

生物质颗粒机组远程监控系统设计与试验

王伟伟^{1,2} 汤君杰¹ 周国安¹ 何家勋¹ 谢东波¹ 郑 泉^{1,2}

(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)

摘要: 为提高生物质颗粒生产自动化水平,实时监控制粒机组生产过程中作业参数,解决当前存在的粉料喂入量不精确导致的压缩室堵塞问题,设计了一套生物质制粒远程监控系统,依托运行于远程上位机内的模糊 PID 控制算法,PLC 通过 OPC 与之通信实现对粉料喂入量的控制;以 5G 网络作为远程数据传输途径,选择 5G 工业路由器作为网络数据收发器,通过网页、手机 APP 或微信小程序实现客户端的远程监控功能。本系统设置了用户监控层、数据网络传输层和测控现场层;基于系统远程监控要求,工业路由器与 PLC 之间通过 PROFINET 协议实现数据传递;并使用 MQTT 协议,实现其与云服务器之间数据传输。根据对系统稳定性、喂料量准确性及其通信性能的试验,稳定时电流实际值与目标值平均相对误差在 1% ~ 12% 范围内波动,变异系数在 0.19% ~ 0.28% 范围内波动,满足生物质颗粒生产需求,有效提高了生物质颗粒生产智能化水平。

关键词: 生物质颗粒机; 远程监控; 5G 网络; 模糊 PID 控制

中图分类号: S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0402-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Remote Monitoring System for Biomass Briquetting Machine

WANG Weiwei^{1,2} TANG Junjie¹ ZHOU Guoan¹ HE Jiaxun¹ XIE Dongbo¹ ZHENG Quan^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to improve the automation level of biomass briquetting machine production, monitor the key parameters in the production process of the briquetting machine in real time, and solve the problem of blockage in the compression chamber caused by inaccurate powder feeding rate, a set of remote monitoring system for biomass briquetting machine was designed, which realized the control of powder feeding rate through OPC communication with PLC relying on the fuzzy PID control algorithm running in the remote host computer. The 5G network was used as the remote data transmission channel, the 5G industrial router was selected as the network data transceiver, and the remote monitoring function of the client was realized through the Web page, mobile phone APP or WeChat applet. This system set up user monitoring layer, data network transmission layer and measurement and control field layer. Based on the requirements of system remote monitoring, data transmission between industrial router and PLC was realized through PROFINET protocol. The MQTT protocol was used to realize data transmission between it and the ECS. According to the tests on system stability, feeding accuracy and communication performance, when the current was stable, the average error between the actual value and the target value of the current fluctuated at the range of 1% ~ 12%, and the variance fluctuated at 0.19% ~ 0.28%, meeting the production needs of biomass particles and improving the intelligent level of biomass particle production.

Key words: biomass briquetting machine; remote monitoring; 5G network; fuzzy PID control

收稿日期: 2022-10-23 修回日期: 2022-11-24
基金项目: 安徽省科技重大专项(202003a06020013)和安徽省重点研发与开发计划项目(202004a06020058)
作者简介: 王伟伟(1989—),男,副教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wangww0618@163.com
通信作者: 郑泉(1970—),女,教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: zhengquan@ahau.edu.cn

0 引言

生物质颗粒燃料是一种以农林废弃物为原料生产的高热值、低污染、绿色型可再生能源,其开发与利用对建设资源节约型、环境友好型社会,助推“碳中和 + 乡村振兴战略”落实具有重要意义。据统计 2021 年我国农林废弃物产量高达 8.02 亿 t,提高生物质颗粒产量是有效解决我国能源短缺问题重要途径之一^[1-3]。生物质颗粒机作为生物质颗粒生产线的核心装备,其生物质颗粒生产流程包括农林废弃物精细化粉碎、粉料经螺旋输送机喂入颗粒机压缩室,经压辊挤压后进入环模孔,从而聚合成高密度颗粒,通过刮刀切断,形成生物质颗粒燃料成品^[4-6]。

诸多学者在生物质颗粒成型领域做了大量研究^[7-25]。但由于当前用户难以根据制粒粉料参数进行实时控制,易出现颗粒品质差、故障率高等问题,尤其不同种类的生物质原料对应的最佳物料层厚度不同,出现驱动螺旋输送机送料速度与制粒机压辊主轴速度不匹配,造成单位产量能耗增高、颗粒机物料压缩室壅堵、模孔堵塞,从而损坏颗粒机核心部件等问题。

本文设计一种生物质颗粒机组远程监控系统,基于模糊 PID 算法实现对螺旋输送机送料与压辊主轴最优速度匹配控制,同时实现颗粒生产线各分机作业状态实时监测与故障报警,以提高生物质颗粒机组生产智能化水平,解决喂料速度与压辊主轴转速不匹配引起的物料模孔堵塞,造成生物质颗粒机环模-压辊等核心部件损坏等问题。

