doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.12.047

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研究

陈仲举[1,2]　谢　斌[1,2]　罗振豪[1,2]　刘楷东[1,2]　张胜利[3]　温昌凯[2,4]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 北京 100083;
3. 比亚迪股份有限公司产品规划及汽车新技术研究院, 深圳 518112;
4. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 田间土壤比阻多变、地块凹凸不平造成拖拉机在犁耕工况下行驶速度和牵引阻力大幅波动,传统拖拉机无人作业系统难以满足路径跟踪精度和耕深均匀性的农艺要求。本文系统分析了无人驾驶电动拖拉机犁耕机组作业特性,提出了拖拉机犁耕机组路径跟踪与耕深模糊控制策略,包括模糊 Stanley 路径跟踪控制方法和预估补偿变论域模糊 PID 耕深控制方法,兼顾了拖拉机重负载犁耕工况下的犁耕深度与行驶速度,提高了电液悬挂系统的耕深均匀性和无人驾驶系统的直线性。为验证所提控制策略的有效性,搭建无人驾驶电动拖拉机犁耕机组试验平台,开展田间路径跟踪和犁耕试验。试验结果表明:本文提出的控制策略能适应复杂多变的田间环境,路径跟踪作业最大横向偏差不大于 0.042 m,犁耕作业横向偏差标准差不大于 0.086 m;行驶速度均值保持稳定,平均绝对误差为 0.16 km/h,平均相对误差为 4.38%;耕深变异系数均值为 9.29%,相较于模糊 PID 算法降低 14.57%。本文提出的控制策略可根据不同土壤比阻、地块凹凸程度和牵引阻力,提高拖拉机犁耕作业的耕深均匀性和导航直线性,具有良好的适应性和鲁棒性,满足拖拉机犁耕作业农艺需求,为实现无人驾驶电动拖拉机多参数控制提供了参考。

关键词: 无人驾驶; 电动拖拉机; 路径跟踪; 电液悬挂; 犁耕作业; 模糊控制

中图分类号: S219.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)12-0491-14　　**OSID**:

Fuzzy Control Strategy for Path Tracking – Tillage Depth of Unmanned Electric Tractor Ploughing Unit

CHEN Zhongju[1,2]　XIE Bin[1,2]　LUO Zhenhao[1,2]　LIU Kaidong[1,2]　ZHANG Shengli[3]　WEN Changkai[2,4]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Product Planning and Automotive New Technology Research Institute of BYD Co., Ltd.*, *Shenzhen* 518122, *China*
4. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Variable specific resistance of field soil and unevenness of the plot cause the tractor driving speed and traction resistance to fluctuate greatly under the ploughing condition, and the traditional unmanned tractor operation system is difficult to meet the agronomic requirements of path tracking accuracy and ploughing depth uniformity. The operation characteristics of unmanned electric tractor ploughing unit were systematically analyzed, and a fuzzy control strategy for tractor ploughing unit path tracking and ploughing depth was proposed, including the fuzzy Stanley path tracking control method and the predictive compensation variable-domain fuzzy PID ploughing depth control method, which took into account the ploughing depth and driving speed under the ploughing condition of the tractor with heavy loads, and improved the ploughing depth uniformity and the straightness of unmanned system of electro-hydraulic suspension. In order to verify the effectiveness of the proposed control strategy, a test platform for the ploughing unit of unmanned electric tractor was set up to carry out field path tracking and ploughing tests. The test results showed that the control strategy proposed can adapt to the complex and variable field environment, the maximum lateral deviation of the path tracking operation was no more than

收稿日期: 2024-01-19　修回日期: 2024-02-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(52272444)
作者简介: 陈仲举(1999—),男,硕士生,主要从事电动拖拉机智能化设计研究,E-mail: zhongju_chen@126.com
通信作者: 谢斌(1973—),男,教授,博士,主要从事拖拉机智能化及农业机器人研究,E-mail: xiebincau@126.com

0.042 m, and the standard deviation of lateral deviation of ploughing operation was no more than 0.086 m; the mean value of the driving speed remained stable, with an average absolute error of 0.16 km/h and an average relative error of 4.38%; the mean value of the coefficient of variation of ploughing depth was 9.29%, which was 14.29% lower than that of the fuzzy PID algorithm. A control strategy proposed can enhance the ploughing depth uniformity and navigation linearity of tractor ploughing operation on the basis of different soil specific resistance, the degree of concavity and convexity of the plot, and the magnitude of traction resistance, with excellent adaptability and robustness to satisfy the agronomic requirements of tractor ploughing operation, which provided a reference for the implementation of the multi-parameter control of the unmanned electric tractor.

Key words: autonomous driving; electric tractor; path tracking; electro-hydraulic suspension; plowing operation; fuzzy control

0 引言

随着农业机械智能化的发展[1],拖拉机无人驾驶及自动作业技术可有效提高作业精度与作业效率[2]。为提高无人驾驶拖拉机犁耕作业质量,路径跟踪与耕深双参数的控制显得尤为重要,可进一步改善拖拉机的作业效率与能源利用率[3]。

相关学者对无人驾驶拖拉机路径跟踪控制方法开展了研究[4-7],实现了无人驾驶拖拉机田间的自主导航控制,然而并未考虑轨迹跟踪中犁耕机组受到频繁突变的犁耕阻力、轮胎-土壤互相作用等干扰因素对拖拉机行驶稳定性的影响[8]。

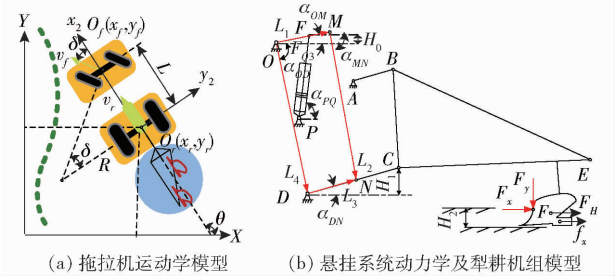
电液悬挂耕深调节系统是无人电动拖拉机的一个关键子系统[9-10],可调节农机具高度和入土角度,直接影响犁耕作业的质量[11-12]。耕深调节包括单因素(阻力、位置、滑转率)独立和多因素综合调节。其中,力位综合调节兼顾了影响耕深均匀性的牵引阻力和犁耕深度,广泛应用于农用机械领域[13]。文献[14-16]研究了力位综合调节控制效果,但力位综合调节受到固定权重模糊论域的影响,论域不能自适应犁耕阻力[17],无法在时变的犁耕深度、牵引阻力和行驶速度的需求下,完成无人驾驶电动拖拉机的犁耕作业[18]。

因此,在拖拉机田间路径跟踪犁耕时,土壤比阻不同、地面凹凸程度不同以及牵引负载波动等因素导致无人驾驶系统跟踪效果较差,诸多控制方案无法兼顾田间路径跟踪犁耕作业的直线性和耕深均匀性[19]。拖拉机无人导航系统和电液悬挂系统的协同控制研究较少[20],相关学者对于插秧机、播种机、收获机等农机设备进行了无人导航与自主作业的协同控制研究[21-24],具有借鉴意义,但与拖拉机犁耕机组作业的工况特性有较大差异,适用性仍需进一步验证。

本文提出一种无人驾驶电动拖拉机犁耕机组的路径跟踪与耕深模糊控制策略。基于 Stanley 路径跟踪控制与模糊控制,形成一个动态可调增益系数的路径跟踪控制方法;并在力位控制中整合变论域自动缩放和 Smith 预估补偿系统时滞控制方法,提出预估补偿变论域模糊 PID 力位综合耕深调节方法。搭建无人驾驶电动拖拉机犁耕机组试验平台,开展田间试验验证该控制策略的可行性和有效性。

1 无人驾驶犁耕机组动力学分析

本文研究对象为无人驾驶电动拖拉机犁耕机组。其中无人驾驶系统包括前轮转向系统与后轮驱动系统,电液悬挂系统包括电液悬挂装置和犁耕机具,如图 1 所示。



(a) 拖拉机运动学模型 (b) 悬挂系统动力学及犁耕机组模型

图 1 无人驾驶电动拖拉机及犁耕机组模型

Fig. 1 Unmanned electric tractor and ploughing unit model

1.1 拖拉机运动学模型

在笛卡尔世界坐标系中建立拖拉机运动学模型,从几何学角度分析二维平面中拖拉机的相对位置和前后轴中心点速度随时间的变化关系。以正北方向为 Y 轴正方向,X 轴垂直 Y 轴方向,取 X 轴向右为正方向,建立如图 1a 所示的拖拉机二轮车运动学模型。其中,$O_f(x_f,y_f)$ 和 $O_r(x_r,y_r)$ 分别为拖拉机前、后轴中心的绝对坐标,v_r 和 R 分别为拖拉机后轴中心的速度和转弯半径,L 为拖拉机轴距,δ 为前轮转角,θ 为航向角。在运动学分析中,假设拖拉机进行转向时为纯滚动运动,拖拉机车身及悬架是刚性的,不考虑拖拉机出现侧滑、俯仰等现象,行驶速度平稳,忽略空气动力学和转弯时因惯性产生的轮胎侧偏等因素,搭建一种非完整约束的理想模型,满足阿克曼几何学原理。本文研究的电动拖拉机满足二自由度自行车模型,在真实反映运动特性的同时

