doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.014

基于全状态反馈控制的农机自动驾驶曲线路径跟踪方法

何　杰[1,2]　刘善琪[1,2]　满忠贤[1,2]　岳孟东[1,2]　王靖霆[1,2]　汪　沛[1,2]　胡　炼[1,2]

(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)

摘要:不规则农田中,沿曲线路径作业可有效提高无人化农机作业适用性。针对当前无人化作业曲边农田作业覆盖率低的问题,本文提出一种基于全状态反馈控制的曲线路径跟踪控制方法。构建一个以横向偏差、航向偏差和航向增量作为状态向量的三阶全状态反馈控制器。将系统线性化并转换为空间矩阵形式,在满足系统稳定性约束的条件下求解增益矩阵,从而获取前轮转角。基于 Matlab/Simulink 仿真环境对控制器性能进行验证,结果表明,补偿后平均绝对误差相较于补偿前算法降低 31%,最大绝对误差降低 17.9%。为验证本文所提方法,设计了 3 组田间试验。变曲率路径试验结果表明,当农机作业速度为 0.7 m/s 时,横向偏差最大值为 0.070 5 m,绝对误差为 0.021 8 m,标准差为 0.023 4 m,航向偏差最大值为 12.25°,绝对误差为 1.37°,标准差为 1.68°;定曲率路径试验结果表明,横向偏差最大值为 0.103 4 m,绝对误差为 0.042 4 m,标准差为 0.047 7 m,航向偏差最大值为 8.9°,绝对误差为 1.86°,标准差为 2.45°;沿曲边田埂跟踪试验结果表明,横向偏差最大值为 0.059 7 m,绝对误差为 0.012 3 m,标准差为 0.015 8 m,航向偏差最大值为 7.01°,绝对误差为 1.85°,标准差为 2.49°。跟踪精度均能满足作业需求,研究结果为无人农机进行复杂多变的曲边作业提供了理论和技术支撑。

关键词:农业机械;自动驾驶;路径跟踪;曲线导航;全状态反馈控制

中图分类号:S220;S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)02-0145-10　　**OSID**:

Curve Path Tracking Control of Agricultural Machinery Automatic Driving Based on Full State Feedback Control

HE Jie[1,2]　LIU Shanqi[1,2]　MAN Zhongxian[1,2]　YUE Mengdong[1,2]　WANG Jingting[1,2]　WANG Pei[1,2]　HU Lian[1,2]

(1. *Key Laboratory of Key Technologly 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*)

Abstract: Working on irregular farmland along a curved path can effectively improve the applicability of unmanned agricultural machinery operations. Aiming at the problem of low coverage of unmanned curved farmland operations, a curved path tracking control method was proposed based on full-state feedback control. A third-order full-state feedback controller with lateral deviation, heading deviation and heading increment as state vectors was constructed. The system was linearized and converted into a spatial matrix form. The gain matrix was solved under the condition of satisfying the system stability constraint to obtain the front wheel steering angle. The front wheel steering angle was compensated according to the curvature of the nearest path point. The controller performance was verified based on the Matlab/Simulink simulation environment. The results showed that the average absolute error after compensation was reduced by 31% compared with that of the algorithm before compensation, and the maximum absolute error was reduced by 17.9%. Three sets of field experiments were designed to verify the proposed method. The test results of variable curvature path showed that when the operating speed of agricultural machinery was 0.7 m/s, the maximum lateral deviation was 0.070 5 m, the absolute error was 0.021 8 m, the standard deviation was 0.023 4 m, the maximum heading deviation was 12.25°, the absolute error was 1.37°, and the standard deviation was 1.68°; the test results of fixed curvature path showed that the

收稿日期:2024-11-12　修回日期:2024-12-25

基金项目:井冈山农高区省级科技专项"揭榜挂帅"项目(20222-051252)和广东省科技计划项目(2023B0202010023)

作者简介:何杰(1985—),男,副教授,主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究,E-mail:hooget@scau.edu.cn

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

maximum lateral deviation was 0.103 4 m, the absolute error was 0.042 4 m, the standard deviation was 0.047 7 m, the maximum heading deviation was 8.9°, the absolute error was 1.86°, and the standard deviation was 2.45°; the results of tracking test along curved ridges showed that the maximum lateral deviation was 0.059 7 m, the absolute error was 0.012 3 m, the standard deviation was 0.015 8 m, the maximum heading deviation was 7.01°, the absolute error was 1.85°, and the standard deviation was 2.49°. The tracking accuracy can meet the operational requirements. The research results can provide theoretical and technical support for unmanned agricultural machinery to perform complex and changeable curved edge operations.

Key words: agricultural machinery; autopilot; path tracking; curve navigation; full-state feedback control state feedback

0 引言

随着农业机械化水平不断提高,极大地提高了生产效率[1-3]。路径跟踪是农机向无人化发展的基础[4-6],通常采用直线跟踪方法便能满足日常作业需求。然而,农业生产环境复杂多变,部分田块由于道路布局、障碍物分布等因素干扰,存在不规则田块现象。只采用直线进行作业[7-10]会导致大面积漏播漏种,后续还需人工进行补种,效率低且费时费力。开展曲线路径跟踪等研究对提高不规则田块覆盖率具有重要意义。

