doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.022

基于改进 PSO－PID 的玉米收获机自动对行系统设计与试验

黄　毅[1]　任子誉[1]　周志红[2]　周　涛[1]　郭　岗[3]　黄国勇[3]

（1. 长沙理工大学机械与运载工程学院，长沙 410114；2. 湖南工业职业技术学院机械工程学院，长沙 410208；
3. 中联农业机械股份有限公司，长沙 410013）

摘要：玉米收获机作业时存在错行、漏割现象，且对非直线生长模式的玉米植株收获质量差，因此设计了一套玉米收获机自动对行系统。该系统主要由机械式对行装置、转向轮偏转角检测装置、转向控制系统 3 部分构成。其中，机械式对行装置与转向轮偏转角检测装置可基于二轮车模型的纯追踪模型，实时检测横向偏差与横向误差。转向控制系统采用基于改进 PSO－PID 的控制方法调整收获机的行驶路线，进一步消除横向偏差。最后，通过 Matlab 仿真软件分析及模拟场景下试验对系统进行验证。仿真结果显示，相比于传统 PSO－PID 控制，改进的 PSO－PID 控制将方波超调量降低了 94.3%，正弦波最大误差降低了 95.5%，正弦波跟踪延迟仅为 0.01 s。模拟场景试验结果显示，作业偏差在 ±20 cm 范围内的比例高于 80%。在速度不超过 4 km/h 时，直线路径轨迹偏差能够控制在 ±20 cm 以内，曲线路径中偏差 ±20 cm 以内的比例高于 93%。试验结果表明本系统满足实际作业要求，可对农业收获自动化提供技术支持。

关键词：玉米收获机；自动对行系统；改进 PSO 算法；PID 控制

中图分类号：S225.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)11-0234-09　　**OSID**：

Design and Experiment of Automatic Rowing System for Corn Harvester Based on Improved PSO－PID

HUANG Yi[1]　REN Ziyu[1]　ZHOU Zhihong[2]　ZHOU Tao[1]　GUO Gang[3]　HUANG Guoyong[3]

（1. *College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410114, *China*
2. *School of Mechanical Engineering, Hunan Industry Polytechnic, Changsha* 410208, *China*
3. *Zhonglian Agricultural Machinery Co., Ltd., Changsha* 410013, *China*）

Abstract: Corn harvesters operate with wrong rows and missed cuts, and the poor harvesting quality of corn plants with non-linear growth patterns, thus an automatic alignment system for corn harvesters was designed to meet the needs of practical use. The system mainly consisted of three parts: mechanical row alignment device, steering wheel deflection angle detection device, and steering control system. Among them, the mechanical row alignment device and the steering wheel deflection angle detection device can be based on a pure tracking model of the two-wheeled vehicle model in order to detect the lateral deviation and the current lateral error in real time. In addition, the steering control system used a control method based on improved PSO－PID to adjust the harvester's travelling route to further eliminate the lateral deviation. Finally, the system was verified by Matlab simulation software analysis and experimented in simulated scenarios. The simulation results showed that compared with the traditional PSO－PID control, the improved PSO－PID control reduced the square wave overshoot by 94.3%, the sinusoidal maximum error by 95.5%, and the sinusoidal tracking delay was only 0.01 s. The results of the experiments in the simulation scenarios showed that the percentage of the operating deviation within the range of ±20 cm was higher than 80%. When the vehicle speed did not exceed 4 km/h, the deviation of straight line path trajectory can be controlled within ±20 cm, and the proportion of deviation

收稿日期：2024－07－25　修回日期：2024－10－10

基金项目：国家自然科学基金项目(51875048)和湖南省自然科学基金项目(2022JJ40550)

作者简介：黄毅(1978—)，男，教授，博士，主要从事工程机械动力学及控制研究，E-mail：tjhuangyi110@163.com

通信作者：周志红(1978—)，男，高级工程师，主要从事工程机械结构设计及液压传动控制研究，E-mail：632430930@qq.com

within ±20 cm in curve path was higher than 93%. The experimental results showed that the system met the requirements of actual operation and provided technical support for the automation of agricultural harvesting.

Key words: corn harvester; automatic alignment system; improve PSO algorithm; PID control

0　引言

在玉米收获机的作业过程中，传统的人工操作方式难以精确控制收获机的行进轨迹，容易导致错行、漏割现象，且对非直线生长模式的玉米植株收获质量差，这不仅影响了收获效率，也增加了驾驶员的劳动强度，使得他们需要频繁调整方向盘以适应不同行距和植株分布，从而影响作业的连续性和稳定性。为了提升作业效率和质量，减轻驾驶员的劳动负担，确保收获机始终沿着最佳路径行进，开发玉米收获机的自动对行系统显得尤为迫切。

环境感知与路径跟踪控制是实现自动对行的两大核心技术。环境感知旨在确定收获机与作物之间的相对位置，目前，国内外主要方法包括：运用机器视觉提取作物行线与路径，计算两者之间的距离[1-5]；通过全球定位系统（Global positioning system，GPS）技术获取作物的布局并定位收获机在地块的位置[6-7]；使用激光雷达技术检测作物的边界行从而得到其与边界行之间的相对位置关系[8-10]。但是，机器视觉技术对工作环境要求严格，对农业机械作业时产生的振动、灰尘等缺乏适应性；GPS 导航技术需要在作业前对导航的目标路径进行规划；激光雷达在强光或高温环境下测量的稳定性会降低。

