

履带收获机自动驾驶系统设计与作业效率分析

王 辉¹ 景西东² 李德芳¹ 徐万里¹ 张国栋¹ 张 盟¹ 孙 鹏¹ 何 杰³

(1. 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司, 潍坊 261206; 2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109;

3. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对履带式收获机自动驾驶作业地头转弯无效作业路径长、地头重复碾压, 导致作业效率低与通过性差问题, 本文提出一种内回字型路径规划与地头快速转弯换行的自动驾驶收获方法。设计内回字型全局覆盖路径, 实现常见凸四边形地块的连续满幅收获; 建立履带差速运动学模型, 采用预瞄追踪路径跟踪控制方法, 结合双泵双马达独立控制左右履带底盘, 实现履带收获机的直线导航控制; 提出了一种高效地头转弯换行策略, 实现较小地头空间快速转弯并精确对准下一作业行; 分析了本文路径和转弯方法的作业效率优势。田间试验表明, 直线导航横向偏差标准差平均值为 3.7 cm、航向偏差标准差平均值为 0.9°; 地头转弯换行时间平均为 10.4 s, 转弯换行结束初始对行位置偏差平均为 10.3 cm、初始航向偏差平均为 3.0°, 验证了该方法地块全程自动驾驶的有效性。结果表明, 该方法能够减小地头转弯非作业时间并避免地头重复碾压, 提高履带机自动驾驶系统的作业效率和实用性。

关键词: 履带式收获机; 自动驾驶; 内回字型; 路径规划; 地头转弯换行

中图分类号: S225.3; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)15-0214-10

OSID:



Design and Operational Efficiency Analysis of Auto Drive System for Crawler Harvester

Wang Hui¹ Jing Xidong² Li Defang¹ Xu Wanli¹ Zhang Guodong¹ Zhang Meng¹ Sun Peng¹ He Jie³

(1. Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang 261206, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Addressing the issues of ineffective operation paths due to long turning paths at the field ends and repeated compaction at the field ends in the auto drive system of crawler harvesters, leading to low operation efficiency and poor trafficability, an auto drive harvesting method featuring an inner-looped path planning and rapid turning at field ends for line changes was proposed. An inner-looped global coverage path was designed to achieve continuous full-width harvesting of common convex quadrilateral plots. A kinematic model for differential speed movement of the crawler was established, and a preview tracking path following control method was adopted, combined with independent control of the left and right crawler chassis using dual pumps and dual motors, to achieve linear navigation control of the crawler harvester. An efficient strategy for turning and changing lines at field ends was proposed, enabling rapid turning in small field spaces and precise alignment with the next operation line. The operational efficiency advantages of the proposed path and turning methods were analyzed. Field tests showed that the average standard deviation of lateral deviation during linear navigation was 3.7 cm, and the average standard deviation of heading deviation was 0.9°; the average time for turning and changing lines at field ends was 10.4 s, with an average initial alignment position deviation of 10.3 cm and an average initial heading deviation of 3.0° upon completion of the turning and changing lines, verifying the effectiveness of the method for full-field auto drive. The results indicated that this method can reduce non-operating time during field end turns and avoid repeated compaction at field ends, enhancing the operational efficiency

收稿日期: 2026-02-05 修回日期: 2026-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD20000603、2025YFD2300400)

作者简介: 王辉(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事农机自动驾驶及智能作业研究, E-mail: wanghui4@lovol.com

通信作者: 何杰(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业导航装备研究, E-mail: hooget@scau.edu.cn

and practicality of the auto drive system of crawler harvesters.

Key words: crawler harvester; auto drive system; inner-looped; path planning; turning at field ends for line changes

0 引言

农村劳动力外流导致水稻收获季节性用工紧张,加之高温高粉尘与高强度作业环境,增加了用工难度和成本^[1],急需无人化收获装备降低对人工的依赖。因此,面向水稻等收获工况研制具备稳定控制、连续高效作业的无人驾驶履带收获装备,对减少人工依赖、降低作业成本、改善人工作业环境具有重要意义^[2]。

在国家“十四五”农业农村现代化规划及土地规模化经营引导驱动下,智慧农业技术取得了长足进步^[3]。国际上,欧美日等发达国家已形成较为成熟的技术体系,如 John Deere 与 CNH Industrial 致力于构建无人作业生态^[4-5],日本 Kubota 则在 RTK-GNSS 导航与无人化作业方面积累深厚^[6]。在国内,以潍柴雷沃、联适导航、中联重科等为代表的企业^[7-9],充分发挥北斗高精度定位优势,实现了自动驾驶收获机的研发与示范应用,其直线行驶精度达到厘米级标准,推动了我国农机装备的智能化升级^[10-11]。

自动驾驶履带收获机主流全局路径规划主要包括往复式、口字型与回字型^[12]。现有自动驾驶履带收获机多采用外回字型或“先边后中”的口字型路径,配合弓字、鱼尾等地头转弯完成地块作业。现有方式地头通常重复通行且非作业时间偏高。在湿软水田中,重复碾压还会引发车辙沉陷甚至拖底陷车,影响实际应用的作业效率与连续性^[13]。

针对以上问题,本文面向凸四边形水田提出一种“内回字型全覆盖路径+高效地头转弯+无缝衔接入行”的连续作业方法,通过内回字路径的规则引导收获机四边均满幅收获;基于预瞄追踪模型路径跟踪控制方法,结合双泵双马达独立控制左右履带无级变速底盘,实现履带收获机的直线导航高精度控制;根据人工驾驶地头转弯经验,结合履带收获机车辆尺寸参数、地头空间以及路径跟踪控制方法,设计地头转弯引导线与控制方法流程,实现地头的小空间快速转弯换行;并通过田间试验与典型地块效率计算验证所提方法。