为了提高曲线跟踪精度,国内外学者对无人驾驶曲线跟踪开展了研究。直线跟踪研究为曲线跟踪奠定了一定基础,直线行驶过程中速度控制、扰动稳定等方面的成果,能够为曲线跟踪中不同线段处理提供借鉴。段贤强等[11]提出了一种基于链式系统模型和小范围稳定性优化的直线路径跟踪控制方法,该方法提高了农机直线路径跟踪控制在不同速度条件下的稳定性和鲁棒性。杨然兵等[12]提出了一种前馈+反馈复合路径跟踪控制算法。在航向偏差 PD 控制器基础上,增加横向偏差比例项,并引入行驶速度自适应控制延时补偿前馈项。二者均在直线跟踪精度、稳定性等方面取得了较好的成果。NETTO 等[13]分析了前视距离与车速的关系,提出了速度二次超前距离和一种来自车联测模块的优化策略。迟瑞娟等[14]提出了一种基于模型预测的路径跟踪控制方法,通过当前状态量预测下一时刻车辆状态,控制自动驾驶插秧机沿参考路径行走。试验结果表明,曲线路径跟踪平均横向偏差、航向偏差分别为 0.45 m、10.107°。在早期研究曲线跟踪时,两者均未引入路径曲率这一变量,曲线跟踪过程精度较差。XUE 等[15]建立了差动驱动农用轮式机器人运动模型,采用滑模变量结构设计控制器对农用轮式机器人进行跟踪控制。赵治国等[16]提出了一种基于粒子群多目标优化算法的预瞄距离自适应驾驶员模型,采用滑模变结构设计转向控制器,综合各性能指标设计了 PSO 优化算法。两者采用滑模变结构设计,但由于控制不连续性,系统状态到达滑模面后,容易在滑模面两侧来回穿越,产生高频的抖振现象,不适用边界的稳定跟踪需求[17]。YANG 等[18]提出了一种基于最优目标点的农业机械路径跟踪算法,通过模拟驾驶员前视距离行为,得到最佳前视距离。吴才聪等[19]提出了一种基于前轮转角前馈补偿策略的变曲度路径跟踪控制方法,试验结果表明,行驶速度为 1.0 m/s 变曲度路径跟踪过程中,平均绝对误差为 0.027 m。张闻宇等[20]提出了一种基于 B 样条路径优化的积分补偿模糊纯追踪控制方法,通过 B 样条插值方法平滑路径,建立曲率和作业速度与前视距离的关系,同时采用跟踪横向偏差设计前轮转角积分补偿。三者在跟踪精度上均取得了较好的效果,但试验平台多为拖拉机,作业转弯半径较大时会出现田块角落大面积漏播现象。适用场景多为田间作业,忽略了田块边界作业,在面对一些复杂曲边农田时,仍需进一步优化以提升适应性和稳定性。

为提高曲边田块边缘覆盖率,本文提出一种基于全状态反馈控制的曲线跟踪方法。将横向偏差、航向偏差、航向增量作为输入量,前轮转角作为输出量,并通过最近参考点曲率对前轮转角进行分量补偿。并以洋马 YR60D 型直播机为试验平台,在不同场景下进行变曲率跟踪、定曲率跟踪和沿曲边田埂跟踪试验,以验证提出方法的可行性。

1 全状态反馈控制器设计

1.1 运动学模型

采用的轮式农机为前轮转向,假设轮式农机在田间或水泥路上的跟踪控制过程中忽略轮胎侧偏特性,轮式农机转向速度即为农机横摆角速度,则可将轮式农机简化为二轮车模型[21-22]。以正东方向为 X 轴正方向,正北方向为 Y 轴正方向,得到轮式农机导航坐标系 XOY 下运动学模型如图 1 所示。图中 (x_2,y_2) 为车辆当前位置坐标,(x_1,y_1) 为当前时刻

距离车辆最近路径参考点坐标，$(\dot{x}_r,\dot{y}_r)$为当前时刻距离车辆最近路径参考点方向矢量，(x_3,y_3)为下一时刻距离车辆最近路径参考点坐标，e_d为车辆横向偏差，ϕ_P为车辆当前时刻目标航向角，ϕ_C为车辆当前航向角，ϕ_Q为下一时刻目标航向角，δ_C为前轮转角，L为车辆轴距，v为车辆当前速度。

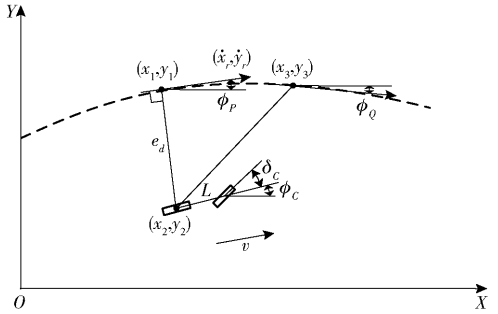


图 1　轮式农机运动学模型与车辆状态几何示意图

Fig. 1　Kinematic model of wheeled agricultural machinery and geometric diagram of vehicle state

由轮式农机前后轮几何约束及运动学约束可得到运动学模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_v\\ \dot{y}_v\\ \dot{\phi}_v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sin\phi_C\\ \cos\phi_C\\ \tan\delta_C/L\end{bmatrix}v \tag{1}$$

式中　$\dot{x}_v$——车辆 X 轴方向速度，m/s

$\dot{y}_v$——车辆 Y 轴方向速度，m/s

$\dot{\phi}_v$——车辆航向角速度，rad/s

1.2　全状态反馈控制器

一般农机作业路径为一条连续可导的曲线，以二轮车运动学模型为基础，车辆后轮轴中心为控制点，通过车辆当前位置到路径上最近点的向量，得到以当前车辆位置为中心，车辆到当前路径最近点的距离为半径线段，目标航向为线段垂线，方向为当前路径点指向下一个路径点方向，几何关系如图 1 所示。

在 k 时刻，最近路径参考点到车辆向量与最近路径参考点方向矢量关系为

$$\boldsymbol{P}_{12}\boldsymbol{P}_r=0 \tag{2}$$

式中　$\boldsymbol{P}_{12}$——最近路径参考点到车辆向量

$\boldsymbol{P}_r$——k 时刻最近路径参考点目标航向向量

此时，路径参考点目标航向角为

$$\phi_P=\arccos\frac{\dot{x}_r}{\sqrt{\dot{x}_r^2+\dot{y}_r^2}} \tag{3}$$

可以得到车辆横向偏差和航向偏差为

$$e_d=(x_2-x_1,y_2-y_1) \tag{4}$$

$$\phi_d=\phi_C-\phi_P \tag{5}$$

式中　ϕ_d——k 时刻车辆航向偏差，rad

预瞄航向增量为 k 时刻到 $k+1$ 时刻目标航向变化量，表示为

$$\phi_M=\phi_Q-\phi_P \tag{6}$$

式中　ϕ_M——目标航向增量，rad

将横向偏差、航向偏差、航向增量作为状态向量设计全状态反馈控制器，则状态向量 $\boldsymbol{d}$ 可表示为

$$\boldsymbol{d}=\begin{bmatrix}e_d\\ \phi_d\\ \phi_M\end{bmatrix} \tag{7}$$

定义偏差为当前值与期望值差值，结合式(4) ~ (6)可得状态向量各输入量变化率为

$$\begin{bmatrix}\dot{e}_d\\ \dot{\phi}_d\\ \dot{\phi}_M\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}v\sin\phi_d\\ v\,\delta_C/L-vc\\ v\,\delta_C/L\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中　c——$k+1$ 时刻车辆路径点曲率，m^{-1}

