

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.015

## 基于 GA 算法的舰载机快速调度

朱兴动<sup>1</sup>, 孟杨凯<sup>2</sup>, 黄葵<sup>2</sup>, 范加利<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264000; 2. 海军航空大学青岛校区研究生队, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 为解决舰载机在舰面进行保障时作业顺序、作业时间等多重不确定的问题, 设计一种舰载机飞行作业快速调度算法。建立舰载机甲板保障作业组合优化调度模型, 对算法结构的编码方式进行阐述, 利用合适的遗传算法策略进行求解, 给出有效调度方案, 在基本静态调度方案上采用动态调度进行调整, 得出当前有效快速调度方案, 并通过仿真实例对算法的有效性进行验证。仿真结果表明, 利用该算法可得到当前算法模式下最优快速调度方案。

**关键词:** 甲板作业调度; 车间调度; 启发式规则; 遗传算法

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码** A

## Aircraft Fast Scheduling Based on GA Algorithm

Zhu Xingdong<sup>1</sup>, Meng Yangkai<sup>2</sup>, Huang Kui<sup>2</sup>, Fan Jiali<sup>2</sup>

(1. Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. Brigade of Postgraduate, Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** In order to solve the multiple uncertain problems such as the operation sequence and operation time of the carrier-based aircraft on the ship's support, a fast flight scheduling algorithm for carrier-borne aircraft is designed. Aircraft deck to ensure job combination optimization scheduling model is established, the encoding mode of algorithm structure is introduced, the appropriate strategy of genetic algorithm is used to calculate and effective scheduling scheme is given. Based on the basic static scheduling scheme, the current effective fast scheduling schemes is acquired by using dynamic scheduling adjustment, and the effectiveness of the algorithm is validated by simulation examples. The simulation results show that the optimal scheduling scheme can be obtained by using this algorithm.

**Keywords:** deck operation scheduling; workshop scheduling; heuristic rules; genetic algorithm (GA)

### 0 引言

随着大型水面舰艇的发展, 舰载机成为舰艇战斗力形成的重要因素<sup>[1]</sup>。舰面空间及保障资源有限, 舰载机在舰面的保障调度成为发挥舰载机战斗力效率的重要影响因素。由于舰载机在舰面进行保障作业具有作业顺序不确定、作业开始时间与持续时间不确定等多重不确定因素, 故整个保障调度属车间柔性作业, 是典型的资源受限项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP)。

针对舰载机保障作业调度, 李耀宇等通过将舰载机飞行甲板布列调运问题转化为排队网络中各服务节点的调度进行了研究<sup>[2]</sup>; 刘钦辉等针对舰载机调度中的不确定性及动态特征, 给出了基于多主体 (Agent) 技术的舰载机动态调度仿真与优化方法<sup>[3]</sup>; 周晓光等面向舰载机舰面保障效率和资源利用率等效能指标, 系统分析了一站式保障流程约束和资源约束条件, 建立了舰载机多机舰面一站式保障调度

的数学优化模型<sup>[4]</sup>; 苏析超等针对舰载机面向作战任务的实时动态的综合保障需求, 提出了基于多主体 (Agent) 的舰载机动态保障模型<sup>[5]</sup>; 崔博针对舰载机舰面保障过程中设备故障扰动下的重调度问题, 综合考虑保障的工序逻辑约束和人员、设备等资源约束, 提出舰载机保障重调度预判机制, 建立了舰载机舰面保障重调度模型, 并采用变邻域算法对模型进行求解<sup>[6]</sup>; Michini 和 Ryan 等联合开发了航母甲板作业规划决策支持系统(deck operations course of action planner, DCAP), Michini 等进行了基于人机交互的舰载机甲板调度研究, 设计了甲板作业调度自动规划算法<sup>[7]</sup>; Ryan 等针对舰载机重调度问题引入启发式教学法, 设计了甲板作业调度决策支持系统<sup>[8-9]</sup>; Dastidar 等基于飞行甲板操作的排队网络模型, 建立一种新的舰载机随机调度方法, 优化了舰载机特征参数<sup>[10]</sup>。

