

基于改进离散黑翅鸢算法的变电站摄像头巡检任务调度方法研究

李海丰¹ 陈庆^{1,2} 黄悦华^{1,3} 陈曦^{1,3} 文斌^{1,2} 吴喜春⁴

1 三峡大学电气与新能源学院 湖北 宜昌 443002

2 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学) 湖北 宜昌 443002

3 湖北省微电网工程技术研究中心(三峡大学) 湖北 宜昌 443002

4 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司 湖北 宜昌 443000

(1448307327@qq.com)

摘要 针对变电站摄像头巡检中任务分配不均、灵活性不足,导致摄像头工作效率较低的问题,提出一种基于改进离散黑翅鸢算法的摄像头巡检任务调度方法。首先,考虑摄像头、变电设备和巡检任务之间的复杂映射关系,构建以巡检完工时间、偏转角度和负载均衡为目标的摄像头巡检任务优化调度模型;然后,基于实际巡检特定信息设计启发式联合规则对优化求解的初始种群进行生成,有效解决随机初始化不确定性的问题;进一步地,引入离散差分变异操作和螺旋搜索迁徙机制对黑翅鸢算法进行多策略搜索混合改进,增加算法适应性和搜索能力。场景测试结果表明,提出的方法有效提升了变电站摄像头巡检的效率,可使摄像头在大规模、长周期巡检任务中具有更好的稳定性。

关键词: 摄像头巡检;巡检任务调度;改进离散黑翅鸢算法;启发式联合规则;多策略搜索

中图分类号 TM769

Research on Substation Camera Inspection Task Scheduling Method Based on Improved Discrete Black-winged Kite Algorithm

LI Haifeng¹, CHEN Qing^{1,2}, HUANG Yuehua^{1,3}, CHEN Xi^{1,3}, WEN Bin^{1,2} and WU Xichun⁴

1 College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

2 Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

3 Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Microgrid, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

4 State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Yichang Power Supply Company, Yichang, Hubei 443000, China

Abstract Aiming at the problem of uneven task allocation and lack of flexibility in substation camera inspection, which leads to low efficiency of camera work, a camera inspection task scheduling method based on improved discrete black-winged kite algorithm is proposed. Firstly, considering the complex mapping relationship between cameras, substation equipment and inspection tasks, an optimal scheduling model for camera inspection tasks is constructed with inspection completion time, deflection angle and load balancing as the objectives. Then, heuristic joint rules based on the actual inspection-specific information are designed to generate the initial population of the optimization solution, which effectively solves the problem of random initialization uncertainty. Furthermore, the introduction of the discrete difference mutation operation and spiral search migration mechanism are introduced to improve the black-winged kite algorithm with hybrid multi-strategy search to increase the algorithm adaptability and search capability. Scenario test results show that the proposed method effectively improves the efficiency of substation camera inspection, and the method can make the camera have better stability in large-scale and long-cycle inspection tasks.

Keywords Camera inspection, Inspection task scheduling, Improved discrete black-winged kite algorithm, Heuristic joint rule, Multi-strategy search

1 引言

随着变电站自动化、智能化水平的快速发展,大规模种类多样且部署密集的设备投入站内运行,对日常巡检工作的精细化、高效化程度提出了更高的要求,传统人工巡检方式的效率低、风险高、覆盖面窄等问题越来越明显^[1-3]。通过智能

摄像头对设备进行全方位的巡视与检查,逐渐成为保证变电站设备稳定安全运行的主要手段^[4-6]。然而,站内有限的摄像头布点位置与大量的待巡检设备形成较大的供需矛盾,且刚性调度方案下部分摄像头易出现运行负荷过大和待机时间过长的现象。变电站摄像头巡检任务调度灵活性不足往往导致巡检资源浪费等问题,因此,对巡检摄像头进行快速、精准的

基金项目:国家自然科学基金(62233006);湖北省自然科学基金(2024AFD409);三峡大学科学基金项目(2024RCKJ022)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62233006), Hubei Provincial Natural Science Foundation of China(2024AFD409) and Science Foundation of China Three Gorges University(2024RCKJ022).

通信作者:陈庆(chenqing@ctgu.edu.cn)

调度,是提高变电站巡检效率的重要手段。

目前,国内变电站利用摄像头进行可视化巡检的方式多通过人工安排摄像头巡检任务,缺少对其调度效率优化的研究^[7]。变电站智能巡检系统中摄像头调度涉及设备、任务与资源间的多要素耦合关系,其数学本质与柔性作业车间调度问题(Flexible Job-shop Scheduling Problem, FJSP)^[8]是同构的,故本文基于离散制造系统理论进行模型构建。现有研究对作业车间调度优化模型开展了大量研究^[9-10]。文献[11]以碳排放成本约束和最大完工时间为目标建立了低碳 FJSP 模型,兼顾了效率与环保需求。文献[12]提出一种表达式树结构的顺序优先关系,建立了以最大完工时间为优化目标的生产调度模型,有效解决了工序顺序排序问题。文献[13]以最小化最大产品完工时间为目标,对批量流混合装配流水车间问题进行建模,提高了多模具约束下的生产计划优化效果。上述研究中构建的考虑完工时间单目标优化调度模型能较好地解决实际作业车间生产效率的需求,但在变电站巡检作业中摄像头(车间调度中的机器)转动角度与频次(高频、大幅度的调用易磨损与故障)也是影响调度方案可行的关键因素,建模时对该类关键指标的忽略,可能导致巡检调度运行长时间尺度下的摄像头巡检任务难以正常实施。

在柔性作业车间调度问题中,智能优化算法常被用来快速寻找近似最优解。文献[14]采用鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)对 FJSP 问题进行求解,在 15 台机器和最大 300 任务规模中取得了较好的求解效果。文献[15]将黑猩猩优化算法(Chimp Optimization Algorithm, ChOA)应用于作业车间调度问题进行结果优化,利用 10 台机器加工 15 个工件的标准案例进行实验,结果表明该方法具有高效性。在小规模实例中智能优化算法取得了良好的优化效果^[16-17],但变电站复杂巡检工作中摄像头通常要面对不同规模的任务场景(例行巡视、全面巡视、特殊巡视等)^[18]。该类摄像头巡检优化调度是一个非确定性多项式难题(Non-deterministic Polynomial Hard, NPH)求解问题^[19],计算复杂度会随着问题参数规模改变而急剧变化。而黑翅鸢优化算法(Black-winged Kite Algorithm, BKA)^[20]在求解规模差异较大的优化问题时,均能给出最佳方案且展现出较强的鲁棒性^[21]。在求解中现有优化算法仍依赖问题先验知识,普遍采用的随机初始化策略^[22-23]易造成先验知识缺失,导致盲目搜索,从而限制了 BKA 在变化条件下的计算性能。同时,变电站巡检规模的扩大引起解空间维度增加,导致搜索效率和可行解比例下降。因此,维持种群多样性、平衡和指导解空间搜索是提升算法性能的关键。

针对上述问题,本文提出一种基于改进离散黑翅鸢算法的变电站摄像头巡检任务调度方法。首先,将摄像头转动和任务工序纳入约束条件中,以巡检完工时间、偏转角度和负载均衡为目标建立了多目标优化模型。然后,为了满足摄像头调度问题的稳定求解需要,采用实际巡检特定信息设计了启发式联合初始化规则;在此基础上,通过离散差分变异和螺旋搜索迁徙机制进行多策略搜索混合改进,以满足变电站巡检不同规模调度问题对算法高适用性和强搜索能力的需要。最后,通过算例仿真验证了本文方法的有效性和优越性。