式(8)中存在常数项 vc，则设计含有常数项的标准状态方程[23-25]，即

$$\dot{d}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{d}+\boldsymbol{B}\delta_C+\boldsymbol{C} \tag{9}$$

式中　$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$——状态空间矩阵

将式(8)拆分为式(9)的形式，对系统进行线性化处理，应用小角度近似($\sin x\approx x$)，转换后状态空间矩阵[26-27]为

$$\begin{bmatrix}\dot{e}_d\\ \dot{\phi}_d\\ \dot{\phi}_M\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&v&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_d\\ \phi_d\\ \phi_M\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ v/L\\ v/L\end{bmatrix}\delta_C+\begin{bmatrix}0\\ -v\\ 0\end{bmatrix}c \tag{10}$$

设置增益矩阵 $\boldsymbol{K}$ 为

$$\boldsymbol{K}=[k_1\quad k_2\quad k_3] \tag{11}$$

式中　k_1、k_2、k_3——增益矩阵系数

通过状态反馈控制前轮转角，根据式(11)设定控制律为

$$\delta_C=-\boldsymbol{K}\boldsymbol{d} \tag{12}$$

将式(12)代入式(10)，可得

$$\begin{bmatrix}\dot{e}_d\\ \dot{\phi}_d\\ \dot{\phi}_M\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&v&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_d\\ \phi_d\\ \phi_M\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ v/L\\ v/L\end{bmatrix}[k_1\quad k_2\quad k_3]\begin{bmatrix}e_d\\ \phi_d\\ \phi_M\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ -v\\ 0\end{bmatrix}c \tag{13}$$

闭环系统方程可表示为

$$\dot{d}=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\boldsymbol{d} \tag{14}$$

通过闭环系统方程，可得系统特征多项式[28]为

$$s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})=s[s^2+(k_2+k_3)(v/L)s+v^2k_1/L] \tag{15}$$

式中 s——拉氏变换复频域 $\boldsymbol{I}$——单位矩阵

为了得到一个稳定的系统响应,在式(15)中,已知一个根为零的情况下,需确保有两个根,且两个根均为负根,即二次方程的判别式大于等于零且求根公式中最大的根小于零。约束条件为

$$\begin{cases}\Delta=[(k_2+k_3)^2-4k_1L]v^2/L^2\geqslant 0\\ [-(k_2+k_3)^2+\sqrt{\Delta}]/2<0\end{cases} \tag{16}$$

式中 Δ——二次方程判别式

化简得到增益矩阵约束条件为

$$\begin{cases}(k_2+k_3)^2\geqslant 4k_1L\\ k_1>0\end{cases} \tag{17}$$

利用极点配置[29],将系统的极点放在理想位置。由式(17)可知,特征多项式中含有一个零点,将期望极点位置设置为$p_1=0$、p_2、p_3。则特征方程为

$$(s+p_1)(s+p_2)(s+p_2)=s^3+(p_2+p_3)s^2+p_2p_3s \tag{18}$$

对比式(15)、(18),取 s 的等次幂,得到

$$\begin{cases}p_2+p_3=(k_2+k_3)v/L\\ p_2p_3=k_1v^2/L\\ p_1=0\end{cases} \tag{19}$$

结合式(17)约束条件和经试验验证得到最优增益矩阵系数,即

$$\begin{cases}k_1=L/v^2\\ k_2=2L/v\\ k_3=L/(2v)\end{cases} \tag{20}$$

将式(20)代入式(12)可得

$$\delta_C=\frac{L}{v^2}e_d+\frac{2L}{v}\phi_d+\frac{L}{2v}\phi_M \tag{21}$$

规定车辆在路径左边偏差为负,右边偏差为正;前轮转角为正,方向盘向右转,为负,方向盘向左转;航向增量为负时方向盘向右转,前轮转角值为正。则前轮转角关系式为

$$\delta_C=\frac{L}{v^2}e_d+\frac{2L}{v}\phi_d-\frac{L}{2v}\phi_M \tag{22}$$

在车辆运动学模型中,前轮转角 δ 决定车辆在行驶过程中将采取何种转向行为,直接影响车辆行驶轨迹。当驾驶员转动方向盘时,前轮转角改变,车辆前进方向也随之改变,从而影响车辆行驶轨迹。前轮转角越大,车辆行驶轨迹越弯曲[30]。前轮转角和曲率的关系可以表示为

$$\tan\delta_k=\frac{L}{R} \tag{23}$$

式中 δ_k——参考路径曲率对轮角的补偿值,rad

规定在二维平面,路径前进方向曲线向左弯曲则曲率为正,向右弯曲则曲率为负。路径曲率带来的轮角补偿值为

$$\delta_k=\arctan(cL) \tag{24}$$

结合式(22)控制器计算得到主轮角控制量和式(24)路径曲率补偿得到的分轮角控制量,可以得到最终期望前轮转角 δ 表达式为

$$\delta=\frac{L}{v^2}e_d+\frac{2L}{v}\phi_d-\frac{L}{2v}\phi_M+\arctan(cL) \tag{25}$$

根据上述推导得出的前轮转角关系,设计系统整体控制框图,如图 2 所示。

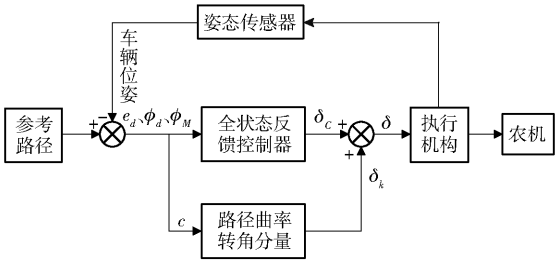


图 2 全状态反馈曲线跟踪控制算法结构框图

Fig. 2 Full state feedback curve tracking control algorithm structure diagram

1.3 仿真验证

为验证本文全状态反馈控制器在曲线路径的跟踪控制性能,采用仿真试验对算法进行曲线跟踪控制效果验证。在 Matlab/Simulink 中搭建仿真环境,如图 3 所示。

