

考虑滑移影响的履带式收获机 MPPI 路径跟踪控制方法

魏文波 何 敏 齐泽中 解臣硕 刘 泽 肖茂华

(南京农业大学工学院, 南京 211800)

摘要: 在田间作业过程中履带式联合收获机常因纵向打滑与横向漂移导致实际运行轨迹偏离规划路径,严重影响作业效果。而传统路径跟踪控制仍多基于理想无滑假设,难以准确反映履带-地表之间滑移导致的非线性相互作用。目前尚缺乏能够有效抑制滑移扰动并保证收获机持续稳定路径跟踪的实用方法,为此,本文提出一种考虑滑移影响的履带式收获机模型预测路径积分 (SLIP - MPPI) 路径跟踪方法。在运动学建模中引入纵向滑移率与横向位移近似模型,以修正状态传播;并在代价函数中增加滑移惩罚项,从而在采样优化过程主动规避滑移过大的不稳定轨迹。结合响应面方法对代价函数权重进行多目标优化,获得更合理的权重组合。田间试验结果表明,在复杂转向工况下 SLIP - MPPI 横向误差与航向误差均显著优于传统模型预测路径积分 (MPPI)。正弦曲线路径试验结果表明,SLIP - MPPI 最大横向误差和标准差分别降至 0.029 m 和 0.010 m,比 MPPI 下降 40.8% 和 41.2%;最大航向误差与标准差分别为 1.84° 和 0.91°,较 MPPI 降低 38.5% 和 27.8%。此外,直线路径收获试验结果表明,该方法能够保持稳定作业,作业带边界整齐,无明显偏移或蛇形轨迹,验证了 SLIP - MPPI 方法在田间复杂工况下有效性与鲁棒性。研究结果为履带式收获机在复杂土壤条件下实现高精度路径跟踪提供了一种可行方案。

关键词: 履带式收获机; 路径跟踪; 模型预测路径积分控制; 滑移抑制

中图分类号: S24; TP24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)08-0089-11

OSID:



MPPI-based Path Tracking Control Method for Tracked Combine Harvesters Considering Slip Effects

WEI Wenbo HE Min QI Zezhong XIE Chenshuo LIU Ze XIAO Maohua

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: During field operations, tracked combine harvesters often experience longitudinal slip and lateral drift, which cause deviations of the actual trajectory from the planned path and severely affect operational performance. However, conventional path tracking control is still mostly based on the ideal no-slip assumption, which fails to accurately capture the nonlinear interactions caused by slip between the tracks and the ground surface. At present, practical methods that can effectively suppress slip disturbances and ensure continuous and stable path tracking of harvesters remain lacking. To address this issue, a slip-aware model predictive path integral (SLIP - MPPI) path tracking method was proposed for tracked combine harvesters. In the kinematic modeling, the method incorporated an approximate model of longitudinal slip ratio and lateral displacement to correct state propagation. Additionally, a slip penalty term was introduced into the cost function, enabling the sampling-based optimization to actively avoid unstable trajectories with excessive slip. Furthermore, a response surface methodology was employed to perform multi-objective optimization of the cost function weights, yielding more reasonable combinations of weight coefficients. Field experiments demonstrated that SLIP - MPPI achieved significantly lower lateral and heading errors than conventional MPPI under complex steering conditions. In sinusoidal path tests, the maximum lateral error and standard deviation of SLIP - MPPI were reduced to 0.029 m and 0.010 m, respectively, representing decreases of approximately 40.8% and 41.2% compared with MPPI. The maximum heading error and standard deviation were 1.84° and 0.91°, corresponding to

收稿日期: 2025-09-24 修回日期: 2025-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001604)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25_1035)

作者简介: 魏文波(1995—),男,博士生,主要从事智能农机装备和多机协同技术研究,E-mail: wbooclear@stu.njau.edu.cn

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

reductions of 38.5% and 27.8%. In addition, straight-line harvesting tests showed that the method maintained stable operation, with well-aligned working strip boundaries and without noticeable deviations or serpentine trajectories. These results verified the effectiveness and robustness of the SLIP – MPPI method under complex field conditions. The proposed SLIP – MPPI method provided a feasible solution for achieving high-precision path tracking of tracked combine harvesters under complex soil conditions, contributing to the advancement of agricultural machinery automation and the development of smart agriculture.

Key words: tracked combine harvester; path tracking; model predictive path integral control; slip suppression

0 引言

随着精准农业的快速发展,收获机自动驾驶技术已成为提高收获环节自动化程度的重要支撑^[1-3]。路径跟踪精度是决定收获机导航系统作业质量与作业效率的关键^[4-5]。然而,田间作业环境复杂多变,土壤含水率差异、地表起伏及作物根茬等因素常导致履带纵向打滑和横向漂移,使得收获机实际轨迹偏离预期路径,影响作业稳定性和作业效果^[6-8]。现有方法在应对滑移扰动时效率有限,往往难以在复杂工况下保持稳定精度。如何在复杂土壤条件下有效抑制滑移带来的扰动,提高履带式收获机路径跟踪精度,已成为自动驾驶技术发展中的突出难题。

针对收获机路径跟踪控制问题,国内外学者已开展了大量研究。基于几何模型的控制方法,如 SONG 等^[9]提出基于麻雀搜索自适应前视距离调整的纯追踪路径跟踪方法,以预测偏差为变量构造适应度函数,通过比较适应度搜索前视区域最优目标点,提高了曲线和直线交替条件下路径跟踪效果。HE 等^[10-12]利用两段相切圆弧改进了纯追踪模型,提出了预瞄一切线路径跟踪算法,有效避免了收获机大角度转向带来的转向不稳定问题。基于几何模型的控制方法计算简单、实时性好,但依赖于理想无滑假设,在复杂田间环境下易因滑移产生较大误差。基于经典控制理论的方法,如 ZHANG 等^[13]将多参数优化反馈算法与非线性 PID 转向控制相结合,提高了收获机导航系统动态适应能力和稳态精度。何杰等^[14]提出了一种基于全状态反馈控制的路径跟踪方法,该方法在曲边田埂时具有较好的跟踪精度。HU 等^[15]基于线性二次调节器提出了一种履带式自主跟随机器人路径跟踪控制算法,抑制了导航横向偏移。该控制方法能够在一定程度上抑制路径偏差,但控制参数对工况高度敏感,鲁棒性方面仍需进一步提高。除上述 2 类常见的路径跟踪方法外,目前也有少量研究尝试将模型预测控制引入农机领域^[16-18],以利用其多步预测和约束处理能力,但受

限于对精确模型和较高计算资源的依赖,尚未在实际农田作业中得到广泛应用。近年来,基于采样的随机优化方法逐渐受到关注,其中模型预测路径积分(MPPI)方法因不依赖解析梯度、能够适应强非线性与环境不确定性,更适合在农机复杂工况下应用。然而,已有研究大多未显式考虑履带纵向和横向滑移的影响,导致在田间作业中控制精度与稳定性仍难以保证。