简化了数学模型。

对拖拉机在水平面的运动进行分析，后轴中心速度为

$$v_r = \dot{x}_r\cos\theta + \dot{y}_r\sin\theta \tag{1}$$

建立前轮转向、后轮驱动非完整约束方程为

$$\begin{cases}\dot{x}_f\sin(\theta+\delta) - \dot{y}_f\cos(\theta+\delta) = 0\\ \dot{x}_r\sin\theta - \dot{y}_r\cos\theta = 0\end{cases} \tag{2}$$

根据阿克曼转向理论可知拖拉机转向过程中的几何关系为

$$\begin{cases}x_f = x_r + L\cos\theta\\ y_f = y_r + L\sin\theta\end{cases} \tag{3}$$

已知拖拉机轴距，通过横摆角速度 ω 和后轴中心纵向速度的关系，可得出前轮转向过程中的转向半径和前轮转角为

$$\begin{cases}\omega = \dfrac{v_r}{L}\tan\delta\\ R = \dfrac{v_r}{\omega}\\ \delta = \arctan\dfrac{L}{R}\end{cases} \tag{4}$$

由上述分析可得电动拖拉机运动学模型为

$$\begin{bmatrix}x'(t)\\ y'(t)\\ \theta'(t)\\ \delta'(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\\ \dfrac{\tan\delta}{L}\\ 0\end{bmatrix}v_r + \begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 1\end{bmatrix}\delta'(t) \tag{5}$$

其中，$[x'(t)\ \ y'(t)\ \ \theta'(t)]^{\mathrm{T}}$ 为状态量，$[v_r\ \ \delta'(t)]^{\mathrm{T}}$ 为控制输入量。

由式(5)可知，通过控制电动拖拉机后轴中心速度和前轮转角，可实现路径跟踪过程中位置和行驶航向的改变。

1.2　悬挂系统动力学模型

在电动拖拉机电液悬挂系统中，由继电器控制电液比例阀开度和流速以改变液压缸伸缩量，进而调整农机具位置和犁耕深度。电动拖拉机电液悬挂系统与农机具如图 1b 所示。在四连杆机构 *OMND* 中，*OM* 为提升臂，*MN* 为提升立柱，*DN* 为下拉杆，*OD* 为车架，提升立柱在下拉杆中与点 *N* 连接，L_1、L_2、L_3、L_4 为上述四连杆矢量模(长度)；矢量方向如图 1b 所示，各矢量与水平方向的夹角分别为 α_{OM}、α_{MN}、α_{DN}、α_{OD}。此外，*FP* 为液压缸，连接在提升臂中点 *F*。闭环四连杆结构，矢量和为零，因此采用复数矢量形式，联立欧拉公式可表示为

$$\begin{cases}L_1e^{i\alpha_{OM}} + L_2e^{i\alpha_{MN}} - L_3e^{i\alpha_{DN}} - L_4e^{i\alpha_{OD}} = 0\\ e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\beta\end{cases} \tag{6}$$

分离欧拉公式实部和虚部，消除 α_{MN}、α_{OD} 可得

$$\sin\alpha_{OM} = \frac{L_3}{L_1}\sin\alpha_{DN} - \frac{L_3}{L_4}\cos(\alpha_{OM}-\alpha_{DN}) + \frac{L_1^2 - L_2^2 + L_3^2 + L_4^2}{2L_1L_4} \tag{7}$$

设液压缸与垂直方向夹角为 α_{PQ}，液压缸位移变化量为 Δx_{FP}，液压缸在垂直方向的位移变化量为 H_0，下拉杆与农机具铰接点离地距离为 H_1，由三角函数可得

$$\alpha_{OM} = \arcsin\frac{2\Delta x_{FP}\cos\alpha_{PQ}}{L_1} \tag{8}$$

拖拉机电液悬挂系统中各连杆长度为固定量，可通过拉线位移传感器和角度传感器获得液压缸位移和连杆角度变化量。

综上可知，拖拉机下拉杆与农机具铰接点离地距离 H_1 与液压缸位移 x_{PF} 为线性相关。实际拖拉机犁耕工况中，为了消除结构件微小形变、轮胎压陷等影响，建立带有误差补偿系数 C_1 的数学模型为

$$H_1 = 2L_3\sin\alpha_{DN} = k_1x_{PF} + C_1 \tag{9}$$

式中　k_1——土壤比阻

拖拉机犁耕工况下，农机具犁耕阻力主要与犁体工作曲面、刃口锋利程度、行驶速度、耕作深度和犁耕宽度相关。犁体所受的综合阻力与耕作深度 H_2 呈正相关，可分为水平阻力 F_x 和垂直阻力 F_y。垂直阻力 F_y 分解为垂直动态分量 F_m 和垂直稳态分量 F_b，其犁体土壤模型为

$$\begin{cases}F_x = B_1H_2\\ F_y = F_b + F_m = B_2H_2 + B_3\dfrac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)}\end{cases} \tag{10}$$

式中　B_1、B_2——稳态水平、垂直土壤作用力对耕深的比例系数，N/m

B_3——行驶速度决定的动态比例系数，N/m

$\dot{x}(t)$——电动拖拉机行驶速度，m/s

$\dot{y}(t)$——土壤对犁体作用力点的垂直运动速度，m/s

将水平阻力和垂直阻力的稳态分量在水平方向合成为总稳态土壤阻力 F_w；F_w 与水平方向夹角为 $w = \arctan(B_1/B_2)$；由于 $B_1 = k_1w_d$，可得水平阻力与土壤比阻 k_1、犁耕宽度 w_d、作用点 w 有关。设稳态土壤作用力对耕深的比例系数为 B，可得

$$\begin{cases}F_w = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}H_2 = BH_2\\ F_x = k_1w_dH_2\sqrt{1+\tan^2 w}\cos w\end{cases} \tag{11}$$

垂直阻力 F_y 中动态分量 F_m 主要与垂直动态阻力系数、行驶速度 $\dot{x}(t)$ 有关，若 $\dot{x}(t)$ 恒定，此时

动态分量仅受行驶速度影响。

农具所受的总水平阻力除了与土壤水平阻力 F_x 有关,还受到犁侧板与沟壁的水平摩擦力 f_x 影响,通常取 $f_x \approx F_x/6$。综上所示,农机具所受水平犁耕阻力 F_H 为

$$F_H = F_x + f_x = 1.17F_x \approx k_1 H_2 z w_d \tag{12}$$

式中 z——犁铧数

分析电动拖拉机犁耕工况的功率需求,保持低速匀速行驶,忽略空气和加速阻力的影响,可知行驶速度和农机具所受的水平土壤阻力关系为

$$\dot{x}(t) = \frac{P_q - P_l}{F_f + F_H} \tag{13}$$

式中 P_q——拖拉机牵引功率,kW

P_l——拖拉机损失功率,kW

F_f——拖拉机牵引阻力,N

由式(6)~(13)可以得出液压缸位移与犁耕深度、水平犁耕阻力与犁耕深度、犁耕深度与行驶速度之间的关系,为后文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中,通过调节行驶速度和犁耕深度来改变牵引阻力提供理论依据。

2 路径追踪-耕深模糊控制策略

为研究无人驾驶电动拖拉机在犁耕工况下,土壤比阻突变、牵引负载剧烈波动导致拖拉机直线犁耕精度低和耕深均匀差的问题,本文提出了路径跟踪与耕深模糊控制策略,包括模糊 Stanley 路径跟踪控制方法和预估补偿变论域模糊 PID 耕深控制方法。

在重负载犁耕工况下,控制策略优先降低拖拉机行驶速度,在保证犁耕深度不变的情况下,使电动拖拉机完成大牵引阻力地块的犁耕作业;在犁耕极限工况下,若拖拉机降速行驶的牵引阻力仍过大,则降低犁耕深度以减小牵引阻力,提高拖拉机整车通过性;当拖拉机驶出复杂地块后,再次以目标行驶速度、犁耕阻力和牵引速度完成后续犁耕作业。

本文提出的控制策略以行驶速度和犁耕深度为控制目标,针对驱动电机转速和液压缸位移两个因素对电动拖拉机轮边电机行驶系统和电液悬挂系统进行控制,兼顾拖拉机犁耕工况下的路径跟踪和耕深控制,提高无人驾驶系统直线性和电液悬挂系统耕深均匀性。控制策略原理图如图 2 所示。

