doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.025

# 基于 DARP 算法的水田除草机器人路径规划方法研究

张宝峰　司　香　蔡宇哲　顾学行　曹　烨　奚小波
(扬州大学机械工程学院, 扬州 225127)

**摘要**: 为了解决水田株间机械化除草难的问题,基于“鸭稻共作”控草模式,提出一种多机器人协同作业的稻田除草方法。为保证机器人能够有效清除稻田行间及株间杂草,基于 DARP 算法设计了除草机器人全覆盖路径规划方法,根据机器人数量随机平分对应的工作区域,设立总起始点和终止点,各机器人随机寻找从总起始点到工作起始点再到终止点的路程,用控制策略约束最大路线长度,分权多机器人成本、路径规划长度和工作时间,计算多机协同作业下的总成本,确定了水田面积与所需机器人的关系。以栅格地图形式建立了常规水稻田模型,利用 Matlab 仿真软件进行了除草机器人全覆盖路径规划试验。结果表明,在 6.15 m×6.15 m 的水田区域,该路径规划方法得出适合此区域机器人数量为 3 台,覆盖率为 100%,证明了该算法具有较好的规划效果,可为小型水田机器人除草路径规划提供参考。

**关键词**: 水田除草机器人; 多机协同作业; 全覆盖路径规划; DARP 算法
**中图分类号**: S224.1; TP242.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0335-09　　**OSID**:

# Research on Path Planning Method for Weeding Robots in Paddy Fields Based on DARP Algorithm

ZHANG Baofeng　SI Xiang　CAI Yuzhe　GU Xuexing　CAO Ye　XI Xiaobo
(*College of Mechanical Engineering*, *Yangzhou University*, *Yangzhou* 225127, *China*)

**Abstract**: Aiming to address the challenge of difficult mechanized weeding inter-column paddy fields, a collaborative multi-robot weeding system for rice fields was proposed based on the “duck-rice co-cultivation” weed control model, utilizing post-transplanting seedling maps obtained from intelligent rice transplanters. Ensuring effective weed removal in both inter-row and inter-column spaces, a complete coverage path planning (CCPP) method for robotic swarms was developed based on the divide areas algorithm for optimal multi-robot coverage path planning. This approach randomly partitioned operational areas through allocation matrices, established global start/end points. And suffered boustrophedon coverage patterns and A* algorithm enlighten to propose three selection validation functions based on the DFS algorithm, which were designed to enable stochastic path discovery from global start points through work areas to terminal points, while controlled strategies constrain maximum path length and turning frequency. The methodology incorporated different turning angle-based counting mechanisms because of the turning of robot and decentralized hardware costs, operational duration, and energy consumption of multi-robots. Multiple iterations were used to calculate the global optimal solution under multi-machine collaborative operation. A conventional paddy field model was established in the form of a grid map, and Matlab simulation software was used to conduct experiments on complete coverage path planning for multi-robots cooperative weeding and the relationship of requiring number of robots was determined from the perspectives of paddy field area and total cost. The results showed that when weeding time was prioritized, with 0.1, 0.8, and 0.1 weighting coefficients, the path planning method determined that the optimal number of robots for the 6.15 m×6.15 m paddy field map was 3, achieving 100% coverage and a total weeding cost of 38.08. When the number of robots was small, hardware costs dominated and should be prioritized for optimization. As the number of robots was increased, energy consumption costs

收稿日期: 2025-04-21　修回日期: 2025-04-30
**基金项目**: 江苏省农业自主创新项目(CX(22)3098)和江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX25_3959)
**作者简介**: 张宝峰(1987—),男,讲师,博士,主要从事农业生产机械化技术及装备研究,E-mail: bf_zhang@yzu.edu.cn
**通信作者**: 奚小波(1989—)男,副教授,博士,主要从事农业生产机械化技术及装备研究,E-mail: xbxi@yzu.edu.cn

were risen significantly and should be prioritized for optimization. The findings demonstrated that the proposed algorithm achieved effective multi-robot cooperative planning, providing a reference for path planning of small-scale paddy field weeding robots.

**Key words**: paddy field weeding robot; multi-machine collaborative operation; full coverage path planning; DARP algorithm

## 0 引言

水稻是我国主要粮食作物之一,传统的水稻种植需要使用大量的除草剂对田间杂草进行控制,既增加成本又易造成药害残留[1-3]。随着人们生活水平的不断提高,有机稻的需求量逐年上升[4-5]。然而,目前有机稻种植过程中的除草环节主要以人工为主[6],不仅效率低且劳动强度大。为了解决有机稻除草问题,科研人员进行了大量的研究[7-11]。目前水田除草农业机械大多是大型机械设备,一般多为拖拉机携带特定机械设备进行除草作业,能够对水稻行间杂草进行有效管理,然而对于株间除草效果并不理想,且插秧后稻田秧苗排列易受到地况影响而不整齐,影响除草机械作业效果。章家恩等[12]采用鸭稻共作模式,利用鸭子的活动特征控制稻田杂草。张本华等[13]开展了稻田鸭群放养密度对鸭群行为及除草效果影响的研究。然而鸭子的驯化、饲养、种类选择、数量投放等有一定科学要求,使得鸭稻共作有一定的技术门槛[14]。

除草机器人群体协同作业涉及多机协同全路径覆盖规划问题,国内外对于全覆盖路径规划技术开展了深入研究,并取得了一定研究成果[15-20]。然而,生成一条既全面覆盖目标区域、避免重复作业,又避开障碍的最优路径并适用于水田除草的研究尚不多见。目前路径规划涉及 2 个计算技术:任务分配算法和群智能算法[21-24]。文献[25-27]的研究成果促进了全覆盖路径规划算法的发展,但是这些算法在应用到水田除草的工作环境时,都存在一些各自的问题,如算法在覆盖过程中的重复率高、覆盖率低、容易陷入局部最优化等。