针对上述问题,本文提出一种考虑滑移影响的履带式收获机模型预测路径积分(SLIP – MPPI)路径跟踪方法。在运动学建模中引入纵向滑移率与横向位移近似模型,从预测层面修正车辆状态传播;在代价函数中增加滑移惩罚项,以抑制几何误差较小但滑移严重的轨迹,从而在采样优化过程中主动规避不稳定解。此外,结合响应面方法通过多目标优化获得代价函数权重最优参数组合,以增强对滑移扰动的鲁棒性。

1 履带式收获机自动驾驶平台构建

1.1 导航系统硬件结构

基于 YH1180R 型履带式联合收获机构建一套自动驾驶试验平台(图 1),作为滑移鲁棒 MPPI 控制



图 1 YH1180R 型履带式联合收获机自动驾驶试验平台
Fig.1 Autonomous navigation experimental platform of YH1180R tracked combine harvester

方法硬件与软件依托。履带式联合收获机主要性能参数如表 1 所示。

表 1 YH1180R 型履带式联合收获机主要性能参数
Tab.1 Key specifications of YH1180R tracked combine harvester

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 630×2 510×2 770
整机质量/kg	4 490
发动机标定功率/kW	88.4
履带轨距/mm	1 200
履带宽度/mm	550
最小离地间隙/mm	230
粮仓容量/L	2 100
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	≤0.867

导航系统硬件结构主要由定位感知模块、信息处理模块和执行驱动模块组成。定位感知模块包括实时动态全球卫星导航定位装置(RTK-GNSS; INS622-3B, I-NAV)、惯性测量单元(INS; SCHA634-D03, MURATA)和履带速度反馈编码器。其中,RTK-GNSS 用于提供厘米级的绝对定位信息(定位精度为 1 cm+1 ppm,航向精度为 0.2°),保证收获机在田间作业中能够精确获取质心位置;INS 输出加速度(速度随机游走不大于 50 mm/s)和角速度(角度随机游走不大于 0.25°),在 GNSS 信号受遮挡或波动时仍可保持短时姿态估计;履带编码器实时测量左右履带速度(速度测量精度不大于 0.03 m/s),既为车速反馈控制提供数据,也为滑移率计算提供必要的观测量。信息处理模块以嵌入式边缘计算机(Jetson Orin NX, NVIDIA)为核心,用于收集、计算和分析数据,同时通过 CAN 总线与传感器和联合收获机车载控制器(NMC208, LIANSHI)通讯,向收获机发送转向、行走和收割等命令。嵌入式边缘计算机与人机交互显示器连接,用于输入自动驾驶所需的参数和显示收获机工作状态。

1.2 导航系统控制方案

为了保证收获机在田间作业时导航精度与控制实时性,在嵌入式计算平台上构建基于 ROS 框架的在线数据采集与控制系统,采集系统硬件连接框架如图 2 所示。系统通过话题通信机制实现定位信息、惯导信息和速度传感器等多源信息并行采集。各类传感器数据在进入 ROS 系统后,以独立节点形式运行,并通过自定义消息格式进行标准化处理。在采样过程,所有传感器均采用连续采样方式,以确保数据时序的完整性和控制环节的连续性。针对不同传感器可能存在时间戳差异,系统设计数据同步与缓存处理节点,用于对传感器数据进行统一的时间对齐,并在统一时间框架下集成,从而提高状态感

知的时间精度。

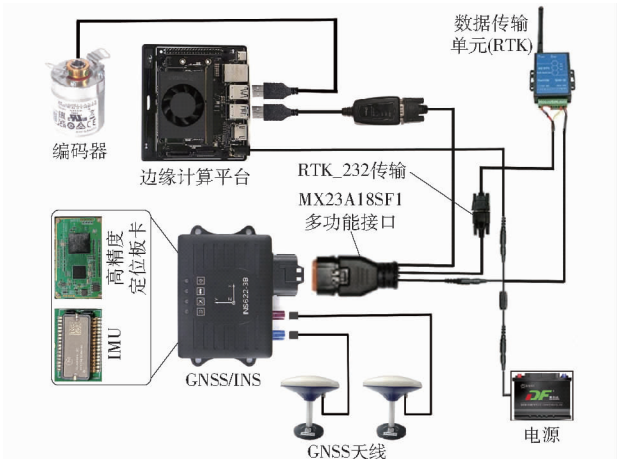


图 2 自动驾驶试验平台数据采集系统硬件连接框架
Fig.2 Hardware architecture of data acquisition system for autonomous navigation experimental platform

在此数据处理架构支持下,提出的滑移鲁棒 MPPI 控制器能够在每个控制周期内调用经过同步和缓存的数据流,完成车辆状态估计与未来轨迹预测。控制器通过大量采样生成候选控制序列,并结合引入滑移修正项的代价函数,对不同轨迹进行评估与筛选,最终选择最优控制输入,转换为左右履带目标速度。经由 CAN 总线将速度指令发送至收获机车载控制器,以驱动履带执行机构。

2 履带式收获机滑移鲁棒 MPPI 路径跟踪方法

履带式收获机在田间作业过程需保持稳定的路径跟踪能力,而由于土壤含水率差异和地面不平整等因素,车辆实际运动状态往往与理想模型存在偏差^[19-20]。为在实际作业工况下实现鲁棒路径跟踪控制,本文引入模型预测路径积分控制方法,并在此基础上考虑滑移因素对 MPPI 模型进行改进。

2.1 路径跟踪问题数学描述与定义

在路径跟踪控制中,系统通常以固定周期进行更新。因此,履带式收获机作业路径跟踪问题可转换为 1 个离散时间非线性系统最优控制问题^[21]。在离散时间下,设系统采样时间为 Δt,预测时域长度为 H。为表达履带式收获机在平面上的运动学姿态,收获机状态向量为

$$\mathbf{x}_t = (p_{x,t}, p_{y,t}, \theta_t)^T \tag{1}$$

式中 $p_{x,t}$ ——地面坐标系下收获机质心横坐标
 $p_{y,t}$ ——地面坐标系下收获机质心纵坐标
 θ_t ——收获机航向角

履带式收获机通过差速驱动实现转向,左右履带速度差直接决定车辆转向角速度^[22]。因此,控制输入向量为

$$\mathbf{u}_t = (v_{L,t}, v_{R,t})^T \tag{2}$$

式中 $\mathbf{u}_t$ ——控制输入,即履带式收获机在该采样周期内应执行的速度指令

$v_{L,t}$ ——左履带 t 时刻线速度

$v_{R,t}$ ——右履带 t 时刻线速度

在离散形式下,系统动力学模型状态转移模型为

$$\mathbf{x}_{t+1} = f(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) + \mathbf{w}_t \tag{3}$$