1 系统总体设计与工作原理

1.1 机组结构组成与原理

生物质颗粒机组整体结构主要包括供料管、主电机、机架、刮料电机、出料口、制粒机构、罩壳、刮料刀、环模、螺旋输送机、螺旋输送机驱动电机、维护支架。如图 1 所示,主电机、制粒机构与机架上方连接,且主电机的输出轴通过带轮和皮带驱动制粒机构转动制粒,环模安装于制粒机构外侧,刮料刀与制粒机构上端外侧连接,罩壳与制粒机构连接,出料口与罩壳上端中心连接,刮刀电机与机架上端固定连接,螺旋输送机驱动电机安装在螺旋输送机轴末端,螺旋输送机落料口与制粒机构相连。当颗粒机工作时,粉料从供料管通过螺旋输送机输送至喂料口,经制粒机构从环模孔挤压成型,再由刮料刀将压制成型的粉料切断为颗粒后从出料口排出。生物质颗粒机组技术参数如表 1 所示。

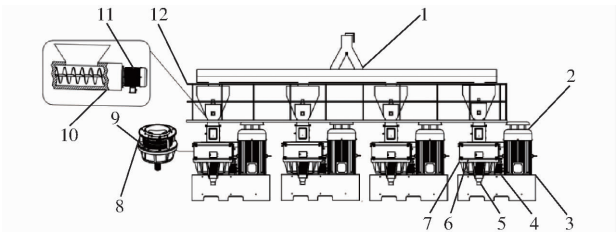


图 1 生物质颗粒机组结构示意图

Fig.1 Schematic of biomass briquetting machine structure

1. 供料管 2. 主电机 3. 机架 4. 刮料电机 5. 出料口 6. 制粒机构 7. 罩壳 8. 刮料刀 9. 环模 10. 螺旋输送机 11. 螺旋输送机驱动电机 12. 维护支架

表 1 生物质颗粒机组技术参数

Tab.1 Parameters of biomass briguetting machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 600×2 400×4 700
设备总功率/kW	200
整机质量/kg	5 500
刮料刀驱动电机功率/kW	0.55
螺旋输送机驱动电机功率/kW	2.2
颗粒机驱动电机功率/kW	55
颗粒机组数量	4
整机效率/(kg·h ⁻¹)	3 800

1.2 远程监控系统设计

1.2.1 系统硬件选择与集成

生物质颗粒机组远程监控系统由 PLC 控制器、A/D 转换模块、D/A 转换模块、HMI 触摸屏、变频器、交流互感器、压力传感器、称量传感器、温度传感器、湿度传感器、5G 智能网关、电源模块等硬件构成。系统选用西门子 S7-1200 1215 PLC 作为主控制器,基于西门子 KTP-700 Basic 型触摸屏开发各机组控制参数人机交互界面,其中 5G 智能网关选用 AR580 型工业网关,表 2 为各硬件规格参数。

远程监控系统主要由控制系统、上位机、云平台、远程监控客户端组成,图 2 为监控系统总体框架。其中,控制系统包括信息采集模块、PLC 控制模块及数据传输模块,信息采集模块利用交流互感器、温湿度传感器、称量传感器分别采集电机相电流、粉料含水率、环模温度、颗粒产量等参数,并将参数信息以模拟信号传输给 PLC 控制器;以数字量和模拟量控制继电器和变频器,继而控制机组各电机的启停、转向和调速;数据传输模块基于 5G 工业智能网关将各参数传输至上位机与云服务器,远程监控生物质颗粒机在线状态参数,并且发送用户指令至生物质颗粒机端,接收生物质颗粒机工作状态信息。用户利用人机交互界面触摸屏按钮调制生物质颗粒机组作业参数。同时,工业智能网关通过 MQTT 通信协议将 PLC 中数据上传至云服务器,云服务器对

表 2 硬件选型
Tab.2 Hardware selectione

名称	技术参数	数值或型号
S7-1200 1215 PLC	工作电压/V	220(AC)
	输出类型	继电器型
	数字输入/输出数	14/10
1215 AC/DC/RLY	模拟量通道数	2
	通信端口数	2
KTP-700 Basic 型触摸屏	额定电压/V	19.2~28.8
	触摸屏模式	电阻式
	通信方式	Profinet
	量程/A	0~300
BH-0.66 30Φ 型交流互感器	准确度	0.5 级
	信号输出/A	0~5
PT1000 型温度传感器	工作电压/V	24(DC)
	检测范围/℃	-50~200
	信号输出/mA	4~20
CJHJ-31A 型湿度传感器	工作电压/V	24(DC)
	测量精度/%	±3
	分辨率/%	0.1

收到的数据解析后保存到数据库,数据库会将接收数据存储并分类显示,发布至网络。其他用户可通过浏览器登录云平台,或使用手机 APP 对机组生产过程进行查询。为了实时监测生产中的报警信息,系统将报警信息以短信方式发送至监控人员,以应对突发状况。