1 系统硬件结构

本文选取雷沃谷神 RG70 型履带式全喂入联合收获机作为无人驾驶试验平台,其相关参数如表 1

所示。该机型适用于我国南方及东北地区地块的水稻、小麦等谷物收获作业,转向灵活、防陷通过性强、水旱兼作,适应坡地与小地块调头作业^[14]。底盘采用静液压传动(Hydrostatic transmission, HST)驱动与履带差速转向结构,具备无级变速与原地转向能力。在人工驾驶模式下,驾驶员通过操作驾驶台的机械主手柄及辅助拉杆,手动控制液压阀组,完成车辆速度、油门、转向、割台升降、脱粒主离合、卸粮筒展开及卸粮等动作。

表 1 RG70 型收获机相关参数
Tab.1 RG70 harvester related parameters

参数	数值
发动机功率/kW	89
外形尺寸/(mm×mm×mm)	5 600×2 300×2 700
工作幅宽/mm	2 300
轨距/mm	1 250
履带规格/(mm×mm×节)	500×90×59
行驶速度/(m·s ⁻¹)	0~2.6

1.1 自动驾驶履带收获机系统组成

潍柴雷沃 RG70-AG11BD-2.5GY 型履带收获机,整机系统集成北斗定位接收机、车载显示屏、整车控制器 VCU,并可与远程控制 APP 通信形成一套完整的自动驾驶履带收获机系统,如图 1 所示。



图 1 自动驾驶履带收获机系统组成
Fig.1 Hardware composition of auto drive crawler-type harvester

自动驾驶控制系统整体结构如图 2 所示,主要由以下部分组成:

北斗定位接收机:接收机为系统核心硬件^[15-17],集成 BDS 定位主天线、UM982 定位模组、LINS16460 IMU 模组、EC200 4G 通信模组、导航主控芯片 STM32F743 及控制底板等,实现高精度定位测姿、路径规划、导航控制、底盘动作指令决策等功能。接收机安装于驾驶室车顶前方左侧位置,从天线安装于驾驶室车顶中轴线后侧位置,双天线间距

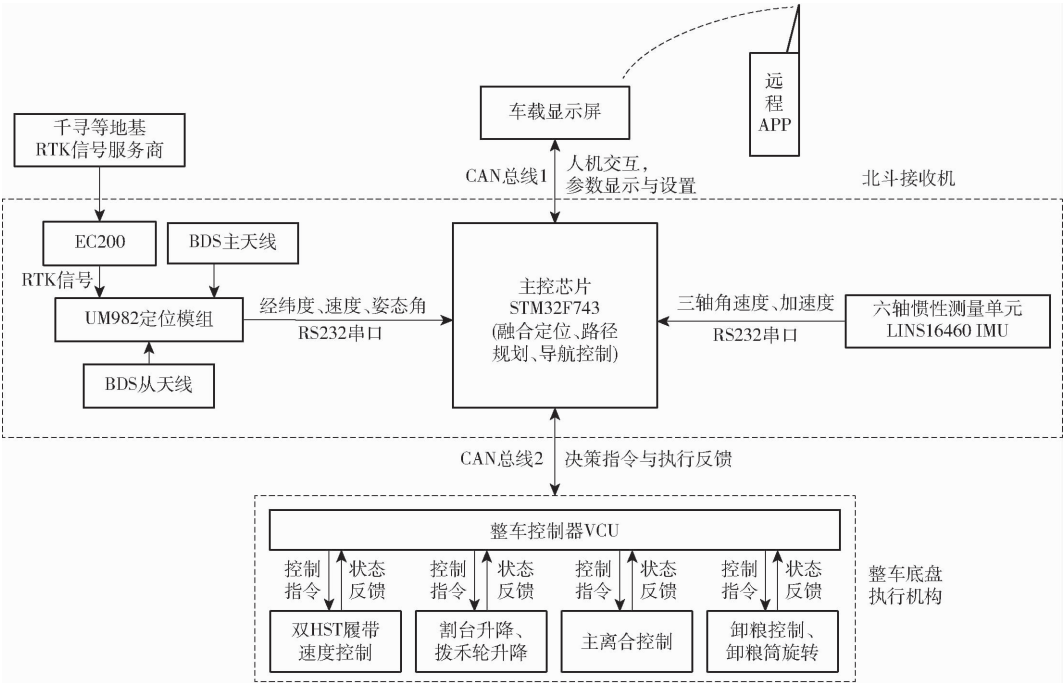


图2 控制系统整体结构图

Fig. 2 Schematic of overall system architecture

1.2 m,用于车辆航向实时测量。

车载显示屏:作为人机交互终端,用于导航状态显示、导航操控、作业参数配置(如有效幅宽、割台高度等)。同时与远程 APP 通信,转发远程 APP 指令控制自动驾驶系统。

整车控制器 VCU:负责整车底盘控制执行,包括双泵双马达履带无级变速行走/转向、发动机转速、主离合、割台升降、卸粮筒旋转与卸粮离合等液压/电控执行部件。各执行机构依据导航控制器下发的 CAN 报文完成相应动作,实现根据作业决策对速度、转向与收获作业执行机构的联动控制。

