



基于模糊PID算法的镁基固态储氢装置控制系统

宋文杰, 李 森, 冯文博, 李誉之, 袁越锦
(陕西科技大学, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对镁基固态储氢装置运行中温度、压力及流量等多参数动态控制需求, 传统PID控制存在响应迟缓、超调量大及稳态精度不足等问题, 严重影响装置运行稳定性与储氢工艺可控性, 为提升装置控制系统性能, 提出了一种基于模糊PID算法的控制方案。该方案以S7-200 smart PLC为控制系统核心, 根据各参数控制要求建立传递函数, 并借助MATLAB/Simulink仿真平台构建模糊控制器及各参数控制仿真模型, 系统开展了传统PID与模糊PID对比仿真测试, 重点分析两者在参数调节精度、响应速度及稳定性等方面的性能差异。结果表明, 采用模糊PID算法控制时, 温度、压力及流量控制的调节时间分别缩短了50%、60%和33%, 系统响应速度和调节速率大幅提升, 稳定性、抗干扰能力等核心性能均得到明显优化。本研究不仅能够高效适配镁基固态储氢装置的多参数控制需求, 同时可充分满足装置常规运行的精准控制要求, 有效提升了装置整体运行的稳定性与储氢工艺的可控性, 为镁基固态储氢装置的智能化调控提供了切实可行的控制技术方案。

关键词: 镁基储氢; 固态储氢装置; 模拟量控制; 模糊PID; 控制性能对比

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1166

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2247-11

A control system for magnesium-based solid-state hydrogen storage devices based on fuzzy PID algorithms

SONG Wenjie, LI Sen, FENG Wenbo, LI Yuzhi, YUAN Yuejin
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: To address the requirements for multiparameter dynamic control of temperature, pressure, and flow rate during the operation of magnesium-based solid-state hydrogen storage devices, traditional PID control suffers from issues such as slow response, substantial overshoot, and insufficient steady-state accuracy. These issues severely impact the operational stability of the devices and the controllability of the hydrogen storage process. To enhance the control system performance of magnesium-based solid-state hydrogen storage devices, we propose a control scheme based on a fuzzy PID algorithm. This scheme employs the S7-200 smart PLC as the control system core. Transfer functions are established according to the control requirements of each parameter. Using the MATLAB/Simulink simulation platform, a fuzzy controller and simulation models for each parameter control are constructed. The system conducts comparative simulation tests between traditional and fuzzy

收稿日期: 2025-12-29; 修改稿日期: 2026-02-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (52201265); 陕西省重点研发计划秦创原“科学家+工程师”队伍 (2023KXJ-060); 陕西省重点研发计划技术创新引导专项 (2024ZC-YYDP-29); 陕西省重点研发计划关键核心技术攻关项目 (2024CY2-GJHX-02); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目 (2024011); 咸阳市重大科技创新专项 (L2025-ZDKJ-ZDGG-QN-006)。

第一作者及通信联系人: 宋文杰 (1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为镁基固态储氢材料及装备研发, E-mail: songwenjie@sust.edu.cn。

引用本文: 宋文杰, 李森, 冯文博, 等. 基于模糊PID算法的镁基固态储氢装置控制系统[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2247-2257.

Citation: SONG Wenjie, LI Sen, FENG Wenbo, et al. A control system for magnesium-based solid-state hydrogen storage devices based on fuzzy PID algorithms[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2247-2257.

PIDs, focusing on analyzing performance differences in parameter adjustment accuracy, response speed, and stability. The results demonstrate that when using the fuzzy PID algorithm for control, the adjustment times for temperature, pressure, and flow control are reduced by 50%, 60%, and 33%, respectively. System response speed and adjustment rate are considerably enhanced, with core performance metrics such as stability and interference resistance markedly optimized. This study not only efficiently adapts to the multiparameter control requirements of magnesium-based solid hydrogen storage devices but also fully satisfies the precise control demands of routine operations. It effectively enhances the overall operational stability of the devices and the controllability of the hydrogen storage process, providing a practical control technology solution for the intelligent regulation of magnesium-based solid hydrogen storage systems.

Keywords: magnesium-based hydrogen storage; solid-state hydrogen storage device; analog control; fuzzy PID; control performance comparison

全球能源结构正向低碳化转型,氢能作为清洁、高效的理想二次能源,对实现“双碳”目标具有战略意义^[1]。氢能最大的瓶颈在于储运环节,镁基固态储氢凭借储氢密度高、安全性强、成本低廉等优势,成为大规模氢能存储及运输领域的研究热点^[2]。然而,镁基固态储氢装置的活化反应及吸/放氢反应过程伴随着强的吸/放热特性,且温度、压力与氢气流量动态响应相互关联,增加了控制难度^[3]。传统PID控制器的核心优势是结构简单、鲁棒性强,能满足多数工业场景的基本控制需求,但因参数固定,难以兼顾动态响应速度与稳态精度,在实际运行中易出现调节缓慢、超调量较大、稳定性不足等问题,严重制约了其产业化应用。