1.2.2 监控系统软件界面设计

远程监控客户端界面包括主界面和机组监控子界面,如图 3 所示,主界面由历史报表、生产监控、设备监控、操作界面、实时曲线等部分组成,用户可通过操作界面栏的机组选择按钮进入各机组监控子界面,查看当前各机组生产状态信息,如主电机、螺旋输送机驱动电机、刮料电机的运行是否正常,可按需求将历史数据信息和历史报警信息以 Excel 表格形式下载,以便后续开展分析工作。机组监控子界面由机组控制栏和运行状态监控栏组成,机组控制栏的功能为子机组的电机启停、正反转和调速,运行状

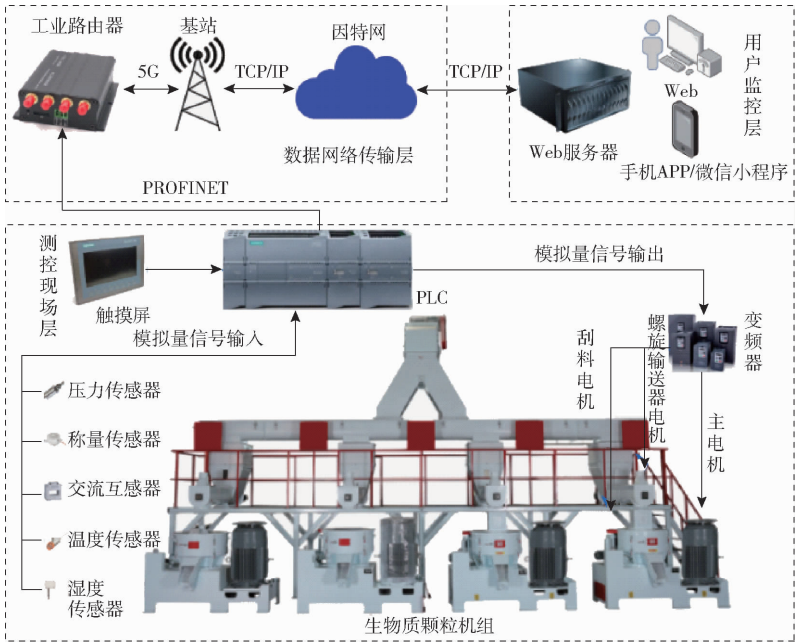


图 2 远程监控系统工作原理图

Fig.2 Working principle of remote monitoring system

态监控栏显示生物颗粒机传感器监测参数信息、机组工作状态信息。

2 机组控制电机建模

为优化系统控制过程,降低下料速度变化导致的主机电流变化,对螺旋输送机送料系统进行传递函数的模型建立。生物颗粒控制系统控制模型由主电机的交流互感器采集的实时电流作为输入,通过电流转换器转换为控制器能够读取的电信号,控制器经过换算后将电信号输送给变频器,变频器控制螺旋输送机驱动电机的转速,最后系统输出量

为喂料速度。如图 4 所示,由于喂料速度会引起生物颗粒机主机电流变化,利用交流互感器测量主轴电机实际转速信号反馈至控制器,实现螺旋输送机喂料转速的闭环控制。

2.1 变频器的数学模型与传递函数

所选变频器通过恒压频比方式控制电机向下调频率,该方法可忽略电机磁通变化,因此,将其传递函数看成一个惯性环节。即

$$f = K_f u_r \tag{1}$$

式中 f ——变频器输出频率,Hz
 K_f ——信号输入增益系数



图 3 云平台界面

Fig. 3 Interface of cloud platform

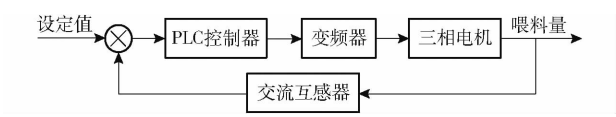


图 4 粉料喂入系统控制系统框图

Fig. 4 Control system block diagram of powder feeding system

u_r ——变频器输入模拟量电压,V

电机额定输入电压 U_N 为

$$U_N = K_N f_N \quad (2)$$

式中 f_N ——电机额定输入频率,Hz

K_N ——信号输出增益系数

变频器输出电压为

$$U_c = K_u f = K_N K_f u_r \quad (3)$$

故变频器传递函数为

$$G_1(s) = \frac{U_c(s)}{U_r(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (4)$$

式中 K_1 ——电压频率转换系数

T_1 ——时间常数

2.2 三相电机数学模型与传递函数

在忽略谐波干扰、磁路饱和以及铁损影响的条件下,对恒压频比控制的三相电机进行数学建模。由电机正常工作状态下的近似等效电路可得,折算到定子侧的转子电流 I_r' 表达式为

$$I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + C_1 \frac{R_r'}{S}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + C_1 L_{1r}')^2}} \quad (5)$$

式中 U_s ——电机输入电压,V

R_s ——定子每相电阻, Ω

R_r' ——转子每相电阻, Ω

S ——转差率

C_1 ——励磁电感,H

L_{1s} ——定子每相电感,H

ω_1 ——电机电磁角频率,Hz

L_{1r}' ——转子每相电感,H

忽略励磁电流,则 $C_1 \approx 1$ H,则转子电流 I_r' 为

$$I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r'}{S}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2}} \quad (6)$$

