

基于能耗模型与 HHO 算法的混动采棉机作业路径规划

沈 跃^{1,2} 张蓝珂¹ 温浩军³ 杨 锋¹ 刘 慧¹

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学智能农机装备理论与技术重点实验室, 镇江 212013;
3. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 823003)

摘要: 为解决在新疆棉田环境下混动采棉机作业路径难以实地规划, 优化混动采棉机在各棉田块中不同行驶角度下作业能耗, 以及其在棉田块间转移序列差异化导致的能耗浪费等问题, 本文研究了一种基于能耗模型与哈里斯鹰优化 (Harris hawks optimization, HHO) 算法的作业路径规划方法。通过易于获取的高精度电子地图结合采棉机在棉田块边界处采收需求, 构建并校准符合实际作业需求的棉田模型。分析混动采棉机动力特性及整机参数, 并考虑转弯模式与能耗量化关系, 构建以作业总能耗为优化目标的棉田块内混动采棉机作业能耗模型。引入基于距离矩阵的贪婪启发式策略及非线性能量衰减因子解决哈里斯鹰优化算法在求解转移序列时存在的原生缺陷, 合理消除转移序列中冗余路径产生的能耗浪费。试验结果表明, 加入能耗模型后混动采棉机作业能耗降低率达 42.80%、路径长度降低率达 51.13%、生产效率提升率达 44.02%; 改进 HHO 算法后求解的转移序列路径降低率达 6.13%, 验证了所提作业路径规划方法的有效性。

关键词: 混动采棉机; 路径规划; 能耗模型; HHO 算法

中图分类号: S225.91 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)10-0010-12

OSID: 

Hybrid Cotton Picker Operation Path Planning Based on Energy Consumption Model and HHO Algorithm

SHEN Yue^{1,2} ZHANG Lanke¹ WEN Haojun³ YANG Feng¹ LIU Hui¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Key Laboratory for Theory and Technology of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 823003, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficult on-site planning of the hybrid cotton picker's operation paths in the cotton field environment in Xinjiang, optimize the operation energy consumption of the hybrid cotton picker under different driving angles in each cotton field, as well as the waste of energy consumption caused by the differentiation of their transfer sequences between cotton fields, a method of operation path planning based on energy consumption model and Harris hawks optimization algorithm was investigated. The cotton field model that met the actual operation requirements was constructed and calibrated by combining the easily accessible high-precision electronic map with the harvesting requirements of the cotton picker at the boundary of the cotton field. The dynamic characteristics and machine parameters of the hybrid cotton picker were analyzed, and the quantitative relationship between the turning mode and energy consumption was considered to construct the operation energy consumption of the hybrid cotton picker in the cotton field with the operation direction angle as the only optimization target. The greedy heuristic strategy based on the distance matrix and the nonlinear energy attenuation factor were introduced to solve the original defects of the Harris hawks optimization algorithm in solving the transfer sequence, and the energy waste caused by the redundant paths in the transfer sequence was reasonably eliminated. Experimental results showed that the hybrid cotton picker's operating energy consumption was reduced by 42.80%, the path was reduced by 51.13%, and the production efficiency was increased by 44.02% after the energy consumption model was added; the improved HHO algorithm reduced the path length of the transition sequence by 6.13%, which verified the good effect of the proposed operation path planning method.

Key words: hybrid cotton picker; path planning; energy consumption model; HHO algorithm

收稿日期: 2025-09-10 修回日期: 2025-12-24

基金项目: 江苏大学农业工程学部项目 (NGXB20240102)

作者简介: 沈跃(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无人农机和农业机器人智能控制研究, E-mail: shen@ujs.edu.cn

0 引言

新疆是我国最重要的棉花生产基地^[1],其大型棉田自动化采收效率与农机能源消耗密切相关^[2-3]。混动采棉机凭借高效作业能力已成为新疆棉区的主力采收设备^[4-5],但在实际作业中仍面临诸多挑战。新疆棉田普遍面积广阔、形状多样^[6],采棉机需预设合理的作业路径及跨地块转移序列^[7],以减少无效行驶带来的能耗损失。与传统燃油机型不同,混动采棉机动力系统具有独特能耗特性,现有以路径长度为优化目标的能耗模型^[8-11]难以准确反映其实际能耗情况。多样的地块边界条件与转弯模式进一步增加了作业能耗优化复杂度。目前,求解跨地块转移序列的主流方法为启发式算法与深度学习算法。文献[12]基于排序的轮盘赌策略改进遗传算法,提升了全局排序质量,但计算开销大、收敛速度较慢;文献[13]基于蚁群与 2-opt 的混合算法,提升了搜索能力,但算法约束条件较多;文献[14]提出增强型交换序列 PSO 算法,采用多策略改进求解质量,但其性能受随机性影响较大;文献[15]提出增强列表模拟退火算法,优化了大规模问题求解效率,但全局探索能力有限,局部搜索方式较为单一;文献[16]改进蚁群算法的信息素与角度因子,提升了求解精度,但对环境适应性较弱;文献[17-19]基于深度神经网络实现快速求解,但依赖大量训练数据,在未知场景中泛化能力不足。哈里斯鹰优化算法因结构简单、参数调节灵活、收敛迅速、具备动态调整全局与局部搜索的能力,且无需训练数据,避免了上述部分算法的缺陷。然而,该算法仍存在初始解选取具有随机性^[20]、线性收敛的迭代因子^[21-23]易导致搜索过程中全局与局部比例失衡等问题。

本文以新疆大型棉田为研究对象,针对混动采棉机作业路径规划问题展开研究。通过构建高精度电子地图^[24]并优化地块边界,建立贴近实际作业的棉田模型;分析混动采棉机能耗特性,建立 5 种典型转弯模式路径长度与能耗的量化关系,构建以作业总能耗为优化目标、涵盖作业与转移能耗的综合能耗模型;引入基于距离矩阵^[25]的贪婪启发式策略及非线性能量衰减因子,改进 HHO 算法在求解转移序列中的不足。最后,验证改进后 HHO 算法与能耗模型在采棉试验中的有效性,以形成混动采棉机高效能作业路径规划方案。

1 作业模型构建

1.1 作业地图构建

以 Google Earth 获取位于目标作业区域的棉田

遥感影像(47°03'N,87°20'E),利用 QGIS 中高密度采样方式对其进行裁剪,得到包含面状要素的各棉田块轮廓采样点。为精确构建各棉田块轮廓,对采样点进行拓扑检查,剔除孤立点与重复点。在 Matlab 中对处理后的采样点逐点标记并线性拟合,对拟合后的拐点进行平滑优化,得到棉田块轮廓经纬度坐标。将经纬度坐标转换为棉田块相对位置的精确轮廓坐标,并内缩棉田块边界轮廓为种植区域边界轮廓。图 1 为新疆棉田块种植区域电子地图和边界轮廓图。

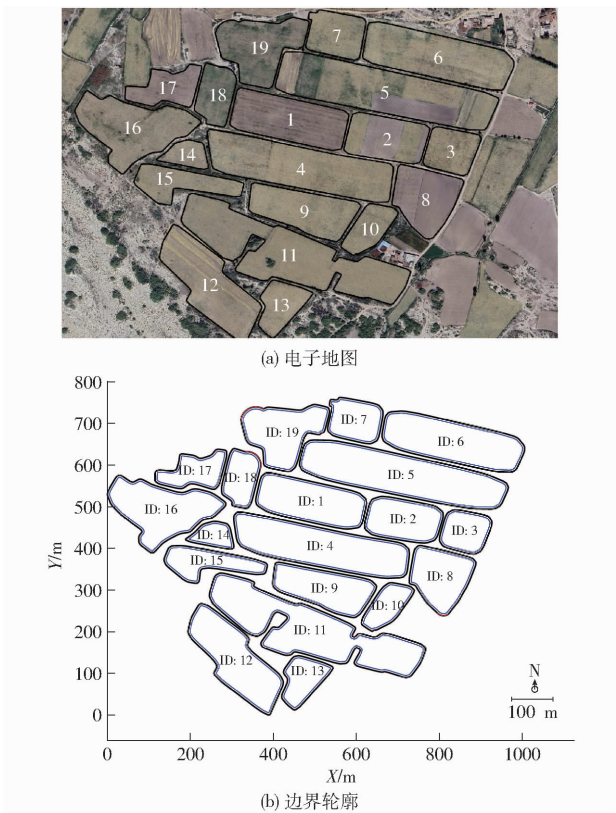


图 1 新疆棉田块种植区域电子地图和边界轮廓

Fig.1 Electronic map and boundary outline of cotton field planting area in Xinjiang