国内在镁基储氢材料及控制技术方面开展了大量研究。邹建新等^[4]综述了2023年镁基储氢材料的研究热点,重点分析了材料成分优化对储氢性能的影响,但未涉及储氢装置控制策略的应用。张中卫等^[5]基于自适应模糊PID设计了输液温度控制系统,提升了温度控制的稳态精度,但该系统工况单一,未考虑储氢反应中多参数动态耦合的复杂特性。蒋凌云等^[6]采用改进粒子群优化算法进行PID参数整定,优化了控制器响应速度,但未结合模糊逻辑实现参数的实时动态调节,在工况突变场景中适应性不足。

氢能储运及控制技术的研究在国际上已形成一定规模。Qi等^[7]针对碱性电解系统的时滞特性设计了PID温度控制器,通过参数整定优化了系统动态响应,但未解决复杂工况下参数自适应调节的问

题,在多参数耦合场景中控制精度受限。Rahmani等^[8]基于MATLAB/Simulink搭建了电动汽车电池热管理系统仿真模型,对比验证了智能控制算法相对于传统PID的性能优势,为储能设备的控制策略优化提供了方法论参考。Veyna等^[9]针对质子交换膜燃料电池的温度控制系统,提出基于参数不确定性建模的多目标鲁棒控制设计方法,提升了系统对环境扰动的适应能力,但该方法计算复杂度较高,难以适配镁基储氢装置的实时控制需求。

针对这一问题,模糊PID控制技术因兼具模糊逻辑对复杂系统的自适应处理能力与控制方面的高稳态精度的优势,能够实时动态调节PID参数,有效提升控制性能^[10],为解决镁基固态储氢装置控制系统响应迟缓、超调量大及稳态精度不足等问题提供技术方案。本研究围绕镁基固态储氢装置的温度、压力及流量协同控制需求,提出了一种基于模糊PID的多变量控制系统:通过MATLAB中的Simulink仿真软件构建温度、压力及流量控制仿真模型并建立模糊PID控制器^[11],实现关键参数的实时动态调节;重点研究系统在传统PID及模糊PID控制下的性能参数对比,以提升控制鲁棒性。该研究不仅可为镁基固态储氢装置的高效稳定运行提供技术支撑,也为复杂能源系统的模拟量智能控制提供理论参考与实践借鉴。

1 控制系统方案

1.1 设计方案

首先将镁基固态储氢材料装入储氢罐中并完成

装置连接；利用真空泵对整个装置抽真空，并充入氩气进行洗气及气密性测试；待装置预检工作完成后，通过电加热装置加热实现温度调控，并调节减压阀及质量流量控制器的开度，实现恒温、恒压及恒流控制，系统方案设计如图1所示。

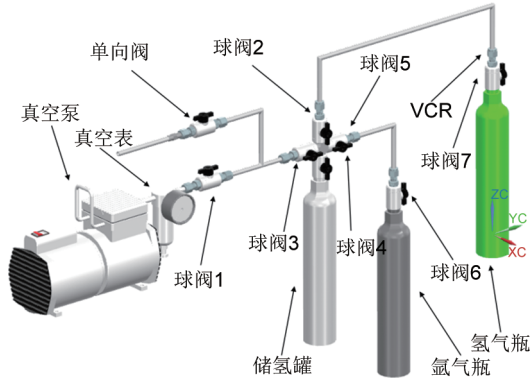


图1 系统方案设计
Fig. 1 System solution design

1.2 控制要求

(1) 温度控制要求

设定装置吸/放氢阶段的控制温度为350℃，利用K型热电偶实时采集温度数据，通过模糊PID控制算法调节电加热装置的输出功率，实现吸/放氢全过程的恒温精准控制。

(2) 压力控制要求

设定装置吸/放氢阶段的控制压力为3 MPa，利用压力传感器实时采集压力数据，通过模糊PID控制算法调节电磁阀开度，实现吸/放氢全过程的恒压精准控制。

(3) 流量控制要求

设定装置吸/放氢阶段的控制流量为1 L/min，利用质量流量控制器实时采集流量数据，通过模糊PID控制算法调节质量流量控制器开度，实现吸/放氢全过程的恒流精准控制。

1.3 硬件选型

本研究需要用到的硬件包括以触摸屏为核心的管理级硬件，以PLC为核心的控制级硬件，以热电偶、压力传感器、质量流量控制器、电磁阀和电加热装置为核心的设备级硬件。通过触摸屏对吸/放氢及发电过程温度、压力及流量进行设定；采用各类传感器采集实时参数；通过PLC及模糊PID控制电加热装置及电磁阀的各类动作，实现储氢装置的恒温、恒压及恒流控制，控制系统硬件架构如图2



