

引用格式: 邓建辉, 田程程, 王岩磊, 等. 基于改进樽海鞘算法的舰载机舰面保障作业流程优化方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(增刊 2): 1-10.

DENG J H, TIAN C C, WANG Y L, et al. Optimization method of carrier-based aircraft support operation process based on improved salp swarm algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(Supp 2): 1-10 (in Chinese).

基于改进樽海鞘算法的舰载机 舰面保障作业流程优化方法

邓建辉¹, 田程程², 王岩磊¹, 刘鹏鹏¹, 彭辉^{*2}, 黄婧柠²

1 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161

2 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072

摘要: [目的] 为保障舰载机持续高效出动的作业效率, 需优化舰载机舰面保障作业流程。[方法] 考虑到舰载机保障作业调度复杂且舰面保障设备易受未知因素的影响, 以舰载机舰面保障作业流程为研究对象, 研究舰面保障作业流程调度优化模型的建立及优化算法。以美军“福特”级航母为例, 从舰载机“一站式”保障模式入手, 针对舰载机保障作业调度问题展开研究, 建立能同时处理串行、并行及柔性约束的保障作业流程调度模型。此外, 通过对樽海鞘算法及遗传算法进行分析, 提出在樽海鞘算法基础上引入遗传算法交叉、变异操作的舰载机保障作业流程调度算法。[结果] 通过算例验证, 所提算法能够获得近似全局最优解, 在保障时间上与遗传算法相比缩短了 16.8%。[结论] 该方法能有效地提高资源利用率, 从而合理配置航母的保障资源, 使得舰载机能够高效出动, 提高航空母舰作战能力。

关键词: 舰面保障系统; “一站式”保障; 作业流程; 樽海鞘算法

中图分类号: U664.771; E925.671; E926.392

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03458

Optimization method of carrier-based aircraft support operation process based on improved salp swarm algorithm

DENG Jianhui¹, TIAN Chengcheng², WANG Yanlei¹, LIU Pengpeng¹, PENG Hui^{*2}, HUANG Jingning²

1 The 92942 Unit of PLA, Beijing 100161, China

2 School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: [Objective] In order to ensure the continuous high-sortie operation of carrier-based aircraft, it is of great significance to optimize the flight deck operation process. [Methods] Considering the complexity of carrier-based aircraft support operation scheduling, as well as the complexity of flight deck support equipment and its susceptibility to unknown factors, the establishment of a support operation scheduling optimization model and its optimization algorithm are studied. Taking Ford-class aircraft carrier of the US navy as an example, starting from the pit-stop servicing mode, the carrier-based aircraft support job scheduling problem is studied, and a scheduling model that can handle serial, parallel, and flexible constraints at the same time is established. Meanwhile, based on the analysis of the salp swarm algorithm (SSA) and genetic algorithm, a scheduling algorithm for the carrier-based aircraft support operation process is proposed which introduces the crossover and mutation operation of the genetic algorithm on the basis of the SSA. [Results] Verified through numerical examples, an approximate global optimal solution can be obtained which shortens the support time by 16.8% compared with the genetic algorithm. [Conclusions] The proposed method improves the utilization rate of aircraft carrier's support resources to allow the rational allocation of them, enabling the carrier-based aircraft to be dispatched efficiently and improving the combat readiness of the aircraft carrier.

Key words: aircraft carrier flight deck support system; pit-stop servicing; operation process; salp swarm algorithm

收稿日期: 2023-07-11 修回日期: 2024-08-12

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 邓建辉, 男, 1966 年生, 硕士, 研究员

田程程, 女, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 电气设备健康状态管理与故障诊断。E-mail: 2514127461@qq.com

彭辉, 男, 1975 年生, 博士, 副教授。研究方向: 电气设备健康状态管理与故障诊断。E-mail: hpeng@whu.edu.cn

*通信作者: 彭辉

0 引言

航空母舰(以下简称“航母”)是国之重器,是当前对海作战的中坚力量^[1]。舰载机在弹射起飞出动之前,所有作业任务都需要按照严格的顺序约束关系进行保障,因此,保证舰载机能够持续高效出动的前提是高效地保障作业效率。在实际工作中,舰载机保障作业调度流程复杂,涉及到的工序繁琐,舰载机所需被保障的任务作业流程之间存在严格的时序约束关系,并且舰面保障设备复杂,相关的元件及指标参数众多;与此同时,相比于陆上作业,对海作战的航母空间资源、物资配备及人员保障都很有限,且更容易受到极端天气、设备损坏及其他未知因素的影响^[2-4]。因此,在有限的资源配备及恶劣的环境下,如何高效地完成舰载机保障作业、优化作业流程,实现舰载机的高效出动,是提升航母对海作战能力的关键所在。

以美国航母为例,当前的舰载机舰面保障作业流程研究对于航母舰面的资源调度主要依赖于数字化调度模型台,该模型台也被美军称作“电子显灵板”,其主要依托航空数据管理与控制系统(ADMACS)实现对甲板作业的实时管理与数据采集^[5]。由于舰面保障系统对舰载机的保障作业时间受到资源、空间、保障人员战位等影响,因此该作业流程并不是简单的线性叠加,其形式类似于传统的车间作业调度问题(JSSP)^[6]。JSSP是典型的组合约束问题,根据 Gere^[7]对调度的描述,调度规则是指一个乃至多个规则组合的优先判定,具有一定的线性复杂度。目前,针对车间调度流程的优化,已经做过许多研究。例如,张建明等^[8]提出用离散量子微粒群优化算法(DQPSO)进行求解,该算法主要通过结合离散量子群优化算法,并结合遗传算法中对算子的操作,使得 DQPSO 能够直接求解车间作业调度问题;刘明等^[9]提出通过遗传算法,两两随机配对竞争具备保留适应度最优的个体,可较好地解决 JSSP 中的最小完工时间要求;许梦楠等^[10]以建立高效车间调度程序为目标,通过对布谷鸟搜索算法中的步长和检索方式等来改进算法,与原算法相比,改进后的算法求解的效果更好。

