

多农机全过程路径规划应用研究

张 过, 赖惠成, 杜浩浩

(新疆大学 计算机科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘 要: 在智慧农场中, 农机调度与路径规划是一项关键技术。然而, 目前多台自主农机在运行中存在任务调度不均衡、作业效率低下、缺乏全过程路径规划等问题。特别是在新疆地区, 单块农田面积较大, 多台农机的不均衡调度会引起农机负载超负荷。针对以上问题, 提出一种多农机作业的全过程规划算法。首先, 设计一种基于K-means的负载均衡分配方法, 使用预热机制提高效率, 采用制衡因子保证每台农机任务均衡。其次, 提出一种基于混合禁忌搜索算法的调度策略, 加入组间转移变异算子和解禁策略来避免局部最优, 有效实现多个任务的快速调度。最后, 引入旋转卡尺路径全覆盖规划算法, 确保农田内部作业的全面覆盖。在构建的电子地图上进行仿真测试, 结果表明, 相比改进的人工蜂群算法、蚁群优化算法与鲸鱼优化算法, 在3、4、5台农机作业时, 该算法比3种算法中最优算法的性能分别提升了9.15%、9.88%、8.40%, 分配均衡性分别提高了40.65%、81.12%、79.47%, 验证了负载均衡分配方法和调度策略的有效性。该算法在实现多农机作业均衡调度的同时完成了田内作业路径, 在智慧农场中具有较高的应用价值。

关键词: 多农业机械; 均衡分配; 调度策略; 路径规划

DOI: 10.11907/rjdk.241429

中图分类号: TP18

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2025)007-0029-09



Application Research on Whole Process Path Planning of Multi-agricultural Machinery

ZHANG Guo, LAI Huicheng, DU Haohao

(College of Computer Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In smart agriculture, the scheduling and path planning of agricultural machinery are key technologies. However, currently, multiple autonomous agricultural machines face issues such as uneven task scheduling, low operational efficiency, and lack of whole-process path planning during operation. Especially in Xinjiang, where individual farmland plots are large, and uneven scheduling of multiple agricultural machines can lead to overload. To address these issues, a whole-process planning algorithm for multi-machine operations is proposed. First, A load balancing allocation method based on K-means is designed, which uses a preheating mechanism to improve efficiency and a check-and-balance factor to ensure that the tasks of each agricultural machine are balanced. Secondly, a scheduling strategy based on hybrid taboo search algorithm is proposed, which incorporates inter-group transfer variation operator and unlocking strategies to avoid local optimums, and efficiently achieves fast scheduling of multiple tasks. Finally, the comprehensive coverage path planning algorithm is introduced to ensure full coverage of field operations. The simulation tests are performed on the constructed electronic map, and the results show that compared with the improved artificial bee colony algorithm, ant colony optimization algorithm and whale optimization algorithm, the proposed algorithm has improved performance by 9.15%, 9.88% and 8.40% respectively when there are 3, 4 and 5 agricultural machines in operation. Meanwhile, the balance of task allocation has been increased by 40.65%, 81.12% and 79.47% respectively. Additionally, the effectiveness of the load balancing allocation method and scheduling policy is verified. This algorithm has good application value in achieving balanced scheduling of multi-machine operations while completing field operation paths in smart farms.

Key Words: multi-agricultural machinery; balanced allocation; scheduling strategy; path planning

收稿日期: 2024-05-07

扫描二维码阅读全文:



基金项目: 科技创新2030——“新一代人工智能”重大项目(2022ZD0115803)

作者简介: 张过(1999-), 女, 新疆大学计算机科学与技术学院硕士研究生, 研究方向为群智能算法的应用; 赖惠成(1963-), 男, 新疆大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师, 研究方向为群智能算法的应用、视频/图像处理; 杜浩浩(1997-), 男, 新疆大学计算机科学与技术学院硕士研究生, 研究方向为群智能算法。本文通讯作者: 赖惠成。

0 引言

农业在全球经济和发展中占据中心地位,对于减贫、经济增长、粮食安全等都至关重要^[1-2]。智慧农业可大幅提升农业劳动生产率、资源利用率和土地产出率,是现代农业发展的重要方向^[3-5]。智能农机自主作业具有作业效率与可靠性高、节能环保等优点,是实现农业高效生产的重要手段^[6]。任务调度和路线规划作为农机自主完成作业的关键技术,一方面,任务调度能充分利用机械的工作能力,减少闲置时间;另一方面,路线规划可以减少重耕和漏耕现象,节省非作业距离。因此,任务调度和路线规划可以提高操作效率和土地资源利用率,对实现精准作业和智慧农业具有重要意义^[7-8]。

任务调度在多农机协作中扮演着关键角色。多农机协作是指多台农业机械共同配合完成农业生产任务的方式,任务调度则是确定与分配各台农机在农田作业中的具体任务和工作内容。目前,任务调度研究集中在物流车辆^[9]、无人机^[10-12]、移动机器人^[13-14]等领域,而农机的任务调度大多处于理论研究阶段。曹如月等^[15]类比旅行商问题遍历农田,使用蚁群算法优化任务序列。Cao等^[16]构建路径成本、平均操作周期最优化的多机合作任务分配模型,采用改进的蚁群算法求解,实现了静态任务和动态任务相结合的多台农机协同管理。Liang等^[17]引入PFCI(Potential Field of Capability Influence)的基于启发式的聚类拍卖方法,解决不确定场景下异构农机能力不同的问题,并实现有效的任务分配。Huang等^[18]建立了考虑农机作业时性的带时间窗的多区域农机调度模型,使用混合粒子群优化求解,实现多区域多农田作业的合理调度,降低调度成本。近年来,任务调度综合考虑了农机作业时出现故障后重新分配以及在规定时间内窗口内完成农田分配的情况,但在任务均衡方面表现欠佳,不利于资源的有效利用。