式中 $f(\cdot)$ ——理想无滑移条件下非线性运动学函数

$\mathbf{w}_t$ ——过程噪声,表示由于土壤扰动、湿滑地表或传感器精度不足引入的不确定性

预测时域内,轨迹 $\tau = \{\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t+1}, \dots, \mathbf{x}_{t+H}\}$ 累计代价函数为

$$S(\tau) = \sum_{k=0}^{H-1} q(\mathbf{x}_{t+k}, \mathbf{u}_{t+k}) \tag{4}$$

式中 $q(\cdot)$ ——单步代价函数,反映系统状态偏离期望程度

MPPI 算法采用随机扰动对控制量进行采样,因此代价函数表现为一个随机变量,其优化目标是以概率加权的形式逼近全局最优解^[23-25]。该优化目标实质是寻找 1 条在未来时域内的最优路径,使得收获机在执行控制输入时能够最大限度地贴合参考轨迹,同时抑制因滑移造成的路径跟踪偏差。因此,在基于 MPPI 的路径跟踪控制中,优化目标是寻找 1 组最优控制输入 $\{\mathbf{u}_t, \mathbf{u}_{t+1}, \dots, \mathbf{u}_{t+H-1}\}$,使得预测时域内累积代价期望值最小化。

2.2 模型预测路径积分(MPPI)控制原理

MPPI 属于基于采样的随机最优控制方法,适用于像履带式收获机这样存在复杂非线性与环境扰动的系统。与传统基于梯度的非线性 MPC 不同,MPPI 不依赖模型解析梯度,而是通过采样大量随机扰动轨迹,并基于路径积分的形式更新控制律,从而避免复杂求解过程,并将最优控制问题转换为轨迹采样与概率加权问题^[24]。

首先,设定基线控制序列为 $\bar{\mathbf{u}}_{t:t+H-1}$,对每个控制量叠加随机扰动 $\varepsilon_k^{(i)} \sim \eta(0, \mathbf{\Gamma})$,得到第 i 条采样轨迹在 $t+k$ 时刻控制输入为

$$\mathbf{u}_{t+k}^{(i)} = \bar{\mathbf{u}}_{t+k} + \varepsilon_k^{(i)} \quad (i=1,2,\dots,N) \tag{5}$$

式中 $\bar{\mathbf{u}}_{t+k}$ ——经过上一采样周期优化获得的控制序列

N ——采样轨迹数

$\mathbf{\Gamma}$ ——控制扰动协方差矩阵

每条采样轨迹累积代价为

$$S^{(i)} = \sum_{k=0}^{H-1} q(\mathbf{x}_{t+k}^{(i)}, \mathbf{u}_{t+k}^{(i)}) \tag{6}$$

根据路径积分控制理论,每条轨迹代价通过指数加权映射为概率权重 $w^{(i)}$ 计算式为

$$w^{(i)} = \frac{\exp\left(-\frac{1}{\lambda} S^{(i)}\right)}{\sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{1}{\lambda} S^{(j)}\right)} \tag{7}$$

式中 λ ——温度,控制不同轨迹之间相对区分度

在得到每条轨迹概率权重后,基于权重的 MPPI 控制更新公式为

$$\mathbf{u}_t = \bar{\mathbf{u}}_t + \alpha \sum_{i=1}^N w^{(i)} \varepsilon_0^{(i)} \tag{8}$$

式中 α ——更新系数,取 0~1

$\varepsilon_0^{(i)}$ ——当前时刻第 i 条轨迹扰动

2.3 履带式收获机动力学模型

在田间作业工况下,收获机通常以低速(1~1.5 m/s)运行,此时惯性效应相对较弱,履带弹性变形及复杂的悬架运动对路径跟踪精度的影响有限^[26-27]。因此,为了保证 MPPI 模型计算实时性,设收获机绕瞬时旋转中心(ICR)做刚体运动,履带上各点速度矢量均垂直于其到 ICR 的连线方向。基于此,建立履带式收获机运动学理想模型(图 3),用于描述收获机在全局坐标系下位置与姿态演化。

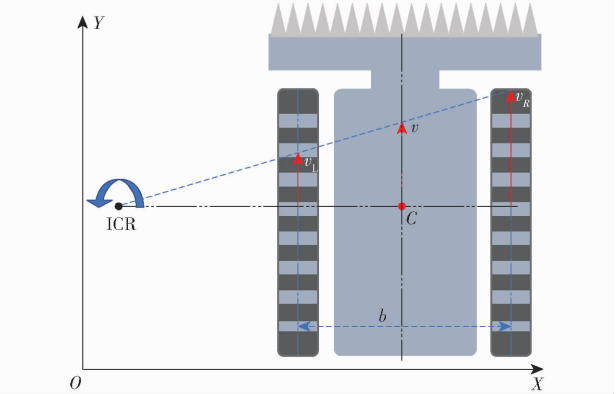


图 3 履带式收获机的运动学理想模型
Fig. 3 Idealized kinematic model of tracked combine harvester

由图 3 可知,收获机纵向速度由左右履带速度平均值决定,角速度由左右履带速度差与履带间距比值决定,计算模型为

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/b & -1/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中 v ——收获机沿车体纵向前进速度

ω ——绕收获机质心 C 角速度

b ——履带间距

在全局坐标系下收获机连续时间运动微分方程为

$$\begin{cases} \dot{p}_x = v \cos \theta \\ \dot{p}_y = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \tag{10}$$

在理想无滑条件下,在全局坐标系中收获机位姿更新公式为

$$\begin{cases} p_{x,k+1} = p_{x,k} + v_k^c \cos \theta_k \Delta t \\ p_{y,k+1} = p_{y,k} + v_k^c \sin \theta_k \Delta t \\ \theta_{k+1} = \theta_k + \omega_k^c \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

式中 $(p_{x,k}, p_{y,k})$ ——收获机质心位置

θ_k ——航向角

v_k^c ——履带速度命令得到的纵向速度

ω_k^c ——履带速度命令得到的角速度

Δt ——离散时间步长

2.4 滑移鲁棒 MPPI 代价函数建立

履带式收获机在田间作业时,由于土壤含水率、压实度和作物根茬等因素,常出现履带纵向打滑和横向漂移,这些滑移现象是路径跟踪误差的重要来源^[12]。为了解决由滑移现象导致的收获机路径跟踪精度鲁棒性不足问题,分别建立纵向滑移率与横向滑移率数学模型,并将其引入 MPPI 模型的运动学预测和代价函数设计中,降低收获机在田间作业时的路径跟踪误差。

2.4.1 纵向滑移率

纵向滑移主要由于履带在纵向发生空转/打滑,导致命令速度与实际作业速度不一致^[6]。为了定量描述这一现象,定义滑移率为

$$s_k^l = \frac{v_k^c - v_k^g}{\max(|v_k^c|, v_{\min})} \quad (12)$$

其中

$$v_k^c = \frac{v_{L,k} + v_{R,k}}{2}$$

式中 v_k^c ——第 k 时刻收获机由左右履带速度命令得到的纵向速度

v_k^g ——由 GNSS 获得的收获机质心速度

$v_{\min}$ ——避免分母为零而设定的常数

当滑移率为 0 时,表明车辆实际速度与命令速度一致,无纵向滑移;当滑移率较大时,则表明履带打滑显著,收获机实际作业速度低于期望作业速度。

2.4.2 横向位移近似模型

横向滑移是不均匀土壤阻力或转向侧向力造成的车辆横向漂移现象,表现为收获机沿垂直于车体前进方向的横向位移。与纵向滑移相比,横向滑移并非由履带驱动直接产生,而是由土壤非均匀支撑力、侧向摩擦不足以及车辆转向动力学等因素共同引起^[1,7]。为了在路径跟踪控制中考虑其影响,基于收获机动力学方法建立收获机横向位移近似模型。