根据机电能量转换关系得到电机的电磁转矩

T_e 为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3 I_r'^2 R_r' n_p}{S \omega_1} \quad (7)$$

式中 P_m ——电动机电磁功率,W

ω_m ——同步电磁角速度,rad/s

n_p ——电机磁极对数

代入可得

$$T_e = \frac{3 n_p R_r'}{S \omega_1} \times \frac{U_s^2}{\left(R_s + \frac{R_r'}{S}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2} \quad (8)$$

三相电机在正常工作时,转差率 S^2 可以忽略,则可简化为

$$T_e = \frac{3 n_p}{2 \pi f_s R_r'} \left(U_s^2 - \frac{n_p n}{60 f_s} U_s^2 \right) \quad (9)$$

式中 f_s ——电机输入频率,Hz

n ——螺旋输送机电机输出转速,r/min

根据电机的参数可得转子每相电阻为

$$R_r' = \frac{3 n_p U_N^2 S}{2 \pi f_N T_N} \quad (10)$$

式中 T_N ——电机额定输出扭矩,N·m

根据运动平衡方程,可得

$$J \frac{dn}{dt} + B n(t) + T_L = T_e \quad (11)$$

式(9)、(10)代入式(11),得到转速与输入电压的微分方程为

$$J \frac{dn}{dt} + B n(t) + T_L = \frac{3 K_N n_p}{2 \pi R_r'} U_s - \frac{3 K_N^2 n_p^2}{120 \pi R_r'} n(t) \quad (12)$$

式中 J ——转子转动惯量,kg·m²

B ——粘滞阻尼系数

T_L ——负载转矩,N·m

螺旋输送机工作时,可将其近似为一个旋转刚体

$$T_L = J_L \frac{dn}{dt} \quad (13)$$

$$\text{其中 } J_L = \frac{1\,000 \pi \gamma D^4 L}{32 \times 980} \quad (14)$$

式中 J_L ——负载折算到电机轴的转动惯量,kg·m²

γ ——近似刚体密度,g/cm³

D ——近似刚体直径,mm
 L ——近似刚体长度,mm

螺旋输送机与变频三相电机的参数如表 3、4 所示,代入式 (12) 并对其做拉普拉斯变换,得到其传递函数表达式为

$$G_2(s) = \frac{n(s)}{U(s)} = \frac{15.8}{12.8s + 0.54} \tag{15}$$

则变频三相电机的传递函数为

$$G(s) = G_1(s) G_2(s) = \frac{79}{0.192s^2 + 12.8s + 0.54} \tag{16}$$

表 3 螺旋输送机近似刚体参数

Tab.3 Rigid body parameters

参数	数值
近似刚体密度 $\gamma/(g \cdot cm^{-3})$	7.4
近似刚体直径 D/mm	317
近似刚体长度 L/mm	1 700

表 4 变频器与三相异步电机参数

Tab.4 Inverter and three-phase asynchronous motor parameters

参数	数值
变频器输入模拟量电压 u_r/V	0 ~ 10
变频器输出频率 f/Hz	0 ~ 50
变频器输出电压 U_c/V	0 ~ 380
频率上升时间 t/s	0.015
额定电压 U_N/V	380
额定频率 f_N/Hz	50
额定输出扭矩 $T_N/(N \cdot m)$	14.7
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.01
额定转速 $n_N/(r \cdot min^{-1})$	1 440
电机磁极对数 n_p	2
粘滞阻尼系数 B	0.01

电机输出转速 n 与螺旋输送机喂料量 Q 的关系式为

$$Q = 47D_l^2 S_l \varphi_l \lambda_l \varepsilon_l n \tag{17}$$

式中 D_l ——螺旋外径,mm S_l ——螺距,mm
 φ_l ——填充系数
 λ_l ——物料单位容积质量,kg/m³
 ε_l ——倾斜输送系数

3 模型仿真分析

3.1 模糊 PID 控制器设计

传统 PID 控制器参数需要多次试验调整,且系统运行过程中参数不能改变。因此,传统 PID 仅适用于线性定常系统,对于非定常系统需要对各个工况进行 PID 参数整定,系统根据工况实时切换^[26-27]。由所建立的生物质颗粒上料系统数学模

型可知,在建模时为了简化建模过程,存在将非线性特性进行局部线性化,但这种简化将会对系统动态特性产生影响,同时由于在生产中常常将不同原料种类的粉料与碎布和牛粪等相互混合,且其混合比例不固定,因此实际负载存在不规律变化。传统 PID 对变负载工况下的响应速度慢,控制效果差,模糊 PID 相较于传统 PID,具有不需要精确数学模型,系统鲁棒性好的优点^[28-32],如图 5 所示,基于生物质颗粒机螺旋输送机上料控制系统的控制要求对模糊 PID 控制器进行设计。