路径规划技术是多机协同作业的关键技术之一。路径规划技术主要分为两种,第一种是点到点路径规划,主要用于农机从一个农田任务转移到另一个农田任务以及在转移路径中避开障碍物的路径规划。Zhou等^[19]根据障碍物对农田划分了多个任务,采用蚁群算法进行任务序列优化,最小化连接块的移动距离。Yang等^[20]提出动态自适应RRT策略以实现从起始位置到目标位置的最佳路径,同时避开障碍物,并且满足任何附加条件。Feng等^[21]提出一种基于免疫蚁群B样条插值的路径规划算法,在避障的同时提高了农业机器人路径轨迹的平滑性。第二种是全覆盖路径规划,用于对田内的路径全覆盖。Bochtis等^[22]提出基于耕地作业开发的最优面积覆盖方法,实现了果园行内和行间的路径规划。Nilsson等^[23]提出一种通用的覆盖路径规划方法,将54个不同形状的农田和3种操作配置组成基准数据集,并提出定量的测量方法,有助于比

较覆盖路径规划方法。Shang等^[24]提出一种基于改进遗传算法的电动拖拉机全覆盖路径规划算法,采用网格法建立模型,实现了在复杂度不同的环境下遍历网格。Han等^[25]提出一种基于回溯的改进全覆盖路径规划算法,首先使用莫尔斯分解方法对农田进行划分,其次按照一定顺序对划分的农田进行全覆盖,解决了农机跨区域作业穿田的问题。

综上所述,现有研究大多专注于多农机调度或者单农机的田内路径规划,而缺乏多农机的全过程路径规划。为解决上述问题,本文的主要贡献为:

(1)构建了新疆昌吉农场的电子拓扑图,切实解决了新疆农场的农田分配问题。

(2)针对作业调度不均衡的问题,设计了负载均衡分配方法(Load Balancing Allocation Based on K-means, KLBA)以平衡多农机的任务分配。通过提出的预热机制和制衡因子,在提高效率的同时,保证作业的均衡分配。

(3)针对路径搜索易陷入死锁的问题,提出混合禁忌调度策略(Scheduling With a Hybrid Taboo Search, HTSS),通过组间转移变异算子和解禁策略增加了搜索的多样性,通过最短路径优化降低了农机代价成本。

(4)引入旋转卡尺路径全覆盖规划算法(Rotating Caliper Path Full Coverage Planning, RCPP)实现了农田内部代价最小化的作业路线,并最大化全覆盖作业区域,解决了农机重耕、漏耕的问题。

本文提出的KLBA、HTSS以及RCPP构成了多农机全过程路径规划算法WPP(Whole-Process Planning),以解决农机作业研究内容单一的问题。

1 模型构建

1.1 农田环境

对农场环境的精确描述能更好地规划农机行进路线,因此创建环境是多农机调度和路径规划的一项重要工作。根据全球定位系统提供的地理基本信息精确地映射地块,构建的新疆昌吉农场电子地图如图1所示。

首先打点标记农田地块边界的关键点,然后提取农田边界点信息,获取农田所有边界关键点的大地经纬度坐标,并对经纬度坐标进行平面坐标转换运算。

本文采用WGS-84地球坐标系,通过墨卡托投影将地球的三维曲面转换为二维平面。在墨卡托投影中,经度和纬度被映射到一个平面上。将经纬度坐标转化为平面坐标的公式如下:

$$x = R \cdot \text{lon} \quad (1)$$

$$y = R \cdot \ln\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\text{lat}}{2}\right)\right) \quad (2)$$

