doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.027

田间水稻育秧机取泥装置控制系统研究

况福明[1,2]　姬　傲[1,2]　何　箐[3]　王　俊[4]　熊　玮[1,2]　朱德泉[1,2]　郑　泉[1]

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
4. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 南方丘陵山区地块小而分散,通常采用田间取泥育秧方式。机械化取泥虽可以降低成本、节省时间和劳动力,提高秧苗适应性,但由于水田硬底层和泥浆表面不平,作业参数难以动态调节,导致取泥量不稳定,难以实现连续田间取泥育秧作业。本文运用 Matlab/Simulink 建立取泥控制系统模型,以泥浆质量为控制目标,以取泥深度和螺旋输送器转速为被控变量,采用模糊 PID 控制方法设计取泥控制系统仿真模型,并进行仿真。仿真结果表明,当前进速度为 0.15 m/s 时,取泥控制系统储泥箱中泥浆质量稳定时间为 18 s,超调量为 0.125%。为验证取泥控制系统作业效果,搭建了基于位移传感器、压力传感器、倾角传感器和 PLC1200 控制器的取泥试验台架,以取泥装置前进速度、地面平整度为试验因素开展台架试验,试验结果表明,泥浆质量最大标准偏差为 0.46 kg,最小标准偏差为 0.21 kg,储泥箱最大泥浆质量为 8.8 kg,最小泥浆质量为 7.1 kg,作业过程中螺旋输送器前端未出现泥浆堆积,各项作业指标均满足田间取泥育秧装备作业要求。

关键词: 水稻田间取泥育秧机; 模糊 PID 控制; 螺旋输送器入泥深度监测; 储泥箱质量; PLC 控制

中图分类号: TP23; S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0290-15　　**OSID**:

Control System of Mud Collection Device for Rice Seedling Cultivation Machines

KUANG Fuming[1,2]　JI Ao[1,2]　HE Jing[3]　WANG Jun[4]　XIONG Wei[1,2]　ZHU Dequan[1,2]　ZHENG Quan[1]

(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Provincial Engineering Laboratory for Intelligent Agricultural Machinery Equipment*, *Hefei* 230036, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Seiences Group Co.*, *Ltd.*, *Beiing* 100083, *China*
4. *College of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: In the fragmented and small-scale fields of southern hilly regions, field-based mud collection is crucial for rice seedling cultivation. While mechanized mud collection can reduce costs, save time and labor, and improve seedling adaptability, challenges such as the hard underlying layer and uneven mud surface in paddy fields complicate dynamic adjustment of operational parameters. This results in unstable mud collection quantities and difficulties in achieving continuous field-based mud collection and seedling cultivation. A control system model for mud collection was developed by using Matlab/Simulink, targeting mud mass as the control objective, with mud collection depth and spiral conveyor speed as controlled variables, employing a fuzzy PID control approach. Simulation results showed that at a forward speed of 0.15 m/s, the mud mass in the storage tank was stabilized within 18 s, with an overshoot of 0.125%. To validate the system's performance, a test rig equipped with displacement, pressure, and tilt sensors, and a PLC1200 controller was constructed. Experimental results indicated that the maximum standard deviation of mud mass was 0.46 kg, with a minimum of 0.21 kg; the maximum and minimum mud masses in the storage tank were 8.8 kg and 7.1 kg, respectively. The system effectively met field operational requirements, with no mud accumulation observed at the front end of the spiral conveyor. The successful implementation of this control system enabled more efficient and simplified rice cultivation.

收稿日期: 2024-08-26　修回日期: 2024-11-04

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重大项目(2023AH040137)、安徽省科技重大专项项目(202203A06020004)和安徽省高校协同创新项目(23108207)

作者简介: 况福明(1990—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: fmkuang@ahau.edu.cn

通信作者: 朱德泉(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事作物生产机械化技术与装备研究,E-mail: zhudequan@ahau.edu.cn

This system can provide a promising solution for improving agricultural productivity in fragmented and challenging terrains.

Key words: field taking mud rice seeding machine; fuzzy PID control; spiral conveyor submersion depth monitoring; mud storage tank mass; PLC control

0　引言

南方水稻种植区主要采用泥浆法进行秧床育秧[1]。然而,南方丘陵地形复杂,田块小而分散,导致田间育秧机械化水平较低[2],并且采用人工取泥育秧劳动强度大。因此亟需开发适合南方地区的轻量化田间育秧装备。目前国内学者进行了大量研究。金亦富等[3]研发了 2B－4A 型自走式多功能育秧机;杨望等[4]基于电磁振动式排种器结构,结合水稻田间拌浆育秧技术,设计了水稻田间育秧机;袁文胜等[5]结合水稻田间育秧要求,设计了一种水稻悬挂式田间育秧机具。上述研究虽提高了田间育秧作业效率,但均需要预添育秧土,导致装置结构笨重、机动性差、育秧成本高、效率低,不适合南方田间育秧实际情况。

采用就田取泥的育秧方式可有效地解决上述田间育秧机存在的问题并且提高了水稻秧苗适应性。但是水田环境复杂,水田表面以及水田硬底层不平[6],容易造成取泥装置入泥深度动态变化,导致取泥量难以匹配育秧所需出泥量从而无法进行连续的田间育秧作业。为保证取泥量匹配出泥量,亟需研发入泥深度自适应控制的取泥控制系统。

在农业机械装备作业参数动态监测方面,宫元娟等[7]为降低甘蔗收获破头率设计了电液式工作台高度控制系统,根据仿形结构上的传感器检测和控制割台高度;李涛等[8]为降低薯类作物收获过程中的破损率,设计一种挖深自动控制系统,通过仿形装置检测挖掘机构深度并进行调整;耿爱军等[9]为控制玉米收割留茬高度,设计了割台高度自适应控制系统。上述研究虽完成了作业参数精准调控,但是均未能将作业效果作为反馈信号对作业参数进行调控,难以保证作业效果。

本文设计的入泥深度自适应调整的取泥控制系统实时监测储泥箱中的泥浆质量,通过质量信号变化判断取泥量与出泥量之间的匹配作业效果并作为反馈信号对螺旋输送器作业参数进行控制,以期实现作业效果与作业参数之间的闭环控制,使泥浆质量稳定在设定值,取泥量自动匹配出泥量。

1　试验台架系统结构与工作原理

1.1　取泥装置结构

为了实现取泥量自动匹配出泥量的作业效果,设计取泥装置控制系统试验台架如图 1 所示。

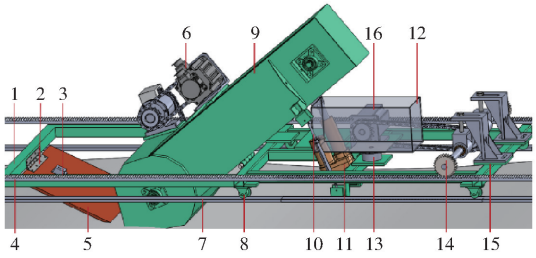


图 1　取泥装置控制系统试验台架硬件结构图

Fig. 1　Hardware structure diagram of test bench

1. 仿形支架　2. 铰链　3. 倾角传感器　4. 齿条　5. 摆动收光板　6. 螺旋输送器伺服电机　7. 导轨　8. 钢轮　9. 输泥箱　10. 位移传感器　11. 电动推杆　12. 储泥箱　13. 压力传感器　14. 齿轮　15. 机架　16. 前进伺服电机

由图 1 可知,取泥控制系统试验台架主要由 4 部分组成:入泥深度监控系统、螺旋输送器取泥系统、储泥质量监测系统以及试验台驱动系统。入泥深度检测系统包括仿形支架、摆动收光板、铰链、倾角传感器、电动推杆、输泥箱和位移传感器等。倾角传感器和位移传感器采集的信号传输到控制器中,通过数据分析得出当前螺旋输送器入泥深度,并通过控制电动推杆升降来调整螺旋输送器入泥深度;螺旋输送器取泥系统主要由伺服电机、螺旋输送器、刮板和输泥箱组成。伺服电机驱动螺旋输送器旋转,将进入输泥箱泥浆传送至左侧刮板,刮板再将泥浆输送至储泥箱中,完成取泥过程。通过调节螺旋输送器伺服电机转速,可控制泥浆在输泥箱中的传输速度[10－11];储泥质量监测系统由储泥箱和压力传感器组成。通过检测压力传感器的信号,获取储泥箱中泥浆质量,用以评估取泥速度与出泥育秧速度之间的匹配情况;试验台架驱动系统主要由伺服电机、传动轴、机架、齿轮、齿条、导轨和钢轮组成。伺服电机通过链轮链条驱动传动轴旋转,传动轴两侧安装的齿轮与齿条啮合,实现机架匀速运动。机架底部钢轮由导轨支撑,并限制机架左右偏移。通过伺服控制器调节前进伺服电机转速调整试验台架运动速度。

如图 2 所示,控制系统采用西门子 CPU1212C 搭载 CB1241(RS485)作为主控制单元,该 CPU 具有较强的数据处理能力以及较高的性价比,满足使用要求[12－13]。上位机将采用昆仑通态 TCP7022KT 触摸屏方便对试验台架操控、工作状态监控以及工作

模式切换。通过主控单元将协调各控制系统之间的关系,控制储泥箱中的泥浆质量稳定在设定质量从而实现取泥速度调整,匹配出泥速度。

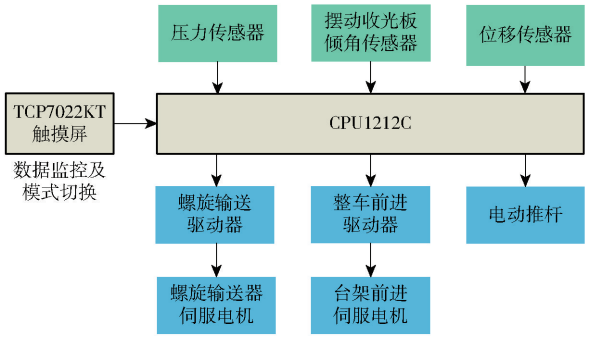


图 2 取泥控制系统构成图

Fig. 2 Composition of mud extraction control system

1.2 系统工作原理

取泥作业开始时,切换成自动控制模式,设定前进速度与储泥箱质量,开始自动取泥作业,作业时前进伺服电机通过链条传动驱动齿轮旋转,通过齿轮齿条啮合驱动试验台架前进运动,同时螺旋输送器伺服电机驱动螺旋输送器旋转进行取泥。作业过程中压力传感器实时采集储泥箱中的泥浆质量信号并传递给主控单元,主控单元对比设定质量与储泥箱实际质量通过模糊 PID 控制算法对螺旋输送器入泥深度设定值进行调整。工作原理如图 3 所示。