1.2 履带底盘差速驱动控制系统

如图3所示,履带底盘采用双泵双马达静液压驱动结构。定位及测速模块向整车控制器提供车辆运动状态与控制目标,整车控制器根据期望行驶速度与转向需求,分别输出左、右侧变速泵控制指令,调节变速泵排量与输出流量,进而驱动左右定量马达实现履带无级调速。左右马达转速由转速传感器实时采集并反馈至整车控制器,用于闭环修正与同步控制,提高速度跟踪精度与转向稳定性。

在不考虑打滑等因素的理想条件下,变速泵输出流量与马达转速呈正相关关系,马达转速与履带速度呈正相关关系;因此可通过调节左右变速泵控制量实现左右履带速度的独立控制。直线行驶时左右履带速度保持一致;转向行驶时通过左右履带速度差实现差速转向,速度差越大,转向越明显。

为便于工程实现,本文将左右履带速度指令归

一化为速度控制百分比 $P_v(0 \sim 100)$,并通过标定建立“速度百分比—泵控制指令—马达转速(或履带速度)”的映射关系,从而将上层控制输出统一转换为底盘可执行的控制量。

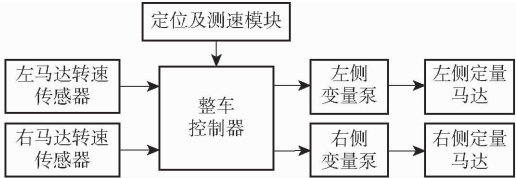


图3 履带控制系统框图

Fig. 3 Track control system block diagram

2 地块全覆盖收获路径规划设计

在自动驾驶收获作业中,全局路径规划用于确定整块地块的覆盖顺序与作业行组织方式^[18-20]。目标是在满足割幅搭接与边界约束的前提下实现全覆盖,并尽量减少割幅重叠、非作业行驶距离与地头重复碾压。

针对常见凸四边形农田地块,为实现履带收获机的高效自动作业,本文提出一种由外向内的螺旋式与中心平行填充相结合的混合全局路径规划方法。如图4所示,首先建立作业区域的几何模型,定义农田外轮廓为凸四边形 $ABCD$,其顶点集合记为 $V = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$,按逆时针方向排列。设收获机割台机械幅宽为 W ,有效作业幅宽为 W_s ,考虑到机身尺寸及地头转弯换行安全性,设定各边界的初始安全距离分别为 $d_{s1}, d_{s2}, d_{s3}, d_{s4}$ 。边界直线 L_j 采用斜截式方程描述,即

转弯半径 R 为

$$R = \frac{v_1}{\omega} = \frac{B(v_R + v_L)}{2(v_R - v_L)} \tag{9}$$

车辆在 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 位置时位姿分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_1 = [x_1, y_1, \varphi_1]^T \\ \boldsymbol{P}_2 = [x_2, y_2, \varphi_2]^T \end{cases} \tag{10}$$

履带收获机在 XOY 坐标系下线速度用 $\dot{X}, \dot{Y}$ 表示,转动/航向角速度用 $\dot{\psi}$ 表示,车辆中心点 P 在地固坐标系下的运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\cos\varphi & \frac{1}{2}\cos\varphi \\ \frac{1}{2}\sin\varphi & \frac{1}{2}\sin\varphi \\ \frac{1}{B} & -\frac{1}{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中 φ_1 ——车辆 P_1 位置航向角
 φ_2 ——车辆 P_2 位置航向角
 v_1 ——车辆质心处线速度
 φ ——车辆航向角

3.2 基于预瞄追踪模型的直线控制方法

预瞄追踪 (Pure pursuit) 是一类几何路径跟踪方法^[26-27]。其做法是在目标路径上选取预瞄追踪点,将当前车辆航向与预瞄方向之间的偏差转化为控制量,从而使车辆轨迹逐步收敛至规划路径^[23]。

图 6 中建立全局坐标系 OXY ,其中 X 轴为横向、 Y 轴为纵向。右侧规划路径为全覆盖作业路径示意,外圈和内圈作业路径分别以 $A_1B_1C_1D_1$ 和 $A_2B_2C_2D_2$ 表示。 P 为车辆中心点; M 为点 P 在路径 A_1B_1 上的投影点, PM 的距离为车辆位置偏差 P_e ; N 为预瞄点; MN 线段长度 d 为预瞄距离; ψ_t 为目标路径 A_1B_1 航向角; ψ_v 为车体当前航向角; ψ_a 为预瞄航向角,即车辆中心 P 指向预瞄点 N 的向量方向角; ψ_e 为航向偏差角(车体航向与目标路径航向之差); ψ_p 为位置偏差决策角,表示预瞄航向 ψ_a 与目标航向 ψ_t 夹角。