综上所述,为了解决小型水稻机器人多机协同作业的问题,本文基于“鸭稻共作”模式,提出一种小型多机器人协同除草作业思路,利用多个小型除草机器人完成稻田全域除草作业。基于 DARP(Divide areas algorithm for optimal multi-robot coverage path planning)[28]算法提出一种仿鸭群离散行为的路径规划算法,该算法包括均分工作区域覆盖、回溯机制和定位起始终止工作点 3 个主要部分,首先随机定位工作起始点,以工作起始点平分以机器人数量为标准的工作区域数量,然后每个机器人利用回溯机制遍历各自工作区域,再通过回溯机制和定位终止工作点达到停止工作位置,不断降低约束最长路径长度,多次循环算法并不断更新其最短路径长度获取最优路线,最终得出适合不同区域的除草机器人数量,以期为水稻机械化除草技术提供理论参考。

## 1 建立模型

### 1.1 问题描述

为了描述机器人稻田工况,便于设定机器人总起始点、开始工作起始点和终止点的精确位置,同时用于辅助函数的寻路条件,本研究构建栅格地图模拟稻田工况,并对栅格地图进行赋值。以 6.15 m × 6.15 m 的规则水田为例,结合农艺种植要求,设行距 30 cm,穴距 15 cm。以二维栅格地图为例定义水田环境,图 1 中黑色栅格表示水稻种植位置,红色栅格表示各机器人总起始点,白色栅格表示杂草分布区域。

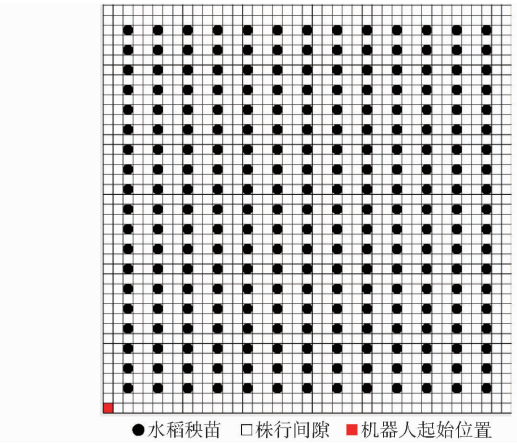



图 1 栅格地图

Fig. 1 Raster map

对栅格位置性质函数 $B_{i,j}$ 赋值,具体为

$$B_{i,j}=\begin{cases}1 & (\text{当前位置为苗间区域})\\ 0 & (\text{当前位置为秧苗区域})\\ 2 & (\text{当前位置为机器人作业起点})\end{cases}$$
$$(i=1,2,\cdots,A;\ j=1,2,\cdots,B) \tag{1}$$

式中 $A$、$B$——长、宽栅格总数

### 1.2 数学模型

本文以最优作业成本为优化目标,包括硬件成本、作业时间成本以及总能量消耗成本。因此,目标函数为

$$\min W = \alpha_1 F_a + \alpha_2 T_{\max} + \alpha_3 F_b \tag{2}$$

其中

$$F_a = MP_m \tag{3}$$

$$T_{\max} = \frac{L_m}{\pi D} T_1 + \xi(t_{m1} T_2 + t_{m2} T_3 + t_{m3} T_4) \tag{4}$$

$$F_b = \sum_{m=1}^{M} L_m \tag{5}$$

式中　$W$——目标函数

$\alpha_1$、$\alpha_2$、$\alpha_3$——成本权重

$F_a$——所有除草机器人硬件成本

$T_{\max}$——用时最长除草机器人所用的时间成本

$F_b$——所有除草机器人从总起始点到终止点的路径长度总和，用于表征所消耗的总电量成本

$\xi$——转弯打滑修正系数

$P_m$——单个机器人本身成本

$M$——除草机器人数量

$L_m$——第 $m$ 个除草机器人行驶路径长度

$D$——除草机器人轮子直径

$T_1$——轮子转一圈所需的时间

$t_{m1}$、$t_{m2}$、$t_{m3}$——除草机器人转动 45°、90°、135°时的次数

$T_2$、$T_3$、$T_4$——除草机器人转动 45°、90°、135°时的时间

约束条件为

$$\begin{cases} \xi \geqslant 1 \\ \boldsymbol{B}_{ms} = (1,1) \\ \boldsymbol{B}_{me} = (41,41) \\ \forall B_m \in (B_{i,j} = 1) \\ \boldsymbol{S}_m = (\lfloor 41 S_{m_x} \rfloor + 1, \lfloor 41 S_{m_y} \rfloor + 1) \\ S_1 \neq S_2 \neq \cdots \neq S_m \\ S_{m_x} \in [0,1] \\ S_{m_y} \in [0,1] \\ \forall S_m \in (B_{i,j} = 1) \end{cases} \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{B}_{ms}$——第 $m$ 个除草机器人总起始点

$\boldsymbol{B}_{me}$——第 $m$ 个除草机器人终止点

$\boldsymbol{S}_m$——第 $m$ 个除草机器人随机工作起始点且位置互不相等

$S_{m_x}$、$S_{m_y}$——第 $m$ 个机器人所在位置坐标，为 0 到 1 任意值

$B_m$——第 $m$ 个机器人可行走区域

## 2　多机协同路径规划算法

### 2.1　工作区域分配

传统 DARP 全覆盖算法旨在解决多机器人系统中的覆盖路径规划问题。该算法将多机器人路径规划问题分解为多个单机器人路径规划问题以降低问题的复杂性，利用 STC（Spanning tree coverage）算法使每个机器人负责一个子区域。其目标是高效地分配任务，使得多个机器人能够协同工作，再利用分配矩阵 $\boldsymbol{A}$ 使得多机器人具有平等的作业区域，并以最短的总路径长度完成对一个指定区域的全面覆盖。

$$\boldsymbol{A}_{x,y} = \operatorname{argmin} \boldsymbol{E}_{i|x,y} \quad (\forall (x,y) \in L) \tag{7}$$

其中：$\boldsymbol{E}_{i|x,y} = d(\chi_i(t_0), [x,y]^{\tau})$ 为评估矩阵，表示总区域 $L$ 中的单元格与第 $i$ 个机器人初始位置 $\chi_i(t_0)$ 之间的可达性（例如距离）。