2 变电站摄像头巡检任务调度问题

2.1 问题描述

在变电设备巡检过程中,通过人工手动或优化方法进行

摄像头工作规划,给出变电站巡检任务调度方案,驱动巡检过程对摄像头进行调配。如图 1 所示,不同位置的摄像头 M 根据映射关系选择可被巡检的变电设备 J ,变电设备上的若干巡检任务依次排序并依据启发式规则分配给摄像头,通过反复迭代任务规划过程,直至生成最优的巡检任务最优调度方案。人工手动规划难以快速精准协同多摄像头、多设备、多任务之间的最优匹配,仅能为单个摄像头进行任务分配。而采用启发式优化算法进行任务规划时,优化调度问题可分为变电设备选择、摄像头选择和巡检任务排序 3 个部分,分别包含不同决策变量之间的映射关系。问题描述如下:

1) 变电设备选择。设有一组待巡检变电设备 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$,摄像头根据所在位置来匹配可巡检设备,变电设备与摄像头的相对位置影响到巡检时摄像头需要偏转的角度,频繁的大角度转动易引发摄像头机械损耗,因此摄像头在选择匹配待巡检变电设备时需考虑合适的映射范围。

2) 摄像头选择。站内不同位置布设的巡检摄像头 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 根据不同任务需求,会有不同的偏转角度和对焦时间。占据优势位置的摄像头有承担多个巡检任务的能力,但高频次、长周期的巡检转动常常导致摄像头出现故障或使用寿命缩短,因此摄像头的选择需考虑多摄像头并行协同、任务负载均衡。

3) 巡检任务排序。每个变电设备包含一道或多道巡检任务,可由映射关系中的不同摄像头进行巡检。但是,当多个巡检任务需要同时访问同一摄像头时会出现资源竞争问题,当多个巡检任务需要同时访问不同摄像头时又会出现调用排队等待问题,因此需对任务的巡检顺序和巡检开始时间进行合理安排。

由于变电站可视化巡检系统的硬件限制,其无法同时调度站内所有摄像头,在实际工作中常以柔性(摄像头并行调用)和刚性(摄像头依次调用)调度结合的方式调用摄像头巡检。本文的巡检任务调度中仅对摄像头柔性调度进行研究,故假设:1)同一摄像头同一时刻只能巡检一台变电设备;2)同一道巡检任务在同一时刻只能被一个摄像头巡检;3)每台变电设备的每道巡检任务一旦开始巡检不能中断;4)不同变电设备之间具有相同的优先级;5)不同变电设备的巡检任务之间没有先后约束,同一变电设备的巡检任务之间有先后约束;6)所有变电设备在零时刻都可以被巡检。

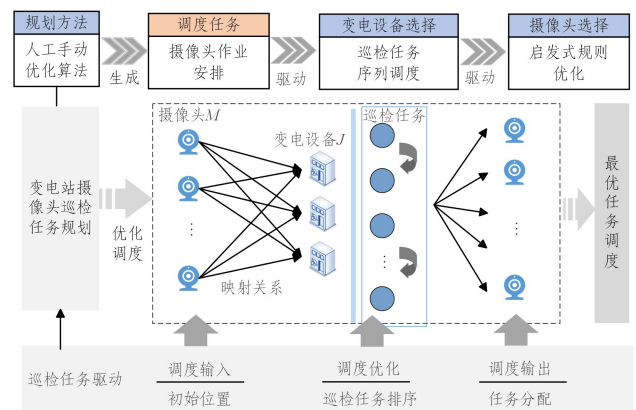


图 1 变电站摄像头巡检示意图

Fig. 1 Schematic diagram of substation camera inspection

2.2 符号说明

模型中使用的符号变量及其定义如表 1 所列。

表1 符号变量定义

Table 1 Symbolic variable definitions

符号	定义
m	摄像头总数
n	变电设备总数
i, k	摄像头索引, $i, k \in \{1, 2, \dots, m\}$
j, l	变电设备索引, $j, l \in \{1, 2, \dots, n\}$
h	巡检任务索引, $h \in \{1, 2, \dots, h_j\}$
h_j	变电设备 j 的巡检任务总数
J	变电设备集
M	摄像头集
C_j	变电设备 j 的巡检完成时间
C_{\max}	最大完工时间
$\theta_{i,j,h}$	摄像头 i 偏转角度
C_{\max}^M	摄像头最大负载
C_{\min}^M	摄像头最小负载
$s_{j,h}$	变电设备 j 的第 h 道巡检任务开始时间
$x_{i,j,h}$	0-1 变量, 如果变电设备 j 的第 h 道巡检任务选择摄像头 i , 则取值为 1, 否则取值为 0
$t_{i,j,h}$	摄像头 i 巡检变电设备 j 的第 h 道巡检任务的巡检时长
$c_{j,h}$	变电设备 j 的第 h 道巡检任务完成时间
L	足够大的正数
$m_{j,h}$	变电设备 j 的第 h 道巡检任务可选择的巡检摄像头数
$y_{i,j,h,k,l}$	0-1 变量, 如果变电设备 j 的第 h 道巡检任务选择摄像头 i 巡检先于变电设备 l 的第 h 道巡检任务选择摄像头 i 巡检, 则取值为 1, 否则取值为 0

2.3 问题模型

1) 目标函数

变电站摄像头巡检任务调度的目的是合理安排摄像头对变电设备进行各项巡检任务的工作顺序和调配方案,使巡检工作的最大完工时间最短和巡检摄像头总负荷(偏转角度)最小。

(1) 最小化最大完工时间目标 f_1

将每个变电设备完成其巡检任务的时间视为完工时间,在完成最后一个巡检任务时,该时刻为最大完工时间,计算公式为:

$$f_1 = \min C_{\max} = \min\{\max_{1 \leq j \leq n}(C_j)\} \quad (1)$$

(2) 最小化巡检摄像头偏转负荷目标 f_2

各巡检任务完成时,参与巡检摄像头的偏转角度总和作为总偏转负荷,计算公式为:

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^{h_j} \theta_{i,j,h} \quad (2)$$

(3) 最小化巡检摄像头负载均衡目标 f_3

为了避免单个摄像头承担过多巡检任务,以摄像头巡检时长作为摄像头负载,摄像头最大与最小负载之差作为均衡性衡量指标,计算公式为:

$$f_3 = \min\{C_{\max}^M - C_{\min}^M\} \quad (3)$$

采用加权求和法得到巡检任务的目标函数:

$$F = \min(\eta_1 f_1 + \eta_2 f_2 + \eta_3 f_3) \quad (4)$$

其中, η_1, η_2 和 η_3 为权重系数。 η_1, η_2 和 η_3 满足如下关系:

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1 \quad (5)$$

2) 约束条件

(1) 每个变电设备的巡检任务先后顺序约束。

$$s_{j,h} + x_{i,j,h} \times t_{i,j,h} \leq c_{j,h} \quad (6)$$

$$c_{j,h} \leq s_{j,h+1} \quad (7)$$

(2) 每个变电设备的完工时间不能超过总完工时间的约束。

$$C_j \leq C_{\max} \quad (8)$$

(3) 同一时刻同一台摄像头只能巡检一道巡检任务约束。

$$s_{j,h} + t_{i,j,h} \leq s_{l,h} + L(1 - y_{i,j,h,k,l}) \quad (9)$$

$$c_{j,h} \leq s_{j,h+1} + L(1 - y_{i,k,l,j,h+1}) \quad (10)$$

(4) 同一时刻同一道巡检任务只能被一台摄像头巡检约束。

$$\sum_{i=1}^{m_{j,h}} x_{i,j,h} = 1 \quad (11)$$

(5) 每一台摄像头上可以存在循环操作约束。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^{h_j} y_{i,j,h,k,l} = x_{k,l,h} \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^{h_k} y_{i,j,h,k,l} = x_{i,j,h} \quad (13)$$

(6) 摄像头的最小偏转角度约束,摄像头优先选择距目标点位小于 180° 的偏转方向。

$$\theta_{i,j,h} \leq 180^\circ \quad (14)$$

(7) 参数变量非负约束。

$$s_{j,h} \geq 0, c_{j,h} \geq 0 \quad (15)$$

3 改进离散黑翅鸢算法

在变电站摄像头巡检任务调度问题中,多摄像头、多变电设备、多巡检任务之间的时间、角度、负载等映射关系复杂,使得问题拥有庞大的求解空间。求解过程中,优化算法往往会因解空间高维距离搜索失效,导致算法性能下降。且随着巡检任务规模的扩大,问题求解复杂度会急剧增加,传统的优化算法难以在有限的求解时间内平衡全局搜索和局部搜索,易引发大规模问题求解的随机性现象。针对上述问题,提出一种改进离散黑翅鸢算法(Improved Discretized Black-winged Kite Algorithm, IDBKA)对摄像头巡检任务调度问题进行求解,算法框架如图2所示。

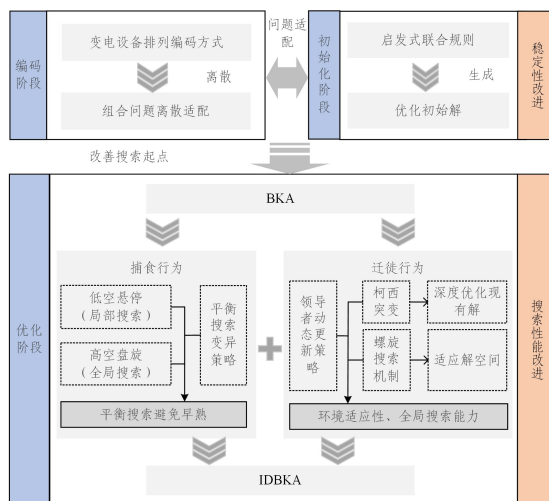


图2 改进算法框架图

Fig.2 Framework diagram of the improved algorithm

在编码阶段采用变电设备排列的编码方式进行离散适配;在初始化阶段根据调度中不同时期变电设备巡检任务对最大完成时间的影响不同,提出一种启发式联合规则代替随机初始化,提高求解不同规模问题时的稳定性;在多策略搜索阶段,算法的捕食搜索中引入差分变异平衡搜索策略,以平衡全局和局部搜索并扩大搜索范围,应对变电站规模提升的解空间维度增加;算法的迁徙计算中通过螺旋搜索机制维持种群的多样性^[24],提升局部求解精度,增加算法适应性和搜索能力。

3.1 解的编码与解码

本文采用排列编码方式确定变电设备巡检排列顺序,从而降低解的搜索空间,每个解代表变电设备的调度序列 $\pi = \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(n)\}$;再利用插入式解码方式,按变电设备编码顺序依次解码。在不影响已安排巡检任务的情况下,将新巡检任务尽可能插入到摄像头最早可投入巡检的时间中,最后将编码序列转化为合理的调度方案,再计算各摄像头对各变电设备上巡检任务的巡检时间和偏转角度。

3.2 WPF-NEH 启发式规则初始化

本文将剖面拟合规则(Profile Fitting, PF)引入到传统 NEH 算法(Nawaz-Enscore-Ham, NEH)^[25]中,形成 PF-NEH 联合规则来生成优势个体,其余个体随机生成,以达到改善初始种群质量、增加初始种群多样性的目的。而在摄像头实际调度过程中,不同摄像头在不同时间段内执行同一巡检任务时,会产生不同的完成时间。因此,将 PF 规则优化为带有摄像头权重的 PF-NEH 启发式规则(WPF-NEH)。在 NEH 算法框架下,通过选择性插入,仅针对 WPF 规则产生的初始调度方案中的关键序列进行局部位置调整,充分保留原始序列中的有效调度特征信息。

1) WPF 规则生成初始变电设备序列,产生调度序列信息,构造步骤如下:

(1) 确定第 1 台待巡检变电设备。选择总巡检时长最短的变电设备作为第 1 个进行巡检,记作 $\pi(1)$,在 $\pi(1)$ 上所有巡检任务都被依次完成时的耗时即为最大完工时间。

(2) 选择第 2 台待巡检变电设备。依次测试余下的每一台变电设备,把变电设备 J_2 安插在 $\pi(1)$ 之后,计算 J_2 所需的巡检耗时,即总耗时 T_{J_2} 。采用摄像头权重 ω_i 依据变电设备巡检状态动态更新,以 J_2 为例计算总耗时,如式(16)一式(18)所示。将总耗时最短的测试变电设备作为第 2 个巡检变电设备,记作 $\pi(2)$ 。

$$\begin{cases} T_{J_2,1} = \max\{T_{\pi(1),2}, T_{\pi(1),1} + t_{J_2,1}\} \\ \vdots \\ T_{J_2,i} = \max\{T_{\pi(1),i+1}, T_{J_2,i-1} + t_{J_2,i}\}, i=2,3,\dots,m-1 \\ \vdots \\ T_{J_2,m} = \max\{T_{J_2,m-1}, T_{\pi(1),m} + t_{J_2,m}\} \end{cases} \quad (16)$$

$$\arg \min H_{J_u} = \sum_{i=1}^m \omega_i (T_{J_u,i} - T_{J_u,i-1} - t_{J_u,i}), u=2,3,\dots,n \quad (17)$$

$$\omega_i = \frac{m}{i + u(m-i)/(n-2)} \quad (18)$$

其中, T_{J_u} 是测试变电设备 J_2 在第 1 个摄像头巡检完成的时间, $T_{\pi(1),1}$ 是第 1 个巡检变电设备在第 1 个摄像头巡检完成

的时间, $t_{J_2,1}$ 是测试变电设备 J_2 在第 1 个摄像头巡检的时间, H_{J_u} 是测试变电设备 J_u 巡检总耗时, ω_i 是第 i 个摄像头权重, $T_{J_u,i}$ 是测试变电设备 J_u 在第 i 个摄像头巡检完成的时间, $t_{J_u,i}$ 是测试变电设备 J_u 在第 i 个摄像头巡检的时间。

(3) 根据步骤(2)得到第 2 个巡检变电设备更新计算思路,第 2 个变电设备上所有巡检任务都被完成的时间作为种群修正的依据。然后重复步骤(2),直至产生一个满足要求的完整调度序列。

