

基于自适应模糊PID的小麦播深控制系统研究

薛冰^{1,2} 周利明^{1,2} 牛康^{1,2} 郑元坤^{1,3} 白圣贺^{1,3} 隗立昂^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对目前小麦播种机在复杂的田间作业过程中存在的播深一致性和稳定性难以控制等问题,从调节覆土量确定小麦播深的控制角度出发,提出了一种基于播深反馈的模糊PID控制方法,设计了小麦播种机高精度播深控制系统,实现了播深的自动调控,保证了小麦播深的均匀一致性。该系统主要由车载终端、播深检测模块、播前镇压辊检测模块以及播前镇压辊调节机构等4部分组成,能够实现小麦播种机播深的实时检测及调整。通过播深检测模块获取实时播深并作为反馈输入,结合播深预设值,根据专家模糊规则和 Mamdani 推理法对 PID 参数进行在线整定得到控制输出量,控制驱动器调整播前镇压辊位置,不断调整作业过程中的覆土量,从而实现对播深的实时精确控制,确保播深的一致性。田间试验结果表明:播种作业过程中,播深存在小范围波动。当设定播深为 30 mm、车速为 3~5 km/h 时,播深平均值为 30.13 mm,播深标准差为 0.18 mm,播深合格率均值为 93%,播深变异系数均值为 2.93%。该系统实现了小麦播种机播深均匀一致的实时自适应调控。

关键词: 小麦播种机; 播深; 控制系统; 模糊PID; 播深检测模块

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0093-10

Sowing Depth Control System of Wheat Planter Based on Adaptive Fuzzy PID

XUE Bing^{1,2} ZHOU Liming^{1,2} NIU Kang^{1,2} ZHENG Yuankun^{1,3} BAI Shenghe^{1,3} WEI Li'ang^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the present wheat seeder in complex field exists in the process of deep consistency and stability is difficult to control, through adjust the volume of overburden soil from aspects determine wheat sowing depth control perspective, a fuzzy PID control method was proposed based on sowing depth feedback, the designed wheat seeder sowing depth control system had high precision, which realized the automatic control of sowing depth, and the uniformity of sowing depth of wheat was ensured. The system was mainly composed of four parts: vehicle terminal, sowing depth detection module, pre sowing suppression roller detection module and pre sowing suppression roller adjustment mechanism, which can realize real-time sowing depth detection and adjustment of wheat sowing machine. The real-time sowing depth was obtained through the sowing depth detection module and used as feedback input. Combined with the preset sowing depth value, PID parameters were adjusted online according to the expert fuzzy rule and Mamdani reasoning method to obtain the control output. The driver was controlled to adjust the position of the suppression roll before sowing and the amount of soil cover during the operation constantly, so as to achieve real-time and accurate control of sowing depth and ensure consistency of sowing depth. The results of field experiment showed that the sowing depth fluctuated in a small range during the sowing operation. When the sowing depth was set to be 30 mm, the average sowing depth was 30.13 mm, planter speed was 3~5 km/h, the standard deviation of sowing depth was 0.18 mm, the average passing

收稿日期: 2023-07-18 修回日期: 2023-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001502)

作者简介: 薛冰(1997—),女,硕士生,主要从事精准农业测控技术研究,E-mail: xuebingso@163.com

通信作者: 周利明(1982—),男,研究员,博士,主要从事精准农业测控技术研究,E-mail: haibo1129@163.com

rate of sowing depth was 93% , and the mean coefficient of variation of sowing depth was 2.93% . The system realized real-time adaptive control of uniform sowing depth of wheat planter.

Key words: wheat planter; sowing depth; control system; fuzzy PID; sowing depth detection module

0 引言

播种作业作为小麦全程机械化生产的关键环节,其作业效果对小麦产量具有决定性作用^[1-3]。近年来随着精准农业技术的推广和发展,精准控制已成为现代农业播种技术体系的重要组成部分^[4-6]。播深一致性要求对不同的地块因地制宜地采取适宜的播深,并为小麦塑造物理性质均一、硬度一致的种床,在作业过程中保证播深不随地面起伏和土壤坚实度差异而发生变化,从而保证小麦出苗均匀,使得小麦茎蘖构成适宜的群体,能够充分利用土壤资源,确保小麦高产^[7-10]。因此,实现小麦播深的一致性和稳定性成为亟待解决的问题。

实际播种过程中受田间复杂环境影响,播深受开沟器开沟、土壤回流、覆土轮镇压以及土壤环境等共同影响^[11-13],目前主要的测量方式是将播种单体开沟深度作为实际播深,分为直接测量与间接测量两种方式。其中,在直接测量控制研究方面,PASI等^[14]和赵金辉等^[15]通过位移传感器检测开沟器等位置,以计算出理论开沟深度作为播深;文献[16-21]设计了基于角度传感器、线性位移传感器以及超声波传感器等的控制系统,通过对开沟压力的主动调节控制播深,提高播种机的播深一致性;黄东岩等^[22]利用 PVDF 压电薄膜传感器测量限深轮的胎面形变量,实时监测播种单体对地表的压力,以控制播深;WEATHERLY 等^[23]利用干燥面传感器测量土壤含水率,根据地形实现播深的自动控制。在播深间接测量控制研究方面,李玉环等^[24]采用压力传感器测量镇压轮的压力,通过调节覆土量以调节播深;文献[25-28]均采用销轴传感器测量限深轮对地压力,调节播种单体下压力,进而完成对播深的调控。上述研究通过控制播种单体开沟器的播深或覆土厚度实现播深控制,并未综合考虑播种前床紧实度一致且平整以及播深一致性问题,实际进行田间播种作业时,沟内落种位置不定,土壤坚实度以及含水率等各处差异也较大,很难使实际播深一致,达到预期效果。