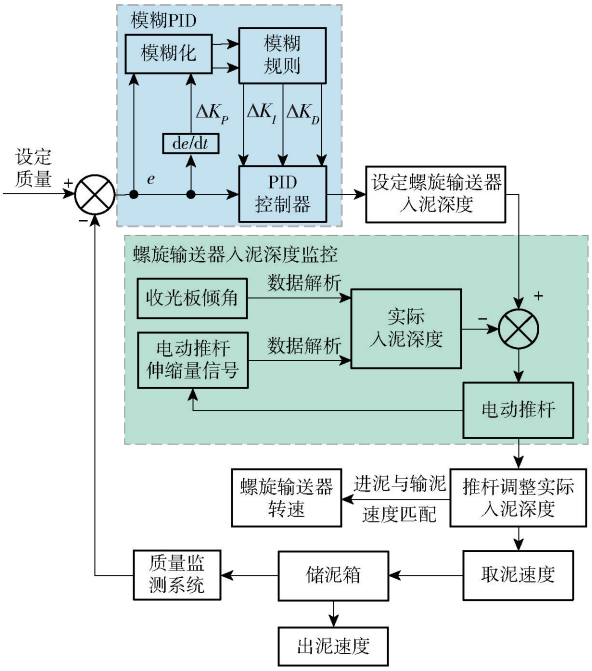


图 3 取泥控制系统工作原理图

Fig. 3 Diagram of working principle of mud collection control system

收光板实时检测地面的起伏变化,通过倾角传感器采集收光板倾角信号;通过安装在电动推杆同侧的位移传感器采集电动推杆伸缩量信号,将收光板倾角信号与电动推杆伸缩量信号代入入泥深度计算模型进行数据解析得到螺旋输送器实际入泥深度,通过对比实际入泥深度与设定入泥深度驱动电动推杆工作带动取泥螺旋输送器上下浮动控制入泥深度满足要求,螺旋输送器入泥深度形成闭环控制系统保证入泥深度控制精度。螺旋输送器入泥深度的改变导致进泥速度变化,进泥速度变化导致储泥箱中泥浆质量变化,形成储泥箱泥浆质量控制闭环系统,控制泥浆质量稳定在设定质量从而实现进泥与出泥速度匹配的目的。为了入泥深度的控制过程中,螺旋输送器前端不出现泥浆堆积的现象,螺旋输送器转速根据入泥深度进行比例调整。

2 关键结构设计与取泥作业分析

2.1 入泥深度测量机构设计与原理分析

2.1.1 螺旋输送器入泥深度监控机构设计

传统旱地使用地面高度测量装置,如仿形轮或自重摆动式仿形机构,不适用于水田环境。由于水田泥浆对仿形机构支撑力不足,仿形机构容易沉入泥浆,导致仿形精度下降甚至出现仿形失效[14]。

为解决上述问题,设计了一种泥浆表面信息监测机构,如图 4 所示,主要由仿形支架、摆动收光板、活动铰链及倾角传感器组成,具有以下功能:①仿形泥浆表面并采集高度信号,摆动收光板在重力作用下紧贴泥浆表面,随地面起伏摆动,倾角传感器采集摆动角度信号并传输至控制器,通过数据解析得到泥面高度。②抹平泥浆表面,消除左右高度差。收光板在重力和前进力作用下使泥浆变形,泥浆向压强最小方向迁移,从而使左右泥浆高度一致[15]。③降低泥浆附着,摆动收光板下表面与泥浆之间产生滑动摩擦,降低泥浆附着[16]提高泥浆表面高度测量精度。

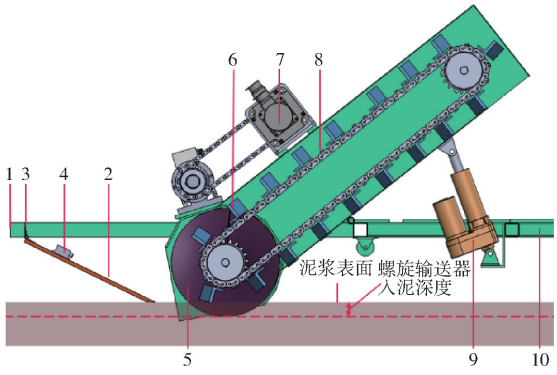


图 4 螺旋输送器入泥深度监控机构示意图

Fig. 4 Diagram of spiral conveyor submersion depth measurement and adjustment mechanism

1. 铰链 2. 摆动式仿形机构 3. 仿形支架 4. 倾角传感器 5. 螺旋输送器 6. 刮板 7. 伺服电机 8. 电动推杆 9. 机架 10. 输泥箱

螺旋输送器高度调整装置主要由输泥箱、电动推杆、位移传感器组成。电动推杆推动输泥箱的上部使得输泥箱围绕铰链中心旋转从而实现螺旋输送器的高度调整，位移传感器采集电动推杆的伸缩量信号并传递至控制器中进行数值分析得到螺旋输送器高度值。

通过对比泥面高度与螺旋输送器高度，得出螺旋输送器入泥深度，并通过控制电动推杆伸缩量，精准调整螺旋输送器入泥深度。

2.1.2　螺旋输送器入泥深度公式推导

图 5 为螺旋输送器入泥深度检测结构简图，图中点 O_0 为摆动收光板的旋转中心；点 O_1 为输泥箱旋转中心；点 O_2 为电动推杆与输泥箱之间的铰接点；点 O_3 为液压缸旋转中心；β 为收光板上倾角传感器采集的收光板倾角；θ_0 为线段 O_1O_3 与水平线夹角；θ_1 为线段 O_1O_2 与点 O_1 与螺旋输送器底部连线夹角；L_0 为收光板长度；L_1 为螺旋输送器底部到输泥箱铰链中心点 O_1 长度；L_2 为线段 O_1O_2 长度；L_3 为电动推杆长度；L_4 为线段 O_1O_3 长度；H_0 为收光板铰链中心与输泥箱铰链中心的高度差；H_1 为输泥箱铰链中心与螺旋输送器底部之间的高度差；H_2 为收光板铰链中心与泥浆面之间的高度差；H_3 为螺旋输送器入泥深度。在取泥作业过程中摆动收光板在重力作用下绕点 O_0 旋转紧贴泥浆表面根据倾角传感器上的角度数值结合收光板长度可得地面至仿形支架高度 H_2 为

$$H_2 = L_2\tan\beta \tag{1}$$

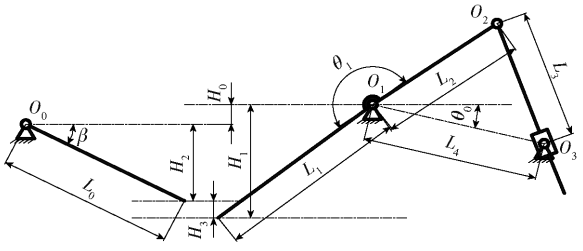


图 5　螺旋输送器入泥深度测量与控制机构原理图

Fig. 5　Mechanical principle diagram of spiral conveyor submersion depth measurement and control mechanism

电动推杆推动输泥箱使输泥箱绕点 O_1 旋转调整入泥深度，通过对平面机构的运动分析得出电动推杆长度 L_3 与螺旋输送器与机架之间高度差 H_1 为

$$H_1 = L_1\sin\left(\theta_1 - 180° + \arccos\frac{L_4^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_4} - \theta_0\right) \tag{2}$$

由于机架之间为固定连接所以 H_0 为定值，由此可得螺旋输送器入泥深度 H_3 为

$$H_3 = H_1 - H_2 - H_0 \tag{3}$$

联立式(1)～(3)可得螺旋输送器入泥深度为

$$H_3 = L_1\sin\left(\theta_1 - 180° + \arccos\frac{L_4^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_4} - \theta_0\right) - L_2\tan\beta - H_0 \tag{4}$$

收光板测量位置与螺旋输送器底部在水平方向上有一段距离导致实际入泥深度与测量入泥深度之间产生时间延时，延时时间与前进速度和水平方向上两点之间距离有关，在机构模型上测量两点之间距离为 0.19 m，由此设定延时时间为

$$T_0 = \frac{0.19}{v} \tag{5}$$

式中　T_0——延时时间

v——取泥作业前进速度

取泥过程中，在前进速度作用下产生的冲击力导致收光板振动，并且由于泥浆支撑力不足，支撑板易陷入泥浆中，这使得入泥深度测量精确度下降。为验证螺旋输送器入泥深度测量方案可行性并明确入泥深度测量准确性的影响因素，采用 ADAMS 软件对其运动过程进行了仿真。

使用 Solidworks 按照比例 1∶1 简化入泥深度监控机构模型。建立了泥浆面波长为 1、2、3 m，地面振幅为 1、3、5 cm 的泥浆面模型。随后，将模型另存为. step 格式并导入至 ADAMS 中进行仿真分析。

模型导入后根据实际使用情况设置相关仿真参数及约束条件，以保证试验结果准确。触底部件及其他零部件设置为普通碳钢，仿真地面材料为土壤，密度为 1.68×10^3 kg/m^3，泊松比为 0.29，杨氏模量为 3.0×10^6 Pa[17]。分析各零件之间的运动关系，利用旋转副实现摆动收光板与仿形支架之间的旋转运动；利用机架与大地之间的滑移副和滑移驱动实现整机水平前进运动，选择田间育秧作业时常用前进速度 0.1、0.15、0.2 m/s 进行仿真；收光板与地面之间建立接触约束，接触约束库伦摩擦力静摩擦因数为 0.35，动摩擦因数 0.1[17]，用来模拟收光板在运动过程中与泥浆的接触效果。仿真模型如图 6 所示。