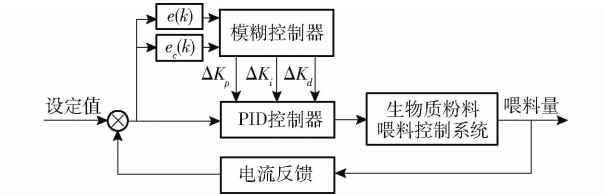


图 5 模糊 PID 控制系统框图

Fig.5 Block diagram of fuzzy PID control system

模糊 PID 控制原理是将输入输出的参数模糊化,根据专家经验建立模糊控制规则,控制器根据控制规则实现反模糊化,得到 PID 参数的补偿值。模糊 PID 控制算法中,以误差 $e(k)$ 以及误差变化率 $e_c(k)$ 作为控制器的输入,分别以 PID 控制器 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的补偿值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为模糊控制器的输出。经过模糊规则的推理优化后得到 PID 控制器所需的参数值。分析螺旋输送机喂料过程,选择 7 个状态作为模糊控制器输入的状态变量,分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大(PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB),各变量均采用三角形隶属度函数进行求解。模糊 PID 算法参数设置如表 5 所示。

表 5 模糊 PID 算法参数

Tab.5 Parameters setting of fuzzy PID algorithm

输入输出变量	e	e_c	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
语言变量	E	EC	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
基本论域	[- 6 6]	[- 3 3]	[- 1 1]	[- 0.3 0.3]	[- 1 1]
模糊子集	[NB NM NS ZE PS PM PB]				
模糊论域	[- 6 6]	[- 3 3]	[- 3 3]	[- 0.6 0.6]	[- 3 3]
量化因子	1	1	3	2	3

为保证系统输出响应的动静态性能达到最佳,通过总结工程中 PID 调参经验,得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 3 个参数对应的模糊控制规则,根据 PID 模糊控制规则,可由输入偏差 e 和偏差变化率 e_c 推理得出 PID 控制相应的增益变化量, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 在各模糊规则下对应的隶属度为

$$\mu_{K_p(j)} = \min \{ \mu_{r(j)}(E), \mu_{r(j)}(EC) \} \tag{18}$$

$$\mu_{K_i(j)} = \min \{ \mu_{r(j)}(E), \mu_{r(j)}(EC) \} \tag{19}$$

$$\mu_{K_d(j)} = \min \{ \mu_{r(j)}(E), \mu_{r(j)}(EC) \} \tag{20}$$

式中 $\mu_{r(j)}$ 表示不同偏差和偏差变化率下,所有模糊规则调整的隶属度。

通过重心法对模糊控制器输出量进行反模糊化得到

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} (\mu_{K_p(j)} \Delta K_p(j))}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{K_p(j)}} \tag{21}$$

$$\Delta K_i = \frac{\sum_{j=1}^{49} (\mu_{K_i(j)} \Delta K_i(j))}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{K_i(j)}} \tag{22}$$

$$\Delta K_d = \frac{\sum_{j=1}^{49} (\mu_{K_d(j)} \Delta K_d(j))}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{K_d(j)}} \tag{23}$$

将取得的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 乘以相应的比例因子

α_p 、 α_i 、 α_d 得到最终的自整定增益修正参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,并输入至 PID 控制器。 k 时刻 PID 控制参数 $K_p(k)$ 、 $K_i(k)$ 、 $K_d(k)$ 为

$$K_p(k) = K_p(k-1) + \alpha_p \Delta K_p \tag{24}$$

$$K_i(k) = K_i(k-1) + \alpha_i \Delta K_i \tag{25}$$

$$K_d(k) = K_d(k-1) + \alpha_d \Delta K_d \tag{26}$$

其中 $K_p(k-1)$ 、 $K_i(k-1)$ 、 $K_d(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的控制参数值。模糊规则需满足:当系统刚开始输出时,此时偏差 e 较大,为减小被控系统响应时间,防止因误差变化过大而引起微分过饱和,此时应取较大的 K_p 与较小的 K_d ,为避免出现超调, K_i 取零。当系统处于中等状态时,为使系统在保证响应速度的同时降低超调量,应当取适中的 K_i 、 K_d 和较小的 K_p 。当系统趋于稳定状态时,偏差 e 较小,系统进入稳态调节阶段,为了使系统具有较好的稳态性能,应取较大的 K_p 与 K_i 。为防止输出响应在设定值周围出现振荡,增强系统的抗干扰性能,应选择适当的 K_d ,基于上述关系确定 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊规则如表 6 所示。

表 6 模糊 PID 规则
Tab. 6 Rule of fuzzy PID control

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

3.2 控制系统仿真分析

在 Simulink 仿真模块中建立 PID 与模糊 PID 控制系统仿真模型,输入信号均为幅值为 1 的阶跃信号。仿真过程中,在 $t=0$ 时刻输入一个幅值为 1 的阶跃信号,设定仿真时间均为 0.1 s,PID 控制的参数为手动对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行整定,并将结果输出到示波器;模糊 PID 控制输入经过模糊化处理的误差 $e(k)$ 及误差变化率 $e_c(k)$,输出经过解模糊后的 PID 参数的补偿值,利用补偿值对初始参数进行优化,得到仿真波形。

