

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.05.04

基于IWOA的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法

石金龙¹, 冯玲玲², 张磊³, 陈寅生^{1*}

(1. 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院, 北京 100000;
3. 中国船舶集团有限公司第七〇八研究所, 上海 200011)

摘要: 针对岸滩卸载系统作业任务可靠性分配研究尚不完善、结果需进一步优化的问题, 提出一种基于改进鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA)的可靠性分配方法。根据岸滩卸载系统各任务之间存在的并联和串联的逻辑关系, 构建了并联和串联组成的混合可靠性分配模型; 设计了基于IWOA的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法, 完成了任务的可靠性分配。采用仿真对分配结果进行评估, 完成了任务可靠性分配方法的验证。仿真结果表明: 系统最优的可靠度 $R = 0.975$, 可提升岸滩卸载作业系统任务可靠性分配能力。

关键词: 水路运输; 岸滩卸载作业; 改进鲸鱼优化算法; 任务可靠性; 可靠性分配; 最优可靠度; 工作效率; 混合模型

中图分类号: U666; TP202 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 05-0030-10

Reliability assignment method for shore unloading operations based on IWOA

SHI Jinlong¹, FENG Lingling², ZHANG Lei³, CHEN Yinsheng^{1*}

(1. School of Measurement and Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. China Institute of Marine Technology & Economy, Beijing 100000, China;
3. 708 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Shanghai 200011, China)

Abstract: Aiming at the problem that the research on the reliability assignment method of the shore-landing unloading system is not perfect and the reliability assignment results need to be optimized, a reliability assignment method based on the improved whale optimization algorithm (IWOA) was proposed. According to the parallel and series logical relationships existing among various tasks of the shoreline unloading system, a reliability assignment model of the unloading system was constructed, and reliability allocation method based on the IWOA was designed to complete the reliability allocation of tasks. The simulation method was used to evaluate the assignment results of the proposed method, and the reliability assignment method for shore unloading operation was verified. The simulation results show that the optimal reliability of the system is 0.975, which can enhance the task reliability allocation capability of the shore unloading operation system.

Key words: water transport; shore unloading operation; IWOA; task reliability; reliability assignment; optimal reliability; work efficiency; hybrid model

收稿日期: 2025-06-25; 修回日期: 2025-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(62403164)

引用格式: 石金龙, 冯玲玲, 张磊, 等. 基于IWOA的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 30-39.

Citation: SHI J L, FENG L L, ZHANG L, et al. Reliability assignment method for shore unloading operations based on IWOA[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 30-39.



0 引言

近年来, 各国围绕水路运输的争端态势不断加剧, 港口和航运资源的争夺日趋激烈。作为水路输送链条的关键环节, 岸滩卸载作业能力直接影响装备、物资及人员的上陆效率, 已成为现代水路运输综合保障能力建设的重要议题^[1]。岸滩卸载作业是以大规模装备、物资与人员卸载上陆为目标的系统工程, 由多型卸载装备协同构成, 作业环境复杂、操作难度大、安全风险高, 易受气象、水文等自然条件的限制^[2]。卸载过程节点众多, 各环节都对卸载效率产生显著影响; 系统运行过程中须实现卸载装备功能相互衔接、作业能力相互匹配及载荷转运界面相互兼容, 从而提高卸载系统的整体可靠性和作业效能。因此, 对岸滩卸载作业任务可靠性进行合理分配, 是确保系统高效运行、提高卸载任务成功率的重要因素^[3]。

可靠性分配是指通过一定的标准或某种方法将完整系统的可靠性指标合理地分配给系统的各组成单元或子系统, 从而保障系统功能任务顺利完成。可靠性分配过程遵循从整体到局部、从上到下、从大到小的分配逻辑^[4]。目前, 常用的可靠性分配方法包括等分配法^[5]、比例分配法^[6-7]、AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, 电子设备可靠性咨询小组) 分配法^[8]、评分分配法^[9]等。根据航天测控通信系统任务可靠性分配的特点, 文献[10]提出了基于权重信息的启发式算法, 能有效解决串联、并联、备份等各种结构下的多阶段任务可靠性分配问题。文献[11]建立了考虑部件不确定性的可靠性分配模型, 提出了基于方差分析的部件全局重要度的混合启发式算法, 该重要度指标可以用来评估所有部件的可靠性在不确定的情况下, 某个部件对系统的重要程度。文献[12]提出了基于区间犹豫模糊语言项集的可靠性分配方法, 建立了基于专家评分的可靠性分配方法, 并对计算结果进行比较, 证明了该方法的有效性。文献[13]提出了基于重要度与复杂度的可靠性分配方法, 建立了飞行操纵系统可靠性框图, 完成了任务可靠性分配的实际应用。文献[14]综合考虑了影响权重及其相关性,

提出了数控机床两阶段可靠性分配方法, 通过定性和定量相结合的方式对结果的准确性进行了全面验证。针对深海载人平台的多任务场景, 文献[15]提出2种总体任务可靠性分配方法, 并通过算例验证其有效性。文献[16]将粗糙集理论与概率语言术语集相结合, 提出粗糙概率语言环境下的可靠性分配方法, 有效提高了专家处理模糊信息的能力。文献[17]则基于改进模糊层次分析法构建综合权重计算模型, 实现各子系统的可靠性分配权重的定量求解。

当前, 可靠性分配理论研究多是验证分配方法的有效性, 但面向岸滩卸载任务场景的可靠性分配方法尚不完善, 仍有待持续深化研究。本文提出一种基于改进鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA)的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法, 根据系统的组成和特点, 构建任务可靠性分配模型, 在IWOA求解过程中引入惯性参数, 以增强算法的局部搜索能力和收敛速度, 通过仿真对分配结果进行评估和验证。为可靠度计量测试的新方法、新成果交流和应用等提供参考。