路径跟踪控制则负责引导收获机按预定路径行驶，国内外学者将 PID 控制运用在叶菜[11]、薯类[12]、玉米[13]等作物的路径跟踪控制上，有效降低了漏割率；同时运用模糊控制确定纯追踪模型中的前视距离，提高了路径跟踪的精度[14]；运用神经网络控制使得控制器具备自我学习能力，有效提高了环境适应能力[15-16]。但这些方法运用在农业机械导航上都存在一定的局限性，如 PID 控制的参数难以确定，模糊控制的规则库不完善或规则设计不完善会导致控制效果不理想，神经网络算法受训练数据的质量和数量影响大等，而且对于种植生长趋势呈非直线的情况，未有良好的控制效果。

本文设计一套玉米收获机自动对行系统，通过结合机械式对行装置与转向轮偏转角检测装置，可基于收获机二轮车模型的纯追踪模型检测收获机与作物之间的横向偏差，实时监测转向轮的转向角度得到对应的偏移距离，从而确定当前的横向误差。同时通过在适应度函数中增加超调量与调节时间的权重改进粒子群（Particle swarm optimization，PSO）算法，将改进 PSO 算法应用于 PID 控制，实时快速地找到最优的 PID 参数，有效抑制系统超调，减小稳态误差，提升动态跟踪性能。基于此，转向控制系统采用基于改进 PSO－PID 的控制方法调整收获机的行驶路线，进一步消除横向偏差，改进 PSO 算法的全局搜索能力使其在植株呈非直线生长模式下仍能使收获机准确自动对行。

1　整机结构与控制原理

玉米收获机自动对行系统的主要作用是检测收获机割台与作物行之间的横向偏差，并控制玉米收获机自动向消除这一偏差的方向行驶。主要由 HMI 显示屏、机械式对行装置、转向轮偏转角检测装置、转向控制系统组成，其中转向控制系统包括电动方向盘、转向机构和 PLC 控制器。系统组成如图 1 所示。

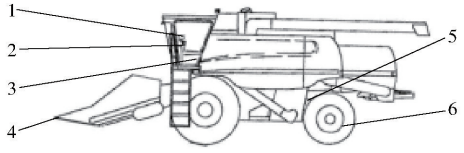


图 1　自动对行系统结构示意图

Fig. 1　Schematic of composition of automatic parallel system

1. HMI 显示屏　2. 电动方向盘　3. PLC 控制器　4. 机械式对行装置　5. 转向轮偏转角检测装置　6. 转向机构

在自动对行系统中，操作者通过驾驶室内的 HMI 显示屏激活自动对行模式，并实时显示电动方向盘的状态参数。在收获作业过程中，机械式对行装置通过与作物触碰，将作物的偏移信号转化为机械式对行装置传感器的输出信号。该信号由 PLC 控制器接收并处理，以计算出收获机相对于作物行的横向偏差。基于此，PLC 控制器调节电动方向盘电机的转速与转向，驱动转向机构进行相应调整，以实现对行动作。同时，安装于转向轮的转向轮偏转角检测装置实时检测并反馈转向轮的实际偏角至 PLC 控制器，并计算出实际的偏移距离，将其与作物行的预期位置进行对比，从而确定当前横向误差大小。通过这种实时反馈和调整机制，形成一个对行闭环控制系统，确保收获机精准对行。自动对行系统控制原理图如图 2 所示。

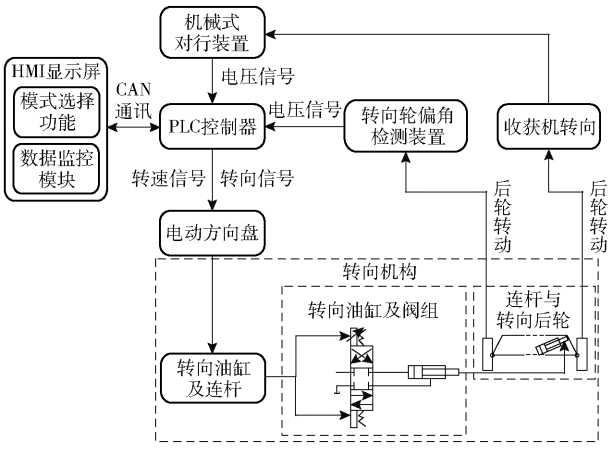


图 2 自动对行系统控制原理图

Fig. 2 Control principle diagram of automatic alignment system

2 关键部件设计

2.1 机械式对行装置

机械式对行装置具有结构原理简单、成本低、适应性强、维护简单等特点。本文设计的机械式对行装置通过角度传感器输出的电压信号转化为角度值,进而准确计算出作物横向偏差。机械式对行装置结构如图 3 所示,主要由角度传感器、衬套、固定板、旋转轴、复位弹簧、防护罩、探测杆套筒和探测杆组成。通过固定板安装在同一割道的两侧分禾器上,探测杆通过探测杆套筒与旋转轴固连,旋转轴通过螺钉与角度传感器固连,复位弹簧通过探测杆套筒与固定板上的通孔固定,在探测杆发生偏移后产生复位力,衬套、防护罩与固定板通过螺栓连接。