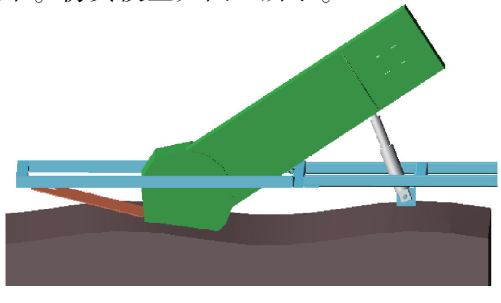


图 6　螺旋输送器入泥深度测量机构仿真模型

Fig. 6　Simulation model of spiral conveyor submersion depth measurement mechanism operation process

仿真试验以整机前进速度、地面波长以及地面幅值为影响因素，平均螺旋输送器入泥深度绝对误差为评价指标，进行正交试验。入泥深度绝对误差平均值计算式为

$$W_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} | M_i - T_i |}{N_0} \tag{6}$$

式中 W_0——入泥深度绝对误差平均值

N_0——总取样数

M_i——第 i 步测出的入泥深度

T_i——第 i 步实际入泥深度

仿真步数为 1 500，仿真时间为 15 s，仿真开始时收光板受到重力作用开始下落到与泥浆面接触，随着机架向前运动收光板随着地形变化开始上下摆动，仿真结束后通过后处理模块获取倾角变化时域信号，将倾角信号与电动推杆长度代入方程(4)中得到所测螺旋输送器入泥深度。剔除前 0.1 s 中因收光板下落导致的测量误差对获取数据进行处理得到仿真试验结果，如表 1 所示。

表 1 仿真试验结果

Tab. 1 Results of simulation experiment

试验序号	因素			入泥深度绝对误差平均值 W_0/mm
	前进速度 A/(m·s^{-1})	地面波长 B/m	地面振幅 C/cm	
1	0.10	1	3	5.27
2	0.20	1	3	5.73
3	0.10	3	3	2.91
4	0.20	3	3	3.00
5	0.10	2	1	3.13
6	0.20	2	1	2.45
7	0.10	2	5	4.55
8	0.20	2	5	5.04
9	0.15	1	1	3.94
10	0.15	3	1	2.62
11	0.15	1	5	6.30
12	0.15	3	5	3.86
13	0.15	2	3	3.50
14	0.15	2	3	3.48
15	0.15	2	3	3.51
16	0.15	2	3	3.53
17	0.15	2	3	3.83

将试验结果导入 Design-Expert 进行回归方程显著性分析和方差分析，结果如表 2 所示。得出各试验因素对入泥深度检测影响显著性因素由大到小依次是地面振幅、地面波长和前进速度。绝对误差与试验因素之间的二次多项式回归模型为

$$W_0 = 7.46 + 2.95A - 1.3B + 2.56C - 0.052\,7AB + 1.17AC - 0.28BC + 0.55A^2 + 0.55B^2 + 0.73C^2 \tag{7}$$

表 2 入泥深度绝对误差回归模型方差分析

Tab. 2 ANOVA for regression model of absolute deviation in mud depth

来源	方差和	自由度	均方	F	P
矫正模型	18.990 0	9	2.110 0	31.760 0	<0.000 1
A	0.478 0	1	0.047 8	0.719 0	0.424 5
B	0.121 0	1	0.121 0	1.820 0	0.219 3
C	0.867 5	1	0.867 5	13.060 0	0.008 6
AB	0.000 4	1	0.000 4	0.005 3	0.943 8
AC	0.342 2	1	0.342 2	5.150 0	0.057 5
BC	0.313 6	1	0.313 6	4.720 0	0.066 4
A^2	0.013 0	1	0.013 0	0.196 2	0.671 1
B^2	1.010 0	1	1.010 0	15.220 0	0.005 9
C^2	0.018 1	1	0.018 1	0.272 1	0.618 0
残差	0.465 1	7	0.066 4		
失拟项	0.379 3	3	0.126 4	5.890 0	0.059 7
误差	0.085 8	4	0.021 5		
总和	19.460 0	16			

根据分析结果，螺旋输送器入泥深度测量较为准确，并且泥浆表面越平整时，测量精度越高；此外，前进速度越低，入泥深度测量准确度也越高。因此，在田间取泥育秧作业时，需对育秧田进行精整，并将前进速度控制在适当的作业区间，以确保育秧效率，同时保证螺旋输送器入泥深度检测准确性。

2.2 取泥过程

如图 7 所示，在整机前进时前侧泥浆进入输泥箱底部的罩壳内，罩壳内旋转的螺旋输送器将泥浆输送到左侧的输泥箱，输泥箱内链条刮板的将泥浆运送至后侧的储泥箱内。根据上述描述可以看出取泥过程被分为进泥阶段和泥浆输送阶段，泥浆输送分为螺旋输送器输送和刮板输送。在取泥过程中对取泥速度产生影响的可调参数有螺旋输送器转速、螺旋输送器入泥深度、整机前进速度。

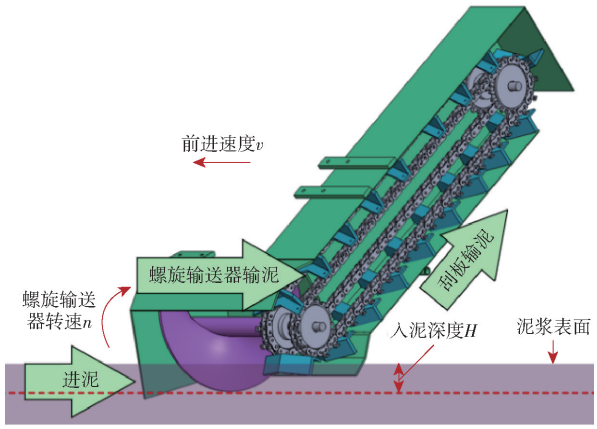


图 7 取泥装置取泥过程原理图

Fig. 7 Principle diagram of mud collection process for mud collecting device

首先对进泥阶段进行分析，如图 8 所示整机在

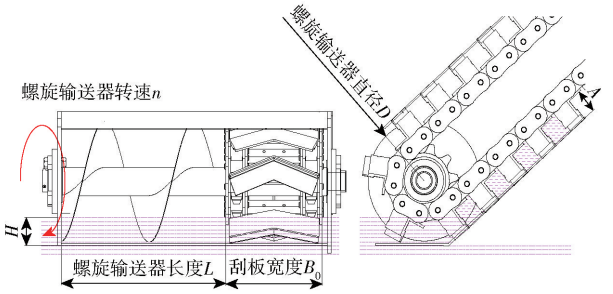


图 8　取泥装置结构图

Fig. 8　Structural diagram of mud collecting device

前进过程中输泥箱将入泥深度为 H，长度为 $L+B_0$ 范围内的泥浆全部收集在罩壳内部[18]，之后这些泥浆将被输送至储泥箱中，由此可知总进泥速度可表达为

$$Q_1=\frac{60vH\rho(L+B_0)}{1\,000} \tag{8}$$

式中　Q_1——进泥速度，kg/min

v——前进速度，m/s

L——螺旋输送器长度，m

B_0——链条刮板宽度，m

ρ——泥浆密度，kg/m^3

如图 8 所示，螺旋输送器输送泥浆结构为开口式螺旋输送装置，物料由开口段进入螺旋内，随着螺旋旋转运动将泥浆输送至右侧，相较于闭式螺旋输送装置影响输泥量主要参数为填充系数 ψ[19-20]。在闭式螺旋输送器中，填充系数取决于输送物料状态，在开式输送器中为单位时间内进入一个螺距内的泥浆体积与螺旋体积比值，可得

$$\psi=\frac{HSv}{1\,000S\pi D^2/4}\approx\frac{1.27Hv}{1\,000D^2} \tag{9}$$

式中　S——螺旋输送器螺距，m

D——螺旋输送器直径，m

闭式螺旋输送器产量理论计算公式[21]

$$Q=47D^2\psi Sn\rho C \tag{10}$$

式中　Q——闭式螺旋输送器理论输送量，kg/min

C——螺旋输送器倾角系数，水平输送取 1

n——螺旋输送器转速，r/min

将填充系数代入式(10)中得到开式螺旋输送器输送泥浆输送速度为

$$Q_2=\frac{59.7HvSn\rho}{1\,000} \tag{11}$$

式中　Q_2——螺旋输送器输送泥浆速度，kg/min

对链条刮板最大输泥量进行理论分析。刮板被固定安装在链条上，链条由链轮驱动，链轮与螺旋输送器主轴为固定安装，螺旋输送器转速与链轮转速相同均为 n，由链轮链条驱动计算式可知链条线速度为

$$v_l=\frac{Pzn}{1\,000} \tag{12}$$

式中　v_l——链条线速度，m/min

P——链条节距，mm

z——链轮齿数

已知链条刮板宽度为 B_0 和高度 A，通过几何计算可知链条刮板输送泥浆最高速度为

$$Q_3=\rho v_lAB_0 \tag{13}$$

式中　Q_3——刮板输泥速度，kg/min

联立式(12)、(13)化简得

$$Q_3=\frac{\rho PznAB_0}{1\,000} \tag{14}$$

为保证取泥过程顺利进行，进泥速度应该与泥浆输送速度相匹配，若进泥速度大于泥浆输送速度将会导致泥浆在输泥箱入口堆积造成堵塞，若进泥速度远小于泥浆输送速度，将会导致螺旋输送器以及刮板空转。