在车辆动力学中,常用质心滑移角描述横向滑移^[13],车辆质心速度方向与车体纵向轴之间的夹角

β_k 为

$$\beta_k = \arctan \frac{v_{lat,k}}{v_{lon,k}} \quad (13)$$

式中 $v_{lat,k}$ ——收获机横向速度

$v_{lon,k}$ ——收获机纵向速度

当收获机完全无侧滑时 β_k 为 0;当土壤附着力不足或车辆转弯时, β_k 显著大于 0。纵向速度 $v_{lon,k}$ 和横向速度 $v_{lat,k}$ 由 GNSS 推算获得。

质心滑移角虽然具有清晰的物理意义,但其量纲为角度,不便于直接与纵向滑移率统一建模。因此将横向滑移转换为一个无量纲比值,记为横向滑移率 s_k^t ,即

$$s_k^t = \frac{v_{lat,k}}{|v_k^g|} \quad (14)$$

当 s_k^t 为 0 时,收获机不存在横向滑移;当 s_k^t 显著大于 0 时,收获机在作业时存在显著的横向位移。

由式(13)、(14)可知,横向滑移率与质心滑移角之间满足近似关系

$$s_k^t \approx \sin \beta_k \quad (|\beta_k| \ll 1) \quad (15)$$

在离散时间步长 Δt 下,横向滑移会表现为车辆质心横向附加位移 δy_k 。在典型田间收获工况下,收获机作业速度较低,且横向附加位移本质上为一阶近似,因此假设在采样周期 Δt 内,收获机质心在车体坐标系横向速度 $v_{lat,k}$ 保持不变。值得注意,当车辆高速行驶时,横向速度可能在短时间内发生较大变化,需采用更高阶的动力学模型刻画横向滑移,因此本文仅适用于农机装备低速作业应用范围。

横向滑移率与横向位移之间的关系为

$$\delta y_k = v_{lat,k} \Delta t = s_k^t v_k^g \Delta t \quad (16)$$

为后续状态传播修正提供依据。

2.4.3 基于滑移效应的 MPPI 代价函数

基于纵向滑移率与横向位移近似模型,将滑移效应引入 MPPI 控制的履带式收获机动力学模型与代价函数,以更准确地反映田间复杂环境下真实运动特性。具体而言,纵向滑移通过速度修正削弱车辆前进位移,横向滑移通过附加侧向位移修正体现偏移效应,使 MPPI 在采样预测过程中能够显式覆盖由滑移引起的动态偏差。消除滑移效应后,MPPI 状态传播公式为

$$\begin{cases} p_{x,k+1} = p_{x,k} + v_k^{sp} \cos \theta_k \Delta t \\ p_{y,k+1} = p_{y,k} + v_k^{sp} \sin \theta_k \Delta t + \delta y_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + \omega_k^c \Delta t \end{cases} \quad (17)$$

式中 v_k^{sp} ——由纵向滑移率修正后质心速度

在原始 MPPI 中,单步代价函数通常由横向误差、航向误差、速度偏差和控制增量组成,目标是最

小化轨迹跟踪误差并保证控制平滑性^[28]。然而,对于履带式收获机而言,仅考虑几何误差并不足以保证作业稳定性。由于土壤含水率和附着条件随作业区域而显著变化,车辆在达到相似轨迹误差情况下,可能存在不同程度滑移^[12]。如果控制器不对滑移进行约束,有可能选择 1 条几何误差较小但滑移严重的轨迹,从而导致实际作业时出现动力浪费、履带过度磨损甚至车辆偏离规划路径。为此,在代价函数中增加滑移惩罚项,以主动抑制滑移过大的轨迹。定义综合滑移指标为

$$\sigma_k = \sqrt{\alpha_l (s_k^l)^2 + \alpha_t (s_k^t)^2}$$

(18)

其中 $\alpha_l, \alpha_t = 1$

式中 α_l, α_t ——权重

修正后单步代价函数为

$$q(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = w_y e_{y,k}^2 + w_\theta e_{\theta,k}^2 + w_v (v_k - v_k^{\text{ref}})^2 + w_u \|\Delta \mathbf{u}_k\|^2 + w_s \sigma_k^2$$

(19)

式中 $e_{y,k}$ ——横向偏差 $e_{\theta,k}$ ——航向偏差

v_k ——实际速度

$\Delta \mathbf{u}_k$ ——控制增量

v_k^{ref} ——期望速度

$w_y, w_\theta, w_v, w_u, w_s$ ——代价函数权重

综上所述,纵向滑移率和横向位移近似模型分别以速度修正和位移修正的形式优化 MPPI 模型,并同时构成代价函数中的滑移惩罚项。双重优化机制使优化后的 MPPI 控制模型不仅在预测环节考虑滑移效应,而且在代价评估中主动抑制滑移过大的轨迹,保证了田间复杂工况下履带式收获机路径跟踪精度和稳定性。在实际控制中,该单步代价函数被用于评价每条采样轨迹在预测时域内的累积偏差,并作为轨迹概率加权的依据。控制器在每个采样周期通过比较候选轨迹代价,更新得到最优控制输入,并作用于左右履带速度,从而在闭环框架下不断修正车辆姿态,实现对参考路径持续跟踪。

3 验证试验

3.1 SLIP - MPPI 代价函数权重优化

为确定滑移鲁棒模型预测路径积分 (SLIP - MPPI) 代价函数中各权重,采用响应面方法 (Response surface methodology, RSM) 对代价函数参数进行优化。代价函数共包含 7 个待优化参数,其中 5 个为控制误差相关权重 (横向误差权重 w_y 、航向误差权重 w_θ 、速度偏差权重 w_v 、控制增量权重 w_u 和滑移惩罚权重 w_s),另外 2 个为综合滑移指标权重 (纵向滑移权重 α_l 和横向滑移权重 α_t)。在权重优化前,为消除代价函数各组成项之间的量纲差异,对不同指标进行归一化处理。以经验基线工况下各指标均值与峰值为基准,从而保证不同量纲的指标在代价函数中具有可比性。基于第 2.4 节推导的滑移鲁棒 MPPI 代价函数,采用 Python 语言编写路径跟踪仿真脚本,并在 Visual Studio Code (V1.104.0) 环境下运行。脚本调用履带式收获机简化动力学模型,在不同权重配置下重复执行路径跟踪任务,并实时统计横向误差、航向误差、速度偏差、控制增量及综合滑移指标。

