

# 再生稻头季低碾压收获作业路径规划技术研究

胡炼<sup>1,2</sup> 张鸿<sup>1</sup> 何杰<sup>1,2</sup> 满忠贤<sup>1</sup> 岳孟东<sup>1</sup> 屈高凯<sup>1</sup>  
唐启源<sup>3,4</sup> 黄培奎<sup>1,2</sup> 罗锡文<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 农业装备技术全国重点实验室, 广州 510642;

3. 湖南宏硕生物科技有限公司, 益阳 413119; 4. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

**摘要:** 路径规划是决定再生稻头季收获作业效率和质量的关键因素之一。目前, 无人农机在作业区域内的全覆盖路径规划技术研究中, 较少有考虑收获机在田间收获时对再生稻的碾压问题, 为此本文开展减少碾压的再生稻收获路径规划研究。通过分析农田信息、待作业区域和卸粮等, 将再生稻收获卸粮路径规划问题转化为带有容量约束的车辆路径问题(CVRP)。以收获机最小碾压面积和最短总路径为目标, 构建再生稻收获路径数学模型。提出再生稻少碾压路径规划混合算法, 采用传统蚁群算法(ACO)和2-opt算法获得最优路径。以再生稻无人驾驶收获机为对象, 设计直线路径规划田间试验、地头转向路径以及卸粮路径规划田间试验和全环节田间作业试验, 采用自动驾驶系统进行田间试验, 考察收获机田间碾压率。结果表明, 直线跟踪平均绝对误差为3.51 cm, 最大偏差为8.24 cm, 直线段作业碾压率为17.55%。地头区域碾压率下降52.2%。本研究设计的路径规划全田碾压率为27.42%, 满足再生稻特殊的作业要求。

**关键词:** 再生稻; 收获机; 无人驾驶; 路径规划; 蚁群算法; 2-opt算法

中图分类号: S220; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)02-0019-09

OSID:



## Path Planning Technical Research of Low-rolling Compaction Harvesting Operation for the First Season of Ratoon Rice

HU Lian<sup>1,2</sup> ZHANG Hong<sup>1</sup> HE Jie<sup>1,2</sup> MAN Zhongxian<sup>1</sup> YUE Mengdong<sup>1</sup> QU Gaokai<sup>1</sup>  
TANG Qiyuan<sup>3,4</sup> HUANG Peikui<sup>1,2</sup> LUO Xiwen<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Guangzhou 510642, China

3. Hunan Hongshuo Biotechnology Co., Ltd., Yiyang 413119, China

4. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Path planning is one of the key factors determining the efficiency and quality of the first season harvest operation for regenerated rice. At present, there are many studies on the full coverage path planning technology of unmanned agricultural machinery in the operating area, but little consideration is given to the problem of the harvester crushing the regenerated rice during field harvesting. Therefore, research on the path planning of regenerated rice harvesting was conducted with reduced crushing. By analyzing farmland information, waiting areas, and unloading of grain, the problem of harvesting and unloading path planning for regenerated rice was transformed into a vehicle routing problem with capacity constraints (CVRP). A mathematical model for the harvesting path of regenerated rice was constructed with the goal of minimizing the rolling area and minimizing the total path of the harvester. A hybrid algorithm for path planning of regenerated rice with less compaction was proposed, using traditional ant colony algorithm (ACO) and 2-opt algorithm to obtain the optimal path. Taking the driverless harvester

收稿日期: 2024-11-22 修回日期: 2024-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000600、2022YFD2301003)

作者简介: 胡炼(1984—), 男, 研究员, 博士, 主要从事智能农机装备和无人农场技术研究, E-mail: lianhu@scau.edu.cn

通信作者: 罗锡文(1945—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事精准农业研究, E-mail: xwlu@scau.edu.cn

of ratooning rice as the object, the field experiments of straight path planning, headland turning, grain unloading planning and full link field operation were designed. The field experiments were conducted with the auto drive system to investigate the field compaction rate of the harvester. The results showed that the average absolute error of linear tracking was 3.51 cm, the maximum deviation was 8.24 cm, and the compaction rate of the linear segment was 17.55%. The compaction rate in the head area was decreased by 52.2%. The path planning designed had a total field compaction rate of 27.42%, which met the special operational requirements for regenerated rice. The research result can provide theoretical and technical support for reducing the crushing area of unmanned harvesting machines for regenerated rice.

**Key words:** regenerative rice; harvesters; autonomous driving; path planning; ant colony algorithm; 2-opt algorithm

## 0 引言

水稻是我国第一大粮食作物,常年种植面积  $3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,再生稻通过“一种两收”的方式,可以节省生产成本、简化第二季生产环节和提高全年的收获产量,在一季稻生产积温有余而双季稻积温不足的地区,可以实现两季生产,但受光温条件不足的限制,产量会有所下降。再生稻是增加单位面积产量和经济收入的有效措施之一<sup>[1]</sup>。收获是水稻生产的重要环节。再生稻头季收获时,为了减少碾压,大多采用人工收获,劳动强度大、人工成本高<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着水稻联合收获机的不断发展,部分适应再生稻头季收获的联合收获机开始应用到再生稻收获中,但仍存在碾压率过高、割茬高度不一致等问题<sup>[4]</sup>。为兼顾收获质量和作业效率,再生稻收获机械需要合理设定规划路径,以减少再生稻头季收获碾压率,提高整体水稻产量。