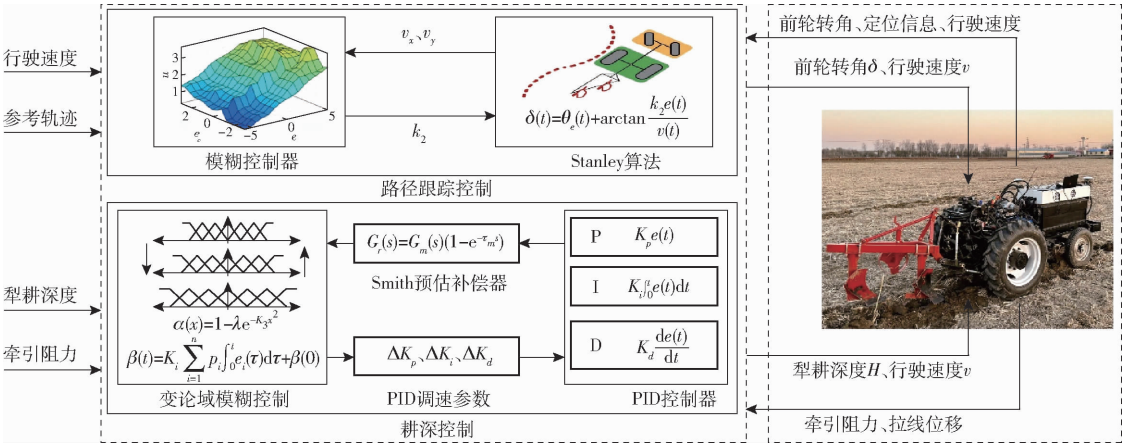


图 2 无人驾驶电动拖拉机路径跟踪与耕深模糊控制策略原理图

Fig. 2 Principles of fuzzy control strategy for path tracking - tillage depth of unmanned electric tractor

2.1 模糊 Stanley 路径跟踪控制方法

2.1.1 路径跟踪控制原理

Stanley 控制是根据电动拖拉机前轮中心航向偏差与参考路径的相对关系获得前轮转角控制量,使横向偏差迅速缩小为零,如图 3 所示。

Stanley 控制方法适用于低速行驶的车辆,在无横向偏差的情况下,可以保证前轮与参考轨迹平行直线行驶。当行驶过程产生横向偏差时,Stanley 控制通过非线性反馈输出的控制量控制转向系统收敛至零,收敛过程通过抑制前轮转向指令和测量的转向角度之间的差值实现,该方法具有指数收敛性。

由图 3 可知,根据电动拖拉机位姿与参考轨迹

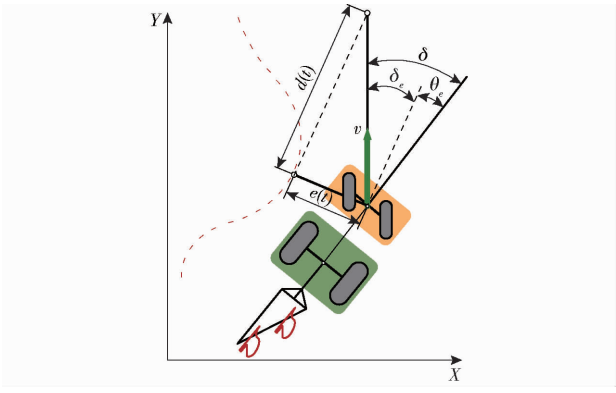


图 3 Stanley 路径跟踪控制方法原理图

Fig. 3 Principles of Stanley path tracking control method

的相对几何关系可得控制车辆方向盘转角的控制变量，其中包含横向偏差和航向偏差造成的转角，即

$$\delta(t)=\delta_e(t)+\delta_\theta(t) \tag{14}$$

式中　$\delta(t)$——前轮期望转角

$\delta_e(t)$——横向偏差造成的期望转角

$\delta_\theta(t)$——航向偏差造成的期望转角

忽略横向偏差时，此时前轮转角应与给定路径参考点的切线方向一致，θ_e 为拖拉机航向角与最近路径点切线方向之间的夹角。则在没有横向偏差的情况下，有

$$\delta_\theta(t)=\theta_e(t) \tag{15}$$

在不考虑航向偏差时，横向跟踪偏差越大，前轮转角越大，假设拖拉机预期轨迹在距离前轮 $d(t)$ 处与给定参考轨迹上最近点的切线相交，根据几何关系得非线性比例函数

$$\begin{cases}\delta_e(t)=\arctan\dfrac{e(t)}{d(t)}=\arctan\dfrac{k_2e(t)}{v(t)}\\ d(t)=\dfrac{v(t)}{k_2}\end{cases} \tag{16}$$

式中　$d(t)$——前视距离　　k_2——增益系数

$e(t)$——横向偏差

$v(t)$——行驶速度

电动拖拉机前轮转向角为

$$\delta(t)=\theta_e(t)+\arctan\frac{k_2e(t)}{v(t)} \tag{17}$$

综合上述控制因素，无人驾驶电动拖拉机行驶过程中，指向参考路径的前轮转角受到横向偏差、行驶速度和增益系数的限制。

2.1.2　路径跟踪控制方法

为解决电动拖拉机犁耕作业上线时横向、航向偏差较大，对行驶直线性的农艺要求等，应选取时变的增益系数满足拖拉机田间凹凸程度不同、牵引阻力波动等特征。因此基于拖拉机的纵向速度 v_x 和横向速度 v_y 结合模糊控制器计算增益系数，建立一个模仿拖拉机驾驶员行为的增益系数自适应方法。基于安全考虑，选择纵向、横向行驶速度初始论域时将其设定为拖拉机田间作业试验中的最大纵向行驶速度（±5 m/s）、横向行驶速度（±1 m/s），增益系数初始论域设为 ±2。模糊控制主要由模糊化、模糊推理以及解模糊 3 部分组成。各参数离散论域均取 [-3,3]，变量模糊子集{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}对应{NP，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}。可得模糊 Stanley 变量及其论域如表 1 所示。输入量分别为电动拖拉机纵向速度和横向速度，输出为 Stanley 控制的增益系数，选择 TRIMF 型隶属度函数，隶属度函数如图 4 所示。

表 1　模糊 Stanley 控制变量及其论域

Tab.1　Fuzzy Stanley control variables and their domains

变量	基本论域	离散论域	量化论域	量化因子和比例因子
v_x	[-5,5]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	0.60
v_y	[-1,1]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	1
k_2	[-2,2]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	0.67

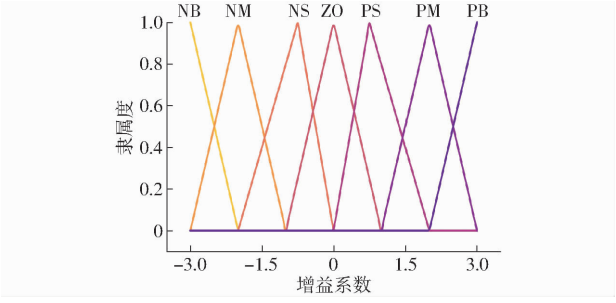


图 4　模糊 Stanley 控制增益系数隶属度函数

Fig.4　Fuzzy Stanley control gain coefficient membership function

在制定模糊控制规则时，结合拖拉机驾驶员的丰富经验：航向偏差小时，横向偏差越大，增益系数大；航向偏差与横向偏差对车轮转角影响方向相同，航向偏差大，增益系数小；航向偏差与横向偏差对车轮转角影响方向相反，航向偏差大，增益系数大；航向偏差大时，与横向偏差对前轮转角影响方向相同，增益系数小；航向偏差大时，与横向偏差对前轮转角影响方向相反，增益系数大。综合考虑电动拖拉机的工作特性和参数的内在联系，制定如表 2 所示的增益系数模糊控制规则。

表 2　模糊 Stanley 控制增益系数 k_2 模糊推理规则

Tab.2　Fuzzy Stanley control gain coefficient k_2 fuzzy inference rule

v_y \ v_x	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
NS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
ZO	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
PB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM

采用重心法进行解模糊判决得到推理结果，获得精准的控制效果，表达式为

$$u=\frac{\int x\mu_N(x)\,\mathrm{d}x}{\int\mu_N(x)\,\mathrm{d}x} \tag{18}$$

式中　u——模糊控制输出量

$\mu_N(x)$——模糊控制隶属度函数

2.2 预估补偿变论域模糊 PID 耕深控制方法

无人驾驶电动拖拉机电液悬挂系统在整个犁耕工况会依据田间作业情况在位置控制和阻力控制之间切换调整,同时兼顾耕作深度与牵引阻力。本策略以力位综合控制为耕深调节的主要方式,权重系数 $a=1$ 时为位置控制,$a=0$ 为位置控制,$0<a<1$ 时为力位综合控制。3 种控制方式通过改变电动拖拉机犁耕深度或牵引阻力来调整行驶速度,进而使无人驾驶系统在路径跟踪控制中保持直线性。

2.2.1 模糊 PID

电动拖拉机电液悬挂系统是难以建立精确数学模型的非线性系统,传统基于数学模型的控制方法不适用于该系统。因此将拖拉机犁耕深度的控制转换为液压缸位移与犁耕深度对应关系的模糊控制。采用二输入三输出形式,即输入犁耕深度偏差 e 及偏差变化率 e_c,根据拖拉机电液悬挂系统要求和实际作业环境连续对 PID 控制中 K_p、K_i、K_d 进行参数修正,使电液悬挂系统性能稳定。修正后参数量表达式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \tag{19}$$