为考察控制器在连续曲率条件下性能表现,设计半径为 5 m 的圆形参考路径作为标准工况 (图 4)。由图 4 可知,在该工况下,无滑移时收获机履带压痕在空间中形成一个稳定的理想轨迹带。考虑到田间作业滑移不可避免性,仿真中通过在动力学模型中引入不同水平纵向滑移率与横向位移扰动来模拟滑移效应,并结合 SLIP - MPPI 算法对控制器的动态响应进行过程化描述。典型轨迹演化如图 5 所示, t_1 阶段,车辆轨迹紧密贴合参考路径,控制器维持稳定跟踪; t_2 阶段,车辆发生滑移并瞬时偏离参考路径,控制器通过采样机制在多条候选轨迹中选择代价较小的修正路径; t_3 阶段,随着修正轨迹的实施,车辆逐步回到参考路径,横向误差和航向误差逐渐衰减;

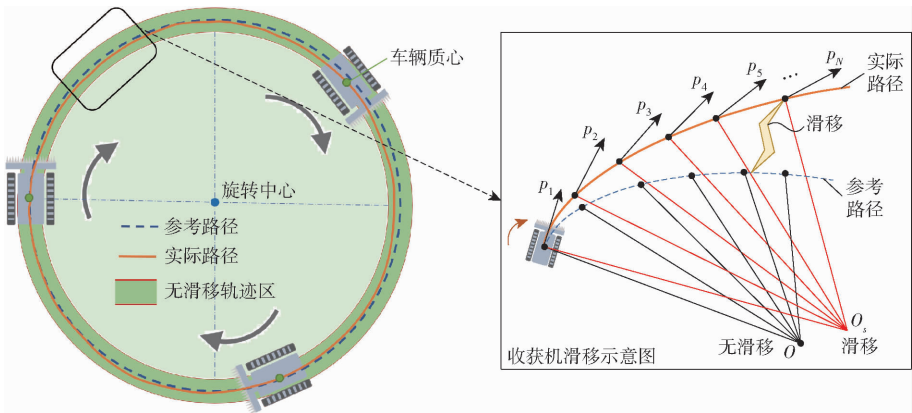


图 4 连续曲率条件下收获机滑移示意图

Fig.4 Schematic of slip behavior of tracked harvester under continuous curvature conditions

t_4 阶段, 滑移影响减弱, 车辆重新稳定在参考路径附近, 控制精度恢复至无滑移工况水平。

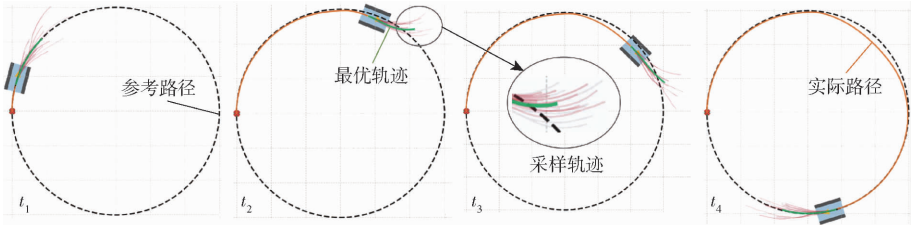


图 5 滑移条件下收获机典型轨迹演化

Fig. 5 Typical trajectory evolution of tracked harvester under slip conditions

在 SLIP - MPPI 代价函数权重归一化过程中, 采用峰值归一化方法获取基线控制下代价函数各分量归一化系数 (表 2), 即以基线控制条件下各代价分量峰值作为归一化系数, 使基线条件下的代价函数权重取值均为 1。在 Plackett - Burman 设计里, 设置 2 个水平 (高、低) 在基线值 $\pm 50\%$ 变动, 既体现参数变化的效应, 又避免搜索空间过大^[27,29]。在此基础上, 代价函数权重低水平设定为 0.5, 高水平设定为 2.0, 分别对应基线值的 50% 与 200%, 反映其对控制性能主效应^[30]。而滑移权重则在 $[0, 1]$ 区间内取值, 且 2 个滑移权重和为 1。因此, 低水平设定为 0.3, 高水平设定为 0.7。利用 Plackett - Burman 设计对 SLIP - MPPI 代价函数权重进行显著性筛选, 获得影响显著性结果: 横向误差权重、航向误差权重、滑移惩罚权重及纵向滑移权重对性能指标影响最为显著, 其余因子影响较小, 因此固定为中性水平。

表 2 基线控制下代价函数各分量的统计结果与归一化系数

Tab. 2 Statistical results and normalization coefficients of cost function components under baseline control			
代价函数分量	平均值	峰值	归一化系数
横向误差/m	0.23	0.52	0.52
航向误差/(°)	1.95	4.53	4.53
速度偏差/(m·s ⁻¹)	0.12	0.27	0.27
控制增量	0.09	0.19	0.19
综合滑移指标	0.41	0.72	0.72

由于各因素与横向误差、航向误差之间的关系复杂, 因此理清各参数之间的交互作用对参数优化尤为重要。因此, 基于显著性筛选结果, 以影响显著的因子为试验因素, 路径跟踪时横向误差 (R_1) 和航向误差 (R_2) 为响应指标, 应用 Design-Expert 10 设计 Box - Behnken 试验。通过对 2 个响应指标进行方差分析, 建立二次回归模型。试验因素编码如表 3 所示, 响应面试验设计及结果如表 4 所示, 表中 $X_1 \sim X_4$ 为因素编码值, 方差分析结果如表 5、6 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Coding for experimental factors				
编码	因素			
	w_y	w_θ	w_s	α_l
-1	0.50	0.50	0.50	0.3
0	1.25	1.25	1.25	0.5
1	2.00	2.00	2.00	0.7

表 4 Box - Behnken 试验方案与结果

Tab. 4 Box - Behnken test design and results						
试验 序号	因素				R_1/cm	$R_2/(^\circ)$
	X_1	X_2	X_3	X_4		
1	0	-1	0	1	5.35	2.19
2	0	0	0	0	3.85	1.42
3	0	0	-1	-1	4.37	2.15
4	1	0	0	-1	5.36	0.92
5	0	1	1	0	4.25	0.68
6	0	1	-1	0	3.26	2.59
7	0	0	0	0	4.31	1.66
8	0	-1	-1	0	5.77	3.28
9	-1	0	0	1	5.23	2.47
10	0	0	-1	1	3.57	3.04
11	-1	-1	0	0	6.96	2.95
12	0	0	1	-1	6.58	0.85
13	0	1	0	-1	4.82	2.15
14	0	0	0	0	4.07	1.50
15	-1	0	1	0	6.94	1.82
16	0	-1	0	-1	6.94	3.14
17	0	0	1	1	2.63	2.03
18	1	1	0	0	4.54	1.52
19	1	0	0	1	3.47	2.74
20	1	-1	0	0	5.39	0.93
21	1	0	-1	0	4.58	2.26
22	-1	1	0	0	2.67	3.19
23	0	1	0	1	3.18	1.83
24	0	-1	1	0	6.58	1.08
25	-1	0	-1	0	5.56	3.77
26	-1	0	0	-1	6.82	3.97
27	1	0	1	0	5.01	0.79