其中, x 、 y 为平面坐标系中的横坐标和纵坐标, lon 为经度, lat 为纬度, R 为地球半径, $\ln$ 为以e为底的对数。

在开发的智慧农场中,农田分布密集,便于统一、高效

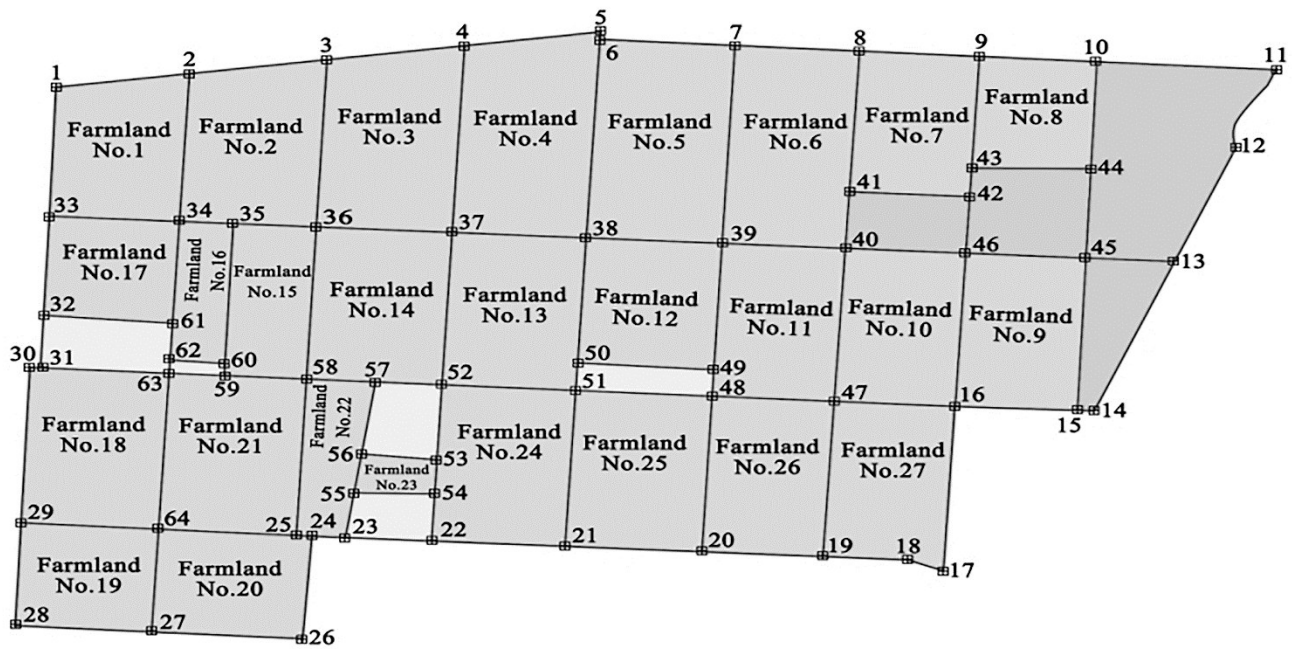


Fig. 1 Electronic map of Changji farm in Xinjiang

图 1 新疆昌吉农场电子地图

的管理, 契合现代农业发展的趋势。

1.2 多机协同作业数学模型

农机执行耕种管收作业具有较强的时效性, 需作出科学的农机作业调度决策, 在保证任务及时完成的前提下, 实现作业成本最小化。一般来说, 执行作业的农机按照以下流程工作: 多台农机从规划的机库出发, 依次进入各个农田, 完成农田指定的作业, 最后返回车库。全球卫星导航系统提供三维(经度、纬度、高度)坐标, 假设农机在平坦的地块中作业, 暂不考虑地块高度的影响, 农机作业规划示意图如图 2 所示。

$c = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 表示 m 台农机, $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 表示 n 个任务。考虑到农机的不同磨损程度影响作业效率, 受激

活函数 Sigmoid 的启发, 给出以下目标函数:

$$\min f = \sum_{i=1}^m s_i \cdot g(x_i) \quad (3)$$

$$g(x_i) = \frac{1}{1 + e^{-(x_i - 5)}} \quad (4)$$

式中, f 为多机协同代价, s_i 为第 i 台农机完成作业所需的总路程, $g(x_i)$ 为第 i 台农机的磨损程度。

总路程 s_i 由 3 部分组成: 农机 c_i 从车库到其第一个任务 t_j 的路程 $s(c_i, t_j)$, 农机 c_i 从第 j 个任务 t_j 到下一个任务 t_k 的路程 $s(c_i, t_j t_k)$, 农机 c_i 从最后一个任务 t_l 回到车库的路程 $s(c_i, t_l)$ 。其中, $j, k, l \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

$$s_i = \sum_{j=1}^n s(c_i, t_j) p(c_i, j) + \sum_{l=1}^n s(c_i, t_l) p(c_i, l) \quad (5)$$

$$+ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n s(c_i, t_j t_k) p(c_i, jk)$$

其中:

$$p(c_i, j) = \begin{cases} 1 (t_j \text{ 是 } c_i \text{ 执行的第一个任务}) \\ 0 (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

$$p(c_i, l) = \begin{cases} 1 (t_l \text{ 是 } c_i \text{ 执行的最后一个任务}) \\ 0 (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

$$p(c_i, jk) = \begin{cases} 1 (t_j, t_k \text{ 是 } c_i \text{ 执行的任务顺序}) \\ 0 (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

1.3 约束条件建立

农机作业所对应的农田地图是开展机器路径规划的约束条件。为便于计算识别, 借助数学手段将真实的农田环境转换为环境模型, 本文采用拓扑图完成环境建模。设建模后形成的需覆盖二维区域为 $R = \{x, y\}$, 据此可构建

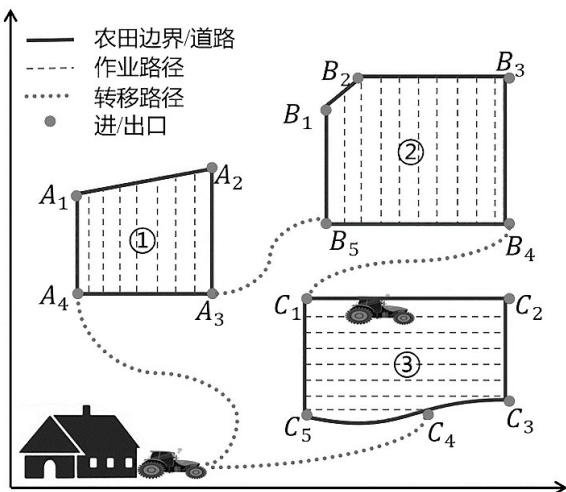


Fig. 2 Schematic diagram of agricultural machinery operation planning

图 2 农机作业规划示意图

以下3类约束条件:

(1)遍历区域约束条件。

$$r_1 = \{x, y | f(x, y) = 0\} \in R \quad (9)$$

$$r_2 = \{x, y | f(x, y) = 1\} \in R \quad (10)$$

其中, r_1 为可遍历区域, r_2 为不可遍历区域, (x, y) 为电子地图所包含的农田坐标, $f(x, y)$ 为遍历函数, 0 为可遍历点, 1 为不可遍历点。

(2)遍历过程路径约束条件。

$$\begin{cases} d = \sqrt{(x_g - x_r)^2 + (y_g - y_r)^2} \\ (x_g, y_g) \subseteq r_1 \end{cases} \quad (11)$$

其中, (x_r, y_r) 为机器当前所处作业的中心点坐标, (x_g, y_g) 为机器下一个作业目标点。

(3)作业转移过程中入口约束条件。

$$B = \text{mod}(L, W) \quad (12)$$

$$B_N = \begin{cases} 2i + 1, \text{同侧} \\ 2i, \text{异侧} \end{cases} \quad (13)$$

其中, L 为单农田长度, W 为机器作业幅宽, B_N 为作业总行数, mod 为取余运算, 判断机器能否恰好完成单农田作业。若 W 是 L 的整数倍, 则 B 为 0。 B_N 为偶数时, 机器入地和出地位于农田的同一侧地头; B_N 为奇数时, 机器入地和出地位于农田的不同侧地头。

2 全过程规划算法

根据已知任务信息和环境信息, 通过高效的 KLBA 和 HTSS 策略完成多农机与多农田的合理调度, 利用 RCPP 实现田内预设作业路径, 使农机在田间准确地行进和转弯, 实现对复杂农田作业的精细化管理。多农机全过程规划的总体框架如图 3 所示。