1.2 单个棉田块作业地图校准

在棉田种植中常常会对农田边缘留空,留空操作可显著降低病虫害从边缘蔓延至主作物的几率,依据棉田种植农艺要求,本文设为 20 cm^[26-28]。电子地图在获取边界时往往存在偶然误差,特别是在高精度作业任务中,因此需对电子地图边界等距内缩 0.25 m,得到更为保守的棉田种植区域边缘轮廓,如图 2 中外轮廓线。另外由于混动采棉机的转弯约束,需对棉田块的种植区域边缘轮廓再次进行内缩优化,最小内缩距离为混动采棉机最小转弯半径 4.8 m,以预留出掉头区域,此区域作为机械转弯带,避免碾压作物或因空间不足产生非计划压茬区。以 ID16 田块为例,设原始边界为多边形 O ,定义等

距内缩操作为负缓冲区操作,一次等距内缩为缓冲区处理 O_1 和二次等距内缩为机械转弯区 O_2 为

$$O_1 = O - D_1 \quad (1)$$

$$O_2 = O_1 - D_2 \quad (2)$$

式中 D_1 ——缓冲区等距内缩距离

D_2 ——机械转弯区等距内缩距离

得到最终棉田块作业区域轮廓,如图2所示。

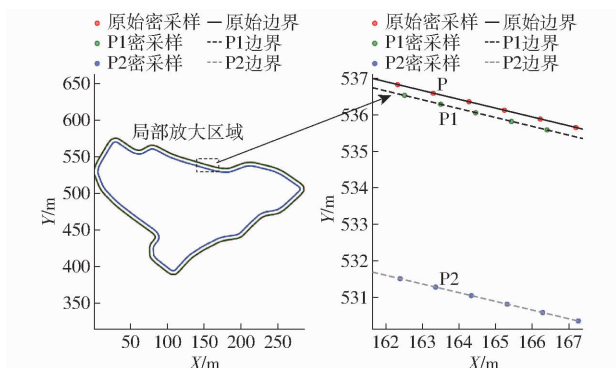


图2 单田块内缩后边界

Fig. 2 Shrinkage boundary of single field block

1.3 转弯模式选择

农用工具中常见的转弯模式^[29]包括鱼尾形、U形、弓形、Ω形及钩形5种,转弯模式选择受机具最小转弯半径、作业宽度等条件约束。当机具转弯半径大于其1/2作业宽度时选择鱼尾形、Ω形或钩形;否则选择弓形或U形,如图3所示。

其中绿色阴影部分为作业区域,蓝色阴影为未受转弯约束的未作业区域,红色阴影为受转弯约束未作业区域,不同转弯方式转弯路径长度分别为 $l_a \sim l_e$,计算式为

$$\begin{cases} l_a = (\tan\theta - 1)\omega + (\pi + 2)R \\ l_b = \omega(\tan\theta + \pi/2) \\ l_c = (\tan\theta + 1)\omega + (\pi - 2)R \\ l_d = 2\omega\tan\theta + R[\pi + 4\arccos(0.5 + \omega/(4R))] \\ l_e = \omega\tan\theta + R(\pi + 2K + 2\sin K) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $K = \arccos(\omega/(2R))$

式中 ω ——机具作业宽度, m

R ——机具最小转弯半径, m

θ ——机具行驶方向与边界夹角, ($^\circ$)

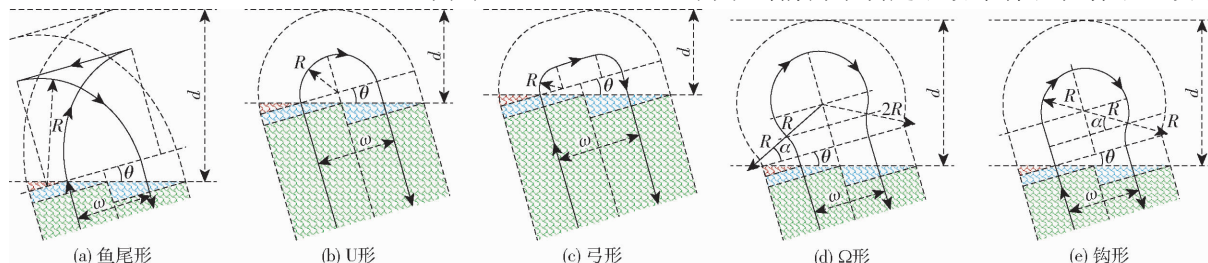


图3 混动采棉机可行转弯模式

Fig. 3 Feasible turning modes of hybrid cotton picker

最短转弯路径长度为U形 l_b , 最大路径长度为鱼尾形 l_a 。本研究采棉机作业宽度为5.3 m, 最小转弯半径为4.8 m, 采棉机最小转弯半径明显远大于其1/2作业宽度, 同时由于采棉机转弯半径可人为调节, 理论上可采用鱼尾形、Ω形与钩形转弯方式。但在棉田实际采收活动中, 为缩短转弯路径长度以及避免频繁转弯与倒车等操作, 采用Ω形转弯方式。

1.4 能耗模型构建

1.4.1 单次转弯能耗

为量化采棉机在不同转弯模式下的能耗, 忽略棉田地势坡度及轮胎滑移, 转弯能耗考虑沿转弯路径前进所克服地面摩擦力的非线性位移能耗和转弯过程中的附加能耗。单次转弯总能耗为

$$E_{\text{turn}}^{(\xi)} = Fl_{\xi} + E_{\text{extra}}^{(\xi)} \quad (\xi = a, b, c, d, e) \quad (4)$$

其中

$$F = \mu G = \mu mg \quad (5)$$

式中 F ——采棉机转弯过程中所受摩擦力

$E_{\text{extra}}^{(\xi)}$ ——转向附加能耗项

l_{ξ} ——某次转弯模式下距离代价

μ ——动摩擦因数, 取0.3

m ——采棉机质量

转弯过程附加能耗主要来源于采棉机执行转向操作时, 电控控制系统对方向变化指令的响应功耗。车辆在转向过程, 转向马达、电控单元或液压执行系统需持续输出功率, 以调整前轮方向并维持转向角变化; 同时, 车辆重心惯性动态调整过程亦对系统施加附加负载。因此, 转向附加能耗本质上取决于方向角变化的“速率剧烈程度”与“控制系统响应强度”的叠加效应。为量化该附加能耗, 可将路径离散划分为若干转向段, 即

$$E_{\text{extra}}^{(\xi)} = \gamma v_{\text{turn}}^2 \sum_{c=1}^{n_{\xi}} \left(\frac{\Delta\kappa_c}{\Delta s_c} \right)^2 \Delta s_c \quad (6)$$

式中 $\Delta\kappa_c$ ——相邻转弯段的曲率变化量

Δs_c ——第 c 段转弯路径长度

v_{turn} ——采棉机平均转向速度

γ ——系统能耗因子, 取 $3000 \text{ J} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^3$

n_{ξ} ——第 ξ 种转弯模式曲率变化段总数

1.4.2 转弯次数

由于当前尚未确定混动采棉机在各子田块最佳

行驶方向角以及混动采棉机转移序列坐标,无法判断实际转弯次数。故设其内部转弯次数 R_m 为

$$R_m = r_m - 1 \quad (7)$$

对于编号为 $m = 1, 2, \dots, 19$ 的子田块,其在某一作业方向角下内部作业行数 r_m 为

$$r_m = \left\lfloor \frac{W_m(\lambda_m)}{\omega} \right\rfloor \quad (8)$$

式中 $W_m(\lambda_m)$ ——子田块在方向角的投影宽度
 λ_m ——作业方向角

采棉机子田块间转移时,若涉及转弯动作(非直线),则记录一次跨田块转弯,整个转移序列转弯次数 R_{inter} 为

$$R_{\text{inter}} = \sum_{m=1}^{18} \delta_m \quad (9)$$

其中 $\delta_m = \begin{cases} 0 & (\text{不需要转弯}) \\ 1 & (\text{需要转弯}) \end{cases} \quad (10)$

总转弯次数 R_{turn} 为

$$R_{\text{turn}} = \sum_{m=1}^{19} R_m + R_{\text{inter}} \quad (11)$$

1.4.3 采棉作业能耗

对于每个子田块 m ,其坐标点集由若干个二维坐标点组成。坐标点 (x_{mn_m}, y_{mn_m}) 表示第 m 个子田块的第 n 个坐标点。具体地,第 m 个子田块坐标点集可表示为 1 组向量集合 P_m ,即

$$P_m = \left\{ \begin{pmatrix} x_{m1} \\ y_{m1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{m2} \\ y_{m2} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} x_{mn_m} \\ y_{mn_m} \end{pmatrix} \right\} \quad (12)$$