经过多元回归拟合分析, 建立横向误差和航向误差模型为

$$R_1 = 4.08 - 0.4858X_1 - 1.19X_2 - 0.955X_4 + 0.86X_1X_2 - 0.7875X_3X_4 + 0.7850X_1^2 \quad (20)$$

$$R_2 = 1.53 - 0.7508X_1 - 0.82X_3 + 0.83X_1X_4 + 0.4271X_1^2 + 0.4908X_4^2 \quad (21)$$

由表 5、6 可知, 二次回归模型显著性检验 P 均小于 0.01, 失拟项均大于 0.05, 即回归模型极显著, 失拟项不显著, 说明模型拟合二次回归方程可以较

表 5 横向误差回归模型方差分析结果
Tab.5 Analysis of variance for lateral error

regression model					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	41.93	14	2.99	7.80	0.000 5 **
X_1	2.83	1	2.83	7.38	0.018 7 *
X_2	16.97	1	16.97	44.21	<0.000 1 **
X_3	1.98	1	1.98	5.17	0.042 1 *
X_4	10.94	1	10.94	28.51	0.000 2 **
X_1X_2	2.96	1	2.96	7.71	0.016 8 *
X_1X_3	0.225 6	1	0.225 6	0.587 8	0.458 1
X_1X_4	0.022 5	1	0.022 5	0.058 6	0.812 8
X_2X_3	0.008 1	1	0.008 1	0.021 1	0.886 9
X_2X_4	0.000 6	1	0.000 6	0.001 6	0.968 5
X_3X_4	2.48	1	2.48	6.46	0.025 8 *
X_1^2	3.29	1	3.29	8.56	0.012 7 *
X_2^2	0.997 6	1	0.997 6	2.60	0.132 9
X_3^2	0.676 9	1	0.676 9	1.76	0.208 9
X_4^2	0.357 1	1	0.357 1	0.930 3	0.353 8
残差	4.61	12	0.383 8		
失拟	4.50	10	0.45	8.5	0.109 8
纯误差	0.105 9	2	0.052 9		

注：**表示影响极显著($P<0.01$),*表示影响显著($0.01\leq P<0.05$),下同。

准确反映各因素与响应指标之间的关系^[31]。但各因素对不同响应指标的贡献和交互关系不同。对横向误差的影响, X_2 和 X_4 极显著, X_1 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_3X_4 和 X_1^2 显著,影响显著性由大到小为: X_2 、 X_4 、 X_1^2 、 X_1X_2 、 X_1 、 X_3X_4 、 X_3 。其中, X_1 和 X_2 、 X_3 和 X_4 之间存在交互作用,如图 6a 和 6b 所示。对航向误差的影响, X_1 、 X_3 和 X_1X_4 极显著, X_1^2 和 X_4^2 显著,影响显著性由大到小为: X_3 、 X_1 、 X_1X_4 、 X_4^2 、 X_1^2 。其中 X_1 和 X_4 之间存在交互作用,如图 6c 所示。

由图 6a、6b 可知,在滑移惩罚权重和纵向滑移权重为 0 水平时,横向误差随着航向误差权重和横向误差权重增大呈持续降低趋势,但趋势较为平缓;

表 6 航向误差回归模型方差分析结果
Tab.6 Analysis of variance for heading error

regression model					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	20.13	14	1.44	6.06	0.001 7 **
X_1	6.77	1	6.77	28.49	0.000 2 **
X_2	0.216 0	1	0.216 0	0.909 6	0.359 0
X_3	8.07	1	8.07	33.98	<0.000 1 **
X_4	0.104 5	1	0.104 5	0.440 2	0.519 6
X_1X_2	0.030 6	1	0.030 6	0.129 0	0.725 8
X_1X_3	0.057 6	1	0.057 6	0.242 6	0.631 3
X_1X_4	2.76	1	2.76	11.60	0.005 2 **
X_2X_3	0.021 0	1	0.021 0	0.008 5	0.771 1
X_2X_4	0.099 2	1	0.099 2	0.417 8	0.530 2
X_3X_4	0.021 0	1	0.021 0	0.088 5	0.771 1
X_1^2	1.19	1	1.19	5.01	0.045 0 *
X_2^2	0.325 6	1	0.325 6	1.37	0.264 3
X_3^2	0.051 6	1	0.051 6	0.217 2	0.649 6
X_4^2	1.28	1	1.28	5.41	0.038 3 *
残差	2.85	12	0.237 5		
失拟	2.82	10	0.282 0	18.88	0.151 3
纯误差	0.029 9	2	0.014 9		

在横向误差权重和航向误差权重为 0 水平时,横向误差随着滑移惩罚权重的增大呈先降低后增大趋势,趋势较缓,随纵向滑移权重的增大呈持续降低趋势,且趋势明显。表明 SLIP-MPPI 作为路径跟踪控制时,横向误差受纵向滑移影响更为明显。由图 6c 可知,在航向误差权重和滑移惩罚权重为 0 水平时,航向误差随着横向误差权重增大呈迅速降低趋势,随纵向滑移权重增大呈缓坡增大趋势。该现象表明航线误差受横向误差的影响较大,虽然也受纵向滑移的影响,但表现不够强烈。横向误差是保证路径跟踪精度的直观表现,在优化模型时应以横线误差最小为标准。航向误差是模型修正路径跟踪精度的重要调整参数,理论上使航向误差最大或者最小都不是调整路径跟踪精度的最优方案,但过大的航向

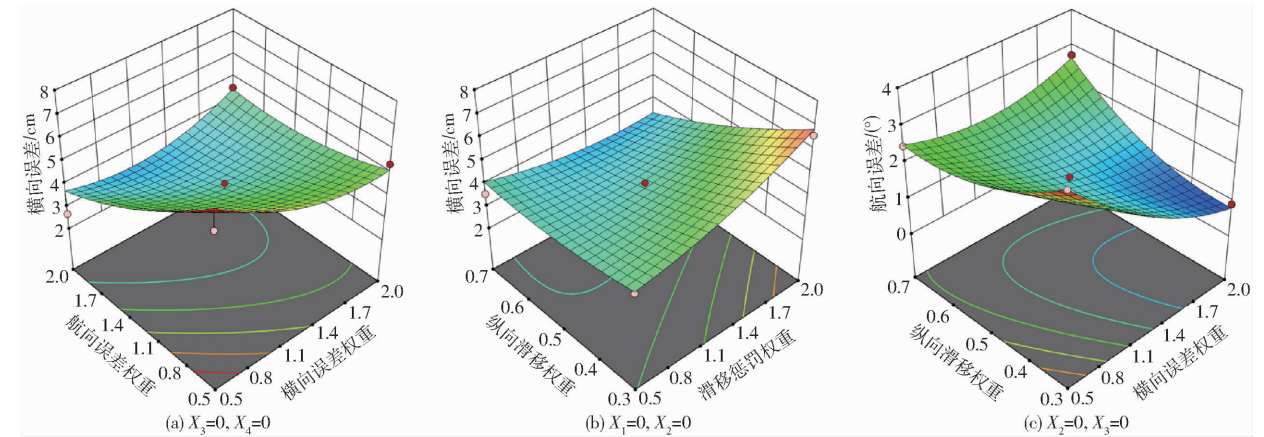


图 6 响应面分析结果
Fig.6 Results of response surface analysis

误差会导致收获机大幅度换向或小幅度频繁换向，严重影响收获机机器稳定性及收获作业效果，因此基于提升收获作业稳定性的理念，在优化模型时航向误差也以最小化为目标。综上，建立目标函数为

$$\begin{cases} \min R_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \min R_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \\ -1 \leq X_4 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