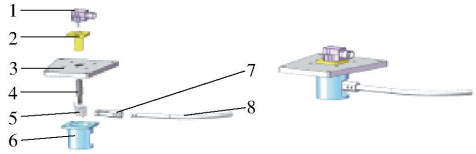


图 3 机械式对行装置结构图

Fig. 3 Structural diagram of mechanical alignment device

1. 角度传感器 2. 衬套 3. 固定板 4. 旋转轴 5. 复位弹簧 6. 防护罩 7. 探测杆套筒 8. 探测杆

角度传感器是机械式对行装置的核心部件,负责精确监测作物的横向误差,本文选用瑞士 Conrelec 公司的 VERT - X2631s_SS3 型角度传感器,该传感器具备 IP68 的电气防护等级,提供 0.5 ~ 4.5 V 的稳定输出电压,能够准确反映 -45° ~45°范围内的角度变化。

机械式对行装置原理如图 4a 所示,收获机作业时,若作物秆位于两探测杆之间且未发生接触,角度传感器不产生偏转信号,表明作物秆未偏离预设基准行,无需进行调整。若作物秆与任一探测杆产生碰触,导致探测杆旋转,带动角度传感器产生偏转信号。在作物秆即将脱离探测杆的瞬间,角度传感器输出的角度信号达到最大,记此时的最大偏差角度为 θ。

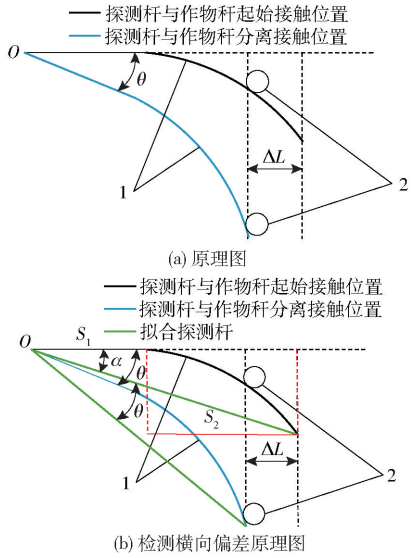


图 4 机械式对行装置原理简化图

Fig. 4 Simplified diagram of mechanical alignment mechanism principle

1. 探测杆 2. 作物杆

本文设计的探测杆结合了直杆与曲杆的特点,为了简化计算,将其近似为一根直杆。利用图 4b 所示的原理图,计算出横向偏差

$$\Delta L = (S_1 + S_2)\left(1 - \frac{\cos(\alpha + \theta)}{\cos\alpha}\right) \tag{1}$$

式中 S_1——探测杆直杆部分长度,m

S_2——探测杆曲杆部分横向长度,m

α——探测杆与拟合探测杆夹角,(°)

该计算基于探测杆与作物杆的相互作用,以及角度传感器输出信号的变化,从而准确计算作物杆相对于基准行的横向偏差。

割台相邻前尖的距离为 0.56 m,允许的最大偏移距离为 0.1 m,所以设计探测杆的整体长度为 $S_1 + S_2 = 0.23$ m。根据实际设计,可以测得探测杆与拟合探测杆夹角 $\alpha = 18°$,因此式(1)可简化为

$$\Delta L = 0.23\left(1 - \frac{\cos(18° + \theta)}{\cos 18°}\right) \tag{2}$$

2.2 电动方向盘转向机构

电动方向盘转向控制方法简单,安装简便,具备手自动切换功能,适用性强[17-18],本文采用上海华测导航技术公司电动方向盘来实现收获机转向轮控制,其采用 CAN 通讯接口实时接收控制指令,反馈电机位置和转速等参数。电动方向盘的主要参数如表 1 所示。电动方向盘安装实物图如图 5 所示。电动方向盘的安装结构分为固定部分和转动部分,固定部分包括通用型固定架与 T1 型固定架,通用型固

定架用于稳固地安装方向盘电机，T1 型固定架与收获机的转向轴固定筒相连，确保整个系统的稳定性。转动部分为方向盘本身，通过原车自带的花键套与收获机的转向柱连接，从而实现方向盘的顺畅转动和转向控制。

表 1　电动方向盘主要参数

Tab. 1　Main parameters of electric steering wheel

参数	数值/类型
电机额定电压/V	12
电机额定电流/A	15
电机峰值扭矩/(N·m)	>18
电机空转最大转速/($r \cdot min^{-1}$)	200
控制方式	转速控制
通讯方式	CAN 总线



图 5　电动方向盘安装实物图

Fig. 5　Physical installation of electric steering wheel

1. 方向盘　2. T1 型固定架　3. 通用型固定架

2.3　转向轮偏转角检测装置

转向轮的偏转和回正操作是闭环控制系统中的关键环节[19]。为了能够准确实现自动对行动作，并在每次割台对行动作完成后，使收获机的转向轮与车身保持相同的方向，确保收获机沿直线行驶，需要精确地实时监测转向轮偏转角度。直接测量转向轮偏转角增加了机械设计的复杂性且更容易受到机械振动和作业环境的影响，因此，本文运用间接测量方式设计了一套转向轮偏转角检测装置，确保在完成对行操作后，车身能够顺利回正。