然而,舰面保障作业调度问题不限于 JSSP,更是车间调度问题的扩展^[11],即混合流水车间调度问题(HFSP)^[12]和柔性车间作业调度问题(FJSP)^[13]。针对 HFSP 和 FJSP, Brah 等^[14]通过提出一种分支界定法,实现处理小规模 HFSP; Moccellini 等^[15]

通过考虑阻塞的混合流水车间调度问题,提出改进启发式算法,一定程度上降低了求解结果受启发规则的影响; Brandimarte^[16]则使用分步法求解 FJSP 问题,将机器分配问题和工序调度问题分开求解,取得了一定的成效。目前,已有许多学者针对舰载机舰面保障调度问题进行了研究。例如,魏昌全等^[17]根据舰载机不同的出动方式,在合理假设及简化的前提下,分别建立了集中打击模式和循环出动模式下的舰面资源调度模型,以数学模型的方式描述了舰面保障作业调度模型;苏析超等^[18]通过采用嵌入资源分配策略的方法建立舰面资源串行调度方案,并设计将自适应变异策略引入 Memetic 算法求解,具有一定的可行性和有效性。然而,上述方法没有把舰面资源保障的问题和优化算法结合起来,因此没有形成关于舰面保障的最优方案。

本文将以舰载机舰面保障作业流程为研究对象,研究舰载机舰面保障作业流程调度优化模型的建立与算法改进。以美军“福特”级航母为例,从舰载机“一站式”保障模式入手,针对舰载机保障作业调度问题展开研究,建立能同时处理串行、并行及柔性约束的保障作业流程调度优化模型。在算法设计方面,通过对樽海鞘算法(salp swarm algorithm, SSA)及遗传算法进行分析,提出在樽海鞘算法的基础上引入遗传算法的交叉和变异操作,采用优化算法来求解舰载机保障作业流程调度,并获得近似全局最优解,得到舰面作业流程的优化方案。

1 舰面保障作业流程模型

舰载机在遂行完任务着舰之后,还需要进行一系列的保障作业任务,如通风、通电、加油、挂载弹药和特设外观检查等操作,以确保能再次出动执行作战任务。资料表明,目前在役的航母中,舰载机的保障模式主要包括两种:一种是以“尼米兹”级航母为例的传统保障模式;另一种是当前较为先进的以“福特”级航母为例的“一站式”保障模式。传统保障模式下的舰载机着舰后需根据保障作业顺序约束的要求,依次通过牵引车牵引至作业区域进行保障,最后到弹射战位准备下一次的起飞作业。舰载机从着舰至保障结束,至少需转换 5~6 个工作区域,不仅增加了调运复杂度,还降低了作业效率,造成资源浪费。

1.1 舰载机“一站式”保障模式

为解决传统保障模式下的问题,美军在 2017 年投入使用的“福特”级航母上采用一站式保障

模式,对舰载机的出动与回收进行保障作业,通过在航母甲板上设置 18 个“一站式”保障区,每

一个区域都能完成舰载机的一整套保障作业任务^[9]。一站式保障的基本流程如图 1 所示。

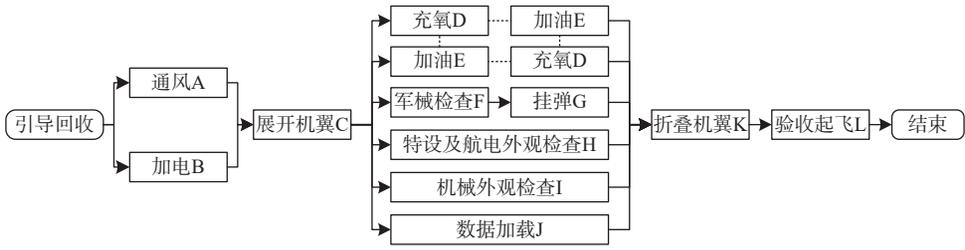


图 1 “一站式”保障流程图

Fig. 1 Working flow of pit-stop servicing

“一站式”保障的具体流程包括:

- 1) 通过着舰引导和阻拦回收系统完成对舰载机的引导回收。
- 2) 舰载机着舰之后,引导员通过牵引车将其牵引至“一站式”保障区域,保持喷气口朝船舷外侧,并关闭发动机。
- 3) 将舰载机接地,将电力服务站电缆或电源车与舰载机相连,完成对舰载机的通电检查。
- 4) 将舰载机进行通风操作,保证飞行时内外空气循环的稳定。
- 5) 打开舱盖口,用软管将加油辅助车与加油口相连,进行加油操作,辅助车也起控制油流量的作用。
- 6) 利用武器升降机从弹药库运送弹药至甲板,由挂弹小组人员卸下弹药并运送至“一站式”保障区,为舰载机武器进行挂弹操作。
- 7) 外观检查及数据加载等操作,保证运行的可靠性。
- 8) 机翼的展开与折叠。展开机翼是进行弹药挂载等操作的前提;机翼折叠则是在所有保障任务结束、准备起飞之前进行的操作,主要通过折叠机翼提高甲板空间的资源利用率。
- 9) 完成上述所有保障任务后,引导员再次通过牵引车将舰载机从“一站式”保障区域牵引至弹射战位,为下一次的起飞待命。

分析可知,与传统保障模式相比,“一站式”保障模式不需要对舰载机进行工作区域之间的来回调运,有些任务甚至可以同时进行,例如加油与军械检查等。有些任务完成后可紧接着进行下一项保障任务,无需转运调度,这不仅很大程度上缩短了保障时间,也提高了资源利用率。因此,本文将对舰载机“一站式”保障模式展开研究。

1.2 保障作业调度优化模型的建立

本文将依据“福特”级航母“一站式”保障流程的实际工作情况,结合作业流程特点,将保障

作业执行过程各任务之间的约束关系抽象为数学模型,同时以保障一波次舰载机最短耗时为目标函数进行数学建模。通过设计改进算法求解该优化模型获得高效的舰载机舰面保障作业流程调度方案,从而代替人工调度,缩短总体调度时间,提高舰载机的架次出动能力。