由于喂料过程粉料结块或存在杂质的情况,导致螺旋输送机电机实际负载会在一定范围内突变,为了真实模拟喂料过程中螺旋输送机电机负载特性,仿真中加入 ± 0.1 的随机干扰信号,PID 与模糊 PID 控制的仿真波形对比效果如图 6b 所示。自整定模糊 PID 控制相较于传统 PID 控制,响应时间缩短 18.03 ms,超调量减少 0.112,调节精度更高,抗

干扰能力更强,整体效果更佳。

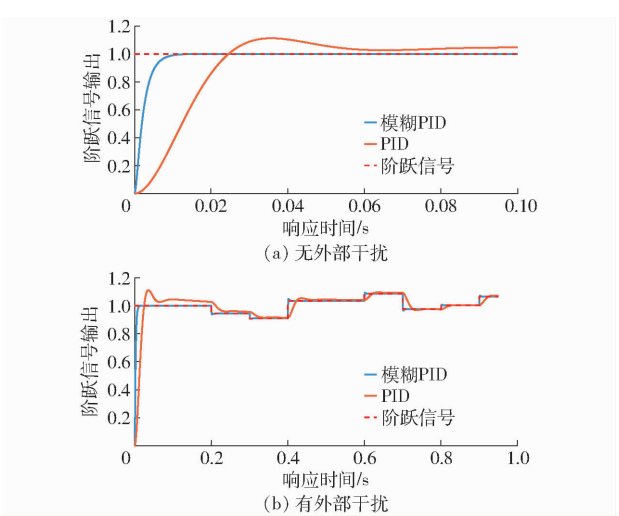


图 6 模糊 PID 仿真对比
Fig. 6 Comparison of simulation waveform of fuzzy PID control system and traditional PID

4 控制系统准确性试验

4.1 试验条件

为了验证该生物质制粒机组远程监控系统稳定性,于2022年10月在安徽某能源科技有限公司生物质颗粒生产车间,利用所设计的远程监控系统对5个串联生物质颗粒机组进行作业状态监测和喂料系统算法效果验证试验,主要包括验证远程监控系统的数据监测准确性;开展基于模糊PID控制的喂料系统稳定性。试验现场如图7所示。

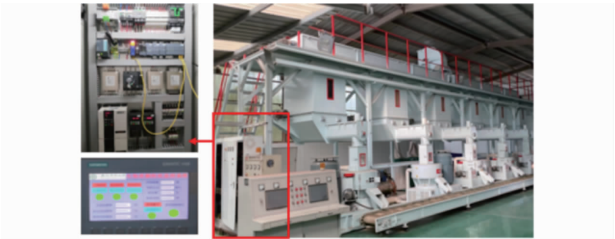


图7 试验现场
Fig.7 Test site

5G工业路由器作为本系统的通信模块,其通信可靠性和准确性已在出厂前进行过测试,在网口通信模式下,在温度-20~75℃、相对湿度为5%~95%、传导骚扰EN61000-4-6-level3条件下,以490 Mb/s的下行速度和50 Mb/s的上行速度通信30 min,该工业路由器系统丢包率和准确率测试结果为:数据传输丢包率0.33%~0.41%。验证了本系统的准确性与可靠性。

4.2 喂料系统精度测试

为全面验证模糊PID算法在多机组螺旋输送机喂料系统的适应性,选择主轴电机速率分别为低、中、高速的3个工况进行算法验证,其环模线转速分别为43.2、50.4、57.6 r/min,设定物料层厚度分别为10、20、30 mm进行试验。试验材料选用含水率20%的竹粉,模辊间隙为0.12 mm,试验时间为每组5 min,采集300个数据。图8为生物质颗粒机主轴电机控制电流输出变化曲线,低、中、高速工况下2 s以内电流趋于稳定。

由表7可知,在各工况下,主机电流的平均相对误差在1%~12%范围内波动,变异系数在

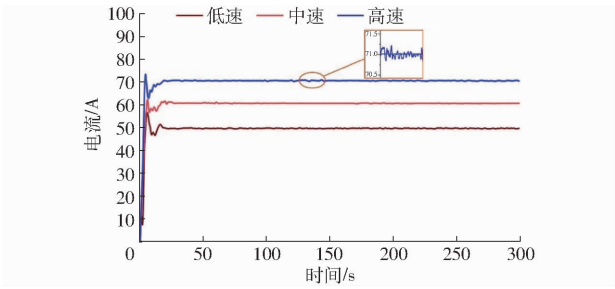


图8 电机控制电流曲线
Fig.8 Motor control current curves

表7 喂料系统性能测试条件和数据结果
Tab.7 Feeding system performance test conditions and data results

设定环模 转速/ (r·min ⁻¹)	设定喂 取高度/ mm	设定 稳定 电流/A	实际 平均电 流/A	平均 相对误 差/%	变异 系数/ %
43.2	10	50	49.98	12	0.28
50.4	10	61	61.03	7	0.24
57.6	10	71	71.00	1	0.19

