;0	B;0	A;0	A;0	A; 0	A;7.4	D; 6.4	D;11.7	D; 10.7	D; 15.9	E; 14.9	_	_
任务4	B;0	C;0	B;0	A;0	A;0	A; 0	A;0	D;0	D;7.6	D; 6.7	D;11.9	D; 10.9	D;15.8	E;14.7

#### 4.2 算法对比与讨论

为了验证本文所提出的双种群模糊引力搜索算法(DPFGSA)在求解舰载机甲板作业调度问题方面的性能,选取求解RCMPSP的多模态遗传算法(multimodal genetic algorithms, MMGA)<sup>[3]</sup>、改进差分进化算法(modified differential evolution algorithm, MDE)<sup>[3]</sup>、 混合分布估计算法(hybrid estimation of distribution algorithm, HEDA)<sup>[5]</sup>以及自适应混合引力搜索差分进 化算法(SGSADE)<sup>[10]</sup>进行对比,算法的编码方式均为 优先数编码. 根据正交实验结果,算法的相关参数设 置如下: DPFGSA中,各种群粒子数量N = 30,常数  $G_0 = 100$ ; MMGA中,种群大小、交叉率和变异率分 别设置为50、0.8和0.002; MDE中,种群大小为100,交 叉系数 $c_1 = 0.3, c_2 = 0.7, 变异率F_1 = F_2 = 0.7;$  SGSADE中,粒子数量为30,常数 $G_0$ 、 $\alpha$ 的初始值均为 100,初始变异率sf = 0.5,初始交叉率cr = 0.5,历史 记忆列表长度H = 100;HEDA算法中,种群大小为 250,精英比例P = 0.02,学习速率 $\beta$  = 0.05,局部搜索 接受率 $P_{per}$  = 0.5. Qian等<sup>[9]</sup>指出,最小最迟完成时间 (minimal latest finish time, minLFT)和最小自由时差 (minimal slack, minSLK)两个优先规则结合PSGS在 求解该类考虑转移时间的RCMPSP问题上具有较好 的效果,故本文同时选取minLFT和minSLK两个优 先规则作为对比.所有算法的最大评价次数为Q = 2000,独立运行20次后的结果如表5所示,其中avg.、 best.和var.分别表示各算法20次保障完工时间的平 均值、最优值(单位:min)和方差.算法的收敛曲线如 图5所示.

	表 5 算法对比结果									
但陪在久	性能 指标			优先规则						
不厚江方		DPFGSA	SGSADE	MMGA	MDE	HEDA	minLFT	minSLK		
	avg.	57.075	57.825	57.87	58.2	56.935		~ ~ ~		
仕务1	best. var.	56.5 0.0799	56.8 0.494 6	57 0.202 2	57.3 0.457 8	55.7 0.157 1	59.2	62.5		
	avg.	57.54	59.93	58.35	59.82	57.85				
任务2	best. var.	56.8 0.1194	58.4 0.382 2	57.3 0.2142	58.8 0.335 4	56.9 0.259 5	60.6	63		
	avg.	60.92	63.69	61.715	63.2	61.06				
任务3	best. var.	60.2 0.268	62.7 0.3367	60.7 0.215	62.1 0.397 9	60.4 0.1425	62	64.4		
	avg.	61.41	64.315	62.25	63.835	61.83				
任务4	best. var.	60.6 0.145 2	63.3 0.4066	61.3 0.228 9	62.9 0.187 7	61.1 0.2064	64.1	72		









通过表5和图5可以发现:对于保障规模较大的 任务2、任务3和任务4,本文提出的DPFGSA算法 在所有对比算法中表现最好;在保障规模较小的任 务1中仅劣于HEDA算法.这说明DPFGSA算法在求 解舰载机甲板作业调度问题上具有一定优势,尤其 是在较大规模保障任务中,其寻优能力和收敛速度 均优于其他各算法.优先规则和PSGS构成的启发式 算法计算速度快且容易实现,但其产生的调度方案 通常不如元启发式算法.在对比的4个元启发式算法 中:SGSADE算法在任务规模最小的任务1中表现较 好,但随着任务规模扩大,其寻优能力和稳定性均变 差;MMGA算法与SGSADE算法表现情况相反,随着 任务规模扩大,其寻优能力优于SGSADE和MDE算法;在每组任务中,MDE算法的性能均介于MMGA和SGSADE之间;HEDA算法在任务规模较小的任务1中表现最好,适合求解规模较小的保障调度问题.