式中 K_p、K_i、K_d——PID 控制器参数

K_{p0}、K_{i0}、K_{d0}——PID 控制器参数初始值

ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d——PID 控制器调整参数

通过实车调试,在保证拖拉机行驶稳定性的前提下,选择模糊 PID 控制的基本论域、离散论域、量化论域以及量化因子和比例因子如表 3 所示。

为提高控制精度,将变量等级均划分为 7 级,分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB),隶属度选择 TRIMF 型函数。各变量隶属度函数如图 5 所示。

模糊控制规则是模糊控制的关键,这些规则是根据拖拉机犁耕工况下不同时刻的系统输入值及 3 个输出参数之间的内在联系,并结合拖拉机驾驶员田间犁耕经验建立的。根据拖拉机田间作业特点、电液悬挂系统数学模型和模糊 PID 控制输入输出参数之间的关系,制定如表 4 所示的模糊控制规则。

表 3 路径跟踪与耕深控制模糊 PID 变量及其论域

Tab. 3 Path tracking - tillage depth control fuzzy PID variables and their domains

变量	基本论域	离散论域	量化论域	量化因子和比例因子
e	[-6,6]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	0.5
e_c	[-1.2,1.2]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	2.5
ΔK_p	[-0.09,0.09]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	0.03
ΔK_i	[-0.3,0.3]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	0.1
ΔK_d	[-0.0015, 0.0015]	{-3,-2,-1,0,1,2,3}	[-3,3]	0.0005

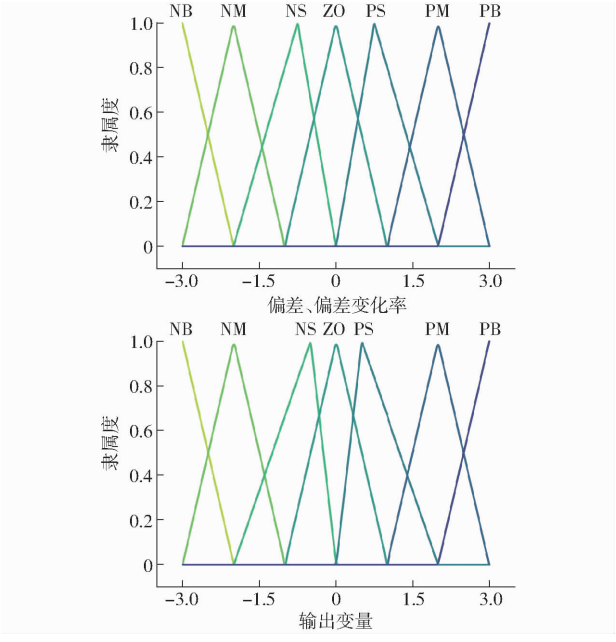


图 5 路径跟踪与耕深控制模糊控制变量隶属度函数

Fig. 5 Path tracking - tillage depth control fuzzy control variable affiliation function

表 4 路径跟踪与耕深控制 $\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ 模糊控制规则

Tab. 4 Path tracking - tillage depth control $\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ fuzzy control rules

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/ZO/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

采用重心法进行模糊控制器的解模糊判决，获得输出隶属函数的运算结果，表达式为式(18)。

2.2.2　变论域模糊 PID

无人驾驶电动拖拉机在土壤比阻不均匀的耕地进行犁耕作业时，牵引阻力波动会导致行驶速度、犁耕深度变化，控制过程中固定的输入输出论域不能充分发挥模糊控制的效果。模糊 PID 控制器中模糊控制的论域范围是预先设置的，过大的论域输入会导致输出幅值较为振荡，稳定性下降，过小的论域则不能充分利用整个论域的控制规则，控制精度不足。变论域模糊控制是相对于传统模糊控制的固定论域而言的[25-26]，即通过引入伸缩因子在控制过程中随着系统误差的变化同时来膨胀或收缩模糊控制器的论域范围，等同于增加了输入、输出的控制规则，增强耕深控制策略在无人驾驶电动拖拉机犁耕工况下的自适应能力。变论域原理如图 6 所示。

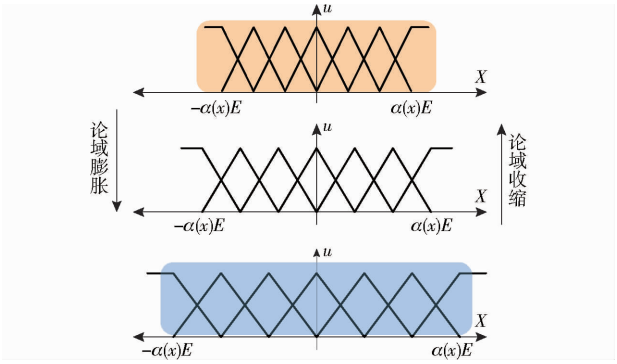


图 6　变论域控制原理图

Fig. 6　Variable theory domain control principle

本文采用函数型变论域模糊 PID 控制，论域输入、输出伸缩因子 $\alpha(x)$、$\beta(t)$ 为指数形式变化，公式为

$$\alpha(x)=1-\lambda e^{-k_3x^2} \tag{20}$$

$$\beta(t)=K_i\sum_{i=1}^{n}p_i\int_0^t e_i(\tau)\mathrm{d}\tau+\beta(0) \tag{21}$$

式中　$e_i(\tau)$——矢量误差

$\beta(0)$——输出变量论域伸缩因子的初值

p_i——常数向量模

通常函数式系数 $\lambda\in(0,1)$，λ 越大，$\alpha(x)$ 越小，但 $\alpha(x)$ 变化越剧烈，论域压缩很明显，系统响应很快；指数系数 $k_3>0$，k_3 越大，$\alpha(x)$ 越大。

2.2.3　预估补偿变论域模糊 PID

为解决拖拉机在犁耕作业时电液悬挂系统响应滞后导致牵引阻力和行驶速度波动和超调大的问题，在耕深控制策略中加入 Smith 预估补偿控制方法，对电液悬挂系统的滞后加以补偿，削弱振荡和超调等不利影响，提高稳定性。Smith 预估补偿器是在时滞系统中为减小延迟对控制系统性能影响的控制方法[27-28]，其原理如图 7 所示。首先预先估计出拖拉机被控过程的动态模型，将 Smith 预估补偿器与拖拉机原控制系统的被控对象电液比例阀并联，对比例阀滞后时间进行补偿。在电液悬挂系统中加入 Smith 预估补偿器 $G_r(s)$，使系统提前了 τ_m 时刻，消除了特征方程中的滞后环节 $e^{-\tau s}$ 部分，使得滞后时间的被控量提前反馈到控制器的输入端。ECU 控制器提前发出指令，减弱电液悬挂系统闭环回路中时滞引起的超调或者振荡。

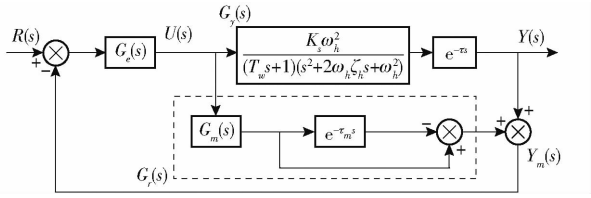


图 7　Smith 预估补偿控制原理图

Fig. 7　Smith's predictive compensation control principle

$G_e(s)$ 为被控对象电液比例阀非时滞部分的传递函数，τ 为被控对象的时滞因子，$G_m(s)$ 为预估模型不包含纯时滞特性的传递函数，τ_m 为预估模型的时滞因子，$R(s)$ 为电液悬挂系统输入，$Y(s)$ 为电液悬挂系统输出，$Y_m(s)$ 为预估的电液悬挂系统输出。电液悬挂系统中提升液压缸位移对阀芯位移的传递函数 $G_y(s)$ 为

$$G_y(s)=\frac{K_s\omega_h^2}{(T_ws+1)(s^2+2\omega_h\zeta_hs+\omega_h^2)} \tag{22}$$

其中　$K_s=\dfrac{K_qA}{K_{ce}G}$　　$T_w=\dfrac{A^2}{K_{ce}G}$

式中　K_q——阀流量增益，m^2/s

A——液压缸有效面积，m^2

K_{ce}——总泄漏系数，$m^5/(N\cdot s)$

G——负载弹簧刚度，N/m

ω_h——液压系统固有角速度，rad/s

ζ_h——阻尼系数

上述电液比例阀技术参数由出厂检测报告中提供。若实现完全补偿，引入预估补偿器后，其传递函数表达式为

$$G_r(s)=G_m(s)(1-e^{-\tau_m s}) \tag{23}$$

经过补偿后电液悬挂系统的闭环传递函数表达式为

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{G_e(s)G_m(s)e^{-\tau s}}{1+G_e(s)[G_0(s)e^{-\tau s}+G_m(s)(1-e^{-\tau_m s})]} \tag{24}$$