1.2.1 任务流程说明

结合图 1“福特”级航母的“一站式”保障流程来看,涉及到的保障工序繁多,除去进入“一站式”保障站台前的引导回收任务之外,包含通风、加电及数据加载等共计 12 项保障作业任务流程,其中各任务之间又存在极强的约束关系。用于描述任务之间的关系和限制的三种约束类型分别为串行、并行和柔性约束。在串行约束中,任务必须按照线性顺序依次执行,不能同时进行或交叉进行。而对于并行约束,多个任务可以同时进行,它们之间没有强制的先后顺序。这种约束允许团队在项目同时处理多个任务,提高效率和并行执行能力。柔性约束则是一种相对灵活的约束类型,允许在一定程度上调整计划或任务的执行方式,有助于更好地应对风险或不确定性^[20-21]。

1) 串行关系约束如图 2 所示。军械检查与挂弹作业任务必须满足军械检查在前、挂弹在后的紧前紧后时序约束。



图 2 串行关系约束

Fig. 2 Serial relation constraint

2) 并行关系约束如图 3 所示。通风与加电作业任务可以同时进行。

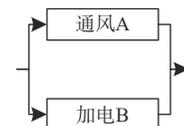


图 3 并行关系约束

Fig. 3 Parallel relation constraint

3) 柔性关系约束如图4所示。充氧与加油作业任务必须满足串行的时序约束,但是无需强制约束具体的先后顺序。

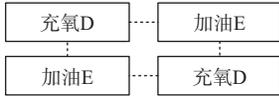


图4 柔性关系约束

Fig. 4 Flexible relation constraint

从以上对“一站式”保障作业流程的分析说明可以看出,舰载机保障作业调度问题与传统的混合流水车间调度问题(HFSP)^[22]类似,图5为混合流水车间调度问题的模型示意图。

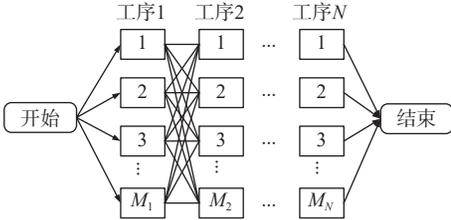


图5 混合流水车间调度问题的模型示意图

Fig. 5 Diagram of hybrid flow shop scheduling problem

图中, M 表示能够加工某一工序的设备总数, N 表示工序数, 其中每个工序都可以从多个设备中任选某一设备进行加工, 例如工序1的加工便从 $1, 2, 3, \dots, M_1$ 中任选其一。可以看出, 混合流水车间的加工流程是按照严格的串行约束关系执行的, 而本节所研究的舰载机“一站式”保障流程则不限于此, 不仅包含如图2严格的串行约束关系, 也有如图3和图4的柔性及并行约束关系, 任务流程更为繁琐, 相应的数学模型较混合流水车间调度模型更为复杂。

根据上述对于舰载机舰面保障作业流程的描述, 本节以“一站式”保障作业中的调度流程展开研究, 将单架次舰载机本身的任务执行顺序关系以及多架次舰载机的任务执行先后顺序用数学语言进行描述, 从而建立航母舰载机舰面保障作业流程调度的优化模型。对作业流程说明如下:

1) 按实际作业情况, 一波次作业应保障多架次舰载机;

2) 每架次舰载机所需被保障的任务相同, 但顺序可以不同;

3) 舰载机与舰载机之间的任务顺序没有强限制, 可以随机排序;

4) 舰载机每个任务都可由能够保障该任务的任一小组进行作业, 但每个保障小组只能同时保障其中一架舰载机;

5) 某一保障小组在一波次作业流程中, 既可以保障多架次舰载机的同一任务, 也可以不参与

任何架次舰载机的保障;

6) 各舰载机等间距并列停靠, 所有保障小组在相邻的两架舰载机之间的转换时间相同;

7) 假设保障设备完备、保障人员高效、保障资源充足, 影响保障总耗时的因素为舰载机任务顺序关系及小组调度分配。

1.2.2 保障作业调度的优化模型

本节将根据保障作业的实际调度过程, 说明条件转换为舰载机舰面保障作业流程的优化模型。以完成一波次所有舰载机的保障作业任务所需的最短时间 t 为目标函数, $t = \min(\max(T_{e_{ij}}))$, 其中, $T_{e_{ij}}$ 为结束保障舰载机 i 任务 j 的时刻。约束条件包括:

$$\sum_{k_j} M_{ik_j} = 1 \quad (1)$$

该约束条件表示每个任务只需一个保障小组完成。其中, G_j 为能够保障第 j 个任务的小组集合, $G_j = \{1, \dots, k_j, \dots, G_{jn}\}$, G_{jn} 为能够保障第 j 个任务的小组总数; k_j 为能够保障第 j 个任务的小组编号; M_{ik_j} 为如果保障小组 k_j 保障了第 i 架飞机, 则取值为1, 否则取0。

$$T_i = \sum_j^T \sum_{i,i'}^A (t_{ik_j} + t_{i'j} + t_{r_{k_j}}) \quad (2)$$

该约束条件表示舰载机 i 的所有任务保障所需时间。其中, A 为舰载机集合, $A = \{1, \dots, i, \dots, A_n\}$, A_n 为舰载机总数, i 为舰载机编号; T 为舰载机保障任务集合, $T = \{1, \dots, j, \dots, T_n\}$, T_n 为单个舰载机任务总数, j 为舰载机任务编号; $t_{i'j}$ 为保障小组从舰载机 i 到 i' 的时间, t_{ik_j} 为保障第 j 个任务的小组保障时间。若舰载机 i' 的任务 j 先于舰载机 i 受保障, 则舰载机需要等待 i' 的 j 先保障时间 $t_{r_{k_j}}$ 以及保障小组从 i' 到 i 的耗时 $t_{i'j}$ 。

$$T_{iB_j} = \max \left(\sum_{j \in B_j} T_{e_{ij}} \right) \quad (3)$$

该约束条件表示舰载机 i 的所有并行任务最终完成保障时刻由最大结束时间确定。

$$T_{b_{ij}} = \begin{cases} T_{e_{vj}} + t_{i'j}, (J_{i'k_j} = -1) \& (T_{e_{vj}} + t_{i'j} \geq \max(T_{e_{i'j'}})) \\ \max(T_{e_{i'j'}}, (J_{i'k_j} = -1) \& (T_{e_{vj}} + t_{i'j} < \max(T_{e_{i'j'}})) \end{cases} \quad (4)$$