转向轮偏转角检测装置安装实物图如图 6 所示，该检测装置由角度传感器、传感器固定架、连杆机构以及连杆机构固定装置组成。该装置将连杆机构的一端与转向轮的转向轴刚性连接，另一端与角度传感器的旋转轴耦合。角度传感器通过固定架安装于后桥上，确保转向轮与角度传感器轴的同步转动，从而能够实时监测后轮的转向角度。选用瑞士 Conrelec 公司的 VERT－X2631s_SS3 型角度传感器。

3　自动对行控制系统设计

3.1　两轮车模型与纯追踪模型

鉴于收获机的行进速度较慢，电动方向盘在进行转向控制时与转向轮之间有固定的传动比，精确值为 1∶34.43。在此精确传动比的基础上，可合理假设两个转向轮的转动角度一致，基于这一假设，将收获机的转向系统简化为两轮转向模型。如图 7 所示，该模型中收获机后轮转角用 δ 表示，收获机轴距为 l，行进速度为 v，转弯半径为 R。



图 6　转向轮偏转角检测装置安装实物图

Fig. 6　Physical installation diagram of steering wheel deflection angle detection device

1. 传感器固定架　2. 连杆机构　3. 角度传感器　4. 连杆机构固定装置

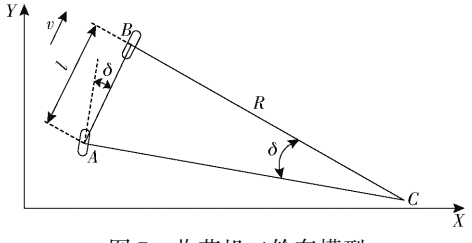


图 7　收获机二轮车模型

Fig. 7　Harvester two wheeled vehicle model

基于上述二轮车模型建立收获机的纯追踪模型，如图 8 所示。该模型以收获机后轮中心为坐标原点，建立地面坐标系 XOY。设定点 K 为收获机行进目标位置，其中前轮中心与目标点 K 在行进速度方向上的横向距离即为机械式对行装置所检测到的横向偏差 ΔL(如图 8 中的 HK 所示)，前轮中心与目标点 K 在行进速度方向上距离(HB)即为机械式对行装置到收获机前轴的垂直距离，用 p 表示，前轮中心到目标点 K 的直线距离用 q 表示，车身姿态与目标点之间的夹角记为 β。

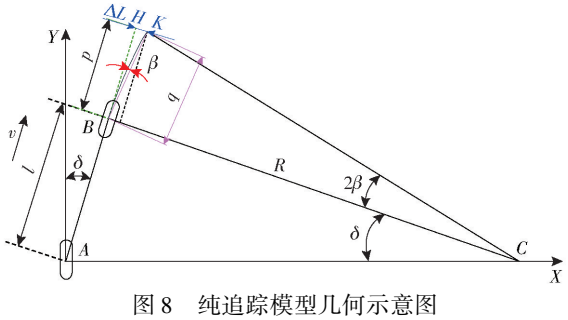


图 8　纯追踪模型几何示意图

Fig. 8　Geometric diagram of pure tracking model

根据正弦定理和曲率 ρ 可以得到

$$\rho = 2\frac{\sin\beta}{q} \tag{3}$$

根据图 8 的几何关系可以得到

$$\begin{cases}\tan\beta = \Delta L/p \\ \tan\delta = l/R \\ q = \sqrt{p^2 + \Delta^2 L}\end{cases} \tag{4}$$

可以得到

$$\beta = \arctan(\Delta L/p) \tag{5}$$

$$\delta = \arctan(l/R) = \arctan(\rho l) = \arctan(2l\sin\beta/q) \tag{6}$$

将式(4)与式(5)代入式(6),可得转向轮偏角与横向偏差之间的关系式为

$$\delta = \arctan\frac{2l\sin(\arctan(\Delta L/p))}{\sqrt{p^2 + \Delta^2 L}} \tag{7}$$

收获机为后轮转向,所以规定收获机后轮左转为负,右转为正。

3.2 转向系统函数模型

联合收获机的转向系统模型如图 9 所示,其中 n 为电动方向盘的目标转速,n_1 为电动方向盘的实际转速。



图 9 联合收获机转向系统模型

Fig. 9 Model of steering system of a combine harvester

运用电动方向盘的联合收获机转向系统,属于电控机械式转向系统,根据文献[20],联合收获机的转向系统(包括电动方向盘和液压驱动部分)可以看成是一阶惯性环节和纯积分环节的组合,其传递函数为

$$\frac{\delta(s)}{v(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \tag{8}$$

式中 k_m——联合收获机转向系的增益

τ_m——联合收获机转向系的时间常数

通过对中联农机公司生产的 4YZL-12F 型收获机做辨识试验,得到传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{34.43}{s(1.568s + 1)} \tag{9}$$

3.3 改进 PSO-PID 对行控制算法设计

3.3.1 改进 PSO 算法

PSO 算法是粒子群优化算法的简称,又称粒子群算法,每个粒子开始都具有自己的随机位置 x_i 和随机初速度 v_i,PSO 算法的核心是迭代更新每个粒子的速度和位置,主要公式为

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (pBest_i - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (gBest_i - x_i^{(t)}) \tag{10}$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \tag{11}$$