1 岸滩卸载系统组成结构

1.1 组成岸滩卸载任务作业系统

岸滩卸载系统任务: 在近岸水域, 利用离岸过驳平台、驳运船(小型运输艇和渡船)对运输船上装载的装备物资进行卸载, 并完成驳运、上岸等任务。其中, 离岸过驳平台用于水上卸载和过驳, 驳运船用于近距离驳运。抵滩输送装备、物资上岸, 运输船、离岸过驳平台和驳运船可在近岸水域形成一个装备物资的“卸载-转运”循环系统, 系统组成如图1所示。

岸滩卸载作业系统主要以客滚船、运输船和大中型运输艇等为主要母船。其作业流程包括离岸过驳、近岸驳运、岸边卸载3大环节。其中, 离岸过驳是指在水上过驳区将装备和物资由输送船吊装或滚装过驳到小型驳运船, 并完成人员换乘; 近岸驳运依托吃水浅、适应岸滩的驳运船艇和渡船, 由离岸过驳区向滩头转运装备物资和人员; 岸边卸载则通过船艇直接登滩或两栖方式完成最

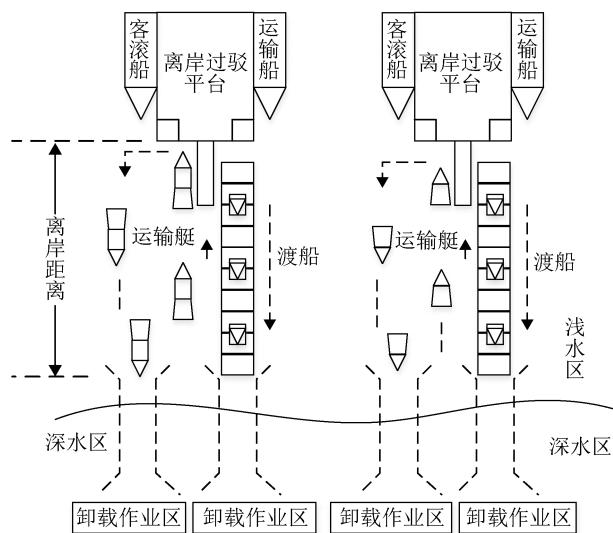


图1 岸滩卸载任务作业系统

Fig.1 Shore unloading task operation system

终卸载。岸滩卸载系统适用于输送船无法抵近岸边的场景，可在一定水深的近岸水域实施装备物资过驳和人员换乘，并通过小型船艇转运至滩头卸载上岸，其作业流程如图2所示。

在整个岸滩卸载系统的水上过驳作业中，离岸过驳环节包括靠船、系缆、升跳板、拆卸限位器、装备发动、卸载装备、降跳板、解缆、离船9个作业节点；由离岸过驳转向近岸驳运时，水上机动卸载平台设2个泊位，可同时并行作业；近岸驳运作业包括靠船、系缆、放大门、装备登艇、装备固定、收大门、解缆、离船8个节点；岸边卸载部分可视为无节点。

1.2 岸滩卸载作业任务系统特点

岸滩卸载任务具有规模大、结构复杂、影响

因素多等特征，其作业进程易受作业环境制约，具体包括与输送转运作业有关的海洋海岸与内河环境要素：天气气象(风、雨、雾、冰)、水文动力(近岸波浪、水位波动、近海流)以及地质地貌(水岸航道地质构造、基地及腹地的地形地貌等)等。卸载作业环境直接影响水路航道的泊稳条件以及载运工具与装卸搬运机械泊稳性能，进而对水路输送转运中船舶靠泊、装卸及运行各环节产生重要影响，最终影响作业效率与安全性。因此，岸滩卸载任务具有过程复杂、影响因素较多、需要兼顾作业效率和可靠性的特点。

2 任务可靠性分配模型架构

2.1 任务可靠性模型构建

任务可靠性分配旨在提高卸载系统的完成效率，减少因突发故障导致作业中断的频率。人员技术水平、工作环境与系统复杂度等诸多因素都会对其可靠性产生不可小觑的影响。据作业流程可知，离岸过驳作业有9个节点，近岸驳运有8个节点，岸边卸载可视为无节点。如图2所示，岸滩卸载作业系统中各任务之间呈并联和串联的关系：离岸过程中，靠船和拆卸限位器、系缆和装备发动、降跳板和解缆可同时进行，相当于并联关系；升跳板、卸载装备、离船则组成串联关系。在近岸过程中，近岸驳运作业任务靠船、系缆、放大门、装备登艇、装备固定、收大门、解缆、离船组成了串联关系。因此岸滩卸载作业的可靠性模型可以采用各个任务的并联和串联组成的混合模型，如图3所示。

