

基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型的多机协同作业策略

朱烨均¹ 张 闯¹ 魏文波¹ 孙宜田² 肖茂华¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 211800; 2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250103)

摘要: 针对单侧卸粮模式下玉米籽粒收获转运多机协同自主作业中智能农机调度冲突和转运路径冗余等问题, 本文提出了一种基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型(MDOP)的多机协同调度策略。该策略通过实时调整收获机卸粮阈值, 实现收获机与运粮车高效协同作业, 在不影响收获机连续作业效率前提下, 有效降低了收获机非生产性等待时间, 减少了运粮车转运成本和玉米籽粒转运损失。将优化马尔可夫决策模型下多机协同作业情况与传统仓满召唤卸粮模型、遗传算法优化模型进行比较, 优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间减少18.1%、4.9%, 转运成本降低8.9%、19.3%, 玉米籽粒转运损失率约为4.3%, 验证了本文调度策略的有效性和优越性。研究结果为实现无人化玉米籽粒多机协同自主作业奠定了基础, 可为玉米无人农场建设提供技术支持。

关键词: 智能农机; 多机协同; 无人农场; 收获; 转运

中图分类号: S964.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)06-0187-09

OSID:



Multi-machine Cooperative Operation Strategy Based on Dynamic Unloading Threshold Optimized Markov Decision Model

ZHU Yejun¹ ZHANG Chuang¹ WEI Wenbo¹ SUN Yitian² XIAO Maohua¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Ji'nan 250103, China)

Abstract: In addressing the challenge of coordinating multiple machines during autonomous maize grain harvesting and transportation under a one-sided unloading configuration, a collaborative scheduling strategy was introduced based on a dynamic unloading-threshold-optimized Markov decision process (MDOP). By continuously adjusting the harvester's unloading threshold in real time, the proposed approach enabled seamless interaction between harvesters and grain transport vehicles, thereby ensuring that the harvester maintained uninterrupted operational efficiency. This dynamic adjustment mechanism significantly reduced the harvester's nonproductive waiting time and curtailed both the transportation cost incurred by the vehicles and the grain loss that occurred during transfer. To evaluate its performance, the MDOP-based collaborative strategy was benchmarked against two alternative models: the conventional full-bin-triggered unloading protocol and a genetic-algorithm-optimized unloading strategy. Under identical field conditions, the MDOP approach achieved an 18.1%, 4.9% reduction in total operational time compared with the conventional approach, while transportation costs were lowered by 8.9%, 19.3%. Moreover, the grain transfer loss rate under the MDOP regime was measured at approximately 4.3%, underscoring its ability to mitigate kernel spillage more effectively than competing methods. These results confirmed the superior efficacy and robustness of the MDOP-based scheduling strategy in multi-machine cooperative tasks. By optimizing unloading thresholds dynamically, it not only preserved the continuous harvesting pace of the combines but also minimized idle intervals and logistical overhead. Consequently, this research laid a theoretical and practical foundation for realizing fully autonomous, multi-machine cooperative operations in maize harvesting, thereby furnishing critical technological support for the development of unmanned maize farming systems.

Key words: intelligent agricultural machinery; multi-machine collaboration; unmanned farm; harvesting; transshipment

收稿日期: 2025-04-27 修回日期: 2025-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001604)

作者简介: 朱烨均(1990—),男,讲师,博士,主要从事人工智能技术在农业中的应用研究,E-mail: yjzhu@njau.edu.cn

通信作者: 肖茂华(1981—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: xiaomaohua@njau.edu.cn

0 引言

近年来,基于智能决策和多机协同的无人化农业作业系统已逐步兴起^[1-5]。国内外许多学者对农机调度问题进行了研究。SETHANAN 等^[6]基于改进粒子群优化算法(MO-GLNPSO)解决了甘蔗收获机路径规划问题;NOGUCHI 等^[7]提出了2种典型农机协同模式(主机指定给从机作业目标和从机跟随主机作业);LI 等^[8]提出了一种基于NSGA-Ⅲ和改进蚁群算法的指令多机协同作战智能调度方法;白晓平等^[9-10]提出了联合收获机群协同作业的控制方法和有限状态机的农机导航多任务调度研究;张闻宇等^[11-12]提出了一种基于有限状态机(Finite state machine,FSM)的水稻收获机与转运车协同作业策略,并且设计了纵向相对位置位速耦合控制器;满忠贤等^[13]采用改进型连续时间马尔科夫链模型的多农机协同收获作业控制方法;王博等^[14]研究了多维度与全链条农机多机协同技术;李寒等^[15]设计并开发了基于WebGIS的农机多机协同导航服务平台;曹如月等^[16-17]研究了基于融合算法的多机协同全局路径规划和基于蚁群算法的多机协同作业任务规划;文献[18-20]研究了农机跨区调度问题;吴才聪等^[21]提出基于时间窗的农机资源时空调度数学模型,以动态规划的思想逐步分解决策过程,完成每个决策最优解解算,并进行模型寻优和复杂度分析。但现有研究大多关注单机作业优化,对多机协同自主作业调度问题的研究尚处于起步阶段,尤其是在如何设计有效的协同作业策略以最小化作业时间、提高作业效率方面存在明显不足^[22-23]。

本文提出一种基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型的玉米籽粒收获机与运粮车多机协同作业策略,旨在通过建立优化决策模型,实现多机自主协同作业的高效调度,以调度成本最低为原则,优化无人化玉米籽粒收获和转运过程。同时,利用Pycharm平台下的conda虚拟环境对所提出的协同作业策略进行仿真。