式中 ω——惯性权重 c_1、c_2——学习因子

r_1、r_2——[0,1]范围内的随机数

t——迭代次数

$pBest_i$——粒子 i 的个体历史最优位置

$gBest_i$——全局最优位置

惯性权重对算法寻优能力有显著影响,一个较大的惯性权重会促进全局搜索,一个较小的惯性权重则有利于局部搜索,本文采取线性权值降低的方法对惯性权重进行优化,平衡全局搜索和局部搜索之间的关系,表达式为

$$\omega_k = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) r_k}{r_{\max}} \tag{12}$$

式中 r_k、$r_{\max}$——当前迭代次数和最大迭代次数

ω_k、$\omega_{\min}$、$\omega_{\max}$——当前惯性权重、最小惯性权重和最大惯性权重

在 PSO 算法中,适应度函数是评估粒子解决方案质量的关键组成部分。适应度函数设计质量直接影响到优化过程的效率和最终解的质量。目前以误差积分型函数为代表的综合性适应度函数被广泛应用,主要有误差平方积分、时间乘以误差平方积分、误差绝对值积分和时间乘以误差绝对值积分[21-22]。在自动对行系统中,调节时间、超调量和稳态误差是评估控制系统性能的关键指标。调节时间直接关系到系统对偏差的响应速度。超调量反映了系统响应的过冲程度,过大的超调可能导致机械结构的冲击、定位不准确或作业效率降低。较小的稳态误差有助于提高对行的精确度。但是单一的综合性适应度函数无法兼顾调节时间、超调量以及对稳态误差的抑制作用,因此本文通过设计加权适应度函数来优化 PSO 算法。为了综合这些性能指标,设计的加权适应度函数表示为

$$J = A\int_0^\infty t|e(t)|\mathrm{d}t + B(y_1/y_\infty) + CT_s \tag{13}$$

式中 $e(t)$——被优化系统输入与响应之差,m

y_1——瞬时最大偏差,m

y_∞——稳态值,m

T_s——调节时间,ms

A、B、C——权重系数

A、B、C 是根据系统分配的权重,用于平衡调节时间、超调量和稳态误差的影响。通过调整这些权重,可以根据自动对行系统的具体需求,优化 PID 控制器参数,以达到最佳的控制效果。

3.3.2 基于改进 PSO 算法的 PID 控制器

采用改进的 PSO 算法,对控制器的 3 个参数 K_p、K_i、K_d 进行调节,流程如图 10 所示。首先在三维搜索空间中,设置一组种群规模为 50 的粒子群,来模拟 K_p、K_i、K_d 的优化过程,每个粒子开始都具有自

己的随机位置 x_i 和随机初速度 v_i，通过定义的适应度函数计算适应度值来判断粒子当前位置性能，记录个体最优位置和全局最优位置，根据式(10)～(13)，粒子在解空间不断更新位置和速度，最终满足迭代条件，从而输出最优 K_p、K_i、K_d。

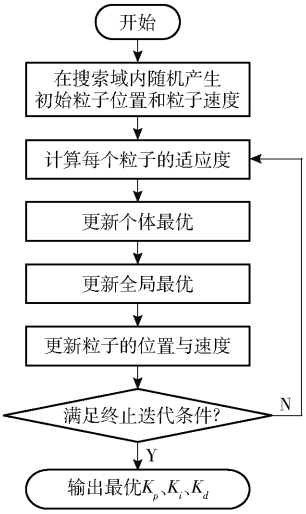


图 10　改进 PSO 算法优化 PID 参数流程图

Fig. 10　Improved PSO algorithm to optimize PID parameter flowchart

基于改进 PSO 算法的 PID 控制器结构如图 11 所示，模块的输入信号为预设的横向偏差和实时检测的横向偏差的差值，改进 PSO 算法整定 PID 控制器的参数，控制对象为辨识的转向系统函数模型，模块的输出信号为收获机的偏移距离，改进 PSO－PID 控制器能保证自动对行系统快速稳定地完成精准对行作业。