式中 n_m ——子田块 m 内的坐标点序号

每个子田块坐标点集包含 n_m 个坐标点,则所有子田块坐标点集 A 为

$$A = \{P_1, P_2, \dots, P_{19}\} \quad (13)$$

通过 QGIS 软件中高密度采样方式提取出边界采样点,经转换后得到棉田块相对位置精确轮廓坐标,将其映射入 A 中进行实例化。

在作业方向角下单位向量及与其垂直的单位向量为

$$d_m = (\cos \lambda_m, \sin \lambda_m) \quad (14)$$

$$d_m^\perp = (-\sin \lambda_m, \cos \lambda_m) \quad (15)$$

将边界点集 A 投影至垂直方向 $d_m^\perp$,计算投影区间 $[\ell_{\min}, \ell_{\max}]$ 为

$$\ell_{\min} = \min_j (P_{mj} d_m^\perp) \quad (16)$$

$$\ell_{\max} = \max_j (P_{mj} d_m^\perp) \quad (17)$$

式中 P_{mj} ——向量集合 P_m 第 j 个向量, $j = 1, 2, \dots, n_m$

在作业方向角下采棉机作业路径直线方程为

$$x d_m^\perp = \ell_h \quad (h = 0, 1, 2, \dots, r_m - 1) \quad (18)$$

$$\ell_h = \ell_{\min} + (h + 1/2) \omega \quad (19)$$

式中 ℓ_h ——第 h 条路径垂直方向投影值

每条路径 L_h 与子田块边界点集 A 相交。边界每一条线段可用两点确定,即

$$e_j = [P_{mj}, P_{m(j+1)}] \quad (20)$$

$$P_{mj} = (x_j, y_j) \quad (21)$$

对于每条路径 L_h ,将其与线段 e_j 联立,计算出交点 $Q_1^{(h)}$ 和 $Q_2^{(h)}$,并计算交点欧几里得距离 $l_h(\lambda_m)$ 为作业路径长度,即

$$l_h(\lambda_m) = \|Q_1^{(h)} - Q_2^{(h)}\| \quad (22)$$

每条路径作业能耗 $E_{\text{work}}^{(m)}(\lambda_m)$ 为

$$E_{\text{work}}^{(m)}(\lambda_m) = \frac{P_0}{v} \sum_{j=0}^{r_m-1} l_h(\lambda_m) \quad (23)$$

式中 P_0 ——采棉机标定功率

v ——作业速度

1.4.4 采棉作业总能耗

采棉作业中总能耗包含转弯过程中非线性位移能耗与附加能耗及采棉作业能耗,即

$$E_{\text{total}}^{(m)}(\lambda_m) = E_{\text{work}}^{(m)}(\lambda_m) + \sum_{\xi=a}^e R_m^{(\xi)} E_{\text{turn}}^{(\xi)} \quad (24)$$

式中 $R_m^{(\xi)}$ ——不同转弯模式对应转弯路径数量

2 子棉田作业路径规划

2.1 子棉田内作业方式

根据采棉机行驶规律与田块地形特征,常见的路径行驶方式主要包括开垄式、梭形式、集合式以及迂回式,如图 4 所示。

混动采棉机采棉作业时,子田块边界条件、采棉机工作状态尺寸以及最小转弯半径等参数对路径行驶方式具有很强的约束前置。基于上述条件分析,采用梭形式对棉田进行作业遍历,在兼顾采棉机本体与棉田参数约束的同时,尽可能地最大化遍历棉田。

2.2 作业路径规划性能评价指标

为验证所提能耗模型在降低总作业能耗的优势,设计 3 个关键性能指标:路径长度降低率 K_R 、能耗降低率 K_E 、生产效率提升率 K_T ,计算式为

$$\begin{cases} K_R = (R_{\max} - R_{\min}) / R_{\max} \times 100\% \\ K_E = (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\max} \times 100\% \\ K_T = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max} \times 100\% \end{cases} \quad (25)$$

式中 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ ——最长、最短作业路径, m

$E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ ——作业中最大、最小能耗, J

$T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ ——最长、最短作业时间, s

3 子棉田作业顺序优化策略

在实际作业中,采棉机需在棉田块间转移,优化

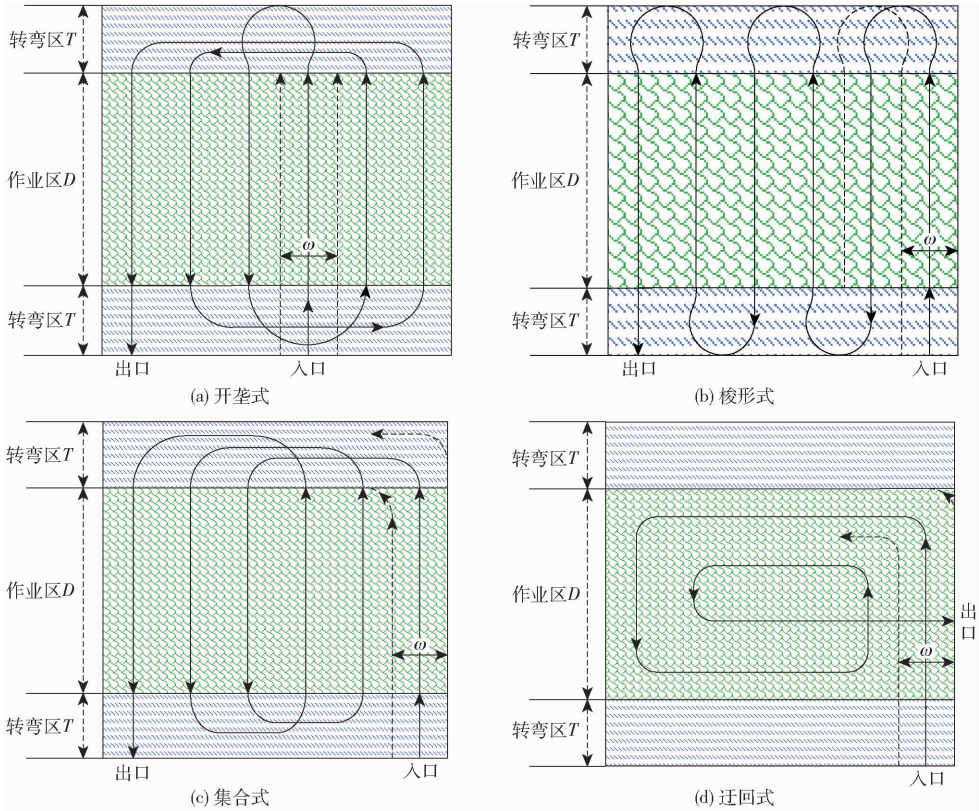


图 4 混动采棉机路径行驶方式

Fig. 4 Path driving modes of hybrid cotton picker

转移顺序,最小化总作业距离和能耗,成为提升作业效率的关键问题。其本质与旅行商问题^[30] (Traveling salesman problem, TSP)类似,目标是找到最短的路线覆盖所有节点(子田块),转为旅行商问题,并采用基于改进哈里斯鹰优化算法以求解最佳转移序列。

3.1 哈里斯鹰优化算法

哈里斯鹰优化算法是一种基于生物群体智能的优化算法,模拟哈里斯鹰捕猎行为,如图 5 所示。

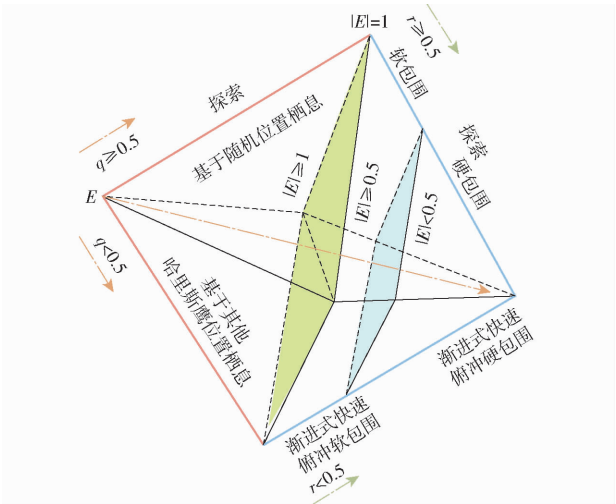


图 5 哈里斯鹰优化算法示意图

Fig. 5 Diagram of HHO algorithm

当种群规模为 N 时,根据猎物逃逸能量 $E(t)$ 为

$$E(t) = E_0 E_1(t) \tag{26}$$

其中
$$E_1(t) = 2(1 - t/T) \tag{27}$$

式中 E_0 ——猎物初始逃逸值
 $E_1(t)$ ——线性能量衰减因子
 t, T ——目标迭代次数、最大迭代次数

将其划分为探索、探索与开发转换、开发 3 阶段。在开发阶段,哈里斯鹰根据猎物逃脱几率和 $E(t)$ 作出 4 种策略:软包围、硬包围、渐进式快速俯冲软包围和渐进式快速俯冲硬包围^[31]。当 $t = T$ 时,输出当前最优解;否则继续搜索。