针对此问题, 笔者设计优化调度模型, 通过遗传算法求解, 以库兹涅佐夫航母上 8 机双周期再次出动准备作业为例进行验证。

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-05-29

作者简介: 朱兴动(1967—), 男, 海南人, 博士, 教授, 从事武器装备保障信息化研究。E-mail: 836668943@qq.com。

## 1 舰载机再次出动保障任务调度模型

### 1.1 舰载机甲板作业描述

如图 1 所示, 舰载机在航母甲板上的起降一般为分波次循环进行, 按循环方式分单周期、双周期等<sup>[11]</sup>。

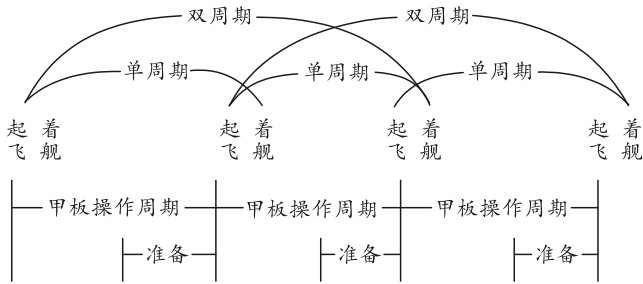


图 1 舰载机起降周期

俄罗斯“库兹涅佐夫”航母于 1991 年 1 月 21 日服役, 是俄罗斯第一艘真正意义上的航母。该航母舰面采用滑跃起飞方式, 搭载苏-35 飞机作为主站舰载机。航母舰面共 33 个停机位, 3 个滑跃起飞位 (C1, C2, C3), 飞行甲板分若干功能区域, 各区域受空间及站位配置资源的限制, 设置不同多个站位及保障资源<sup>[12-13]</sup>。

舰载机完成飞行任务着舰后, 再次起飞前, 共需进行出动检修、加油、挂弹、牵引至暖机位、惯导对准、暖机、滑行、起飞等工序。受机位管理性约束, 飞机降落后必须先滑行至临时停机位, 由于临时停机位不可进行暖机, 进而在起飞前则必须牵引至暖机位进行惯导对准、暖机、飞控系统自检等作业, 随后再滑行至起飞位起飞<sup>[14-15]</sup>。

受安全管理约束, 舰载机的加油、挂弹和牵引至暖机位 3 项任务, 不可同时进行, 但可不分先后, 惯导对准、暖机、滑行、起飞 4 项任务必须依次执行。因为此 4 项任务不存在先后顺序调度, 为方便研究, 将其纳入工作集  $T$ , 不安排其参与先后调度, 但在仿真过程中, 依然将其资源约束限制考虑在内。舰载机再次出动准备作业时序如图 2 所示。

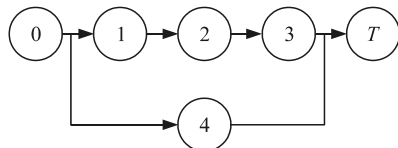


图 2 舰载机再次出动准备作业时序

工序说明:

工序 0: 滑行至停机位; 工序 1: 加油; 工序 2: 挂弹; 工序 3: 牵引至暖机位; 工序 4: 机务检修; 工序  $T$ : 惯导对准、暖机、滑行、起飞。

### 1.2 舰载机甲板作业调度的数学模型

笔者研究模型调度初始起点: 一波次舰载机全部着舰, 且已全部停靠至临时停机位。因机务检修工作伴随舰载机多项工作同时进行, 无需单独进行工序安排, 故不考虑在内。

目标函数:

$$F = \min C_{\max} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{k=1}^K y_{ijk} = 1, \quad \forall i \text{ 和 } j_i \in V_i \cap (V_{nr} \cup V_{ra}); \quad (2)$$

$$\sum_{j_i \in E_{j_i}} \sum_{k=1}^K y_{ijk} = 1, \quad \forall i \text{ 和 } j_i \in V_i \cap V_{rs}; \quad (3)$$

$$\sum_{s=k}^K y_{im_s} + \sum_{s=1}^{k+d_{m_i n_i}-1} y_{in_s} \leq 1, \quad \forall i, j \text{ 和 } (m_i, n_i) \in A_i; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I y_{ijk} \leq N_{jk}, \quad \forall k \text{ 和 } j \in V_{rs} \cup V_{ra}; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K (y_{ijk} + y_{ij_m k}) \leq 1, \quad \forall i \text{ 和 } (j_l, j_m) \in V_s; \quad (6)$$

$$st_{i1j_{zy}} \leq st_{i2j_{zy}}, \quad \forall ZW_{i1, i2} \in H_s, \quad X_{zwl} \geq X_{zwl2}. \quad (7)$$