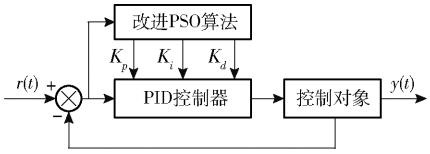


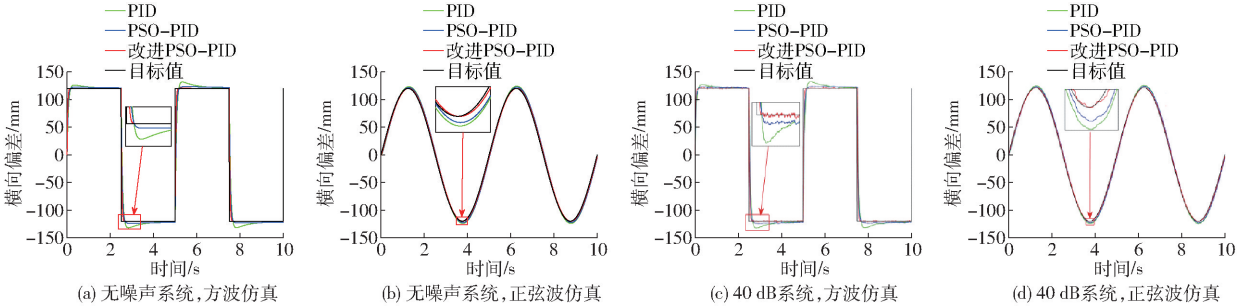
图 11　基于改进 PSO 算法的 PID 控制器原理图

Fig. 11　PID controller based on improved PSO algorithm

4　仿真试验

为验证改进 PSO－PID 算法的优化效果，本文采用 Matlab 软件构建了相应的控制系统仿真模型用于仿真试验。在试验设置中，迭代次数设定为 100 次，种群规模为 50 个个体，学习因子 c_1 与学习因子 c_2 均设为 2，控制器参数 K_p 取值范围为[－2，2]，K_i 取值范围为[－2，2]，K_d 取值范围为[－2，2]，所有初始速度范围均设为[－1，1]，ω_{max} 为 0.9，ω_{min} 为 0.3，采样周期为 0.01 s。仿真试验利用模拟信号作为输入，同时监测反馈信号对于输入信号的跟踪。即将输入幅值为 120 mm 横向偏差的方波信号和正弦信号作为输入，反馈信号则是基于后轮转角计算得到的收获机偏移距离。为了考察算法的抗噪性，在输入信号时分别加入信噪比(Signal noise ratio，SNR)为 60、40、20 dB 的高斯白噪声。对比改进 PSO－PID、PSO－PID 和 PID 控制对于系统的方波信号和正弦信号响应，研究分析系统的瞬态响应能力与稳定性。仿真结果如图 12 所示，性能对比如表 2 所示。

试验结果表明，PID 控制超调量大、响应慢、精度低。PSO 算法能对 PID 控制进行优化，在方波仿真中 PSO－PID 控制的超调量有显著下降，在正弦波仿真中对减小最大误差也具有一定的作用，但是响应速度仍较慢。而改进的 PSO 算法能够大幅提升控制效果，较之 PSO 算法，改进 PSO－PID 控制在进行参数寻优时，充分考虑了超调量与稳态误差对系统的影响，因此将方波超调量降低了 94.3%，正弦波最大误差降低了 95.5%，正弦波跟踪延迟仅为 0.01 s，极大提升了响应时间与控制精度。改进 PSO－PID 算法能有效抑制系统超调，在跟踪性能上具有显著优势，且误差更小。根据表 2 数据可以看出，改进 PSO－PID 算法具有较强的抗噪性，只有信噪比达到 20 dB 时才会受到显著影响，且受影响幅度明显小于对比算法。同时方波信号受噪声的影响明显高于正弦信号，超调量相较于无噪声的情况增大了 10% 以上。综合仿真试验结果，验证了改进 PSO－PID 算法在动态性能优化方面的优势，尤其是在处理复杂信号跟踪任务时，其高效的控制策略和参数调整机制，为提高控制系统的稳定性和精确度提供



(a) 无噪声系统，方波仿真　(b) 无噪声系统，正弦波仿真　(c) 40 dB系统，方波仿真　(d) 40 dB系统，正弦波仿真

图 12　方波仿真与正弦仿真结果

Fig. 12　Square wave simulation and sine wave simulation results

表 2 方波信号与正弦波信号跟踪性能对比

Tab. 2 Comparison of tracking performance between square wave signal and sine wave signal

性能指标	算法	SNR/dB			
		无噪声	60	40	20
方波超调量/%	PID	9.80	9.80	9.93	13.36
	PSO－PID	2.48	2.42	3.26	12.65
	改进 PSO－PID	0.14	0.23	0.86	10.32
正弦波跟踪延迟/s	PID	0.04	0.04	0.04	0.04
	PSO－PID	0.03	0.03	0.03	0.04
	改进 PSO－PID	0.01	0.02	0.02	0.02
正弦波最大误差/mm	PID	3.95	3.99	4.11	6.74
	PSO－PID	2.34	2.38	2.47	5.73
	改进 PSO－PID	0.03	0.10	0.38	4.69

了有力支持,为后续的自动对行模拟试验提供了坚实的理论研究基础。

5 田间试验

5.1 试验平台与试验方法

为验证自动对行系统的可行性,以中联重科农机有限公司研制的 4YZL－12F 型大型联合收获机作为试验平台进行试验,如图 13 所示,包括电动方向盘、显示屏、PLC 控制器、机械式对行装置、转向轮偏转角检测装置和沙漏装置。选用德国 Rexroth 公司的 RC28－24 型 PLC 控制器,其具有 4 个独立 CAN 总线接口,电气防护等级达到 IP65,具备良好的抗振性和抗冲击性,能够适应恶劣复杂的试验环境。机械式对行装置分别装载于玉米割台第 6 行、第 7 行分禾器前端,沙漏装置用于记录收获机的行驶轨迹,其安装在机械式对行装置同一直线的水平位置。

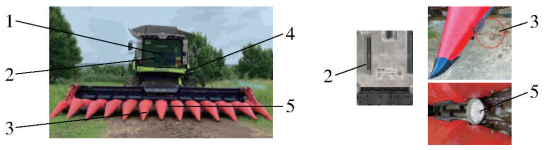
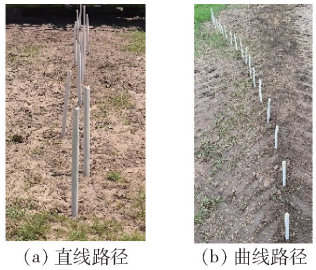