本文基于模糊自适应 PID 控制方法设计小麦播种机播深控制系统,通过播深检测模块获得的实时播深作为控制系统反馈进行伺服电动缸位移调节,从而控制播前镇压辊位置变化调节覆土量,进而实时调整小麦播深,保证播深的均匀一致性和稳定性,

提高小麦播深控制的响应速度和控制精度。

1 系统结构与原理

1.1 系统结构

本系统搭载于中国农业机械化科学研究院集团有限公司自主设计的 2BFG-12 型小麦播种机上,整机结构如图 1 所示。其主要结构包括机架、三点悬挂装置、旋耕整地模块、播前镇压辊模块、播后镇压辊模块、挡土板模块、种肥箱和动力输出轴等。

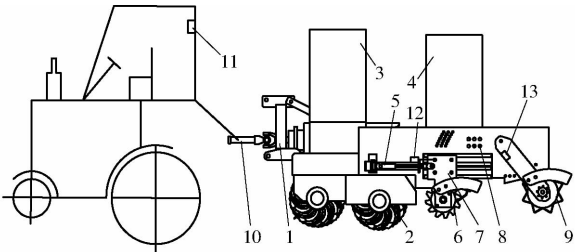


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of whole machine

- 1. 三点悬挂装置 2. 旋耕整地模块 3. 肥箱模块 4. 种箱模块
- 5. 伺服电动缸 6. 播前镇压辊 7. 播前镇压辊调整机构 8. 挡土板模块 9. 播后镇压模块 10. 动力输出轴 11. 车载终端
- 12. 拉绳位移传感器 13. 双轴倾角传感器

小麦播种机播深控制系统主要由车载终端、播深检测模块、一体伺服电机、伺服电动缸、播前镇压辊位置检测模块及蓄电池等组成,如图 2 所示。其中选用人机交互 SPD-070-Ax 电容式触摸显示终端作为车载终端,实现小麦播深的实时控制并显示播种机系统各作业模块的状态信息,同时也能实现数据的采集和下发;播深检测模块采用双轴倾角传感器,能够实时输出当前的姿态倾角并传输至车载终端处;一体伺服电机通过带轮与伺服电动缸传动轴相连,驱动伺服电动缸实现电动缸推杆伸缩;伺服电动缸推杆通过螺栓与播前镇压辊连接板铰接,驱

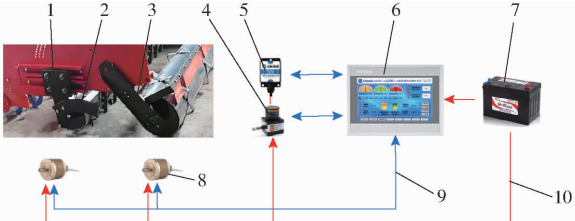


图 2 控制系统总体结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of whole control system

- 1. 播前镇压辊调整机构 2. 播前镇压辊 3. 播后镇压辊 4. 播前镇压辊位置检测模块 5. 播深检测模块 6. 车载终端 7. 蓄电池 8. 一体伺服电机 9. 数据传输线 10. 电源线

动播前镇压辊实现覆土量调节;播前镇压辊位置检测模块采用拉绳位移传感器,其一端固定安装于伺服电动缸上,另一端与播前镇压辊连接板固定连接,能够实现线性定位和行程位移反馈,可实时输出当前的播前镇压辊位移并通过数据传输线传输至车载终端。

1.2 播深控制原理

播深控制过程如图 3 所示,小麦播种机采用“浅旋+深旋”的双轴旋耕整地方案。一次旋耕刀组正转浅旋,完成一次碎土灭茬过程;二次旋耕刀组正转深旋,实现二次碎土及抛土过程。小麦播种机进行田间作业时,其播前镇压辊对二次旋耕后的土壤进行整体塑形并构建平整且紧实度一致的种床,其两侧轴头固定于滑槽内,在伺服电动缸的驱动下可进行前后移动,以调整与二次旋耕刀组之间的间距,从而调整覆土量;导种管布置在播前镇压辊后方,种子经导种管的输送直接均匀撒播于塑形后的种床上;二次旋耕所抛碎土越过播前镇压辊,经挡土板的阻挡下落完成覆土,最后由播后镇压辊完成镇压过程。

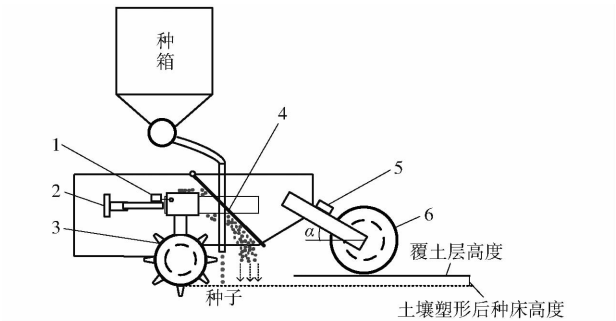


图 3 播深控制过程示意图

Fig. 3 Sowing depth control process diagram

- 1. 播前镇压辊位置检测模块 2. 伺服电动缸 3. 播前镇压辊
- 4. 挡土板 5. 播深检测模块 6. 播后镇压辊

播深控制原理如图 4 所示,首先在车载终端处手动输入目标播深,同时通过安装在播后镇压辊连接板上的播深检测模块连续采样获得实时覆土层高

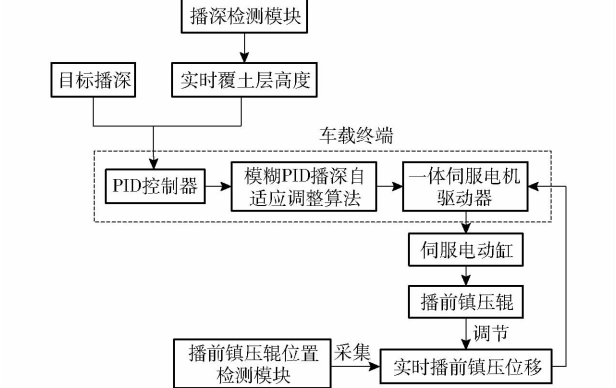


图 4 播深控制原理图

Fig. 4 Schematic of sowing depth control

度(即播深反馈值)。PID 控制器对比所述播种深度反馈值与预设的目标播深,通过模糊 PID 自适应调整算法进行偏差计算得出一体伺服电动驱动器目标控制量,播前镇压辊位置检测模块采集实时播前镇压辊位移。一体伺服电机驱动器结合实时播前镇压辊位移与目标控制量,控制伺服电动缸推动播前镇压辊移动一段距离,直至播种深度反馈值稳定于预设值,进而实现播深的实时控制。