参考路径为圆形路径,3 组试验参考路径为不同半径的圆。初始条件下设置采样时间为 0.05 s,车辆初始位置为参考路径第 1 个点,航向为参考路径第 1 个路径点指向第 2 个路径点方向,横向偏差和航向偏差为 0,轴距为 1.1 m,速度为 0.7 m/s。

控制算法补偿前及补偿后仿真跟踪如图 4 所示,可以明显看出两者跟踪效果均较理想,未出现超调和发散的现象,补偿前因为路径曲率及车辆模型等因素会存在一定偏差,通过参考路径曲率值对输出轮角进行补偿,使偏差整体减小。仿真模型横向偏差结果如表 1 所示,未进行曲率补偿的全状态反馈控制算法平均绝对误差为 0.014 5 m,最大绝对误差为 0.020 1 m;曲率补偿后全状态反馈控制算法平均绝对误差为 0.01 m,最大绝对误差为 0.016 5 m。补偿后平均绝对误差相较于补偿前降低 31%,补偿后最大绝对误差相较于补偿前算法降低 17.9%。由试验结果可知,本文设计的全状态反馈控制算法对曲线跟踪具有较好的跟踪效果。

2 田间试验

2.1 试验平台

为了验证本文全状态反馈控制算法曲线跟踪效果,试验平台采用洋马YR60D 型直播机,试验平台

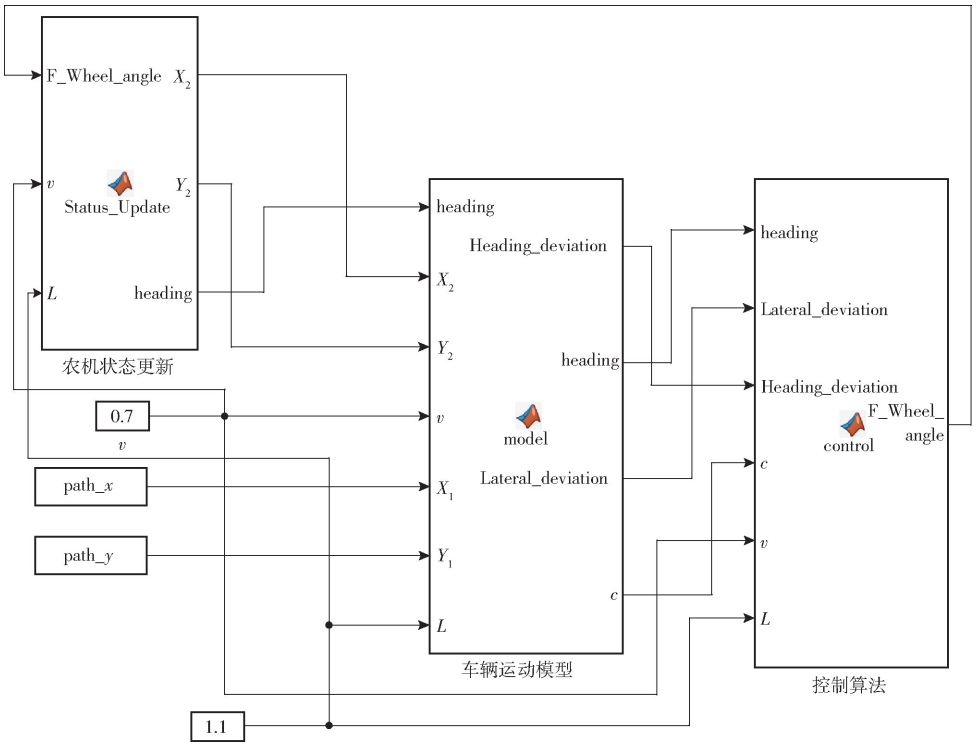


图 3　全状态反馈控制器仿真模块

Fig. 3　Simulation design of full state feedback controller

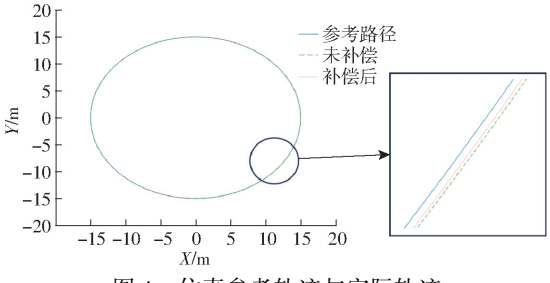


图 4　仿真参考轨迹与实际轨迹

Fig. 4　Simulation reference trajectory and actual trajectory

表 1　仿真模型横向偏差结果

Tab. 1　Statistics of lateral deviation results of simulation model　　m

控制方法	圆半径	平均绝对误差	最大绝对误差
未补偿	10	2.12×10^{-2}	2.72×10^{-2}
	15	1.26×10^{-2}	1.86×10^{-2}
	20	9.70×10^{-3}	1.45×10^{-2}
均值		1.45×10^{-2}	2.01×10^{-2}
补偿后	10	1.47×10^{-2}	1.86×10^{-2}
	15	8.80×10^{-3}	1.70×10^{-2}
	20	6.60×10^{-3}	1.38×10^{-2}
均值		1.00×10^{-2}	1.65×10^{-2}

表 2　洋马 YR60D 型直播机参数

Tab. 2　Yanmar YR60D direct broadcast machine parameters

参数	数值
整车质量/kg	820
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	3 320 × 2 200 × 2 330
轴距/mm	1 100
前轮距/mm	1 220
后轮距/mm	1 210
标定功率/kW	16.0