图 13 玉米收获机自动对行试验平台

Fig. 13 Automatic pairing test platform for corn harvester

1. 电动方向盘 2. PLC 控制器 3. 机械式对行装置 4. 转向轮偏转角检测装置 5. 沙漏装置

在安徽省芜湖市中联重科芜湖产业园内进行田间试验,采用塑料管模拟玉米茎秆,并对塑胶管进行编号,以统一方向排列,为检验自动对行系统应对不同复杂度路径上的表现差异,分为直线路径与曲线路径,如图 14 所示。于试验区域前后各预留 5 m 作为收获机加减速的缓冲区域,试验前对模拟玉米植株与拟合玉米行的横向偏差进行测量并记录。试验过程中,驾驶员仅控制油门使收获机达到设定速度,电动方向盘由自动对行系统控制,以调整收获机行进方向。使用沙漏装置监测自动对行系统控制下收获机的作业轨迹,并测量其与模拟植株的间距。



(a) 直线路径 (b) 曲线路径

图 14 模拟植株试验场景

Fig. 14 Simulated plant layout test scene

5.2 试验结果与分析

如表 3 所示,随着收获机的速度逐步提升,自动对行系统的轨迹与标准玉米行的偏差呈现增长趋势,导致偏差在 ±10 cm 范围内的比例逐渐下降,反映出对行质量的降低,其主要原因是:速度不断提高,但检测装置和转向系统的响应延迟时间没有缩短,导致调整完成度降低,误差累积,从而增加了与基准行的偏差,但是偏差在 ±20 cm 范围内的比例高于 80%。在直线路径的条件下,系统表现优于曲线路径,尤其在 4 km/h 以下速度时,轨迹偏差维持在 ±20 cm 以内。在速度 1 ~6 km/h 范围内,偏差控制在 ±10 cm 和 ±20 cm 范围内的比例平均值分别为 86.45% 和 97.3%。

表 3 自动对行系统模拟试验结果

Tab. 3 Simulation experiment results of automatic alignment system

前进速度/(km·h^{-1})	直线路径				曲线路径			
	偏差平均值/cm	标准差/cm	偏差在 ±10 cm 内的比例/%	偏差在 ±20 cm 内的比例/%	偏差平均值/cm	标准差/cm	偏差在 ±10 cm 内的比例/%	偏差在 ±20 cm 内的比例/%
1	3.88	6.35	100	100	2.16	3.68	98.8	100
2	3.17	6.88	94.8	100	3.22	4.69	92.5	100
3	4.56	7.12	88.3	100	4.36	6.51	88.6	98.6
4	2.73	7.42	84.5	100	3.62	6.29	82.3	93.3
5	5.80	9.56	79.8	94.3	4.62	7.42	74.2	88.4
6	4.33	6.59	71.3	89.5	5.33	9.68	65.6	83.6

曲线路径条件下,由于基准行曲率的连续变化,收获机在完成对行操作后倾向于沿当前直线轨迹行驶,难以及时适应曲率的动态调整,从而产生偏离基

准行的现象，导致偏差增大，但是偏差在 ±20 cm 范围内的比例仍高于 80%。

图 15 展示了收获机的沙漏轨迹与模拟植株的局部偏差对比与采样。图 16 呈现了在 4 km/h 速度下，系统在直线和曲线路径上的模拟试验结果。结果表明，收获机能够跟踪模拟植株路径，并向基准行逐步靠近，与模拟植株的偏差维持在 10 cm 以下。试验结果证明了自动对行系统具有较高的对行稳定性和精确度，能适应复杂的路径条件，满足玉米收获机对行收获作业的精度要求。



图 15　沙漏轨迹与模拟植株的偏差对比

Fig. 15　Comparison of deviation between hourglass trajectory and simulated plants

6　结论

（1）以 4YZL－12F 型联合收获机为载体，基于改进 PSO－PID 算法，设计了一套玉米收获机自动对行系统，实现了玉米收获机面对不同生长模式时快速精确的自动对行。

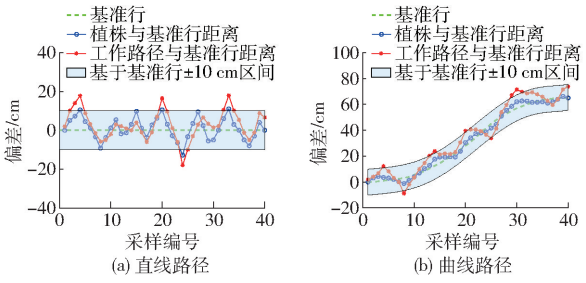


图 16　速度为 4 km/h 的模拟试验结果

Fig. 16　Simulation test results at speed of 4 km/h

（2）针对现有的农业机械自动对行环境感知中存在的不足，设计了一套机械式对行装置与转向轮偏转角检测装置，两者相结合基于二轮车的纯追踪模型可以实时监测横向偏差。

（3）模拟试验表明，自动对行系统在 1～6 km/h 速度范围内，在偏差 ±20 cm 范围内的比例高于 80%，在速度不超过 4 km/h 时，直线路径轨迹偏差能维持在 ±20 cm 以内，曲线路径中偏差 ±20 cm 以内的比例高于 93%，上述结果不仅满足玉米收获机对行作业的技术要求，而且为实现玉米收获机的自动对行提供了有力的实践依据。

参　考　文　献

[1] MITSUHASHI T, CHIDA Y, TANEMURA M. Autonomous travel of lettuce harvester using model predictive control[J]. IFAC, 2019, 52(30): 155－162.