1 玉米籽粒收获转运作业调度策略

1.1 问题描述

在玉米籽粒收获转运主从协同调度问题中,建立多台收获机和运粮车协同作业的调度模型,采用召唤转运模式^[24],由收获机召唤运粮车到达指定卸粮点完成协同卸粮任务。对于这类智能农机协同调度问题,模型基本假设如下:

(1)每台收获机收获路径已知,在每个地块上连续作业,不间断采收。

(2)每台收获机有一个预设的卸粮阈值,当收获机粮仓装载量达到这一阈值时,即视为达到卸粮条件,触发卸粮动作。

(3)每台设备在同一时刻只能执行一个任务。

(4)模型采用事件触发与动态决策方法,以实时监控收获量并根据当前状态做出调度决策。

(5)模型中所有的参数,如收获速率、满仓门限、转运行驶时间、卸粮时间以及各项成本权重,均被看作是已知且稳定的。

(6)外部环境因素(如天气、机械故障等)不对模型参数产生影响。

本文提出的收获机与运粮车协同调度模型旨在最小化调度成本。确保不影响收获机连续作业效率的前提下,降低收获机非生产性等待时间,减少运粮车转运路径成本和最小化转运损失率。

1.2 协同调度模型建立

为了完成上述调度模型,设定收获机卸粮触发条件为

$$C_s = \int_{t_s}^t \varphi(\tau) d\tau \geq \theta Q + \kappa \varphi'(t^*) \quad (t \geq t_s) \quad (1)$$

式中 C_s ——收获机粮仓实时装载量,kg
 t_s ——收获机上次卸粮结束后收获作业起始时刻,s
 t ——当前时刻,s
 $\varphi(\tau)$ ——时刻 τ 收获机实时收获速率,kg/s
 Q ——收获机满仓容量,kg
 θ ——触发比例
 κ ——调整参数,修正收获速率变化的影响
 $\varphi'(t^*)$ —— t^* 时刻收获速率瞬时变化率
 t^* ——收获速率变化较明显时的参考时刻,s
收获机和运粮车卸粮时间为

$$T_u = T_s + \int_0^{Q_{act}} \frac{dq}{r_{u0} + \Delta r_u (1 - e^{-\beta q})} \quad (2)$$

式中 T_u ——总卸粮时间,s
 T_s ——卸粮启动与机械对接等固定延时,s
 Q_{act} ——本次实际卸粮量,kg
 q ——卸粮过程中累计卸粮量的积分变量
 r_{u0} ——初始卸粮速率,kg/s
 Δr_u ——卸粮速率提升的最大幅度,kg/s
 β ——衰减参数
运粮车转运时间为

$$T_t = \begin{cases} 2\sqrt[3]{\frac{d}{j}} & (d \leq d^*) \\ 2\left(\frac{a}{j} + \frac{v - \frac{a^2}{j}}{a}\right) + \frac{d - d^*}{v} & (d > d^*) \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_i ——运粮车转运总时间, s

a ——运粮车最大加速度, m/s^2

v ——运粮车最大行驶速度, m/s

j ——运粮车最大加加速度, m/s^3

d ——运粮车转运行驶距离, m

d^* ——阈值距离, m

当距离较短时, 运粮车在加速与减速过程中受限制时所需的最小距离阈值 d^* 表达式为

$$d^* = \frac{2a^3}{j^2} \quad (4)$$

非生产性等待时间惩罚函数为

$$\Psi = \left(\frac{t_p - t_r}{\Delta} \right)^\eta \quad (5)$$

式中 Ψ ——收获机非生产性等待时间惩罚成本

t_r ——收获机达到卸粮触发条件时刻, s

t_p ——收获机实际开始卸粮时刻, s

Δ ——允许的最大延迟时间阈值, s

η ——惩罚指数

在不影响收获机连续作业效率前提下, 综合调度成本 J 由收获机非生产性等待时间、运粮车转运路径成本和转运损失率组成。综合调度目标函数为

$$J = \mu(\Psi^{(A)} + \Psi^{(B)}) + \lambda \left(\frac{d_{act}}{d_{ref}} \right)^2 + \sigma \left(\frac{\max(0, Q_{act} - Q_T)}{Q_T} \right)^2 \quad (6)$$

式中 $\Psi^{(A)}$ 、 $\Psi^{(B)}$ ——收获机 A 和 B 非生产性等待时间的惩罚成本

μ ——非生产性等待时间惩罚项权重

d_{act} ——运粮车转运过程中行驶实际距离, m

d_{ref} ——参考距离, 用于归一化转运距离, m

λ ——转运路径成本权重

σ ——粮食损失成本权重

Q_T ——运粮车安全容量, kg

卸粮与转运衔接约束条件为

$$t_{arrival} \geq t_s + T_s + \int_0^{Q_{act}} \frac{dq}{r_{u0} + \Delta r_u (1 - e^{-\beta q})} + T_i \quad (7)$$

式中 $t_{arrival}$ ——运粮车到达目标作业区的时刻, s

1.3 模型优化

根据上述收获转运作业调度策略, 提出一种基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型的玉米籽粒收获机与运粮车多机协同作业策略。系统状态 $s_t = (x_t, y_t, \theta_t, z_t)$ 和动作决策 m_t 在时刻 t 仅依赖于前一时刻状态 s_{t-1} 和动作决策 m_{t-1} , 满足无记忆性。其中 x_t 和 y_t 分别表示 2 台收获机当前仓满比例, θ_t 为本阶段决策卸粮阈值, z_t 则记录运粮车运行位置和作业状态, 动作决策 m_t 包含运粮车移动目标决策

m_t^{move} 和动态卸粮阈值决策 m_t^θ 。

在每次动作决策 $m_t = (m_t^{move}, m_t^\theta)$ 驱动下, 系统按照转移概率 $P(s_{t+1} | s_t, m_t)$ 切换到新的状态, 如卸粮量超出运粮车安全容量, 还会在状态转移中标记溢仓风险。