图 5　试验平台实物图

Fig. 5　Test platform physical picture

1. 导航控制器　2. IMU 姿态传感器　3. 推杆电机　4. 定位天线　5. 电控方向盘　6. 底层控制器

车辆参数如表 2 所示。

试验平台实物图如图 5 所示，在原车辆加装定位天线、电控方向盘、导航控制器、底层控制器、IMU 姿态传感器、推杆电机等。双天线左右安装于车辆最前方，离地高度 2.4 m，主从天线距离 1.6 m，距离控制点(后轮轴中心)为1.75m。显示终端与导航控制终端为一体，采用从平 SPRING－10PRO。显示屏可实现参数设置、路径规划、灵敏度调整、作业状态实时更新和数据导出等功能；IMU 采用维特智能 HWT605 六轴高精度倾角传感器，输出频率为 50 Hz，安装于直播机座位下方(车体中心为主)，为车辆提供精确的姿态角；推杆电机采用宏霸 HB－

DJ809,载荷 200 ~ 2 000 N,速度 5 ~ 55 mm/s,定制行程 30 ~ 1 000 mm,12 V 直流有刷电机;定位天线采用司南 AT300 测量型天线,具有信号稳定、体积小、质量轻、防水防尘、抗震等优点;方向盘采用华测电控方向盘 CES - T,根据决策控制量执行速度环开环控制;底层控制器采用 SPC - STW - 2612MS 控制器,可采集高低电平、电压、电流、脉冲等信号,对执行电机发送不同电压使其执行相应的动作。

2.2 试验设计

为验证本文所提方法在实地作业中的可行性,在华南农业大学增城教学科研基地进行田间试验,试验分 3 组:①变曲率曲线试验。直播机在平整的水泥路上对一条变曲率曲线路径进行自动导航跟踪,路径为试验车辆通过定位装置及导航控制器采集的一条人为驾驶的曲线。考察其对不同曲率路径跟踪精度。②定曲率曲线试验。直播机在耕整后的水田中对一条定曲率曲线路径进行自动导航跟踪,路径为由两个曲率固定的半圆组成的 S 形路径。考察其抗干扰能力及跟踪精度。③曲边田埂试验。直播机沿曲边田埂进行作业,考察其实际场景的应用性。

试验采用最常见的 S 形和自定义曲线路径作为试验参考路径,试验时,用控制点代替整车位置,控制点位于车辆后轮轴中心,通过导航控制器与定位装置记录车辆行走轨迹、横向偏差、航向偏差等信息,供后期数据统计分析。导航控制器采样时间为 0.1 s,路径点间隔为 0.2 m,选取初始偏差为 0 作为车辆起始条件。针对曲线作业,选用中低速进行作业,直播机速度为 0.7 m/s。试验前,将直播机初始位置调整到目标路径横向偏差 ±0.025 m 范围内,航向偏差调整到 ±1.5°范围内。为了减少随机误差的影响,保证数据可靠性和代表性,选取 3 次试验平均值作为最终试验数据。

2.3 变曲率曲线试验结果分析

人工驾驶农机行驶一段任意曲率的轨迹,通过无人驾驶直播机搭载的定位装置获取行驶轨迹,然后通过导航控制器保存处理轨迹信息,最终得到目标路径。测试直播机对变曲率曲线跟踪效果。试验场景如图 6 所示。



图 6 直播机变曲率跟踪试验场景

Fig. 6 Live broadcast machine variable curvature tracking test scene

图 7a 为路径跟踪轨迹,图 7b、7c 分别为车辆行驶过程中的横向偏差和航向偏差。由图 7 可见,车辆在行驶大约 30 m 时,曲率变化较大。通过算法计算得到的转角变化增大,方向盘在进行输出时会有一定的迟滞性,此时相较于曲率变化较小的路径段跟踪偏差增大,通过偏差和曲率补偿加大输出的轮角值,车辆会出现短暂的偏离期望路径的情况,随后立刻收敛,此时偏差数据会出现尖峰形状。图 7 为表 3 中试验 1 的结果。在表 3 中,取 3 次试验结果平均值作为最终试验数据。结果表明,变曲率路径跟踪试验过程中最大横向偏差为 0.070 5 m,平均绝对误差为 0.021 8 m,标准差为 0.023 4 m,最大航向偏差为 12.25°,平均绝对误差为 1.37°,标准差为 1.68°。试验表明基于全状态反馈控制的曲线算法在平整的水泥地上,对变曲率路径具有良好的鲁棒性,试验结果符合实地作业需求。

2.4 定曲率曲线试验结果分析

选取两个半径为 13 m 的半圆组成一个 S 形的参考路径,测试直播机在耕整后水田中对曲线的跟踪效果。试验场景如图 8 所示。

图 9a 为农机的路径跟踪轨迹,图 9b、9c 分别为车辆行驶过程中横向偏差和航向偏差。整体跟踪过程中,由于硬地层不平导致车辆出现几次侧滑偏移,横向偏差和航向偏差突然增大,此时控制量加大,使车辆急速回正后趋于稳定。图 9 为表 4 中试验 1 的

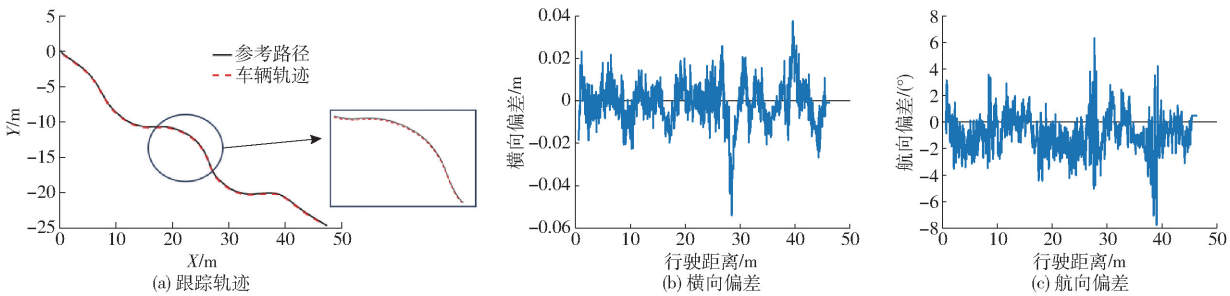


图 7 变曲率路径跟踪效果与偏差曲线

Fig. 7 Variable curvature path tracking effect and deviation curves

表 3　变曲率路径跟踪偏差统计

Tab. 3　Deviation statistics of variable curvature path tracking

试验号	最大横向偏差/m	平均绝对误差/m	标准差/m	最大航向偏差/(°)	平均绝对误差/(°)	标准差/(°)
1	5.41×10^{-2}	7.70×10^{-3}	1.01×10^{-2}	14.33	1.39	1.63
2	9.16×10^{-2}	3.23×10^{-2}	3.69×10^{-2}	8.94	1.28	1.75
3	6.57×10^{-2}	2.54×10^{-2}	2.31×10^{-2}	13.47	1.44	1.67
均值	7.05×10^{-2}	2.18×10^{-2}	2.34×10^{-2}	12.25	1.37	1.68