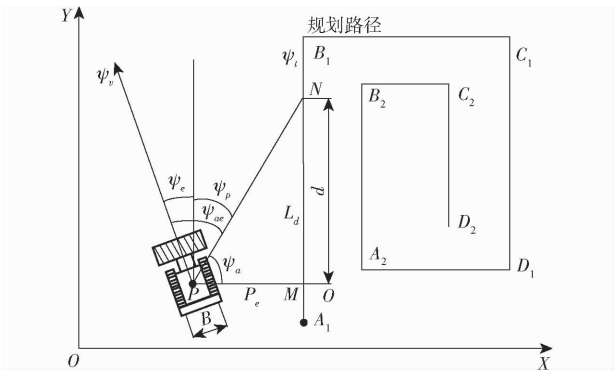


图 6 预瞄追踪模型

Fig. 6 Pure pursuit tracking model

首先,定位及测速模块输出车辆实时位姿(位置 P 与航向 ψ_v),导航控制器根据当前目标路径 A_1B_1 计算投影点 M 和位置偏差 P_e ,并按设定预瞄距离 d 沿直线前进方向生成预瞄点 N 。其次,导航控制器计算预瞄航向角 ψ_a ,并将其与车辆航向 ψ_v 比较得到预瞄航向偏差 ψ_{ae} :当车辆偏离直线或航向与路径方向不一致时, ψ_a 始终会指向目标直线路径预瞄点 N 的位置,引导车辆以连续的方式靠近、跟踪目标直线。设计控制器将预瞄航向偏差 ψ_{ae} 通过 PID 算法转换为履带底盘转向控制量,通过左右履带速度百分比命令实现转向控制与位置纠偏。直线跟踪时左右履带速度相等;左、右侧纠偏时,控制器保持一侧履带速度不变并相应减小另一侧履带速度,减小速度比例为 P_{vs} ,形成角速度使车体逐渐对准 PN 方向。左右马达转速传感器反馈实际转速,导航控制器对左右履带速度进行闭环修正,使履带收获机稳定跟踪目标路径实现直线段跟踪控制。

具体设计控制律,令履带收获机减速侧履带减速比例 P_{vs} 为预瞄航向偏差 ψ_{ae} 的 k 倍, k 称为控制增益。则有

$$P_{vs} = k(\psi_v - \psi_a) = k\psi_{ae} \tag{12}$$

$$\psi_{ae} = \psi_e + \psi_p \tag{13}$$

$$\psi_e = \psi_v - \psi_t \tag{14}$$

$$\psi_p = \arctan \frac{P_e}{d} \tag{15}$$

根据公式推导及实践测试整定^[28],设置最佳预瞄距离 d 为

$$d = \begin{cases} 2v_1 & (v_1 \geq 0.75) \\ 1.5 & (v_1 < 0.75) \end{cases} \tag{16}$$

则导航控制器发送叠加转向控制量后的实际两侧履带速度指令为

$$\begin{cases} P_{v1} = P_{vset} \\ P_{v2} = P_{vset} - k \left(\psi_e + \arctan \frac{P_e}{d} \right) \end{cases} \tag{17}$$

式中 P_{v1} ——正常侧履带速度控制指令
 P_{v2} ——转弯减速侧履带速度控制指令
 P_{vset} ——设定的履带机作业速度控制指令

经过多次实践与整定,控制增益 $k = 5$,可实现较佳的履带收获机直线导航控制效果。

3.3 地头转弯换行方法

水稻田块通常较小,履带式收获机在相邻作业行之间换行时需频繁转向,转弯轨迹直接决定换行时间、空驶距离以及地头重复碾压程度^[29-30]。在湿软水田中,履带转向引起的侧向剪切与沉陷更显著,因此需要采用尽量减小空间占用、转弯耗时与土壤碾压的转弯换行策略。

现有常用策略主要包括弓字型、 Ω 型、鱼尾型与原地转向等,这些转弯类型均未较好解决空间、效率、碾压等问题。

本文第 2 节所述内回字型路径规划理论上能够较好兼顾水稻收获作业的连续性与效率。但其关键在于地头转弯换行:既要实现快速转弯平顺换行,同时需避免履带压苗。为此,本文提出一种模仿人工熟练驾驶的地头转弯方法,如图 7 所示,其核心思路为“斜入—对准—倒车—旋转”4 个步骤,以几何方式规划地头斜向引导线 MN ,实现作业行之间的高效转弯换行平顺衔接。

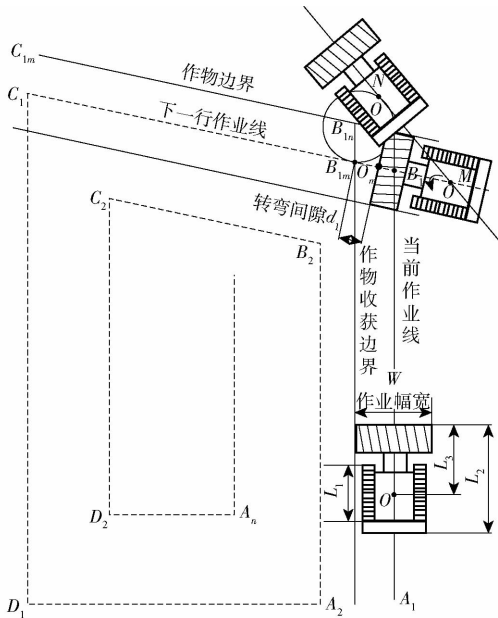


图 7 履带式收获机差速转弯示意图

Fig. 7 Differential steering for tracked harvester

图 7 中建立全局坐标系 OXY ,其中 X 轴为横向、 Y 轴为纵向。 A_1B_1 为当前作业线, B_1C_1 为下一行作业线; B_1 为当前行到达地头的终点基准; B_{1n} 为地头收获边界上的对齐参考点, B_{1m} 为下一行作业线与该行收获边界线交点; C_{1m} 为作物边界的延长参考标记。车辆几何中心(控制点)记为 O ,履带收获机割台前端中心点记为 O_m ,换行后进入下一行的目标位姿点记为 O' 。 M 、 N 为地头斜切段的两端点, MN 为地头规划斜切直线; d_1 为转弯安全间隙, W 为作业设置幅宽; L_1 为车辆履带长度, L_2 为车辆总长, L_3 为车辆中心至割台最前端距离。