为了使卸粮触发条件更灵活, 将原来静态卸粮触发公式改为一个基于动态阈值 θ_t 的条件, 即

$$C_s^* = \int_{t_s}^t \varphi(\tau) d\tau \geq \theta_t Q + \kappa \varphi'(t^*) \quad (t \geq t_s) \quad (8)$$

在优化马尔可夫决策过程中, 状态转移可以分为 3 部分: 收获机收获量推演、动态阈值更新和运粮车作业状态切换。

在上一个时刻状态 $s_t = (x_t, y_t, \theta_t, z_t)$ 下, 若动作中包含等待或行驶时间 Δt , 2 台收获机仓满比例按其即时收获速率推演为

$$x_{t+1} = \min \left\{ 1, x_t + \int_t^{t+\Delta t} \varphi_A(\tau) d\tau \right\} \quad (9)$$

$$y_{t+1} = \min \left\{ 1, y_t + \int_t^{t+\Delta t} \varphi_B(\tau) d\tau \right\} \quad (10)$$

对每台收获机分别做积分, 并以 1 为上界。若在 $[t, t + \Delta t]$ 期间触发卸粮, 则对应 x_{t+1} 或 y_{t+1} 会被重置为 0。

采用逻辑回归, 收获机动态卸粮阈值更新, 决定下一时刻阈值, 即

$$\begin{cases} \hat{\theta}_t = \sigma \left(\alpha_0 + \alpha_1 \frac{v_h(t)}{v_{h, \max}} + \alpha_2 \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}} + \alpha_3 \frac{\rho(t)}{\rho_{\max}} + \alpha_4 \frac{C_s}{Q} \right) \\ \theta_{t+1} = \text{proj}_{[\theta_{\min}, \theta_{\max}]}(\hat{\theta}_t) \\ \sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $v_h(t)$ ——收获机实时行进速度, m/s

$v_{h, \max}$ ——收获机标定的最大行进速度, m/s

$\omega(t)$ ——收获机实时割幅, m

$\omega_{\max}$ ——收获机最大割幅, m

$\rho(t)$ ——地块实际作物密度, kg/m^2

$\rho_{\max}$ ——地块最大作物密度, kg/m^2

α_0 ——在所有输入为 0 时基准卸粮阈值映射前量

$\alpha_i (i = 1, 2, 3, 4)$ ——每个归一化特征的权重, 反映该因素对卸粮阈值敏感度

记录 k 次历史作业数据 $(v_h^{(k)}, \omega^{(k)}, \rho^{(k)}, C_s^{(k)}, \theta_{\text{best}}^{(k)})$, $\theta_{\text{best}}^{(k)}$ 为每次数据最优卸粮阈值, 最小化预测卸粮阈值与观测值误差, 使用最小二乘进行最优参数 α 求解, 即

$$L(\alpha) = \sum_k (\theta_{\text{best}}^{(k)} - \hat{\theta}^{(k)})^2 \tag{12}$$

运粮车状态包含前往卸粮点、卸粮、等待、返仓等。如图 1 所示。

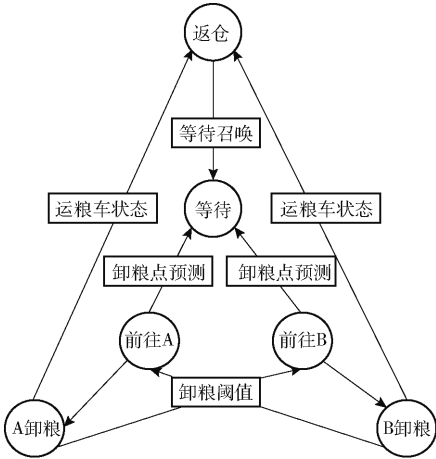


图 1 运粮车状态转移

Fig. 1 State of grain transport vehicle changed

现阶段,运粮车运行位置和作业状态 z_t 与运粮车的移动目标决策 m_t^{move} 共同决定其下一个状态 z_{t+1} 及相应时间消耗。整个过程构成概率结构,即

$$P(z_{t+1} | z_t, m_t^{move}) = \begin{cases} 0 & (\text{状态唯一}) \\ 1 & (\text{状态不唯一}) \end{cases} \tag{13}$$

将 3 部分合并,即可得到完整的组合状态转移,即

$$P(S_{t+1} = (x_{t+1}, y_{t+1}, \theta_{t+1}, z_{t+1}) | s_t, m_t) \tag{14}$$

在该马尔可夫决策过程中,及时调整卸粮阈值成为优化收获机非生产性等待时间、降低运粮车转运路径成本和粮食转运损失的关键。每一次决策,都会根据当前状态 s_t , 实时综合调度成本 $c(s_t, m_t)$ 计算式为

$$c(s_t, m_t) = \mu(\Psi_t^{(A)} + \Psi_t^{(B)}) + \lambda \left(\frac{d_{act}}{d_{ref}} \right)^2 + \sigma \left(\frac{\max(0, Q_{act} - Q_T)}{Q_T} \right)^2 \tag{15}$$