合理的再生稻收获机路径规划可以有效地辅助人工进行收获,降低驾驶员的工作强度。文献[5-6]通过改进机械结构系统,达到减少履带对水稻植株碾压的目的,但机构较为复杂;文献[7-10]均通过优化路径规划算法和优化调度算法减少碾压。此外,张国忠等<sup>[11]</sup>提出一种同时考虑水稻倒伏、履带碾压面积和收获机粮仓容积约束的路径规划算法,通过优化作业遍历顺序和转弯方式减少碾压面积,但未应用到实际收获情景中。

综上,目前已有关于水稻收获的路径规划,但针对减少再生稻头季收获碾压的研究较少。为此,本文以沃得4LZ-7.0ZQ型再生稻收获机为研究对象,针对再生稻收获机田间作业碾压率过高的问题,根据再生稻专用收获机割幅宽、履带窄的机械特性<sup>[12]</sup>,研究减少再生稻头季收获碾压的路径规划,以期为再生稻无人驾驶收获机减少全田碾压面积提供理论支撑。

## 1 路径规划方法

### 1.1 问题描述

收获路径规划主要分为作业路径和非作业路

径,其中非作业路径包含田间地头转向和卸粮路径。非作业路径主要规划在开阔区域,开阔区域大小决定作业效率,为此需要针对农机转向特性合理规划地头调头区域。因收获机粮仓容量较小,因此需要考虑直线作业与粮仓容积的关系,根据卸粮情况规划路径。本文主要研究再生稻头季收获路径规划,重点考虑收获机履带对再生稻植株碾压的问题,根据无人驾驶农机作业习惯,简化收获机田间作业模型,如图1所示,其中,A为作业行起始点;B为作业行终止点;C为转弯轨迹终点;P为卸粮点;D为田间点。

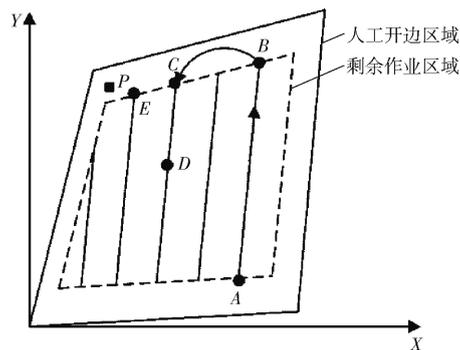


图1 收获机田间作业简化模型

Fig.1 Simplified model for field operation of harvester

为满足再生稻头季收获少碾压、轻碾压的目的,在直线作业路径AB应优先选择满幅作业; $\widehat{BC}$ 为作业行间转移路径。为实现再生稻收获机全覆盖路径,考虑到粮仓容积的约束,若在点C粮满,则规划一条路径CP,前往点P卸粮。BC、CP作为非作业路径,应尽可能将两种路径重合,在不增加碾压面积的前提下选择最短路径。

综上,将田间待收水稻看作即将装载的货物,收获机将按照一定的行驶规则将所有水稻进行遍历收获,并在固定卸粮点进行卸粮,因此可将再生稻收获卸粮路径规划问题转化为带有容量约束的车辆路径问题(CVRP)<sup>[13]</sup>。本文结合CVRP方法,根据田块具体形状,考虑作业方式和卸粮点位置,结合粮仓容量约束情况规划出碾压面积最小的再生稻头季收获

路径。

## 1.2 路径规划约束

无人驾驶农机在田间作业会受到地头空间、农机转向特性、转弯半径、作业幅宽和粮仓容量等因素约束,可将无人驾驶收获机作业路径规划的目标抽象为在一定约束条件下路径模式和路径序列组合的优化问题。约束路径规划的主要性能指标计算如下。

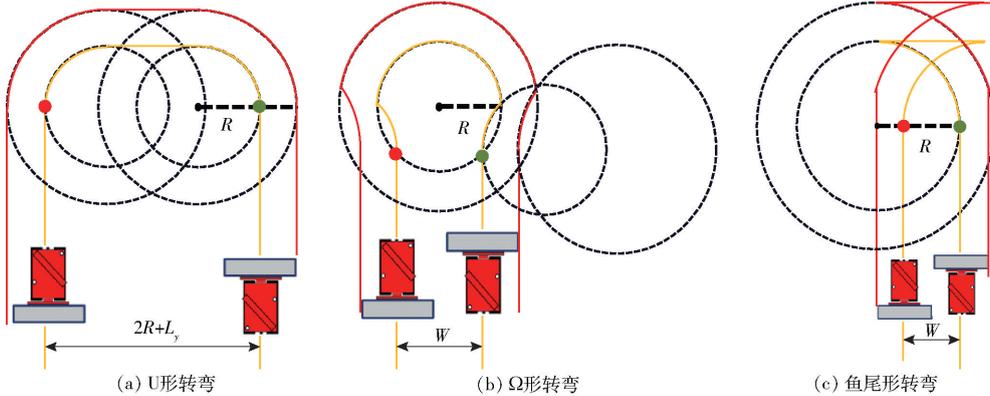


图2 地头转弯原理图

Fig. 2 Schematics of ground turning principle

对于作业行之间的转移,转向衔接路径越长,作业时间越大,造成的碾压面积就会越多,因此对于路径规划应选择转向衔接路径最短的方式。转向路径长度计算式为

$$\begin{cases} L_U = \pi R + L_y + 2L_e \\ L_\Omega = 2\pi \frac{\arccos \frac{W}{2R}}{180} + \pi R + 2L_e \\ L_T = \pi R + 2R - W + 2L_e \end{cases} \quad (1)$$

式中  $L_U$ ——U形转弯路径长度,m  
 $L_\Omega$ —— $\Omega$ 形转弯路径长度,m  
 $L_T$ ——鱼尾形转弯路径长度,m  
 $L_e$ ——收获机机具偏移引起的额外路径长度,m