换行过程分为 4 步:①斜入:车辆沿当前作业线 A_1B_1 自动收获至地头,越过 B_1 后继续前行,当车辆中心 O 越过作物边界线 $B_{1n}C_{1m}$ 时,车辆前进跟踪地头转弯引导斜切直线 MN 。其中点 M 位于下一行作业线 B_1C_1 沿 $C_1 \rightarrow B_1$ 方向的延长线上,以 B_{1m} 为基准平移距离 ($L_3 + d$) 得到;以 B_{1n} 为圆心、半径 $0.5W$ 作圆,从点 M 作该圆外侧切线,切点为 N ,连接 M 、 N

得到斜切直线 MN 。②对准:车辆沿 MN 前进,当横向误差与航向误差进入设定阈值后短暂停车(用于姿态与控制稳定)。③倒车:车辆沿 MN 直线 $N \rightarrow M$ 方向倒车回到点 M 。④旋转:车辆到达点 M 后进行差速转向(一侧履带速度置零、另一侧驱动),使车体航向与下一行作业线 B_1C_1 的方向偏差控制在约 5° 以内,随后前进进入下一行作业线,完成地头转弯换行。

该方法通过斜向引导、倒车回退与原地旋转的组合,将转弯换行动作控制在作物边界附近已收获空白区域,在保证作业效率的同时有效避免压苗,同时减小了转弯换行空间,可有效减小人工收获地头的安全距离,提高无人驾驶收获作业操作便利性。按照该步骤在相邻作业行间循环执行,与内回字螺旋路径规划配合,可高效平顺完成整个地块的收获作业。

4 作业效率分析

4.1 内回字型作业效率分析

水稻标准农田地块多为近似矩形地块,以矩形农田地块作为研究对象,单条作业行的有效作业距离约等于地块边长,在速度固定情况下,地头转弯换行时间可等效为一个常数。自动驾驶收获作业的一个基本循环为:沿作业行直线收获→地头转弯换行→进入下一行继续收获。

设一般矩形地块的长为 L_0 、宽为 B_0 ,作业有效割幅设置为 W_s ,将较短边决定的作业行数 N 作为作业总行数,除最后一行外每行包含两个基本循环

$$N = \text{ceil} \left(\frac{B_0}{W_s} \right) \quad (B_0 \leq L_0) \quad (18)$$

式中 $\text{ceil}()$ ——上取整函数

则第 i 行 ($i < N$) 的直线作业长度 L_i 为

$$L_i = L_0 + B_0 - (2i - 1)W_s \quad (19)$$

忽略微小误差,第 N 行直线作业长度亦可表示为式(19),则内回字型螺旋路径部分的直线作业总距离 S_T 为

$$S_T \approx \sum_{i=1}^N [L_0 + B_0 - (2i - 1)W_s] \quad (20)$$

简化合并后得到

$$S_T = N(L_0 + B_0) - N^2W_s \quad (21)$$

若直线作业速度为 v_2 ,则直线收获时间 T_{work} 为

$$T_{\text{work}} = \frac{S_T}{v_2} = \frac{N(L_0 + B_0) - N^2W_s}{v_2} \quad (22)$$

地头转弯换行次数 N_{turn} 为

$$N_{\text{turn}} = 2N - 2 \quad (23)$$

假设地头转弯速度为 v_T ,地头每次转弯换行时

间为 $\bar{t}_{\text{turn}}$,包括转弯对行“斜入—对准—倒车—旋转”4个步骤的时间和,计算式为

$$\bar{t}_{\text{turn}} \approx 4 + \frac{5.3}{v_T} \tag{24}$$

其中固定时间4 s包括前进/后退切换时间和旋转阶段时间,另外一部分为地头行驶时间。

地头转弯换行总时间为 T_{turn} ,计算式为

$$T_{\text{turn}} = N_{\text{turn}} \bar{t}_{\text{turn}} \tag{25}$$

因此,整块田收获的总时间为

$$T_{\text{total}} = T_{\text{work}} + T_{\text{turn}} \tag{26}$$

联立式(22)、(25)得

$$T_{\text{total}} = \frac{N(L_0 + B_0) - N^2 W_s}{v_2} + 2(N - 1) \bar{t}_{\text{turn}} \tag{27}$$

综合收获作业效率可用单位时间收获面积 η 表示,有

$$\eta = \frac{L_0 B_0}{T_{\text{total}}} \tag{28}$$

上述式(27)、(28)可直接用于不同矩形地块、割幅、速度与转弯耗时条件下的作业时间和作业效率评估,便于参数敏感性分析与效率估计。

4.2 外回字型作业效率分析

假设同样长 L_0 、宽 B_0 的作业地块,直线作业速度 v_2 和地头转弯速度 v_T 相同,外回字型作业路径直线作业长度 S_{T2} 为

$$S_{T2} = NL_0 \tag{29}$$

直线收获总时间 T_{work2} 为

$$T_{\text{work2}} = \frac{NL_0}{v_2} \tag{30}$$

第 i 行($i < N$)的地头转弯距离为

$$L_{\text{turn}i} \approx \pi R + 2d_0 + B_0 - iW_s \tag{31}$$

其中, R 为地头转弯半径,一般设为3 m; d_0 为自动转弯入行预留的对行距离,一般设为1.5 m。

则第 i 行地头转弯时间估算为 $\bar{t}_{\text{turn}2i}$,即

$$\bar{t}_{\text{turn}2i} \approx \frac{\pi R + 2d_0 + B_0 - iW_s}{v_T} \tag{32}$$

则整个地块地头转弯换行总时间为 T_{turn2} ,计算式为

$$T_{\text{turn2}} = \frac{(N - 1)(\pi R + B_0 + 2d_0) - N(N - 1)/2W_s}{v_T} \tag{33}$$