2) WPF-NEH 对初始序列后的 α 个变电设备进行 NEH 插值操作,从未安排的变电设备集合中选择一个变电设备 J_α ,计算其在不同位置上的权重;将 J_α 插入到初始序列的可能位置,并计算相应位置上的总权重;选择使得总权重最小的插入位置,将 J_α 插入该位置;重复上述步骤生成一个优势部分序列,前 $n-\alpha$ 部分序列变电设备不做更改,通过联合构造得到一个可用的初始序列。

3) 采用随机优化方式生成剩余的初始个体,确保初始种群的多样性。如果存在相同个体,则新生成个体将被放弃;反之,将新个体添加到初始调度序列集中,避免重复的个体在集中出现。

3.3 离散变异捕食行为

BKA 的捕食行为是模拟黑翅鸢在飞行过程中根据猎物位置以及自身位置选择不同的策略进行捕食,不同的捕食行为分别用于全局探索和局部搜索。其行为如式(19)一式(20)所示:

$$Y_{a+1} = \begin{cases} Y_a + v(1 + \sin c) \times Y_a, & q < c \\ Y_a + v(2c - 1) \times Y_a, & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

$$v = 0.05 \times e^{-2 \times \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (20)$$

其中, Y_a 和 Y_{a+1} 分别为黑翅鸢在第 a 次和第 $a+1$ 次迭代中的位置, c 为服从在 $[0, 1]$ 中的随机数, q 为常数(取值为 0.9), b 为迭代次数, v 为随迭代次数增加而非线性减小的变量。

为避免 BKA 在求解大规模巡检任务调度问题时搜索不平衡和早熟收敛的缺点,采用离散型的 DDE/rand-to-best/pbest 变异策略^[26],有效利用种群内部个体间信息驱使种群进化,扩大捕食行为中的搜索范围。每次迭代后,对种群中的个体进行评估,并将其分为不同的等级或质量水平。根据每个个体的质量水平,灵活地选择 3 种不同的变异策略:1) 对排名中间 1/3 的目标个体,执行式(21)的变异操作;2) 对排名前 1/3 的优势目标个体执行式(22)的变异操作;3) 对余下的劣势个体执行式(23)的变异操作。动态地调整进化方向和控制参数,提升搜索过程中的多样性和收敛性。

$$Y_p^*(a) = Y_o(a) \oplus \lambda_1 \otimes [Y_{\text{best}}(a) - Y_p(a)] \oplus \lambda_2 \otimes [Y_{p_{\text{best},p}}(a) - Y_p(a)] \quad (21)$$

$$Y_p^*(a) = Y_o(a) \oplus \lambda_2 \otimes [Y_{p_{\text{best},p}}(a) - Y_p(a)] \quad (22)$$

$$Y_p^*(a) = Y_o(a) \oplus \lambda_1 \otimes [Y_{\text{best}}(a) - Y_p(a)] \quad (23)$$

其中, $Y_p^*(a)$ 为变异后的个体, $Y_o(a)$ 为第 a 代种群的一个随机个体; $Y_{\text{best}}(a)$ 为第 a 代种群中适应度最好的个体; $Y_{p_{\text{best},p}}(a)$ 为某一选定个体 $Y_p(a)$ 所经历的最优解; λ_1 为控制个体之间交互与学习过程的变异系数; λ_2 为控制个体自身解生成过程的变异系数; \oplus 为求余运算。 \otimes 的运算逻辑为:变异率小于某一 $[0, 1]$ 中的随机数时,对该运算符后的个体取 0,反之则将运算符后的序列作减法。

3.4 螺旋搜索迁徙机制

BKA 中迁徙行为用于指导当前方案向更优的调度方案迁移^[27],具有动态自适应选择的优点。迁徙的动机是若当前种群适应度值低于随机种群的适应度值时,领导者(当前最优调度方案)将放弃领导地位,加入迁徙种群;若当前种群适应度值大于随机种群,领导者则会引导种群到达目的地。其数学表达式如式(24)、式(25)所示:

$$Y_{a+1} = \begin{cases} Y_a + C(0,1) \times (Y_a - L_a), & F_a < F_r^a \\ Y_a + C(0,1) \times (Y_a - \gamma \times L_a), & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

$$\gamma = 2 \times \sin\left(r + \frac{\pi}{2}\right) \quad (25)$$

其中, $C(0,1)$ 为柯西突变, L_a 为第 a 次迭代到目前为止的最优解, F_a 为在第 a 次迭代中任一个体的适应度值, F_r^a 为第 a 次迭代中当前种群任意个体的适应度值, γ 为随机变量。

迁徙行为在动态选择领导者时,通过引入柯西突变保证种群环境适应性,但种群中适应度较差的个体过度依赖领导者,可能会导致算法收敛速度降低、种群多样性下降。进一步地,通过引入螺旋搜索机制优化迁徙阶段的位置更新方式,以螺旋路径提升局部搜索精度,增加个体搜索更好位置的能力;通过调整螺旋形状适应不同的解空间,增大种群多样性,在面对更大规模的巡检问题时具有更强的适应性和全局搜索能力。螺旋搜索迁徙机制数学表达式(26)所示:

$$Y_{a+1} = \begin{cases} Y_a + e^{-gr} \cos(2\pi r) \times C(0,1) \times (Y_a - L_a), & F_a < F_r^a \\ Y_a + e^{-gr} \cos(2\pi r) \times C(0,1) \times (Y_a - \gamma \times L_a), & \text{else} \end{cases} \quad (26)$$

其中, r 为 $[-1,1]$ 中的随机数, g 为 $[0,1]$ 中的随机数。

3.5 改进算法流程

改进离散黑翅鸢算法流程如图 3 所示,其具体步骤如下:

- 1) 输入初始巡检信息,采取变电设备排列的编码方式和插入式的解码方式。
- 2) 使用 WPF-NEH 启发式规则初始化 BKA 种群,根据式(16)一式(18)动态生成初始种群。
- 3) 从当前种群选出适应度最高个体为领导者。
- 4) 捕食行为根据式(19)、式(20)调整个体位置,根据个体位置选择不同的策略进行全局和局部搜索。
- 5) 引入离散 DDE/rand-to-best/pbest 变异策略,根据式(21)一式(23)动态领导种群进化。
- 6) 在迁徙行为中采用螺旋搜索策略重新定位,对迁徙