Smith 预估补偿器中通常认为被控对象和预估模型相互匹配，则 $G_0(s)=G_m(s)$，$\tau_m=\tau$，整理可得

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{G_e(s)G_0(s)}{1+G_e(s)G_0(s)}e^{-\tau s} \tag{25}$$

拖拉机电液悬挂系统特征方程表达式为

$$1 + G_e(s)G_0(s) = 0 \tag{26}$$

Smith 预估补偿控制系统与无网络延迟的控制系统相比,推迟了控制过程,因此要达到相同的闭环回路稳定,电液悬挂系统中需加入 Smith 预估器后加速调节过程,控制作用有效增强。在拖拉机作业过程中,预估补偿变论域模糊 PID 控制器依据采集的信号,对其进行修正,输出信号调节液压缸伸缩量,从而控制犁耕深度变化,达到动态调节目的。该控制方法充分结合了变论域模糊 PID 控制与 Smith 预估补偿机制优势,减小了电液悬挂系统滞后性的同时增强了稳定性。

3 田间试验与结果分析

3.1 试验条件

针对无人驾驶电动拖拉机在道路运输和田间犁耕的作业需求,主要分为无人驾驶系统与电液悬挂系统,在课题组前期研制的 20 kW 无人驾驶电动拖拉机样机基础上,开展路径跟踪与耕深模糊控制策略试验。电动拖拉机样机如图 8 所示,整机主要参数如表 5 所示。



(a) 外形 (b) 调试

图 8 无人驾驶电动拖拉机样机

Fig. 8 Unmanned electric tractor prototype

电动拖拉机犁耕机组由线控底盘系统、轮边电机行驶系统、无人驾驶系统、电液悬挂系统和 1L－220 型农机具等组成。

表 5 无人驾驶电动拖拉机整机主要参数

Tab. 5 Main parameters of whole unmanned electric tractor

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 500×1 400×1 250
整车质量/kg	1 100
轴距/mm	1 387
最高行驶速度/(km·h^{-1})	15
额定牵引力/N	4 000
最小转弯半径/m	4.5
动力电池容量/(A·h)	460
作业时间/h	≥5
PTO 转速/(r·min^{-1})	540

电动拖拉机无人驾驶系统采集数据发送到上位机,确定位置和姿态信息,根据控制策略做出决策指令。进一步地,获得反馈信息作为下一时刻系统的输入值。电液悬挂系统通过 ECU 控制器和控制面板等组件采集和显示数据,并利用信号差值,依据预设的控制策略计算得出控制指令的输出量。改变电液比例阀开度和流速,实现双作用液压缸进行换向动作,驱动农机具执行动作。

综上所述,电动拖拉机无人驾驶系统和电液悬挂系统硬件平台及整体布局如图 9 所示。

3.2 试验设计

为验证本文提出的控制策略性能,在北京市精准农业基地开展田间实车试验验证。首先进行电动拖拉机无人驾驶运输作业直线段和曲线段的路径跟踪;其次,开展无人驾驶犁耕作业,为对比本文所提的控制方法,设置模糊 PID 算法作为对照组。拖拉机田间试验区域和犁耕场景如图 10 所示。

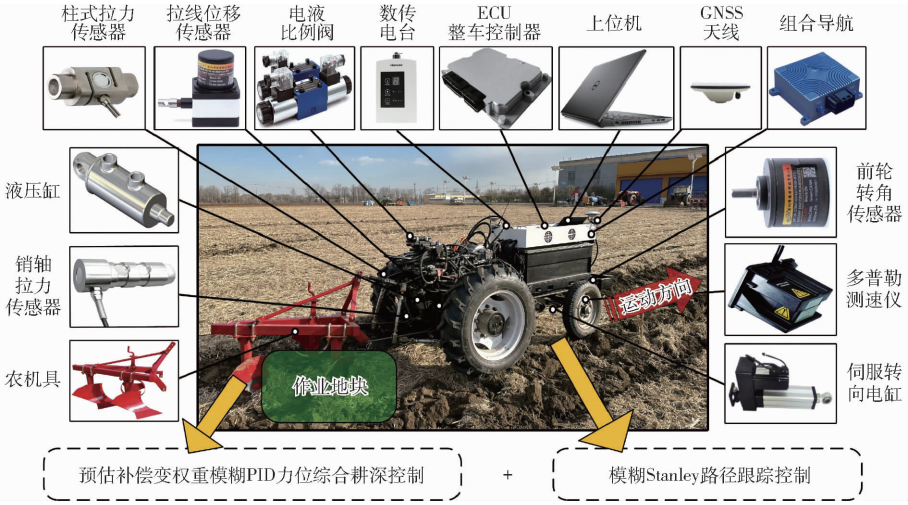
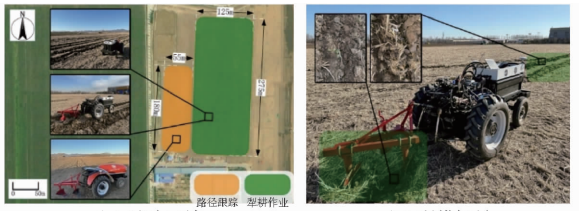


图 9 无人驾驶电动拖拉机犁耕机组整体布局

Fig. 9 Overall layout of ploughing unit of unmanned electric tractor



(a) 试验区域　　(b) 犁耕场景

图 10　无人驾驶电动拖拉机试验区域及犁耕场景

Fig. 10　Unmanned electric tractor test area and ploughing scenario

3.3　结果分析

3.3.1　田间路径跟踪

电动拖拉机在田间耕地完成运输作业的参考轨迹由直线段和曲线段组成，全长为 180 m，开展路径跟踪试验。拖拉机行驶轨迹如图 11 所示、横向位置偏差变化曲线如图 12 所示，统计结果如表 6 所示。

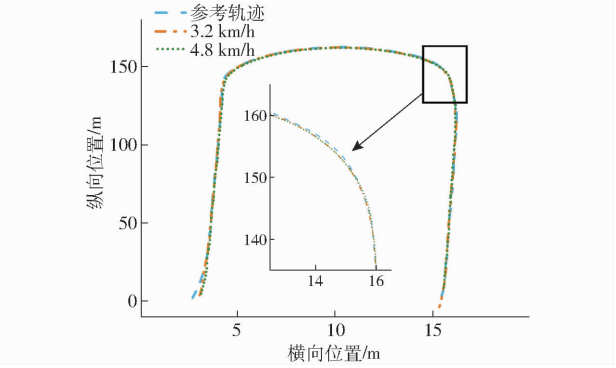


图 11　无人驾驶电动拖拉机路径跟踪轨迹

Fig. 11　Path tracking trajectory of unmanned electric tractor

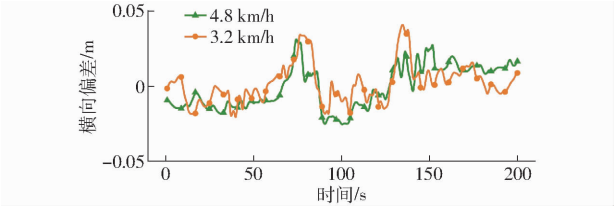


图 12　无人驾驶电动拖拉机路径跟踪横向偏差变化曲线

Fig. 12　Lateral deviation of path tracking for unmanned electric tractor

表 6　无人驾驶电动拖拉机路径跟踪横向偏差

Tab. 6　Lateral deviation of path tracking of unmanned electric tractor

速度/(km·h^{-1})	最大值/m	最小值/m	均值/m	标准差/m	平均绝对误差/m
4.8	0.033	−0.026	−0.002	0.015	0.002
3.2	0.042	−0.024	0.002	0.013	0.001

从图 11 可知，无人驾驶电动拖拉机在路径跟踪路段能平稳地沿参考轨迹行驶。在速度为 4.8 km/h 时，拖拉机行驶轨迹横向偏差的平均绝对误差为 0.002 m，3.2 km/h 行驶轨迹下的标准差为 0.013 m。结果表明拖拉机符合基于运动学模型的 Stanley 控制特性。电动拖拉机受转向结构和土壤环境的影响需时刻调整前轮转角，使得横向偏差在小范围波动，沿参考轨迹匀速行驶。

3.3.2　田间犁耕作业

(1) 犁耕作业轨迹

为验证无人驾驶电动拖拉机在犁耕工况下，无人驾驶系统的模糊 Stanley 控制方法在田间耕地凹凸程度不同、土壤比阻变化工作条件下保持直线稳定作业的能力，选择耕地路径规划直线段分别以 3 种行驶速度和 2 种犁耕深度开展试验。其中，无人驾驶电动拖拉机直线段的犁耕轨迹如图 13 所示，横向偏差分布如图 14 所示，横向偏差统计量如表 7 所示。