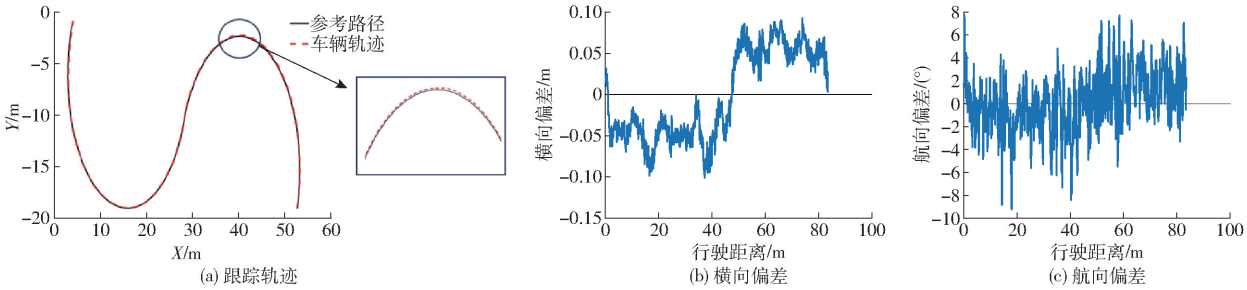
图 8　直播机定曲率跟踪试验场景

Fig. 8　Live broadcast machine constant curvature tracking test scene

结果。在表 4 中，取 3 次试验结果平均值作为最终试验数据。结果表明，定曲率路径跟踪试验过程中最大横向偏差为 0.103 4 m，平均绝对误差为 0.042 4 m，标准差为 0.047 7 m，最大航向偏差为 8.9°，平均绝对误差为 1.86°，标准差为 2.45°。试验表明基于全状态反馈的曲线控制算法在耕整后的水田上具有良好的鲁棒性，在有侧滑干扰时能快速纠正偏差。

2.5　曲边田埂试验结果分析

人为驾驶农机在旱田进行起垄，模拟含曲边的



(a) 跟踪轨迹　(b) 横向偏差　(c) 航向偏差

图 9　定曲率路径跟踪效果与偏差曲线

Fig. 9　Constant curvature path tracking effect and deviation diagrams

表 4　定曲率路径跟踪偏差统计

Tab. 4　Constant curvature path tracking deviation statistics

试验号	最大横向偏差/m	平均绝对误差/m	标准差/m	最大航向偏差/(°)	平均绝对误差/(°)	标准差/(°)
1	1.009×10^{-1}	4.62×10^{-2}	5.13×10^{-2}	9.23	2.04	2.58
2	1.036×10^{-1}	4.00×10^{-2}	4.42×10^{-2}	8.60	1.72	2.31
3	1.056×10^{-1}	4.11×10^{-2}	4.75×10^{-2}	8.88	1.82	2.45
均值	1.034×10^{-1}	4.24×10^{-2}	4.77×10^{-2}	8.90	1.86	2.45

田块边界。起垄后驾驶农机贴合垄的边界行驶，通过搭载的定位装置获取行驶的轨迹并保存为参考路径，路径点间隔 0.2 m，测试直播机对曲边田埂的跟踪效果。试验场景如图 10 所示，图中蓝色线段为模拟田埂边界，红色虚线为车辆行驶轨迹。

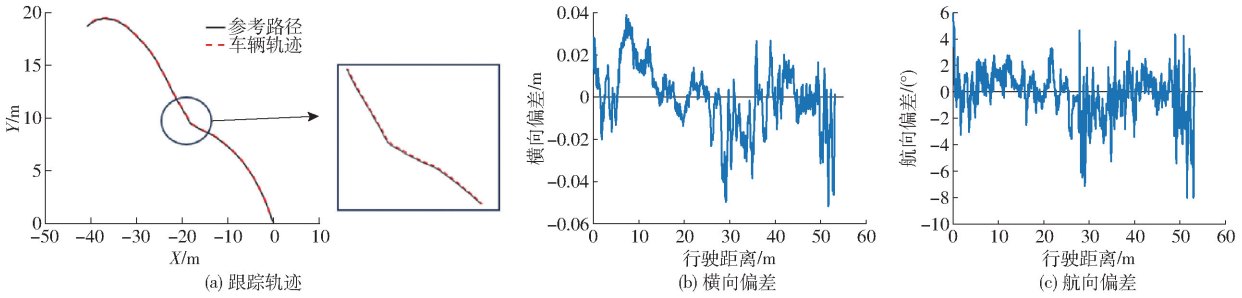
图 11a 为车辆的行驶轨迹，图 11b、11c 分别为车辆行驶过程中横向偏差和航向偏差。第 1 个正曲率弯中，车辆行驶 10 m 左右时，因旱地颠簸不平导致前轮翘起，此时车辆位姿发生变化，车辆出现偏差波动。在第 1 个负曲率弯中，车辆行驶 30 m 左右时，此时航向增量和路径曲率变化较大，车辆轮角输出量加大，调整车辆位置直至稳定跟踪。图 11 为表 5 中试验 1 的结果。在表 5 中，取 3 次试验结果平均



图 10　曲边田埂跟踪试验场景

Fig. 10　Curved ridge tracking test scene

值作为最终试验数据。结果表明，沿曲边田埂跟踪试验过程中最大横向偏差为 0.059 7 m，平均绝对误差为 0.012 3 m，标准差为 0.015 8 m，最大航向偏差为 7.01°，平均绝对误差为 1.85°，标准差为 2.49°。