3.2 改进哈里斯鹰优化算法

3.2.1 基于距离矩阵的贪婪启发式策略

HHO 算法采用随机初始化方式生成种群个体的位置向量,缺乏启发性信息指导,易导致算法陷入低效探索。为此引入一种基于距离矩阵的贪婪启发式初始化策略。通过距离矩阵衡量解空间中各个个体之间的相似性关系,采用贪婪启发式策略,从中逐步选择距离最近的个体构建序列。生成初始个体保持较好的结构性,目标函数值较优,作为初始种群的一部分,引导算法在初期阶段更快收敛到优质解域。

在解空间内随机生成 M_0 个候选个体集合 X_{raw} , 即

$$X_{\text{raw}} = \{X_1, X_2, \dots, X_{M_0}\} \quad (M_0 > N) \tag{28}$$

为度量候选个体间的相对位置关系,生成距离

矩阵 $D \in \mathbf{R}^{M_0 \times M_0}$, 每个元素 $D(i, j)$ 为个体 X_i 与 X_j 间的欧氏距离, 计算式为

$$D(i, j) = \|X_i - X_j\|_2 = \sqrt{\sum_{d=1}^D (x_{id} - x_{jd})^2} \quad (29)$$

式中 x_{id}, x_{jd} ——第 i, j 个个体在第 d 维上的坐标值
从 X_{raw} 中随机选取个体 X_{s_1} 作为种群第一个成员。采用贪婪策略, 从剩余候选集中逐步选择与当前已选个体集合最接近的个体, 直到生成 N 个初始解。设当前已选中的前 k 个个体集合为 S_k , 即

$$S_k = \{X_{s_1}, X_{s_2}, \dots, X_{s_k}\} \quad (30)$$

第 $k+1$ 个个体 $X_{s_{(k+1)}}$ 的选择规则为

$$X_{s_{(k+1)}} = \arg \min_{X_j \in (X_{\text{raw}} \setminus S_k)} (\min_{X_i \in S_k} D(i, j)) \quad (31)$$

式中 $X_j \in (X_{\text{raw}} \setminus S_k)$ ——未被选择的候选个体

通过此方式, 从未选中的个体中, 找一个与当前种群中某个个体最接近的个体加入, 从而加速生成一个具有全局性探索的初始种群 X_{start} , 即

$$X_{\text{start}} = \{X_{s_1}, X_{s_2}, \dots, X_{s_N}\} \quad (32)$$

3.2.2 非线性能量衰减因子

HHO 算法收敛因子 $E_1(t)$ 的线性衰减在初期迅速下降, 易使算法过早收缩搜索空间, 限制全局搜索潜力, 并且迭代过程中也无法有效地开发局部最优解。因此, 根据算法迭代不同阶段动态调整收敛速度, 优化全局和局部搜索平衡, 设计分段式非线性收敛因子策略, 用于替代原算法中线性衰减能量因子 $E_1(t)$, 即

$$E_1(t) = 2 \left(\frac{2}{1 + e^{-10(1-t/T)^3}} - 1 \right) \quad (33)$$

为验证与原线性衰减能量因子收敛效果, 随机设计迭代次数为 100, 收敛效果如图 6 所示。

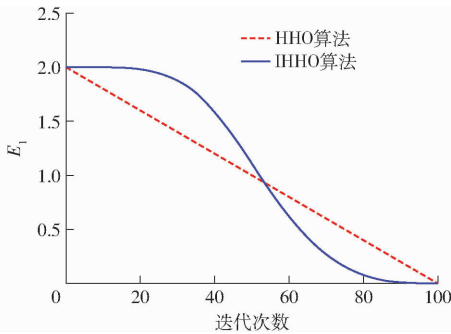


图 6 衰减能量因子收敛效果

Fig. 6 Convergence effect of attenuation energy factor

由图 6 可知, IHHO 算法迭代初期衰减因子下降缓慢, 拓展全局搜索能力, 中后期快速下降至平缓, 拓展局部搜索能力。逃逸能量 $E(t)$ 如图 7 所示。

由图 7 可知, IHHO 算法提升了其递减平滑性,

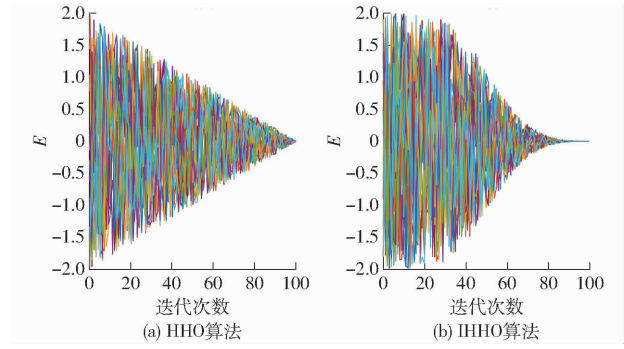


图 7 逃逸能量示意图

Fig. 7 Schematics of escape energy comparison

在早期保持足够探索性, 中后期迅速收敛, 使逃逸行为更温和, 有利于后期局部搜索。改进哈里斯鹰优化算法流程如图 8 所示。

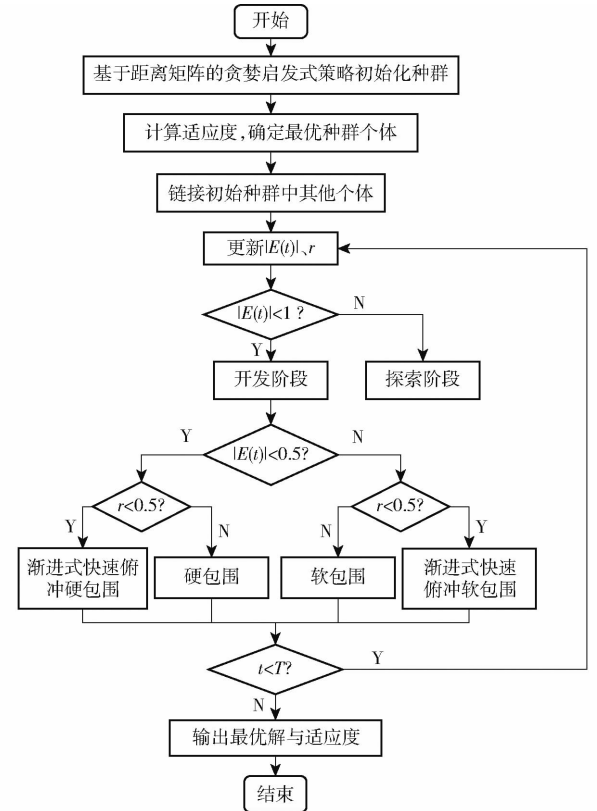


图 8 IHHO 算法流程

Fig. 8 Process of IHHO algorithm

4 仿真

4.1 IHHO 算法求解子棉田最佳转移序列

采棉机完成单个子田块内部作业后, 需转移至下一子田块继续作业, 该转移过程可建模为经典的 TSP。为有效求解该问题, 引入 HHO 算法。通过探索、转换与开发 3 个阶段, 高度契合 TSP 问题的求解特性: 在探索阶段广泛搜索解空间, 提升全局探索能力; 在转换阶段依据逃逸能量自适应调整搜索策略; 在开发阶段运用多种围攻策略实现局部精细搜索。相较于粒子群算法 (PSO)、遗传算法 (GA) 等主流启

发式算法,HHO 算法具有参数设置简单、搜索目标明确等优势。提出改进 HHO 算法(IHHO),用于求解采棉机最优转移序列,并系统验证 IHHO 算法相较于 HHO、PSO 和 GA 等算法的性能提升效果。基于 ID1 ~ ID19 棉田块种植区域几何中线点坐标如表 1 所示,其空间分布如图 9 所示。

表 1 ID1 ~ 19 的棉田块种植区域几何中心点

Tab. 1 ID1 ~ 19's geometric center points of cotton

m			
ID	坐标 (x,y)	ID	坐标 (x,y)
1	(490.292, 512.138)	11	(489.623, 204.497)
2	(713.329, 468.216)	12	(308.388, 133.928)
3	(862.714, 440.659)	13	(472.036, 84.630)
4	(515.250, 403.595)	14	(255.672, 430.835)
5	(708.906, 575.908)	15	(242.871, 365.802)
6	(831.838, 656.285)	16	(130.520, 493.103)
7	(597.705, 707.295)	17	(210.896, 584.750)
8	(803.478, 331.202)	18	(322.320, 569.382)
9	(523.969, 303.355)	19	(422.202, 678.755)
10	(674.206, 262.096)		