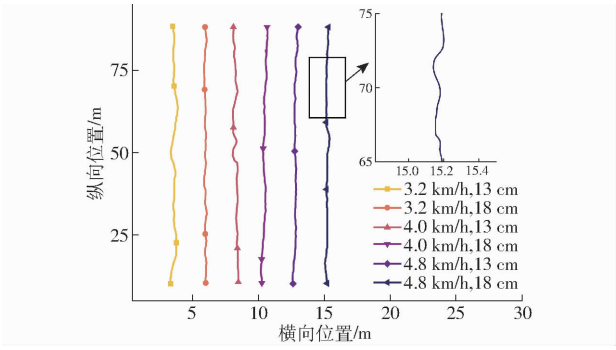


图 13　无人驾驶电动拖拉机犁耕作业轨迹

Fig. 13　Trajectory of ploughing operation of unmanned electric tractor

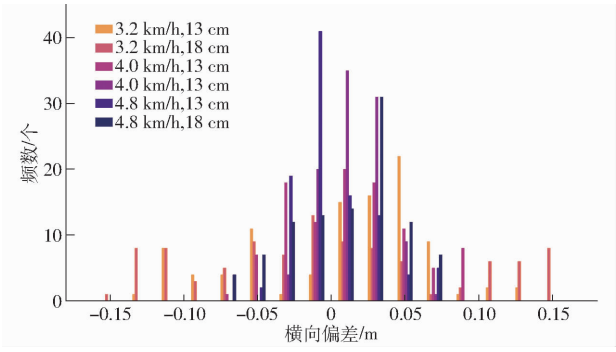


图 14　无人驾驶电动拖拉机犁耕作业横向偏差

Fig. 14　Lateral deviation of ploughing operation of unmanned electric tractor

表 7　无人驾驶犁耕工况横向偏差

Tab. 7　Lateral deviation for unmanned ploughing conditions

速度/(km·h^{-1})	耕深/cm	最大值/m	最小值/m	均值/m	标准差/m	平均绝对误差/m
3.2	13	0.127	−0.127	0.007	0.062	0.051
	18	0.160	−0.150	0.013	0.086	0.070
4.0	13	0.970	−0.063	0.014	0.041	0.033
	18	0.060	−0.032	0.015	0.020	0.017
4.8	13	0.074	−0.050	0.006	0.027	0.021
	18	0.074	−0.070	0.010	0.026	0.030

分析图 13、14 和表 7 中无人驾驶电动拖拉机在犁耕作业路段的横向偏差分布可得，在行驶速度 3.2、4.0、4.8 km/h 和犁耕深度 13、18 cm 共计 6 条轨迹下，无人驾驶电动拖拉机横向偏差均值最大值为 0.015 m，标准差最大值为 0.086 m，平均绝对误差最大值为 0.07 m，最大误差为 0.127 m。对比 3 种犁耕速度，电动拖拉机均能沿参考轨迹完成直线犁耕作业。这些统计结果验证了本文提出的基于模糊 Stanley 的路径跟踪控制方法的有效性。从图 14 也能发现，在横向偏差最大处存在短时轨迹偏航，但仍小于 0.15 m，满足直线犁耕作业要求。同时，即便在偏航时，本文路径跟踪控制策略仍能调整拖拉机航向，完成直线犁耕作业。造成偏航的潜在原因可能是土壤比阻突变、地面凹凸程度不同及牵引阻力突变。

（2）犁耕作业行驶速度影响

为验证电动拖拉机基于预估控制器的变论域模糊 PID 耕深控制策略对行驶速度稳定性的影响，设计 2 种目标耕深下拖拉机行驶速度试验。统计分析试验结果中，行驶速度稳定性曲线如图 15 所示，统计量如表 8 所示。

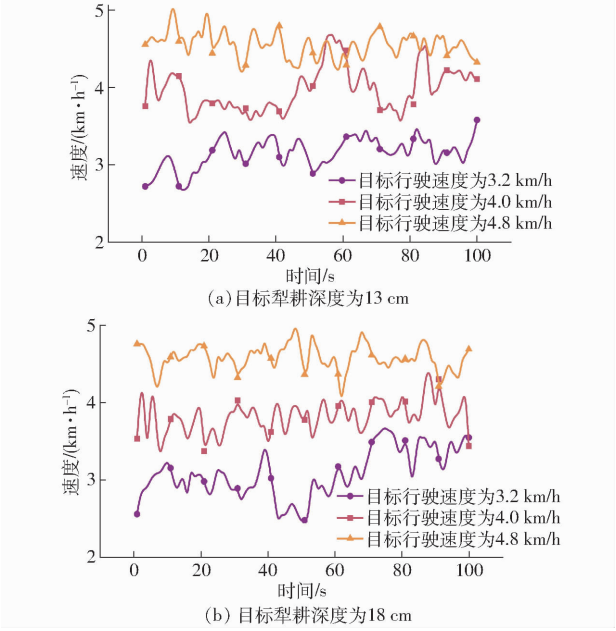


图 15 无人驾驶电动拖拉机犁耕工况行驶速度稳定性曲线

Fig. 15 Stability curves of driving speed under ploughing conditions for unmanned electric tractor

表 8 无人驾驶电动拖拉机犁耕工况行驶速度统计结果

Tab. 8 Driving speed for ploughing conditions of unmanned electric tractors

速度/(km·h⁻¹)	犁耕深度/cm	最大值/(km·h⁻¹)	最小值/(km·h⁻¹)	均值/(km·h⁻¹)	标准差/(km·h⁻¹)	平均绝对误差/(km·h⁻¹)	平均相对误差/%
3.2	13	3.679	2.437	3.086	0.317	0.257	8.327
	18	3.580	2.663	3.149	0.198	0.158	5.017
4.0	13	4.425	3.262	3.822	0.228	0.179	4.683
	18	4.696	3.478	3.979	0.294	0.086	2.161
4.8	13	4.992	3.947	4.578	0.183	0.137	2.992
	18	5.067	4.182	4.552	0.182	0.139	3.053

分析图 15 和表 8 可知，在 2 种犁耕深度下拖拉机的行驶速度在目标设定速度 3.2、4.0、4.8 km/h 波动。在犁耕深度为 13 cm 时，3 种行驶速度最大值为 3.679、4.425、4.992 km/h，犁耕深度为 18 cm 时，3 种行驶速度标准差分别为 0.198、0.294、0.182 km/h。拖拉机在犁耕工况行驶速度均值保持稳定，平均绝对误差为 0.16 km/h，平均相对误差为 4.38%；基本覆盖小功率拖拉机的犁耕作业速度要求，满足拖拉机犁耕作业需求。

（3）犁耕深度与牵引阻力

为验证电动拖拉机的路径跟踪与耕深控制策略作业效果，设定目标犁耕深度、行驶速度和牵引阻力开展试验，并设置模糊 PID 算法作为对照组；统计分析在 2 种控制方法下的数据，绘制出无人驾驶电动拖拉机犁耕工况牵引阻力、犁耕深度、行驶速度三者在不同目标速度和目标耕深下的三维关系图，如图 16 所示。

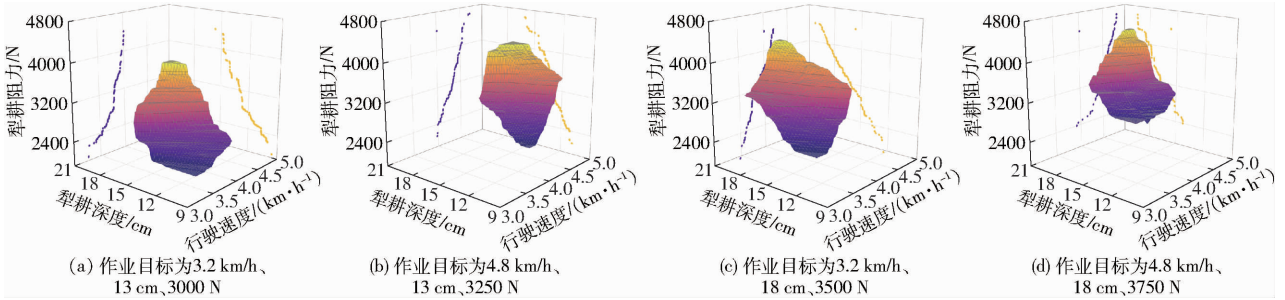


图 16 无人驾驶电动拖拉机犁耕工况阻力-耕深-速度关系曲面

Fig. 16 Resistance - ploughing depth - speed relationships for ploughing conditions of unmanned electric tractor

对比分析图 16a、16b 可知，电动拖拉机无人驾驶犁耕工况下，相同目标耕深时，目标速度为 4.8 km/h 的实际牵引阻力范围比 3.2 km/h 的范围更大，图 16c、16d 同理。对比分析图 16a、16c 可知，在相同目标速度时，目标耕深越大，实际牵引阻力范围会逐渐增大，对比分析图 16b、16d 可得出同样结论。此外，分析图 16a、16d 知，在目标耕深、行驶速度和牵引阻力同时增大的对比试验中，实际牵引阻力范围显著扩大。以上 4 组试验数据满足在电动拖拉机目标耕深恒定时，若行驶速度增加，则牵引阻力会随着上升；若拖拉机行驶速度恒定不变，增大拖拉机犁耕深度会导致牵引阻力增大。这一试验结果符合上文推导的拖拉机犁体土壤模型，也符合拖拉机驾驶员的田间驾驶经验。