采用折扣因子 γ 迭代法不断更新最优价值函数,即

$$V(s) = \min_m \left\{ c(s, m) + \gamma \sum_{s'} P(s' | s, m) V(s') \right\} \tag{16}$$

直到式(16)收敛,得出基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型的调度策略。该模型能够在保证收获机连续高效作业前提下,有效减少综合调度成本。

当真实转移概率 P 存在不确定性,将其建模为不确定性集合 $K(s, m)$,从而得到在状态 s 下的鲁棒最优值函数,即

$$V^*(s) = \min_{m \in M(s)} \left\{ c(s, m) + \gamma \sup_{P \in K(s, m)} \sum_{s'} P(s' | s, m) V^*(s') \right\} \quad (m \in M(s)) \tag{17}$$

式中, $\sup_{P \in K(s, m)} \sum_{s'} P(s' | s, m) V^*(s')$ 为针对每个动作决策 m 计算在最不利转移概率分布下的下一步期望值; m 为状态 s 可选的决策动作集合。

实际作业中,由于地形路况变化、极端天气、通信延迟、设备等原因,使得协同调度策略在不确定条件下表现出不稳定或“抖动”特征。决策者需为最坏情况进行准备,从而保证策略在任何符合模型假设的环境中都能获得较好性能。

2 材料与方法

2.1 逻辑框架设计

本文提出的多机协同逻辑框架集成了路径跟踪控制^[25-26]、纵向协同算法、作业流程管理^[27]、粮仓监测系统、自动卸粮技术等,将理论模型转换为自主作业系统。在主调度循环中,收获机沿预设路径执行收获作业,运粮车则通过决策选取最优协同目标(综合考虑距离与粮仓状态)并实时规划行驶路径。通过状态转移链实现多机间通信与协同调度:当任一收获机粮仓达到阈值,即发出卸粮请求,运粮车响应后计算最优卸粮点并完成对接;卸粮后,运粮车根据剩余装载量与任务需求动态决策返仓或继续支援,全程以最小化调度成本为目标,显著减少非生产性等待时间,减少运粮车转运路径成本和最小化粮食转运损失。该框架通过算法深度融合与在线决策闭环,显著提升无人化农业多机协同效率,为智能农机系统提供了关键技术支撑。具体收获转运协同逻辑流程如图 2 所示。

2.2 仿真实验

农田数据采自山东潍坊平原地区试验田,依据实际作业环境设置仿真作业任务,2 台收获机和 1 台运粮车在相邻两个长方形地块上协同作业,田间地块参数(表 1)与农机参数(表 2)。采用单侧卸粮模式,回字形收获路径,如图 3 所示。对比传统仓满召唤卸粮模型、遗传算法优化模型、优化马尔可夫决策模型仿真结果,以验证本文提出的优化模型和算法的性能稳定性。算法运行环境为:处理器 Intel(R) i9-13980,内存 16 GB,操作系统 Windows 11,编程语言 Python。

2.2.1 传统仓满召唤卸粮模型

每台收获机在作业过程中持续累积粮食,当其仓内储量达到预设满载阈值时,即发出卸粮请求;运

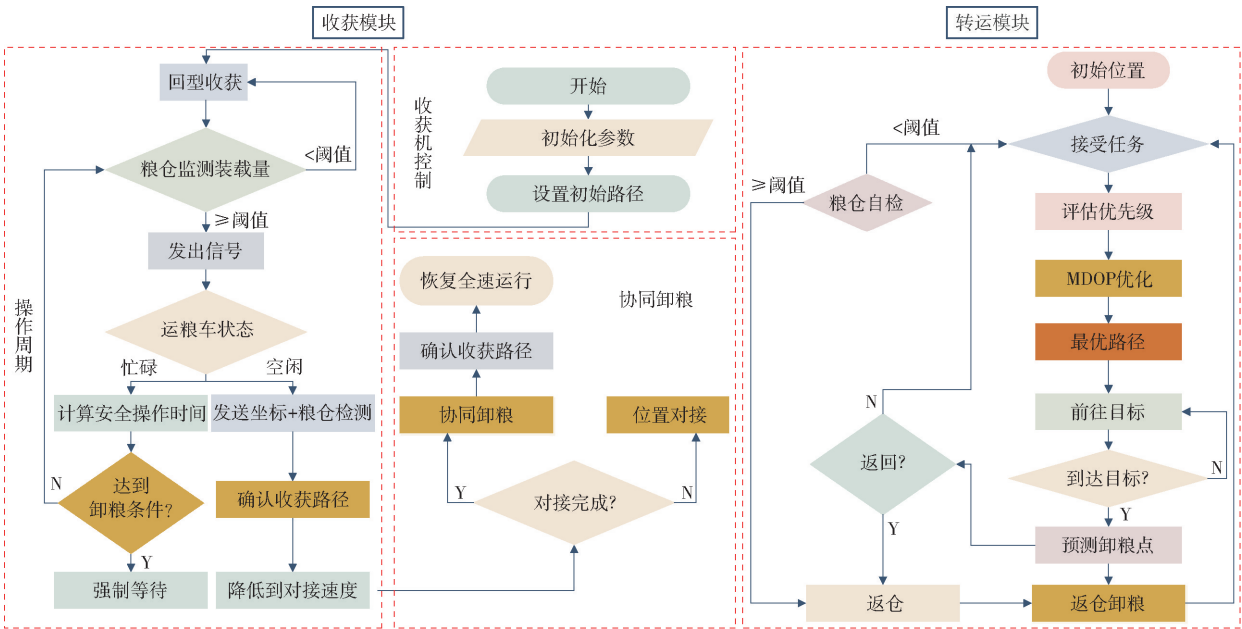


图2 收获转运协同逻辑流程

Fig.2 Logical process of harvest and transfer collaboration

表1 田间地块参数

Tab.1 Field plot parameters

地块	面积/(m×m)	作物密度/(kg·m ⁻²)	地形坡度/(°)
A	100×50	0.80~0.85	1~3
B	100×50	0.78~0.83	1~3