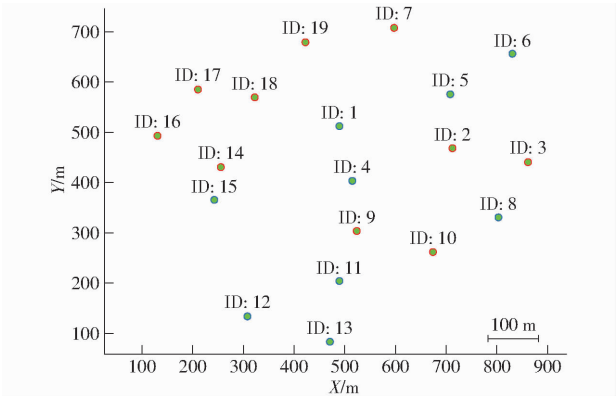


图 9 几何中心点分布图

Fig. 9 Distribution diagram of geometric center points

进前后最佳转移序列、最优路径长度及收敛曲线,最大迭代次数为 1 000,仿真结果如图 10 所示。由收敛曲线可看出,在迭代初期,各算法全局搜索能力由强到弱依次为 IHHO、HHO、PSO 和 GA;迭代中期 IHHO 算法迅速收敛并转入局部精细搜索,而 PSO 与 GA 算法过早陷入局部最优,HHO 算法收敛相对缓慢;在迭代后期,收敛精度由高到低排序为 IHHO、HHO、PSO、GA。验证了 IHHO 算法在全局探索 and 快速收敛至优质解方面的显著优势。

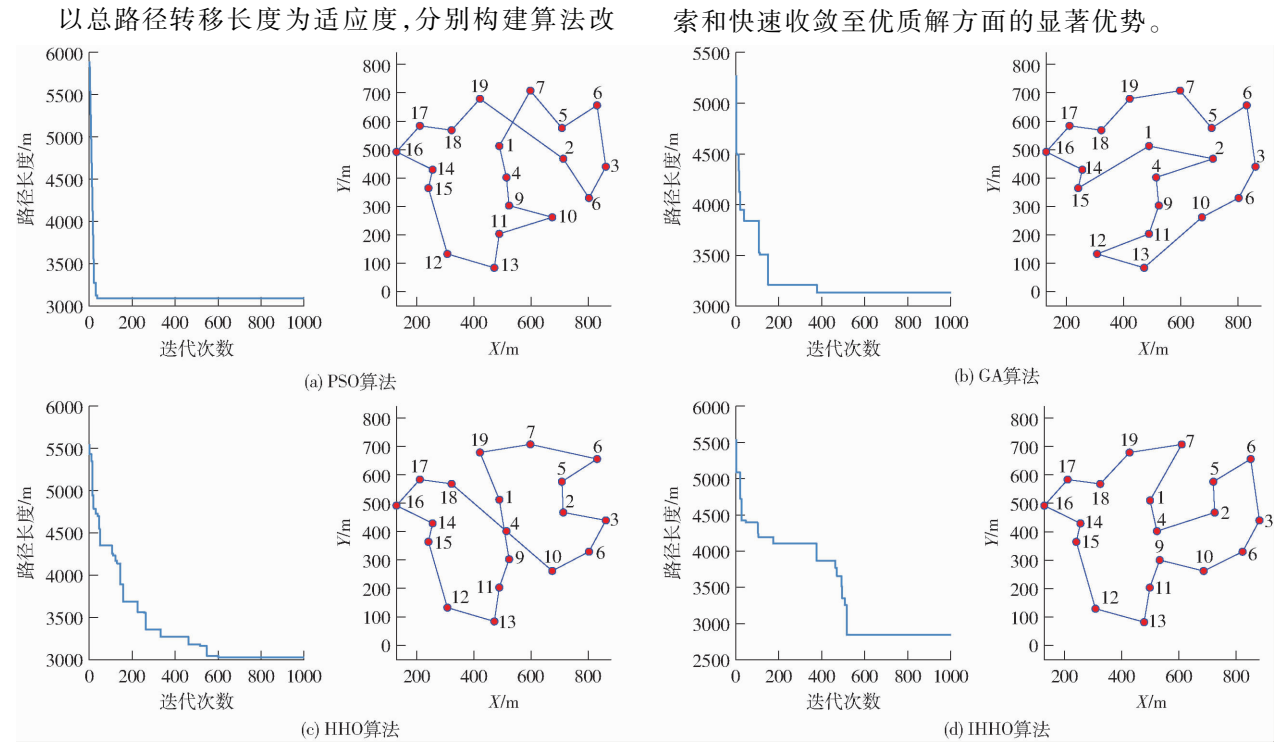


图 10 适应度和最优路径曲线

Fig. 10 Adaptability and optimal path curves

表 2 为各算法获得的子田块最优转移序列及路径长度,IHHO 算法得到的最优路径长度相较于 HHO、GA 和 PSO 分别缩短 185.96、291.20、244.22 m,路径长度降低率为 6.13%、9.28% 和 7.90%。综上所述,IHHO 算法在求解采棉机转移路径优化问题中,展现出更优的全局探索能力、更快的收敛速度以及更高的求解精度,显著提升了作业路径经济性与

调度效率。

4.2 能耗模型仿真验证

基于高精度电子地图获取棉田作业区域,通过 QGIS 软件对获取的电子地图裁剪、拓扑检查、线性拟合、平滑优化与坐标变换等处理,最终得到棉田块的相对位置轮廓,并导入 Matlab 软件验证所提出的能耗模型准确性。根据式(24),行驶作业方向角是

表 2 最优路径长度与最佳转移序列

Tab.2 Optimal path length and transfer sequence		
算法	最优路径 长度/m	最佳转移序列
PSO	3 090.08	19→18→17→16→14→15→12→13→11→10 →9→4→1→7→5→6→3→8→2→19
GA	3 137.06	19→18→17→16→14→15→1→2→4→9→11 →12→13→10→8→3→6→5→7→19
HHO	3 031.82	19→1→9→11→13→12→15→14→16→17 →18→4→10→8→3→2→5→6→7→19
IHHO	2 845.86	17→16→14→15→12→13→11→9→10→8 →3→6→5→2→4→1→7→19→18→17

影响采棉作业总能耗的关键因素。在仿真中,设定方向角以 1°为步长,逐步从 0°递增至 180°,得到与作业总能耗、作业时间、路径总长度及转弯次数关系曲线,如图 11~14 所示。由图 11~14 可知,在采棉机作业宽度、平均作业速度与平均转弯速度一致的条件 下,作业总能耗与路径总长度呈正相关,路径总长度与作业时间亦呈正相关。转弯次数越少,作业路径与转弯路径的复杂度越低,转弯能耗在总能耗中所占比例也相应减小。