2 播深控制关键技术

2.1 播深控制系统建模

播深控制系统的控制模型由角度传感器采集的播后镇压辊贴地运动时摆臂的实时运动角度作为输入,控制器经过计算后将电信号输送给播前镇压辊调节机构,播前镇压辊调节机构调节电动缸控制播前镇压辊位移,最后系统输出量为播深。播深通过图 5 所示控制系统框图中播深检测模块反馈到控制器,通过控制器进行闭环负反馈控制。

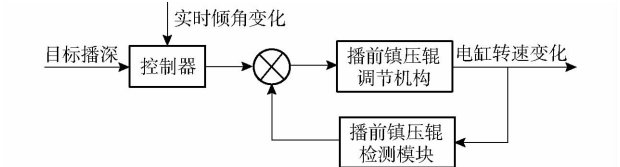


图 5 播深控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of sowing depth control system

根据控制系统框图的输入输出关系,得到系统的输入输出关系为

$$h = K(L + R) \tag{1}$$

式中 h ——目标播深,mm

K ——传感器倾角变化时对应电流变化比例

L ——播后镇压辊支撑悬臂长度,mm

R ——播后镇压辊半径,mm

根据图 5 可知,系统反馈通道的输入量为播前镇压辊调节机构检测模块读取的实时播深,反馈通道输出到控制器的信号为模拟量信号,控制器将信号与输入系统的播后土壤层角度反馈以及目标播深进行对比调整,实现控制系统的负反馈控制。

控制模型中反馈环节的函数可表示为

$$H(s) = \frac{K(s)}{h(s)} = \frac{1}{L + R} \tag{2}$$

式中 s ——传递函数进行拉式变换后的复变量

H ——传递函数的负反馈环节

根据播深控制系统控制要求,播前镇压辊调节机构为主要控制对象,其信号控制框图如图 6 所示。

根据图 6,CAN 信号模拟量输出模块的输入输出分别为模拟量和电压信号,传递函数为比例环节,其关系式为



图 6 播前镇压辊调节机构控制系统框图
Fig. 6 Block diagram of sowing depth control system

$$G_1(s) = \frac{Y_{out}}{Y_{in}} = K_m \tag{3}$$

式中 $G_1(s)$ ——模块的传递函数
 Y_{out} ——模块输出
 Y_{in} ——模块输入
 K_m ——模块模拟量与电压信号转换系数

在忽略微小电感的情况下,直流伺服电机可以看成是一个典型的一阶系统,其传递函数为一个典型的惯性环节和积分环节串联,用拉氏变换来表示一体伺服电机的输入和输出,则一体伺服电机传递函数可写为

$$G_2(s) = \frac{1/(2\pi K_e)}{s\left(\frac{J_a R_a}{K_e K_c} s + 1\right)} \tag{4}$$

式中 $G_2(s)$ ——一体伺服电机传递函数
 K_e ——电动势常数,由电机结构参数确定
 J_a ——伺服电机转子转动惯量,kg·cm²
 R_a ——伺服电机电阻,Ω
 K_c ——伺服电机电磁力矩常数,N·m/A

本播深控制系统采用直流伺服电机,主要参数电动势常数为 6.1 Vrms/Krpm,电阻 0.39 Ω,电磁力矩常数 0.3 N·m/A,转动惯量 2.78 kg·cm²,代入式(4)得

$$G_2(s) = \frac{26.091}{s(0.592s + 1)} \tag{5}$$

一体伺服电机输出轴的转速经过减速器后作为伺服电动缸推杆的转速输出,减速器输入与输出的转速比为 10:1。减速器的输入输出信号传递关系主要由转速比来体现,控制过程为比例控制,传递函数表示为

$$G_3(s) = \frac{\theta_{out}}{\theta_{in}} = \frac{1}{10} = 0.1 \tag{6}$$

式中 $G_3(s)$ ——减速器的传递函数
 θ_{out} ——减速器输出
 θ_{in} ——减速器输入

播深控制系统中伺服电动缸推杠速度与播深呈线性关系,故播深与伺服电动缸推杠速度的关系式为

$$G_4(s) = \frac{Q(s)}{\theta(s)} = K_q \tag{7}$$

式中 $G_4(s)$ ——伺服电动缸推杠传递函数
 $Q(s)$ ——播深的拉氏变换函数

$\theta(s)$ ——推杠速度的拉氏变换函数
 K_q ——推杠速度与播深转换系数

根据图 5 可知,播前镇压辊调整机构的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = G_1(s) G_2(s) G_3(s) G_4(s) \tag{8}$$

式(2)中 L 为 320 mm, R 为 140 mm,式(3)中 K_m 取 0.1,式(7)中 K_q 取 10。根据图 5 和式(2)~(7)可知,播深控制系统的闭环反馈控制传递函数可表示为

$$G_z(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{2.6091}{0.592s^2 + s + 1200.186} \tag{9}$$