传统 DARP 全覆盖算法默认起始点和终止点都处于同一处，不适用于水田除草时的行为模式。为了均衡各除草机器人除草作业成本，本文提出均分工作区域思想（图 2）。首先设定除草机器人数量，计算出全部除草区域面积，利用选择验证函数 $F_{S0}$ 判断机器人是否可以从当前位置 $(x_0, y_0)$ 到达下一位置 $(x_1, y_1)$ 并赋值 1 或 0，其数学描述为

$$F_{S0} = \begin{cases} 1 & ((x_1,y_1) \in \{(x_0 \pm 1, y_0), (x_0, y_0 \pm 1)\}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \tag{8}$$

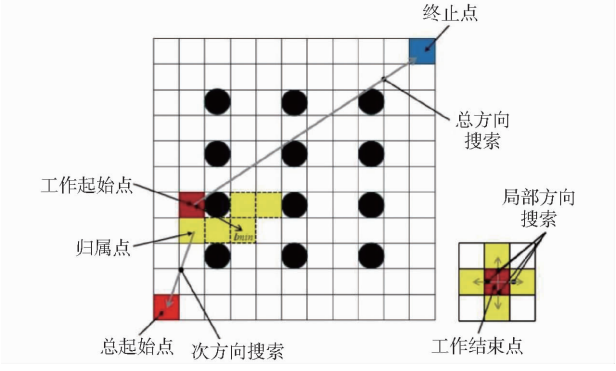



图 2　均分工作区域示意图

Fig. 2　Diagram of evenly divided work area

当选择验证函数 $F_{S0}$ 确定了可到达的杂草区域时，用 $F_{\text{findmin}}$ 函数计算工作起始点 $\boldsymbol{S}_m$ 到每个确定可达点（$F_{S0} = 1$）的距离，并选择距离最小的区域点。其数学描述为

$$F_{\text{findmin}}(\boldsymbol{S}_m) = \underset{(x_1,y_1) \in \boldsymbol{V}}{\operatorname{argmin}} (d(\boldsymbol{S}_m, (x_1,y_1))) \tag{9}$$

$$F_{\text{findmin}}(\boldsymbol{B}_{ms}) = \underset{(x_1,y_1) \in \boldsymbol{V}}{\operatorname{argmin}} (d(\boldsymbol{B}_{ms}, (x_1,y_1))) \tag{10}$$

$$F_{\text{findmin}}(\boldsymbol{B}_{me}) = \underset{(x_1,y_1) \in \boldsymbol{V}}{\operatorname{argmin}} (d(\boldsymbol{B}_{me}, (x_1,y_1))) \tag{11}$$

其中

$$d = |x - x_1| + |y - y_1|$$

式中　$\boldsymbol{V}$——$B_{i,j} \neq \infty$ 的区域集合

$d$——曼哈顿距离

找到最小距离的点后对其赋值

$$C_m = 10m \tag{12}$$

式中　$m$——机器人编号

$C_m$——区域颜色归属标记

当确定了最小距离位置时，将位置($x_1$，$y_1$)唯一归属于起始点为$\boldsymbol{S}_m$的第 $m$ 个机器人，并将该位置性质函数值 $B_{i,j}$标记为 $C_m$，同时更新工作区域分配下的目标函数值，从第 1 个除草机器人依次如此循环到第 $M$ 个除草机器人向终止点$\boldsymbol{B}_{me}$搜索直到将所有杂草区域平分结束，记录到达总起始点的最小距离和保留所有探索出的路径，示意图如图 2 所示。

## 2.2 路径搜索和回溯机制

传统 A* 算法结合了 Dijkstra 算法和广度优先搜索算法(BFS)，使用代价函数来评估和选择路径，目的在于在电子地图中规划全局最优的路径[29-31]。通过 A* 算法可以规划出一条从死点到回溯点的回溯路径，但是将导致整体转弯多、重复搜索率高等问题。本文基于 A* 算法在均分工作区域之后，以深度优先搜索(DFS)为基础得到 $F_{\text{findway}}$函数用于寻找和回溯路径。其数学描述为

$$F_{\text{findway}}(B_{i,j},x_0,y_0,C_m,P_{mi})=\begin{cases}P_{me}\\F_{\text{findway}}(B_{i,j},x_1,y_1,C_m,P_{mi})\\F_{\text{back}}(B_{i,j},x_0,y_0,C_m,P_{mi})\end{cases}\tag{13}$$

式中 $P_{me}$——已找到终止点的路径

$P_{mi}$——函数搜索出的全部路径

当 $F_{\text{findway}}=F_{\text{findway}}(B_{i,j},x_1,y_1,C_m,P_{mi})$时为可继续使用选择验证函数 $F_s$向 8 个方向(上、下、左、右、右上、右下、左上、左下)寻找路径，已被经过的区域将其栅格位置性质更新，不能够再被选定。当路径搜索进入局部最优化时，停止继续搜索路径，使 $F_{\text{findway}}=F_{\text{back}}(B_{i,j},x_0,y_0,C_m,P_{mi})$进入回溯阶段，利用选择验证函数 $F_{S1}$向 4 个邻接位置搜寻有无归属标记 $C_m$，使其回到距离最接近 $\boldsymbol{B}_{me}$的已访问点，尝试其他方向，直到结束所有归属区域并回到终止点 $\boldsymbol{B}_{me}$。

$$F_{S1}=\begin{cases}1 & ((x_1,y_1)\in\{R_m\cap C_m\})\\0 & (\text{其他})\end{cases}\tag{14}$$

$$F_{S2}=\begin{cases}1 & ((x_1,y_1)\cap C_{m_x,m_y}=C_m)\\0 & (\text{其他})\end{cases}\tag{15}$$

其中 $R_m=\{(m_x+1,m_y),(m_x+1,m_y+1),(m_x+1,m_y-1),(m_x,m_y+1),(m_x,m_y-1),(m_x-1,m_y),(m_x-1,m_y+1),(m_x-1,m_y-1)\}$。回溯机制示意图如图 3 所示。

## 2.3 控制策略

因 $F_{\text{findway}}$函数是基于深度优先搜索函数，其解大多是可行解，不是最优解或者接近最优解，故需要设计控制策略使其解接近最优解。根据均分工作区域分配，使各机器人任务面积趋于相等，但归属面积的差异使各机器人行驶路程不一，故以此为基础进行控制策略的研究，可将第 1 次迭代路径长度最短的机器人和第 1 次迭代的机器人路径总长度记录下来，以其为约束条件，缩短第 2 次迭代的路径，同时引入转弯角度判定 $\theta$，它可以约束其次数来辅助寻找最短路径，从而缩短时间成本，转弯 90°、45°和 135°示意图如图 4 所示。