该约束条件表示舰载机 i 的任务 j 开始受保障的时间, 其中 $T_{e_{i'j'}}$ 为舰载机 i 任务 j 的紧前任务结束保障的时刻集合, $T_{e_{i'j'}}$ 为对于任务 j 先受保障的舰载机 i' 的保障完成时刻; $J_{i'k_j}$ 为同一任务 j 、不同舰载机 i 的先后受保障顺序, 若舰载机 i 的任

任务 j 先被保障, 则取值为 1, 若舰载机 i 的任务 j 后被保障, 则取值为 -1, 若两舰载机的任务 j 同时被保障, 则取值为 0。

$$T_{e_{ij}} = T_{b_{ij}} + t_{ik_j} \quad (5)$$

该约束条件表示任务 j 的保障结束时刻由开始时刻及保障小组耗时共同决定, 其中 $T_{b_{ij}}$ 为开始保障舰载机 i 任务 j 的时刻。

2 改进樽海鞘算法

根据上述对于保障作业流程优化模型可看出, 舰载机作业调度流程任务量和约束条件繁多, 传统人工调度很难对如此复杂的数学模型做出高效的调度流程, 且舰载机保障作业调度问题是比传统的 HFSP 更为复杂的问题, 因此本节将在上述优化模型的基础上, 对樽海鞘算法进行改进。

2.1 樽海鞘算法

樽海鞘算法是 Mirjalili 等^[23] 在 2017 年提出的一种新型元启发式群智能优化算法, 该算法设计的灵感来自樽海鞘的群体觅食行为。樽海鞘是一种深海微生物, 在觅食的时候樽海鞘会成群结队形成樽海鞘链。樽海鞘链由领导者、追随者这两类个体组成, 领导者处于樽海鞘链的最顶端, 其他个体则是追随者。领导者以食物为目标, 引导种群不断移动, 有助于快速找到食物。樽海鞘算法作为新型算法, 其主要优点是所需参数少, 其种群不同个体能够同时搜索全局最优解, 因此具有应用范围广、计算速度快、不易陷入局部最优的优点。

樽海鞘链的数学模型建立包括:

- 1) 依据所求问题的变量个数 D ($1, \dots, j, \dots, D$), 确定算法的维数为 D 。
- 2) 随机生成种群规模为 N ($1, \dots, i, \dots, N$) 的樽海鞘链, 如式(6)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_D^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_D^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^N & x_2^N & \dots & x_D^N \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{X} 为随机生成的樽海鞘链矩阵, 其每一行代表一个樽海鞘个体, 矩阵中每一个元素表示某个个体在第 j 维空间的位置。

- 3) 确定领导者与追随者。樽海鞘种群主要由领导者与追随者两大类构成, 其中领导者的位置受“食物”(即最优解)的影响排在矩阵 \mathbf{X} 的前面; 追随者的位置更新则依据排在其前面的个体进行更新。

- (1) 领导者的位置依据式(7)更新^[24]。

$$x_j = \begin{cases} F_j + c_1(c_2(ub_j - lb_j) + lb_j), & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1(c_2(ub_j - lb_j) + lb_j), & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_j 为“食物”第 j 维的位置信息; x_j 为第 1 个樽海鞘(即领导者)的第 j 维的位置信息; ub_j 与 lb_j 分别为第 j 维位置的上限和下限; c_2 与 c_3 是 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数; c_1 是樽海鞘算法中重要的控制参数, 计算方式如式(8)所示。

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{l}{L}\right)^2} \quad (8)$$

式中: l 为当前迭代次数; L 为最大迭代次数。

- (2) 追随者的位置依据式(9)更新。

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (9)$$

式中: x_j^i 为第 i 个种群个体的第 j 维的位置信息; x_j^{i-1} 为第 $i-1$ 个种群个体的第 j 维的位置信息。

- 4) 依据所得的解, 计算适应度值。樽海鞘算法的伪代码如图 6 所示。

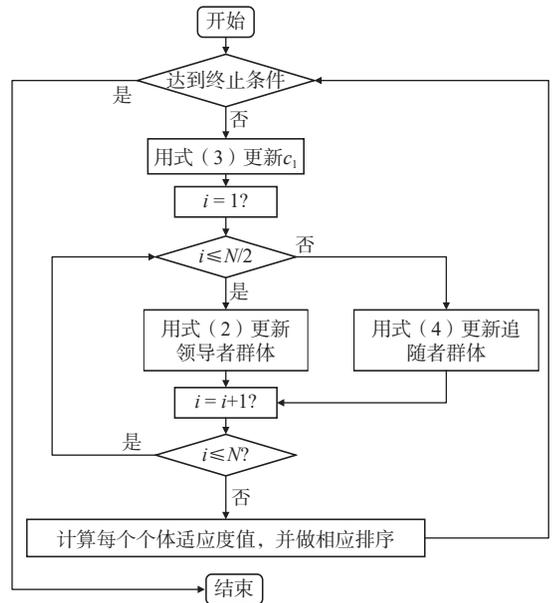


图 6 樽海鞘算法流程图

Fig. 6 Flow chart of the salp swarm algorithm

2.2 改进樽海鞘算法

标准的樽海鞘算法适用于连续区域内的位置搜索, 对于离散解的空间搜索无法直接实现, 本文通过引入上述遗传算法中的交叉及变异操作来对樽海鞘算法进行改进, 从而实现樽海鞘算法在离散空间搜索解的能力。

改进樽海鞘算法的步骤如下所述。

- 步骤 1: 依照遗传算法中染色体的实数编码方式, 随机生成种群个数为 N 、变量为 D 的樽海鞘链。

步骤 2: 计算每个个体的适应度值, 适应度最大的个体作为领导者, 其他 $N-1$ 个个体作为追随者, 并按照适应度值由大至小排序, 参照式(1)形成如表 1 的初始种群, 其中 n 为舰载机数量。