无人驾驶收获机在田间地头转向区域调头时,如果转向区域宽度过大,地头不作业区域过多,人工开边的区域就越大,碾压面积增加。如果转弯区域宽度过小,无人驾驶农机将无法完成转向动作,甚至可能碰撞田埂造成事故。因此,路径规划时需根据机具外侧尖端轨迹明确转向区域地头预留宽度的阈值,计算式为

$$\begin{cases} D_U = R + \frac{L_C + W}{2} + D_s + L_e \\ D_\Omega = R + \frac{L_C + W}{2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} + D_s + L_e \\ D_T = R + \frac{L_C + W}{2} + D_s + L_e \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2.1 转向衔接路径与地头预留宽度

联合收获机在田间地头主要有 $\Omega$ 形、U形和鱼尾形3种转弯方式<sup>[14]</sup>,如图2所示,其中,红色实线为再生稻收获机机具外侧轨迹;黄色实线为再生稻收获机作业路径;绿色原点为转弯路径起点;红色圆点为转弯路径终点; $W$ 为收获机作业幅宽,m; $R$ 为收获机最小转弯半径,m; $L_y$ 为收获机U形转弯两行之间的直线运移距离,m。

式中  $D_U$ ——U形转弯地头预留宽度,m  
 $D_\Omega$ —— $\Omega$ 形转弯地头预留宽度,m  
 $D_T$ ——鱼尾形转弯地头预留宽度,m  
 $L_C$ ——收获机车身总长,m  
 $D_s$ ——安全距离,m

通过对比分析得出, $\Omega$ 形转弯策略较为复杂且所需的地头宽度较大,需要较多的人工介入对地头进行处理,由于转弯行驶所造成的碾压大于直线行驶,所以 $\Omega$ 形转弯方式的碾压比其他转弯方式更多。鱼尾型转弯需要用到倒车处理,因此转弯相对较慢,影响整体作业效率。U形转弯的行驶路径长度取决于农田地头宽度和是否分组等因素,每次从作业行驶出,在地头地尾的运移轨迹都应重合在一起,这虽然会对已碾压区域造成重复碾压,但可以减少对地头其他区域的碾压。综合考虑转弯路径长度、地头预留宽度和碾压面积的情况,U形转弯更适合用于再生稻收获。

### 1.2.2 作业方向划分和作业行数

再生稻生产中,实际作业田块常为四边形。首先对田块进行人工开边,预留出足够的地头区域,再对剩余作业区域按照平行作业行进行划分。在确保收获机遍历所有作业行的同时,力求转弯次数最小、转向路径最短以及转向操作简单。在剩余作业区域沿着边界方向进行作业时,按照作业幅宽进行平行线划分,划分作业行数越多,表示转向次数越多,耗费作业时间就越长。由于单位面积内直线作业产生

的碾压面积远低于转弯产生的碾压面积,因此大部分田块应以长边作为作业方向<sup>[15]</sup>,以有效减少转向次数。一般情况下收获机作业到最后一行时,往往会出现剩余水稻行宽度与收获机作业幅宽不等的情况,为了保证全覆盖收获作业,避免遗漏或重复作业,采取将短边长度除以作业幅宽后再向上取整的方式,即

$$N_l = \left\lceil \frac{L_f - 2W}{W} \right\rceil \quad (3)$$

式中  $N_l$ ——作业行数

$\lceil \cdot \rceil$ ——向上取整运算符号

$L_f$ ——农田宽度, m

### 1.2.3 卸粮次数

收获机在田间作业时,受粮仓容量限制,需经常到卸粮点进行卸粮,因此收获机全覆盖路径规划需要计算直线段作业长度和作业行粮食重量等数据,最终计算出卸粮次数。

根据剩余田块作业区域的顶点坐标可得直线作业长度,即根据图1中剩余收获边界坐标点  $A$ 、 $B$  可得

$$L = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (4)$$

式中  $L$ ——单条作业行长度, m

$(x_A, y_A)$ ——点  $A$  坐标

$(x_B, y_B)$ ——点  $B$  坐标

根据人工开边一圈得到的水稻体积、开边路径长度和单条作业行长度可得作业行内水稻体积,计算式为

$$V_l = \frac{V_k}{L_k} L \quad (5)$$

式中  $V_l$ ——单条作业行水稻体积,  $m^3$

$V_k$ ——开边一圈得到的水稻体积,  $m^3$

$L_k$ ——开边一圈得到的路径长度, m

根据田块大小、下田口设置卸粮点数量以及位置,收获机沿作业行行驶至卸粮边后,需判断是否进行卸粮。

(1)如图1所示,若行驶至卸粮边(点  $B$ )时检测到粮仓已满,则直接行驶到卸粮点(点  $P$ )进行卸粮,卸粮完成后按规划路径去下一行继续作业,卸粮次数可根据田块总体积和粮仓容量进行计算,即

$$a = \left\lceil \frac{N_l V_l}{V_H} \right\rceil \quad (6)$$

式中  $a$ ——卸粮次数

$V_H$ ——收获机粮仓容积,  $m^3$

(2)若行驶至卸粮边检测到粮仓恰未满载,则根据规划路径转移到下一行继续作业,如图1所示,作业到点  $D$  后,若粮仓已满,则倒退回卸粮边(点  $C$ ),前往卸粮,卸粮完成后返回点  $D$  继续作业。可根据

田块总体积和粮仓容量计算卸粮次数,如式(6)。

(3)若行驶至卸粮边检测到粮仓未满载,但粮仓剩余容量不足以装下一行收获的粮食总量,则放弃下一行作业,进行卸粮操作。可根据收获机粮仓单次最大可存储作业行内粮食的行数决定卸粮次数,即

$$a = \left\lfloor \frac{N_l}{\left\lceil \frac{V_H}{V_l} \right\rceil} \right\rfloor \quad (7)$$