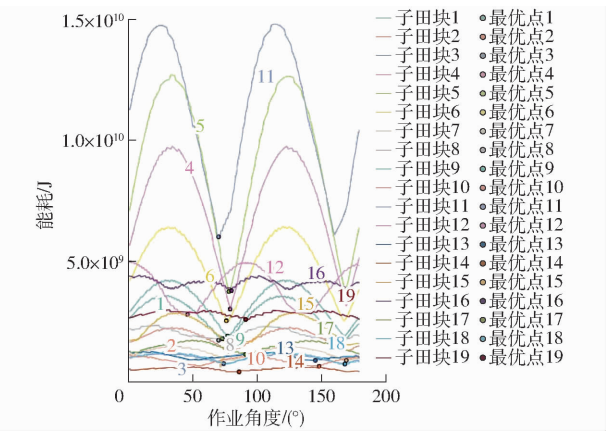


图 11 作业角度与能耗关系曲线

Fig. 11 Working angle and energy consumption curves

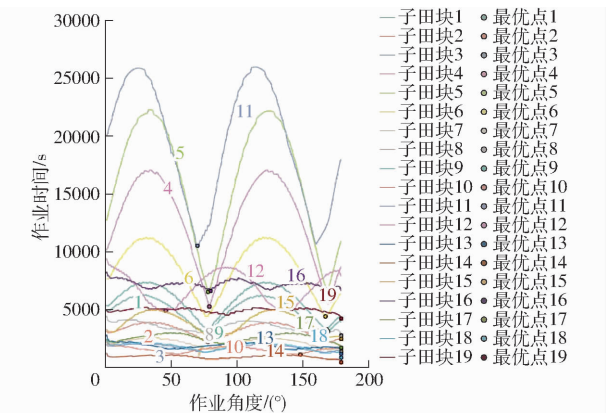


图 12 作业角度与作业时间关系曲线

Fig. 12 Working angle and time curves

提取最优与最劣 2 种情况下作业角及其对应的作业总能耗、作业时间、路径总长度与转弯次数,如

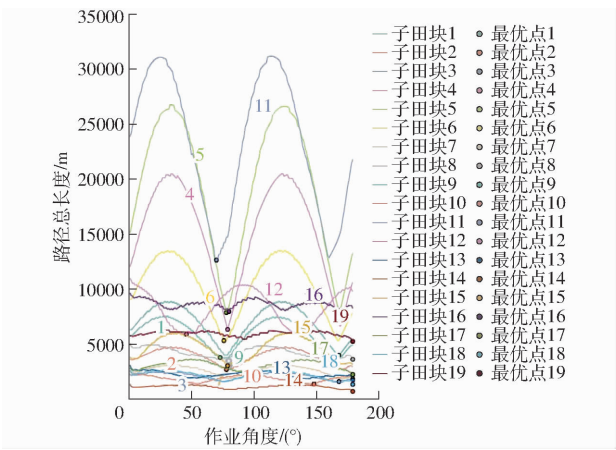


图 13 作业角度与作业路径长度关系曲线

Fig. 13 Working angle and total path length curve

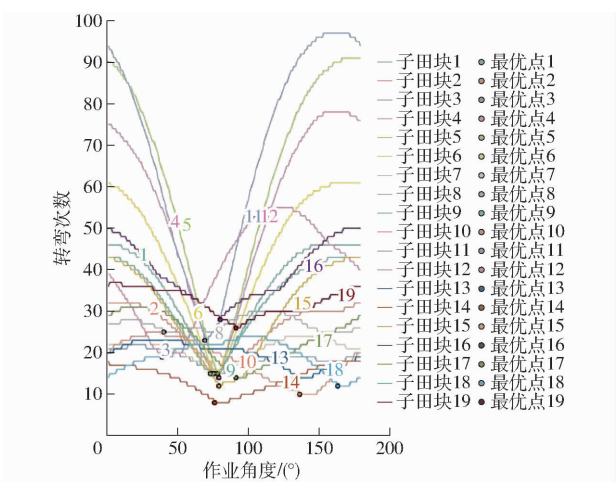


图 14 作业角度与转弯次数关系曲线

Fig. 14 Working angle and turning number curves

表 3 所示。各子田块作业总能耗降低率为 12.99% ~ 70.42%;作业时间降低率为 18.56% ~ 70.40%;路径总长度降低率为 16.10% ~ 70.41%;转弯次数降低率为 16.67% ~ 83.52%。由此可见,行驶作业方向角对作业总能耗与作业效率具有显著影响。分析 4 种降低率取极值时作业方向角,以子田块 19 为例:在作业总能耗最低(2.6096×10^9 J)时方向角为 91°;在作业时间最短(1.19 h)时方向角为 179°;在路径总长度最短(5 308 m)时方向角为 179°;在转弯次数最少(26 次)时方向角为 91°。尽管最优方向角并不完全一致,但图线显示在 91°与 179°情况下作业总能耗、作业时间、路径总长度与转弯次数差异极小,表明 2 种方向角均具备实际可行性。其余子田块仿真结果亦呈现相同规律,验证了所提出的能耗模型在实际棉田作业中的适用性与实用价值。

5 试验

5.1 试验平台与方法

基于沃得 4MZD-6H 型混合动力自走式采棉

表 3 子田块内作业工况
Tab.3 Working conditions in sub-fields

最小能 ID	最小 耗角/ (°)	最小 能耗/J	最大能 耗角/ (°)	最大 能耗/J	最小时 间角/ (°)	最小 时间/ s	最大时 间角/ (°)	最大 时间/ s	最小路 径长度 角/(°)	最小路 径长 度/m	最大路 径长度 角/(°)	最大路 径长 度/m	最小转 弯次数 角/(°)	最小 转弯 次数	最大转 弯次数 角/(°)	最大 转弯 次数
1	77	1.927 6×10 ⁹	120	4.252 2×10 ⁹	168	3 370	120	7 465	168	4 052	120	8 955	76	15	1	46
2	78	1.304 5×10 ⁹	125	2.282 6×10 ⁹	78	2 297	34	4 010	78	2 752	125	4 808	78	15	1	32
3	74	7.866 0×10 ⁸	27	1.188 4×10 ⁹	179	1 293	27	2 102	168	1 658	27	251	74	15	15	22
4	79	3.031 8×10 ⁹	123	9.764 0×10 ⁹	79	5 327	34	17 139	79	6 388	123	20 558	79	14	153	78
5	78	3.759 6×10 ⁹	33	1.271 0×10 ¹⁰	78	6 604	33	22 314	78	7 921	33	26 768	78	15	166	91
6	76	2.551 7×10 ⁹	120	6.458 4×10 ⁹	167	4 479	120	11 335	76	5 378	120	13 600	76	15	1	61
7	169	9.174 0×10 ⁸	126	1.497 9×10 ⁹	179	1 451	126	263	179	1 890	126	3 156	75	15	126	24
8	70	1.745 8×10 ⁹	22	2.352 2×10 ⁹	179	2 817	1	4 528	179	3 673	1	5 112	40	25	100	30
9	73	1.820 1×10 ⁹	31	3.610 8×10 ⁹	169	3 198	31	6 351	73	383	31	7 612	73	15	1	43
10	148	6.803 0×10 ⁸	1	1.152 9×10 ⁹	148	1 193	1	2 319	148	1 432	1	2 626	136	10	28	25
11	70	6.022 3×10 ⁹	114	1.480 7×10 ¹⁰	70	10 577	114	25 985	70	12 686	114	31 177	69	23	153	97
12	46	2.812 0×10 ⁹	1	5.042 8×10 ⁹	46	4 970	1	9 452	46	5 944	1	11 022	39	19	114	55
13	145	9.151 0×10 ⁸	1	1.301 9×10 ⁹	179	126	1	2 889	179	1 806	1	3 146	135	14	18	23
14	86	4.453 0×10 ⁸	51	6.513 0×10 ⁸	179	51	1	1 306	179	766	1	1 404	76	8	1	18
15	79	1.462 9×10 ⁹	40	2.907 5×10 ⁹	179	2 547	40	5 117	79	3 087	40	6 132	79	12	1	43
16	80	3.795 6×10 ⁹	9	4.437 8×10 ⁹	80	6 687	1	8 339	80	8 010	1	9 686	80	28	1	50
17	91	1.169 0×10 ⁹	50	1.756 0×10 ⁹	179	178	50	3 095	179	2 287	50	3 706	91	14	10	31
18	168	7.715 0×10 ⁸	27	1.260 8×10 ⁹	179	929	1	2 474	179	1 407	27	2 685	163	12	92	24
19	91	2.609 6×10 ⁹	32	2.999 2×10 ⁹	179	4 300	32	5 280	179	5 308	32	6 326	91	26	2	37

机开展试验,如图 15 所示,其工作状态下长宽高为 10.3 m×5.3 m×5.2 m,质量 30 000 kg,标定功率 570 kW,行走电机功率 350 kW,最小转弯半径 R 为 4.8 m,作业宽度 ω 为 5.3 m,采棉机在子田块内平均作业速度为 1.25 m/s,平均转弯速度为 0.8 m/s,平均转移速度为 2.5 m/s,测试地点为新疆某棉花田 (47°03'N,87°20'E),棉田参数如表 4 所示。



图 15 试验平台
Fig.15 Experimental platform

表 4 棉田参数
Tab.4 Parameters of cotton field

ID	面积/m ²	周长/m	ID	面积/m ²	周长/m	ID	面积/m ²	周长/m
1	20 811	631	8	15 309	481	15	9 406	558
2	13 979	467	9	16 794	584	16	23 981	719
3	8 402	341	10	6 524	332	17	8 104	450
4	33 225	954	11	43 518	1 495	18	7 934	352
5	40 096	1 086	12	23 737	713	19	18 344	605
6	27 280	778	13	7 514	360			
7	9 708	383	14	3 639	258			