0.19%~0.28%范围内波动,平均相对误差和变异系数较小,喂料控制效率良好,运行过程中没有出现堵转现象,可以满足生物质颗粒机生产实际需求。

5 结论

(1)根据生物质颗粒生产需求,设计了一种生物质颗粒机组远程监控系统,以PLC为控制核心,基于5G工业网关实现了远程监控;基于模糊PID算法对制粒机喂料过程进行了优化,提高了喂料稳定性,堵转现象得到改善。

(2)基于生物质颗粒机组远程监控要求,选择5G网络作为系统的通信方式,利用PROFINET协议实现PLC与5G网关之间的数据通信。实现与云服务器之间的数据传输,系统可通过网页、微信小程序进行远程监控。设置故障和数值超限报警,并以短信形式将报警信息告知管理员。

(3)通过对系统通信性能和运行准确性、可靠性测试,结果表明,系统运行时,主机电流可以控制在设定目标值附近,系统稳定性符合预先设计要求。

参 考 文 献

[1] 霍丽丽,赵立欣,郝彦辉,等. 国内外生物质成型燃料质量标准现状[J]. 农业工程学报,2020,36(9):245-254.
HUO Lili, ZHAO Lixin, HAO Yanhui, et al. Quality standard system of densified biomass fuels at home and abroad[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 245-254. (in Chinese)
[2] 德雪红,吴桂芳,李南丁,等. 内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):379-386.
DE Xuehong, WU Guifang, LI Nanding, et al. Design and experiment of epicyclic train structured biomass ring-die briquetting machine with plunger roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):379-386. (in

- Chinese)
- [3] PRADHAN P, MAHAJANI S M, ARORA A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: a review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 181: 215–232.
- [4] GILVARI H, DE JONG W, SCHOTT D L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: measuring methods and affecting factors—a review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2019, 120: 117–134.
- [5] 仇平, 李兴兴, 赵铁石, 等. 秸秆压块机辊口式环模耐磨机理分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 112–116. QIU Ping, LI Xingxing, ZHAO Tieshi, et al. Wear-resisting mechanism analysis and experiment on circular mould of straw briquetting machine by rolling entrance structure[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 112–116. (in Chinese)
- [6] 王韦韦, 蔡丹艳, 谢进杰, 等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 127–134. WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 127–134. (in Chinese)
- [7] JENS K H, ULRİK B H, JOHAN E H, et al. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20: 2686–2694.
- [8] 武凯, 孙宇, 彭斌彬, 等. 环模制粒粉体旋转挤压成型扭矩模型构建及试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 33–39. WU Kai, SUN Yu, PENG Binbin, et al. Modeling and experiment on rotary extrusion torque in ring-die pelleting process[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(24): 33–39. (in Chinese)
- [9] 熙鹏, 丛茜, 滕凤明, 等. 提高耐磨与破碎性的仿生凹坑形磨辊设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 55–61. XI Peng, CONG Qian, TENG Fengming, et al. Design and experiment of bionics pit shape grinding roller for improving wear resistance and crushability[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(8): 55–61. (in Chinese)
- [10] 崔旭阳, 杨俊红, 邓磊, 等. 生物质颗粒燃料的成型能耗试验研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 27–32. CUI Xuyang, YANG Junhong, DENG Lei, et al. Experimental study on molding energy consumption of biomass pellet fuel[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(2): 27–32. (in Chinese)
- [11] 彭飞, 李腾飞, 康宏彬, 等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 51–58. PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Optimization and experiment on feeder for small-scale pellet mill[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 51–58. (in Chinese)
- [12] 彭飞, 王红英, 康宏彬, 等. 小型可调间隙饲料制粒机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 103–110. PENG Fei, WANG Hongying, KANG Hongbin, et al. Design and experiment on small-scale adjustable clearance pellet feed mill[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 103–110. (in Chinese)
- [13] 丁宁, 李海涛, 闫安, 等. 秸秆多级连续冷辊压成型试验研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 279–285. DING Ning, LI Haitao, YAN An, et al. Experiment on multi-stage continuous cold roll forming of straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 279–285. (in Chinese)
- [14] 蒋清海, 武凯, 孙宇, 等. 生物质制粒机环模的磨损机理分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 42–49. JIANG Qinghai, WU Kai, SUN Yu, et al. Wear mechanism analysis of ring die of pellet mill[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(22): 42–49. (in Chinese)
- [15] 周晓杰, 王春光. 压缩条件对苜蓿草径向受力的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(2): 115–118. ZHOU Xiaojie, WANG Chunguang. Effect of compressing conditions on radial force of alfalfa[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2): 115–118. (in Chinese)
- [16] 黄晓鹏, 万芳新, 黄建龙, 等. 基于挤压模拟试验的苜蓿草颗粒成型工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 354–358. HUANG Xiaopeng, WANG Fangxin, HUANG Jianlong, et al. Parameter optimization of granulated alfalfa pelleting process based on extrusion simulation experiment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(11): 354–358. (in Chinese)
- [17] 王春华, 宋超, 朱天龙, 等. 环模秸秆成型机压辊半径的优选与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 26–33. WANG Chunhua, SONG Chao, ZHU Tianlong, et al. Optimization and test of roller radius of ring die straw forming machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(15): 26–33. (in Chinese)
- [18] 蔡红珍, 刘建彪, 程卫东, 等. 立式柱塞冲压生物质成型机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 435–441. CAI Hongzhen, LIU Jianbiao, CHENG Weidong, et al. Design and experiment on vertical ram compression molding machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2): 435–441. (in Chinese)
- [19] 段建, 陈树人, 姚勇, 等. 环模秸秆压块机吨燃料能耗试验与工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1): 149–155. DUAN Jian, CHEN Shuren, YAO Yong, et al. Energy consumption test and process optimization for circular mold briquetting machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp.1): 149–155. (in Chinese)
- [20] 姚宗路, 赵立欣, 田宜水, 等. 立式环模生物质成型机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 139–143. YAO Zonglu, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Study on biomass briquetting machines with vertical ring die[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 139–143. (in Chinese)
- [21] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 模辊式生物质颗粒燃料成型机性能试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 121–125. HUO Lili, TIAN Yishui, MENG Haibo, et al. Parameters experiment of biomass pellet mill performance[J]. *Transactions of*