式中  $\lfloor \cdot \rfloor$ ——向下取整运算符号

(4)若行驶至卸粮边检测到粮仓未满载,粮仓剩余容量可以装下一行收获的粮食总量,则根据规划路径前往下一行继续作业,再判断是否卸粮。

### 1.2.4 碾压面积

碾压面积是衡量再生稻头季收获质量的重要指标,头季稻作业区域的碾压面积直接影响再生季水稻的产量,特别是地头地尾区域的反复碾压会降低再生季休眠芽的存活率。因此再生稻头季收获需要减少作业区域的碾压面积,特别要减少地头地尾区域的重复碾压。本文主要以作业时间较短、操作便捷的U形转弯为主<sup>[16]</sup>。剔除掉重复作业区域,分别计算直线和转弯以及卸粮产生的碾压面积,即

$$\begin{cases} S_z = 2d\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \\ S_u = 2d(\pi r + \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $S_z$ ——单行作业碾压面积,  $m^2$

$S_u$ ——从  $i$  行转入  $j$  行的U形转弯产生的碾压面积,  $m^2$

$d$ ——履带宽度, m  $r$ ——转弯半径, m

针对再生稻收获机全覆盖作业存在重复碾压的情况,重复碾压属于总作业路径的一部分,因此在不增加碾压面积的情况下,尽可能选择路径短的方案。

## 2 路径规划算法

旅行商问题(TSP)是组合优化领域中的一个经典问题,它要求寻到一条最短路径,经过一系列指定的城市各一次并返回起点,是一个典型的NP-hard问题<sup>[17-18]</sup>。随着约束条件增加,找到最优解变得更加困难,因此衍生出许多其他模型,本文基于TSP问题将再生稻收获卸粮路径规划问题转化为带有容量约束的车辆路径问题(CVRP)。CVRP问题求解算法主要分为3类:精确算法、近似算法和启发式算法。精确算法主要用于求解规模较小的问题,近似算法和启发式算法求解速度和效率较快,但近似算法不能保证找到最优解。在启发式算法中,蚁群算法求解较优于遗传算法和模拟退火算法<sup>[19]</sup>。

### 2.1 收获路径数学模型建立

根据上述再生稻收获减少碾压的约束条件,可将再生稻收获卸粮路径规划问题转化为带有容量约束的车辆路径问题(CVRP)<sup>[20]</sup>,将仓库作为卸粮点,将作业行视为不断收获作业过程,单次收获水稻体积不得超过最大收获机粮仓容量和完成全田收获任务为约束条件,最小碾压面积以及最短路径长度  $F$  为目标函数,即

$$\begin{cases} \min F = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m d_{ij} X_{ij}^k \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n v_{ij} X_{ij}^k \leq V \quad (\forall k \in K) \\ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X_{ij}^k = 1 \quad (\forall k \in K) \\ X_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (\forall k \in K, \forall i, j \in N) \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $N = \{0,1,2,\dots,n\}$   
 式中  $N$ ——田间点集  
 $d_{ij}$ ——从节点  $i$  到达节点  $j$  的距离  
 $X_{ij}^k$ ——决策变量,完成从节点  $i$  到节点  $j$  后,  
 $X_{ij}^k$  为 1, 否则为 0  
 $K$ ——卸粮次数

$N$  中“0”为卸粮点,  $1,2,\dots,n$  为作业点。  
 对上述模型进行求解后得到最优作业路径,由于再生稻收获机全覆盖作业存在重复碾压的情况,结合式(8)剔除掉重复作业的区域,求得最小总碾压面积,即

$$\begin{cases} S_{ur} = 2d\pi r \\ S_H = 2d\pi r \\ S_L = 2d\sqrt{(x_H - x_n)^2 + (y_H - y_n)^2} \\ S_A = N_l S_z + (n - a) S_u + a S_H + S_L \end{cases} \quad (10)$$

式中  $S_{ur}$ ——单次 U 形转弯除去直线行走部分的碾压面积,  $m^2$   
 $S_H$ ——单次卸粮新增碾压面积,  $m^2$   
 $S_L$ ——地头卸粮直线碾压面积,  $m^2$   
 $(x_H, y_H)$ ——卸粮点坐标  
 $(x_n, y_n)$ ——第  $n$  行结束点坐标,  $n$  行为距离卸粮点最远的一行  
 $S_A$ ——总碾压面积,  $m^2$

### 2.2 路径规划算法实现流程

基于收获机粮仓容量约束以及再生稻生长特性,以最小碾压面积和最短路径长度为目标,再生稻头季收获路径规划流程如图 3 所示。

具体步骤为:

(1) 输入农田坐标,获取农田信息,根据 U 形转

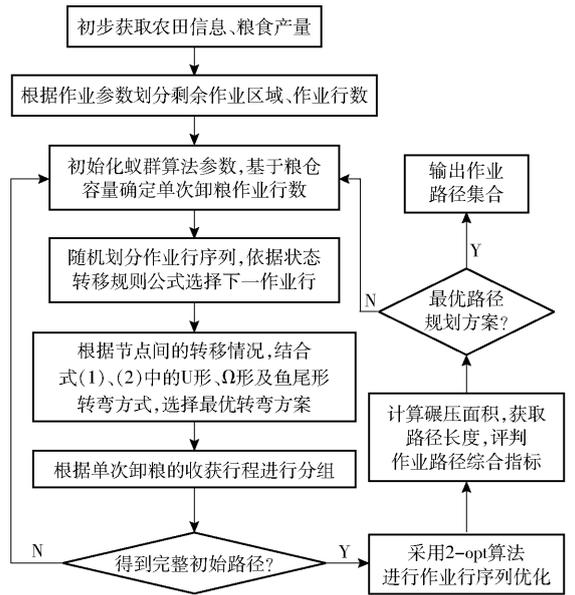


图 3 路径规划流程图

Fig. 3 Path planning process diagram

弯参数  $L_U, D_U$  (机具尖端轨迹) 划分地头预留区域得到剩余作业区域,通过作业幅宽和剩余作业区域得到作业行数  $N_l$ 、粮食产量和卸粮情况等。