从构建的岸滩卸载作业可靠性模型可知，系

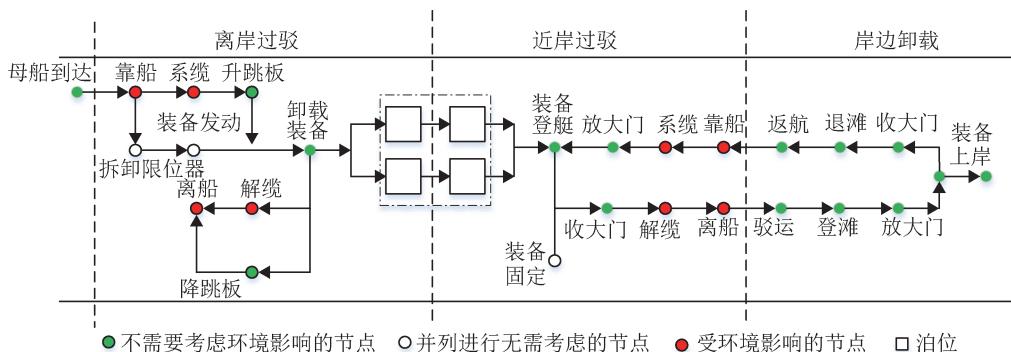


图2 岸滩卸载作业流程

Fig.2 Shore unloading operation process

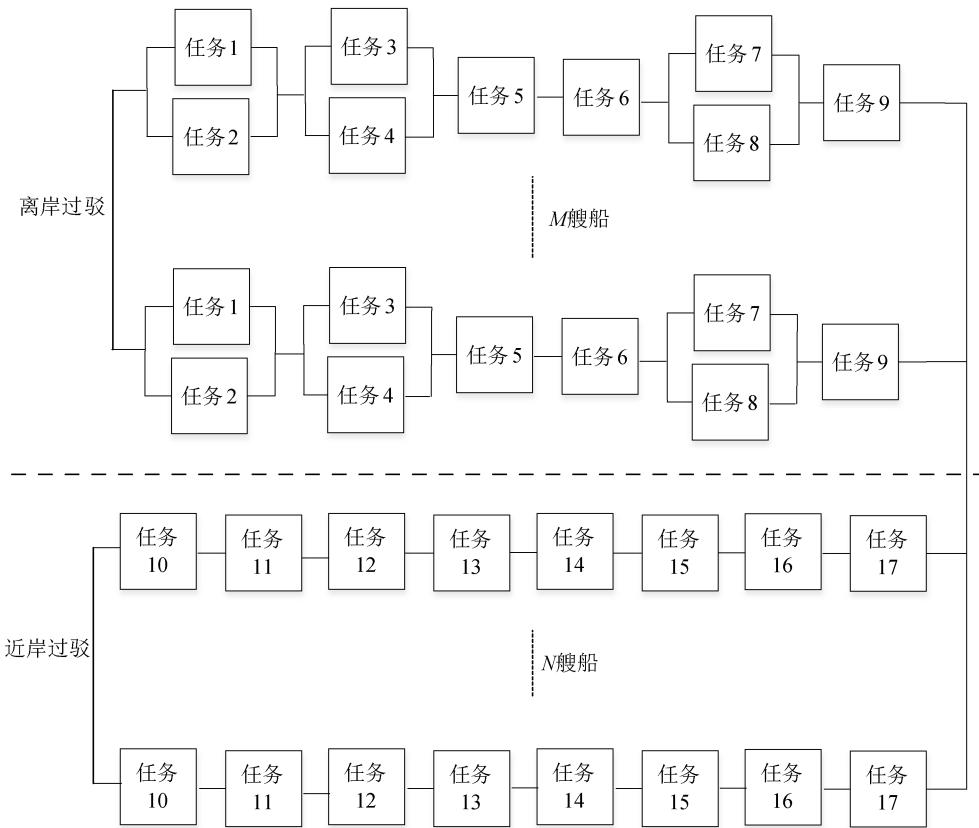


图3 岸滩卸载作业可靠性模型

Fig.3 Reliability model of shore unloading operation

统运行过程中主要涵盖离岸过驳作业任务(9项)和近岸驳运作业任务(8项)。只有当所有的过驳任务和近岸驳运任务都顺利完成,才表示岸滩卸载作业的最终完成。

2.2 可靠性数学模型

综合考虑岸滩卸载作业任务系统可靠性的影晌因素,对其进行更加合理的可靠性设计,实现系统自上而下的可靠性指标分配,不仅能够为岸滩卸载作业的流程设计、人员规划提供更合理的方案,也可在成本控制预期范围内实现高可靠性目标。因此,建立岸滩卸载作业系统的可靠性分配模型,综合多种因素影响,实现设计初期的可靠性分配,使分配结果更接近实际、更合理有效。

2.2.1 岸滩卸载作业任务过程数学表示

岸滩卸载作业中各任务可靠度用 X_k^j 表示,不可靠度用 \bar{X}_k^j 表示。 $\bar{X}_k^j = 1 - X_k^j$,其中 $k = [1, 17]$,表示卸载作业可靠性模型中的任务标号。根据图3所示的岸滩卸载作业可靠性模型中各个任务(任务

1到任务9)之间存在的逻辑关系,得到离岸过驳过程中第 j 艘船的任务可靠度 R_{bj} 计算模型为

$$R_{bj} = (1 - \bar{X}_1^j \bar{X}_2^j)(1 - \bar{X}_3^j \bar{X}_4^j)X_5^j X_6^j (1 - \bar{X}_7^j \bar{X}_8^j)X_9^j \quad (1)$$

式中: $1 < j \leq M$, M 为离岸过驳过程中的运输船数量。则离岸过驳过程的任务可靠度 R_1 计算模型为

$$R_1 = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - R_{bj}) \quad (2)$$

同理,根据图3的岸滩卸载作业可靠性模型中各个任务(任务10到任务17)之间存在的逻辑关系,可以得到近岸过驳过程中第 j 艘运输船任务可靠度 R_{oj} 计算模型为

$$R_{oj} = X_{10}^j X_{11}^j X_{12}^j X_{13}^j X_{14}^j X_{15}^j X_{16}^j X_{17}^j \quad (3)$$

式中: $1 < j \leq N$, N 为近岸过驳过程中的船数量。可以得到近岸过驳过程的可靠度 R_2 计算模型为

$$R_2 = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - R_{oj}) \quad (4)$$