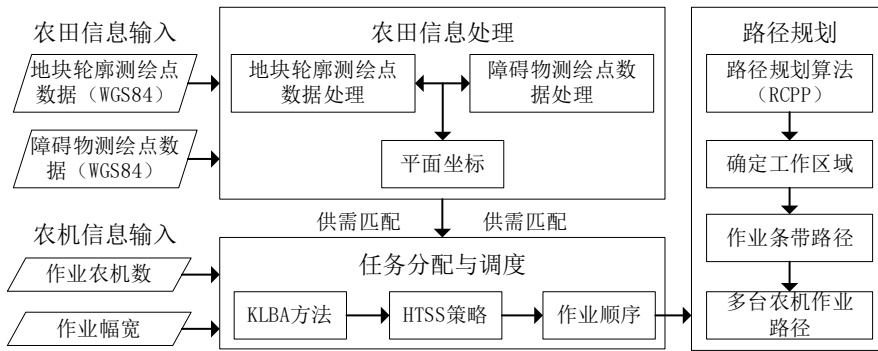


Fig. 3 Overall framework of multi-agricultural machinery whole-process planning

图3 多农机全过程规划总体框架

在任务调度的基础上, 为利用有限的资源, 需要使每台农机的任务分配均衡, 但任务平衡和路径成本最低两者本身是矛盾的^[26-27]。因此, 如何在确保农机作业任务平衡的同时使路径成本更低是本文研究的一个重要问题。本文采用集中处理 KLBA 方法和分布处理 HTSS 策略相结合的方法进行多农机任务调度。

2.1 基于 K-means 的负载均衡分配方法

K-means 聚类算法 (K-Means Algorithm, KMA) 是一种简单且有效的启发式方法, 其核心是将给定的数据集 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 划分为 K 个子集 $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ ^[28]。经典 K-means 聚类思想如下: 在目标样本中随机选择 K 个聚类中心, 根据相似度将数据分配到最近的簇中, 得到的簇 c_i 满足 $c_i \neq \emptyset, i = 1, 2, \dots, k$ 。然后重新计算类簇中心, 循环迭代直到类中心不变或收敛。针对算法中聚类中心的随机选取导致收敛速度缓慢的问题, 提出了预热策略, 通过引入约束条件实现负载的均衡分配。基于 K-means 的负载均衡分配具体步骤为:

步骤 1: 根据环境动态调整簇类 K , K 代表作业农机总数。

步骤 2: 使用遗传算法进行分配的预热操作, 将分配结

果 $\text{Re} = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ 作为初始质心。预热策略可避免初始值的敏感性, 在减少计算复杂度的同时提高收敛速度。

步骤 3: 计算样本集合节点和初始质心的距离, 其相似程度用距离 D_s 来表示。距离越小, 样本 i 与质心越相似; 反之, 距离越大, 样本 i 与质心越相异。

$$D_s = \|x_q - r_s\| = \sqrt{\sum_{s=1}^k |x_q - r_s|^2} \quad (14)$$

其中, x_q 为样本数据, r_s 为初始聚类中心。

步骤 4: 加入制衡因子。在满足步骤 3 时, 计算各簇类面积 S_i , 设置一定的阈值 P_i 实现负载的均衡分配。

$$p_i = \frac{S}{K_i} \cdot E_i \quad (15)$$

$$S_i \leq p_i \quad (16)$$

其中, S 表示作业总面积, S_i 表示各簇类面积, K_i 表示第 i 台农机, E_i 表示第 i 台农机的作业效率。

步骤 5: 计算新簇的类中心。对所得的各个簇结果, 通过求解平均值得到簇中心。公式如下:

$$c_i = \frac{1}{N_k} \sum_{u=1}^{N_k} X_u \quad (17)$$

其中, N_k 是簇 k 的样本数目, c_i 是新簇的中心, X_u 是样本集合 x 中的每个数据对象。

步骤 6: 计算聚类准则函数 (Sum of the Squared Error, SSE), 通过聚类准则函数评价聚类性能。聚类准则函数公式为:

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (c_i - c_j)^2 \quad (18)$$

步骤 7: 给出一个足够小的阈值 δ , 在聚类迭代过程中, 如果满足 $SSE \leq \delta$, 则表示算法结束; 否则, 返回步骤 3。

2.2 基于混合禁忌搜索算法的调度策略

一旦完成任务分配, 调度路线规划则属于离散优化问题, 使用智能算法实现最佳任务序列。禁忌搜索算法 (Taboo Search Algorithm, TSA) 是一种元启发式随机搜索算法, 通过模拟人类的记忆机制以避免搜索过程中陷入局部最优解, 并在解空间中进行有效的全局搜索, 但 TSA 仍然存在全局搜索能力弱、效率不高、易陷入局部最优等问题。针对上述问题, 本文提出混合禁忌搜索算法, 改进了邻域产生规则和解禁规则。具体来说, TSA 引入了遗传算法中的组间转移变异算子和模拟退火算法中的 Metropolis 准则, 在提高全局搜索能力的同时, 防止陷入局部最优解。

2.2.1 邻域搜索

邻域搜索是一种基于贪心思想的方法, 其核心思想是在当前解的邻域进行搜索, 搜索结果很大程度上取决于邻域产生规则和初始解的选择。变异邻域搜索过程可以概括为以下步骤:

(1) 给定初始解。K 台农机的分配结果 $x_0 = c_i$, 设置当前最优解 $x_{best} = x_0$ 。使用 2-opt 策略产生邻域解集合, 该邻域产生规则的缺陷是没有足够的搜索空间。因此, 设计了组间转移变异算子 (见图 4), 产生当前可选解集合 $T = N(x_{best})$, 其中 $N(x_{best})$ 为 x_{best} 的邻域。

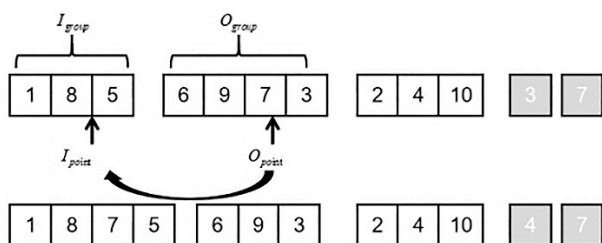


Fig. 4 Schematic of transfer mutation operator between groups

图 4 组间转移变异算子示意图

(2) 当前可选解仅包含最优解一个元素时, 满足 $T = \emptyset$, 则需输出当前最优解 x_{best} 。

(3) 选取候选集合 S, 得到 S 中的最优解作为当前评估解 $x_{calculate}$ 。若满足 $f(x_{calculate}) \leq f(x_{best})$, 则更新当前可选解和最优解, 即 $x_{best} = x_{calculate}$, $T = N(x_{best})$; 否则, 屏蔽集合 S, 更新 $T = T - S$ 。其中, $f(x)$ 作为代价函数, 数值越低越好。