(2) 采用蚁群算法,对算法参数进行初始化,主要包括种群规模、迭代次数、信息启发因子  $\alpha$  和期望启发式因子  $\beta$  等<sup>[21-22]</sup>。通过单行收获水稻体积  $V_1$  和收获机粮仓容量  $V_H$  得出单次卸粮需要作业行数,求出卸粮次数  $a$ 。将再生稻收获卸粮路径规划问题转化为带有容量约束的车辆路径问题(CVRP),并对其开始求解。

(3) 根据农田大小划分作业行数,并对作业行赋予数字编号  $N = \{1,2,\dots\}$ ,根据状态转移规则进行计算,即

$$P_{ij}^q(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in A} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)} & (j \in A) \\ 0 & (j \notin A) \end{cases} \quad (11)$$

其中  $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$  (12)

式中  $P_{ij}^q(t)$ ——蚂蚁  $q$  从田间  $i$  行转移到  $j$  行的概率  
 $\eta_{ij}(t)$ ——启发函数  
 $\tau_{ij}(t)$ —— $t$  时刻节点  $i$  到节点  $j$  的信息素浓度  
 $A$ ——该蚂蚁下一可选节点集合

(4) 信息素会随着时间挥发,每完成一次迭代后进行全局信息素更新,即

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \sum_{q=1}^M \Delta \tau_{ij}^q(t) \quad (13)$$

其中  $\Delta \tau_{ij}^q(t) = \begin{cases} Q & (j \in A) \\ 0 & (j \notin A) \end{cases}$  (14)

式中  $\tau_{ij}(t+1)$ ——农田节点  $i$  到农田节点  $j$  所蕴含的信息素,每次经过或每次循环结束,残留的信息素将会被更新

$1-\rho$ ——信息素残留系数,  $\rho \in (0,1)$

$\Delta\tau_{ij}^q(t)$ ——第  $q$  只蚂蚁从农田节点  $i$  到农田节点  $j$  留下的信息素总和

$Q$ ——信息素强度

$L_q$ ——第  $q$  只蚂蚁在此次循环中走过的总路径, m

(5) 将作业行随机打乱后,算法根据不同路径信息素浓度及路径启发函数选择下一作业行。根据作业行间的转移情况,结合式(1)、(2)的 U 形、 $\Omega$  形及鱼尾形转弯方式,确定最优转弯方案。同时将卸粮点作为终点,根据收获机作业长度和粮仓容量决定收获行程,每次行程结束返回卸粮点,将每次卸粮走过的行程进行分组,再分别计算采用不同卸粮方式行程路径长度以及碾压面积  $S_u$ ,选择最优卸粮方式,最终分组形成初始完整路径。

(6) 在形成初始完整路径后,采用 2-opt 算法,对当前生成的最新路径序列随机交换两行,并重新计算最新路径的总长度和碾压面积,若总长度和碾压面积优于原路径,则保存,反之继续重复上述交换操作,直至全部序列交换完成。例如,原序列为  $A_1 = (0,3,6,9,0)$ ,采用 2-opt 算法后变为  $A_2 = (0,9,6,3,0)$ ,比较两个序列路径长度,若  $A_2$  较短,则采用  $A_2$ ,反之重新随机选择两条路径继续交换。

(7) 最终,依据作业路径的综合评估指标,计算路径长度并结合式(10)计算整体碾压面积。若路径满足最优条件,则导出作业集合。否则,重新进行规划。

## 3 试验

### 3.1 试验材料

采用沃得 4LZ-7.0ZQ 型再生稻收获机为主体,如图 4 所示,其自主作业系统技术参数见表 1。系统主要组成为:控制器、驱动器、GNSS 天线、摄像



图 4 再生稻收获机自主作业试验平台

Fig. 4 Autonomous operation system of regenerative rice harvester

头和安卓一体机。可在机载屏中实现作业设置、路径规划、接行调整、灵敏度调整、参数标定、作业状态实时显示和数据导出等功能。该收获机具有窄履带、宽割幅特点,可满足再生稻作物特性,保证割茬高度一致,减少碾压。

表 1 再生稻收获机自主作业系统技术参数

Tab. 1 Technical parameters of autonomous operation system for regenerated rice harvester

参数	数值
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	5 740 × 2 800 × 3 170
履带接地长度 × 履带宽度/(mm × mm)	1 833 × 350
割幅/mm	2 800
粮仓容积/m <sup>3</sup>	1.5
直行碾压率/%	25
作业速度/(km·h <sup>-1</sup> )	0~5.8
喂入量/(kg·s <sup>-1</sup> )	7
平均接地压力/kPa	29.5
作业效率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.175

### 3.2 试验方法

为确保再生稻头季收获低碾压的目的,需要合理地规划路径和精确的跟踪控制。采用自动驾驶系统,通过 PID 控制和纯追踪控制对路径进行跟踪<sup>[23-26]</sup>,保证收获机只碾压规定行作物,防止位置偏差过大,造成碾压面积过多。根据再生稻农艺要求以及收获机机械参数,再生稻植株间距为 25 cm,履带宽度为 35 cm,进行路径规划。