根据基岸滩卸载作业中各个任务的混联可靠性模型,得到系统的可靠度 R 计算模型为

$$R = R_1 \cdot R_2 \quad (5)$$

2.2.2 岸滩卸载作业任务过程的约束条件

在实际的任务实施中，各个任务的可靠度指标应在规定的范围内变化。首先，分配方案应该使分配的预计任务可靠度值大于设定的目标值。当一个任务的可靠度值低于某个下限时，则意味着这一任务是不可能完成的；若一个任务的可靠度值高于某个上限，也是不符合实际情况的。为此，岸滩卸载作业任务可靠性分配需满足以下约束条件：①岸滩卸载作业系统可靠性指标应在某一个范围内变化。②分配方案预计得到的系统可靠度必须大于设定的可靠度指标。

设给定的系统任务可靠性指标为 R^* ，分配完成后系统的可靠度预计值 R 需要大于 R^* ；第 k 个任务的可靠度分配值为 X_k ；第 k 个任务在实际中可靠度的上限指标为 R_{Uk} ；第 k 个任务在实际中可靠度的下限指标为 R_{Dk} 。因此，岸滩卸载系统任务可靠性分配模型的约束条件可以表示为

$$\text{s.t. } R > R^* \quad (6)$$

$$R_{Uk} > X_k > R_{Dk}, \quad k = 1, 2, \dots, 17 \quad (7)$$

式(6)为目标函数约束，表示系统可靠性的预计值必须大于设定的可靠性指标；式(7)为系统中各个任务可靠性指标的约束，表示每个任务可靠度的取值只能在一定范围内。

2.2.3 岸滩卸载作业任务过程的目标函数

岸滩卸载作业任务可靠性分配要保证分配完成后系统的可靠度大于设定的可靠度指标，由于岸滩卸载系统可靠度与卸载作业任务之间存在复杂的非线性关系，难以采用常规数学方法直接求解，因此，只能对每个可行的分配方案进行运算，计算其相应的可靠性指标。为此，本文拟采用基于IWOA的岸滩卸载作业可靠性分配方法，在建模的基础上对每个可行的分配方案进行运算，计算其相应的可靠性指标，依次找到满足要求的最优任务可靠性分配结果 R_e 。在仿真时，算法需要找到系统可靠度的最大任务可靠性分配结果，岸滩卸载任务可靠性分配的目标函数 R_e 为

$$R_e = \text{MAX}(R) \quad (8)$$

3 基于IWOA的可靠性分配方法

可靠性分配是系统可靠性设计中的关键环节，

需在满足既定可靠性指标的前提下，综合考虑可靠性以及其他影响因素，这是一个多约束、非线性、多阶段的优化问题。群体启发式鲸鱼优化算法可以逐渐地接近最优解，适用于复杂系统可靠性分配求解。因此，鲸鱼优化算法为岸滩卸载作业可靠性分配提供了新思路^[18]。鲸鱼优化算法已受到广泛关注，并在多个领域得到了广泛应用^[19-20]。据此，本文提出了基于IWOA的岸滩卸载作业可靠性分配方法，对分配问题进行优化。

3.1 改进鲸鱼优化算法的基本原理

MIRJALILI S等人受座头鲸捕食行为启发提出了鲸鱼优化算法，该算法过程简单、易于编写、全局搜索能力较强^[21]。其数学模型包括模拟鲸鱼的环绕式捕食、发泡网攻击行为的开发阶段以及鲸鱼随机搜索(搜索捕食)行为的探索阶段。

3.1.1 环绕捕猎

当鲸鱼群识别了猎物位置后，会收缩包围圈从而对猎物进行包围，此时以最优坐标作为目标猎物，其余坐标持续向该目标猎物更新自己的坐标(收缩包围)，可以用下列公式表示为

$$X_{i+1} = X_i^* - A \cdot D \quad (9)$$

$$D = |B \cdot X_i^* - X_i| \quad (10)$$

$$A = 2a \cdot r - a \quad (11)$$

$$B = 2r \quad (12)$$

$$a = 2 \cdot \left(1 - \frac{i}{i_{\max}}\right) \quad (13)$$

式中： i 为当前鲸鱼群的代数； X_i 为鲸鱼个体 X 在第 i 代鲸鱼中的个体位置； X_i^* 为第 i 代中获得的最佳鲸鱼个体位置； A 为随机变量，当 A 在 $[-1, 1]$ 之间时，鲸鱼个体 X_{i+1} 的位置将会在 X_i 和 X_i^* 之间随机选择； D 为在第 i 代中 X_i 与 X_i^* 之间的距离； B 为随机参数； a 为收敛因子； r 为随机数，值在 $[0, 1]$ 之间； i_{\max} 为鲸鱼群的总代数。

3.1.2 发泡网攻击

在发泡攻击阶段，鲸鱼个体收缩并包围猎物，同时呈螺旋上升运动。这种行为可以用对数螺旋方程来模拟，其数学方程可以表示为

$$X_{i+1} = D^* \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_i^* \quad (14)$$

$$D^* = |X_i^* - X_i| \quad (15)$$

式中： D^* 为鲸鱼 X_i 与猎物(当前最优解) X_i^* 之间的

距离; b 为常数, 该常数控制着对数螺旋的形状; l 为 $[-1, 1]$ 中的随机数。

3.1.3 对鲸鱼优化算法开发阶段的改进

在鲸鱼优化算法中, 收敛因子 a 随着进化迭代次数的增加, 从 2 到 0 线性减少, 即收敛因子 a 在算法进化的初始阶段数值较大, 可以检测到更广泛的搜索区域, 满足算法的全局搜索要求。在算法的后期发展中, a 的值较小, 可以实现算法的局部搜索。在进化搜索过程中, 收敛因子 a 的线性递减策略不能充分体现鲸鱼优化算法实际的局部搜索能力, 为了增强算法的局部搜索能力, 提高算法的收敛速度, 引入权值参数对算法进行改进。权值 w 可以表示为

$$w = w_1 - (w_1 - w_2) \left(\frac{i}{i_{\max}} \right)^{\frac{1}{i}} \quad (16)$$