式(24)、式(25)进行改进,根据改进公式(26)更新个体位置。

- 7) 多策略搜索更新种群后判断是否满足终止条件,若达到则输出最优调度方案,否则跳转至步骤 3) 更新领导者策略。

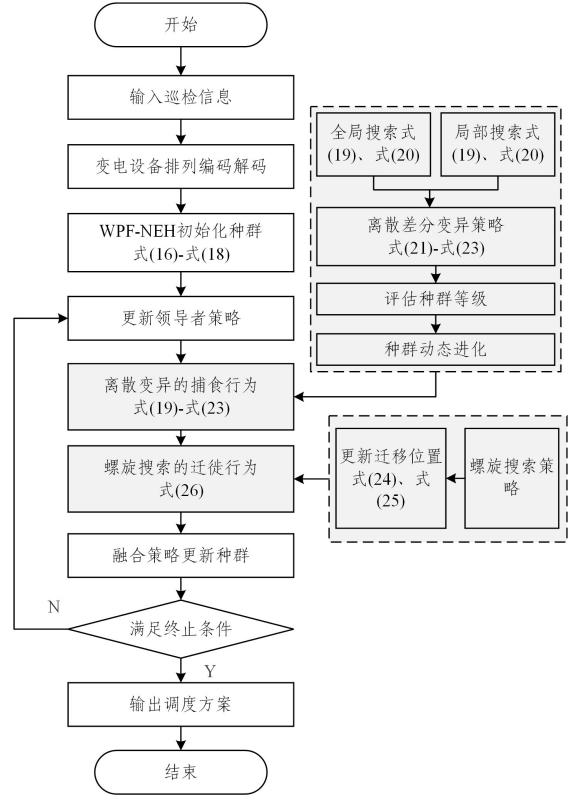


图 3 改进离散黑翅鸢算法流程

Fig. 3 Process of improved discrete black-winged kite algorithm flow

4 实例验证与分析

4.1 实例场景参数

以某变电站小规模可视化巡检任务为测试场景,已知参数为:12 台待巡检变电设备,10 个摄像头,每台变电设备先后经 6-12 个巡检任务完成巡检工作,该巡检计划包括 84 个巡检任务。变电设备、巡检任务与摄像头之间的已知映射关系为:每台变电设备不同巡检任务可选择的摄像头情况如表 2 所列,每道巡检任务的巡检时间如表 3 列所列,摄像头巡检各设备时的预置位角度如表 4 所列(默认摄像头初始位置为 0°)。为验证所提调度方法的有效性与优越性,设计 5 种摄像头调度策略对调度方案进行优化,如表 5 所列。

表 2 巡检任务可选摄像头情况(摄像头编号)

Table 2 Optional camera status for inspection tasks (camera number)

任务编号	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4	设备 5	设备 6	设备 7	设备 8	设备 9	设备 10	设备 11	设备 12
巡检任务 1	5,7	6	4	2,9	3,7	5,10	5,8	6	4,10	2,9	3,7	5,7
巡检任务 2	4	2,9	8	6,7	5	1,10	4	2,9	8	6,7	1,5	1,10
巡检任务 3	3	6,8	7	1,2	4,10	1,5	3,8	6,8	7	2,1	4,10	5,10
巡检任务 4	5	2	4,7	10	2,5	3,6	5	2	4,7	10	2,5	3,6
巡检任务 5	4,5	5	9,10	6	2	3,8	4,5	1,5	9,10	6	2	3,8
巡检任务 6	2,6	1,4	6,9	7,10	8	3,9	2,6	4	6,9	7	8	3,9
巡检任务 7	1,5	6	1,4	2,9	3,7	5	-	-	-	-	-	-
巡检任务 8	4	3,9	8	6,7	5	1,10	-	-	-	-	-	-
巡检任务 9	3	6,8	7	1,2	4,10	5	-	-	-	-	-	-
巡检任务 10	5,10	2	4,7	10	2,5	3,6	-	-	-	-	-	-
巡检任务 11	3,5	1,5	9,10	6	2	3,8	-	-	-	-	-	-
巡检任务 12	2,6	4	6,9	7	8	3,9	-	-	-	-	-	-

表 3 巡检任务巡检时间情况

Table 3 Inspection task inspection time situation

(s)

任务编号	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4	设备 5	设备 6	设备 7	设备 8	设备 9	设备 10	设备 11	设备 12
巡检任务 1	7,8	10	9	5,4	6,6	6,10	5,5	10	9,7	5,4	7,5	10,8
巡检任务 2	6	8,6	4	4,6	6	3,5	6	8,6	8	4,6	5,4	11,10
巡检任务 3	4	5,7	7	5,5	9,11	6,6	11,9	5,7	7	5,5	9,11	7,6
巡检任务 4	7	5	4,6	6	8,7	3,6	7	5	4,6	8	9,7	4,6
巡检任务 5	6,4	10	7,9	8	5	4,7	6,4	8,10	7,9	8	5	6,7
巡检任务 6	3,7	5,8	8,7	9,9	8	9,4	9,7	10	8,7	9	6	9,5
巡检任务 7	5,4	10	11,9	5,4	6,7	10	—	—	—	—	—	—
巡检任务 8	6	8,6	4	7,6	3	7,5	—	—	—	—	—	—
巡检任务 9	4	5,7	7	5,5	9,11	5	—	—	—	—	—	—
巡检任务 10	7,9	8	4,6	10	6,7	5,6	—	—	—	—	—	—
巡检任务 11	6,4	12,10	7,9	8	5	4,7	—	—	—	—	—	—
巡检任务 12	3,7	9	8,7	9	10	8,4	—	—	—	—	—	—

表 4 摄像头巡检时预置位角度情况

Table 4 Preset position angle situation during camera patrol

(°)

摄像头编号	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4	设备 5	设备 6	设备 7	设备 8	设备 9	设备 10	设备 11	设备 12
摄像头 1	45	-70	170	-15	95	-155	180	0	-120	35	-90	150
摄像头 2	-35	175	60	-90	105	10	-180	135	10	-65	80	-20
摄像头 3	150	-45	20	-135	75	-170	90	25	-100	125	55	-5
摄像头 4	-60	165	-10	120	5	-75	135	-150	85	45	-175	100
摄像头 5	180	-125	30	-105	160	65	-85	145	-55	20	-35	10
摄像头 6	-10	100	-180	55	-140	80	15	-95	170	-115	65	140
摄像头 7	115	-80	10	-160	95	-25	155	-65	40	-135	80	-50
摄像头 8	-150	25	175	-40	110	-85	50	135	-20	90	-100	65
摄像头 9	65	-115	140	-5	-170	50	-130	100	25	-155	70	-95
摄像头 10	-70	160	-25	115	35	-105	180	-45	85	-160	15	130

表 5 巡检调度策略

Table 5 Inspection scheduling strategies

调度策略	数学模型	算法
策略 1	本文模型	IDBKA
策略 2	传统模型 ^[28]	IDBKA
策略 3	本文模型	BKA
策略 4	本文模型	ChOA
策略 5	本文模型	WOA

4.2 调度方案有效性分析

为验证所提模型的有效性,采用策略 1 与策略 2 进行调度方案优化和对比分析。如图 4 所示,经优化得到巡检任务调度甘特图,图中横坐标为巡检完工时间,纵坐标为摄像头

编号,矩形框内第一个数字为变电设备编号,第二个数字为对应的任务编号,矩形长度代表该任务的巡检用时。变电站巡检要求摄像头保证长时间的精确稳定工作,本文模型通过增加巡检摄像头偏转负荷目标和摄像头负载均衡目标来实现均衡调用的效果,从而有效减少长时间尺度下因高强度运行出现的摄像头故障和损坏风险。从图中可看出,与策略 2 的调度方案相比,策略 1 的最大完工时间节约了 10%(12s),高负荷摄像头 M4,M5,M6 的任务负担有所减轻,闲置率较高的 M1 和 M3 的工作时间有所增加,其中 M5 的承担任务数从 18 降低至 14,M1 的承担任务数由 5 提升至 11,均衡了摄像头的任务承载量。