为验证再生稻头季低碾压收获作业路径规划方法,在水田环境下验证路径规划策略以及作业效果,在湖南省益阳市千山红镇再生稻种植基地进行试验<sup>[27]</sup>。试验分 3 组进行:直线路径规划田间试验、地头转向路径以及卸粮路径规划田间试验、全环节田间作业试验。

### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 路径规划田间试验

根据再生稻农艺种植要求,在田间规划一条直线作业路径进行试验,按照收获机左右履带各只碾压 1 行水稻株规划直线路径,采用自动驾驶系统保证农机能够准确按规划路径行驶,避免增加其他碾压。

试验结果如图 5 所示,收获机沿直线作业路径行驶,作业控制与人工驾驶一致,基本按照直线规划路径行驶。试验结果如图 6 所示,基于 PID 和纯追踪控制,直线跟踪平均绝对误差控制为 3.51 cm,最大偏差为 8.24 cm,位置偏差累计到一定程度能够快速纠偏,保证直线跟踪。收获时将收获机履带对准水稻植株间,做到单条履带只碾压一行水稻株,尽可能不造成过多碾压。高精度的跟踪控制和合理的

路径规划可以保证头季收获的低碾压,很好地满足再生稻收获需求。

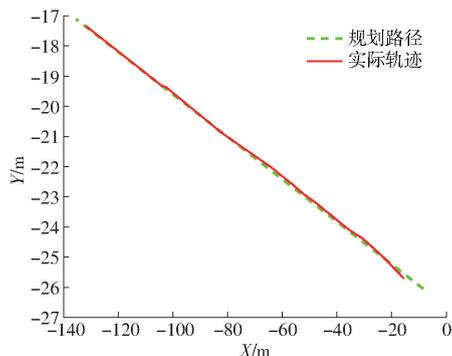


图 5 直线作业路径跟踪轨迹

Fig. 5 Linear path tracking diagram

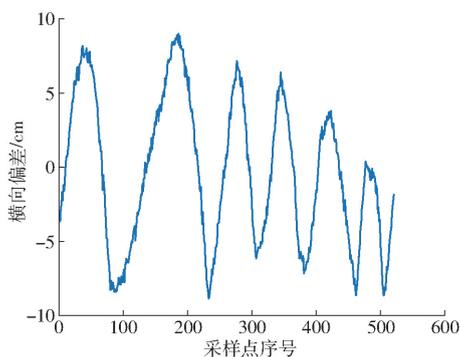


图 6 自动驾驶作业路径横向跟踪偏差

Fig. 6 Lateral tracking error of autonomous driving operation path

### 3.3.2 地头转向路径以及卸粮路径规划田间试验

地头转向以及卸粮路径在整体路径规划中是非作业路径,为减少新增碾压面积,采用 U 形转弯方式<sup>[28]</sup>,同时为防止卸粮造成过多的新增碾压面积,需固定卸粮点,且将卸粮点放在 U 形转弯直线段的延长线上,让卸粮路径和地头转向路径尽可能重合。

试验结果如图 7 所示,左侧蓝色线条为 U 形转弯的重复行驶路径,右侧蓝色路径为卸粮路径与 U 形转弯的重复行驶路径,左右两侧的直线部分基本重合且重复行驶路径越长,新增的碾压面积越少。表 2 中重复行驶区域的路径长度(即蓝色路径长

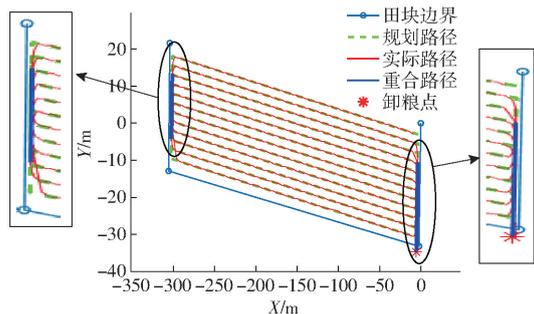


图 7 地头转向以及卸粮作业路径跟踪轨迹

Fig. 7 Ground turning and unloading operation path tracking diagram

度)为 41.5 m,其碾压面积为 30.3 m<sup>2</sup>,经过算法规划地头转向以及卸粮路径可减少新增碾压面积 182.3 m<sup>2</sup>。地头区域碾压率下降 52.2%,满足再生稻地头转向和卸粮少碾压的需求。

表 2 转向与卸粮作业效果

Tab. 2 Steering and unloading operation effect

参数	转向路径	卸粮路径	重复路径	重复路径碾	减少新增碾
	长度/m	长度/m	长度/m	压面积/m <sup>2</sup>	压面积/m <sup>2</sup>
数值	204.16	273.17	41.5	30.3	181.9

### 3.3.3 全环节田间作业试验

收获机可以按照规划的路径顺利完成直线作业、地头转弯、运移和卸粮等各个环节,对整块农田基本做到了全覆盖,表明路径设计合理。导航作业结束后,导出农机作业的实时地理位置坐标生成作业轨迹图,对比分析理论与实际的路径长度、整体碾压面积、转弯路径长度和转弯碾压面积,如表 3 所示。

表 3 理论与实际作业效果

Tab. 3 Theoretical and practical effects

类型	路径长度/	整体碾压	转弯长	转弯碾压
	m	面积/m <sup>2</sup>	度/m	面积/m <sup>2</sup>
理论值	4 020.3	2 573.3	153.9	107.7
实际值	4 185.2	2 742.3	177.3	129.4