4.3 作业效率对比分析

对比式(22)、(30),虽然两式表现形式不一,但直线收获距离和时间是由作业面积和作业速度决定,两种方法直线作业距离和时间相当。

对比式(24)、(32),在地头转弯速度 v_T 一定情况下,显然本文方法地头转弯时间是固定的。而外

回字型路径地头转弯时间由两部分组成,一部分为两个圆弧转弯和入行距离耗费时间,相对固定,另一部分跨行时间由地块宽度和作业行数决定,地块宽度越大,作业行数越小,地头跨行耗费时间越长。当 v_T 为1.78 m/s时,外回字型地头转弯仅圆弧转弯和入行部分时间与内回字型地头转弯时间相等,外回字型地头跨行时间是相对多出转弯时间;当 v_T 小于1.78 m/s时,外回字型地头转弯仅圆弧转弯和入行时间部分就大于内回字型地头转弯时间,外回字型地头跨行时间是另外多出的转弯时间;当 v_T 大于1.78 m/s时,外回字型地头转弯对行时间部分小于内回字型地头转弯时间,但履带收获机地头转弯速度一般不超过1.78 m/s。

综上,本文自动驾驶路径规划方法具有较大的效率优势,地头转弯时间明显减小。尤其在地块宽度较大、地头转弯速度较低时,地头转弯换行效率优势更加明显。另外,本文方法相对于外回字型地头转弯预留空间小、不重复碾压地头,避免了重复碾压地头造成的车辙沉陷陷车等问题,提高了履带收获机自动驾驶系统的实用性。图8为两种路径对比示意图, $ABCD$ 为地块,地块内部黑色直线为直线收获作业部分,红色部分为地头转弯路线部分,图8b地头加粗红线为地头重复碾压部分,从对比图可以清晰看出两种路径差异与优劣。

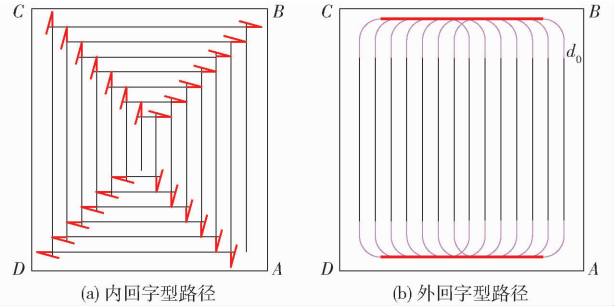


图8 两种路径对比

Fig. 8 Comparison of two paths

5 田间试验

以建三江七星农场高标准水稻农田为试验场地,对本文提出的方法进行试验。为突出路径设计与地头转弯策略对效率的贡献,本节仅统计“直线收获+地头转弯换行”所消耗的时间,不计入卸粮、清堵、人工接管等停机因素^[31]。地块收获作业效率主要由“直线收获行驶距离”与“地头转弯换行/非作业距离”耗时共同决定,测试平台及场地如图9所示。

建三江七星农场高标准水稻农田地块相对规则,选择近似矩形的39.8 m×40.5 m试验地块。为



图 9 测试平台及场地
Fig. 9 Test platform and site

便于系统总体功能和作业效率验证,系统试验的作业主要参数如表 2 所示。

表 2 系统试验作业主要参数设置

Tab. 2 Main homework parameters setting of system testing

参数	数值
地块尺寸/(m×m)	39.8×40.5
地块面积/m ²	1 611.9
有效工作幅宽/m	2.1
作业行数/行	19
地头转弯换行次数/次	36
直线行驶速度/(m·s ⁻¹)	1.2
转弯行驶速度/(m·s ⁻¹)	0.8

田间实测运行轨迹如图 10 所示,其中红色虚线为设定轨迹,蓝色实线为实际运行轨迹,在轨迹特征上,直线段跟踪稳定且误差小;地头换向段则呈现清晰的“超前一斜切—短回撤—差速急转”几何特征。尽管地头角点处因目标路线变化导致位置和航向偏差突变,导航行驶路线出现了外扩与回摆,但整体换行节拍清晰、动作稳定可重复,验证了该方法的有效性。

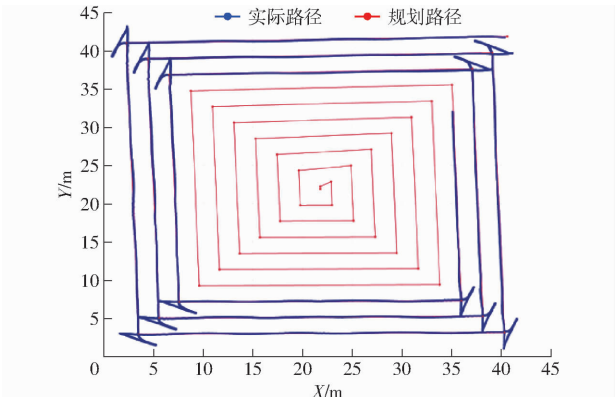


图 10 履带式收获机差速转弯实测运行轨迹
Fig. 10 Measured trajectory of differential steering in field test

图 11 中展示了横向偏差 P_e (cm)、航向偏差 ψ_e 与质心速度 v_1 3 个关键参数随时间变化的动态时序

曲线,直观呈现了系统在不同作业阶段的运行状态与性能表现。整体可分为直行稳定段与地头转弯换行段两类。直行作业阶段,位置偏差和航向偏差均较小,说明直线作业的稳定;地头转弯换行阶段,由于目标航线变化导致位置和航向偏差突然变大,但在导航控制算法作用下,可快速消除偏差进入稳定直线跟踪状态。表 3 系统整理了本文所提自动驾驶收获方法在相邻 3 行实际作业试验中导航精度与地头转弯换行关键指标数据。呈现了系统在多行重复试验中的稳定性与一致性,验证了本文所提“内回字型全覆盖路径规划+预瞄追踪直线导航控制+地头转弯换行”方法全程自动驾驶作业的有效性,为试验分析与结论推导提供了量化数据支撑。