表2 农机技术参数

Tab.2 Technical parameters of agricultural machinery

农机	行驶速度/(m·s ⁻¹)	割幅/m	粮仓容量/kg
收获机A	0.5	2.5	800
收获机B	0.5	2.5	800
运粮车	0.5~2.0		2400

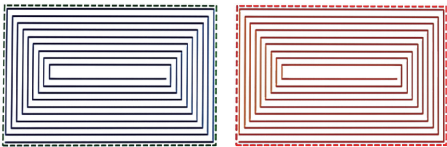


图3 收获路径

Fig.3 Harvest path

粮车收到请求后,按固定调度规则前往对应地块,与收获机在预定卸粮点对接完成卸载;卸载后运粮车再按事先计划的返仓或下一个请求地点行驶。传统仓满召卸载粮模型如图4所示。

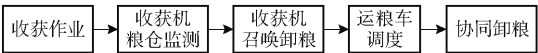


图4 传统仓满召卸载粮模型

Fig.4 Traditional model of unloading grain when warehouse was full

2.2.2 遗传算法优化模型

将“卸粮阈值”看作一个待优化的决策变量,采用经典遗传算法(GA),在仿真调度模型中搜索出调

度成本最小的最优阈值(图5)。具体流程:

- (1)染色体编码:将每台收获机卸粮阈值 θ_i 映射为实数基因。若有 M 台收获机,则1个染色体即为长度 M 实数向量 $\theta=(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_M)$ 。
- (2)初始种群:随机生成 N 个不同染色体 $\{\theta^{(k)}\}_{k=1}^N$,保证阈值落在合法区间。
- (3)选择:基于适应度的轮盘赌或锦标赛方式,优先保留高适应度个体。
- (4)交叉:对选出的染色体对进行均匀交叉或单点/两点交叉,生成新个体。
- (5)变异:以小概率对某些基因加高斯扰动并裁剪到合法区间内。
- (6)精英保留:保持若干最优个体不参与交叉变异,直接进入下一代,以防最优解丢失。
- (7)终止条件:当达到最大代数 $G_{\max}$ 或适应度改进小于阈值 ε 时终止。

2.2.3 优化马尔可夫决策模型

在优化马尔可夫决策过程中,及时调整卸粮阈值成为优化收获机非生产性等待时间、降低运粮车转运路径成本和粮食转运损失的关键(图6)。具体过程:

- (1)明确收获任务。每台收获机按照预设收获路径在各自地块进行收获作业。
- (2)数据准备。整合并标定车辆特性参数。
- (3)最优卸粮阈值计算。利用基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型,计算出每台收获机下一状态的最优卸粮阈值。
- (4)最优调度策略。根据最优卸粮阈值预测卸粮点和卸粮时间,更新智能农机调度顺序。

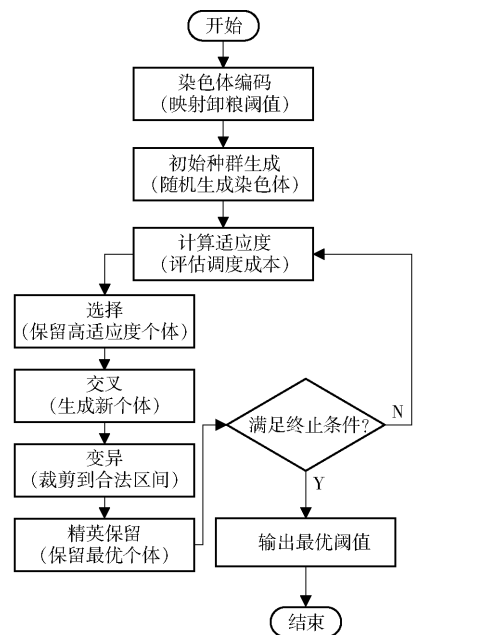


图5 遗传算法优化模型

Fig. 5 Genetic algorithm optimization model

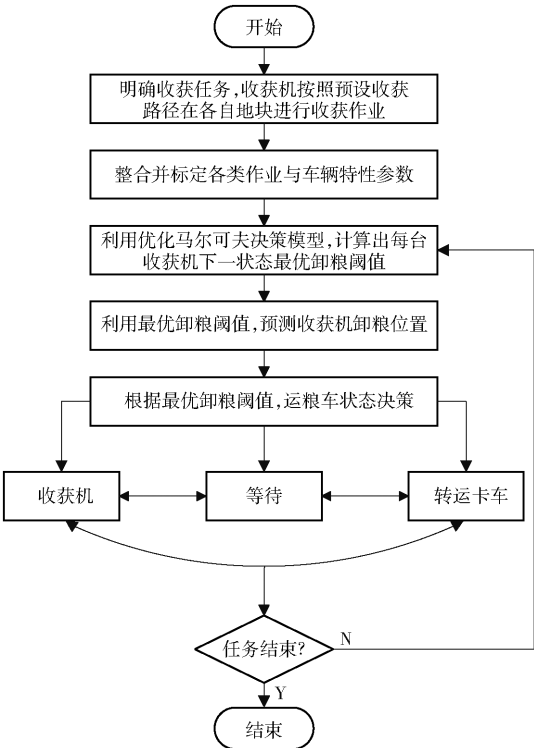


图6 优化马尔可夫决策模型

Fig. 6 Optimized Markov decision model

3 试验结果分析

3.1 非生产性等待时间对比

传统仓满召唤卸粮模型仿真结果如图 7a 所示。所要减少非生产性等待时间是指当收获机的粮仓达到卸粮触发条件它必须暂停收获作业,直到运粮车到达卸粮点并开始卸粮的这段时间。遗传算法优化模型是通过计算每台收获机最优卸粮阈值,从而减