2.2.2 禁忌与解禁策略

禁忌策略是通过记忆过程维护一个禁忌表。在搜索过程中, 当算法生成新解时, 检查此解是否与禁忌表中的

优化过程相冲突。若冲突, 则跳过该解, 继续搜索其他解。位于禁忌表中的解不能作为当前可选解或者最优解被再次访问, 以防止出现局部最优解的死循环。

为实现最优解的移动, 在禁忌策略中引入解禁策略。该解禁策略是受模拟退火算法中的接受准则 Metropolis 启发, 以一定的概率接受禁忌解, 在其领域范围内移动, 获得最优可选解。根据需求调整 Metropolis 准则, 具体公式如下:

$$P_{accept} = \log(1 + \frac{x_{calculate}}{x_{best}}) \cdot N_{sum} \quad (19)$$

其中, P_{accept} 是接受概率, N_{sum} 是每一组解的样本数量。

若最优可选解 $x_{calculate}$ 的代价 $f(x_{calculate})$ 优于 $best_so_far$, 则将 $x_{calculate}$ 解禁, 并用 $x_{calculate}$ 替代 x_{best} , $f(x_{calculate})$ 替代 $best_so_far$ 。

2.3 基于旋转卡尺的路径全覆盖算法

基于旋转卡尺的路径全覆盖算法的核心思想是沿着凸多边形的边界旋转一对相对的卡尺, 卡尺在旋转过程中始终保持触碰凸多边形的边, 通过迭代的方式添加路点^[29]。这些路点是通过将直线与目标多边形的边界以及所需的重叠区域相交得到的。在此过程中, 算法不断调整直线的位置, 以确保其与多边形的边界和预期的重叠区域相交, 从而生成一系列路点, 这些路点构成了完整的路径规划。往复法的覆盖率指数高于嵌套法以及嵌套与内螺旋相结合的方法^[30]。该方法可确保路径覆盖多边形的所有重要区域, 并且考虑了作业过程中所需的重叠, 以保证作业的连续性和完整性。

基于旋转卡尺的路径全覆盖算法原理图如图 5 所示。

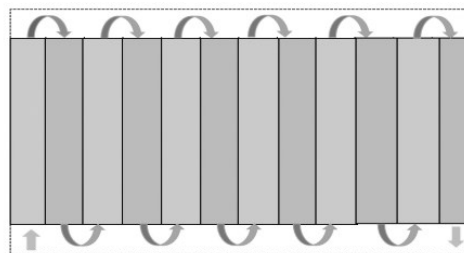


Fig. 5 Schematic diagram of the path full coverage algorithm

图 5 路径全覆盖算法原理图

农业机械从入口进入田间, 田间的工作行宽度相当于机械的工作宽度。机械在地头末端转弯, 开始在相邻行上工作。重复上述操作, 直到剩余的现场区域不满足机械的工作宽度, 最终实现现场路径的全覆盖。

3 算法仿真与数据分析

3.1 仿真条件与参数设置

为验证采用本文多田块全过程路径规划方法的农业机械覆盖路径效果, 利用真实的农田数据和田间作业参数进行仿真实验。实验在 Windows11 操作系统、处理器为 Intel (R) Core(TM) i5-12450H、频率为 2.00 GHz、RAM 为 16 GB

的计算机上进行,编程环境为 MATLAB 2018b。选择经纬度(87.32°E,44.28°N)的区域作为仿真对象,如图1所示。

作业区域由27块农田组成,各田块的数据参数如表1所示。农机数设置为3、4、5。

Table 1 Planar coordinates of each field in the Changji farm topographic map

表1 昌吉农场地形图中各农田平面坐标

农田序号	农田平面坐标/(X-axis, Y-axis)	农田序号	农田平面坐标/(X-axis, Y-axis)
1	(6 137 453.188 571 80, 4 393 078.213 426 60)	15	(6 138 629.443 087 93, 4 393 903.346 302 35)
2	(6 137 438.691 112 16, 4 393 920.717 341 74)	16	(6 138 541.427 859 34, 4 393 478.281 711 72)
3	(6 137 416.908 686 46, 4 394 785.336 095 31)	17	(6 138 371.355 527 03, 4 393 001.548 786 75)
4	(6 137 397.540 985 74, 4 395 638.002 136 04)	18	(6 139 751.128 510 42, 4 392 873.336 315 07)
5	(6 137 432.053 594 11, 4 396 477.458 487 29)	19	(6 140 756.683 067 94, 4 392 806.958 200 04)
6	(6 137 484.366 406 67, 4 397 286.505 200 43)	20	(6 140 815.361 845 91, 4 393 727.903 580 65)
7	(6 137 321.574 695 66, 4 398 066.686 659 97)	21	(6 139 806.430 319 73, 4 393 747.151 527 81)
8	(6 137 257.007 019 06, 4 398 831.440 686 35)	22	(6 139 842.527 761 94, 4 394 340.544 849 70)
9	(6 138 943.035 102 88, 4 398 714.472 955 79)	23	(6 139 984.815 280 25, 4 394 756.757 031 02)
10	(6 138 895.039 358 85, 4 397 954.846 323 67)	24	(6 139 917.926 228 89, 4 395 452.978 568 51)
11	(6 138 844.424 125 09, 4 397 190.719 355 03)	25	(6 139 976.434 230 29, 4 396 301.062 095 75)
12	(6 138 707.977 223 91, 4 396 384.967 742 32)	26	(6 140 029.175 925 17, 4 397 106.806 981 71)
13	(6 138 735.567 210 66, 4 395 535.564 796 02)	27	(6 140 086.409 300 25, 4 397 874.328 338 95)
14	(6 138 676.325 457 73, 4 394 686.706 034 41)		