试验过程,作业棉田区域被分解为多个子田块,

各子田块间并无固定化的农场道路,仅仅是种植时隔开一段间距,所以采棉机在子田块之间的转移无需考虑农场道路的问题,并且在前一个子田块作业结束转移至下一个子田块的过程,由于前一个子田块已作业完毕,转移路径也避免了碾压未收获的子田块。由于采棉机最小转弯半径 R 远大于 0.5ω ,同时为避免频繁的转弯与倒车操作,基于 Ω 形转弯方式。具体过程为:采棉机采用连续不间断方式作业,首先由首个子田块入口处进入,沿田块最边界按速度 1.25 m/s 直线行驶作业,在行走至田块地头后,附件电机停止工作,行走电机继续工作,按转弯速度 0.8 m/s 进入下一行收获。在完成首个子田块作业任务后,采棉机按速度 2.5 m/s 直线转移至下一子田块入口处继续作业,直至最后一个子田块作业完毕,由出口处驶出结束此棉田区域采收任务。试验过程中,数据采集包括时间与能耗。时间数据包括采棉机在各个子田块内作业时间与子田块间转移时间,采集方式为电子计时。能耗包括采棉机在各个子田块内作业能耗、子田块间转移能耗。由于采棉机在作业过程中处于低速、稳定负载状态,功率波动相对较小,并且考虑到棉田地形较平整,瞬时功率变化对能耗贡献较小,能耗主要受作业持续时间影响,故能耗采集方式为“功率时间法”,即采棉机在子田块作业能耗为标定功率与作业时间乘积、转弯能耗为行走电机功率与转弯时间乘积、转移能耗为行走

电机功率与转移时间乘积。

5.2 试验结果与分析

以采棉机作业总能耗为优化目标,计算其在各

子棉田内最佳作业方向角,在已知最佳作业方向角、棉田参数及边界轮廓点集合的情况下,计算转移坐标,如表 5 所示。

表 5 子田块转移坐标
Tab.5 Transfer coordinates of sub-field

			m		
ID	入口坐标	出口坐标	ID	入口坐标	出口坐标
1	(611.21, 469.09)	(370.85, 554.52)	11	(761.01, 154.14)	(261.47, 325.68)
2	(803.82, 476.32)	(626.22, 465.33)	12	(388.22, 5.39)	(224.67, 261.09)
3	(920.63, 453.85)	(816.62, 465.81)	13	(538.17, 112.49)	(450.26, 17.65)
4	(718.16, 348.18)	(309.67, 475.52)	14	(299.24, 404.45)	(196.89, 422.38)
5	(960.71, 545.72)	(468.50, 608.33)	15	(379.83, 357.16)	(142.28, 374.94)
6	(1 000.30, 634.31)	(673.05, 708.61)	16	(280.27, 505.48)	(5.27, 530.42)
7	(631.81, 745.04)	(621.30, 657.32)	17	(282.33, 625.12)	(119.50, 567.17)
8	(881.00, 356.18)	(744.90, 394.22)	18	(307.44, 634.29)	(311.41, 505.09)
9	(642.06, 302.33)	(409.66, 360.52)	19	(529.74, 729.52)	(326.74, 708.68)
10	(729.23, 303.01)	(635.39, 208.10)			

采棉机在子田块间进行转移时,不仅仅考虑子田块几何中心,还需考虑子田块出入口位置,出入口可互相调换,即入口可作为出口,出口可作为入口,并且相邻棉田块出入口是绑定的,即前一个子田块出口需和下一个子田块入口绑定,在此收获农艺特点下,再利用改进前后哈里斯鹰优化算法求解其转移序列,仿真结果如表 6 所示,转移时间降低 0.03 h,结合行走电机功率可知转移能耗降低 3.78×10^7 J,能耗降低率为 6.12%。

表 6 子田块最佳转移序列
Tab.6 Optimal transfer sequence of sub-field

算法	转移路径 长度/m	转移 时间/h	转移 能耗/J	最佳转移序列
				7→19→18→17→16→14
HHO	4 449.12	0.49	6.174×10^8	→15→9→10→11→12→13 →8→4→1→2→3→5→6 19→18→17→16→14→15
IHHO	4 200.68	0.46	5.796×10^8	→12→13→11→9→10→4 →1→2→8→3→5→7→6

5.2.1 时间

采棉机在各子田块内按照最优作业方向角作业,田间转移时按照 IHHO 算法求解的最佳转移序列转移,采集实际时间如表 7 所示,作业总时间为 18.36 h,其中田内作业时间为 17.89 h,田间转移时间 0.47 h。由仿真结果可知,采棉机在棉田中的最短作业时间为 17.33 h,最长作业时间为 31.50 h,试验过程的总时间远小于最长作业时间,并且与最短作业时间有误差,时间误差为 0.56 h,分析导致误差原因为采棉机作业过程的速度误差累计。采棉机在田间转移时间为 0.47 h,优于未改进前 0.49 h,与理想仿真结果(0.46 h)有所误差,时间误差为 0.01 h,

误差较小,分析误差原因为采棉机作转移过程的速度误差累计。实际试验总时间 18.36 h、路径总长度 84 505.55 m 与仿真最长时间 31.96 h、最长路径 172 930.68 m 相比,生产效率提升率达 44.02%;路径长度降低率达 51.13%。

表 7 采棉机实际作业时间
Tab.7 Operating time of cotton picker

项目	类型	时间/h	距离/m
试验	田内作业	17.89	80 293
	田间转移	0.47	4 212.55
仿真	田内作业	17.33 ~ 31.50	76 828 ~ 168 730
	田间转移	0.46	4 200.68

5.2.2 能耗

已知采棉机在各子田块内作业时间,田间转移时间,结合采棉机作业时标定功率与行走电机功率,可求得采棉机能耗,如表 8 所示。

表 8 采棉机能耗
Tab.8 Energy consumption of cotton picker

项目	类型	能耗/J	时间/h
试验	田内作业	3.671×10^{10}	17.89
	田间转移	5.922×10^8	0.47
仿真	田内作业	$(3.556 1 \sim 6.463 8) \times 10^{10}$	17.33 ~ 31.50
	田间转移	5.796×10^8	0.46

棉田块内作业能耗为 3.671×10^{10} J,与仿真理想最小能耗 $3.556 1 \times 10^{10}$ J 相比,误差为 1.149×10^9 J,导致误差的原因为作业电机长时间运行的损耗。子田块间转移能耗 5.922×10^8 J,与仿真理想转移能耗 5.796×10^8 J 相比,误差为 1.26×10^7 J,分析导致误差原因为行走电机长时间运行的损耗。实际试验总能耗 $3.730 22 \times 10^{10}$ J 与仿真最大总能耗

6.521 76 × 10¹⁰ J 相比,能耗降低率为 42.80%。

由表 8 可知,尽管所提模型在能耗预测中存在一定误差,主要由于作业电机和行走电机的长时间运行损耗,但试验结果表明,采棉机总能耗相比仿真

最大总能耗显著降低,验证所提能耗模型实际应用中的可靠性和优化潜力。采棉机在整个棉田区域作业与转移总路径如图 16 所示,并局部放大边界区域标识,包括缓冲区、转弯区、作业区与棉田边界。

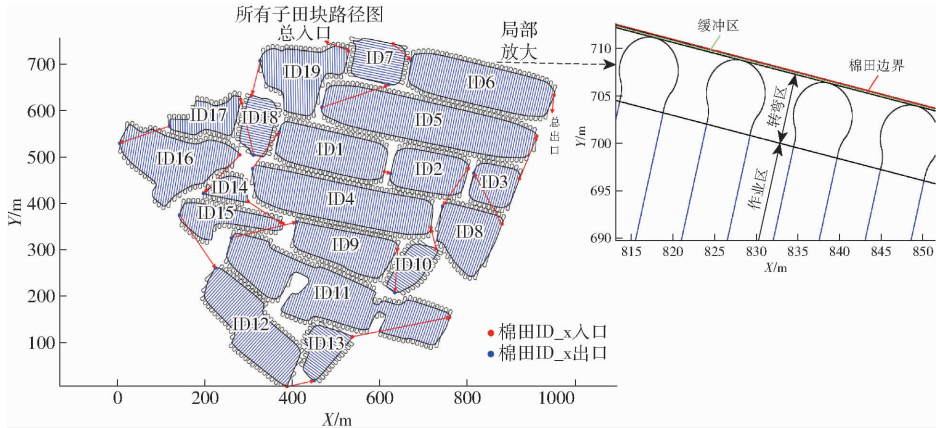


图 16 混动采棉机作业与转移总路径
Fig. 16 Operation and transfer total path of hybrid cotton picker

6 结论

(1) 针对大型棉田环境下混合动力采棉作业路径难以进行实地规划及能耗优化的问题,以高精度电子地图构建作业地图模型,并在作业地图模型的基础上,构建基于行驶方向角的作业能耗模型,通过仿真分析,实现最低能耗要求的行驶方向角。