式中: w_1 为最大权值参数, w_2 为最小权值参数。

假设在开发阶段, 鲸鱼群体的包围猎物和发泡网攻击的更新概率均为 p , 则改进后的位置向量更新公式为

$$X_{i+1}^* = \begin{cases} X_i^* - wA \cdot D, & p < 0.5 \\ wD^* \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_i^*, & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

式中: p 为 $[0, 1]$ 中的一个随机数。

3.1.4 搜索猎物

在搜索猎物阶段(探索阶段), 将 A 的随机值设置为大于 “1” 或小于 “-1”, 使得其他鲸鱼个体远离当前最优的鲸鱼位置, IWOA 算法将会随机地选择一个鲸鱼位置 X_i^{rand} 而非迄今最好的鲸鱼个体位置作为最优的鲸鱼个体位置 X_i , 该算法能够实现全局范围内的搜索, 模拟鲸鱼群体在探索阶段的算法数学模型可以表示为

$$X_{i+1} = X_i^{\text{rand}} - A \cdot D \quad (18)$$

$$D = |B \cdot X_i^{\text{rand}} - X_i| \quad (19)$$

3.2 可靠性分配算法的步骤

基于 IWOA 算法的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法的主要步骤包括:

- 步骤 1: 确定决策变量及其取值范围。
- 步骤 2: 定义适应度函数。主要利用 IWOA 算法对岸滩卸载作业任务可靠性进行优化, 所以直接使用公式(8)作为适应度函数。
- 步骤 3: 初始化 IWOA 参数。选取离岸过驳作

业任务(9 个任务)和近岸驳运作业任务(8 个任务)共 17 个任务作为鲸鱼个体的 17 维坐标, 初始化鲸鱼个体的位置, 并设置算法的初始 i_{\max} 、 b 、当前迭代次数 i 、最大权值参数 w_1 、最小权值参数 w_2 以及算法终止条件。

步骤 4: 利用式(8)计算所有鲸鱼个体的适应度值, 最后得到此时迭代次数中最优的鲸鱼个体位置 X^* 。

步骤 5: 当 $i \leq i_{\max}$ 时, 更新 a 、 A 、 D 和 p 的值。

步骤 6: 当 $p < 0.5$ 时, 若 $|A| < 1$, 使用式(17)更新当前鲸鱼个体的空间位置。若 $|A| \geq 1$, 则 X_i^{rand} 从当前个体鲸鱼位置中随机选取, 并使用式(18)更新空间位置。

步骤 7: 当 $p \geq 0.5$ 时, 利用式(14)更新当前种群个体的空间位置。

步骤 8: 设置 $d = d + 1$ 。

步骤 9: 判断是否所有鲸鱼个体位置更新完毕, 若完毕, 则继续执行步骤 10; 若未完毕, 重复步骤 5 至步骤 9。

步骤 10: 利用式(8)来计算所有鲸鱼个体的适应度, 最后得到此时迭代次数中最优的鲸鱼个体位置 X^* , 如果满足终止条件, 请执行步骤 11。否则, 设置 $i = i + 1$, 并重复步骤 5 至步骤 10。

步骤 11: 得到并保存最优的鲸鱼个体位置 X^* 。

4 任务可靠性分配方法验证

本文对算法的收敛性进行验证, 选取权值参数, 并仿真验证基于 IWOA 算法的岸滩卸载作业任务可靠性分配结果。

4.1 仿真设置

本文采用 MATLAB 进行仿真: 设定系统可靠度 $R = 0.925$, 各个任务的初始可靠度 $R_0 = 0.6$, 各个任务的可靠度下限 $R_{Dk} = 0.5$, 各个任务的可靠度上限 $R_{Uk} = 0.95$, $M = N = 5$ 。为了得到更合理的仿真数据和结果, 本研究设计的验证实验独立重复 50 次, 每次实验中的迭代次数为 100 次, 最终取 50 次的平均值进行统计和分析。

4.2 仿真实验验证结果

4.2.1 算法收敛性验证

首先, 为了验证本研究提出的基于 IWOA 算法

的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法的收敛性，利用算法进行了50次的独立实验，各个独立实验的仿真结果都是收敛的。在50次独立实验中随机选择一次收敛结果进行详细分析，如图4所示。

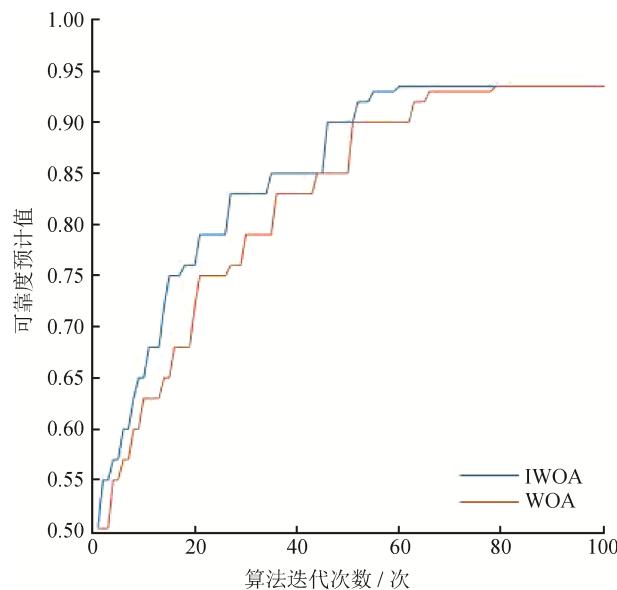


图4 IWOA 算法的收敛曲线

Fig.4 Convergence of the IWOA algorithm

通过该收敛曲线可分析出带有权重的算法比无权重的算法可靠度更早达到稳定，证明了权重提高了算法的收敛性。另外，从单个曲线可知系统可靠度随着IWOA算法迭代次数增加而逐渐提高，目标曲线(蓝色)在大约第60代时趋于平稳，可靠度预计值平稳为0.935，即找到实现约束条件下的最优解。