为防止泥浆堵塞与限制空转，引入输泥系数 f ($f\geqslant1$)使

$$Q_3=fQ_1 \tag{15}$$

将式(8)、(14)代入式(15)中并化简得

$$n=\frac{60fvH(L+B_0)}{PzAB_0} \tag{16}$$

在取泥育秧过程中，前进速度为设定值，因此建立螺旋输送器转速与螺旋输送器入泥深度之间的函数关系。

3　取泥控制系统方案设计及仿真

3.1　控制系统整体方案设计

如图 9 所示，取泥控制系统由模糊 PID 控制器、入泥深度监测系统、螺旋输送器转速控制系统、储泥箱质量监测系统和前进驱动系统组成。自动取泥开始时，在触摸屏上设定整机前进速度和储泥箱泥浆质量。伺服控制器控制整机匀速前进，质量监测系统实时监测储泥箱中的泥浆质量，将实际质量与设定质量的差值输入模糊 PID 控制器。模糊 PID 控制器根据此差值计算出设定螺旋输送器入泥深度 h。

摆动收光板实时监测地面起伏，倾角传感器采集收光板倾角 β；电动推杆通过伸缩运动控制螺旋输送器入泥深度。与电动推杆同侧的位移传感器采集电动推杆伸缩量 L_3。将实时采集的 β 和 L_3 代入螺旋输送器入泥深度解析程序中，得到螺旋输送器实际入泥深度 H。通过调整电动推杆伸缩量，使螺旋输送器入泥深度达到模糊控制程序的设定深度。

为了避免螺旋输送器前端积泥，根据式(16)对螺旋输送器转速 n 进行比例调控。螺旋输送器入泥

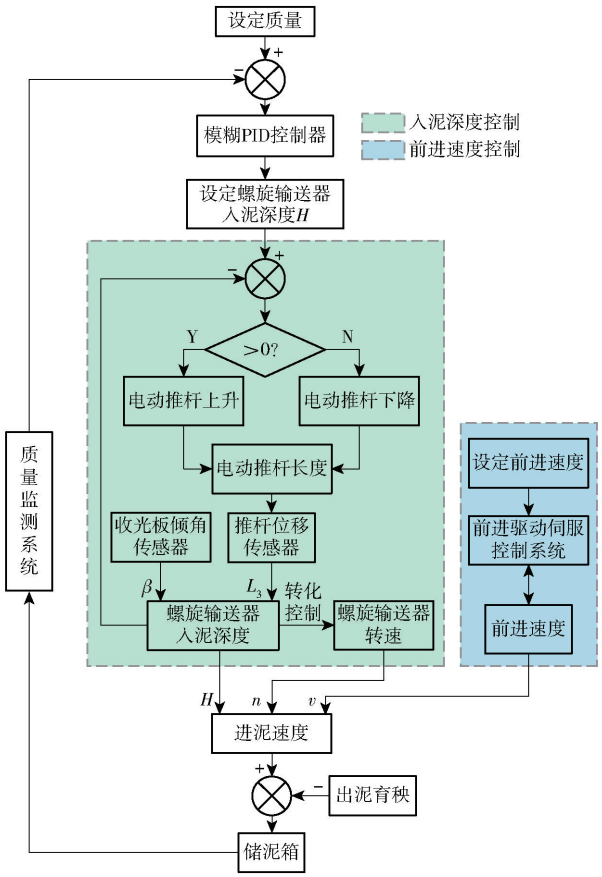


图 9 取泥控制系统结构框图

Fig. 9 Block diagram of mud collection control system

深度 H、螺旋输送器转速 n 以及前进速度 v 共同决定取泥速度。储泥箱中的泥浆用于出泥育秧,通过差值运算得到储泥箱中泥浆质量。通过循环控制螺旋输送器入泥深度,稳定储泥箱中的泥浆质量在设定值,实现取泥量实时匹配出泥量。

3.2 模糊 PID 控制器设计

如图 10 所示,在取泥育秧过程中,系统实时获取储泥箱中泥浆质量,并将其与预设目标质量进行对比,以获取质量偏差 e 和 e_c。这些偏差通过模糊推理和逆模糊化运算进行处理,依据专家经验和相关知识制定模糊控制规则[22-23],获取输出变量 K_P、K_I、K_D 的隶属度。由此,模糊 PID 控制器生成 PID 控制参数修正值 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D,实现在线整定。经过整定的 PID 控制器根据输入质量偏差 e 确定螺旋输送器入泥深度设定值[24],并通过入泥深度监控系统进行调控,从而实现对螺旋输送器入泥深度的精确调整。PID 参数为

$$\begin{cases} K_P = K_P' + \Delta K_p \\ K_I = K_I' + \Delta K_I \\ K_D = K_D' + \Delta K_D \end{cases} \tag{17}$$

式中 K_P、K_I、K_D——PID 参数瞬时值

K_P'、K_I'、K_D'——PID 参数预设值

通过仿真得最优 PID 参数预设值分别为 $K_P' = 6.5$、$K_I' = 1.1$、$K_D' = 0.05$。

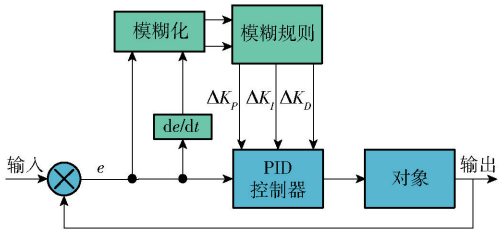


图 10 自适应模糊 PID 控制器结构

Fig. 10 Structure of adaptive fuzzy pid controller

模糊 PID 控制系统中 e、e_c 作为输入语言变量,ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 作为输出语言变量,为提高控制算法在 S7-1200 的实时性需要对算法进行简化,e 和 e_c 分为 5 个模糊集{VS,S,M,B,VB};输出变量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 也划分为 5 个模糊子集{VS,S,M,B,VB}。根据试验台架中储泥罐容量、取泥系统结构以及 PID 预设值,确定 e、e_c、ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 基本论域如表 3 所示。

表 3 变量论域

Tab. 3 Variable domain

变量	论域
e	[-1,8]
e_c	[-6,6]
ΔK_P	[-3,3]
ΔK_I	[-0.4,0.4]
ΔK_D	[-0.02,0.02]

为了简化程序提高模糊 PID 算法在 PLC 上的实时性,使用简单的三角形隶属函数来描述输入输出变量隶属度,模糊推理过程采用 Min-Max 推理法 K_P、K_I、K_D 显著减少了运算量,以满足 PLC 实时计算需求。

PID 参数自整定原则如下[25-27]:

当实际质量与设定质量差值 e 较大时,提高 K_P 从而提高系统响应速度;取较小的 ΔK_I,以避免在储泥罐质量控制初期对螺旋输送器入泥深度参数过度控制导致产生过饱和现象,对系统产生较大的超调影响;减小 K_D 从而减少前期对偏差向各个方向上的变化的抑制,提高控制系统响应速度。

当实际质量在设定质量附近时,适当降低 K_P 值,减小控制系统超调量;适当增加 K_I,降低系统稳态误差;取较大的 K_D 从而抑制稳态过程中泥浆质量向设定质量两侧的变化稳定泥浆质量。

当实际质量过大时,取较小 K_P,消除超调现象;取较小 ΔK_I,减小系统超调现象;适当减小 ΔK_D 从而使系统及时快速地回到系统设定值上。根据上述设计原则结合实际工程经验,设计的 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 模糊控制规则如图 11 所示。

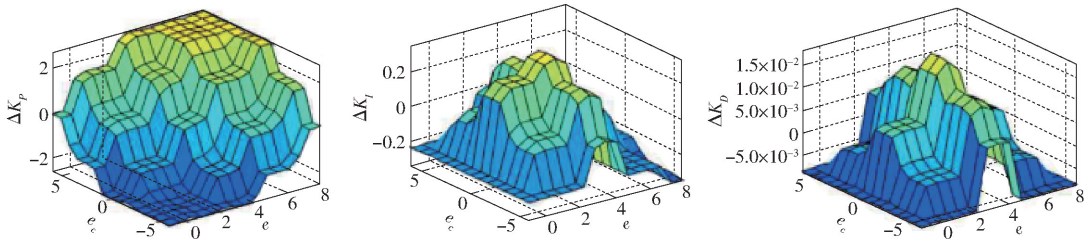


图 11　模糊控制规则

Fig. 11　Fuzzy control rules

为验证简化后模糊 PID 算法性能，通过 Matlab/Simulink 来测试简化算法控制效果，以确保动态性能不因简化而受到过大影响。

3.3　取泥控制系统仿真

3.3.1　控制系统模型建立

为验证取泥控制系统控制有效性，在 Matlab/Simulink 中对取泥控制系统进行仿真并与传统 PID 控制进行对比。仿真模型由模糊 PID 控制模型、螺旋输送器入泥深度调整模型、螺旋输送器旋转伺服电机模型、前进驱动伺服电机模型以及取泥模型组成，通过对螺旋输送器入泥深度和螺旋输送器转速的控制对取泥速度进行控制，使储泥箱中泥浆质量稳定在设定值附近，使取泥速度与出泥育秧速度匹配。

如图 12 所示，在 Matlab 中建立两输入三输出模糊控制器，导入 Simulink 并建立模糊 PID 控制模型，该模型输入值为储泥箱质量值与设定质量之间差值 e，差值 e 经过微分处理得到差值变化率 e_c，通过模糊控制器处理后得 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 对 PID 参数进行修正得到 K_P、K_I、K_D，e 通过 PID 控制器转换为螺旋输送器入泥深度设定值。