式中 $G_z(s)$ ——播深控制系统传递函数

2.2 播深检测模块

播深检测传感器通过采集播后镇压辊贴地运动时摆臂的运动角度来检测地面起伏高度,其摆动范围受播后镇压辊结构影响。角度传感器是播深控制系统中的关键部分,其性能直接影响控制效果。

播深检测模块如图 7 所示,其采用非接触式测量原理,可实时输出当前的姿态倾角,实现绝对位置测量。其主要技术参数见表 1。为提升传感器的检测效果,降低电磁环境对检测结果的影响,通过焊接支架与播后镇压辊连接板螺栓连接成一体,传感器安装完成后用金属外壳罩上,并与地线相连。



图 7 播深检测模块
Fig. 7 Depth detection module

表 1 双轴倾角传感器主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of LVT525H sensor					
参数	量程/ (°)	精度/ (°)	模拟量输 出/V	分辨率/ (°)	环境温度/ ℃
数值	-90 ~ 90	0.1	0 ~ 5	0.01	-40 ~ 85

2.3 播深控制器设计

播深控制器由一个标准 PID 控制器、模糊推理调节器和播前镇压辊调节器组成,控制器结构框图如图 8 所示,被控对象由一体伺服电机驱动器、一体伺服直流电机、伺服电动缸、播前镇压辊、执行机构组成。

双轴倾角传感器实时采样获得播后土壤层高度,并根据覆土层高度与基准面计算得到播深反馈

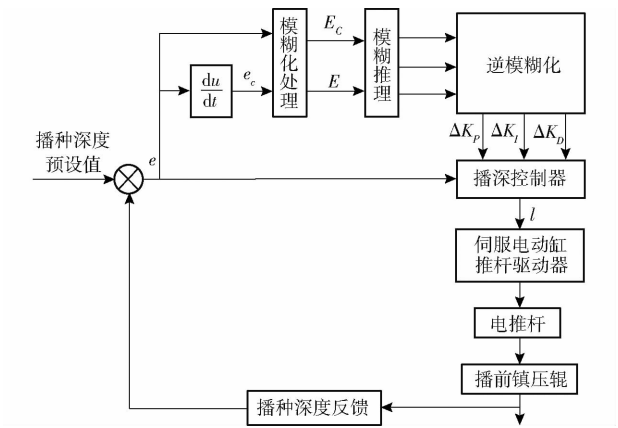


图 8 播深控制器结构框图
Fig. 8 Chart of sowing depth controller

值,由前端模糊控制系统对比播深反馈值与预设的播深目标值,获得播深偏差 e 和播深偏差变化量 e_c 。作为播深控制器的输入变量,并进行模糊化处理得到对应的输入语言变量 E 和 E_c ,播深控制器对经过模糊化处理得到的输入语言变量 E 和 E_c 进行模糊推理和逆模糊化运算,根据专家经验和相关知识制定模糊推理调节器相应的控制规则^[29-30],通过查询模糊控制规则表和获取 3 个输出语言变量 K_p 、 K_i 、 K_d 所对应的隶属度,最终输出 PID 控制器控制参数的修正值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,实现 PID 参数的在线自整定,PID 控制器执行过程中,实时地监测播前镇压辊的实际位置,经模糊推理调节器实时调整 PID 控制参数后,输出适当控制量来调整播前镇压辊的位移 l ,实现系统的自适应调节,使播深的调节达到控制目标。

播种作业前手动输入一播深预设值作为模糊 PID 初始设定值,播深偏差 e 和播深偏差变化量 e_c 作为 PID 控制器的输入语言变量, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出语言变量。播深偏差 E 和播深偏差变化量 E_c 的模糊子集采用三等级对称划分方法, $E = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, $E_c = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$;输出语言变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊子集划分为 7 挡,即: $U = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。其中,输入语言变量 E 、 E_c 和输出语言变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的基本论域和量化论域如表 2 所示。

表 2 模糊 PID 算法参数设置

Tab. 2 Parameters setting of fuzzy PID algorithm

变量	基本论域	量化论域	量化因子 k
E	$[-200, 200]$	$[-6, 6]$	0.03
E_c	$[-50, 50]$	$[-6, 6]$	0.12
ΔK_p	$[-0.9, 0.9]$	$[-3, 3]$	0.30
ΔK_i	$[-0.06, 0.06]$	$[-3, 3]$	0.02
ΔK_d	$[-1.5, 1.5]$	$[-3, 3]$	0.50

为便于实施,实际应用中通常采用三角形隶属度函数,图 9 给出了输入变量 e 和输出变量 ΔK_p 隶属度函数为等分三角形时的情况。

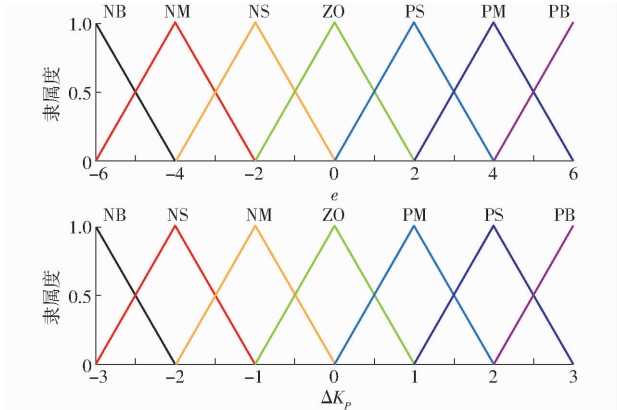


图 9 输入变量 e 与输出变量 ΔK_p 的隶属度函数

Fig. 9 Membership function for input variable e and output variable ΔK_p

在播深 PID 控制器中,其参数自整定公式为

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (10)$$

式中 K'_p 、 K'_i 、 K'_d ——PID 参数的预设值

K_p 、 K_i 、 K_d ——PID 参数的瞬时值

此处可根据双轴旋耕小麦播种机播前镇压辊调节机构自动调整 PID 控制器 3 个参数的取值。

播深控制器在模糊推理中采用 Mamdani 推理法,模糊推理表达式为

$$\begin{cases} \mu_{R_k}(U_{\Delta K_p}) = \min(\mu_{e_i}(e), \mu_{e_{c_j}}(e_c), \mu_{\Delta K_p}(U_{\Delta K_p})) \\ \mu_R(U_{\Delta K_p}) = \min_k(\mu_{R_k}(eU_{\Delta K_p})) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $U_{\Delta K_p}$ —— ΔK_p 的模糊论域