[2] 张振乾，李世超，李晨阳，等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. 农业工程学报，2021，37(21)：9－15.
ZHANG Zhenqian, LI Shichao, LI Chenyang, et al. Navigation path extraction method for banana orchard inspection robot based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 9－15. (in Chinese)

[3] 郭祥雨，薛新宇. 基于机器视觉的水稻制种田导航线提取方法[J]. 中国农机化学报，2021，42(5)：197－201.
GUO Xiangyu, XUE Xinyu. Method for extracting guidance lines in rice seed production fields based on machine vision[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 197－201. (in Chinese)

[4] GARCIA-SANTILLAN I, GUERRERO J M, MONTALVO M, et al. Curved and straight crop row detection by accumulation of green pixels from images in maize fields[J]. Precision Agriculture, 2018, 19: 18－41.

[5] 王侨，孟志军，付卫强，等. 基于机器视觉的玉米苗期多条作物行线检测算法[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：208－220.
WANG Qiao, MENG Zhijun, FU Weiqiang, et al. Algorithm for detecting multiple crop lines in maize seedling stage based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (4): 208－220. (in Chinese)

[6] HAN X, KIM H J, JEON C W, et al. Development of a low-cost GPS/INS integrated system for tractor automatic navigation [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(2): 123－131.

[7] 钟银，薛梦琦，袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报，2021，37(9)：40－46.
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of intelligent agricultural machinery GNSS/INS integrated navigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 40－46. (in Chinese)

[8] BIGLIA A, ZAMAN S, GAY P, et al. 3D point cloud density-based segmentation for vine rows detection and localisation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107166.

[9] 张凯良，胡勇，杨丽，等. 玉米收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(2)：103－114.
ZHANG Kailiang, HU Yong, YANG Li, et al. Design and experiment of automatic alignment system for corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (2): 103－114. (in Chinese)

[10] 周海燕，杨悦，刘阳春，等. 基于激光雷达的作物收获导航线实时提取方法研究[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 1)：

9 – 17.
ZHOU Haiyan, YANG Yue, LIU Yangchun, et al. Research on real time extraction method of crop harvest navigation line based on lidar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (Supp. 1): 9 – 17. (in Chinese)
[11] 繆鹏,左志宇,毛罕平,等. 电动叶菜收获机自动对行控制系统研究[J]. 农机化研究,2022,44(3):84 – 89.
MIAO Peng, ZUO Zhiyu, MAO Hanping, et al. Research on the automatic parallel control system of electric leaf vegetable harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3): 84 – 89. (in Chinese)
[12] 李涛,周进,徐文艺,等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(11):102 – 110.
LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Design and experiment of automatic alignment system for root and stem crop harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 102 – 110. (in Chinese)
[13] DONG N,ZHANG Z, LI C, et al. Design of a deviation detection sensor and an auto-follow row system for corn harvesters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,2023,237(9):2132 – 2142.
[14] GENG A, HU X, LIU J, et al. Development and testing of automatic row alignment system for corn harvesters[J]. Applied Sciences,2022,12(12):6221 – 6221.
[15] 崔冰波,孙宇,吉峰,等. 基于模糊 Stanley 模型的农机全田块路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报,2022,53(12):43 – 48,88.
CUI Bingbo, SUN Yu, JI Feng, et al. Research on the path tracking algorithm of agricultural machinery whole field based on fuzzy stanley model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 43 – 48,88. (in Chinese)
[16] 赵永春,张庆,尤泳,等. 基于虚拟雷达和两级神经网络的割草机路径跟踪算法[J]. 农业机械学报,2023,54(4):222 – 232,267.
ZHAO Yongchun, ZHANG Qing, YOU Yong, et al. Path tracking algorithm for lawn mowers based on virtual radar and two-stage neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 222 – 232,267. (in Chinese)
[17] 靳俊栋,赵祚喜,黄培奎,等. 约翰迪尔 AutoTrac 自动导航系统通用性应用研究[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊 1): 15 – 20.
JIN Jundong, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. General application research of John Deere AutoTrac automatic navigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(Supp. 1):15 – 20. (in Chinese)
[18] 黄培奎,赵祚喜,靳俊栋,等. 基于 AutoTrac 的导航控制参数整定方法试验[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊 2):100 – 106.
HUANG Peikui, ZHAO Zuoxi, JIN Jundong, et al. Experimental study on navigation control parameter tuning method based on AutoTrac[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 100 – 106. (in Chinese)
[19] 陈刚,李青龙,孙宜田,等. 玉米联合收获机自动对行控制系统的研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(3):191 – 194,280.
CHEN Gang, LI Qinglong, SUN Yitian, et al. Research on the automatic parallel control system of corn combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3): 191 – 194,280. (in Chinese)
[20] 李逃昌. 基于级联式控制策略的农业机械自动导航控制方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
LI Taochang. Research on automatic navigation control method of agricultural machinery based on cascade control strategy[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
[21] PRADHAN R,MAIHIS K,PRADHAN J K,et al. Optimal fractional order PID controller design using antlion optimizer[J]. Ain Shams Engineering Journal,2020,11(2):281 – 291.
[22] ROIAS I P,OCHOA G V,DUARTE FORERO J. Comparative performance of a hybrid renewable energy generation system with dynamic load demand[J]. Applied Sciences,2020,10(9):3093.