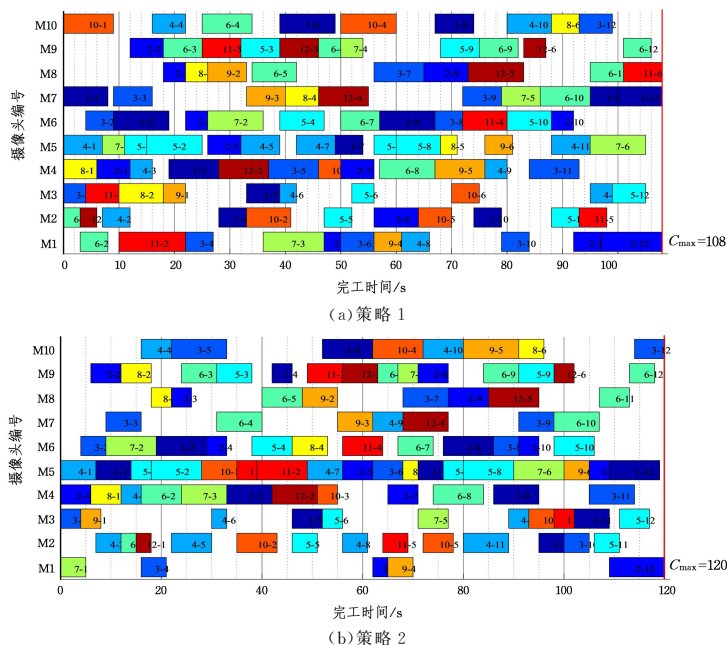


图 4 巡检任务调度甘特图

Fig. 4 Gantt chart of inspection task scheduling

图 5 展示了对不同调度策略中摄像头调用情况的统计,数据显示策略 2 中摄像头 M5 的作业时长在最大完工时间中占比达 99.2%,而摄像头 M1 和 M3 在此次巡检方案中的闲置率高达 75.8%和 55.8%,摄像头调用次数极差达 13 次,最长调用时长与最短调用时长的极差为 90 s,存在严重的摄像头负载分配失序问题。极差过大反映出传统车间调度模型在负载均衡分配上的缺陷。策略 1 中摄像头工作强度差异显著降低,所有摄像头运行时间均集中在 50~87 s 之间,极差缩小至 37 s;摄像头平均闲置率控制在 37.9%,调用极差收窄至 5 次。单个摄像头的最大运行时长较策略 2 降低 26.9%,且各摄像头调用时长与均值的偏离度不超过 15%。

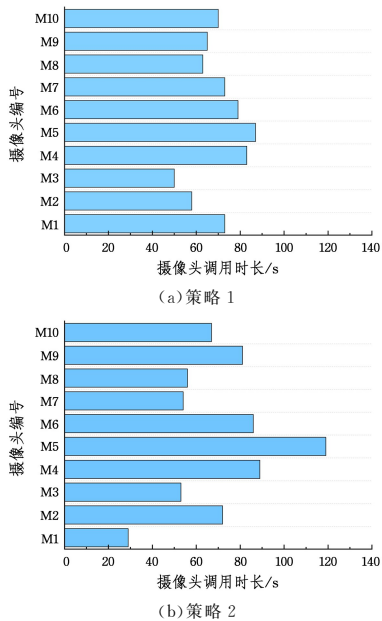


图 5 摄像头调用时长
Fig. 5 Comparison of camera load

图 6 为两种策略的摄像头偏转角度情况,相比于策略 2,策略 1 的各摄像头偏转角度维持在较低水平且离散程度小,符合均匀调度原则。如表 6 所列,策略 1 的调度方案巡检任务最大完工时间和摄像头总调用时长都实现了降低。策略 1 在总调度时间基本持平的约束下,增加模型的偏转负荷目标,使总偏转角度减小且标准差下降 56.4%,体现均衡性的巡检资源利用(各摄像头调用时间)标准差锐减至 10.8 s(相对降幅 54.2%)。本文模型通过最小偏转角度约束实现了摄像头偏转角度的降低,而偏转角度目标和负载均衡目标的加入使得各摄像头调用时长和偏转角度的标准差得到优化,说明本文模型通过多目标优化和场景针对性约束可实现更好的调度效率与调度均衡性。

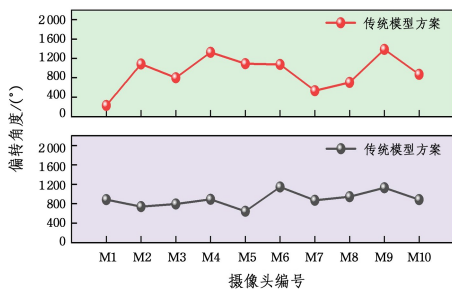


图 6 摄像头偏转角度对比

Fig. 6 Comparison of camera deflection angles

表 6 实验结果指标对比

Table 6 Comparison of experimental results indicators

指标	策略 1	策略 2
最大完工时间/s	108	120
总调用时长/s	701	706
总偏转角度/(°)	8930	9100
偏转角度标准差/(°)	155.5	357.0
资源利用标准差/s	10.8	23.6

4.3 算法对比分析

本文选取平均百分比相对偏差(Average Relative Percentage Deviation, ARPD)和最优解复现率(Repetition-rate of Optimal Solution, ROS)分别作为算法平均求解性能和算法寻优能力上限的评价指标^[29], ARPD 和 ROS 的计算式分别如式(27)、式(28)所示:

$$APRD = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{C_i - C_b}{C_b} \times 100\% \quad (27)$$

$$ROS = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{N_i}{N} \times 100\% \quad (28)$$

其中, I 为某种规模的算例集合, i 为 I 中的算例, C_i 表示某一算法运行算例时所得到的最优解, C_b 表示本文算法运行算例时记录下的最优解, N_i 代表算法运行算例时得到已知最优解的次数, N 代表算法运行算例的总次数。 ARPD 值越小代表算法的平均求解性能越好, ROS 值越大代表算法复现已知最优结果的能力越好。

为验证 WPF-NEH 初始化方法的有效性,分别选用随机生成、NEH 和 WPF-NEH 方法作为 IDBKA 的初始解生成方法,基于测试场景进行重复实验 20 次以降低算法随机性的影响。表 7 列出了 IDBKA 在不同初始化条件下得到的 ARPD 值和 ROS 值,相较于随机生成的初始解生成方法,采用 WPF-NEH 或 NEH 初始化方法后所得的 ARPD 值均降低,其中 WPF-NEH 方法使 ARPD 值下降最多(2.05%),表明其帮助算法的解始终稳定在离最优解较小的范围内。采用启发式初始化方法同时提高了算法的 ROS 值, WPF-NEH 方法的 ROS 值(25%)明显高于其余两组,表明其对算法寻优能力上限的提升更明显。

表 7 IDBKA 在不同初始化条件下的性能指标

Table 7 Performance metrics of IDBKA at different initialization conditions

指标	WPF-NEH	NEH	随机生成
APRD	1.47	2.33	3.52
ROS	25.00	11.00	6.00

为测试所提 IDBKA 算法的有效性,使用策略 1 与策略 3,4,5 在该测试场景进行对比实验,由于第二、三目标主要受模型制约,而完工时间变化更能直观表征算法优化程度,故本文选用受算法影响较大的第一目标 f_1 作为评价函数。