少运粮车调度过程中的产生冲突的概率,达到减少非生产性等待时间的目的,仿真结果如图 7b 所示。本文提出的玉米籽粒收获机与运粮车多机协同作业策略,通过动态调整卸粮阈值,可以减少非生产性等待时间,仿真结果如图 7c 所示。

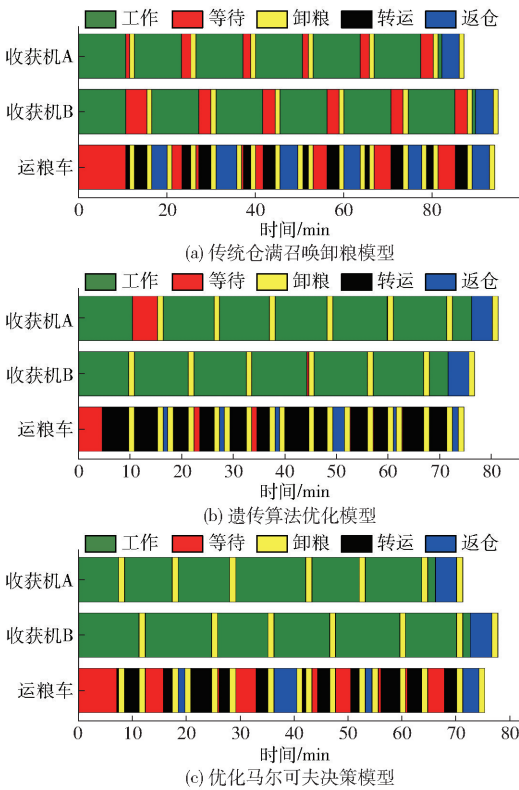


图7 仿真结果

Fig. 7 Simulation results

仿真结果图中红色部分即为收获机非生产性等待时间。图 7a、7b 相比,遗传算法优化卸粮模型总作业时间比传统模型减少 13 min,收获机 A 非生产性等待时间减少 5 min,收获机 B 非生产性等待时间减少 16 min,采用遗传算法优化卸粮模型总作业时间比传统模型减少 13.8%,收获机 A 和 B 的非作业时间减少 50% 和 95%。

图 7a、7c 相比,优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间比传统模型减少 17 min,收获机 A 非生产性等待时间减少 9.5 min,收获机 B 非生产性等待时间减少 17 min,采用优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间比传统模型减少 18.1%,收获机 A 和 B 非作业时间减少 95% 和 99%。

图 7b、7c 相比,优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间比遗传算法优化卸粮模型减少 4 min,收获机 A 非生产性等待时间减少 4.5 min,收获机 B 非生产性等待时间减少 1 min,采用优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间比遗传算法优化卸粮模型减少 4.9%,收获机 A 和收获机 B 非作业时间减少 90% 和 50%。对比结果如表 3 所示。

表 3 对比结果			
Tab.3 Comparison result			min
卸粮模型	总作业时间	收获机 A 等待时间	收获机 B 等待时间
传统模型	94	10	17
遗传算法优化	81	5	1
优化马尔可夫决策	77	0.5	0

3.2 转运成本对比

转运成本指运粮车在田间作业中所行驶路径的总里程。图 8 为不同卸粮模型下,运粮车在田间作

业期间位置信息的变化和运粮车转运状态的运动轨迹。由图 8 可知,随着转运距离增加,玉米籽粒在运输过程中的转运成本亦随之升高。如图 8a 所示,运粮车在传统模型下,转运次数 12 次,返仓次数 6 次,累计距离约 1 745 m;如图 8b 所示,运粮车在遗传算法优化模型下,转运次数 12 次,返仓次数 6 次,累计距离约 1 977 m;如图 8c 所示,运粮车在优化马尔可夫决策模型下,转运次数 12 次,返仓次数 4 次,累计距离约 1 595 m,所以优化马尔可夫决策模型转运成本比传统模型低 8.9%,比遗传算法优化模型低 19.3%。