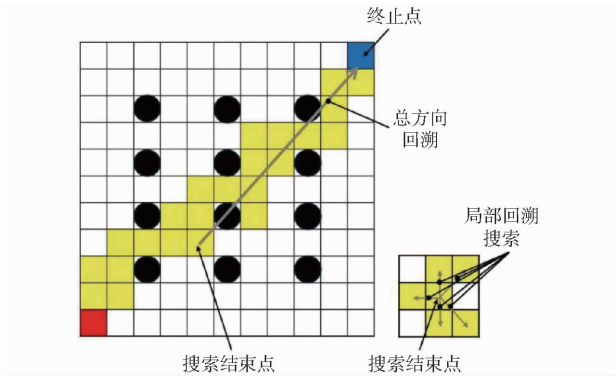



图 3 回溯机制示意图

Fig. 3 Schematic of backtracking mechanism

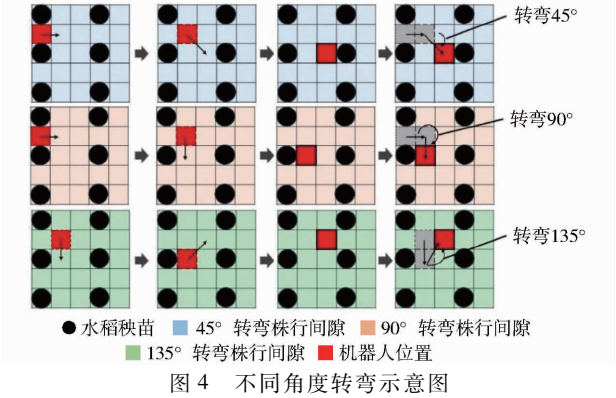



图 4 不同角度转弯示意图

Fig. 4 Diagram of turns from different angles

得出适合该区域的机器人数量范围。控制策略的数学描述为

$$L_m\leqslant D_{\max}\quad(m\in\{1,2,\cdots,M\})\tag{16}$$

$$t_m\leqslant t_{\max}\quad(m\in\{1,2,\cdots,M\})\tag{17}$$

$$\theta=\begin{cases}45^\circ & \left(\arccos(\boldsymbol{I}_1\boldsymbol{I}_2)/(|\boldsymbol{I}_1||\boldsymbol{I}_2|)=\dfrac{\sqrt{2}}{2}\right)\\90^\circ & (\arccos(\boldsymbol{I}_1\boldsymbol{I}_2)/(|\boldsymbol{I}_1||\boldsymbol{I}_2|)=0)\\135^\circ & \left(\arccos(\boldsymbol{I}_1\boldsymbol{I}_2)/(|\boldsymbol{I}_1||\boldsymbol{I}_2|)=-\dfrac{\sqrt{2}}{2}\right)\end{cases}\tag{18}$$

$$\boldsymbol{I}_1=(m_{x1}-m_{x0},m_{y1}-m_{y0})\tag{19}$$

$$\boldsymbol{I}_2=(m_{x2}-m_{x1},m_{y2}-m_{y1})\tag{20}$$

式中 $D_{\max}$——初始预设的最大单个除草机器人路径长度

$t_{\max}$——初始预设的最大单个除草机器人转弯次数

$\boldsymbol{I}_1$——除草机器人第 2 步与第 1 步的位置向量

$\boldsymbol{I}_2$——除草机器人第 3 步与第 2 步的位置向量

先判定是否为 90°转弯角度，再判定 45°和 135°转弯角度。

### 2.4　算法流程

机器人群组协同除草作业算法流程如图 5 所示，具体步骤为：

(1)定义农田边界，确定总起始点和终止点，设置参数 $\alpha_1$、$\alpha_2$、$\alpha_3$、$\xi$、$P_m$、$m$、$T_2$、$T_3$、$T_4$、$\boldsymbol{B}_{ms}$、$\boldsymbol{B}_{me}$，根据实际水田环境绘制模型。

(2)根据式(6)随机设置工作起始点 $\boldsymbol{S}_m$，利用式(8)判定 $\boldsymbol{S}_m$ 周围可有通过点，根据式(9)～(11)计算工作起始点至终止点的总方向路线和至总起始点的次方向路线选择较短距离的点并赋值。

(3)根据式(14)在赋值区域进行路径规划并记录路径，以式(14)为条件判定重复此步骤直到将所属赋值区域全部规划完或到达终止点。

(4)挑选并记录总路径最少的路线，清空 list 表，迭代次数加 1。

(5)循环步骤(2)～(4)，当前迭代次数大于设置次数时结束迭代，使用控制策略长度和转弯角度双控制策略对路径进行优化，输出最终时间和总成本。

## 3　仿真试验

为了验证改进 DARP 算法是否满足除草路径要求以及揭示机器人适配数量规律，优化系统参数，基于 Matlab 平台开展算法适用性研究，探求作业总成本与地块面积、机器人数量、作业时间的最优方案，采取 2 种方法寻找机器人适配规律，同时与原 DFS 函数进行比较分析：①当公式(2)、(4)中成本加权系数 $\alpha_1$、$\alpha_2$、$\alpha_3$ 和转弯打滑修正系数 $\xi$ 不变时，模拟不同面积地块适配机器人数量。②当地块面积不变时，分析两类系数的变化对适配机器人数量的影响规律。

### 3.1　两类加权系数不变，地块区域变化

以 6.15 m×6.15 m 栅格地图为例，其中每一正方形边长为 15 cm，机器人轮子直径设定为 88 mm，电机运动一周所需时间是 2 s，在现实情况中，水稻生长过程中，水田除草次数多达 3 次，每次除草时间应在尽量短的时间内完成[32-34]，故本文认定除草时间重要性高于其余路径长度和机器人成本重要性，故将硬件成本权重 $\alpha_1$ 设为 0.1，时间成本权重 $\alpha_2$ 设为 0.8，总电量消耗成本权重 $\alpha_3$ 设为 0.1。其中除草机器人成本 $P_m$ 为 10；经过多次测试后，转弯打滑修正系数 $\xi$ 为 1.1～1.3，本文取中间值为 1.2；$T_2$ 设为 0.3 s；$T_3$ 设为 0.6 s；$T_4$ 设为 0.8 s，设置循环工作起始点 1 000 次，结合控制策略，得出 1 000 次内全局最优解，仿真结果数据比较如表 1 所示，模拟图结果如图 6 所示。