相关参数定义如下:  $F$  为目标函数;  $C_{\max}$  为一波次舰载机完成所有工序的最大所需时间; 舰载机集为  $i \in \{1, \dots, I\}$ ,  $I$  为甲板舰载机总数量; 每架舰载机  $i$  均有工作集  $V_i$ , 其中  $V_i = \{J_1, \dots, J_j\}$ ,  $j$  为作业数量;  $V_{nr}$  为非资源需求的工作集;  $V_{rs}$  为特定资源需求工作集;  $V_{ra}$  为不定资源需求工序集, 任一工作  $J_j$  必包含在内;  $V_s$  为不可同时执行的作业集, 包含加油、挂弹、转运;  $T_{ij}$  是舰载机  $i$  完成作业工序  $j$  的时间,  $st_{ij}$  为第  $i$  架舰载机第  $j$  项作业的开始时间,  $st_{ij} \geq 0$ ,  $ed_{ij}$  为第  $i$  架舰载机第  $j$  项作业的结束时间;  $d_{ij}$  为第  $i$  架舰载机第  $j$  项作业的持续时间; 作业过程不可中断,  $ed_{ij} = st_{ij} + d_{ij}$ ;  $C_i$  为舰载机  $i$  完成最后一道作业, 即起飞的时间;  $y_{ijk} = 1$  为第  $i$  架舰载机第  $j$  项作业开始;  $d_{\min_i}$  为第  $i$  架舰载机任务  $m_i$ 、 $n_i$  开始的时间间隔;  $N_{jk}$  为在某一时刻  $k$ , 执行作业  $j$  的可用甲板资源数量。

模型中: 式(1)为目标函数; 等式(2)、(3)为保证每架舰载机同一工序只执行一次, 不可重复执行; 不等式(4)为工序作业的时序优先级关系, 针对作业  $T$  中惯导对准、暖机、滑行、起飞 4 项任务必须依次执行; 不等式(5)确保不定资源约束型作业对甲板资源的需求小于甲板资源总量; 不等式(6)确保加油、挂弹、牵引至暖机位 3 项工作中的任意 2 项不

可同时执行；不等式(7)表示机位转运可行性。

## 2 求解算法

遗传算法具有很强的全局搜索能力，可以保证求解结果的相对质量，故使用遗传算法框架对问题进行求解。笔者主要阐述一种适应文中算法结构的编码方式，以及相应的交叉、变异方法和启发式的解码方式<sup>[16-18]</sup>。

### 2.1 遗传算法

#### 2.1.1 顺序编码

顺序编码用  $1 \sim n$  的自然数来编码，此种编码同一染色体单位内不允许重复，即  $X_i = \{x_1, \dots, x_j\}$ ， $x_j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，且当  $m \neq n$  时， $x_m \neq x_n$ ，不同数值分别代表甲板不同保障工序，染色体编码数值的先后顺序代表工序执行顺序。例如下面是 8 架舰载机保障工序数为 7 的一个种群染色体编码：

$$\begin{aligned} X_1 &= (2315476) \\ X_2 &= (3124567) \\ &\vdots \\ X_8 &= (1234567) \end{aligned}$$

上述编码可构成一种甲板调度方案。

#### 2.1.2 顺序编码交叉策略

如图 3，因普通染色体两两交叉策略，可造成同一染色体内数值重复与数值缺失，使得染色体失去研究项目合法性。C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 染色体交叉后，C<sub>1</sub> 出现重复数值 1 和 2，代表实际调度方案中出现重复加油、挂弹操作，失去了研究问题染色体编码规定的合法性。