图 7 展示了各策略分别迭代 200 次的收敛曲线。可以观察到, BKA, WOA 和 ChOA 分别第 76, 174 和 191 次迭代寻到其最优目标值, BKA 在收敛速度和精度上都优于 WOA 和 ChOA, 但迭代曲线均较缓。而 IDBKA 仅经过 16 次迭代即达到最优目标值, 收敛效率较 BKA 提升 78.9%。其中, IDBKA 在第 3 次迭代时就达到 BKA 算法的最优解, 主要原因是 IDBKA 的 WPF-NEH 启发式初始化规则使得初始解更靠近全局最优区域, 可显著降低算法达到最优解所需的迭代

次数。由于离散变异和螺旋搜索策略对搜索范围的提高, ID-BKA 在 BKA 最优解的基础上能继续寻得更优解, 在 BKA 的 115 s 目标值基础上继续寻优至 108 s 目标值。

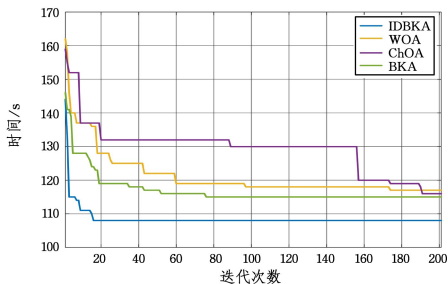


图 7 迭代收敛曲线

Fig. 7 Iterative convergence curve

为进一步验证本文改进算法的有效性, 减少算法随机性带来的影响, 对 IDBKA 和 BKA 算法重复 20 次实验, 收敛曲线如图 8、图 9 所示。分别统计实验中各算法在运行到 30%, 60%, 90% 进程(迭代 200 次)时取得的结果质量和优化性能指标, 指标统计如表 8、表 9 所列。

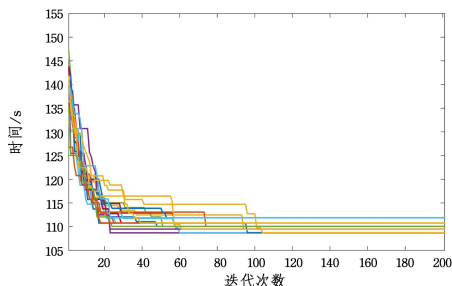


图 8 IDBKA 迭代收敛曲线

Fig. 8 IDBKA iterative convergence curves

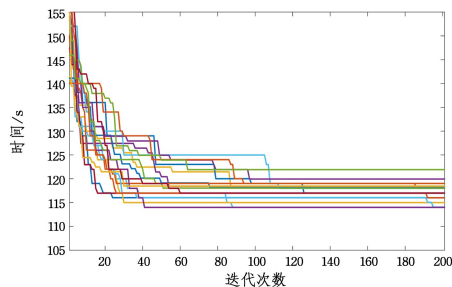


图 9 BKA 迭代收敛曲线

Fig. 9 BKA iterative convergence curves

表 8 算法优化性能指标对比

Table 8 Comparison of algorithm optimization performance metrics

指标	IDBKA	BKA
最优目标值/s	108	114
平均目标值/s	109.20	117.15
最差目标值/s	112	122
标准差/s	0.93	2.01
ARPD/%	0.70	2.34

表 9 算法收敛性能指标对比

Table 9 Comparison of algorithm convergence performance metrics

指标	IDBKA			BKA		
	30%	60%	90%	30%	60%	90%
最小值/s	108	108	108	116	115	115
最优次数	16	20	20	2	12	19
最优总数	56			33		
ROS/%	30			10		

由图 8、图 9 可以看出, BKA 收敛曲线分布稀疏, 中部存在大量水平的非最优解且后期发散明显, 表明 BKA 在搜索中容易陷入局部停滞, 原因主要是其依赖随机初始化导致初始解质量不稳定。而 IDBKA 较 BKA 的迭代曲线更加集中, 因为 WPF-NEH 初始化方法降低了 IDBKA 算法对初始条件及随机扰动的敏感性, 在多次实验中初始解始终靠近全局最优解, 曲线彼此贴近几乎重合, 具有更好的稳定性, 反映在表 8 中, 目标值也位于较小范围内, 有更低的方差和 ARPD 值。根据表 9 统计的结果, 大多数实验中 IDBKA 在迭代初期(30%)就已完成最优值的搜索, 至迭代中期(60%)均已完成最优解的收敛, 最优总数占比达 93.3%。主要原因是 IDBKA 在全局搜索阶段加入了差分扰动生成新解, 加快了 IDBKA 曲线的下降速度; 并通过模拟螺旋路径逼近当前最优解, 使得 IDBKA 曲线更早到达最优目标值, 提升了算法的 ROS 值。

4.4 规模适应性分析

变电站的 200 巡检任务数以下小规模巡检通常应用于跟踪或检测故障设备的发展情况; 大风或雷雨天气前后的特殊巡检任务规模通常在 1000 个任务以内; 根据变电站的规模, 大规模全面巡检可达 2000—4000 任务规模, 刚性巡检通常需 4~8h。本文设置在不同规模任务下的对比测试验证所提算法的稳定性与有效性。

表 10 和表 11 列出了上述算法计算不同任务规模算例所得到的 ARPD 值和 ROS 值。由表 10 可知, IDBKA 在 4 组规模下均取得了最优解, 其平均 ARPD 值明显领先于其他算法。IDBKA 在求解小规模任务时的表现与其余算法无较大差距, 在求解中、大规模任务时仍保持稳定的求解性能, 指标表现上显著优于其他算法。由表 11 可知, 无论是小规模任务还是大规模任务, IDBKA 在 ROS 值上均明显领先于其他算法, 取得了最优 21.75% 平均 ROS 值, 表明所提算法在不同规模下均有明显的寻优上限优势。

表 10 不同任务规模下算法 ARPD 指标对比

Table 10 Comparison of algorithm ARPD metrics for different task sizes

算法	任务规模				平均
	200	1000	2000	4000	
IDBKA	1.52	2.73	2.86	2.40	2.38
BKA	2.64	5.21	6.70	8.62	5.79
WOA	3.01	12.12	17.98	16.79	12.48
ChOA	2.86	7.53	12.47	18.91	10.44

表 11 不同任务规模下算法 ROS 指标对比

Table 11 Comparison of algorithm ROS metrics for different task sizes

算法	任务规模				平均
	200	1000	2000	4000	
IDBKA	26.00	23.00	20.00	18.00	21.75
BKA	15.00	11.00	11.00	9.00	11.50
WOA	11.00	12.00	7.00	6.00	9.00
ChOA	17.00	16.00	7.00	8.00	12.00

图 10 展示了采用不同方法优化的巡检时间对比, 采用算法优化巡检方案在各个任务规模较刚性调度都有明显的优势。其中 IDBKA 随着任务规模的扩大展现出更好的优化效

果,在 2000—4000 大规模任务下较刚性调度均节省超过 50% 的巡检时间。为进一步直观对比各算法的求解稳定性,将各算法在 2000—4000 大规模任务下所得 ARPD 指标绘制得到的箱线图如图 11 所示。图中, BKA, WOA 与 ChOA 相较于 IDBKA 箱体较宽,且存在离群点,反映其在优化过程中易陷入次优解。而更高初始解的质量使得 IDBKA 箱线的上下须线缩短,离散度减少,窄箱体、低中位数(箱体中实线)反映出 IDBKA 解质量的高度稳定; IDBKA 的箱体明显下降,说明 IDBKA 在大规模情况下也有较高的求解精度,验证了本文方法用于巡检摄像头调度的稳定性与有效性。