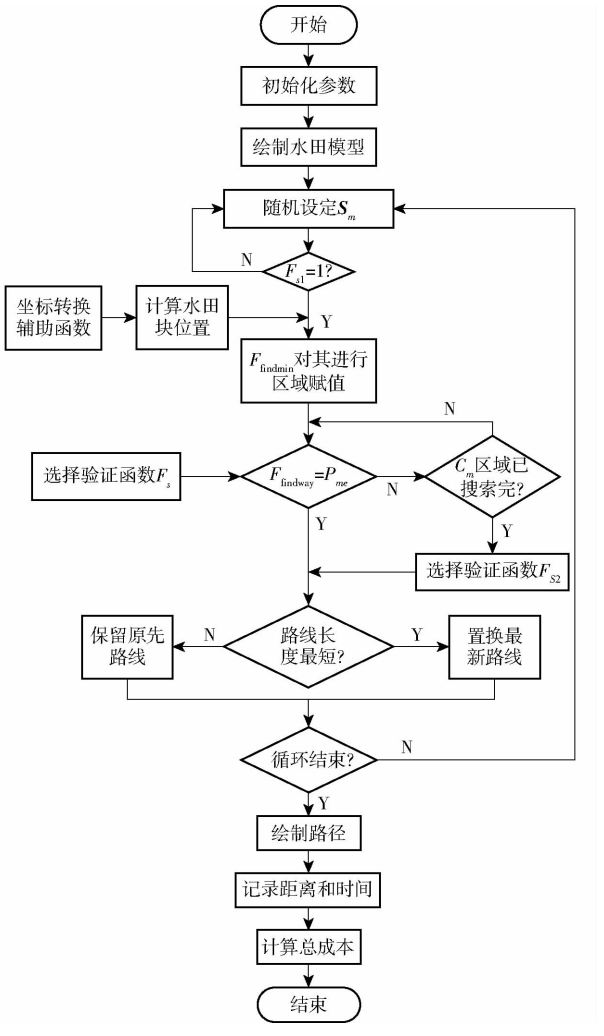



图 5　路径规划算法流程图

Fig. 5　Flowchart of path planning algorithm

在水田除草机器人路径规划模型中，设定循环工作起始点次数为 1 000，以时间成本为优化目标进行仿真分析。试验结果表明，6 台除草机器人系统具有最短的任务完成时间，而 3 台机器人系统则表现出最低的总成本。值得注意的是，首次运行总成本包含设备购置费用，在后续使用中，3 台机器人系统仍保持较低的总成本优势。从长期运行的角度分析，随着使用次数增加，3 台与 6 台机器人系统总成本差异呈扩大趋势。然而，本仿真试验以时间成本为优化重点，且循环次数限定为 1 000，因此，可得出 3 台机器人系统优于 6 台系统。在时间约束严格的作业场景下，采用 6 台机器人系统完成区域除草任务是更优选择。通过分析图 7 中的第 7 组仿真数据可知，7 台机器人系统在该水田模型中出现多条冗余路径，表现为到达目标点的纵横轨迹线显著增多。这种现象表明系统存在运动步数浪费，未能

**表 1 多机器人随机模拟路线仿真结果**

**Tab. 1 Multi-robot stochastic simulation route**

| 除草机器人数量 $M$/台 | 45°转弯次数 $t_{m1}$/次 | 90°转弯次数 $t_{m2}$/次 | 135°转弯次数 $t_{m3}$/次 | 路径长度 $L_m$/m | 消耗的最长时间 $T_{max}$/min | 路线总长 $F_b$/m | 总成本 $W$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 234 | 342 | 234 | 219.15 | 22.69 | 219.15 | 41.06 |
| 2 | 109 | 233 | 101 | 160.50 | 16.33 | 311.70 | 46.23 |
| | 101 | 210 | 100 | 151.20 | | | |
| 3 | 41 | 232 | 29 | 74.70 | 8.73 | 242.95 | 34.28 |
| | 76 | 130 | 75 | 83.40 | | | |
| | 64 | 154 | 64 | 84.85 | | | |
| 4 | 34 | 169 | 28 | 62.55 | 7.84 | 266.40 | 36.91 |
| | 41 | 168 | 32 | 64.35 | | | |
| | 47 | 85 | 49 | 77.70 | | | |
| | 54 | 124 | 48 | 61.80 | | | |
| 5 | 43 | 80 | 46 | 57.60 | 6.80 | 297.40 | 40.18 |
| | 43 | 87 | 45 | 67.05 | | | |
| | 24 | 130 | 21 | 57.75 | | | |
| | 16 | 141 | 10 | 60.70 | | | |
| | 24 | 139 | 20 | 54.30 | | | |
| 6 | 31 | 111 | 28 | 54.00 | 6.08 | 320.70 | 42.93 |
| | 21 | 63 | 26 | 56.55 | | | |
| | 35 | 98 | 33 | 58.50 | | | |
| | 22 | 92 | 18 | 40.65 | | | |
| | 22 | 101 | 14 | 51.60 | | | |
| | 36 | 121 | 26 | 59.40 | | | |
| 7 | 20 | 83 | 18 | 84.00 | 8.34 | 356.85 | 49.35 |
| | 30 | 74 | 31 | 50.70 | | | |
| | 20 | 120 | 13 | 43.95 | | | |
| | 21 | 106 | 11 | 47.10 | | | |
| | 31 | 92 | 27 | 59.70 | | | |
| | 21 | 77 | 20 | 38.85 | | | |
| | 13 | 75 | 7 | 32.55 | | | |

实现局部最优解,同时也验证了在 41×41 的水田栅格地图中,7 台机器人配置数量已超出最优范围。由模拟运算可知:以时间权重为第 1 优先级,不同面积适配的机器人数量见图 7。