试验结果如图 8 所示,再生稻专用收获机可以顺利完成作业,但由于再生稻水田湿滑<sup>[29]</sup>,履带窄,易造成车辆侧滑。田间地头转弯路径和卸粮路径基本重合。由于水田情况较为复杂,实际作业时需不断调整车辆方向,导致收获机实际行驶长度大于理论路径规划长度<sup>[30]</sup>。人工驾驶再生稻收获机在田间作业<sup>[31]</sup>,左右履带只碾压 1 行,测量直行碾压率和割茬高度合格率。收获完成后对田间碾压水稻进行测量,测出地头碾压面积和整体碾压面积。最终得出再生稻头季直线碾压率相较于人工驾驶的 24.58% 下降至 17.55%,卸粮区域碾压率由人工驾驶的 78.2% 下降至 47.1%,本研究设计的路径规划

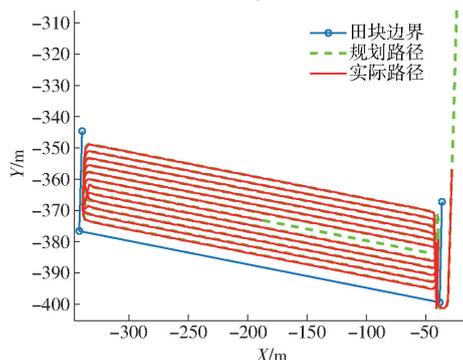


图 8 自动驾驶作业路径跟踪轨迹

Fig. 8 Automated driving operation path tracking map

全田碾压率仅 27.42%，降低了再生稻头季收获的碾压率。

## 4 结论

(1)为降低再生稻头季收获的碾压面积,同时考虑收获机粮仓的容量约束问题,提出了一种基于蚁群和 2-opt 的混合算法进行再生稻收获作业的路径规划。

(2)以真实再生稻农田为场景,建立再生稻收获机田间作业简化模型,划分农田作业与非作业区域、规划田间作业行数与作业方向、测算农田粮食总量、计算卸粮次数,并将再生稻收获卸粮路径规划问题转化为带有容量约束的车辆路径问题(CVRP),建立收获作业路径数学模型。

(3)以沃得 4LZ-7.0ZQ 型再生稻收获机为平台进行收获机自动作业试验。根据再生稻特殊的农艺要求和收获作业流程,以减少碾压面积为目的,合理规划直线作业、地头转向和卸粮环节,设计了全田收获作业路径,同时分别计算各个环节碾压面积。

(4)在水田环境下进行了再生稻自动收获作业性能测试,试验结果表明,采用再生稻专用收获机进行作业,碾压率远低于人工操作,直线跟踪平均绝对误差为 3.51 cm,最大偏差为 8.24 cm,直线段作业碾压率为 17.55%,地头区域碾压率下降 52.2%,本研究设计的路径规划全田碾压率为 27.42%。满足再生稻特殊的收获要求,该研究为再生稻无人驾驶收获机减少碾压面积提供了理论和技术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 徐富贤,熊洪,张林,等.再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J].中国农业科学,2015,48(9):1702-1717. XU Fuxian, XIONG Hong, ZHANG Lin, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(9):1702-1717. (in Chinese)
- [2] 陈基旺,帅泽宇,屠乃美,等.湖南再生稻发展现状与对策分析[J].中国稻米,2018,24(5):68-72. CHEN Jiwang, SHUAI Zeyu, TU Naimei. Analysis on development status and countermeasures of ratoon rice in Hunan[J]. Chinese Rice,2018,24(5):68-72. (in Chinese)
- [3] 林文雄,陈鸿飞,张志兴,等.再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望[J].中国生态农业学报,2015,23(4):392-401. LIN Wenxiong, CHEN Hongfei, ZHANG Zhixing, et al. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4):392-401. (in Chinese)
- [4] 付建伟,张国忠,谢干,等.双通道喂入式再生稻收获机研制[J].农业工程学报,2020,36(3):11-20. FU Jianwei, ZHANG Guozhong, XIE Gan, et al. Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3):11-20. (in Chinese)
- [5] 刘炆,李耀明,朱荣金,等.履带式再生稻联合收获机自动对行系统研制与试验[J].农机化研究,2023,45(5):239-243,248. LIU Yang, LI Yaoming, ZHU Rongjin, et al. Development of automatic alignment system for crawler ratoon rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(5):239-243,248. (in Chinese)
- [6] 周芑,刘伟健,曾山.再生稻收获机后桥转向系统设计与试验[J].农机化研究,2023,45(12):125-129. ZHOU Peng, LIU Weijian, ZENG Shan. Design and test of rear axle steering system of triangular crawler reclaimed rice harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(12):125-129. (in Chinese)
- [7] OKSANEN T, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8):651-668.
- [8] POUR A D, SPISSER M, ESSERT C. Complete coverage path planning for wheeled agricultural robots[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(6):1460-1503.
- [9] UTAMIMA A, REINERS T. Navigating route planning for multiple vehicles in multifield agriculture with a fast hybrid algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212:108021.
- [10] HAMEED I A, BOCHTIS D D, SORENSEN C G. Driving angle and track sequence optimization for operational path planning using genetic algorithms[J]. Appl. Eng. Agric., 2011, 27:1077-1086.
- [11] 张国忠,凌高旻,季超,等.考虑倒伏与粮仓容积的再生稻头季收路径规划[J].农业工程学报,2024,40(12):33-45. ZHANG Guozhong, LING Gaomin, JI Chao, et al. Path planning of mechanical harvesting considering the lodging and grain bincapacity for the ratoon rice in main season[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12):33-45. (in Chinese)
- [12] 顾伟,顾杰,王占飞,等.再生稻收获机的设计思路及技术路线探讨[J].农业开发与装备,2023(8):33-35. GU Wei, GU Jie, WANG Zhanfei, et al. Discussion on the design ideas and technical route of regenerative rice harvester[J]. Agricultural Development and Equipment,2023(8):33-35. (in Chinese)
- [13] 李小花,朱征宇,夏梦霜.多车场 CARP 问题的改进遗传算法求解[J].计算机工程与应用,2009,45(11):230-234. LI Xiaohua, ZHU Zhengyu, XIA Mengshuang. Resolve multiple depot capacitated arc routing problem based on improved genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications 2009,45(11):230-234. (in Chinese)
- [14] 孟志军,刘卉,王华,等.农田作业机械路径优化方法[J].农业机械学报,2012,43(6):147-152. MENG Zhijun, LIU Hui, WANG Hua, et al. Optimal path planning for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(6):147-152. (in Chinese)