表 1 初始种群
Table 1 Initial population

每架舰载机任务顺序: x_1	保障小组的选择: x_2	所有舰载机任务顺序: x_3
$(A, \dots, L)_1$	$(1 \text{ or } 2, \dots, 23 \text{ or } 24)_1$	$\text{rand}(1, n \times 12)$
$(A, \dots, L)_2$	$(1 \text{ or } 2, \dots, 23 \text{ or } 24)_2$	$\text{rand}(1, n \times 12)$
$(A, \dots, L) \dots$	$(1 \text{ or } 2, \dots, 23 \text{ or } 24) \dots$	$\text{rand}(1, n \times 12)$
$(A, \dots, L)_n$	$(1 \text{ or } 2, \dots, 23 \text{ or } 24)_n$	$\text{rand}(1, n \times 12)$

步骤 3: 从第 2 次迭代开始, 选取适应度值最大的个体作为“食物源”, 引入遗传算法变异操作, 利用式(5)对领导者的位置进行更新, 其中: x_1 主要对任务 G 和 F 的柔性关系进行更新; x_2 对保障小组选择更新; x_3 参照樽海鞘算法中对领导者的更新, 实现对所有舰载机任务顺序的更新。最后保留适应度值较大的个体作为变异后的领导者。

$$x_1: \begin{cases} x_1([G]) = x_1([F]), & \text{rand} \geq 0.5 \\ x_1([G]) = x_1([G]), & \text{rand} < 0.5 \end{cases}$$

$$x_2: \begin{cases} x_2(i) = 2 * i, & \text{rand} \geq 0.5 \\ x_2(i) = 2 * i - 1, & \text{rand} < 0.5 \end{cases} (i = 1 : 12)$$

$$x_3: \begin{cases} \text{round}(F_j + c_1(c_2(ub_j - lb_j) + lb_j)), & c_3 \geq 0.5 \\ \text{round}(F_j - c_1(c_2(ub_j - lb_j) + lb_j)), & c_3 < 0.5 \end{cases} (10)$$

步骤 4: 更新追随者位置, 其中, 单架舰载机任务顺序 x_1 和保障小组选择 x_2 仍按照变异操作更新, 所有舰载机任务顺序则依据遗传算法的交叉操作执行, 具体如图 7 所示。最后同样保留适应度值较大的个体作为追随者。

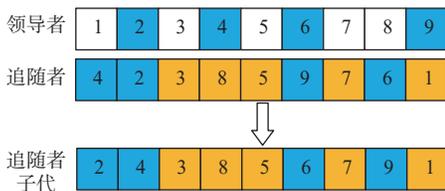


图 7 x_3 变异操作

Fig. 7 x_3 mutation operation

步骤 5: 依据所有个体适应度值进行排序, 生成新的种群, 并返回步骤 2, 直至迭代结束。

改进樽海鞘算法的流程图如图 8 所示。

3 基于改进樽海鞘算法的保障作业流程案例分析

为验证上述针对舰载机舰面保障作业调度的

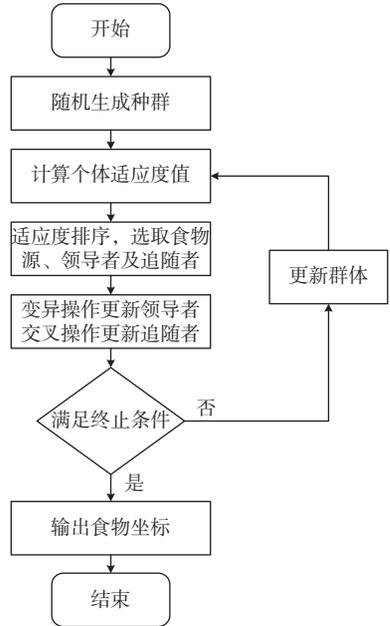


图 8 改进樽海鞘算法流程图

Fig. 8 Flow chart of the improved salp swarm algorithm

优化模型的准确性及改进樽海鞘算法在求解此模型上的可行性, 本节将设计一个具体实例并在 Matlab 中实现。

3.1 舰载机舰面保障作业调度案例说明

依据前文分析, 本节选用“一站式”保障作为舰载机舰面保障作业调度的模式, 单机保障流程如图 1 所示, 共有 13 个保障任务。本次场景设计如图 9 所示, 假设一波次共有 6 架舰载机需要保障。

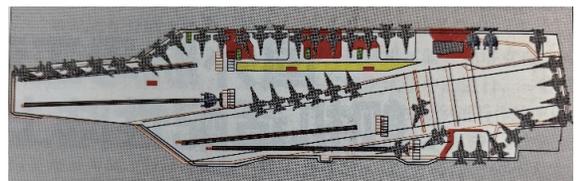


图 9 作业场景设计图

Fig. 9 Operation scheduling scenario design

根据“福特”级航母舰面调度工作实际, 每个保障任务可由两个同类型保障小组其中之一完成, 保障任务及每个小组保障对应任务所需时间如表 2 所示。

此外, 还需花费引导回收的保障时间 3 h, 以及相邻机位的运转时间 0.5 h。其中, 引导回收主要是对舰载机进行“一站式”保障前的着舰引导、阻拦回收以及将舰载机引导至“一站式”保障机务战位。对于多架次飞机需要保障时, “福特”级航母会在所有飞机都到达“一站式”保障区后开始保障作业。因此, 引导回收所耗费的时间为对一波次所有舰载机完成着舰引导及阻拦回收并牵引至“一站式”保障区域为止。

优化模型相关参数设计:

表 2 保障小组对应的任务及保障所需时间

Table 2 Corresponding tasks of support team and time required for support operation

保障小组序号, 能保障任务编号	保障所需时间/min	保障小组序号, 能保障任务编号	保障所需时间/min
1, A	2	13, G	13
2, A	3	14, G	14
3, B	2	15, H	6
4, B	3	16, H	7
5, C	2	17, I	4
6, C	2	18, I	5
7, D	4	19, J	7
8, D	5	20, J	8
9, E	11	21, K	2
10, E	12	22, K	2
11, F	2	23, L	5
12, F	3	24, L	6

1) 所有保障小组从任一舰载机到与其相邻舰载机的耗时为 0.5 min;

2) 以第一个开始参与保障任务的小组为 0 时刻, 不考虑每个保障小组到达第一架所需保障作业舰载机的时间;

3) 其他依据 1.2.2 节的说明。

算法参数设计:

1) 种群数 $N=30$ 。

2) 种群维数 D , 包括:

(1) 6 架舰载机任务顺序的集合维数为 6×12 , 其中单个舰载机任务顺序维数为 12;

(2) 所有舰载机任务顺序的集合维数为 6×12 ;

(3) 每个任务对应的保障小组选择的集合维数为 6×12 ;

综上所述, 种群维数为 216。

3) 最大迭代次数 $L=600$ 。

4) 交叉及变异操作在每次迭代之后都要进行, 因此概率设为 1。

相关目标函数的建立及求解算法均如 1.2.2 节和 2.2 节所示。

3.2 仿真结果及分析

基于改进樽海鞘算法的求解如表 3~表 5 所示。将结果以甘特图的形式展现, 如图 10 所示。同时, 为说明算法的有效性, 将基于遗传算法对实例求解, 并将求解的甘特图展示, 如图 11 所示。其中, 图的横坐标为时间轴, 纵坐标则表示舰载机的编号, 空白方框表示保障小组在舰载机之间的转运, 非空白方框内的数字, 如舰载机 2 对应的“C, 6:2”则表示任务展开机翼由保障小组 6 进行作业, 耗费时间为 2 min。

表 3 每架舰载机任务接受保障顺序

Table 3 Sequence of receiving support operation for each carrier-based aircraft mission

舰载机序号	保障任务先后顺序											
①	B	A	C	D	I	F	G	J	E	H	K	L
②	B	A	C	D	F	H	I	G	E	J	K	L
③	B	A	C	E	F	G	I	D	J	H	K	L
④	A	B	C	H	F	G	J	E	D	I	K	L
⑤	B	A	C	J	H	E	F	D	G	I	K	L
⑥	B	A	C	F	I	E	D	G	H	J	K	L

表 4 所有舰载机接受保障次序

Table 4 Sequence of receiving support operation for all carrier-based aircraft

舰载机序号	所有舰载机接受保障次序											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
①	4	4	4	3	3	4	3	5	3	4	3	3
②	5	6	4	3	6	1	6	5	1	4	5	4
③	4	2	2	5	5	2	5	4	5	2	5	4
④	6	3	2	1	6	6	4	2	2	5	5	1
⑤	2	6	6	3	1	2	1	6	2	6	1	5
⑥	1	3	3	1	6	2	6	2	1	3	1	1

表 5 保障小组的选择

Table 5 Selection of support teams

舰载机序号	保障任务对应的保障小组编号											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
①	1	4	5	7	9	12	14	15	18	20	21	23
②	2	4	6	7	10	11	13	16	17	19	22	24
③	2	3	5	7	9	11	14	15	17	19	22	24
④	1	4	5	8	10	12	13	15	17	19	22	23
⑤	1	4	5	8	9	11	13	15	18	20	22	23
⑥	1	4	6	7	10	12	14	15	17	19	21	23

通过对以上结果分析, 可以得出以下结论:

1) 基于改进樽海鞘算法的优化模型可以精确求解保障作业调度问题。一波次 6 架舰载机的所有任务全部被保障, 且单个舰载机的任务顺序满足 1.2.2 节中的所有约束条件, 结果验证了本文所建立的优化模型能够满足针对一波次舰载机进行保障的工作实际, 因此本文所提的保障作业调度优化模型是正确的。

2) 改进的樽海鞘算法可有效缩短舰载机舰面保障作业的保障所需时间。通过分析图 12 可知, 基于遗传算法计算的收敛次数和最终结果分别为 520 和 71.5, 而改进的樽海鞘算法为 428 和

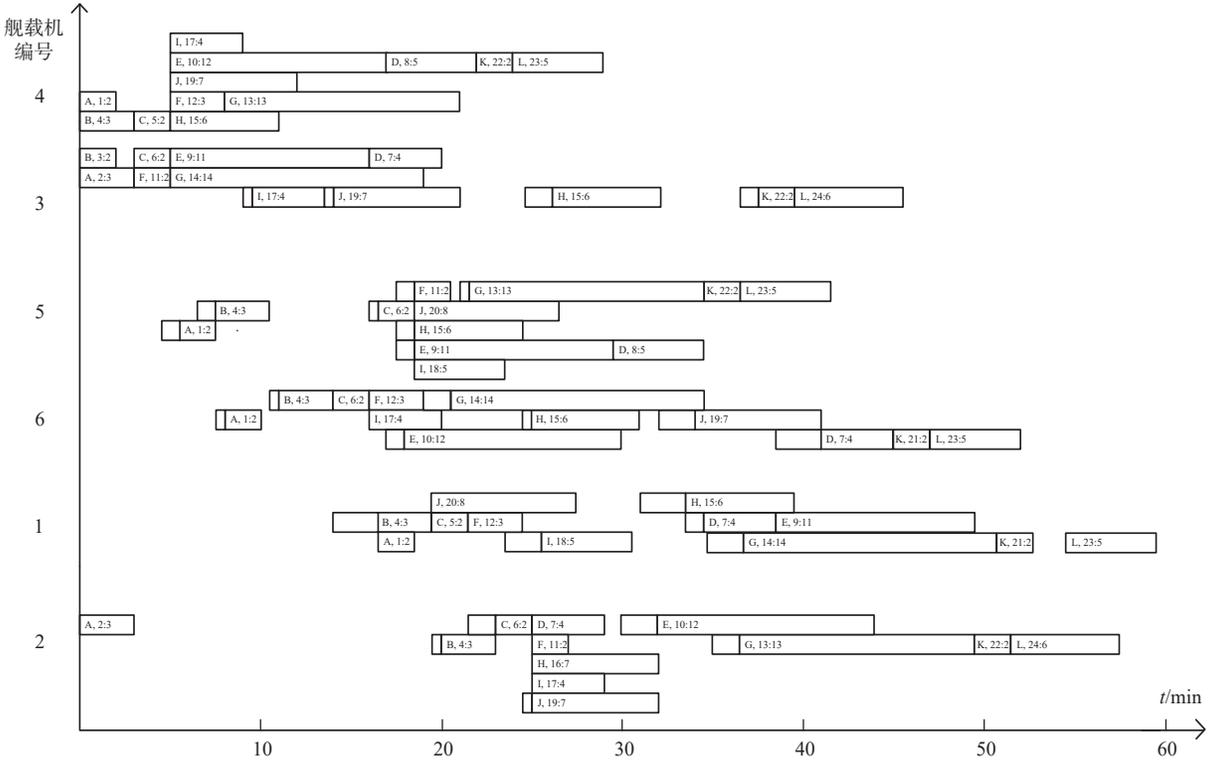


图 10 改进樽海鞘算法求解甘特图

Fig. 10 Gantt chart of the solving process with the improved salp swarm algorithm