(a) 跟踪轨迹 (b) 横向偏差 (c) 航向偏差

图 11 曲边田埂跟踪效果与偏差曲线

Fig. 11 Tracking effect and deviation of curved ridges

表 5 曲边田埂跟踪偏差统计

Tab. 5 Tracking deviation statistics for curved ridges

试验号	最大横向偏差/m	平均绝对误差/m	标准差/m	最大航向偏差/(°)	平均绝对误差/(°)	标准差/(°)
1	5.17×10^{-2}	1.08×10^{-2}	1.45×10^{-2}	5.93	1.48	2.01
2	6.54×10^{-2}	1.39×10^{-2}	1.71×10^{-2}	7.83	2.10	2.82
3	6.21×10^{-2}	1.22×10^{-2}	1.58×10^{-2}	7.26	1.98	2.65
均值	5.97×10^{-2}	1.23×10^{-2}	1.58×10^{-2}	7.01	1.85	2.49

试验表明本文算法在对含曲边的田块边界进行作业时,能够稳定贴合边界行驶,满足对含曲线边界田块作业要求。

3 结论

(1)设计了一种基于全状态反馈控制的曲线跟踪控制算法。以车辆的横向偏差、航向偏差和航向增量作为输入量建立状态方程,求解闭环系统的特征多项式并对系统进行稳定性约束,得到前轮转角的关系式。再通过路径曲率带来的轮角增量对转角进行补偿,实现对曲线路径的跟踪控制。

(2)在水泥地、耕整后水田和轻微颠簸旱地开展直播机的变曲率、定曲率曲线跟踪控制试验及曲线田埂跟踪控制试验。试验结果表明,当直播机以速度 0.7 m/s 作业时,在变曲率试验时,最大横向偏差为 0.070 5 m,平均绝对误差为 0.021 8 m,标准差为 0.023 4 m;最大航向偏差为 12.25°,平均绝对误差为 1.37°,标准差为 1.68°。在水田定曲率试验时,最大横向偏差为 0.103 4 m,平均绝对误差为 0.042 4 m,标准差为 0.047 7 m;最大航向偏差为 8.9°,平均绝对误差为 1.86°,标准差为 2.45°。在曲边田埂跟踪试验时,最大横向偏差为 0.059 7 m,平均绝对误差为 0.012 3 m,标准差为 0.015 8 m;最大航向偏差为 7.01°,平均绝对误差为 1.85°,标准差为 2.49°。在不同场景不同地况下均有较好的跟踪效果,能够有效地提高曲边田块的边界覆盖率。

参 考 文 献

[1] 罗锡文,廖娟,臧英,等. 我国农业生产的发展方向:从机械化到智慧化[J]. 中国工程科学,2022,24(1):46-54.
LUO Xiwen,LIAO Juan,ZANG Ying,et al. The development direction of China's agricultural production: from mechanisation to intelligence[J]. China Engineering Science,2022,24(1):46-54. (in Chinese)

[2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6):8-17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent farm machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University,2021,42(6):8-17. (in Chinese)

[3] 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 Yuhan, 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)

[4] 罗锡文,胡炼,何杰,等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报,2024,40(1):1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie,et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(1):1-16. (in Chinese)

[5] 尹彦鑫,孟志军,赵春江,等. 大田无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文),2022,4(4):1-25.
YIN Yanxin,MENG Zhijun,ZHAO Chunjiang,et al. Research status and outlook of key technologies for unmanned farms in large fields[J]. Intelligent Agriculture,2022,4(4):1-25. (in Chinese)

[6] 钱震杰,金诚谦,刘政,等. 无人农场中的智能控制技术应用现状与趋势(英文)[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2023,4(3):1-13.
QIAN Zhenjie,JIN Chengqian,LIU Zheng,et al. Status and trend of intelligent control technology application in unmanned farms

(in English)[J]. Journal of Intelligent Agricultural Equipment,2023,4(3):1 - 13. (in Chinese)
[7] 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)
[8] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15 - 21.
LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):15 - 21. (in Chinese)
[9] 何杰,朱金光,张智刚,等. 水稻直播机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):17 - 24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):17 - 24. (in Chinese)
[10] 吴正开,王家忠,邢雅周,等. 基于无人驾驶电动拖拉机的自适应跟踪算法研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11):176 - 183.
WU Zhengkai, WANG Jiazhong, XING Yazhou, et al. Research on adaptive tracking algorithm based on driverless electric tractor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(11):176 - 183. (in Chinese)
[11] 段贤强,陶建峰,覃程锦,等. 变速条件下农业机械路径跟踪稳定控制方法[J]. 农业机械学报,2019,50(9):18 - 24,32.
DUAN Xianqiang, TAO Jianfeng, QIN Chengjin, et al. Agricultural machinery path tracking stability control method under variable speed conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):18 - 24,32. (in Chinese)
[12] 杨然兵,吕士亭,张健,等. 履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):231 - 238,343.
YANG Ranbing, LÜ Shiting, ZHANG Jian,et al. Design and test of assisted driving operation system of tracked potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12):231 - 238,343. (in Chinese)
[13] NETTO M, BLOSSEVILLE J M, LUSETTI B, et al. A new robust control system with optimized use of the lane detection data for vehicle full lateral control under strong curvatures[C]//2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2006:1382 - 1387.
[14] 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)
[15] XUE J, DONG S, YAN J. Sliding mode variable structure based path following control of agricultural robots with differential drive[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 455 - 459.
[16] 赵治国,周良杰,朱强. 无人驾驶车辆路径跟踪控制预瞄距离自适应优化[J]. 机械工程学报,2018,54(24):166 - 173.
ZHAO Zhiguo,ZHOU Liangjie,ZHU Qiang. Adaptive optimisation of pre-aiming distance for path tracking control of unmanned vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(24):166 - 173. (in Chinese)
[17] 祝青园,程家琪,陈轩伟,等. 无人驾驶铰接转向车辆路径跟踪控制研究综述[J]. 农业机械学报,2024,55(1):1 - 21.
ZHU Qingyuan, CHENG Jiaqi, CHEN Xuanwei, et al. Review on path tracking control of unmanned articulated steering vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):1 - 21. (in Chinese)
[18] YANG Y, LI Y, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106760.
[19] 吴才聪,吴思贤,文龙,等. 拖拉机自动导航变曲度路径跟踪控制[J]. 农业工程学报,2022,38(21):1 - 7.
WU Caicong, WU Sixian, WEN Long, et al. Variable curvature path tracking control for the automatic navigation of tractors [J]. Transactions of the CSAE,2022,38(21):1 - 7. (in Chinese)
[20] 张闻宇,胡力文,王辉,等. 基于 B 样条优化的改进纯追踪农机导航曲线跟踪方法[J]. 农业机械学报,2024,55(9):42 - 51,115.
ZHANG Wenyu, HU Liwen, WANG Hui, et al. Improved pure pursuit agricultural machinery navigation curve path tracking method based on B-spline optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):42 - 51,115. (in Chinese)
[21] 付小波,韩增德,韩科立,等. 基于粒子群算法改进的轮式收获机纯追踪模型路径跟踪研究[J]. 农业工程,2023,13(7):105 - 112.
FU Xiaobo,HAN Zengde,HAN Keli,et al. Path tracking of improved pure pursuit model of wheeled harvesterb ased on PSO algorithm[J]. Agricultural Engineering,2023,13(7):105 - 112. (in Chinese)
[22] 陈智博,文龙,杨卫中,等. 基于 DF2204 无级变速拖拉机的农机无人驾驶系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19):1 - 9.
CHEN Zhibo, WEN Long, YANG Weizhong, et al. Development of the unmanned driving system for agricultural machinery based on DF2204 continuously variable transmission tractor[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(19):1 - 9. (in Chinese)
[23] FU J, FU Z, SONG S. Power balance control based on full state feedback for a fuel-cell hybrid electric vehicle[J]. Asian Journal of Control, 2021, 23(6): 2693 - 2708.