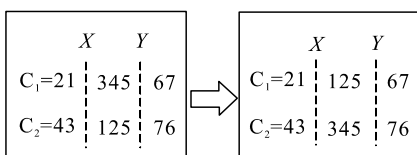


图 3 染色体普通交叉策略

笔者采用部分映射交叉 (partially mapped crossover, PMX) 策略完成染色体合法的双切点交叉。步骤如下：

- 1) 从染色体编码内选切点 X, Y;
- 2) 交换 2 条染色体相同切点中间部分染色体内容;
- 3) 确定交叉部分的染色体映射关系;
- 4) 将未换部分按映射关系恢复合法性。

以上交叉步骤如图 4 所示。

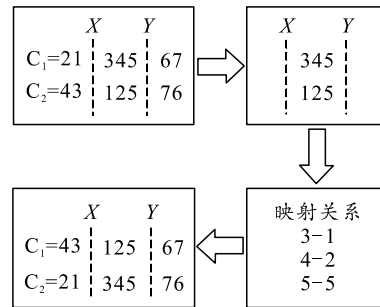


图 4 部分映射交叉 (PMX) 策略

#### 2.1.3 顺序编码变异策略

传统遗传算法变异策略是将染色体位值进行随机变换。如图 5 所示，针对文中容易引起顺序编码染色体的失效，通过在顺序编码染色体上选取 2 个位置进行换位变异，交换基因位置，实现换位变异。

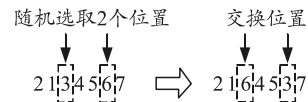


图 5 染色体变异

## 2.2 约束条件

舰载机舰面作业约束比普通资源约束调度问题更为复杂，主要体现在加油、挂弹、转运暖机位作业无固定顺序，且受空间制约和保障资源限制。在实施舰载机调度过程中，不对染色体合法性进行鉴别，通过对违反约束的调度工序插入长时间惩罚，进而在迭代时进行自然淘汰。以加油作业为例，设舰艏、舰艉、左舷、右舷各有加油资源数为 2, 2, 2, 1，具体算法如下：

- 1) function ();
- 2) 通过一个  $3 \times 4$  矩阵  $tjy$ ，记录第  $J$  道工序中，在甲板 4 个区域中需进行加油作业的飞机数，通过对染色体编码列和行的逐一循环，进行自增；
- 3) 取当前舰载机作业工序  $j$  的上一工序结束时间  $TempJ$ ，若当前为第一道工序， $TempJ$  默认为 0；
- 4) 在染色体编码列和行的逐一循环过程中，判别当前工序排序；
- 5) 若当前为舰载机第一道作业工序，且  $tjy(ii, fjzw) \leq JY(fjzw)$  (加油资源约束)，则  $dt=0$ ，否则  $dt=tjyd$ ， $tjyd$  为  $d$  区域的预计加油作业时间；
- 6) 记录当前已安排加油作业的飞机数量  $NjyTask$ ，并将其预计结束时间按从小到大排序；
- 7) 若当前非第一道作业工序，且  $NjyTask \leq JY(fjzw)$ ，则  $dt=0$ ，否则  $dt=\max(LTY\{ii-1, fjzw\}(tjy(ii-1, fjzw)-JY(fjzw)+ty(fjzw)), TempJ(jj, 1))$ ；
- 8) 判断该飞机  $J-1$  道工序、上一加油作业是否

发生保障时间变化(此项仅当  $N_{jy}Task \geq JY(fjzw)$  时需判断),若发生,  $dt=dt \pm t$ ; 对后续工作进行重调度。

### 2.3 基于不固定时间发生后的重调度

舰载机甲板调度以静态调度为基础,当发生保障时间的变化时,触发动态调度,产生对后续作业工序的调整。以加油作业发生动态变化为例,具体算法如下:

- 1) 当发生动态保障时间变化,触发 function();
- 2) 对各保障工序初始化条件进行调整,  $K_{jy}$ 、 $K_{gd}$ 、 $K_{zy}$  分别为当前可进行调度的加油小组、挂弹小组、转运小组初始数量;
- 3) 对各舰载机初始化条件进行调整,将每架舰载机未进行的工序列入,以及将每架舰载机原调度方案下当前正在进行的保障作业预计完成时间作为每架舰载机动态调度起始时间;
- 4) 对原调度下,各保障资源预计完成时间作为保障资源可使用释放时间点;
- 5) 对当前甲板状况,利用文中算法,产生重调度,覆盖原静态调度,作为当前调度方案。