$\mu_{\Delta K_p}$ —— ΔK_p 的清晰化值

具体进一步,对播深控制器采用重心法对模糊集合 R 进行解模糊过程,并得到一个清晰化数值 μ , ΔK_p 的清晰化公式为

$$\mu_{\Delta K_p} = \frac{\sum_{U_{\Delta K_p}} \mu_R(U_{\Delta K_p}) U_{\Delta K_p}}{\sum_{U_{\Delta K_p}} \mu_R(U_{\Delta K_p})} \quad (12)$$

式中 $\mu_R(U_{\Delta K_p})$ —— ΔK_p 在论域上的模糊集合 μ_R 的隶属度函数

播深控制系统通过模糊控制来对 PID ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 3 个参数进行在线实时修正,从而使小麦播种机播前镇压辊调节机构有良好的动稳态性能。

3 软件设计

为实现对播深的实时监测和控制,本系统开发

环境采用硕博电子科技有限公司推出的基于codesys3.5 应用程序的集成开发环境。播深控制系统软件主要实现参数设置、数据采集、播深控制量计算、数据处理及数据储存等功能,软件界面如图 10 所示。



图 10 播深控制系统软件界面

Fig. 10 Software interface of sowing depth control system

小麦播种机开始工作之前,首先在上位机操作界面手动输入播深预设值,系统将播深预设值储存在缓冲区。获取双轴倾角传感器提供的机具实时播后镇压辊与地面角度,通过计算得出目标播后土壤层高度。同时通过数据传输线 CAN 模块接收到由播深检测模块发送的实时数据后,得到实时播后土壤层高度。根据目标播深与实时播深计算出伺服电动缸推杆驱动器输出量,并将输出量通过数据传输线 CAN 模块发送至 CAN 模拟输出模块形成伺服电动缸驱动器控制电压。为保证控制系统实时性,采用多线程方法进行数据采集、数据显示及控制量计算。软件系统的流程如图 11 所示。

4 试验

4.1 系统响应时间测试

为了保证播深控制系统的工作可靠性,首先对本系统进行了系统响应时间检测试验。控制系统的响应时间主要是由播深检测传感器数据采集、PID 控制器运算时间以及电动推杆反应时间组成。其中播深检测传感器数据采集、PID 控制器运算是在系统扫描周期内完成的,系统的扫描周期设为 1 ms,在分析系统响应时间时可以忽略不计,因此本研究的响应时间即为电动推杆的反应时间。由于本系统是利用伺服电动缸推杆控制播前镇压辊位置的伸缩来改变覆土量,所用的伺服电动缸推力确定为 9 806.65 N,由于推杆的伸缩速度固定,故电动推杆伸缩速度为 50 mm/s,即为本装置的实际响应速度。

测试发现在实际工作过程中,只需对播前镇压辊位置进行微调即可满足实际播种工作要求,因此该系统的实际响应时间远低于试验测量值,确保了

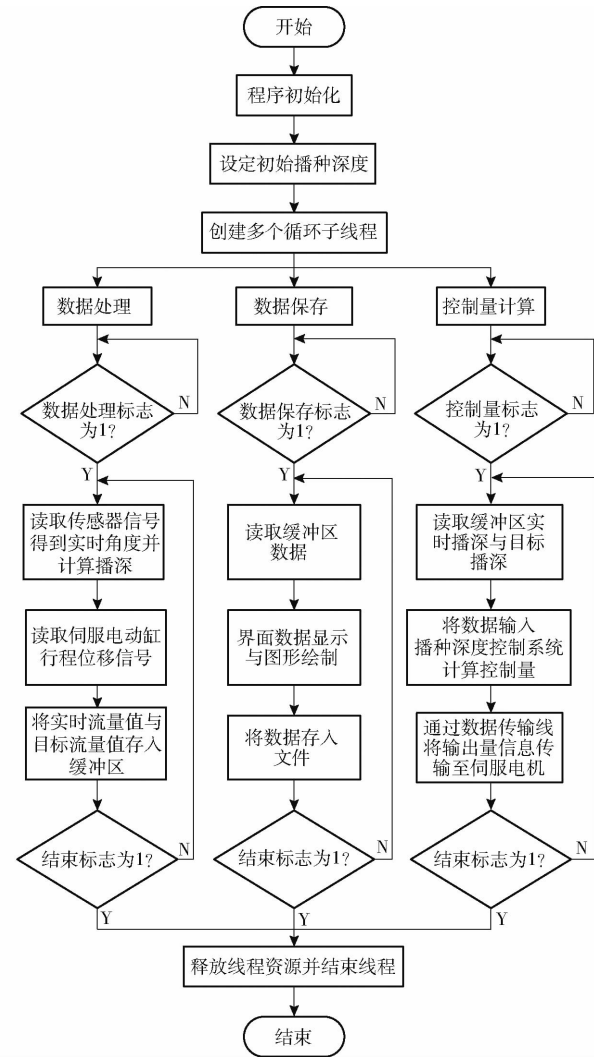


图 11 控制软件程序流程图

Fig. 11 Flow chart of control software program

播深控制系统的工作可靠性。

4.2 播深检测模块标定试验

实时播深采集是播深控制中重要一环,而双轴倾角传感器的测量精度又决定了实时播深的采集精度,因此先进行双轴倾角传感器标定试验。由于角度传感器安装过程中存在偏差,为提高播深测量装置的测量精度,在未考虑实际播深补偿量情况下,进行了传感器室内标定试验。