4.2.2 算法权值参数的选择

设置合理的权值参数可以提高局部搜索能力，这是实现高效搜索的关键。在设置权值参数时，若种群规模较大，鲸鱼个体分散广，所在的区域覆盖大，找到全局最优解的概率更高；若种群规模较小，鲸鱼个体不能有效地分散在整个搜索空间，此时应该找到合理的权值参数，提高IWOA算法的全局搜索能力。为了避免在选择合理的权值参数(w_1, w_2)时算法陷入局部最优，设置较大种群数量为200，权值的变化范围为 $(0, 1]$ ，权值的变化率定义为0.01，以权值变化率1到100的随机倍数选择50对(w_1, w_2)，讨论不同(w_1, w_2)对算法结果的影响。参数(w_1, w_2)与目标函数之间的关系如

图5所示(由于数据较多，本文选取10对进行绘图分析)。

由图5可知，随着迭代次数的增加，10组不同权值参数组合算法都搜索到了最优解，且最后得到的最优解是相同的，说明10组不同权值参数组合算法都没有陷入局部最优，这是设置了较大的种群数量的缘故。虽然10组不同权值参数组合算法都找到了最优解，但各组权值参数组合找到最优解的速度不同，最后一个找到最优解的权值参数组合是 $w_1 = 0.6, w_2 = 0.3$ ，大约在第88次迭代时找到。而当 $w_1 = 0.3, w_2 = 0.2$ 时，算法大约在第60次迭代时找到了最优解。因此，权值参数 $w_1 = 0.3, w_2 = 0.2$ 是随机选择的50组权值参数组合中的最优权值参数。

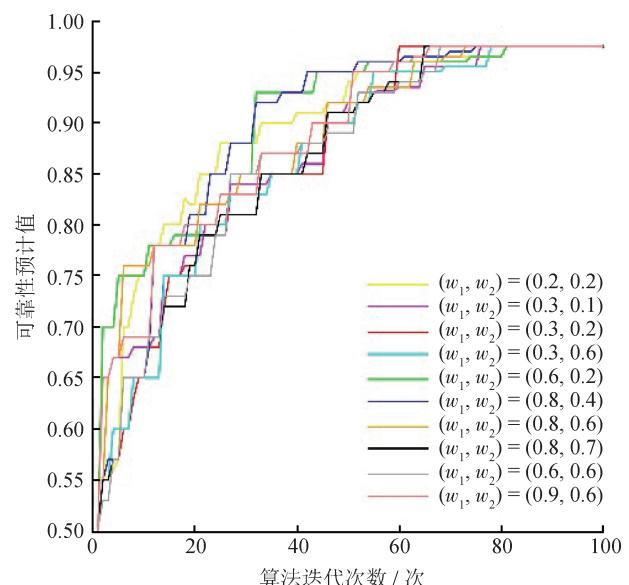


图5 参数(w_1, w_2)与目标函数之间的关系

Fig.5 Relationship between (w_1, w_2) and the objective function

4.2.3 可靠性分配结果

为了对本文提出的改进算法进行验证，利用改进后的算法进行了100次独立实验，采用其中的20组数据得到的分配结果如表1所示，第1组表示岸滩卸载作业过程中的离岸过驳作业任务(共9个任务， $x_1 \sim x_9$)和近岸驳运作业任务(共8个任务， $x_{10} \sim x_{17}$)以及各组系统可靠性的最终结果 R 。第1组至第20组给出了各组任务可靠性分配仿真结果。