(2) 针对子棉田间作业转移序列可间接优化转移路径的能耗问题,提出了基于改进哈里斯鹰优化算法求解最优序列。引入基于距离矩阵的贪婪启发

式策略引导个体在初期阶段更快地收敛到初始种群;并引入非线性能量衰减因子,以优化全局与局部搜索能力。算法改进前后求解的收敛序列路径长度降低率为 6.13%,实际棉田试验中转移路径能耗降低率为 6.12%。

(3) 以路径长度降低率 K_R 、能耗降低率 K_E 、生产效率提升率 K_T 为评价指标,分析以最小能耗方向角在棉田块中的测试结果,路径长度降低率为 51.13%、能耗降低率为 42.80%、生产效率提升率达 44.02%,验证了能耗模型优化效果。

参 考 文 献

[1] 王智,李勇辉,杨召恩,等.我国棉花产业生物育种和创新利用的发展与展望[J].农业生物技术学报,2025,33(3):650-658.
WANG Zhi, LI Yonghui, YANG Zhaoen, et al. Development and perspective of biological breeding and innovation utilization in cotton industry in China[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2025, 33(3): 650-658. (in Chinese)

[2] 石茂林,高小雅,张卫东,等.采棉机关键技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2025,56(5):167-183.
SHI Maolin, GAO Xiaoya, ZHANG Weidong, et al. Development status and prospect of research on key technologies of cotton pickers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 167-183. (in Chinese)

[3] 王楠,郭勇,任强.4MZ-3A型自走式采棉机技术特点及使用调整[J].农业工程,2021,11(12):26-29.
WANG Nan, GUO Yong, REN Qiang. Technical characteristics and application adjustment of 4MZ-3A self-propelled cotton picker[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(12): 26-29. (in Chinese)

[4] 施孟涛.沃得采棉机国内国外两开花“中国智造”领航棉花机采变革[J].农机科技推广,2024(10):63-64.

[5] 吴传云,温浩军,刘小伟,等.基于国产采棉机综合测评的推广应用情况分析[J].中国农机化学报,2025,46(5):1-5.
WU Chuanyun, WEN Haojun, LIU Xiaowei, et al. Analysis of promotion and application of domestic cotton picking machines based on comprehensive evaluation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(5): 1-5. (in Chinese)

[6] 王汇涵,张泽,康孝岩,等.基于 Sentinel-2A 的棉花种植面积提取及产量预测[J].农业工程学报,2022,38(9):205-214.
WANG Huihan, ZHANG Ze, KANG Xiaoyan, et al. Cotton planting area extraction and yield prediction based on Sentinel-2A [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 205-214. (in Chinese)

[7] 何创新,巩蕾,苗中华,等.基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法[J].农业机械学报,2024,55(6):34-41.
HE Chuangxin, GONG Lei, MIAO Zhonghua, et al. Automatic row-follow control method for cotton picker based on parallel trajectory navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 34-41. (in Chinese)

[8] 周俊,何永强.农业机械导航路径规划研究进展[J].农业机械学报,2021,52(9):1-14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1-14. (in Chinese)

[9] 郑路,张啸,王建国,等.基于宏微结合的田间作业机器人路径规划[J].农业机械学报,2023,54(9):13-26.

- ZHENG Lu, ZHANG Xiao, WANG Jianguo, et al. Path planning of field robot based on macro-micro combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 13–26. (in Chinese)
- [10] 王宁, 韩雨晓, 王雅萱, 等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 1–19.
WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 1–19. (in Chinese)
- [11] JOKINIEMI T, ROSSNER H, AHOKAS J. Simple and cost effective method for fuel consumption measurements of agricultural machinery[J]. Agronomy Research, 2012, 10(1): 97–107.
- [12] RAZALI N M, GERAGHTY J. Genetic algorithm performance with different selection strategies in solving TSP[J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2011, 2(1): 1–6.
- [13] 胡炼, 张鸿, 何杰, 等. 再生稻头季低碾压收获作业路径规划技术研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 19–27.
HU Lian, ZHANG Hong, HE Jie, et al. Path planning technical research of low-rolling compaction harvesting operation for the first season of ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 19–27. (in Chinese)
- [14] EMAMBOCUS B A S, JASSER M B, HAMZAH M, et al. An enhanced swap sequence-based particle swarm optimization algorithm to solve TSP[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164820–164836.
- [15] WANG L, CAI R, LIN M, et al. Enhanced list-based simulated annealing algorithm for large-scale traveling salesman problem[J]. IEEE Access, 2019, 7: 144366–144380.
- [16] 任玲, 崔建谱, 张聪华, 等. 基于改进蚁群算法的穴盘苗钵苗移栽路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 293–302.
REN Ling, CUI Jianpu, ZHANG Conghua, et al. Path planning method for hole tray seedling transplanting based on improved ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 293–302. (in Chinese)
- [17] 赵威, 张万枝, 侯加林, 等. 基于改进深度强化学习算法的农业机器人路径规划[J]. 浙江大学学报, 2025, 59(7): 1–12.
ZHAO Wei, ZHANG Wanzhi, HOU Jialin, et al. Path planning of agricultural robots based on improved deep reinforcement learning algorithm[J]. Journal of Zhejiang University, 2025, 59(7): 1–12. (in Chinese)
- [18] PAN Y, YANG Y, LI W. A deep learning trained by genetic algorithm to improve the efficiency of path planning for data collection with multi-UAV[J]. IEEE Access, 2021, 9: 7994–8005.
- [19] CHAKRABORTY S, ELANGO VAN D, GOVINDARAJAN P L, et al. A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots[J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9156.
- [20] SHEHAB M, MASHAL I, MOMANI Z, et al. Harris hawks optimization algorithm: variants and applications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(7): 5579–5603.
- [21] AKL D T, SAAFAN M M, HAIKAL A Y, et al. IHHO: an improved Harris hawks optimization algorithm for solving engineering problems[J]. Neural Computing and Applications, 2024, 36(20): 12185–12298.
- [22] 杨翔宇, 高博. 基于折射反向学习和自适应策略的哈里斯鹰优化算法[J]. 计算机应用, 2024, 44(增刊2): 129–133.
YANG Xiangyu, GAO Bo. Harris hawk optimization algorithm based on refracted opposition-based learning and adaptive strategy[J]. Journal of Computer Applications, 2024, 44(Supp.2): 129–133. (in Chinese)
- [23] 胡啸, 张呈越, 卞炜, 等. 基于改进哈里斯鹰优化算法的动态路径规划研究[J]. 控制工程, 2024, 31(4): 591–600.
HU Xiao, ZHANG Chengyue, BIAN Wei, et al. Research on dynamic path planning based on improved Harris hawk algorithm[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(4): 591–600. (in Chinese)
- [24] 李胜伶, 李金广, 赵立军, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的丘陵山区田块全覆盖作业路径规划[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 61–70.
LI Shengling, LI Jinguang, ZHAO Lijun, et al. Path planning for field full coverage operation in hilly and mountainous farmlands based on the enhanced whale optimization algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(17): 61–70. (in Chinese)
- [25] DHOUB S. Optimization of travelling salesman problem on single valued triangular neutrosophic number using dhouib-matrix-TSP1 heuristic[J]. International Journal of Engineering, 2021, 34(12): 2642–2647.
- [26] 何妍, 周青. 边缘效应原理及其在农业生产实践中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 212–214.
HE Yan, ZHOU Qing. Principle of edge effect and its application in agricultural production practice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 212–214. (in Chinese)
- [27] 戴漂漂, 张旭珠, 肖晨子, 等. 农业景观害虫控制生境管理及植物配置方法[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 9–19.
DAI Piaopiao, ZHANG Xuzhu, XIAO Chenzi, et al. Habitat management and plant configuration for biological pest control in agricultural landscapes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(1): 9–19. (in Chinese)
- [28] 段美春, 刘云慧, 张鑫, 等. 以病虫害控制为中心的农业生态景观建设[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 825–831.
DUAN Meichun, LIU Yunhui, ZHANG Xin, et al. Agricultural disease and insect-pest control via agro-ecological landscape construction[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 825–831. (in Chinese)
- [29] WU H, WANG X, CHEN X, et al. Review on key technologies for autonomous navigation in field agricultural machinery[J]. Agriculture, 2025, 15(12): 1297–1324.
- [30] BOCK S, BOMSDORF S, BOYSEN N, et al. A survey on the traveling salesman problem and its variants in a warehousing context[J]. European Journal of Operational Research, 2025, 322(1): 1–14.
- [31] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: algorithm and applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849–872.