由模拟分析结果可知:加权系数不变的条件下,除草面积越大所需的除草机器人数量越多,当除草面积超过 3 333.3 $m^2$ 时,所需的小机器人数量急剧增加,除草机器人数量增加将导致硬件投入成本的增加,同时对计算机算力也提出了更高的要求。因此在满足除草时间成本的条件下,可将 3 333.3 $m^2$ 以上的水田除草任务分解成多个小区域的除草任务,降低机器人需求量和经济成本。

### 3.2 地块面积不变,权重变化

以 6.15 m×6.15 m 栅格模型为研究对象,继续以 7 台机器人进行模拟。设定不同权重 $\alpha_1$、$\alpha_2$、$\alpha_3$,使其和为 1,其他参数均不变,具体参数如表 2 所示。

由表 2 可以看出,地块面积一定时,除草消耗的总时间成本会随时间路程权重的变大而变大。在 6.15 m×6.15 m 的水田模型中,除草机器人的性能和成本受到多种因素的影响。时间分析表明,随着机器人数量增加,总时间显著下降。当机器人数量从 1 台增加到 7 台时,时间从 35.69 min 下降到 11.53 min,这表明增加机器人数量可以有效提高效率,尤其是在机器人数量较少时,时间下降幅度较大。然而,当机器人超过一定数量后,时间下降趋于平缓,这可能是由于资源利用率趋于饱和。综合时间与总成本分析,针对 6.15 m×6.15 m 的地图环境,当机器人数量为 3 台时,总成本达到最低值(38.08),这表明在这一机器人数量下,时间与成本的消耗最优。

在成本权重的变化中,硬件成本、时间成本和电量成本之间相互影响。由于成本权重 $\alpha_1$、$\alpha_2$、$\alpha_3$ 和为 1,某一成本的降低会导致其他成本的增加。当硬件权重从 0.8 降低到 0.4 时,硬件成本的占比从约 64% 降低到约 32%,而时间成本和电量成本的占比则分别从约 13% 增加到约 26%,以及从约 13%

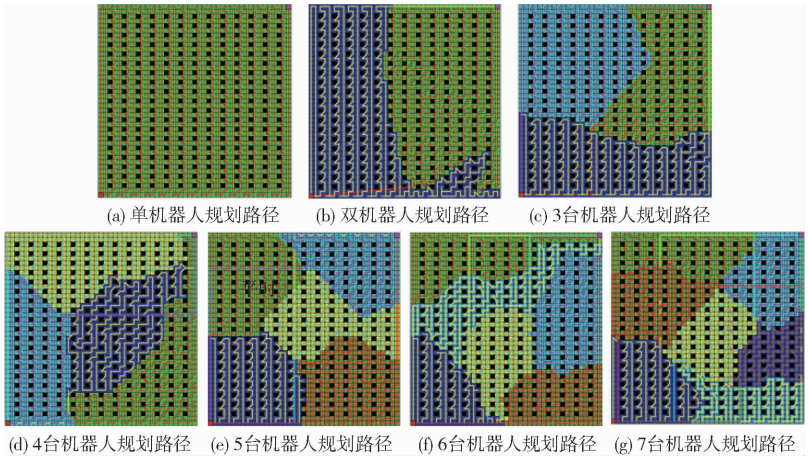



图 6 不同数量机器人模拟试验路径图

Fig. 6 Simulation test path diagrams of different numbers of robots

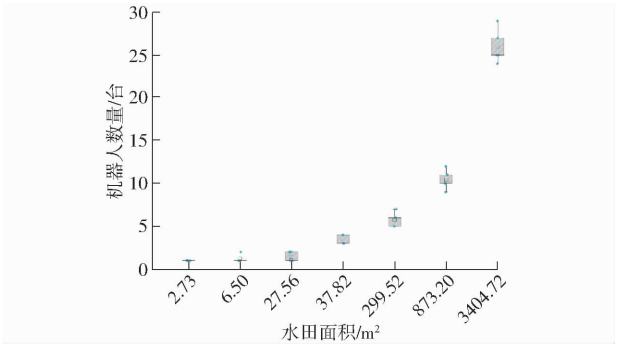



图 7　机器人适配箱线图

Fig. 7　Box plot of robot adaptation

增加到约 42%。当时间权重从 0.8 降低到 0.4 时，时间成本的占比从约 61.4% 降低到约 30.7%，而硬件成本和电量成本的占比则分别从约 23.1% 增加到约 46.2%，以及从约 15.5% 增加到约 23.1%。当电量权重从 0.8 降低到 0.4 时，电量成本的占比从约 43.6% 降低到约 21.8%，而硬件成本和时间成本的占比则分别从约 34.2% 增加到约 51.3%，以及从约 22.2% 增加到约 27.9%。基于以上分析，可知硬件权重的变化对总成本的影响最大，其次是时间权重，最后是电量权重。这表明在优化成本时，应优先考虑硬件成本优化，其次是时间成本，最后是电量成本。然而，具体优化策略应根据实际应用场景和需求进行调整，以实现成本与效率的最佳平衡。

根据 2 种情况的数据仿真，当 $\alpha_1 = 0.1$、$\alpha_2 = 0.8$、$\alpha_3 = 0.1$ 时，利用 Lagrange 插值法得到机器人适配数量函数 $L(Q)$ 表示为

$$L(Q) = \frac{5(Q-666)(Q-3\,333)}{1\,458\,018} - \frac{10(Q-200)(Q-3\,333)}{1\,233\,422} + \frac{25(Q-200)(Q-666)}{8\,355\,211} \tag{21}$$

即

$$L(Q) = -1.63\times10^{-6}Q^2 + 0.012\,14Q + 2.63 \tag{22}$$

式中　$Q$——作业面积，$m^2$

在实际应用中，根据决策者对硬件成本和时间成本的接受程度分配权重，以实现效率和成本最佳平衡。同时，硬件成本在机器人数量较少时占主导地位，应优先优化；而随着机器人数量增加，电量消耗成本占比显著增加，应优先考虑电量成本的优化。此外，多次使用机器人可以有效摊薄硬件成本，进一步降低总成本。