3.2 KLBA 有效性验证

为验证 KLBA 方法的有效性,在任务数为27,农机数分别为3、4和5的情况下,每组实验独立运行10次,对比 KMA 与 KLBA 单次执行的平均时间和最短时间,结果如表2所示。从表2可以看出,当农机数为3和5时,KLBA 在单次执行的平均时间和最短时间上均优于 KMA,分别减少了7.2%和23.91%;当农机数为4时,优化后算法单次执行的最短时间大于优化前算法的最短时间,但是平均时间减少了26.62%。总体上,KLBA 在执行时间上优于 KMA。

Table 2 Execution time of KLBA

表2 KLBA 执行时间

算法	农机数	单次执行的平均时间/ms	单次执行的最短时间/ms	执行时间减少百分比/%
KMA	3	8.462 9	2.817 0	7.20
KLBA	3	7.853 2	2.686 0	
KMA	4	7.439 4	2.508 0	26.62
KLBA	4	5.459 1	3.149 0	
KMA	5	4.404 9	2.433 0	23.91
KLBA	5	3.351 5	2.178 0	

3.3 HTSS 有效性验证

在与上述相同的条件下,每组实验独立运行20次,对比改进前后禁忌搜索算法的平均路径,结果如表3所示。从表3可以看出,随着农机数的增加,单次执行的平均路径减少比例下降。因为农机数较少时,每台农机执行的任务较多,在任务序列规划时复杂度较高,搜索空间较大,更能体现改进后算法的搜索能力。优化后的算法在平均路径上减少了6.68%~21.31%。

3.4 农机任务规划算法有效性验证

3.4.1 算法性能比较

为验证农机任务规划算法的有效性,在任务数一定、农机数不同的情况下,验证农机数对农机任务规划算法的影响。每组实验独立运行20次取平均值,结果如表4所

Table 3 Average path length of HTSS

表3 HTSS 平均路径

算法	农机数	单次执行的平均路径/m	总路径减少百分比/%
TSA	3	50 417.88	21.31
HTSS	3	39 673.47	
TSA	4	50 534.16	14.67
HTSS	4	43 121.38	
TSA	5	50 765.59	6.68
HTSS	5	47 280.89	

示。通过定义评价算法性能的变量 D 来评估算法优劣, $D = (other_best - our_best) / other_best$ 。其中, $other_best$ 代表其他算法中的最优解, our_best 代表本文提出算法的最优解。如果 $D > 0$, 代表本文算法的性能优于其他最优算法, 数值的大小代表性能的优越程度。从表4可以看到, 本文算法与改进的人工蜂群算法(Artificial Bee Colony Algorithm, ABC)^[31]、蚁群算法(Ant Colony Algorithm, ACO)^[15]、鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)^[32]相比, 在平均路径上提升了8.4%~9.88%。

任务数一定, 4种不同算法均使用 K-Means 进行预均衡分配, 验证分配均衡情况下不同算法的性能。每组实验独立运行20次取平均值, 结果如表5所示。从结果中可以看出, 农机数分别为3、4时本文算法的性能优于其他算法, 5台农机协同作业时性能相比遗传算法(Genetic Algorithm, GA)差0.54%。总体而言, 本文算法的性能较优。

3.4.2 负载分配均衡对比

在上述相同的条件下, 对比不同算法中每台农机执行任务的负载能力。定义了平衡度 δ 进行评估, $\delta = (S_l - S_d) / S_l$ 。其中, S_l 代表多机协同作业中各农机中最大的农机负载能力, S_d 代表各农机中最小的农机负载能力。 δ 越大, 表示各农机负载越不均衡。3、4、5台农机的负载均衡结果分别如表6—表8所示。

Table 4 Comparison of algorithm performance with different numbers of agricultural machines

表 4 不同农机数下算法性能比较						
任务数	农机数	ABC	ACO	WOA	WPP	D/%
27	3	66 232.948 47	49 430.494 34	43 668.949 78	39 673.470 00	9.15
	4	68 933.121 09	56 394.853 65	47 847.913 26	43 121.380 00	9.88
	5	70 921.080 27	61 461.640 00	51 615.090 00	47 280.889 88	8.40

Table 5 Comparison of algorithm performance under balanced allocation

表 5 分配均衡情况下算法性能比较						
任务数	农机数	K_ACO	K_GA	K_WOA	WPP	D/%
27	3	40 181.41	44 746.25	40 940.04	39 673.47	1.26
	4	43 385.26	44 298.24	43 777.36	43 121.38	0.60
	5	47 249.59	47 024.92	47 160.84	47 280.89	-0.54

Table 6 Load balance ratio for 3 farm machinery operations

表 6 3台农机作业的负载平衡比						
算法	农机数	最优路径/m	第1台农机覆盖面积/m ²	第2台农机覆盖面积/m ²	第3台农机覆盖面积/m ²	δ/%
ABC	3	55 862.00	7 616 066.80	1 827 153.50	2 061 571.70	76.01
ACO	3	38 634.05	10 488 590.60	496 178.90	520 022.50	95.27
WOA	3	43 080.08	4 559 600.00	4 664 380.10	2 280 811.90	51.10
WPP	3	36 998.87	3 941 192.40	3 990 247.70	3 573 351.90	10.45

Table 7 Load balance ratio for 4 farm machinery operations

表 7 4台农机作业的负载平衡比							
算法	农机数	最优路径/m	第1台农机覆盖面积/m ²	第2台农机覆盖面积/m ²	第3台农机覆盖面积/m ²	第4台农机覆盖面积/m ²	δ/%
ABC	4	57 347.00	10 568 048.00	74 617.10	422 692.20	439 434.70	99.29
ACO	4	47 803.04	9 136 009.60	520 022.50	1 155 585.60	693 174.30	94.31
WOA	4	50 979.43	5 783 323.10	4 574 692.50	650 597.50	496 178.90	91.42
WPP	4	39 181.38	2 840 192.90	2 988 773.70	2 991 966.80	2 683 858.60	10.30