如图 12 所示,将整机用行车抬升至播后镇压辊

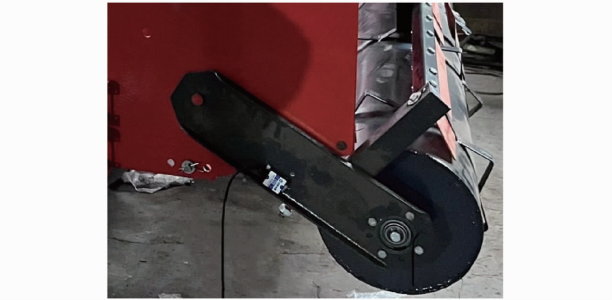


图 12 倾角传感器标定

Fig. 12 Calibration of angle sensor

悬空状态,手动抬升播后镇压辊控制连接板摆动至上限位,采集双轴倾角传感器输出信号值,并用游标卡尺测量播后镇压辊与底端距离。考虑到实际播深不小于 0,且小麦播种机播后镇压辊调整弹簧限制下最大不超过 60 mm,可知传感器输出信号在一定范围内。多次测量后建立播后镇压辊播深测量模型公式为

$$y = -0.065x + 270.35 \tag{13}$$

式中 x ——角度传感器信号值,取 2 628 ~4 356 mV
 y ——播深检测值,mm

决定系数 R^2 为 0.996 2。

4.3 播深控制系统仿真试验

结合控制系统的传递函数,在 Matlab 软件 Simulink 环境下设计仿真模型,对本文模糊 PID 控制系统进行仿真。

将采样时间设置为 1 ms,输入信号采用幅值为 1.0 的方波信号。图 13 为单位方波响应曲线,图 14 为误差响应曲线,图 15 为阶跃信号下 K_p 、 K_I 、 K_D 3 个参数的自适应调整曲线。

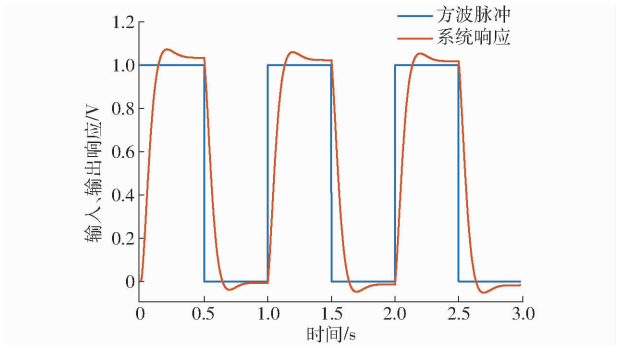


图 13 单位方波响应曲线

Fig. 13 Step response curves

根据仿真结果分析,对于本文所用的播深自调整系统模型,模糊 PID 控制系统具有较小的超调量和较短的调节时间,即较好的动态响应特性和稳态特性。同时模糊 PID 控制系统在实际播种作业过程中能根据土壤变化过程中偏差和偏差变化率自行进行 PID 参数调整,因而具有较好的自适应能力,比较适合应用于播深实时调节。

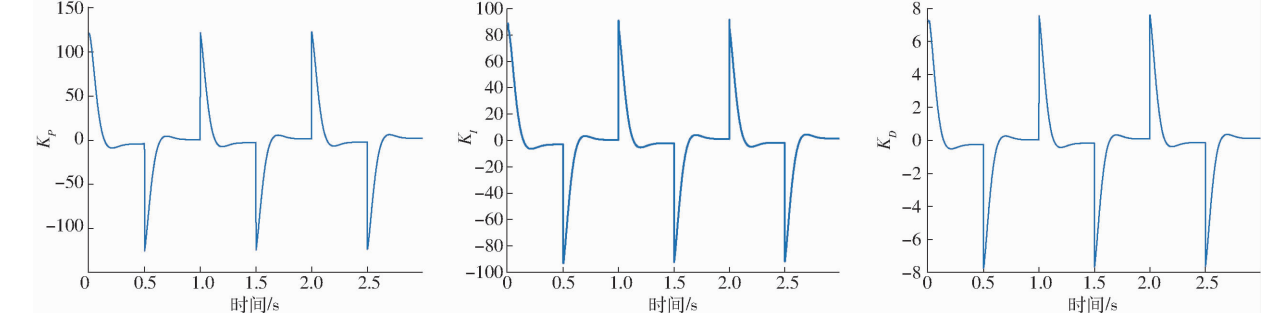


图 15 K_p 、 K_I 、 K_D 自适应调整曲线

Fig. 15 Adaptive adjustment curves for K_p , K_I and K_D

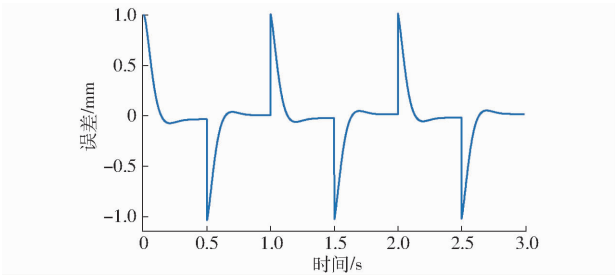


图 14 误差响应曲线

Fig. 14 Error response curves

4.4 田间试验

4.4.1 试验条件

为了检验播深控制系统在不同作业条件下的播深控制性能,分别于 2023 年 5 月 11—12 日在山东省菏泽市牡丹区解北庄村及 2023 年 7 月 5—8 日在山东省德州市禹城市亚泰机械制造有限公司试验田进行了田间试验。试验地块长 180 m,宽 30 m,地况为试验田的免耕地,地表可见残茬,采用浙江托普云农公司 TJSD-750-II 型紧实度测量仪测得地表 5 cm 下的土壤紧实度为 53.8 N/cm²,以及土壤水分测量仪测得地表 4 cm 下土壤含水率为 17.3%。本文系统搭载在基于本播深控制系统自主设计的 2BFG-12 型小麦播种机上,并进行了播深控制系统安装和调试。