## 4　结论

（1）针对水田小型机器人群组协同除草作业时行株间行走的路径规划问题，提出一种基于 DARP 算法的全覆盖路径规划算法以提高水田除草效率。

（2）基于 DARP 算法的分配矩阵，通过区域随机均匀分割及颜色赋值实现任务与对象间的分配；

**表 2　不同权重下除草机器人成本与数量统计**

**Tab. 2　Cost and quantity statistics of weeding robot under different weights**

| 除草机器人数量 $M$/台 | 消耗的最长时间 $T_{max}$/min | 路线长 $F_b$/m | 硬件成本权重 $\alpha_1$ | 时间成本权重 $\alpha_2$ | 电量成本权重 $\alpha_3$ | 总成本 $W$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 35.69 | 219.15 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 33.69 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 80.45 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 51.46 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 83.02 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 179.89 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 101.37 |
| 2 | 24.42 | 311.70 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 49.61 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 108.84 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 52.71 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 109.28 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 253.80 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 138.01 |
| 3 | 13.49 | 242.95 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 49.64 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 88.93 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 38.08 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 87.28 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 198.71 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 110.23 |
| 4 | 11.46 | 266.40 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 59.78 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 99.36 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 39.81 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 96.50 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 218.26 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 122.00 |
| 5 | 10.11 | 297.40 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 70.75 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 112.25 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 42.83 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 108.26 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 243.93 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 137.00 |
| 6 | 9.25 | 320.70 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 80.99 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 122.98 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 45.47 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 117.91 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 263.46 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 149.05 |
| 7 | 11.53 | 356.85 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 92.83 |
| | | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 138.51 |
| | | | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 51.91 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 132.67 |
| | | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 293.63 |
| | | | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 167.20 |

融合牛耕式路径规划思想与 A* 算法的代价函数，设计了 3 个基于 DFS 的选择验证函数，进行对路径的搜索与回溯；引入最大路径长度与最多转弯次数为约束条件，以避免系统计算困境并加速全局最优路径的搜索。

(3)以设计的目标函数值为评判标准，通过 Matlab 模拟仿真，从地块面积和权重 2 个角度进行探究。证明地块面积直接影响时间和总成本的消耗，硬件成本在机器人数量少时占主导；随机器人数量增加，电量成本占比显著增加，基于试验结果得出除草机器人数量适配公式，为水田机器人群组协同除草作业的路径规划问题提供了理论依据。

## 参 考 文 献


[1] DAS T K, BEHERA B, NATH C P, et al. Herbicides use in crop production: an analysis of cost-benefit, non-target toxicities and environmental risks[J]. Crop Protection, 2024, 181: 106691.

[2] WANG H, REN W, XU Y, et al. Long-term herbicide residues affect soil multifunctionality and the soil microbial community [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 283: 116783.

[3] 张馨悦,王庆杰,王超,等.旱田智能化机械除草技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(4):22 - 41,71.
ZHANG Xinyue, WANG Qingjie, WANG Chao, et al. Research progress on intelligent mechanical weeding technology and equipment in dry field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 22 - 41, 71. (in Chinese)

[4] 易峰, 周定邦, 李进前,等. 崇明稻虾共养模式综述[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 95 - 96.
YI Feng, ZHOU Dingbang, LI Jinqian, et al. Advances in rice-crawfish system in Chongming[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(2): 95 - 96. (in Chinese)

[5] 张军, 刘菁, 陈长青. 有机稻鸭共作对土壤理化性状和细菌群落空间分布的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 822 - 829.
ZHANG Jun, LIU Jing, CHEN Changqing. Effects of organic rice-duck fabution of bacterial community[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 822 - 829. (in Chinese)

[6] 柏亚罗,陈燕玲. 水稻农药市场及水稻除草剂开发[J]. 世界农药, 2024, 46(2): 1 - 17.
BAI Yaluo, CHEN Yanling. Rice crop protection markets and development of herbicides in rice[J]. World Pesticides, 2024, 46(2): 1 - 17. (in Chinese)

[7] 史扬杰. 条播水稻对行施肥除草技术及肥药减施改土效果研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
SHI Yangjie. Research on the techniques of row-controlled fertilizing & weeding and the effect of reducing the application of chemical fertilizers and pesticides on soil improvementin drill-seeded rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese)

[8] 嵇国俊, 康伟, 赵余祥,等. 水田除草机自平衡控制机械结构设计与试验[J]. 数字农业与智能农机,2023(9):24 - 26.
JI Guojun, KANG Wei, ZHAO Yuxiang, et al. Design and experiment of mechanical structure for self-balancing control of paddy field weeding machine[J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2023(9): 24 - 26. (in Chinese)

[9] 嵇国俊, 康伟, 赵余祥, 等. 水田除草机液压底盘自适应优势研究[J]. 数字农业与智能农机, 2023(10): 16 - 18.
JI Guojun, KANG Wei, ZHAO Yuxiang, et al. Research on the adaptive advantages of hydraulic chassis for paddy field weeding machines[J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2023(10): 16 - 18. (in Chinese)

[10] 焦晋康,胡炼,陈高隆,等. 水田行间除草装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 11 - 22.
JIAO Jinkang, HU Lian, CHEN Gaolong, et al. Design and experiment of an inter-row weeding equipment applied in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 11 - 22. (in Chinese)

[11] 赖海林. 水田自动对行锄草机研制与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
LAI Hailin. Development and experiment of auto-follow row weeding machine for paddy fields[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)

[12] 章家恩,陆敬雄,张光辉,等. 鸭稻共作生态农业模式的功能与效益分析[J]. 生态科学, 2002(1): 6 - 10.
ZHANG Jiaen, LU Jingxiong, ZHANG Guanghui, et al. Study on the function and beneflt of rice-duck agroecosystem[J]. Ecological Science, 2002(1): 6 - 10. (in Chinese)

[13] 张本华,张宇虹,孔爱菊,等. 放养密度对稻田内鸭子运动规律及杂草控制效果的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 234 - 239.
ZHANG Benhua, ZHANG Yuhong, KONG Aiju, et al. Influence of feeding density of ducks in rice field on movement behaviour and weeds control[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 234 - 239. (in Chinese)

[14] 冯慧敏,郭小丽,肖远业,等. 基于主成分分析不同种养模式下的土壤肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 1 - 10.
FENG Huimin, GUO Xiaoli, XIAO Yuanye, et al. Evaluation of soil fertility under different planting and breeding patterns based on principal component analysis[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(10): 1 - 10. (in Chinese)