分析无人驾驶电动拖拉机犁耕工况牵引阻力和犁耕深度的变化曲线，如图 17 所示，对试验结果进行统计分析，结果如表 9 所示。

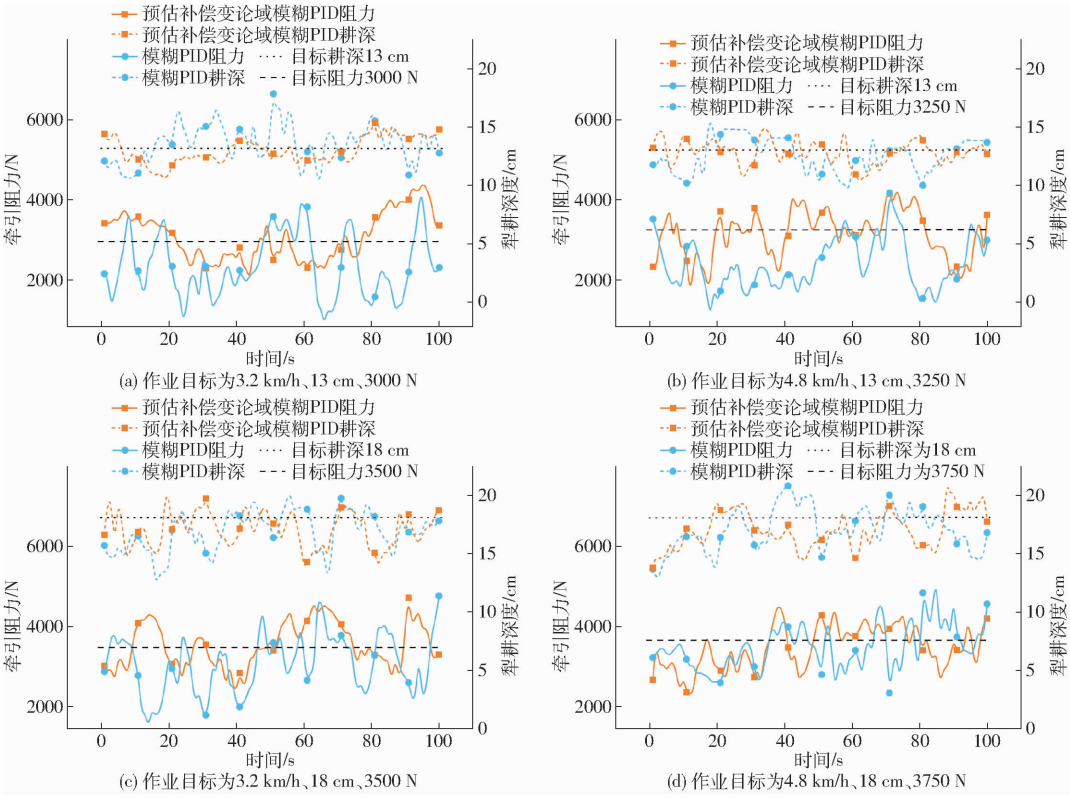


图 17　无人驾驶电动拖拉机犁耕工况阻力-耕深关系曲线

Fig. 17　Resistance – ploughing depth relationships for ploughing conditions of unmanned electric tractor

表 9　无人驾驶电动拖拉机犁耕工况阻力和耕深

Tab. 9　Resistance and tillage depth for ploughing conditions of unmanned electric tractor

作业目标	指标	控制策略	均值	标准差	平均绝对误差	最大值	最小值	耕深变异系数/%
3.2 km/h、13 cm、3 000 N	犁耕深度	预估补偿变论域模糊 PID	12.966 cm	1.135 cm	0.968 cm	15.416 cm	10.634 cm	8.8
		模糊 PID	13.578 cm	1.699 cm	1.388 cm	17.820 cm	10.261 cm	10.2
	牵引阻力	预估补偿变论域模糊 PID	3 074.585 N	595.094 N	513.969 N	4 407.424 N	1 980.161 N	
		模糊 PID	2 346.441 N	810.149 N	666.243 N	4 192.875 N	867.975 N	
4.8 km/h、13 cm、3 250 N	犁耕深度	预估补偿变论域模糊 PID	12.831 cm	1.102 cm	0.885 cm	14.861 cm	10.214 cm	8.6
		模糊 PID	12.557 cm	1.495 cm	1.258 cm	15.672 cm	9.505 cm	11.9
	牵引阻力	预估补偿变论域模糊 PID	3 142.169 N	616.705 N	498.201 N	4 268.804 N	1 602.561 N	
		模糊 PID	2 393.341 N	641.902 N	531.612 N	4 164.824 N	1 036.407 N	
3.2 km/h、18 cm、3 500 N	犁耕深度	预估补偿变论域模糊 PID	17.111 cm	1.563 cm	1.322 cm	20.071 cm	13.697 cm	9.1
		模糊 PID	16.891 cm	1.772 cm	1.452 cm	20.248 cm	12.422 cm	10.5
	牵引阻力	预估补偿变论域模糊 PID	3 529.865 N	569.701 N	458.502 N	4 719.242 N	2 399.944 N	
		模糊 PID	3 063.698 N	750.791 N	632.447 N	4 762.056 N	1 482.293 N	
4.8 km/h、18 cm、3 750 N	犁耕深度	预估补偿变论域模糊 PID	17.069 cm	1.633 cm	1.331 cm	21.342 cm	13.792 cm	9.6
		模糊 PID	17.137 cm	1.872 cm	1.509 cm	20.851 cm	12.933 cm	10.9
	牵引阻力	预估补偿变论域模糊 PID	3 462.646 N	557.431 N	473.681 N	4 513.125 N	2 317.875 N	
		模糊 PID	3 483.681 N	584.390 N	459.477 N	5 202.615 N	2 336.731 N	

分析图 17a 和表 9 可知,电动拖拉机在目标行驶速度为 3.2 km/h、犁耕深度为 13 cm 时,预估补偿变论域模糊 PID 算法调节的耕深曲线在 12.966 cm 附近波动;在牵引阻力-时间关系曲线中,平均牵引阻力为 3 074.585 N。对比模糊 PID 算法,前者的犁耕深度最大值降低 13.49%,牵引阻力均值提高 31.03%。

分析图 17b 和表 9 可知,电动拖拉机在目标作业速度为 4.8 km/h、犁耕深度为 13 cm 时,预估补偿变论域模糊 PID 控制调节的犁耕深度标准差为 1.102 cm;牵引阻力波动较小,均值为 3 142.169 N。对比模糊 PID 算法,前者的犁耕深度平均绝对误差减小 29.65%,牵引阻力标准差降低 3.96%。

分析图 17c 和表 9 可知,电动拖拉机在目标作业速度为 3.2 km/h、犁耕深度为 18 cm 时,预估补偿变论域模糊 PID 算法控制时,犁耕深度均值为 17.111 cm;牵引阻力在某些时刻出现骤变,标准差为 596.701 N。对比模糊 PID 算法,前者的犁耕深度标准差降低 12.14%,牵引阻力平均绝对误差降低 27.50%。

分析图 17d 和表 9 可知,电动拖拉机在目标作业速度为 4.8 km/h、犁耕深度为 18 cm 时,预估补偿变论域模糊 PID 控制模式下,犁耕深度均值为 17.069 cm,其中犁耕深度最大值为 21.342 cm;牵引阻力均值为 3 462.646 N。对比模糊 PID 算法,前者的犁耕深度平均绝对误差减小 11.79%,牵引阻力标准差降低 4.61%,峰值牵引阻力降低 15.28%。

此外,从表 9 分析可得,基于预估补偿变论域模糊 PID 算法的电动拖拉机耕深变异系数均值为 9.29%,相较于模糊 PID 算法降低 14.57%。犁耕深度均值和标准差等统计指标趋于稳定,满足 DB37/T 283—2000《农业机械作业质量 机械耕整地》要求。

上述试验结果表明,在无人驾驶电动拖拉机犁耕工况下,预估补偿变论域模糊 PID 控制方法能保持耕深均匀性,同时将犁耕阻力和行驶速度控制在目标阈值内。在变论域模糊 PID 控制方法的基础上,进一步利用 Smith 预估反馈器削弱时滞因子造成的滞后性影响。得益于变论域控制方法随耕深偏差的变化而自动缩放,当牵引阻力增大时,控制器通过降低行驶速度或减小犁耕深度,使得牵引阻力保持在目标区间。电动拖拉机犁耕作业耕深均匀性得到保障的同时也减缓了轮边驱动电机的负荷和冲击。