加油作业发生变化算法如图 6 所示。

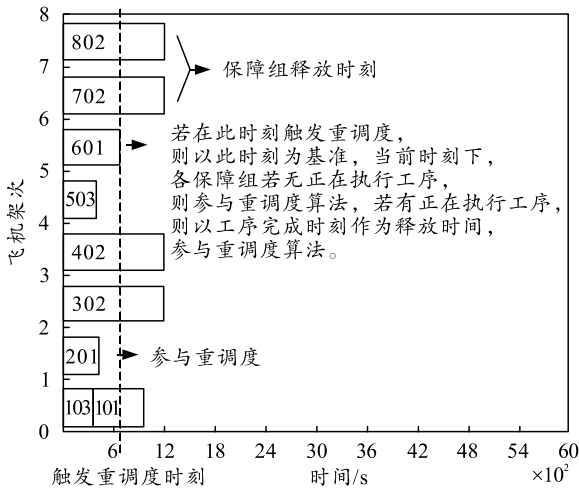


图 6 重调度窗口

### 3 算例仿真

以库兹涅佐夫航母为实例,对航母甲板舰载机进行调度仿真,设舰载机以双周期进行连续出动为背景条件。设甲板初始停机数设为 10,对 8 架舰载机进行调度运算,仿真过程中假设所有舰载机均无故障。仿真保障工序取值如下:加油时间取 23 min;挂弹时间因舰载机停机区域不同,舰艏、舰艉、左舷、右舷分别取 21, 21, 32, 26 min;转运时间为 7 min;惯导对准时间为 8 min;暖机时间为 8 min;滑行和起飞时间均为 1 min;挂弹小组数  $N_{GD}=4$ ;转

运组数  $N_{zy}=3$ 。算法基于 Matlab R2014a 实现,8 机出动模式下的作业调度甘特图如图 7 所示,文中算法解的收敛曲线如图 8 所示。