the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 121 – 125. (in Chinese)

[22] 王咏梅, 黄晓鹏, 吴劲锋, 等. 不同工艺参数下苜蓿草粉环模制粒机流场的模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 267 – 274.

WANG Yongmei, HUANG Xiaopeng, WU Jinfeng, et al. Numerical simulation and verification of flow field in ring die pellet mill at different process parameters for alfalfa[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 267 – 274. (in Chinese)

[23] 韩盛林. 环模生物质成型机的研究与设计[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

HAN Shenglin. Research and design on circular mould molding machine of biomass[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[24] 孙营超. 环模制粒机制粒工艺研究与控制系统开发[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

SUN Yingchao. Studying the pelleting technics and developing control system of hoop standard granulator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[25] 张堃. 基于机器视觉的参数不确定大时滞环模制粒机的监督控制系统研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.

ZHANG Kun. A new machine vision based supervision control system for granulators of large time delay and parameter uncertainty[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016. (in Chinese)

[26] THARANIDHARAN V, SAKTHIVEL R, REN Y, et al. Robust finite-time PID control for discrete-time large-scale interconnected uncertain system with discrete-delay[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 192: 370 – 383.

[27] VEINOVIĆ S, STOJIC D, JOKSIMOVIĆ D. Optimized four-parameter PID controller for AVR systems with respect to robustness[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107529.

[28] HARINATH E, MANN G K I. Design and tuning of standard additive model based fuzzy PID controllers for multivariable process systems[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(3): 667 – 674.

[29] XIE D, CHEN L, LIU L, et al. Actuators and sensors for application in agricultural robots: a review[J]. Machines, 2022, 10(10): 913.

[30] 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)

[31] ZHANG D, MIN H J. A sport monitoring system based on the optimized adaptive fuzzy PID control algorithm in onenet internet of things and cloud platform[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 8234066.

[32] 贺刚, 蔡晓华, 白阳, 等. 基于模糊 PID 的犊牛代乳粉奶液温度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 266 – 276.

HE Gang, CAI Xiaohua, BAI Yang, et al. Design and test of temperature control system of calf milk replacer solution based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 266 – 276. (in Chinese)

(上接第 401 页)

[27] LIU Ying, HAN Shijie, ZHOU Yumei, et al. Soil and root respiration under elevated CO₂ concentrations during seedling growth of *Pinus sylvestris* var. *sylvestriformis*[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 660 – 665.

[28] ARREDONDO T, DELGADO-BALBUENA J, HUBER-SANNWALD E, et al. Does precipitation affects soil respiration of tropical semiarid grasslands with different plant cover types[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 218 – 225.

[29] HURSH A, BALLANTYNE A, COOPER L, et al. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale[J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 2090 – 2103.

[30] ANNA G, OLGA O, CHENGRONG C, et al. Changed by fire: linking C and energy fluxes by microbial decomposition of soil organic matter after frequent forest burning events[J]. EGU General Assembly, 2019, 21: 122 – 126.

[31] 侯毛毛, 陈竞楠, 林志远, 等. 滴灌和微生物有机肥对设施土壤呼吸的耦合作用及机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 104 – 112.

HOU Maomao, CHEN Jingnan, LIN Zhiyuan, et al. Coupling effect and mechanism of drip irrigation and microbial organic fertilization on soil respiration in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 104 – 112. (in Chinese)

[32] WANG Wei, GUO Jixun. The contribution of root respiration to soil CO₂ efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semi-arid meadow steppe[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 516: 697 – 703.

[33] HAN G, ZHOU G, XU Z, et al. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem[J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39(2): 418 – 425.

[34] XIAO H, LI Z, CHANG X, et al. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion[J]. Geoderma, 2018, 329: 73 – 81.