[24] RIBEIRO A M, FIORAVANTI A R, MOUTINHO A, et al. Nonlinear state-feedback design for vehicle lateral control using sum-of-squares programming[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(3): 743 - 769.
[25] SHAO P, MA X, YAN B, et al. Structural state feedback gain-scheduled tracking control based on linear parameter varying system of morphing wing UAV[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024,362(1): 107355.
[26] 白晓平,胡静涛,高雷,等.农机导航自校正模型控制方法研究[J].农业机械学报,2015,46(2):1 - 7.
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(2):1 - 7. (in Chinese)
[27] 陈仲举,谢斌,罗振豪,等.无人驾驶电动拖拉机犁耕机组路径跟踪与耕深模糊控制策略[J].农业机械学报,2024,55(12):491 - 504.
CHEN Zhongju,XIE Bin,LUO Zhenhao,et al. Fuzzy control strategy for path tracking-tillage depth of unmanned electric tractor ploughing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(12):491 - 504. (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] 张培培,杨自栋,赵相君.拖拉机-牵引式农机具的运动建模与跟踪控制[J].中国农机化学报,2021,42(4):128 - 133.
ZHANG Peipei, YANG Zidong, ZHAO Xiangjun. Motion modelling and tracking control of tractor - drawn agricultural implements[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(4):128 - 133. (in Chinese)
[30] 陈亮,秦兆博,孔伟伟,等.基于最优前轮侧偏力的智能汽车 LQR 横向控制[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(9):906 - 912.
CHEN Liang,QIN Zhaobo,KONG Weiwei,et al. Lateral control of intelligent vehicle LQR based on optimal front wheel lateral deflection[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition),2021,61(9):906 - 912. (in Chinese)

(上接第 91 页)

[14] KHAN L, KHATOON A, GAUR P, et al. Speed control of wheeled mobile robot by nature-inspired social spider algorithm-based PID controller[J]. Processes, 2023,11(4):1202.
[15] ZHANG Hongyuan, HAN Mingjuan, MI Yajie, et al. Research and implementation of intelligent control system for grassland grazing robotic vehicle[J]. Electronics, 2023,12(14):3078.
[16] 秦贵, 刘晓明, 郭建业, 等. 大棚蔬菜生产栽植机械化技术试验示范[J]. 农业工程, 2014,4(增刊 2):41 - 44,48.
QIN Gui, LIU Xiaoming, GUO Jianye, et al. Experiment and demonstration of planting mechanization technology for greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Engineering, 2014,4(Supp. 2):41 - 44,48. (in Chinese)
[17] KUMMUAL B N, KOTA V R. Design of MFA - PSO based fractional order PID controller for effective torque controlled BLDC motor[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022,49:101644.
[18] ELTOUM A M, HUSSEIN A, ABIDO M A. Hybrid fuzzy fractional-order PID-based speed control for brushless DC motor[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021,46(10):9423 - 9435.
[19] 许景辉, 王雷, 谭小强, 等. 基于 SOA 优化 PID 控制参数的智能灌溉控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(4): 261 - 267.
XU Jinghui, WANG Lei, TAN Xiaoqiang, et al. Application of PID control based on SOA optimization in intelligent irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):261 - 267. (in Chinese)
[20] ZHENG Haiyan, ABID Y. Optimization algorithm for PID control parameters of electrical equipment in rural electric drainage and irrigation stations[J]. Mobile Information Systems, 2022,2022:4268662.
[21] ZHANG Zhizhou, LI Yang. An AEFA-based optimum design of fuzzy PID controller for attitude control flywheel with BLDC motor[J]. Aerospace, 2022,9(12):789.
[22] 曾雄飞. 基于粒子群算法优化 BP 神经网络的 PID 控制算法[J]. 电子设计工程,2022,30(11):69 - 73,78.
ZENG Xiongfei. The PID control algorithm based on partie swarm optimization optimized BP neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2022,30(11):69 - 73,78. (in Chinese)
[23] XUE Huan, LI Tao, LI Jie, et al. Multi-objective optimization for turning process of 304 stainless steel based on dung beetle optimizer-back propagation neural network and improved particle swarm optimization[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024,33(8):3787 - 3800.
[24] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023,79(7):7305 - 7336.
[25] HE Jiachen, FU Lihui. Robot path planning based on improved dung beetle optimizer algorithm[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024,46(4):235.
[26] GUO Xinhua, QIN Xiao, ZHANG Qing, et al. Speaker recognition based on dung beetle optimized CNN[J]. Applied Sciences, 2023,13(17):9787.