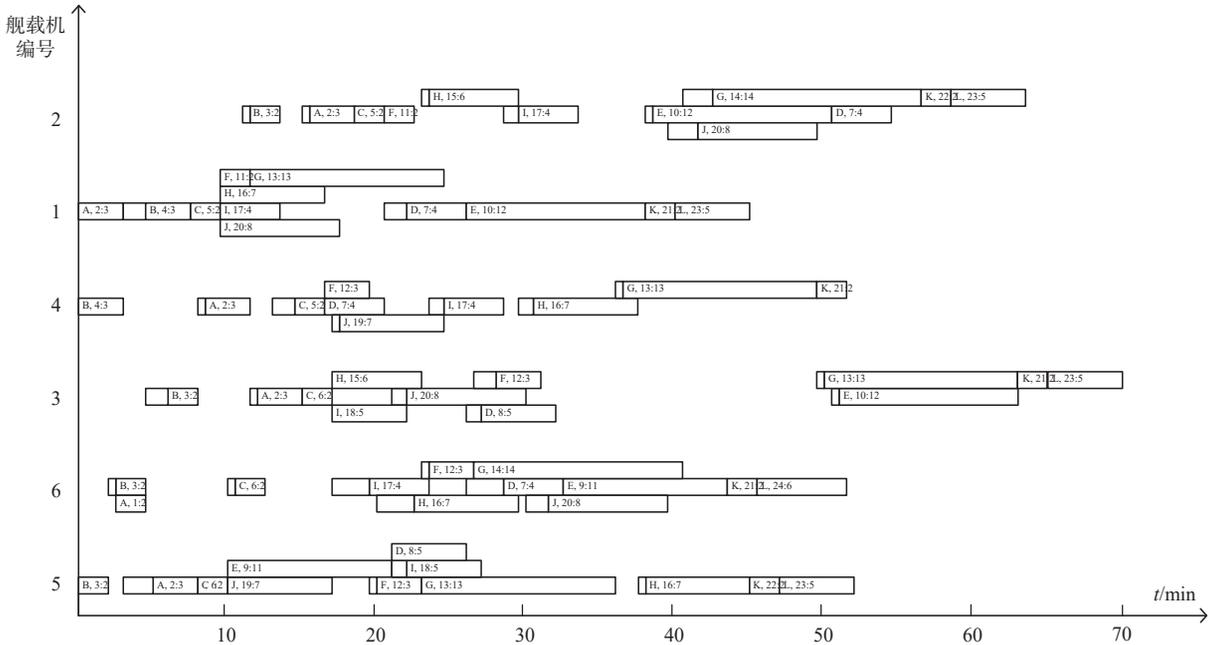


图 11 遗传算法求解甘特图

Fig. 11 Gantt chart of the solving process with the genetic algorithm

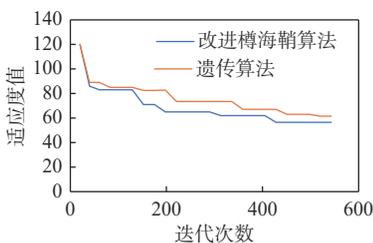


图 12 改进樽海鞘算法与遗传算法计算结果对比

Fig. 12 Comparison of calculation results between improved salp swarm algorithm and genetic algorithm

59.5, 在保障时间上与遗传算法相比缩短了 16.8%, 遗传算法的结果中有些保障任务可以更换保障小组缩短时间, 比如改变第 3 架舰载机挂弹任务 G 的保障小组 13 为 14, 可以缩短 7 min 保障时间, 因此收敛精度不足, 该算法存在许多可以改进的地方; 而从基于改进樽海鞘算法对该优化模型的求解结果可以看出, 在满足任务顺序约束的前提下, 各个保障小组衔接紧凑, 无空闲时间的浪费, 在很大程度上缩短了保障所需总时间, 提

高了资源利用率,从而也提高了舰载机的架次出动率。分析原因,主要是由于遗传算法虽然可以解决离散变量的求解问题,但是在寻优的过程中随机性较大,迭代次数较多,很容易陷入局部最优解^[25]。而改进樽海鞘算法在通过引入遗传算法中的交叉及变异操作后,能够较快地收敛到近似最优解,在舰载机舰面保障作业调度中具有更高的应用前景。

4 结 语

本文介绍了舰载机舰面保障作业的“一站式”保障模式,通过分析该保障模式在传统保障模式上的问题优化与改进之处,针对其建立了舰载机舰面保障作业流程的优化模型。在求解数学模型算法的选择上,通过分析樽海鞘算法与遗传算法的优、缺点,设计改进算法,通过引入遗传算法中的变异及交叉操作,使得樽海鞘算法能够求解离散变量,从而达到搜索舰载机舰面保障作业流程方案的全局最优解的目的。

通过案例分析,本文采用的基于改进樽海鞘算法的舰载机舰面保障作业流程模型可以准确求解保障作业流程调度的最优方案。一波次 6 架舰载机的所有任务全部被保障,且单个舰载机的任务顺序满足 1.2.2 节中所述的所有约束条件,仿真结果验证了本文所建立的仿真模型能够满足针对一波次舰载机进行保障的工作实际。此外,算法具有有效性。通过仿真结果分析,遗传算法虽然可以解决离散变量的求解问题,但是在寻优的过程中随机性较大,收敛精度不足;而从基于改进樽海鞘算法对该优化模型的求解结果可以看出,由于改进樽海鞘算法能够在一定程度上避免陷入局部最优解,在满足任务顺序约束的前提下,各个保障小组衔接紧凑,无空闲时间的浪费,缩短了保障所需的总时间,提高了资源利用率,从而也提高了舰载机的架次出动率。