4 结论

(1)针对拖拉机犁耕工况下,土壤比阻多变、地块凹凸不平造成行驶速度和牵引阻力大幅波动,降低拖拉机路径跟踪精度和耕深均匀性的问题,提出了一种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。基于 Stanley 与模糊控制,形成一个动态可调增益系数的路径跟踪控制方法;并在力位控制中整合模糊 PID 控制、变论域控制和 Smith 预估补偿控制,提出预估补偿变论域模糊 PID 耕深控制方法。搭建无人驾驶犁耕机组试验平台,开展田间试验验证控制策略的可行性和有效性。

(2)路径跟踪与耕深模糊控制策略能够适应复杂多变的田间环境。路径跟踪作业最大横向偏差不大于 0.042 m,犁耕作业横向偏差标准差不大于 0.086 m;行驶速度均值保持稳定,平均绝对误差为 0.16 km/h,平均相对误差为 4.38%;控制策略可根据变化的土壤比阻、地块凹凸程度和牵引阻力提高耕深均匀性,耕深变异系数均值为 9.29%,相较于模糊 PID 算法降低 14.57%。

(3)所提出的无人驾驶电动拖拉机路径跟踪与耕深模糊控制策略兼顾了犁耕作业中田间土壤比阻突变、地块凹凸程度不同、瞬时负载波动等因素对控制系统的影响,对农艺生产具有参考价值,为无人驾驶电动拖拉机多参数联合控制与提高精细化农业耕作质量提供了参考。

参 考 文 献

[1] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. (in Chinese)

[2] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)

[3] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese)

[4] 吴才聪, 王东旭, 陈智博, 等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 42-48.
WU Caicong, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J].

Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 42 - 48. (in Chinese)
[5] 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)
[6] 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 11 - 19.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 11 - 19. (in Chinese)
[7] 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. Study on whole field path tracking of agricultural machinery based on fuzzy Stanley model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 43 - 48, 88. (in Chinese)
[8] 谢斌, 罗振豪, 宋正河, 等. 非道路车辆轮胎-土壤相互作用建模方法及试验技术综述[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 51 - 63.
XIE Bin, LUO Zhenhao, SONG Zhenghe, et al. Review of off-road vehicle tire - soil interaction modeling methods and experimental techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 51 - 63. (in Chinese)
[9] 张硕, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 后轮驱动大功率拖拉机牵引力-滑转率联合自动控制方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 47 - 53.
ZHANG Shuo, DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, et al. Integrated control method of traction & slip ratio for rear-driving high-power tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 47 - 53. (in Chinese)
[10] SUN X, LU Z, SONG Y, et al. Development status and research progress of a tractor electro-hydraulic hitch system[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1547.
[11] 赵艮权, 夏长高. 基于 SimulationX 的拖拉机滑转率控制研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(10): 240 - 245.
ZHAO Genquan, XIA Changgao. Research on tractor slip rate control based on SimulationX[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(10): 240 - 245. (in Chinese)
[12] 张硕, 武仲斌, 陈军, 等. 犁耕作业大马力拖拉机驱动轮滑转率控制方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 47 - 55.
ZHANG Shuo, WU Zhongbin, CHEN Jun, et al. Control method of driving wheel slip rate of high-power tractor for ploughing operation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15): 47 - 55. (in Chinese)
[13] 徐煌, 鲁植雄, 宋延东. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制策略研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(4): 879 - 883.
XU Huang, LU Zhixiong , SONG Yandong. Study on force-position regulation of tractor electro-hydraulic hitch system[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensi, 2013, 25(4): 879 - 883. (in Chinese)
[14] LIU C, ZHAO J, GU J, et al. Pressure control algorithm based on adaptive fuzzy PID with compensation correction for the tractor electronic hydraulic hitch[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3179.
[15] 翟志强, 陈一明, 朱少华, 等. 基于半实物仿真的丘陵山地拖拉机电液悬挂控制试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 328 - 337.
ZHAI Zhiqiang, CHEN Yiming, ZHU Shaohua, et al. Experiment on electro-hydraulic hitch control system for hilly and mountainous tractor based on semi-physical simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 328 - 337. (in Chinese)
[16] 李明生, 叶进, 宋海兰, 等. 拖拉机电液悬挂半物理仿真系统设计及试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(12): 14 - 21.
LI Mingsheng, YE Jin, SONG Hailan, et al. Design and test of a semi-physical simulation system for the tractor electro-hydraulic hitch[J]. Journal of Southwest University(Natural Science), 2018, 40(12): 14 - 21. (in Chinese)
[17] 王素玉, 刘站, 李瑞川, 等. 基于土壤比阻的大功率拖拉机变权重力位综合控制研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 351 - 357.
WANG Suyu, LIU Zhan, LI Ruichuan, et al. Variable weight force-position mixed control of high-power tractor based on soil specific resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 351 - 357. (in Chinese)
[18] SOITINAHO R, OKSANEN T. Local navigation and obstacle avoidance for an agricultural tractor with nonlinear model predictive control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31(5): 2043 - 2054.
[19] 夏俊芳, 李栋, 刘国阳, 等. 基于角度检测的拖拉机悬挂耕深电液监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 386 - 395.
XIA Junfang, LI Dong, LIU Guoyang, et al. Design and test of electro-hydraulic monitoring device for hitch tillage depth based on measurement of tractor pitch angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 386 - 395. (in Chinese)
[20] 杨洋, 查家翼, 李延凯, 等. 拖拉机机组无人作业协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 421 - 429.
YANG Yang, ZHA Jiayi, LI Yankai, et al. Design and experiment of unmanned operation cooperative control system for tractor

operating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):421 - 429. (in Chinese)
[21] 章少岑, 魏新华, 邓屹, 等. 履带式收割机全田块路径跟踪算法设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 36 - 45.
ZHANG Shaocen, WEI Xinhua, DENG Yi, et al. Design and experiments of the whole field path tracking algorithm for a track-based harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 36 - 45. (in Chinese)
[22] 孙传祝, 王法明, 李学强, 等. 马铃薯精密播种机智能控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 36 - 44.
SUN Chuanzhu, WANG Faming, LI Xueqiang, et al. Design of intelligent control system of potato precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 36 - 44. (in Chinese)
[23] 白慧娟, 方宪法, 王德成, 等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 61 - 72.
BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 61 - 72. (in Chinese)
[24] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧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)
[25] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 1999(1): 32 - 42.
LI Hongxing. Variable theory domain adaptive fuzzy controller[J]. Science China Technological Sciences, 1999(1): 32 - 42. (in Chinese)
[26] 张闻宇, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 43 - 50.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43 - 50. (in Chinese)
[27] 曹顺安, 谢学军, 刘光临. 基于 Smith 预估器的 PID 自适应控制及其应用[J]. 化工自动化及仪表, 2004(1): 28 - 32.
CAO Shun'an, XIE Xuejun, LIU Guanglin. PID self-adaptive controlling based on Smith predicator and its application[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2004(1): 28 - 32. (in Chinese)
[28] 陆萍蓝, 张火明, 毛汝东. 史密斯预估补偿控制与 PID 控制的比较研究[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(2): 171 - 179.
LU Pinglan, ZHANG Huoming, MAO Rudong. Investigation on comparison between the SMITH predictive compensation control and the PID control[J]. Journal of China Jiliang University, 2009, 20(2): 171 - 179. (in Chinese)

(上接第 450 页)

[28] 苟金保. 免耕播种机渐开线侧深施肥开沟器设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
GOU Jinbao. Design and test of furrow opener for deep fertilizing at involute side of no-tillage seeder[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2022. (in Chinese)
[29] 文恩杨,李玉华,牛子孺,等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究,2021,43(5):160 - 167.
WEN Enyang,LI Yuhua,NIU Ziru,et al. Parameter calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(5):160 - 167. (in Chinese)
[30] YU H,HU Y,QI L,et al. Hyperspectral detection of moisture content in rice straw nutrient bowl trays based on PSO - SVR[J]. Sustainability,2023,15(11):8703.
[31] 于淼,周海宾,丁京涛,等. 基于 EDEM 的餐厨垃圾组成颗粒间接触参数标定[J]. 中国农业科技导报,2023,25(12): 111 - 120.
YU Miao,ZHOU Haibin,DING Jingtao,et al. Calibration of interparticle contact parameters of kitchen waste composition based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023,25(12):111 - 120. (in Chinese)
[32] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(10):100 - 108.
TIAN Xinliang,CONG Xu,QI Jiangtao,et al. Parameter calibration of discrete element model of corn straw - soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):100 - 108. (in Chinese)
[33] 高昕毓,武佩,李修竹,等. 基于 Matlab 的颗粒饲料休止角试验研究[J]. 农机化研究,2024,46(9):173 - 179.
GAO Xinyu,WU Pei,LI Xiuzhu,et al. Experimental study on angle of repose of pellet feed based on Matlab[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(9):173 - 179. (in Chinese)
[34] 陈永,高晓勋,金鑫,等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(12):58 - 69.
CHEN Yong,GAO Xiaoxun,JIN Xin,et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):58 - 69. (in Chinese)