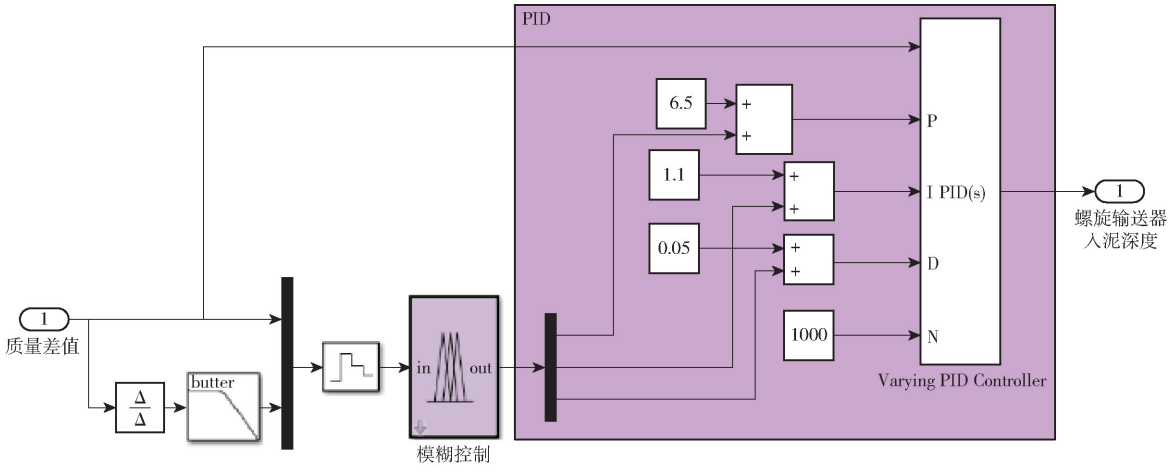


图 12　模糊 PID 控制模型

Fig. 12　Fuzzy PID control model

图 13 为入泥深度调控模型，电动推杆驱动速度为 40 mm/s，仿真开始时螺旋输送器入泥深度为零，通过式(2)可得电动推杆伸出距离与入泥深度转换公式。当实际入泥深度低于模糊 PID 得出的设定入泥深度时电动推杆伸出深度增加反之电动推杆收缩入泥深度减小。

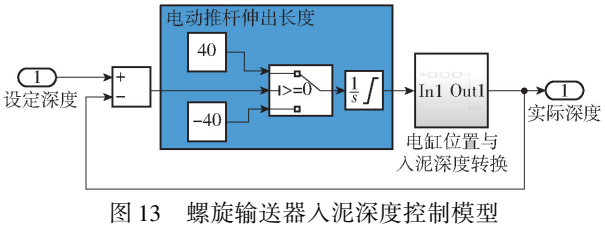


图 13　螺旋输送器入泥深度控制模型

Fig. 13　Spiral conveyor submersion depth control model

控制系统中螺旋输送器旋转与整机前进采用永磁同步伺服电机进行驱动，其中速度环与电流环均采用 PI 控制的方式[28]，其中速度环比例增益与速度环积分系数采用伺服电机默认参数分别为 $P=210$，$I=80$，电流环比例增益系数 $P=210$，电流环积分系数为 $I=80$，图 14 为伺服电机模型。

由 2.2 节可知，取泥装置田间取泥作业时对取泥速度由进泥速度、螺旋输送器输送泥浆速度以及刮板输送泥浆速度构成，为三者之间的最小值。通过 Simulink 建立取泥模型对三者进行比较取其中最小值，由此得取泥模型如图 15 所示。

将子系统模型组合，添加外部设定值，设定储泥箱泥浆质量为 8 kg，前进速度为 0.15 m/s，得到仿真模型如图 16 所示。

3.3.2　取泥控制系统仿真结果

设定仿真时间 50 s 进行传统 PID 控制和模糊

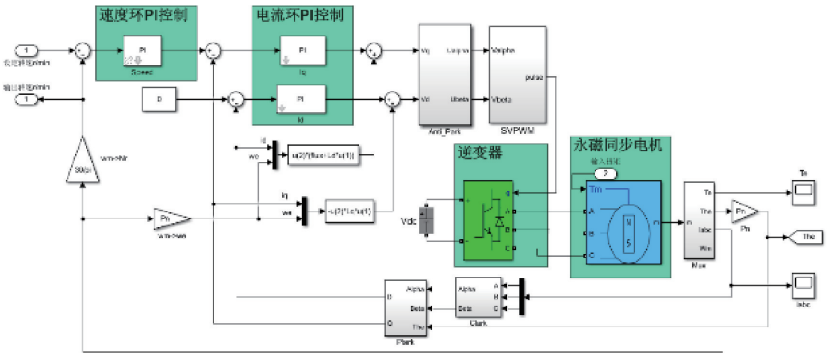


图 14 伺服电机模型

Fig. 14 Servo motor model

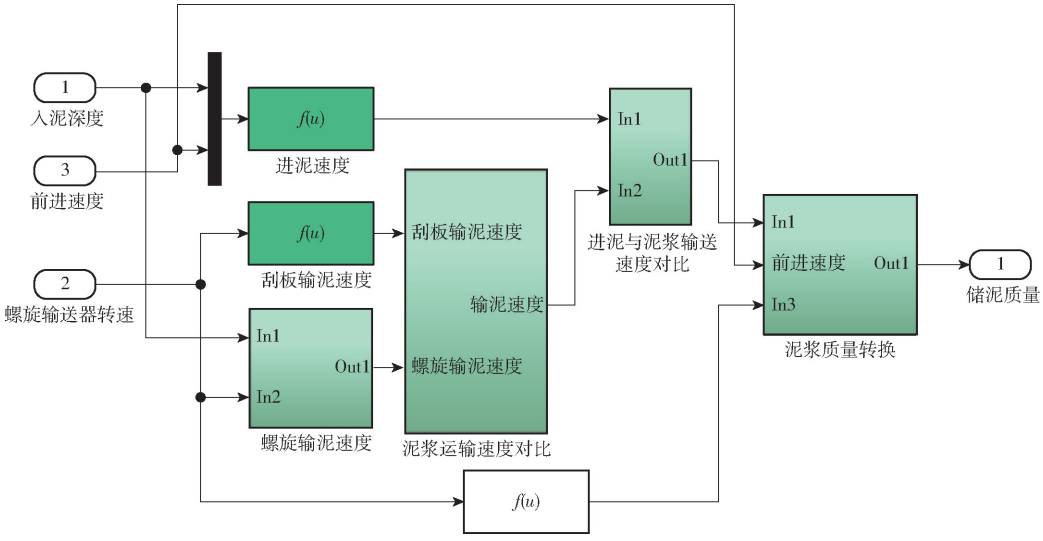


图 15 取泥模型

Fig. 15 Mud collection model

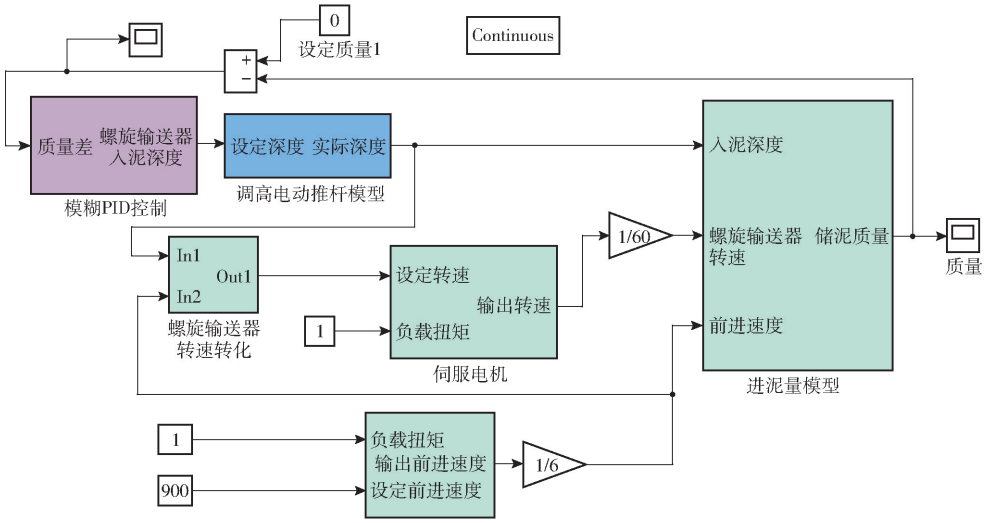


图 16 取泥控制系统仿真模型

Fig. 16 Simulation model of mud collection control system

PID 控制仿真,仿真结果如图 17 所示,图中传统 PID 控制前 2.19 s 因为输泥箱有一定长度泥浆无法及时输送到储泥箱中导致储泥箱中质量延迟,另外电动推杆调整速度为 40 mm/s 无法及时调整到设定深度,所以导致前期进泥速度小于出泥速度,泥浆无法在储泥罐中积累。在 2.19 ~ 5.7 s 之间取泥速度大于出泥速度,泥浆质量在储泥罐中进行累积在 5.7 s 达到最高值 9.8 kg,在 5.7 ~ 23 s 之间储泥罐中质量在 8 kg 附近振荡,23 s 后稳定在设定质量。

控制系统常规 PID 控制下超调量为 22.5%,调节时间为 23 s。采用模糊 PID 控制时系统的超调量远小于传统 PID 控制仅为 0.125%,调节时间也低

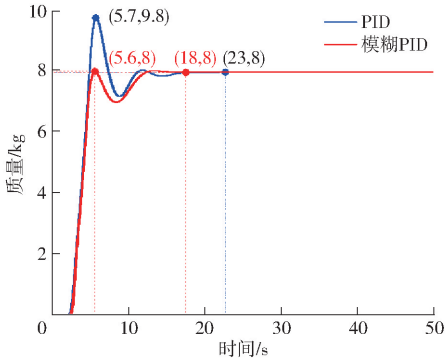


图 17　储泥箱泥浆质量仿真曲线

Fig. 17　Simulation curves of mud quality in mud storage tank

于传统 PID 控制仅为 18 s，综上所述育秧机取泥控制系统中采用模糊 PID 控制优于传统 PID 控制，简化后控制算法满足控制系统使用要求。

在田间取泥作业过程中，土壤硬度和泥浆密度等因素会随着环境条件变化而产生显著波动，可能导致螺旋输送机负载和泥浆质量产生变化。为了弄清外部波动对控制系统的影响，根据预试验得到的泥浆密度和电机扭矩变化范围，并采用正弦信号（$y=6+4\sin t$）N·m 模拟电机负载扭矩动态变化，设定正弦信号（$y=1.75+0.2\sin t$）g/cm^3 模拟田间泥浆密度动态变化情况，进行模糊 PID 仿真，得到结果与无动态干扰信号对比如图 18 所示。由图 18 可知，在泥浆质量上升阶段有无动态干扰信号之间质量曲线变化趋势相似，在达到稳定状态时，引入动态变化信号的仿真曲线在设定值附近呈现轻微波动，但幅度非常小，满足田间取泥控制系统要求，综上所述采用模糊 PID 算法设计的取泥控制系统具有较高的田间适应能力。