图2 系统硬件架构
Fig. 2 System hardware architecture

所示。

2 控制算法原理

2.1 传统PID原理

PID算法，全称为比例（proportional）、积分（integral）、微分（differential）算法，是在工业控制中极为常用的闭环控制算法^[12-13]。PID控制适用于温度、压力、流量等物理量采集及控制，是工业现场中应用最为广泛的一种控制方式^[14-15]。系统通过传感器实时采集被控量的实际值，并与给定值比较，生成偏差信号。该信号随后被送入PID控制器，控制器依据预设算法计算，并将输出的控制信号发送至执行器，实现输入量的控制需求。传统PID控制原理如图3所示。

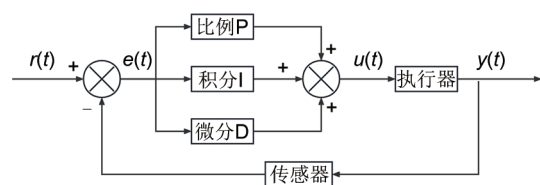


图3 传统PID原理
Fig. 3 Traditional PID principle

当装置采用PID控制时， $r(t)$ 为设定值， $y(t)$ 为系统输出值， $u(t)$ 为控制器输出量，PID控制是按偏差 E 的比例、微分和积分的线性组合来实现对系统的控制^[16]，可描述为式(1)：

$$\Delta u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

式中， K_p 为比例系数； T_i 为积分常数； T_D 为微分常数^[17-18]。进一步可描述为式(2)：

$$\Delta u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中, K_p (比例系数)、 K_i (积分系数)、 K_d (微分系数) 是 PID 控制的三大可调参数^[19], 需根据被控对象特性调整, 也被称为 PID 参数整定, 从而实现控制系统特性达到最佳, 控制效果达到最好^[20]。

2.2 模糊PID原理

模糊 PID 控制是指: 在传统 PID 控制框架下, 加入一个模糊控制器。该控制器根据系统实时的“偏差 E ”和“偏差变化率 EC ”, 通过预设的“模糊规则库”, 实时动态调整 PID 的 3 个关键参数 K_p 、 K_i 、 K_d , 使控制器能自适应系统参数变化, 模糊 PID 的核心是用模糊逻辑模拟人类专家经验, 致使其控制兼顾稳定性与适应性^[21-22], 模糊 PID 控制原理如图 4 所示。

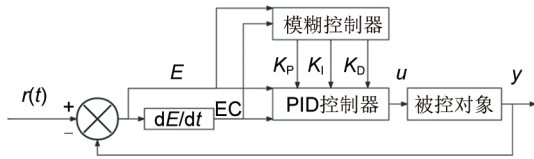


图4 模糊PID原理

Fig. 4 Fuzzy PID principle

3 系统建模

3.1 温度数学模型

基于温度控制要求, 以电加热装置功率为控制系统的输入量, 以镁基固态储氢罐温度为控制系统的输出量。加热过程存在热惯性滞后, 符合一阶惯性环节特性和纯滞后模型, 基于能量守恒定律, 温度传递函数可以表示为式(3):

$$G_T(s) = \frac{K_T \exp(-\tau_T s)}{T_T s + 1} \quad (3)$$

式中, K_T 为增益, 反映加热功率对温度变化的影响程度; T_T 为时间常数, s ; τ_T 为纯滞后时间, s 。

根据设计方案, 电加热装置功率 $P=200$ W; 不锈钢密度 $\rho=7850$ kg/m³; 储氢罐初始温度 $T_0=25^\circ\text{C}$; 加热到终止温度 $T_f=350^\circ\text{C}$; 储氢罐体积 $V=0.5$ L; 比热容 $c=500$ J/(kg·°C), 根据实验测试, 合金内热扩散延迟时间 7 s; 罐体热传导延迟时间 4 s; 热电偶延迟时间 1 s, 将以上参数数值代入式(3)中, 得到温度控制传递函数式(4):

$$G(s) = \frac{1.625 \exp(-12s)}{2015s + 1} \quad (4)$$

3.2 压力数学模型

基于压力控制要求, 以电磁阀开度为控制系统的输入量, 以镁基固态储氢罐进气口压力为控制系统的输出量。压力存在阀门响应、氢气扩散等动态惯性延迟, 符合二阶惯性和纯滞后模型, 压力传递函数可表示为式(5):