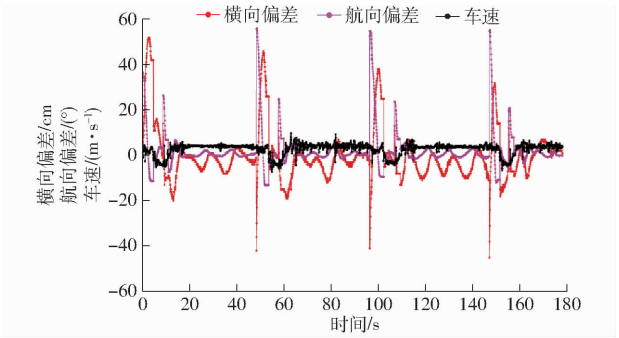


图 11 作业行跟踪横向偏差、航向偏差及车速变化曲线
Fig. 11 Tracking curves of lateral deviation, heading deviation, and speed change during operation

表 3 本文方法的导航精度与地头换行关键指标统计

Tab. 3 Statistics of navigation accuracy and key headland turning indicators for proposed method

参数	第 1 行	第 2 行	第 3 行	平均值
直线段横向偏差 P_e 标准差/cm	4.0	3.6	3.5	3.7
直线段航向偏差 ψ_e 标准差/(°)	1.0	0.9	0.9	0.9
地头转弯换行时间/s	10.1	10.6	10.5	10.4
换行结束初始位置偏差/cm	12.0	10.0	9.0	10.3
换行结束初始航向偏差/(°)	3.6	3.0	2.4	3.0

由表 3 中 3 行试验的统计数据可知,直线段的横向偏差标准差控制在 4.0 cm 以内,航向偏差标准差平均值为 0.9°,农机行驶速度保持稳定,验证了该算法具备优异的稳态行跟踪性能;在地头换行阶段,受目标作业线切换及农机转向的综合影响,系统不可避免地会出现短暂的误差尖峰与速度波动。但 3 次连续的测试结果表明,该算法能够使尖峰误差在转弯动作结束后快速回落并重新进入收敛状态,体现出控制算法良好的动态调节和跟踪能力。

进一步分析地头换行关键指标,本文方法在 3 次试验中的平均地头转弯换行耗时为 10.4 s,与式(24)计算结果基本一致。在换行结束切入新作业线时,其初始位置的平均偏差为 10.3 cm,初始航

向平均偏差为 3.0° 。这表明该方法不仅能在有限的地头空间内高效、稳定地重复完成换行机动,还能在切入初期迅速建立高质量的入线对准姿态,从而有效减小了转弯对行距离和时间,可显著减小地头留白空间,提高地头转弯效率。

6 结论

(1)本文针对履带式收获机自动驾驶作业中地头转弯换行无效作业路径长、耗时长以及地头重复碾压导致通过性退化等问题,提出了“内回字型全覆盖路径规划+预瞄追踪直线导航控制+地头高效转弯换行”的连续高效作业方法。该方法通过内回字螺旋收缩式路径实现收获作业四周满幅收获和地块全覆盖;在控制层面建立履带差速运动学与速度分配框架,结合预瞄追踪实现直线段稳定跟踪;并设计与地头角点匹配的“斜入—对准—倒车—旋转”转弯换行策略,在较小地头空间内实现快速转弯换行,减小地头留白空间并提高了地头转弯效率。

(2)通过作业效率分析,本文自动驾驶路径和地头转弯方法相对外回字型路径具有较大的效率优

势,地头转弯时间明显减小。尤其在地块宽度较大、地头转弯速度较低时,地头转弯换行效率比外回字型方法具有更加明显优势。本文方法地头转弯预留空间小、不重复碾压地头,避免了重复碾压地头造成的车辙沉陷陷车等问题,提高了履带收获机自动驾驶系统的实用性。

(3)田间试验结果表明:实测运行轨迹中,直线作业段与设定轨迹贴合良好,换行段呈现“超前一斜切—短回撤—差速急转”规律的几何特征,能够在有限地头条件下完成航向切换并准确进入下一作业行;地头转弯换行角点处虽存在轻微外扩与回摆,但整体换行节拍清晰且可重复。相邻3行作业试验中:直线段横向偏差标准差为 $3.5 \sim 4.0\text{ cm}$ (平均 3.7 cm);直线段航向偏差标准差为 $0.9^{\circ} \sim 1.0^{\circ}$ (平均 0.9°),直线跟踪性能稳定。地头转弯换行时间为 $10.1 \sim 10.6\text{ s}$ (平均 10.4 s)。同时,换行结束后的初始位置偏差 $9.0 \sim 12.0\text{ cm}$ (平均 10.3 cm)、初始航向偏差 $2.4^{\circ} \sim 3.6^{\circ}$ (平均 3.0°),说明在有限地头空间内能够快速完成地头转弯并保持较好的初始入线对行精度,快速衔接进入下一行作业。

参 考 文 献

[1] 常明明,胡畔.外流与回流:“一五”计划时期农村劳动力流动研究[J].中南财经政法大学学报,2025(2):124-134.
Chang Mingming, Hu Pan. Outflow and return flow: a study on rural labor mobility during the first five-year plan period[J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2025(2):124-134. (in Chinese)

[2] 李昊阳,吴海华,韩科立,等.谷物联合收获机智能控制技术发展现状与展望[J].农业工程,2025,15(11):1-9.
Li Haoyang, Wu Haihua, Han Keli, et al. Current status and future prospects of intelligent control technology for grain combine harvesters[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(11):1-9. (in Chinese)

[3] 沐之.全国各地涌现出一批智慧农业建设的典型案例[J].中国农机监理,2022(12):7.