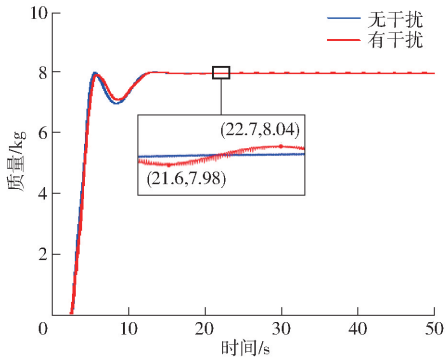


图 18　干扰信号下泥浆质量变化曲线对比

Fig. 18　Comparative curves of slurry quality variation under interference signal

4　取泥控制系统程序开发与台架性能试验

4.1　控制系统设计与优化

4.1.1　控制系统程序设计

取泥控制系统采用 S7－1200 CPU1212C 作为主控单元，使用博图 V17 进行控制程序的开发，并通过昆仑通态 TCP7022KT 触摸屏作为上位机与 PLC 控制器进行 TCP 通信。系统实现了台架操作，包括作业参数设置、数据采集处理与存储、手动与自动模式切换，以及报警信息的采集与存储等功能。取泥控制系统电气接线及控制程序如图 19 所示。

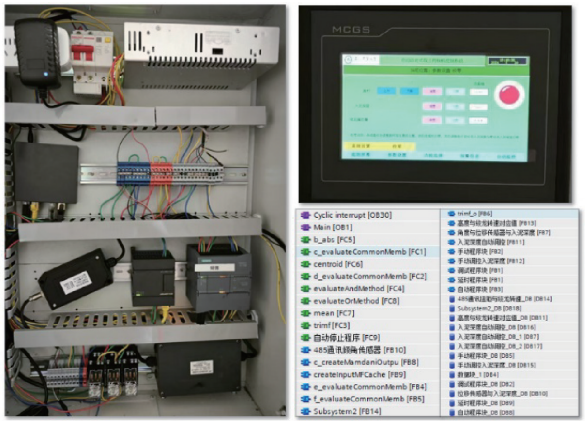


图 19　取泥控制系统程序及电气接线

Fig. 19　Mud collection control system program and electrical wiring

压力传感器采集储泥箱中泥浆的质量信号，量程为 0～50 kg，输出 0～10 V 模拟电压信号，用于反馈电动推杆的伸缩量的位移传感器输出信号为 0～10 V 模拟电压信号，用于反馈摆动收光板倾角的倾角传感器通过 RS485 通信输出 0～32 768 的数字量信号，经过滤波以及保护电路处理后模拟量信号分别接入 PLC 模拟量输入端口 AI0.0、AI0.1，RS485 数字量信号输送至 485 通信拓展板卡 CB1241，将信息传输至 PLC 控制器上经过数值解析得到目标信号，如图 20 所示。

自动取泥前，在触摸屏上设定前进速度和泥浆质量。控制程序将前进速度设定值转换为脉冲信号，通过 Q0.2 输出至伺服驱动器驱动伺服电机使整机以设定速度匀速前进；储泥箱泥浆质量设定值与测得实际质量进行差值计算将结果导入模糊 PID 控制程序块中，计算出螺旋输送器入泥深度设定值。

根据式(4)建立入泥深度转化程序块，将上述采集的摆动收光板倾角与电动推杆长度信号输入程序块中进行数值运算输出螺旋输送器入泥深度反馈值，对比螺旋输送器入泥深度反馈与设定深度值，输出端口 Q0.3、Q0.4 控制中间继电器驱动电动推杆进行螺旋输送器入泥深度调整，形成的入泥深度闭环控制系统提高螺旋输送器入泥深度控制精度。

为保证前侧不出现泥浆堆积现象，根据式(16)建立螺旋输送器伺服电机驱动程序块，在 PLC 中将螺旋输送器入泥深度反馈值转换成脉冲信号通过 Q0.0 输出至伺服驱动器对螺旋输送器转速进行控制。

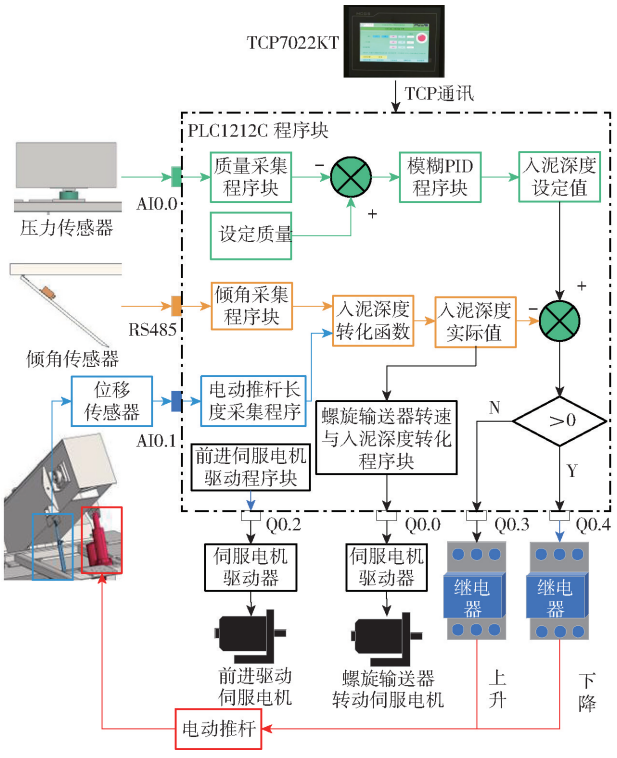


图 20 电气控制原理图

Fig. 20 Electrical control schematic

综上所述控制程序通过储泥箱的泥浆对螺旋输送器入泥深度和螺旋输送器转速控制,形成的闭环控制系统使储泥箱中泥浆质量稳定在设定值附近从而实现取泥速度动态匹配出泥育秧速度。

4.1.2 控制系统程序优化

(1)PLC 控制系统实时性

复杂田间环境中的快速变化要求系统能够在极短时间内更新控制策略,对 PLC 控制系统实时性提出了较高要求。为提高高速作业实时性,在控制算法、系统硬件和程序设计上进行了优化。

首先,在编写程序时发现过高的模糊子集数会降低数据处理实时性,采用 7×7 的模糊子集时 PLC 扫描周期为 450 ms,降低模糊子集数量又会降低控制精度和响应速度,所以程序设计时尝试多种组合并通过仿真对控制性能进行验证,最终确定 5×5 的模糊子集下控制性能与 PLC 系统实时性达到较为理想的平衡,简化后算法如 3.2 节所述,通过仿真和试验证明了简化后算法能够满足取泥作业要求。其次,系统硬件方面,采用了数据处理能力更强的 CPU1212C 作为主控单元,配备高采样频率的压力和位移传感器,并将倾角传感器的 RS485 通信波特率设定为 115 200,以提高数据输出实时性。

在程序设计上,通过中断程序采集传感器信号,避免了扫描周期对信号采集的影响。同时,建立了手动控制和自动控制的子程序块,通过按钮切换工作模式,调用不同工作模块,降低了控制系统的扫描周期。此外,采用临时变量作为中间变量,减少了内存访问和冗余计算。通过这些措施,显著提高了 PLC 在模糊 PID 控制下的实时性,缓解了 PLC 计算速度与复杂控制算法实时性之间的矛盾。

(2)控制系统抗干扰能力

田间取泥作业过程中噪声主要来源于机械振动和伺服电机电磁干扰,这些噪声会影响传感器信号采集的准确性和控制系统的稳定性。为了提升系统抗干扰能力,应从减小噪声来源和提升传感器抗干扰能力两方面入手。

控制系统机械振动主要由链条刮板传动和螺旋输送器入泥深度连续调整引起。针对链条刮板传动产生的振动,设计了链条张紧机构,以保持链条在稳定合适的张力下。同时,通过控制程序适当提高螺旋输送器转速补偿值 f,并将螺旋输送器的最大转速限制为 150 r/min,从而控制链条传动速度,减少机械振动。此外,伺服电机经过多级减速与螺旋输送器连接,这样不仅减小了电机扭矩波动,还增加了系统刚性并均匀分配了负载。这些结构性措施有效降低了取泥过程中链条刮板振动。

入泥深度调整控制系统存在惯性,如需要极其精确的深度调整,将导致电动推杆进行连续的伸缩运动,从而引发振动。为解决此问题,控制程序设定了入泥深度允许误差为 ±0.1 cm。虽然这在一定程度上降低了控制精度,但显著提升了工作过程稳定性,减少了系统振动。

在伺服电机驱动过程中,强烈变化的电磁场导致干扰信号在电缆中传输,从而对信号采集产生了较大影响。为应对这一问题,试验台架在电机驱动过程中加入了交流电源滤波器,大幅减少了电磁噪声,抑制了高频干扰,从而提高了传感器信号采集的准确性。

为了提高传感器的抗干扰能力,可以在传感器采集程序中添加滤波程序,或在传感器与 PLC 之间添加硬件滤波器。然而,复杂的滤波器程序会增加 PLC 的数据处理压力,影响数据采集的实时性。因此,针对压力与位移传感器,在信号变送器与 PLC 模拟量信号采集端口之间添加滤波器,消除高频噪声对传感器信号采集的干扰。同时,倾角传感器采用铝制外壳,内置卡尔曼滤波融合算法,并通过 RS485 通讯协议与 PLC 连接,在 A、B 口并联 120 Ω 匹配电阻以提高数据传输的可靠性。如图 21 所示,通过 NI 设备采集的优化前后传感器信号对比,充分说明了取泥控制系统具备较高的抗干扰能力。