由表1可知，岸滩卸载作业任务系统的可靠度 R 均大于0.925，这表明仿真结果的系统可靠性预

表 1 基于IWOA算法的岸滩卸载作业任务可靠性分配结果

Tab.1 Reliability assignment results of shore unloading operations based on IWOA

数据组	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	R
第1组	0.879 97	0.949 88	0.891 72	0.909 35	0.934 68	0.911 17	0.789 98	0.944 2	0.863 39	0.939 34	0.948 52	0.933 97	0.918 76	0.889 87	0.864 11	0.925 85	0.801 12	0.941 19
第2组	0.908 31	0.922 33	0.870 74	0.934 05	0.882 46	0.972 2	0.927 51	0.947 21	0.931 58	0.927 51	0.874 87	0.908 48	0.898 78	0.886 95	0.907 78	0.945 55	0.914 56	0.954 19
第3组	0.908 45	0.919 72	0.910 51	0.946 78	0.895 42	0.880 04	0.912 93	0.930 26	0.835 34	0.861 96	0.946 11	0.871 57	0.870 1	0.878 7	0.924 55	0.939 98	0.879 96	0.926 66
第4组	0.879 97	0.863 61	0.827 21	0.933 7	0.932 25	0.947 13	0.897 89	0.885 32	0.893 98	0.930 89	0.927 54	0.923 42	0.944 28	0.907 71	0.938 87	0.902 11	0.911 28	0.975 63
第5组	0.935 78	0.898 47	0.944 56	0.934 57	0.921 15	0.878 98	0.838 4	0.922 5	0.878 97	0.946 61	0.921 9	0.908 39	0.897 65	0.922 24	0.948 87	0.939 82	0.934 21	0.978 30
第6组	0.949 97	0.929 88	0.881 72	0.919 35	0.924 68	0.901 17	0.889 98	0.934 2	0.873 39	0.929 34	0.947 52	0.923 97	0.928 76	0.899 87	0.874 11	0.926 85	0.821 12	0.948 89
第7组	0.924 68	0.901 17	0.889 98	0.934 2	0.882 46	0.972 2	0.928 76	0.899 87	0.931 58	0.898 78	0.886 95	0.908 48	0.898 78	0.912 93	0.930 26	0.835 34	0.914 56	0.935 20
第8组	0.918 45	0.909 72	0.930 51	0.926 78	0.895 42	0.880 04	0.912 93	0.910 26	0.935 34	0.904 68	0.926 11	0.891 57	0.880 1	0.898 7	0.924 55	0.869 98	0.859 96	0.926 16
第9组	0.899 97	0.853 61	0.927 21	0.883 7	0.832 25	0.867 13	0.877 89	0.895 32	0.903 98	0.880 89	0.907 54	0.913 42	0.904 28	0.897 71	0.918 87	0.912 11	0.881 28	0.937 24
第10组	0.915 78	0.918 47	0.924 56	0.924 57	0.921 15	0.898 98	0.938 4	0.902 5	0.868 97	0.926 61	0.921 9	0.908 39	0.887 65	0.912 24	0.938 87	0.949 82	0.944 21	0.974 70
第11组	0.899 72	0.900 51	0.937 21	0.910 51	0.946 78	0.898 78	0.886 95	0.907 78	0.908 48	0.898 78	0.912 93	0.933 97	0.918 76	0.889 87	0.924 55	0.930 89	0.927 54	0.967 91
第12组	0.903 61	0.927 21	0.935 34	0.827 21	0.933 7	0.870 1	0.878 7	0.924 55	0.891 57	0.880 1	0.898 7	0.908 48	0.898 78	0.886 95	0.878 97	0.946 61	0.921 9	0.942 50
第13组	0.909 97	0.889 88	0.881 72	0.929 35	0.944 68	0.901 17	0.889 98	0.904 2	0.933 39	0.929 34	0.938 52	0.903 97	0.928 76	0.899 87	0.894 11	0.935 85	0.891 12	0.965 35
第14组	0.918 31	0.932 33	0.890 74	0.904 05	0.892 46	0.942 2	0.917 51	0.937 21	0.941 58	0.917 51	0.894 87	0.928 48	0.918 78	0.896 95	0.927 78	0.925 55	0.924 56	0.967 80
第15组	0.918 45	0.899 72	0.900 51	0.926 78	0.915 42	0.870 04	0.892 93	0.910 26	0.855 34	0.841 96	0.926 11	0.881 57	0.880 1	0.888 7	0.904 55	0.949 98	0.899 96	0.927 97
第16组	0.909 97	0.903 61	0.927 21	0.903 7	0.902 25	0.907 13	0.887 89	0.895 32	0.883 98	0.850 89	0.907 54	0.903 42	0.886 28	0.917 71	0.888 87	0.922 11	0.901 28	0.931 76
第17组	0.925 78	0.888 47	0.924 56	0.904 57	0.911 15	0.868 98	0.868 4	0.902 5	0.898 97	0.926 61	0.911 9	0.918 39	0.887 65	0.912 24	0.938 87	0.909 82	0.904 21	0.961 21
第18组	0.917 51	0.937 21	0.910 51	0.946 78	0.895 42	0.880 04	0.898 78	0.886 95	0.907 78	0.861 96	0.946 11	0.871 57	0.870 1	0.878 7	0.924 55	0.939 98	0.879 96	0.929 56
第19组	0.910 26	0.935 34	0.827 21	0.933 7	0.924 55	0.930 89	0.927 54	0.878 7	0.924 55	0.930 89	0.923 42	0.944 28	0.908 48	0.898 78	0.912 93	0.911 28	0.971 60	
第20组	0.895 32	0.903 98	0.944 56	0.934 57	0.878 97	0.946 61	0.921 9	0.922 5	0.878 97	0.946 61	0.921 9	0.908 39	0.897 65	0.891 57	0.880 1	0.898 7	0.934 21	0.955 96

计值大于设定的可靠性指标，满足目标函数约束的要求。岸滩卸载作业过程中各个任务的可靠度均在可靠度下限 $R_{Dk} = 0.5$ 和可靠度上限 $R_{Uk} = 0.95$ 之间，表示仿真结果中每个任务的可靠度取值均在一定范围内，满足系统中各任务可靠性指标约束要求。第4组海上过驳作业任务($x_1 \sim x_9$: 0.879 97、0.863 61、0.827 21、0.933 7、0.932 25、0.947 13、0.897 89、0.885 32、0.893 98)以及近岸驳运作业任务($x_{10} \sim x_{17}$: 0.930 89、0.927 54、0.923 42、0.944 28、0.907 71、0.938 87、0.902 11、0.911 28)的岸滩卸载作业系统的可靠度为 $R = 0.975$ ，这是20组数据中可靠度最大的，是所建模型下的最优任务可靠性分配结果。分析表1可知：想要得到较高的系统可靠度，处于串联的任务可靠度需要较高的分配结果，而并联的任务可靠度并不一定要较高的可靠度分配结果，这一规律符合数学逻辑，实验结果也进一步验证了所建模型的正确性和合理性。