[15] 李楷, 陈永府, 金志勇, 等. 基于回溯法的全覆盖路径规划算法[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(7): 1227 - 1235.
LI Kai, CHEN Yongfu, JIN Zhiyong, et al. A full coverage path planning algorithm based on backtracking method[J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41(7): 1227 - 1235. (in Chinese)

[16] 王云常，戴朱祥，李涛. 基于 A 星算法与人工势场法的无人机路径规划[J]. 扬州大学学报(自然科学版)，2019，22(3)：36－38.
WANG Yunchang，DAI Zhuxiang，LI Tao. UAV path planning based on A-Star algorithm andartificial potential field method [J]. Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)，2019，22(3)：36－38.(in Chinese)

[17] 李开荣，胡倩倩. 融合 Bezier 遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 扬州大学学报(自然科学版)，2021，24(5)：58－64.
LI Kairong，HU Qianqian. Mobile robot path planning based on Bezier genetic algorithm[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)，2021，24(5)：58－64.(in Chinese)

[18] 罗刚，秦小林. 多无人机编队分组覆盖路径规划算法[J]. 计算机应用，2022，42(增刊 2)：148－154.
LUO Gang，QIN Xiaolin. Multi-UAV groups formation coverage path planning algorithm [J]. Journal of Computer Applications，2022，42(Supp.2)：148－154.(in Chinese)

[19] MUKHAMEDIEV R I，YAKUNIN K，AUBAKIROV M，et al. Coverage path planning optimization of heterogeneous UAVs group for precision agriculture[J]. IEEE Access，2023，11：5789－5803.

[20] LIU S，LI X，HU J. Multi-UAV path planning for multi-region coverage by multi-objective genetic method[C]//International Conference on Electronic Engineering and Informatics，2024：1357－1362.

[21] ZHU D，LI R，ZHENG Y，et al. Cumulative major advances in particle swarm optimization from 2018 to the present：variants，analysis and applications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering，2025，32：1571－1595.

[22] QIU Z，LONG J，YU Y，et al. Integrated task assignment and path planning for multi-type robots in an intelligent warehouse system[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2025，194：103883.

[23] 吴菲，陈嘉诚，王万良. 基于并行计算的计算智能综述[J]. 浙江大学学报(工学版)，2025，59(1)：27－38.
WU Fei，CHEN Jiacheng，WANG Wanliang. A survey of computational intelligence based on parallel computing[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2025，59(1)：27－38.(in Chinese)

[24] 宁聪，范菁，孙书魁. 多无人机协同规划研究综述[J]. 计算机工程与应用，2025，61(1)：42－58.
NING Cong，FAN Jing，SUN Shukui. Review of multi-UAV collaborative planning research[J]. Computer Engineering and Applications，2025，61(1)：42－58.(in Chinese)

[25] CHEN Z，ZHAO T，JIAO J，et al. Availability analysis and optimal design of multistate weighted *k*-Out-of-*n* systems with component performance requirements[J]. IEEE Access，2018，6：51547－51555.

[26] 苏鹏. 几类多状态复杂系统的可靠性分析[D]. 南京：东南大学，2020.
SU Peng. Reliability analysis of several classes of multi-state complex system[D]. Nanjing：Southeast University，2020.(in Chinese)

[27] 黄泰俊，陈国兵，杨自春，等. 考虑性能退化及变工况的多状态系统可靠性分析方法[J]. 科学技术与工程，2018，18(30)：160－165.
HUANG Taijun，CHEN Guobing，YANG Zichun，et al. Multi-state system reliability analysis method considering performance degradation and off-design condition[J]. Science Technology and Engineering，2018，18(30)：160－165.(in Chinese)

[28] KAPOUTSIs A C，CHATZICHRISTOFIS S A，KOSMATOPOULOS E B. DARP：divide areas algorithm for optimal multi-robot coverage path planning[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems，2017，86(3)：663－680.

[29] 樊康生，杨光永，黄训爱，等. 一种改进启发函数的 A* 算法[J]. 扬州大学学报(自然科学版)，2023，26(5)：52－57.
FAN Kangsheng，YANG Guangyong，HUANG Xunai，et al. An improved heuristic function A* algorithm[J]. Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)，2023，26(5)：52－57.(in Chinese)

[30] 董箭，初宏晟，卢杭樟，等. 基于 A 星算法的无人机路径规划优化模型研究[J]. 海洋测绘，2021，41(3)：28－31.
DONG Jian，CHU Hongsheng，LU Yuanzhang，et al. Research on UAV path planning optimization model based on A-star algorithm[J]. Hydroaphic Surveying and Charting，2021，41(3)：28－31.(in Chinese)

[31] 蒋建东，李聪聪，毛智琳，等. 联合收割机高位卸粮自动化控制系统设计[J]. 机电工程，2018，35(10)：1133－1136.
JIANG Jiandong，LI Congcong，MAO Zhilin，et al. Dsesign of combine harvester high discharging automatic control system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine，2018，35(10)：1133－1136.(in Chinese)

[32] 王俊平. 新化合物 NC1 防除直播水稻田禾本科杂草的作用及其机制的初步研究[D]. 南京：南京农业大学，2021.
WANG Junping. Preliminary study on the effect and mechanism of the new compound nc1 for controlling grass weeds in direct-seeded rice fields[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2021.(in Chinese)

[33] 史骏，陈若霞，柴伟纲，等. 30% 苄嘧·丙草胺乳油等量施药的次数及时间对稻田除草效果的影响[J]. 植物保护，2022，48(5)：333－340.
SHI Jun，CHEN Ruoxia，CHAI Weigang，et al. Effect of the frequency and times of equal application of bensulfuronmethyl，pretilachlor 30% EC on weeding efficacy in paddy field[J]. Plant Protection，2022，48(5)：333－340.(in Chinese)

[34] 龙成，田家顺. 5 种除草剂对水稻移栽田杂草的封闭除草效果[J]. 湖南农业科学，2022(8)：52－54.
LONG Cheng，TIAN Jiashun. Study on the blocking effeet of five herbicides on weeds in the rice transplanting field[J]. Hunan Agricultural Sciences，2022(8)：52－54.(in Chinese)