通过多目标优化获得最优参数组合为：横向误差权重 1.31、航向误差权重 1.736、滑移惩罚权重 2、纵向滑移权重 0.636。为验证优化效果，将该参数组合代入 SLIP - MPPI 控制器，优化后横向误差为 3.2 cm，航向误差为 1.3°，说明本文所提出的基于响应面优化的 SLIP - MPPI 参数整定方法具有可行性与有效性。

3.2 田间试验

为进一步验证所提出滑移鲁棒 MPPI (SLIP - MPPI) 控制方法的有效性，2025 年 5 月在江苏省镇江市界东社区试验农田 (119.875°E, 32.076°N)，基于履带式收获机自动导航平台开展了田间路径跟踪试验。试验田土壤含水率为 48.11%，坚实度为 539.54 kPa。鉴于履带式收获机在田间曲线转向过程更易受到土壤非均质性与履带-地表相互作用的影响而产生显著滑移，选取正弦曲线路径作为验证场景。试验路径布置于田间空地，能够体现复杂转向工况下滑移效应，并比较 SLIP - MPPI 算法与传统 MPPI 算法路径跟踪精度差异。

试验时，履带式收获机初始位置设定在目标路径起点附近，目标速度为 1.0 m/s，初始横向偏差设为 0.2 m，航向偏差为 0°，正弦曲线路径跟踪试验结果如图 7 所示，统计结果如表 7 所示。

由图 7 可知，2 种算法均可在短时间内实现误差收敛，但 SLIP - MPPI 算法在复杂转向工况下的恢复速度明显更快，稳态误差波动幅度也更小。具体而言，传统 MPPI 算法在进入曲线段时，横向误差迅速增大并出现较强波动，该现象主要由于其代价函数未显式考虑滑移效应，导致控制器在预测阶段无法补偿因土壤-履带相互作用引起的滑移。相应地，其航向误差在转向初期出现较大峰值，表明履带式收获机姿态受到滑移扰动的强烈影响。相比之下，SLIP - MPPI 算法在代价函数中引入纵向滑移率与横向位移修正项，使得控制器在采样过程中能够识别并抑制由滑移造成的动态偏差。因此，在曲线段

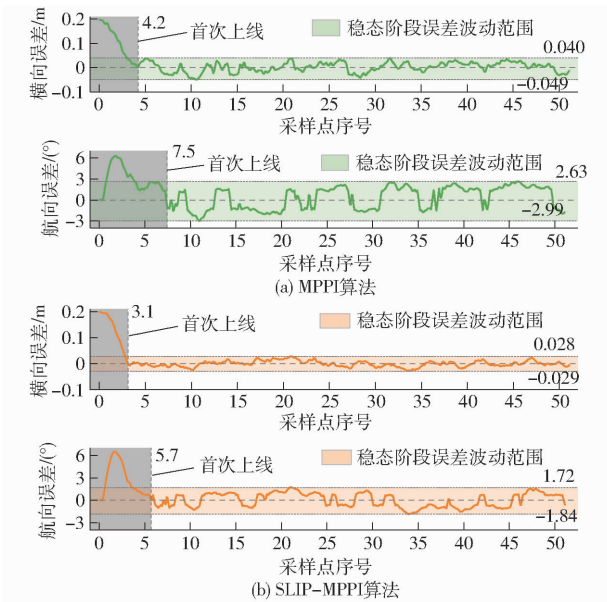


图 7 正弦曲线路径跟踪试验结果
Fig. 7 Results of sinusoidal path tracking experiment

表 7 正弦曲线路径跟踪试验稳态阶段结果对比
Tab.7 Sinusoidal curve path tracking test steady-state result comparison

算法	最大横向	横向误差	最大航向	航向误差
	误差绝对	绝对值标	误差绝对	绝对值标
	值/m	准差/m	值/(°)	准差/(°)
MPPI	0.049	0.017	2.99	1.26
SLIP - MPPI	0.029	0.010	1.84	0.91

进入阶段，SLIP - MPPI 算法不仅横向误差峰值显著减小，而且恢复速度更快，稳态波动范围明显收窄；在航向控制方面，其误差曲线平滑，峰值显著降低并快速回落至稳态水平，使收获机姿态更接近参考轨迹的期望航向。

稳态阶段误差指标如表 7 所示，在横向控制精度方面，SLIP - MPPI 算法最大横向误差为 0.029 m，相比 MPPI 0.049 m 降低 40.8%；横向误差标准差由 0.017 m 降至 0.010 m，表明 SLIP - MPPI 算法在横向控制上稳定性更佳。在航向控制精度方面，SLIP - MPPI 算法最大航向误差为 1.84°，较 MPPI 算法的 2.99°降低 38.5%；航向误差标准差也由 1.26°减至 0.91°。与图 7 的对比分析相一致，表明 SLIP - MPPI 通过在代价函数中引入滑移指标，有效增强了控制器对滑移扰动的鲁棒性，在复杂转向条件下能够显著提高履带式收获机路径跟踪精度与稳定性。

为验证所提方法在实际收获作业条件下的适用性，采用 SLIP - MPPI 算法开展直线路径收获试验，作业效果如图 8 所示。结果表明，SLIP - MPPI 算法在直线作业过程中能够保持稳定的运行状态，作业带边界整齐，无明显偏移或蛇形轨迹，说明所提控制



图 8 田间试验现场

Fig. 8 On-site field experiment

方法不仅在曲线工况下具有显著的滑移抑制效果,同时在大范围直线收获作业中同样具备良好的作业

效果。

4 结束语

针对履带式收获机田间作业中普遍存在的滑移扰动问题,提出了一种考虑纵向与横向滑移效应的 SLIP - MPPI 路径跟踪方法。与传统 MPPI 相比,该方法不仅在运动学预测中引入滑移修正机制,而且在代价函数层面增加滑移惩罚项,从而在控制优化中实现了对滑移的主动抑制。试验结果表明,SLIP - MPPI 算法能够在曲线转向等复杂工况下显著减小横向与航向误差,并在直线收获作业中保持轨迹稳定与作业带平整。通过滑移约束,可以有效弥补传统路径跟踪控制依赖理想无滑假设的不足,保证在滑移干扰下依然维持精确的路径跟踪。