本文提出的DPFGSA算法优于其他算法的原因 如下:1)DPFGSA算法的编码方式是基于作业时序修 正的优先数编码,这种编码方案能实现个体编码与调 度方案的一一对应,缩小了算法的搜索空间;2)基于 编码方案,DPFGSA算法引入了边界修正策略,限定 了搜索范围,进一步提高了算法的搜索效率;3)模糊 逻辑控制策略的引入更好地实现了算法的探索与开 发能力的平衡;4)双种群构架的引入使得传统基于 个体的双向对齐技术改进为基于群体的双向对齐,左 (右)向对齐调度生成机制产生的调度方案进一步由 右(左)向对齐调度生成机制压缩,从而提高了算法的 寻优能力.

# 5 结 论

本文针对舰载机甲板作业调度问题,分析了工序 流程约束、资源约束和转移时序约束,构建了舰载 机甲板作业调度问题混合整数规划模型,基于基本 GSA算法,提出了一种双种群模糊引力搜索算法.从 案例仿真结果看,DPFGSA的寻优能力和稳定性具有 一定优势,尤其适合求解大规模的甲板作业调度问 题.后续研究将针对不同规模的甲板作业调度问题 进行算法改进.

参考文献(References)

- Jewell A. Sortie generation capacity of embarked airwings[R]. Alexandria: Defense Technical Information Center, 1998.
- [2] Yuan P L, Han W, Su X C, et al. A dynamic scheduling method for carrier aircraft support operation under uncertain conditions based on rolling horizon strategy[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1546.
- [3] Pérez E, Posada M, Lorenzana A. Taking advantage of solving the resource constrained multi-project scheduling problems using multi-modal genetic algorithms[J]. Soft Computing, 2016, 20(5): 1879-1896.
- [4] Yan R, Li W J, Jiang P, et al. A modified differential evolution algorithm for resource constrained multi-project scheduling problem[J]. Journal of Computers, 2014, 9(8): 1922-1927.
- [5] Wang L, Fang C. A hybrid estimation of distribution algorithm for solving the resource-constrained project scheduling problem[J]. Expert Systems With Applications, 2012, 39(3): 2451-2460.
- [6] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: A gravitational search algorithm[J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.
- [7] Saeidi-Khabisi F S, Rashedi E. Fuzzy gravitational search algorithm[C]. The 2nd International Conference on Computer and Knowledge Engineering. Mashhad: IEEE, 2012: 156-160.
- [8] González B, Valdez F, Melin P, et al. Fuzzy logic in the gravitational search algorithm enhanced using fuzzy logic with dynamic alpha parameter value adaptation for the optimization of modular neural networks in echocardiogram recognition[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 245-254.
- [9] Qian K, Li W, Qian W. Hybrid gravitational search algorithm based on fuzzy logic[J]. IEEE Access, 2017, 5: 24520-24532.

- [10] Zhao F Q, Xue F L, Zhang Y, et al. A hybrid algorithm based on self-adaptive gravitational search algorithm and differential evolution[J]. Expert Systems With Applications, 2018, 113: 515-530.
- [11] Pei J, Liu X B, Pardalos P M, et al. Application of an effective modified gravitational search algorithm for the coordinated scheduling problem in a two-stage supply chain[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1/2/3/4): 335-348.
- [12] Biswas T, Kuila P, Ray A K, et al. Gravitational search algorithm based novel workflow scheduling for heterogeneous computing systems[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 96: 101932.
- [13] Gouthamkumar N, Sharma V, Naresh R. Disruption based gravitational search algorithm for short term hydrothermal scheduling[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(20): 7000-7011.
- [14] Hartmann S, Kolisch R. Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 127(2): 394-407.
- [15] Debels D, Vanhoucke M. A decomposition-based genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem[J]. Operations Research, 2007, 55(3): 457-469.
- [16] Jia Q, Seo Y. An improved particle swarm optimization for the resource-constrained project scheduling problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9/10/11/12): 2627-2638.
- [17] Chen R M. Particle swarm optimization with justification and designed mechanisms for resource-constrained project scheduling problem[J]. Expert Systems With Applications, 2011, 38(6): 7102-7111.
- [18] 方晨,王凌.资源约束项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 641-650.
  (Fang C, Wang L. Survey of study on resource-constrained project Scheduling[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 641-650.)
- [19] Krüger D, Scholl A. A heuristic solution framework for the resource constrained (multi-) project scheduling problem with sequence-dependent transfer times[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(2): 492-508.

#### 作者简介

韩维(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 从事舰载机舰 面保障与舰载机动力学等研究, E-mai: Hanwei70cn@163. com;

崔荣伟(1996-), 男, 硕士生, 从事舰载机舰面保障的研 究, E-mail: cuirongwei126@163.com;

苏析超(1989-), 男, 讲师, 博士, 从事舰载机舰面保障的研究, E-mail:suxich@126.com;

张勇 (1978-), 男, 副教授, 硕士, 从事航空保障工程等 研究, E-mail:ZhangYongHD@yeah.net.

(责任编辑:李君玲)