- [15] 张宜宝,孙经纬,石绍军,等. 自动驾驶插秧机控制系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2023,45(7):71-78.  
ZHANG Yibao, SUN Jingwei, SHI Shaojun, et al. Design and experiment of control system for automatic driving transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(7):71-78. (in Chinese)
- [16] 雷志强,张国忠,彭少兵,等. 全履带式再生稻收割机行走底盘碾压率的模拟与分析[J]. 安徽农业大学学报,2017,44(4):738-743.  
LEI Zhiqiang, ZHANG Guozhong, PENG Shaobing, et al. Simulation and analysis of the stubble pushing rate by chassis of the completely tracked harvester for the ratoon rice[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2017,44(4):738-743. (in Chinese)
- [17] 张博昆,祝泰鑫,刘晨秋,等. 农业机器人路径规划研究综述[J]. 拖拉机与农用运输车,2024,51(3):11-14.  
ZHANG Bokun, ZHU Taixin, LIU Chenqiu, et al. Review on path planning of agricultural robot[J]. Tractors and Agricultural Transport Vehicles, 2024,51(3):11-14. (in Chinese)
- [18] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报,2022,53(5):17-26,43.  
CHEN Kai, XIE Yinshan, LI Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):17-26,43. (in Chinese)
- [19] 黄小毛,付正坤,丁幼春,等. 矩形边界条件下农机作业方向平行路径的排序优化[J]. 华中农业大学学报,2014,33(4):130-136.  
HUANG Xiaomao, FU Zhengkun, DING Youchun, et al. Sequence optimization of direction parallel path for the agricultural vehicles in field of rectangle boundary [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(4):130-136. (in Chinese)
- [20] 徐涛,孙鉴,刘陈伟. 基于 Spark 的自适应蚁群算法对 CVRP 问题的求解[J]. 中兴通讯技术,2022,28(6):95-100.  
XU Tao, SUN Jian, LIU Chenwei. Spark-based adaptive ant colony algorithm for solving CVRP problems [J]. ZTE Technology, 2022,28(6):95-100. (in Chinese)
- [21] 高方坤,唐宏伟,丁祥,等. 优化蚁群算法的智能物资农机路径规划[J]. 农业装备与车辆工程,2024,62(5):14-18.  
GAO Fangkun, TANG Hongwei, DING Xiang, et al. Path planning of intelligent material agricultural machinery based on optimized ant colony algorithm[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering,2024,62(5):14-18. (in Chinese)
- [22] 杨会甲,张亚军,王鹏杰,等. 基于混合蚁群算法的无人化农机路径寻优研究[J]. 湖北农业科学,2024,63(8):247-251.  
YANG Huijia, ZHANG Yajun, WANG Pengjie, et al. Research on path optimization of unmanned agricultural machinery based on hybrid ant colony algorithm[J]. Hubei Agricultural Sciences,2024,63(8):247-251. (in Chinese)
- [23] 何杰,满忠贤,胡炼,等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(1):9-17.  
HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1):9-17. (in Chinese)
- [24] 胡炼,关锦杰,何杰,等. 花生收获机自动驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):21-27.  
HU Lian, GUAN Jinjie, HE Jie, et al. Design and experiment of automatic driving operation system of peanut harvester based on BDS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):21-27. (in Chinese)
- [25] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10):1-24.  
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10):1-24. (in Chinese)
- [26] 冯汝广,胡建平,王梦娇,等. 智能农机自动驾驶关键技术及应用分析[J]. 农业装备与车辆工程,2024,62(7):15-18.  
FENG Ruguang, HU Jianping, WANG Mengjiao, et al. Key technologies and application analysis of intelligent agricultural machinery autonomous driving[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2024,62(7):15-18. (in Chinese)
- [27] 唐浩文. 倒伏水稻联合收获机割台设计与试验[D]. 长沙:湖南农业大学,2022.  
TANG Haowen. Design and experiment of cutting table of lodging rice combined harvester[D]. Changsha:Hunan Agricultural University,2022. (in Chinese)
- [28] 王法安,杨全合,张兆国,等. 基于 ICR 的履带车辆路径跟踪与转向控制算法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):386-395,425.  
WANG Faan, YANG Quanhe, ZHANG Zhaoguo, et al. Path tracking and turning control algorithm of tracked vehicle based on ICR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):386-395,425. (in Chinese)
- [29] 王明磊,周文,王超,等. 再生稻收获机作业效果综合评价分析[J]. 中国农机化学报,2023,44(11):9-13.  
WANG Minglei, ZHOU Wen, WANG Chao, et al. Comprehensive evaluation and analysis of operation effect of ratooning rice harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(11):9-13. (in Chinese)
- [30] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等. 基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报,2022,53(11):22-30,99.  
CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):22-30,99. (in Chinese)
- [31] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(8):1-18.  
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):1-18. (in Chinese)