4.2 试验方案

为了验证取泥控制系统的实际作业效果,在安

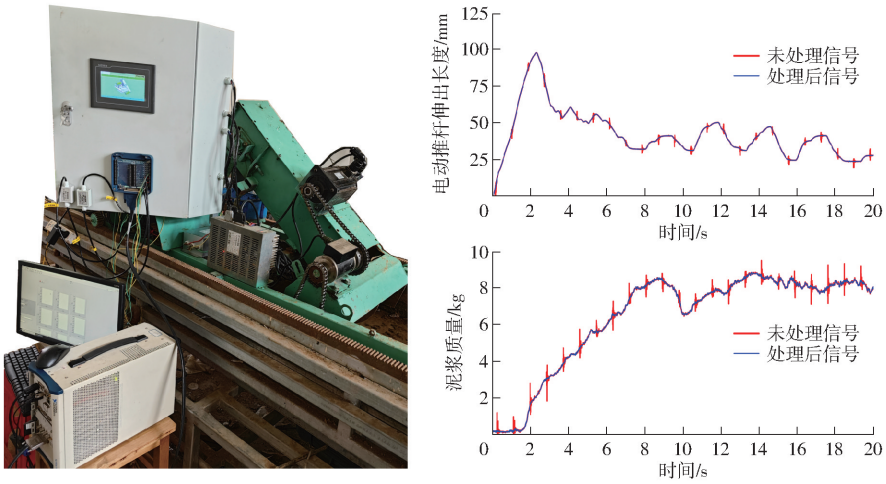


图 21　传感器信号采集

Fig. 21　Sensor signal acquisition

徽农业大学机电园的水田泥浆槽中进行了台架试验，泥浆槽长 10 m，宽 1 m，如图 22 所示。为了贴近现实育秧田环境，模拟田间育秧准备工作，在试验前对槽中的土壤进行给水浸泡、旋耕、沉淀、排水、晒田等处理[29-30]。为了模拟出泥育秧时储泥箱中泥浆流出状态，在储泥箱底部开一个 1 cm × 10 cm 矩形孔用于泥浆流出。



图 22　取泥控制系统试验台架

Fig. 22　Mud collection control system test bench

为了验证取泥控制系统在取泥过程中实际作业效果，实现取泥速度实时匹配出泥速度。试验过程中实时监测储泥箱中的泥浆质量，储泥箱中泥浆质量在达到设定值之后泥浆质量越稳定则说明取泥控制系统的作业性能越优异。在试验中以泥浆平面的平整度、整机前进速度为影响因素进行试验，验证在不同作业条件下取泥控制系统作业性能满足使用要求。按照自走式田间取泥水稻育秧机驾驶经验选择前进速度分别为 0.1、0.15、0.2 m/s，在不同平整度的土槽泥浆下进行台架试验。

如图 23 所示，评价土地平整度，采用农田表面相对高程标准偏差 s_d | $h_j - \bar{h}$ | 平整度测量方式，其计算公式为[31]

$$Y = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} (h_j - \bar{h})^2}{N - 1}} \tag{18}$$

式中　N——泥浆槽内取样测量点数



图 23　平整度测量

Fig. 23　Flatness measurement

h_j——第 j 个测量点至水平基准线垂直距离，mm

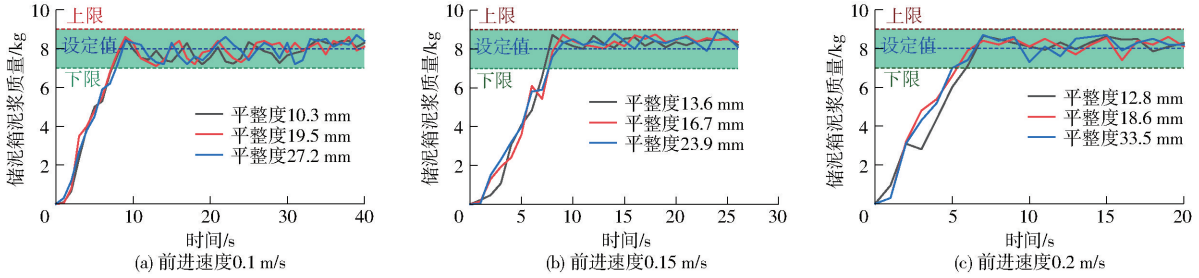
$\bar{h}$——测量点至水平基准线的垂直距离平均值，mm

4.3　试验结果

土槽长度为 8 m，除去试验台架长度以及安全停车空间剩余长度为 4 m，试验台架行进速度为 0.1、0.15、0.2 m/s 对应的试验时长分别为 40、26、20 s，试验时在稳定作业阶段储泥箱中应存有足量的泥浆同时泥浆质量又不能过于接近储泥箱泥浆存储量的上限，综合考虑稳定作业阶段泥浆质量上下限分别为 9、7 kg。

在试验台架上以与仿真相同的控制策略进行台架试验并通过触摸屏上的 ExportHisDataToCSV 函数，采集泥浆质量变化曲线如图 24 所示。

由图 24 可知，当前进速度为 0.1 m/s 时，储泥箱中泥浆质量第 10 秒第 1 次达到设定质量，计算从 10 ~ 40 s 平整度 10.3、19.5、27.2 mm 的试验中储泥箱中的泥浆质量标准偏差为 0.41、0.42、0.46 kg，储泥箱中泥浆质量最大值、最小值分别为 8.7、7.1 kg；前进速度为 0.15 m/s 时在储泥箱泥浆质量在第 8 秒第 1 次达到设定质量，计算从 8 ~ 26 s 平整度 13.6、16.7、23.9 mm 对应储泥箱中泥浆质量标准偏



(a) 前进速度0.1 m/s (b) 前进速度0.15 m/s (c) 前进速度0.2 m/s

图 24 不同前进速度和平整度下质量变化曲线

Fig. 24 Mass variation curves at different flatness levels with different forward speeds

差为 0.21、0.24、0.29 kg,其中储泥箱中泥浆质量最大值和最小值分别为 8.8 kg、7.6 kg;当前进速度为 0.2 m/s 时,储泥箱中泥浆质量在 7 s 第 1 次达到设定质量,计算 7 ~ 20 s 平整度 12.8、18.6、33.5 mm 对应的储泥箱中泥浆质量标准偏差为 0.25、0.32、0.40 kg,其中储泥箱中泥浆质量最大值、最小值分别为 8.7、7.3 kg。整理后试验结果如表 4 所示。

表 4 试验结果统计

Tab. 4 Experimental results statistics

试验序号	前进速度/(m·s^{-1})	平整度/mm	标准偏差/kg	最大质量/kg	最小质量/kg
1	0.10	10.3	0.41	8.6	7.2
2	0.10	19.5	0.42	8.6	7.1
3	0.10	27.2	0.46	8.7	7.2
4	0.15	13.6	0.21	8.7	8.0
5	0.15	16.7	0.23	8.7	7.8
6	0.15	23.9	0.29	8.8	7.6
7	0.20	12.8	0.25	8.6	7.8
8	0.20	18.6	0.32	8.6	7.4
9	0.20	33.5	0.40	8.7	7.3

由表 4 可知,虽储泥箱中泥浆质量与设定质量之间有所偏差但在合理范围之内。取泥控制系统在相同前进速度不同泥浆表面平整度情况下,随着泥浆表面平整度增加储泥箱中泥浆质量波动幅度略有增加,这是由于收光板对泥浆表面有收光抹平的效果,经过收光后泥浆表面平整度下降,从而达到控制泥浆表面平整度对取泥作业性能的影响程度。在相同泥浆表面平整度情况下前进速度为 0.1 m/s 时储泥箱中泥浆质量稳定性最差,这是由于前进速度较低时进泥速度相较于较高的前进速度低,出泥速度较大从而导致在稳定阶段波动较为明显,在试验中前进速度为 0.15 m/s 时泥浆质量稳定效果最好。在储泥箱质量达到稳态后,储泥箱中泥浆质量最大值为 8.8 kg,最小值为 7.1 kg,偏差较小表明取泥控制系统能够实现储泥箱中的泥浆质量的稳定控制,从而使得取泥速度实时匹配出泥速度实现自适应取泥的任务。在试验过程中螺旋输送器入泥深度能够随着储泥箱中泥浆质量与设定质量之间的偏差进行及时的调整,螺旋输送器转速能够随入泥深度变化而变化,螺旋输送器前端没有出现泥浆堆积的情况。相比于手动控制螺旋输送器深度进行取泥作业,自动取泥控制系统提高了作业精度,减少了劳动强度。

图 25 为前进速度为 0.15 m/s 时仿真结果与台架试验结果平均值对比,仿真时系统上升时间为 5 s,试验中上升时间略有增加为 7 s。仿真时泥浆最大超调量为 8.2 kg,试验中泥浆超调量为 8.6 kg,泥浆质量的稳定时间均为 12 s,由仿真与试验绝对误差可知,在泥浆质量上升阶段时仿真与试验的结果相差较大,造成偏差的原因可能是:①泥浆输送存在泥浆回流从而导致实际进泥速度小于理论速度,从而导致仿真中泥浆质量响应速度略快于试验,导致前期仿真结果不一致。②实际设备取泥在螺旋输送器与输泥箱中存在空隙,取泥之初泥浆会先流入空隙中,无法被输送至储泥箱,也是造成在取泥前期试验泥浆输送速度较低的原因。③试验时泥浆密度无法与仿真中的泥浆密度严格保持一致,另外泥浆的密度在深度方向上不均匀,上层泥浆中含水率更高泥浆密度较低,下层泥浆中泥浆密度较大,也会导致前期仿真结果与试验结果不一致。