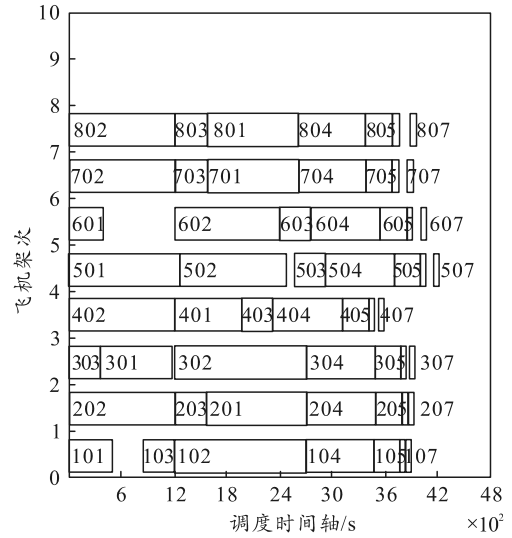


图 7 甲板舰载机静态调度甘特图

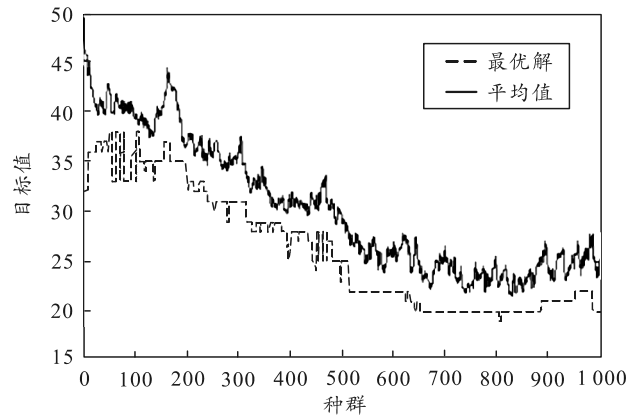


图 8 种群适应值收敛

针对加油过程中,加油时间发生动态变化,对此产生重调度结果如图 9 所示。

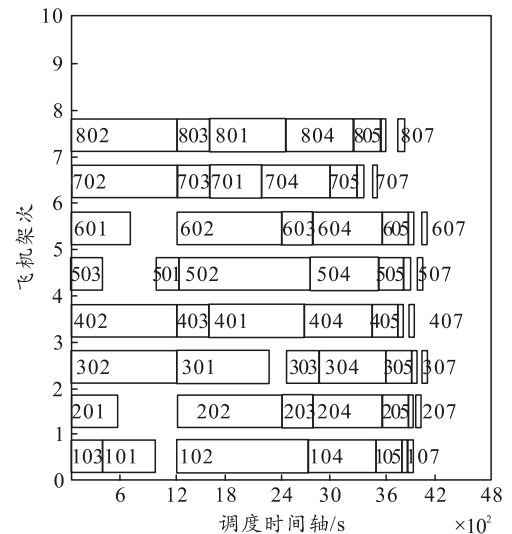


图 9 动态加油时间的甲板舰载机调度甘特图

从仿真结果可以看出: 文中的 GA 算法可以提供一个较优甲板舰载机快速调度方案, 通过种群层层迭代, 最终以  $C_{\max}$  为目标函数的种群适应值趋近于平缓, 算法得到当前模式下的最优值。在通过对加油时间的动态仿真后, 利用文中算法, 可得到当前算法模式下最优快速调度方案。

#### 4 结论

针对库兹涅佐夫航母舰载机以双周期连续出动模式进行批次出动的甲板舰载机保障作业调度问题, 笔者通过分析甲板作业流程、资源约束条件和工序约束条件, 以优化批次再次出动的最短准备时间为目标, 建立优化计算模型; 在此基础上, 采用遗传算法框架设计一种对不固定保障时间需求的快速求解算法。通过以库兹涅佐夫航母为背景的仿真计算验证了算法的有效性, 且算法获得的调度结果能够被甲板调度专家接受。

#### 参考文献:

- [1] 冯强, 曾声奎, 康锐. 基于 MAS 的舰载机动态调度模型[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2119-2125.
- [2] 李耀宇, 朱一凡, 贾全, 等. 基于排队网络的舰载机甲板调运优化调度策略生成方法[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(5): 26-30.
- [3] 刘钦辉, 邱长华, 王能建. 考虑空间约束的舰载机作业调度模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(11): 1435-1439, 1452.
- [4] 周晓光, 赵仁厚, 王迷运, 等. 飞行甲板作业对航母舰载机出动架次影响分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2447-2451.
- [5] 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.
- [6] 崔博. 舰载机保障人员配置优化仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [7] MICHINI B, HOW J P. A Human-Interactive Course of Action Planner for Aircraft Carrier Deck Operations[Z]. AIAA, 2011: 1-11.
- [8] RYAN J C, CHRISTOPHER J, CUMMINGS, et al. Designing an interactive local and global decision support system for aircraft carrier deck scheduling[C]. Proceed-ings of AIAA Information Technology, 2011: 1-12.
- [9] RYAN J C, BANERJEE A G, CUMMINGS M, et al. Comparing the performance of expert user heuristics and an integer linear program in aircraft carrier deck operations[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(6): 761-773.
- [10] DASTIDAR R G, FRAZZOLI E. A queueing network based approach to distributed aircraft carrier deck scheduling[Z]. AIAA, 2011: 1514-1164.
- [11] 刘翔, 刘克. 舰载机保障作业调度问题研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 49-60.
- [12] MICHINI B, HOW J P. A Human-Interactive Course of Action Planner for Aircraft Carrier Deck Operations[Z]. AIAA, 2011: 1-11.
- [13] QI C, WANG D. Dynamic Aircraft Carrier Flight Deck Task Planning based on HTN[J]. IFAC-PapersOnline, 2016, 49(12): 1608-1613.
- [14] 韩维, 苏析超, 陈俊锋. 舰载机多机一体化机务保障调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 809-816.
- [15] 苏析超, 韩维, 萧卫, 等. 基于 Memetic 算法的舰载机甲板一站式保障调度[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2303-2309.
- [16] STORN R, PRICE K. Differential Evolution-A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [17] 韩敏, 王明慧, 范剑超. 基于改进差分进化算法的在线轨迹优化[J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 247-251.
- [18] 李敬花, 胡载萍, 吕慧超, 等. 基于模拟退火分层遗传算法的多资源约束下海工装备多项目调度优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013(10): 1214-1220.