[4] 约翰迪尔收割机家族,适配多作物收获[J].农业机械,2025(9):19.

[5] CNH Industrial brands reveal concept autonomous tractor development: driverless technology to boost precision and productivity [EB/OL]. [2026-01-30]. https://www.cnh.com/media/press_releases/2016/august/CNH-Industrial-brands-reveal-concept-autonomous-tractor-developmet.

[6] 张国明,高春梅,李社潮.久保田水稻收割机技术创新与无人化发展[J].农机市场,2025(8):48-50.

[7] 姚彬.领航智慧农业新征程潍柴雷沃智慧农业亮相2025国际农机展[J].农机市场,2025(11):39-40.

[8] 张晓明.联适“智”造亮相扬州“无人”作业竞赛[J].农机科技推广,2023(6):60.

[9] 韩海波.中联重科履带自走式打捆机亮眼表现显实力[J].农机质量与监督,2025(10):43.

[10] 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)

[11] 张漫,季宇寒,李世超等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报,2020,51(4):1-18.
Zhang Man, Ji Yuhao, Li Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):1-18. (in Chinese)

[12] 孔鹏飞,陈健,吕成兴,等.基于区域划分的农业机器人路径规划算法[J].计算机仿真,2025,42(8):358-365.
Kong Pengfei, Chen Jian, Lv Chengxing, et al. Path planning algorithm of agricultural robot based on region division[J]. Computer Simulation, 2025, 42(8):358-365. (in Chinese)

[13] 伊力达尔·伊力亚斯,朱思洪,Do. Minh Cuong,等.湿软水田土壤行驶工况下拖拉机振动特性研究[J].南京农业大学学报,2016,39(6):1062-1068.
Yilidaer Yiliyasi, Zhu Sihong, Do. Minh Cuong, et al. Study on vibration characteristics of tractor travel at the condition of marshy paddy soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(6):1062-1068. (in Chinese)

[14] 吴可铭.雷沃谷神领航RG70金刚Ⅱ代履带机线上发布会圆满举行[J].农机科技推广,2023(1):59.

[15] 宋丽,艾长胜,孙崇书,等. 基于高精度卫星差分定位的组合导航研究[J]. 现代信息科技,2022,6(15):37–40,44.
Song Li, Ai Changsheng, Sun Chongshu, et al. Research on integrated navigation based on high precision satellite differential positioning[J]. Modern Information Technology, 2022, 6(15):37–40, 44. (in Chinese)

[16] Feng Y,Huang G,Wang M, et al. GNSS/MEMS INS tightly coupled algorithm for agricultural machinery navigation enhanced by random forest-based behavioral state awareness[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2026,242:111350.

[17] Feng L,Xu C,Tang H, et al. Application of navigation technology in agricultural machinery: a review and prospects[J]. Artificial Intelligence in Agriculture,2026,16(1):94–123.

[18] Chen T,Zhai W. STGMAE: a GNSS data-driven pre-training spatiotemporal graph masked autoencoder for agricultural machinery trajectory operation mode identification[J]. Artificial Intelligence in Agriculture,2026,16(1):439–457.

[19] 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)

[20] 李先山. 自动导航控制系统在设施农业机械中的应用及研究[J]. 当代农机,2023(11):48–49.

[21] 陈小虎. 履带式大豆联合收获机路径跟踪控制系统的设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学,2024.
Chen Xiaohu. Design and experiment of path tracking control system for tracked soybean combine harvester[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[22] 宋裕民,梁健明,邱绪云,等. 履带式拖拉机运动控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):242–248.
Song Yumin, Liang Jianming, Qiu Xuyun, et al. Design and test of motion control system for crawler tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7):242–248. (in Chinese)

[23] 孟泽江. 基于 GNSS 的履带式联合收割机自动导航方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2025.
Meng Zejiang. GNSS-Based automatic navigation for crawler combine harvesters: methods andImplementation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)

[24] 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 Fa'an, 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)

[25] 刘志杰,王小乐,任志刚,等. 基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报,2021,52(6):376–385.
Liu Zhijie, Wang Xiaole, Ren Zhigang,et al. Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):376–385. (in Chinese)

[26] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11):139–145.
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139–145. (in Chinese)

[27] 杨旭升. 基于模糊纯追踪模型的最优预瞄研究[J]. 时代汽车,2023(17):13–15.
Yang Xusheng. Optimal presighting research based on fuzzy pure pursuit model[J]. Times Automobile, 2023(17):13–15. (in Chinese)

[28] 王辉,王桂民,罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报,2019,35(4):11–19.
Wang Hui, Wang Guimin, Luo Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11–19. (in Chinese)

[29] 王启洲. 无人驾驶犁耕机组地头转弯控制系统研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2024.
Wang Qizhou. Research on the headland turning control system for unmanned ploughing unit[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)

[30] Chen Tiaotiao,Xu Lizhang,Seok H A, et al. Evaluation of headland turning types of adjacent parallel paths for combine harvesters[J]. Biosystems Engineering,2023,233:93–113.

[31] Bettucci F,Lindia P,Trunfio P, et al. Operational state classification of agricultural machinery using GNSS data: a minimal-input approach for field efficiency assessment[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2026,240:111193.