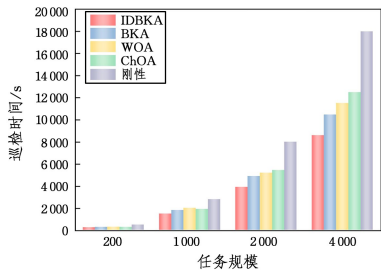


图 10 不同方法优化的巡检时间对比

Fig. 10 Comparison of time for optimized inspection plans using different methods

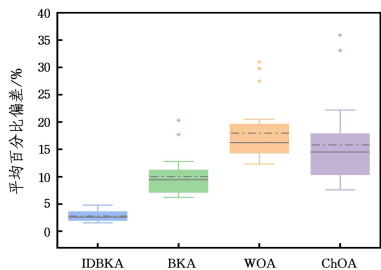


图 11 不同算法求解大规模任务的 ARPD 箱线图

Fig. 11 Box plots of ARPD for different algorithms solving large-scale tasks

结束语 针对变电站巡检摄像头巡检效率低、调度效果差的问题,本文提出了一种基于改进离散黑翅鸢算法的变电站摄像头巡检任务调度方法:

1)对摄像头巡检调度问题进行了多目标优化建模,实现多摄像头间的负载均衡,既缩短了巡检周期又避免了局部设备过载风险。

2)改进离散黑翅鸢算法,通过 WPF-NEH 启发式规则利用巡检特定信息对初始解进行针对性初始化,在搜索阶段设计多策略搜索策略提升算法在变电站大规模巡检任务中的求解性能。

3)通过测试场景的模型方案对比分析发现本文模型有效减少了巡检时长,实现了摄像头间的负载均衡,巡检资源利用指标提升 54.2%。

4)通过规模适应性分析验证了本文方法在不同规模尤其是大规模任务下的稳定性与有效性,在大规模任务时相比传统刚性巡检可节省 52.3% 的巡检时间。

随着智能变电站的日益发展,在未来研究中,将考虑多变电站摄像头的同时调度,引入学习策略,结合本文所提方法以适应更复杂的巡检场景,更好解决现有调度方法存在的问题。

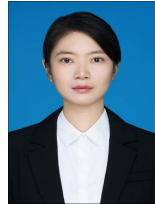
参考文献

- [1] CHEN X, HAN Y F, YAN Y F, et al. A unified algorithm for object tracking and segmentation and its application on intelligent video surveillance for transformer substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7578-7587.
- [2] JIANG Q, LIU Y D, YAN Y J, et al. Substation inspection robot PTZ camera alignment method for high zoom scenes[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3337-3347.
- [3] DONG X Y, JI K, ZHU J, et al. A retrofitted ant colony algorithm for inspection robot path planning in UHV substations[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 154-160.
- [4] QI B, JI M, ZHENG Y P, et al. Application status and development prospect of power internet of things technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3012-3031.
- [5] PENG M Z, XU Y, HU Y B, et al. Intelligent inspection technology for secondary equipment in substations based on artificial intelligence technology[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(S1): 90-96.
- [6] TONG J, QI Z H, PU T J, et al. Edge intelligence to power internet of things: concept, architecture, technology and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5473-5496.
- [7] ZHANG C X, LU Z H, LIU X C. Joint inspection technology and its application in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 158-164.
- [8] ZHANG S J, DU H T, HOU T T. An improved NSGA-II algorithm for solving multi-objective dual resource constrained flexible job shop scheduling problem[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 49(S1): 90-96.
- [9] PEI H L. Joint scheduling method of machine and handling robot in flexible manufacturing workshop[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(3): 15-21.
- [10] SHI W, ZHOU S, NIU Z, et al. Joint device scheduling and resource allocation for latency constrained wireless federated learning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 20(1): 453-467.
- [11] ZHOU K, TAN C, WU Y, et al. Research on low-carbon flexible job shop scheduling problem based on improved Grey Wolf Algorithm[J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 80(9): 12123-12153.
- [12] HU R Q, CHENG H, ZHANG Z N. Solving job shop scheduling problem with flexible process sequence based on expression tree model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(6): 2036-2043.
- [13] LU J S, JIN J H, ZHAO W B, et al. Lot streaming hybrid assembly flow shop scheduling on migratory bird algorithm[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2022, 56(11): 2135-2144.
- [14] WANG S H, LI Y, LI X Y. An improved whale swarm algorithm for flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(1): 1-11.
- [15] YANG G, YU L. A chimp algorithm based on the foraging strategy of manta rays and its application[J]. Plos One, 2024,

- 19(3);e0298230.
- [16] ZHANG S J, YANG W Q, GU X S. An improved multi-swarm migrating birds optimization algorithm for hybrid flow shop scheduling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(10):1378-1388.
- [17] LEI D M, LIU J Y. Reentrant hybrid flow shop scheduling based on cooperated shuffled frog-leaping algorithm[J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 51(5):125-130.
- [18] WU R R, LI D J, QIN J, et al. System design of an indoor inspection robot driven by a flexible cable in a substation [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10):89-97.
- [19] HALL N G, SRISKANDARAJAH C. A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process[J]. Operations Research, 1996, 44(3):510-525.
- [20] WANG J, WANG W, HU X, et al. Black-winged kite algorithm: a nature-inspired meta-heuristic for solving benchmark functions and engineering problems [J]. Artificial Intelligence Review, 2024, 57(4):1-53.
- [21] ZHANG Z, WANG X, YUE Y. Heuristic optimization algorithm of black-winged kite fused with osprey and its engineering application[J]. Biomimetics, 2024, 9(10):595.
- [22] BA Z Y, YUAN Y P, PEI G Q, et al. Hybrid evolutionary algorithm with multi-operation precise joint movement neighborhood structure for job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(2):537-552.
- [23] AMARO D, ROSENKRANZ M, FITZPATRICK N, et al. A case study of variational quantum algorithms for a job shop scheduling problem[J]. EPJ Quantum Technology, 2022, 9(1):5.
- [24] MENG L L, ZHANG B, REN Y P, et al. Hybrid shuffled frog-leaping algorithm for distributed flexible job shop scheduling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(17):263-272.
- [25] NAWAZ M, ENSCORE J E E, HAM I. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem [J]. Omega, 1983, 11(1):91-95.
- [26] WANG J, LIAO J, ZHOU Y, et al. Differential evolution enhanced with multiobjective sorting-based mutation operators [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(12):2792-2805.
- [27] LI D H, XIONG W Q, WANG Z D. Improving seagull optimization algorithm combined multiple strategies and its application [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(5):1360-1367, 1374.
- [28] DAUZÈRE-PÉRÈS S, DING J, SHEN L, et al. The flexible job shop scheduling problem: A review [J]. European Journal of Operational Research, 2024, 314(2):409-432.
- [29] XIONG F L, LI L L. Just-in-time distributed precast scheduling with considering production and transportation costs[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12):4386-4405.



LI Haifeng, born in 2000, postgraduate. His main research interests include intelligent inspection of substations and so on.



CHEN Qing, born in 1989, Ph.D. Her main research interests include application of artificial intelligence technology in power systems and so on.