按照该地区的农艺要求,试验前通过上位机操作界面将播深设置为 30 mm。因试验所用小麦播种机一次性可同时完成灭茬、旋耕碎土、施肥、播种、覆土镇压等,故整机工作速度较普通旋耕小麦播种机慢。将试验地块分为 3 个小区,分别采用速度 2、4、6 km/h 进行试验,在拖拉机上安装北斗卫星测速模块,驾驶员可根据车载终端显示的实测车速对车速进行调控,使各试验组的速度分别保持在 1 ~3 km/h、3 ~5 km/h、5 ~7 km/h 范围内。

图 16 为作业过程中的播前镇压辊位置状态。为了消除加减速过程对播深的影响,在距离地头两端 10 m 的中间区域选点测量,随机选取 3 行,每行选取 40 个点,测量时先用钢尺标记地表,用另一块

平板逐层刮去地表土壤,待漏出种粒时测量种粒与地表的距离。



图 16 田间试验
Fig. 16 Field test

1. 北斗卫星测速模块 2. 上位机 3. 播前镇压辊位置检测传感器 4. 播后土壤层高度传感器

4.4.2 试验方法

根据 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》中的测定方法对平均播深、播深合格率、播深变异系数、播深标准差进行计算,根据标准中合格播深为播深等于或大于 30 mm 时,误差应为 ± 10 mm;播深小于 30 mm 时,误差应为 ± 5 mm 的判定标准,播种的农艺要求播深 h 在 25 ~ 30 mm 范围内,则小麦播深合格范围为 20 ~ 40 mm。故本试验合格播深设定为 20 ~ 40 mm。

4.4.3 试验结果与分析

图 17 为 3 种速度水平下的播深测量数据。由图 17 可知,小麦播种机的播深在设定值处小范围上下浮动,存在少数播深大于 40 mm,导致播深不合格现象。3 种速度下,速度为 3 ~ 5 km/h 时的播深明显较其余两速度下的稳定,部分播深小于 20 mm,导致播深不合格现象。

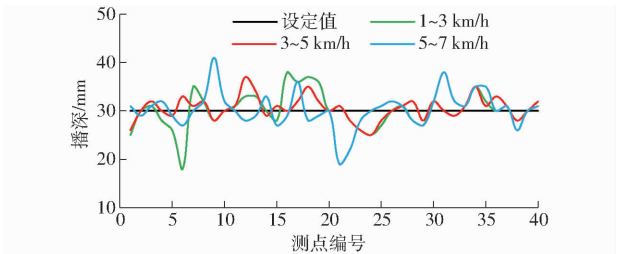


图 17 不同速度下的播深变化曲线
Fig. 17 Changing curves of seeding depth at different speeds

对测得的播深数据进行处理,结果如表 3 所示。试验数据表明,播深平均值最大误差为 1.75 mm,略大于设定值。播深合格率数据显示,在车速 3 ~

5 km/h 时合格率最高,为 93%;分析播深标准差和播深变异系数可知,车速 3 ~ 5 km/h 时播深标准差最小,为 0.18 mm,变异系数最小,为 2.93%。此外,在车速 1 ~ 3 km/h 时播深标准差和变异系数与车速 3 ~ 5 km/h 时相比明显增大,这说明车速过低对旋耕过程碎土及抛土影响较大,造成播深稳定性变差。由于播深调控只受覆土量的影响,因此播深标准差和变异系数较小,而且播深标准差和播深变异系数变化不明显,表明播深一致性受速度影响较小,体现播深控制系统自适应调节方式的优越性。

表 3 播深测量结果			
Tab. 3 Test results of seeding depth			
试验指标	作业速度/(km·h ⁻¹)		
	1 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 7
播深平均值/mm	31.49	30.13	31.75
播深合格率/%	92	93	91
播深标准差/mm	0.26	0.18	0.21
播深变异系数/%	3.51	2.93	3.26

5 结论

(1) 针对现有小麦播种机在播种作业过程中无法实现播深一致性调节的问题,设计了一种基于覆土量调节的播深控制装置,小麦播种机通过播前镇压辊制备紧实度及平整度一致的种床,利用非接触式测量播后土壤层高度的方式,实现播深实时测量,提高了田间复杂作业环境下的播深检测精度。

(2) 提出了将播深作为反馈值的模糊 PID 控制方法,设计了一种小麦播种机播深控制系统,系统能够根据目标播深和小麦播种机播前镇压辊位移调节实现播深的实时调控,该系统的应用可以实现不同地块环境下的播深实时控制,同时模糊 PID 控制算法和传感器的应用可以有效提高播种深度的准确性控制;系统各部件的集成控制有效地提高了控制系统的响应速度。

(3) 田间试验表明,播深控制系统具有稳定可靠的控制性能,播深合格率最大值为 93%。且随着播种速度的提升,播深控制自动调节方式下的播深一致性相对稳定,因播深调控只受覆土量的影响,因此播深标准差和变异系数较小,播深变异系数最小值为 2.93%,最大值为 3.51%,满足小麦播种机播深控制系统的播深精度要求。

参 考 文 献

[1] 罗锡文. 对加速我国农业机械化发展的思考[J]. 农业工程, 2011, 1(4): 1-8, 56.
LUO Xiwen. Thoughts on accelerating the development of agricultural mechanization in China[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(4): 1-8, 56. (in Chinese)
[2] 王利民, 刘佳, 季富华, 等. 中国小麦面积种植结构时空动态变化分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(18): 12-23.