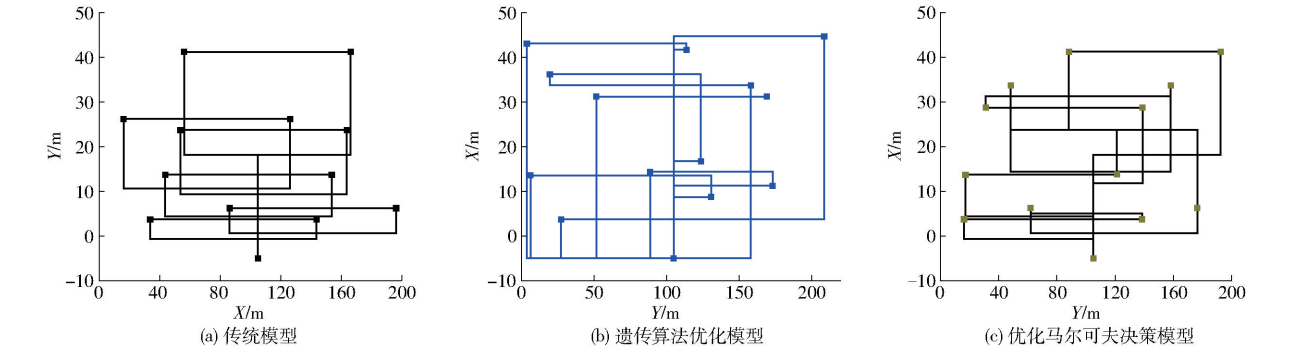


图 8 运粮车运动路径

Fig.8 Movement path of grain transport vehicle

3.3 转运损失率对比

籽粒转运损失率是由收获机实际累计收获量和转运卡车实际累计装载量差值占比决定。图 9a 中,传统模型下收获机 A 和 B 累计收获量约为 7 950 kg,而转运卡车累计装载量为 7 271 kg,可得传统仓满召唤卸粮模型下玉米籽粒转运损失率约为 8.5%,同理,如图 9b、9c 所示,遗传算法优化模型下玉米籽粒转

运损失率约为 6.1%,优化马尔可夫决策模型下玉米籽粒转运损失率约为 4.3%。籽粒转运损失率仿真结果如图 9d 所示。

4 结论

(1)建立了基于动态卸粮阈值优化的马尔可夫决策模型,每台收获机按预设路径收获,通过状态转

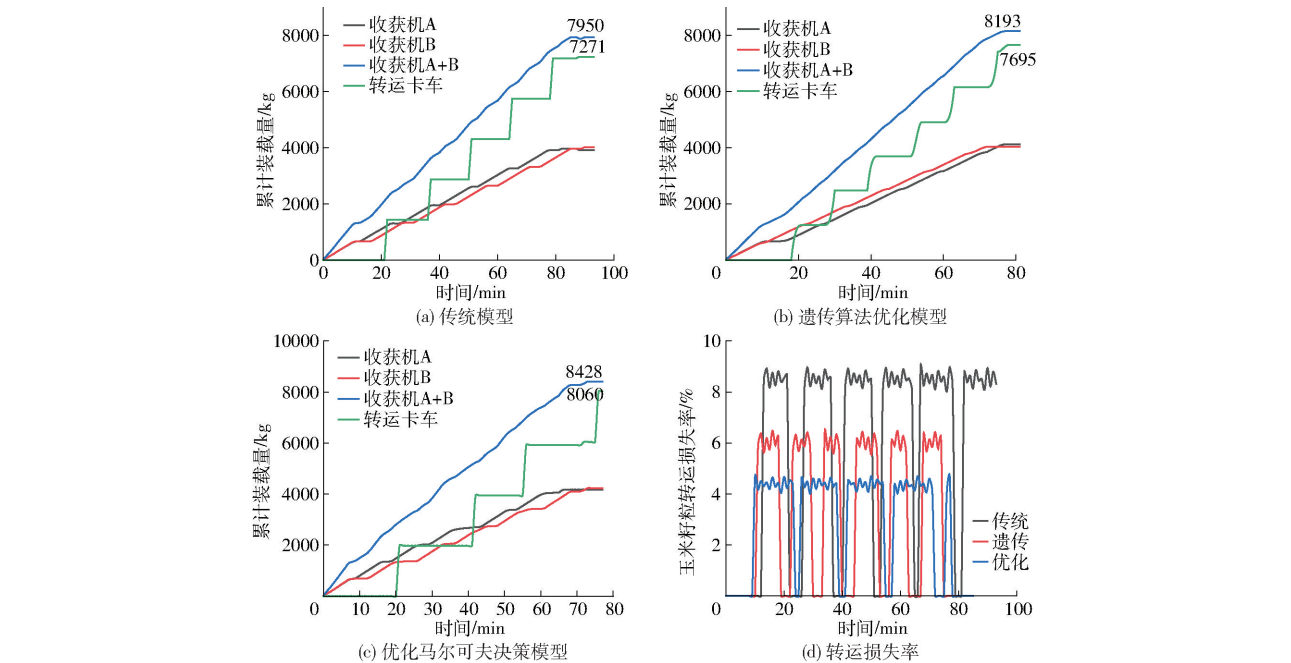


图 9 累计装载量和损失率对比

Fig.9 Comparison of cumulative loading volume and loss rate

移链实现多机通讯驱动的协同流程,采用 Pycharm 软件对协同逻辑框架进行了仿真验证。

(2)采用遗传算法优化卸粮模型总作业时间比传统仓满卸粮模型减少 13.8%,收获机 A 和收获机 B 非作业时间减少 50% 和 95%。采用优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间比传统仓满卸粮模型减少 18.1%,收获机 A 和收获机 B 非作业时间减少 95% 和 99%。采用优化马尔可夫决策卸粮模型总作业时间比遗传算法优化卸粮模型减少

4.9%,收获机 A 和收获机 B 非作业时间减少 90% 和 50%。

(3)优化马尔可夫决策模型转运成本比传统模型低 8.9%,比遗传算法优化模型低 19.3%。传统仓满召唤卸粮模型下玉米籽粒转运损失率约为 8.5%,遗传算法优化模型下玉米籽粒转运损失率约为 6.1%,优化马尔可夫决策模型下玉米籽粒转运损失率约为 4.3%。验证了本文调度策略的有效性和优越性。

参 考 文 献

[1] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究为建设实践[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese)

[2] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8-17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17. (in Chinese)

[3] WANG Ziyi, ZHANG Fan, MA Shiji, et al. Research on collaborative scheduling strategies of multi-agent agricultural machinery groups[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 9045.