5 总结

本研究构建了岸滩卸载作业任务可靠性模型，提出了基于IWOA的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法，采用仿真对本文所提方法的分配结果进行评估，完成了岸滩卸载作业任务可靠性分配方法的验证。仿真结果表明：本文提出的基于IWOA的岸滩卸载作业任务可靠性分配方法能够实现任务可靠性的合理分配，提升了岸滩卸载作业任务可靠性分配结果的质量。为改善岸滩卸载作业系统任务可靠性分配方法的研究提供了理论支撑。

参考文献

- [1] 沈音. 新时代水路运输经济的高质量发展路径探析[J]. 市场周刊, 2025(8): 1-4.
SHEN Y. Analysis of high-quality development path for waterway transportation economy in the new era [J]. Market Weekly, 2025(8): 1-4. (in Chinese)
- [2] 夏波涌, 童悍操. 自动化码头集装箱运输设备调度仿真[J]. 制造业自动化, 2019, 31(2): 32-35.
XIA B Y, TONG H C. Simulation of automatic wharf container transportation equipment scheduling [J]. Manufacturing Automation, 2019, 31(2): 32-35. (in Chinese)
- [3] 周鹏飞, 刘科. 集装箱码头新型岸桥装卸系统仿真分析[J]. 港工技术, 2017, 54(5): 16-19.
ZHOU P F, LIU K. Simulation analysis of new type of quay crane loading and unloading system at container terminals [J]. Port Engineering Technology, 2017, 54(5): 16-19. (in Chinese)
- [4] 卓红艳. 可靠性指标分配方法研究[C]//第五届中国测试学术会议论文集, 2008: 177-179.
ZHUO H Y. Research on reliability index allocation methods [C]// Proceedings of the 5th China Testing Academic Conference, 2008: 177-179. (in Chinese)
- [5] KAPUR K C, LAMBERTSON L R. Reliability in engineering design[M]. New York: Wiley, 1977: 45-51.
- [6] GUO Q, LI Z K, CUI H L. Reliability allocation for products based on MEOWA method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 18-21.
- [7] KIM K O, YANG Y, ZUO M J. A new reliability allocation weight for reducing the occurrence of severe failure effects [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 117: 81-88.
- [8] LI Z B, DING L, HOU X M, et al. Agree method in software reliability allocation based on structure importance [J]. Computer Applications and Software, 2014 (12): 45-47.
- [9] YU H, ZHANG G, RAN Y, et al. A reliability allocation method for mechanical product based on meta-action [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2019, 69(1): 1-6.
- [10] 张新贵. 航天测控通信系统任务可靠性分配模型与算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
ZHANG X G. Research on the task reliability allocation model and algorithm of aerospace measurement and control communication system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 吴昕阳. 基于重要度的多阶段任务系统可靠性分配模型及算法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2024.
WU X Y. Reliability allocation model and algorithm for multi-stage task system based on importance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2024. (in Chinese)
- [12] CHEN W, ZHAO G Y, LI X, et al. Mission reliability allocation based on interval-hesitant fuzzy linguistic term sets [C]// 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM).

- IEEE, 2020: 622–626.
- [13] 薛飞, 杨明, 李云龙. 基于重要度复杂度的任务可靠性分配方法研究[C]//中国航空工业技术装备工程协会. 2022年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 2022: 4. XUE F, YANG M, LI Y L. Research on task reliability allocation method based on importance - complexity [C]// China Aerospace Industry Technology Equipment Engineering Association. Proceedings of the 2022 Annual Conference of the China Aerospace Industry Technology Equipment Engineering Association. Aviation Industry Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., 2022: 4. (in Chinese)
- [14] 钟源. 考虑多元因素影响的数控机床精细化可靠性分配方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. ZHONG Y. Research on the precision reliability allocation methods of CNC machine tools considering multiple influencing factors [D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
- [15] 郝恒, 曹海斌, 张康. 深海载人平台总体任务可靠性分配方法[J]. 船海工程, 2023, 52(5): 90–94. HAO H, CAO H B, ZHANG K. A method for overall task reliability allocation of manned deep sea platforms [J]. Marine Engineering, 2023, 52(5): 90–94. (in Chinese)
- [16] ZHONG Y, LI G, HE J, et al. Reliability allocation method combined with real working conditions under rough probabilistic linguistic environment[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 224: 119964.
- [17] 武园园, 孙文磊. 多因素下风力发电机组系统可靠性分配方法的研究[J]. 机械设计与制造, 2024(6): 210–213. WU Y Y, SUN W L. Research on the reliability distribution method of wind turbine systems under multiple factors [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2024(6): 210–213. (in Chinese)
- [18] MUKHERJEE S, PAN I, SAMANTA T. A particle swarm optimization method for fault localization and residue removal in digital microfluidic biochips [J]. Applied Soft Computing, 2019, 85(1): 1–6.
- [19] ABEDINI M, MOSTAFAI M. Adaptive energy consumption scheduling of multi-Microgrid using whale optimization algorithm [J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2021, 12 (5) : 2150036.
- [20] PREMKUMAR M, KUMAR C, ANBARASAN A, et al. A new maximum power point tracking technique based on whale optimization algorithm for solar photovoltaic systems [J]. International Journal of Ambient Energy, 2021, 6: 1–19.
- [21] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51–67.

(本文编辑: 李成成)



第一作者: 石金龙(1987—), 男, 讲师, 主要研究方向为MEMS、传感器、微流控芯片、人工智能算法。



作者简介: 冯玲玲(1987—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为通用质量特性设计分析与验证评估。



作者简介: 张磊(1980—), 男, 研究员, 主要研究方向为舰船通用质量特性。



通信作者: 陈寅生(1986—), 男, 副教授, 主要研究方向为机器嗅觉技术及应用、智能传感器系统状态监测技术、生物信号感知与识别、智能信息处理与模式识别、图像信息处理与识别。