Table 8 Load balance ratio for 5 farm machinery operations

表 8 5台农机作业的负载平衡比								
算法	农机数	最优解	第1台农机覆盖面积/m ²	第2台农机覆盖面积/m ²	第3台农机覆盖面积/m ²	第4台农机覆盖面积/m ²	第5台农机覆盖面积/m ²	δ/%
ABC	5	58 923.00	9 995 959.20	408 712.30	317 950.10	439 434.70	342 735.70	96.82
ACO	5	47 954.70	10 012 140.30	497 309.30	189 182.20	317 950.10	488 210.10	98.11
WOA	5	52 057.03	5 669 534.40	3 887 072.40	497 763.80	520 022.50	930 398.90	91.22
WPP	5	45 846.38	2 275 146.30	2 161 147.50	2 397 490.30	2 448 774.20	2 222 233.70	11.75

针对新疆农田进行任务分配和路径规划,新疆农田面积较大,一般一块农田面积在30~60万m²不等,如果以农机作业数量来评价均衡情况是不合理的。从表6—表8可以看出,不论是几台农机作业,本文算法相比其他算法,平衡度提升了40.65%~79.47%。在3台农机规划使用的ACO算法、4台农机以及5台农机规划使用的ABC、ACO、WOA算法中,平衡度指标在90%以上。其主要原因是在任务分配过程中,有一台农机完成了大部分任务,剩余农机分别执行一个作业任务,不符合有限资源合理调度及利用的要求。

为了更直观地表现本文提出的任务分配算法在负载均衡上具有良好性能,通过柱状图描述不同算法在不同农机数下的负载平衡比,如图6所示。从整体上看,采用本文算法时,各农机负载差异小,平衡性更好。

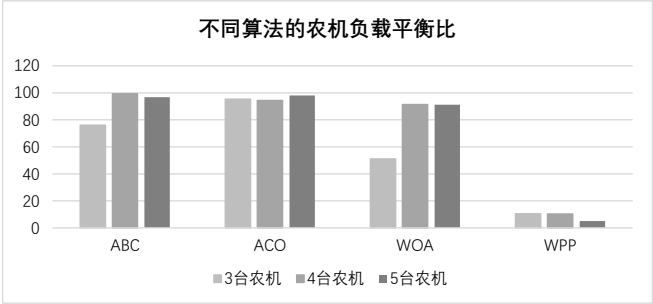


Fig. 6 Load balance ratio of agricultural machinery using different algorithms

图6 不同算法的农机负载平衡比

4 多农机全过程路径规划

4.1 多农机分配

为切实解决新疆昌吉农场大面积作业的问题,对图1

中的 27 块农田进行作业分配与规划。目前大多数研究使用 3 台套农机规划各农场,但考虑到所构建的农场规模较大,本文使用 5 台套农机完成昌吉农田作业,具体分配任务如表 9 所示。农机按照最短路径就近完成相邻任务,且每台农机的任务数也较均衡。

4.2 全过程路径规划

根据表 9 中每台农机分配的任务对每块农田内部进行路径规划,通过对一组任务中各农田最优出入口的选择,实现对每台农机的全过程路径规划。如图 7 所示,每

Table 9 Task allocation results of 5 agricultural machines

表 9 5 台农机任务分配结果

农机序号	任务数	分配结果
1	27	5→7→8→6
2		26→12→11→10→9→27
3		25→24→23→14→13
4		16→17→1→2→3→4
5		22→15→18→19→20→21

台农机按照作业顺序依次完成各自的任務。

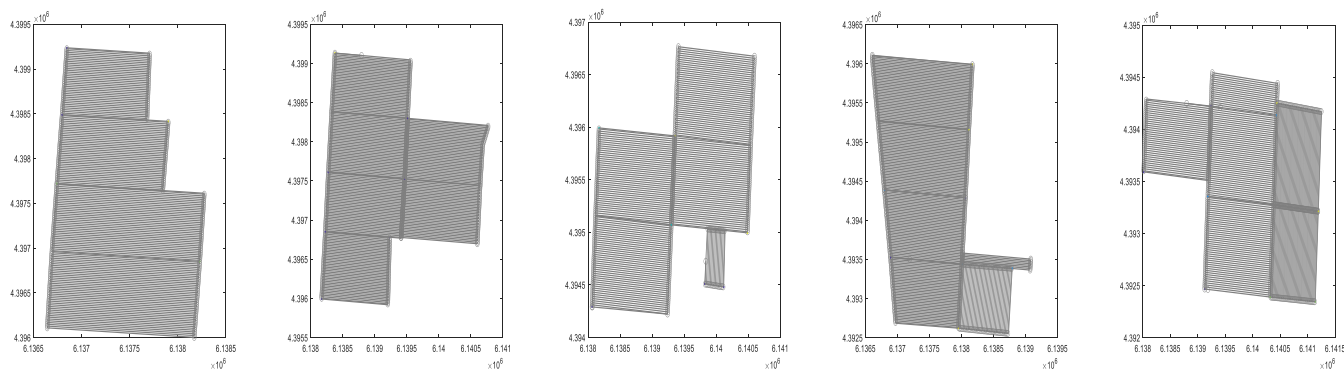


Fig. 7 Route planning for 5 agricultural machines

图 7 5 台农机路径规划

5 结语

本文通过全过程规划算法实现多台农机的调度和作业路线,不仅使每台农机调度均衡,而且减少了调度路径长度,从而达到节约操作成本、提高作业效率的目的。

(1)针对新疆单块农田面积大的特点,本文提出的 KLBA 方法解决了多台农机负载不均衡问题,避免了一台农机因工作量过大导致机械频繁受损的现象,从而实现资源的有效利用。