所研究的舰载机舰面保障作业调度流程在引入遗传算法的交叉变异操作改进樽海鞘算法的基础上,能够近似得到离散变量下舰载机舰面保障作业全局优化调度方案,且满足工程的实际需要,从而合理配置航母的保障资源使得舰载机能够高效出动,能有效提高航空母舰作战能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] JIANG T T, SU X C, HAN W. Optimization of support scheduling on deck of carrier aircraft based on improved differential evolution algorithm[C]//Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE). Beijing, China: IEEE, 2017: 136–140.
- [3] WANG N J, MENG X L, LIU Q H, et al. High level architecture based simulation for aircraft carrier deck operations[C]//Proceedings of 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Xi'an, China: IEEE, 2016: 765–769.
- [4] LIU J, DONG X Z, WANG X W, et al. A homogenization-planning-tracking method to solve cooperative autonomous motion control for heterogeneous carrier dispatch systems[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(9): 293–305.
- [5] 薛均晓, 徐明亮, 李亚飞, 等. 面向航空母舰电子显灵板的多智能体建模技术研究进展 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(10): 1475–1485.
XUE J X, XU M L, LI Y F, et al. Research progress of multi-agent technology for aircraft carrier electronic display panel[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(10): 1475–1485 (in Chinese).
- [6] POTTS C N. Scheduling in computer and manufacturing systems (Second Edition)[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1996, 47(4): 592–593.
- [7] GERE W S JR. Heuristics in job shop scheduling[J]. *Management Science*, 1966, 13(3): 167–190.
- [8] 张建明, 谢磊, 毛婧敏, 等. 基于离散量子微粒群优化的作业车间调度 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2012, 46(5): 842–847.
ZHANG J M, XIE L, MAO J M, et al. Discrete quantum-behaved particle swarm optimization for job-shop scheduling[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(5): 842–847 (in Chinese).
- [9] 刘明, 索良泽. 基于遗传算法的流动车间作业调度 [J]. *新型工业化*, 2018, 8(5): 75–80.
LIU M, SUO L Z. Flow job shop scheduling based on genetic algorithm[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2018, 8(5): 75–80 (in Chinese).
- [10] 许梦楠, 陈兵. 改进布谷鸟搜索算法的车间作业调度优化研究 [J]. *小型微型计算机系统*, 2021, 42(9): 1826–1829.
XU M N, CHEN B. Research on job shop scheduling optimization based on improved cuckoo search algorithm[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2021, 42(9): 1826–1829 (in Chinese).
- [11] WANG Y Q, XIE N M. Flexible flow shop scheduling with interval grey processing time[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2021, 11(4): 779–795.
- [12] 唐立新, 吴亚萍. 混合流水车间调度的遗传下降算法

- [J]. 自动化学报, 2002, 28(4): 637–641.
- TANG L X, WU Y P. A genetic descent algorithm for hybrid flow shop scheduling[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(4): 637–641 (in Chinese).
- [13] 李传鹏, 王桂从, 崔焕勇. 柔性作业车间调度问题研究现状及发展趋势 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2012(11): 109–112.
- LI C P, WANG G C, CUI H Y. Research status and development trend of flexible job shop scheduling problem[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2012(11): 109–112 (in Chinese).
- [14] BRAH S A, HUNSUCKER J L. Branch and bound algorithm for the flow shop with multiple processors[J]. *European Journal of Operational Research*, 1991, 51(1): 88–99.
- [15] MOCCELLIN J V, NAGANO M S, NETO A R P, et al. Heuristic algorithms for scheduling hybrid flow shops with machine blocking and setup times[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(2): 40.
- [16] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search[J]. *Annals of Operations Research*, 1993, 41(3): 157–183.
- [17] 魏全胜, 陈春良, 王保乳. 基于出动方式的舰载机航空保障调度模型 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2012, 27(1): 111–114.
- WEI C Q, CHEN C L, WANG B R. Research on the aircraft support scheduling model of carrier-based aircraft based on launch mode[J]. *Journal of Naval Aviation University*, 2012, 27(1): 111–114 (in Chinese).
- [18] 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 (in Chinese).
- [19] 刘相春. 美国“福特”级航母“一站式保障”技术特征和关键技术分析 [J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(6): 1–5.
- LIU X C. Technical features and critical technologies for the “Pit-Stop” aircraft servicing adopted by ford class aircraft carriers[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(6): 1–5 (in Chinese).
- [20] 徐本柱, 费晓璐, 章兴玲. 柔性作业车间批量划分与并行调度优化 [J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(8): 1953–1964.
- XU B Z, FEI X L, ZHANG X L. Batch division and parallel scheduling optimization of flexible job shop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(8): 1953–1964 (in Chinese).
- [21] 何浩. 基于改进遗传算法的多目标柔性作业车间调度问题研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- HE H. Research on multi-objective flexible job shop scheduling problem based on improved genetic algorithms [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [22] HOOGEVEEN J A, LENSTRA J K, VELTMAN B. Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 89(1): 172–175.
- [23] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114: 163–191.
- [24] 邢致恺, 贾鹤鸣, 宋文龙. 基于莱维飞行樽海鞘群优化算法的多阈值图像分割 [J]. *自动化学报*, 2021, 47(2): 363–377.
- XING Z K, JIA H M, SONG W L. Levy flight trajectory-based Salp swarm algorithm for multilevel thresholding image segmentation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(2): 363–377 (in Chinese).
- [25] ANWAAR A, ASHRAF A, BANGYAL W H K, et al. Genetic algorithms: brief review on genetic algorithms for global optimization problems[C]//Proceedings of 2022 Human-Centered Cognitive Systems (HCCS). Shanghai, China: IEEE, 2022: 1–6.

相关论文

- [1] 朱兴动, 赵洋, 范加利, 等. 基于分层优化策略的一站式保障资源性能指标联合优化方法 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(5): 92–103. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03011>
- [2] 张晓东, 廖晶静, 黄祥钊. 基于事件的舰载机出动回收作业流程建模方法 [J]. *中国舰船研究*, 2014, 9(6): 1–7. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2014.06.001>