[4] LIU Lixing, LIU Hongjie, LI Jianping, et al. Construction of orchard agricultural machinery dispatching model based on improved beetle optimization algorithm[J]. Agronomy, 2025, 15(2): 323.

[5] PAN Weicheng, WANG Jia, YANG Wenzhong. A cooperative scheduling based on deep reinforcement learning for multi-agricultural machines in emergencies[J]. Agriculture, 2024, 14(5): 772.

[6] SETHANAN K, NEUNGMATCHA W. Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field operations[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(3): 969-984.

[7] NOGUCHI N, WILL J, REID J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.

[8] LI Shichao, ZHANG Man, WANG Ning, et al. Intelligent scheduling method for multi-machine cooperative operation based on NSGA-III and improved ant colony algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107532.

[9] 白晓平, 王卓, 胡静涛, 等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14-21.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14-21. (in Chinese)

[10] 白晓平, 王卓, 胡静涛. 基于有限状态机的农机导航多任务调度研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 26-31.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao. Multi-task scheduling research of farm machinery navigation system based on the FSM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 26-31. (in Chinese)

[11] 张闻宇, 张智刚, 罗锡文, 等. 收获机与运粮车纵向相对位置速耦合协同控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 1-11.
ZHANG Wenyu, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Position-velocity coupling control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and grain truck[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 1-11. (in Chinese)

[12] 张闻宇, 张智刚, 张帆, 等. 水稻收获转运双机协同自主作业策略与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 1-9.
ZHANG Wenyu, ZHANG Zhigang, ZHANG Fan, et al. Cooperative autonomous operation strategy and experiment of the rice harvester together with a rice-transporting vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 1-9. (in Chinese)

[13] 满忠贤, 何杰, 刘善琪, 等. 智能农机多机协同收获作业控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 17-26.
MAN Zhongxian, HE Jie, LIU Shanqi, et al. Method and test for operating multi-machine cooperative harvesting in intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 17-26. (in Chinese)

[14] 王博, 毛罕平, 王亚娜, 等. 多维度农机多机协同技术采纳影响因素与作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 45-53.
WANG Bo, MAO Hanping, WANG Ya'na, et al. Influencing factors and mechanism of multi-dimensional agricultural machinery collaborative technologies adoption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 45-53. (in Chinese)

[15] 李寒, 钟涛, 张可意, 等. 基于 WebGIS 的农机多机协同导航服务平台设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 28-35.
LI Han, ZHONG Tao, ZHANG Keyi, et al. Design of agricultural machinery multi-machine cooperative navigation service

platform based on WebGIS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 28 – 35. (in Chinese)

[16] 曹如月, 张振乾, 李世超, 等. 基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的多机协同全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 548 – 554.
CAO Ruyue, ZHANG Zhenqian, LI Shichao, et al. Multi-machine cooperation global path planning based on A-star algorithm and Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 548 – 554. (in Chinese)

[17] 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(增刊): 34 – 39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhao, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 34 – 39. (in Chinese)

[18] 张帆, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 192 – 198.
ZHANG Fan, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 192 – 198. (in Chinese)

[19] 杨昊天, 王良民, 刘路, 等. 基于区块链的农机跨区域调度模型构建与应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 31 – 40.
YANG Haotian, WANG Liangmin, LIU Lu, et al. Model construction and application of agricultural machinery cross-region scheduling based on blockchain[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 31 – 40. (in Chinese)

[20] 曹光乔, 马斌, 陈聪, 等. 基于遗传变邻域搜索算法的农机跨区调度优化研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 114 – 123.
CAO Guangqiao, MA Bin, CHEN Cong, et al. Agricultural machinery cross-region scheduling optimization based on genetic algorithm variable neighborhood search[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 114 – 123. (in Chinese)

[21] 吴才聪, 蔡亚平, 罗梦佳, 等. 基于时间窗的农机资源时空调度模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 237 – 241.
WU Caicong, CAI Yaping, LUO Mengjia, et al. Time-windows based temporal and spatial scheduling model for agricultural machinery resources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 237 – 241. (in Chinese)

[22] WEI Wenbo, XIAO Maohua, DUAN Weiwei, et al. Research progress on autonomous operation technology for agricultural equipment in large fields[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1473.

[23] WEI Wenbo, XIAO Maohua, WANG Hui, et al. Research progress of multiple agricultural machines for cooperative operations: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109628.

[24] 翟志强, 王秀倩, 王亮, 等. 面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 542 – 547.
ZHAI Zhiqiang, WANG Xiuqian, WANG Liang, et al. Collaborative path planning for autonomous agricultural machinery of master-slave cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 542 – 547. (in Chinese)

[25] 祝青园, 程家琪, 陈轩伟, 等. 无人驾驶铰接转向车辆路径跟踪控制研究综述[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 1 – 21.
ZHU Qingyuan, CHENG Jiaqi, CHEN Xuanwei, et al. Review on path tracking control of unmanned articulated steering vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 1 – 21. (in Chinese)

[26] 窦汉杰, 陈震宇, 翟长远, 等. 果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 1 – 22.
DOU Hanyue, CHEN Zhenyu, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 1 – 22. (in Chinese)

[27] 刘庆庭, 黄瑶, 蒋姣丽, 等. 甘蔗机械化收获技术与装备研究综述[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 1 – 21.
LIU Qingting, HUANG Yao, JIANG Jiaoli, et al. Technology and equipment of sugarcane harvesting mechanization review[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 1 – 21. (in Chinese)