(2)本文提出的 HTSS 调度策略降低了农机作业成本。为完成田内耕地操作,使用 RCPP 进行路径全覆盖,实现了智能作业规划。

(3)构建了昌吉农场拓扑图,便于 MATLAB 仿真测试。实验结果证明了本文算法的有效性,并以 5 台农机为例,实现了全过程路径规划。

本文为多台农机协作完成大量任务提供了理论模型和有效算法,对实现智慧农业具有重要意义。但是,农机的作业环境复杂多变,需要进一步考虑农田中存在障碍物时农机的作业路线规划。无人农机的使用具有较强的季节性,因而造成机器的利用率较低,增加了机器的使用成本。因此,应进一步考虑跨区域的农机调度问题。此外,农机在转移作业路线中存在穿过农田的问题也是需要深入研究的。

参考文献:

- [1] BECKMAN J, COUNTRYMAN A M. The importance of agriculture in the economy: impacts from COVID-19[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2021, 103(5): 1595-1611.
- [2] REHMAN U, IQBAL T, HUSSAIN S, et al. Drone and robotics roadmap for agriculture crops in Pakistan: a review[C]// Rawalpindi: International Precision Agriculture Pakistan Conference, 2022.
- [3] LI D L, LI Z. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12.
李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.
- [4] GOEL R K, YADAV C S, VISHNOI S, et al. Smart agriculture—urgent need of the day in developing countries[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2021, 30: 100512.
- [5] KOSHARIYA A K, KALAIYARASI D, JOVITH A A, et al. AI-enabled IoT and WSN-integrated smart agriculture system [M]. New York: IGI Global Scientific Publishing, 2023.
- [6] SHUTSKE J M, SANDNER K J, JAMIESON Z. Risk assessment methods for autonomous agricultural machines: a review of current practices and future needs [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2023, 39 (1): 109-120.
- [7] NØRREMARK M, NILSSON R S, SØRENSEN C A G. In-field route planning optimisation and performance indicators of grain harvest operations[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1151.
- [8] CONESA-MUÑOZ J, BENGOCHEA-GUEVARA J M, ANDUJAR D, et al. Route planning for agricultural tasks: a general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 204-220.

- [9] FAN W, SU Y, LIU J, et al. Joint task offloading and resource allocation for vehicular edge computing based on V2I and V2V modes [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(4): 4277–4292.
- [10] QAMA R A, SARFRAZ M, RAHMAN A, et al. Multi-criterion multi-UAV task allocation under dynamic conditions [J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2023, 35(9): 101734.
- [11] WU X, YIN Y, XU L, et al. Multi-UAV task allocation based on improved genetic algorithm [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 100369–100379.
- [12] ZHANG X, CHEN X. UAV task allocation based on clone selection algorithm [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1: 1–9.
- [13] MARTIN J G, MUROS F J, MAESTRE J M, et al. Multi-robot task allocation clustering based on game theory [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 161: 104314.
- [14] LIU G M, LI C H, LI Y D, et al. Local path planning of robot based on improved PPO algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2023, 49(2): 119–126, 135.
刘国名, 李彩虹, 李永迪, 等. 基于改进PPO算法的机器人局部路径规划 [J]. *计算机工程*, 2023, 49(2): 119–126, 135.
- [15] CAO R Y, LI S C, JI Y H, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(S1): 34–39.
曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(S1): 34–39.
- [16] CAO R Y, LI S C, JI Y Y, et al. Task assignment of multiple agricultural machinery cooperation based on improved ant colony algorithm [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 105993.
- [17] LIANG Y J, ZHOU K, WU C C. Dynamic task allocation method for heterogeneous multiagent system in uncertain scenarios of agricultural field operation [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2022, 2356(1): 012049.
- [18] HUANG H, CUAN X, CHEN Z, et al. A multiregional agricultural machinery scheduling method based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. *Agriculture*, 2023, 13(5): 1042.
- [19] ZHOU K, JENSEN A L, SØRENSEN C G, et al. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 109: 12–22.
- [20] YANG F, FANG X, GAO F, et al. Obstacle avoidance path planning for UAV based on improved RRT algorithm [DB/OL]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/4544499>.
- [21] FENG K, HE X N, WANG M L, et al. Path optimization of agricultural robot based on immune ant colony: B-spline interpolation algorithm [DB/OL]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/2585910>.
- [22] BOCHTIS D, GRIEPENTROG H W, VOUGIOUKAS S, et al. Route planning for orchard operations [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 113: 51–60.
- [23] NILSSON R S, ZHOU K. Method and bench-marking framework for coverage path planning in arable farming [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 198: 248–265.
- [24] SHANG G G, LIU G, ZHU P, et al. Complete coverage path planning for horticultural electric tractors based on an improved genetic algorithm [J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2021, 24(3): 447–456.
- [25] HAN Y L, SHAO M, WU Y Z, et al. An improved complete coverage path planning method for intelligent agricultural machinery based on backtracking method [J]. *Information*, 2022, 13(7): 313.
- [26] MURUGAPPAN E, SUBRAMANIAN N, RAHMAN S, et al. Performance analysis of clustering methods for balanced multi-robot task allocations [J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(14): 4576–4591.
- [27] LU L C, YUE T W. Mission-oriented ant-team ACO for min-max MTSP [J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 76: 436–444.
- [28] MURUGAPPAN E, SUBRAMANIAN N, RAHMAN S, et al. Performance analysis of clustering methods for balanced multi-robot task allocations [J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(14): 4576–4591.
- [29] VASQUEZ-GOMEZ J I, MARCIANO-MELCHOR M, VALENTIN L, et al. Coverage path planning for 2D convex regions [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2019, 97(1): 81–94.
- [30] WANG N, YANG X, WANG T H, et al. Collaborative path planning and task allocation for multiple agricultural machines [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108218.
- [31] LI R, XU H, YANG J F, et al. Improved algorithm of near-neighbor artificial bee colony for flexible job shop scheduling [J]. *Application Research of Computers*, 2024, 41(2): 438–443.
李瑞, 徐华, 杨金峰, 等. 改进近邻人工蜂群算法求解柔性作业车间调度 [J]. *计算机应用研究*, 2024, 41(2): 438–443.
- [32] FANG S, RU Y, HU C, et al. Planning the temporary takeoff/landing site's location for a pesticide spraying helicopter based on an intelligent fusion algorithm [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 209: 107826.

(责任编辑: 黄 健)