WANG Limin, LIU Jia, JI Fuhua, et al. Analysis of spatial-temporal dynamic change of wheat planting structure of China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(18): 12 – 23. (in Chinese)

[3] 易峰, 钱双, 许泽华, 等. 不同播深对小麦生长及其产量的影响研究[J]. 上海农业科技, 2019(3): 55 – 57. YI Feng, QIAN Shuang, XU Zehua, et al. Study on effects of different sowing depth on wheat growth and yield[J]. Shanghai Agriculture Science and Technology, 2019(3): 55 – 57. (in Chinese)

[4] 苑严伟, 张小超, 吴才聪, 等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 222 – 226. YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, WU Caicong, et al. Precision control system of no-till corn planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 222 – 226. (in Chinese)

[5] 胡建平, 毛罕平. 精密播种技术的研究与创新[J]. 农机化研究, 2003, 25(4): 52 – 53, 59. HU Jianping, MAO Hanping. A study and innovation on precision seeding technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003, 25(4): 52 – 53, 59. (in Chinese)

[6] 刘慧敏. 探讨玉米精密播种机械发展现状[J]. 北京农业, 2013(6): 141.

[7] 孙启滨, 王建楠, 李毅念, 等. 大田不同播种间距单株小麦根长密度动态研究[J]. 中国农业科学, 2023, 56(8): 1456 – 1470. SUN Qibin, WANG Jiannan, LI Yinian, et al. Study on the dynamics of root length density in soil layers of single plant wheat under controlled seed-to-seed distance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(8): 1456 – 1470. (in Chinese)

[8] CHANG K F, HWANG S F, GOSSEN B D, et al. Effect of soil temperature, seeding depth, and seeding date on rhizoctonia seedling blight and root rot of chickpea[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2004, 84(3): 901 – 907.

[9] GUUL-SIMONSEN F, JORGENSEN M H, HAVE H, et al. Studies of plough design and ploughing relevant to conditions in Northern Europe[J]. Acta Agricultura Scandinavica Section B—Soil and Plant Science, 2002, 52: 57 – 77.

[10] RIVERA D, JAUREGUI B M, PECO B. The fate of herbaceous seeds during topsoil stockpiling: restoration potential of seed banks[J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 94 – 101.

[11] 王庆杰, 曹鑫鹏, 王超, 等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 1 – 15. WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 1 – 15. (in Chinese)

[12] 于乃群, 任宝柱. 免耕播种机的发展现状及前景展望[J]. 农机使用与维修, 2022(9): 27 – 29.

[13] 高焕文, 李洪文, 姚宗路. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 78 – 82. GAO Huanwen, LI Hongwen, YAO Zonglu, et al. Study on the Chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 78 – 82. (in Chinese)

[14] PASI S, TIMO O. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30 – 35.

[15] 赵金辉, 刘立晶, 杨学军, 等. 播种机播深控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 35 – 41. ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35 – 41. (in Chinese)

[16] NIELSEN S K, NØRREMARK M, CREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 690 – 698.

[17] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill instrumentation for spatial coulter depth measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 207 – 214.

[18] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174 – 180.

[19] WEN L, FAN X, LIU Z, et al. The design and development of the precision planter sowing depth control system[J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 53 – 58.

[20] 蔡国华, 李慧, 李洪文, 等. 基于 ATmega128 单片机的播深自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 11 – 16. CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 11 – 16. (in Chinese)

[21] 赵涵俊. 装在开沟器上的超声波探测器[J]. 粮油加工与食品机械, 1989(1): 43.

[22] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播深控制系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 1 – 8. HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1 – 8. (in Chinese)

[23] WEATHERLY E T, BOWERS J R C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(2): 295 – 305.

[24] 李玉环, 孟鹏祥, 耿端阳, 等. 玉米播深智能控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 62 – 68. LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 62 – 68. (in Chinese)

[25] 付卫强, 董建军, 梅鹤波, 等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 68 – 77.

FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):68-77. (in Chinese)

[26] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播深监测评价系统研究[J]. 农业机械学报,2019,50(12):23-32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):23-32. (in Chinese)

[27] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(6):15-28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):15-28. (in Chinese)

[28] 温丽萍,张永,范雄飞,等. 基于 PLC 的精密播种机播深控制系统研究[J]. 农机化研究,2014,36(2):98-101.
WEN Liping, ZHANG Yong, FAN Xiongfei, et al. The research of precision planter sowing depth control system based on PLC [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(2):98-101. (in Chinese)

[29] 曾光奇,胡均安,王东,等. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.

[30] 崔家瑞,李擎,张波,等. 永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(增刊1):190-194.
CUI Jiarui, LI Qing, ZHANG Bo, et al. Permanent magnet synchronous motor of variable universe adaptive fuzzy PID control [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2013,33(Supp. 1):190-194. (in Chinese)

(上接第 8 页)

[16] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[17] 胡杰,钟鑫凯,陈瑞楠,等. 基于模糊 LQR 的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程,2022,44(1):17-25,43.
HU Jie, ZHONG Xinkai, CHEN Ruinan, et al. Path tracking control of intelligent vehicles based on fuzzy LQR [J]. Automotive Engineering, 2022,44(1):17-25,43. (in Chinese)

[18] 姜龙腾,迟瑞娟,熊泽鑫,等. 基于优化人工势场法的插秧机绕障策略研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):20-27.
JIANG Longteng, CHI Ruijuan, XIONG Zexin, et al. Obstacle winding strategy of rice transplanter based on artificial potential field method after optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 1):20-27. (in Chinese)

[19] 黄小毛,丁幼春,宗望远,等. 农机作业地头转弯方式及路径生成算法研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集,2011:406-411.

[20] LI Yibo, LI Hang, GUO Xiaonan. Online parameter identification of rice transplanter model based on IPSO-EKF algorithm [J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 61(2):25-34.