参 考 文 献

- [1] AN Guangshun, ZHONG Zhidong, YANG Shuang, et al. EASS: an automatic steering system for agricultural wheeled vehicles using fuzzy control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,217:108544.
- [2] 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.
- [3] 尚业华, 王昊, 孟志军, 等. 基于激光雷达的稻麦收获边界检测与自动对齐系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5):19 - 28.
SHANG Yehua, WANG Hao, MENG Zhijun, et al. Rice and wheat harvesting boundary detection and automatic alignment system based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(5):19 - 28. (in Chinese)
- [4] 何杰, 曾鸿禧, 李明锦, 等. 基于驱动轮横向侧偏补偿的自动导航拖拉机改进纯追踪路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2025,56(2):28 - 37.
HE Jie, CENG Hongxi, LI Mingjin, et al. Improved pure pursuit path tracking control method for automatic navigation tractor based on drive wheel lateral deviation compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):28 - 37. (in Chinese)
- [5] 戴祯, 郭延超, 王笑乐, 等. 酿酒葡萄收获机自动对行驾驶局部路径动态规划算法[J]. 农业机械学报, 2025,56(2):124 - 135.
DAI Zhen, GUO Yanchao, WANG Xiaole, et al. Local path dynamic programming algorithm for automatic row alignment traveling of wine grape harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):124 - 135. (in Chinese)
- [6] ZHAO Xin, LU En, TANG Zhong, et al. Trajectory prediction method for agricultural tracked robots based on slip parameter estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,222:109057.
- [7] 胡炼, 张鸿, 何杰, 等. 再生稻头季低碾收获作业路径规划技术研究[J]. 农业机械学报, 2025,56(2):19 - 27.
HU Lian, ZHANG Hong, HE Jie, et al. Path planning technical research of low-rolling compaction harvesting operation for the first season of ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):19 - 27. (in Chinese)
- [8] 刘智勇, 温昌凯, 肖跃进, 等. 拖拉机-牵引式农机具路径跟踪控制算法研究[J]. 智慧农业(中英文), 2023,5(4):58 - 67.
LIU Zhiyong, WEN Changkai, XIAO Yuejin, et al. Path tracking control algorithm of tractor-implement[J]. Smart Agriculture, 2023,5(4):58 - 67. (in Chinese)
- [9] SONG Yue, XUE Jinlin, ZHANG Tianyu, et al. Path tracking control of crawler tractor based on adaptive adjustment of lookahead distance using sparrow search algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,234:110219.
- [10] HE Yongqiang, ZHOU Jun, SUN Jingwei, et al. An adaptive control system for path tracking of crawler combine harvester based on paddy ground conditions identification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,210:107948.
- [11] 何永强, 周俊, 袁立存, 等. 基于履带式联合收获机转向特性的局部跟踪路径规划[J]. 农业机械学报, 2022,53(11):13 - 21.
HE Yongqiang, ZHOU Jun, YUAN Licun, et al. Local tracking path planning based on steering characteristics of crawler-type combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):13 - 21. (in Chinese)
- [12] HE Yongqiang, ZHOU Jun, SUN Jingwei, et al. Traveling control method adapted to different paddy ground conditions with

feedforward compensation for crawler combine harvester based on online tracking error prediction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,220:108853.

[13] ZHANG Shaocen, WEI Xinhua, LIU Chengliang, et al. Adaptive path tracking and control system for unmanned crawler harvesters in paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,230:109878.

[14] 何杰, 刘善琪, 满忠贤, 等. 基于全状态反馈控制的农机自动驾驶曲线路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2):145 – 154.

HE Jie, LIU Shanqi, MAN Zhongxian, et al. Curve path tracking control of agricultural machinery automatic driving based on full state feedback control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):145 – 154. (in Chinese)

[15] HU Yibin, XIAN Jieyu, XIAO Maohua, et al. Design and experiment of a greenhouse autonomous following robot based on LQR-pure pursuit[J]. Agriculture-Basel, 2025,15(15):31.

[16] DING Ying, WANG Liang, LI Yongwei, et al. Model predictive control and its application in agriculture: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,151:104 – 117.

[17] 白国星, 刘丽, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J]. 农业机械学报, 2020,51(9):47 – 52,60.

BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):47 – 52,60. (in Chinese)

[18] 刘环宇, 唐嘉城, 邹顺, 等. 基于多目标优化的策略型自适应农机路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3):198 – 207.

LIU Huanyu, TANG Jiacheng, ZOU Shun, et al. Adaptive path tracking predictive control method for agricultural machinery based on strategy-based multi-objective optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3):198 – 207. (in Chinese)

[19] 齐泽中, 周俊, 叶子渭, 等. 单侧制动式转向履带底盘自主行走局部路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2024,55(6): 52 – 59.

QI Zezhong, ZHOU Jun, YE Ziwei, et al. Local path planning method in automatic walking of single-side brake steering track chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(6):52 – 59. (in Chinese)

[20] 赵润茂, 丁帅奇, 何杰, 等. 履带式除草机路径跟踪误差补偿改进型 MPC 控制方法[J]. 农业机械学报, 2025,56(9): 326 – 334,354.

ZHAO Runmao, DING Shuaiqi, HE Jie, et al. Error compensation improved MPC track-laying weeding machine path tracking control method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(9):326 – 334,354. (in Chinese)

[21] CHENG Jin, ZHANG Bingli, ZHANG Chengbiao, et al. A model-free adaptive predictive path-tracking controller with PID terms for tractors[J]. Biosystems Engineering, 2024,242:38 – 49.

[22] CHENG Gong, JIN Chengqian, CHEN Man, et al. Wheat full-width harvesting navigation line extraction method using improved swin-transformer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,239:10.

[23] KIM T, JEON J, LIM M T, et al. Simultaneous tracking and balancing control of two-wheeled inverted pendulum with roll-joint using dynamic variance MPPI[C]//2024 IEEE – RAS 23rd International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2024:417 – 424.

[24] GANDHI M S, VLAHOV B, GIBSON J, et al. Robust model predictive path integral control: analysis and performance guarantees[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021,6(2):1423 – 1430.

[25] VLAHOV B, GIBSON J, FAN D D, et al. Low frequency sampling in model predictive path integral control[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024,9(5):4543 – 4550.

[26] SUN Jingwei, ZHOU Jun, YUAN Licun, et al. Operation speed prediction and control of unmanned rice harvesters based on multi-source information and data amplification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,237:13.

[27] 王家博, 魏文波, 王广阔, 等. 履带式电动微耕机自动驾驶系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024,40(23):63 – 72.

WANG Jiabo, WEI Wenbo, WANG Guangkuo, et al. Design and experiment of the automatic navigation system for tracked electric micro tillers[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(23):63 – 72. (in Chinese)

[28] ANDREJEV E M, MANOHARAN A, UNT K E, et al. π -MPPI: a projection-based model predictive path integral scheme for smooth optimal control of fixed-wing aerial vehicles[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025,10(6):6496 – 6503.

[29] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油菜籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021,37(12):36 – 44.

HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(12):36 – 44. (in Chinese)

[30] WEI Wenbo, LI Jianchang, HAO Jianjun, et al. Multiparameter collaborative optimization of the vibrating screen based on the behavior of oil sunflower seed penetrating screen holes[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024,17(1):49 – 58.

[31] LONG Sifang, KANG Shuo, XU Shaomin, et al. Parameter optimization of vibration and crushing combination digging device based on soil-tuber breakage model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,230:14.