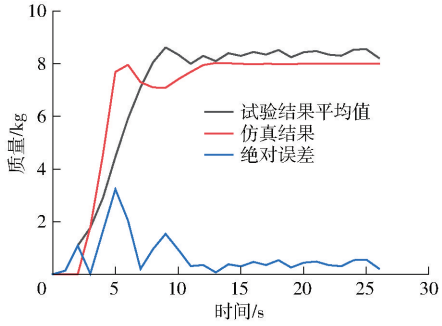


图 25 仿真与试验结果对比

Fig. 25 Comparison of simulation and experimental results

后期随着模糊 PID 控制中的模糊控制和积分环节发挥作用,补偿了螺旋输送器入泥深度,从而使泥浆质量稳定在设定值,仿真与试验结果基本一致,符合预期效果。通过对比仿真与试验结果可知,该仿真模型可以很好地模拟取泥过程中作业参数控制过

程以及泥浆质量变化情况，为取泥控制系统研发和后续优化提供了合适仿真模型。

5　结论

（1）针对田间水稻育秧机取泥装置入泥深度难以监控的问题，设计了一种螺旋输送器入泥深度监控装置，该装置通过收光板自重平整泥浆表面并通过倾角传感器与位移传感器获取螺旋输送器入泥深度反馈值，对比反馈值与设定值控制电动推杆伸缩，实现入泥深度的控制。

（2）设计了自走式田间取泥育秧机的取泥装置采用就地取泥育秧的方法解决了现有育秧机存在的机具笨重、育秧成本高问题。设计了取泥控制系统，使作业效果与作业参数之间形成闭环控制，泥浆质量稳定在设定值，取泥量自动匹配出泥量，保证了田间连续取泥育秧。

（3）通过仿真与台架试验验证了取泥控制系统具有稳定可靠的控制性能，在不同前进速度、泥浆表面平整度土槽中，取泥控制系统土槽中泥浆质量均能稳定在设定质量上下波动，尽管控制效果在泥浆表面平整度下降时有所减弱，但仍能满足田间取泥育秧机使用要求。

参　考　文　献

[1] 陈辉. 秧床稀泥摊铺机的设计与研究[D]. 福州：福建农林大学，2020.
CHEN Hui. The design and research of sludge paver for rice seedling bed[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2020.（in Chinese）

[2] 胡志超，张会娟，钟挺，等. 推进南方丘陵山区农业机械化发展思考[J]. 中国农机化学报，2011,32(5):16－18.
HU Zhichao, ZHANG Huijuan, ZHONG Ting, et al. Reflections on the development of promoting agriculture mechanization in Chinese Southern mountain and hill areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(5): 16－18.（in Chinese）

[3] 金亦富，生昕，李振岩，等. 2B－4A 型自走式育秧机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2015,36(6):15－18.
JIN Yifu, SHENG Xin, LI Zhenyan, et al. Design and experiment of type 2B－4A self-propelled seedling machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015,36(6):15－18.（in Chinese）

[4] 杨望，何俊伟，杨坚，等. 2YBZ－26 型电磁振动式水稻田间育秧播种机试验研究[J]. 农机化研究，2015,37(8):131－137.
YANG Wang, HE Junwei, YANG Jian, et al. Experiment on 2YBZ－26 type electromagnetic vibrated seeder of rice for field seedling raising[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(8):131－137.（in Chinese）

[5] 袁文胜，姬长英，金诚谦，等. 悬挂式水稻田间育秧播种机设计与试验[J]. 农业现代化研究，2017,38(2):352－359.
YUAN Wensheng, JI Changying, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of suspension seeder of rice seedlings nursery in nursery bed[J]. Research of Agricultural Modernization, 2017,38(2):352－359.（in Chinese）

[6] 何焯亮. 水田船型拖拉机船体结构与工作参数优化试验[D]. 杭州：浙江大学，2018.
HE Chaoliang. Experiment of structures and working parameters optimization for paddy field boat-type tractor[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2018.（in Chinese）

[7] 宫元娟，金忠博，白晓平，等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2023,54(2):119－128.
GONG Yuanjuan, JIN Zhongbo, BAI Xiaoping, et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):119－128.（in Chinese）

[8] 李涛，李娜，刘存根，等. 薯类收获机挖掘深度自动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2021,52(12):16－23.
LI Tao, LI Na, LIU Cungen, et al. Development of automatic depth control system employed in potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(12):16－23.（in Chinese）

[9] 耿爱军，张猛，张姬，等. 玉米收获机割台高度自动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2020,51(增刊2):118－125.
GENG Aijun, ZHANG Meng, ZHANG Ji, et al. Design and experiment of automatic control system for corn header height[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):118－125.（in Chinese）

[10] 李树兵，李清华，孙冬霞. 自走式上肥撒施一体机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2023,44(6):202－209.
LI Shubing, LI Qinghua, SUN Dongxia. Design and test of self-propelled fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 202－209.（in Chinese）

[11] 魏赛楠. 电动履带式牛场清粪装置设计与研究[D]. 保定：河北农业大学，2019.
WEI Sainan. Design and research of electric crawler type cattle farm waste removing device[D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2019.（in Chinese）

[12] FADAEI A, SALAHSHOOR K. Design and implementation of a new fuzzy PID controller for networked control systems[J]. ISA Transactions, 2008,47(4):351－361.

[13] OUBERRI Y, YATIMI H, AROUDAM E. Design of a robust sliding mode controller for MPPT based on automation PLC for PV applications[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020,30(4):e12296.

[14] LI M, YAN Y, TIAN L, et al. Design and experiment of the profiling header of river dike mower: agriculture[Z]. 2024.

[15] 万松，陈子林，展鹏程，等. 基于传感技术的水田旋耕机平地系统的设计与试验[J]. 华中农业大学学报，2016,

35(4):129 - 135.
WAN Song, CHEN Zilin, ZHAN Pengcheng, et al. Designing the leveling system of paddy field rotary cultivator based on tilt angle sensor control technology[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016,35(4):129 - 135. (in Chinese)
[16] 刘宏俊, 赵淑红, 谭贺文, 等. 基于刮削与振动原理的减粘降阻镇压装置研究[J]. 农业机械学报, 2018,49(1):86 - 92.
LIU Hongjun, ZHAO Shuhong, TAN Hewen, et al. Investigation on press device in reducing adhesion and resistance based on scrape and vibration principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):86 - 92. (in Chinese)
[17] 余忠义. 自走式水稻田间育秧机取泥装置设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
YU Zhongyi. Design and experiment of mud-taking device for self-propelled rice field seedling machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[18] 余书豪, 李永桥, 谌永祥, 等. 供料方式对垂直螺旋输送机性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2017,23(4):6 - 11.
YU Shuhao, LI Yongqiao, CHEN Yongxiang, et al. Influence of feeding mode on performance of vertical screw conveyor[J]. China Powder Science and Technology, 2017,23(4):6 - 11. (in Chinese)
[19] 王明旭, 靳航嘉, 李永祥. 开口式移动螺旋输送关键参数的研究[J]. 机械设计与制造,2024,18(6):1 - 5.
WANG Mingxu, JIN Hangjia, LI Yongxiang. Study of key parameters of open and moving type screw conveyor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024,18(6):1 - 5. (in Chinese)
[20] 刘威, 唐倩, 刘宗敏, 等. 水平式螺旋输送机运动模型搭建和参数化设计[J]. 食品与机械, 2019,35(6):96 - 99.
LIU Wei, TANG Qian, LIU Zongmin, et al. The movement model construction and parametric design of horizontal screw conveyor[J]. Food and Machinery, 2019,35(6): 96 - 99. (in Chinese)
[21] 张西良, 马奎, 王辉, 等. 颗粒尺寸对螺旋加料机定量加料性能的影响[J]. 农业工程学报, 2014,30(5):19 - 27.
ZHANG Xiliang, MA Kui, WANG Hui, et al. Effect of particle size on precision dosing of screw feeder[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 19 - 27. (in Chinese)
[22] 薛冰, 周利明, 牛康, 等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 1):93 - 102.
XUE Bing, ZHOU Liming, NIU Kang, et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 93 - 102. (in Chinese)
[23] PHU N D, HUNG N N, AHMADIAN A, et al. A new fuzzy PID control system based on fuzzy pid controller and fuzzy control process[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020,22(7):2163 - 2187.
[24] ZHANG F, ZONG S, LI X, et al. Hydraulic gap control of rolling mill based on self-tuning fuzzy PID[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016,31:2985 - 2997.
[25] 陈黎卿, 解彬彬, 李兆东, 等. 基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9):33 - 41.
CHEN Liqing, XIE Binbin, LI Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop PID fuzzy algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(9): 33 - 41. (in Chinese)
[26] 王辉, 刘艺豪, 周利明, 等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(2): 32 - 40.
WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 32 - 40. (in Chinese)
[27] 周志艳, 周铭杰, 陈羽立, 等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022,53(12): 70 - 79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Automatic leveling control system of rotors hovering spray boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):70 - 79. (in Chinese)
[28] 左月飞, 张捷, 刘闯, 等. 基于自抗扰控制的永磁同步电机位置伺服系统一体化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11):51 - 58.
ZUO Yuefei, ZHANG Jie, LIU Chuang, et al. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on active disturbance rejection control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 51 - 58. (in Chinese)
[29] 周晚来, 王朝云, 易永健, 等. 我国水稻机插育秧发展现状[J]. 中国稻米, 2018,24(5):11 - 15.
ZHOU Wanlai, WANG Chaoyun, YI Yongjian, et al. Development status of rice seedling raising technology for mechanical transplanting in China[J]. China Rice, 2018,24(5):11 - 15. (in Chinese)
[30] 邹应斌. 水稻育秧技术的历史回顾与发展[J]. 作物研究, 2018,32(2):163 - 168.
ZOU Yingbin. Historical retrospect and development of rice raising seedlings[J]. Crop Research, 2018,32(2):163 - 168. (in Chinese)
[31] 王金峰, 杨东泽, 王震涛, 等. 水稻秸秆双轴深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(4):21 - 30.
WANG Jinfeng, YANG Dongze, WANG Zhentao, et al. Design and experiment of rice straw biaxial deep-buried returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):21 - 30. (in Chinese)