$$G_p(s) = \frac{K_p \exp(-\tau_p s)}{T_p s^2 + 2\zeta T_p s + 1} \quad (5)$$

式中, K_p 为增益, 单位控制电压下对应的压力稳态变化量; T_p 为时间常数, s ; τ_p 为纯滞后时间, s 。

根据设计方案, 氢气瓶 $V=40$ L; 设定压力 $p=3$ MPa; 温度 $T=25^\circ\text{C}$; 气体常数 $R=8.314$ J/(mol·K); 阻尼比 $\zeta=0.08$; 氢气瓶口与外界压差 $\Delta p=2.9$ MPa, 根据实验测试, 控制电压 3 V, 氢气扩散延迟时间 1 s; 氢气吸附动力学延迟时间 0.5 s; 压力传感器延迟时间 0.5 s, 将以上参数数值代入式(5)中, 得到压力控制传递函数式(6):

$$G(s) = \frac{1.0 \exp(-2s)}{5s^2 + 0.8s + 1} \quad (6)$$

3.3 流量数学模型

基于流量控制要求, 以质量流量控制器开度为控制系统的输入量, 以镁基固态储氢罐进气口流量为控制系统的输出量。考虑到阀门动作及管道流体存在动态惯性延迟, 符合二阶惯性和纯滞后模型, 流量传递函数可表示为式(7):

$$G_Q(s) = \frac{K_Q \exp(-\tau_Q s)}{T_Q s^2 + 2\zeta T_Q s + 1} \quad (7)$$

式中, K_Q 为增益, 单位开度对应的流量稳态变化量; T_Q 为时间常数, s ; τ_Q 为纯滞后时间, s 。

根据设计方案, 管道长度 $L=3$ m; 管道直径 $D=4$ mm; 根据流体力学计算, 流量系数 $K=0.85$; 时间常数 $T=1.2$ s; 阻尼比 $\zeta=0.6$, 根据实验测试, 控制开度 0%~100%, 阀门动作延迟时间 0.5 s; 管道流体惯性延迟时间 1 s; 质量流量控制器延迟时间 0.5 s, 将具体的数值代入, 得到流量传递函数式(8):

$$G(s) = \frac{0.85 \exp(-2s)}{1.44s^2 + 1.44s + 1} \quad (8)$$

3.4 定义变量及其隶属度函数

针对模糊PID控制系统在实时性与控制精度之间的矛盾, 提出了一种兼顾运算效率与性能指标的语言变量划分策略。在模糊控制器的设计阶段, 将

输入输出论域统一量化为7个离散语言值：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)^[23]。镁基固态储氢装置控制系统的温度变化范围是0~350℃，压力0~3 MPa，流量0~1 L/min。因需要对装置3个参数进行控制，本方案通过物理量归一化、动态论域调整及量化因子优化，将偏差 E 与偏差变化率 EC 的基本论域分别定义为 $[-3, 3]$ 和 $[-2, 2]$ ，而二者的模糊语言论域则统一设置为 $[-6, 6]$ 。基于参数整定的结果，设定了输出量 K_p 、 K_i 和 K_d 的基本论域如下： $[-30, 30]$ 、 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-150, 150]$ ，则输出的模糊语言论域设为 $[-6, 6]$ 。

基于上述论域，计算得到输入变量 E 与 EC 的量化因子 $K_E=6/2=3$ ， $K_{EC}=6/3=2$ ；输出变量 $\Delta K_p=30/6=5$ ， $\Delta K_i=0.3/6=0.05$ ， $\Delta K_d=150/6=25$ 。

基于以上条件，本系统在传统离散论域的基础上，每个语言变量均采用三角形隶属函数建模：该函数以简洁的三参数形式(a, b, c)即可唯一确定底边宽度和顶点位置，既降低了在线计算的复杂度，又保留了足够的非线性表达能力，能够平滑地描述变量在负向、零域及正向之间的渐变过渡关系。针对模糊PID控制系统的输入与输出变量，定义了其各自论域上的隶属函数如图5、图6所示。

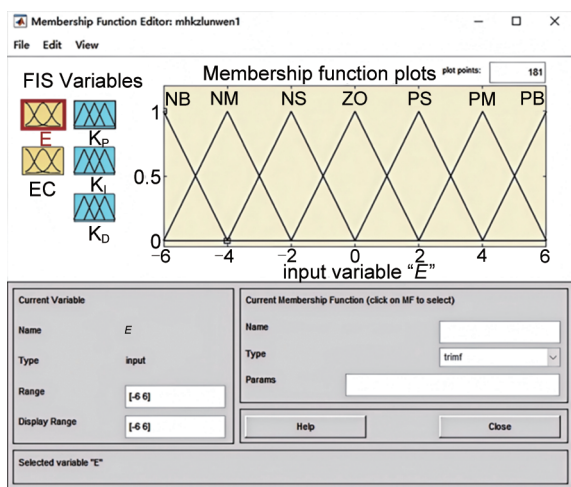


图5 E 、 EC 隶属度函数

Fig. 5 E 、 EC membership function

3.5 模糊规则的制定

模糊规则是模糊逻辑控制的核心，模糊PID控制器以偏差 E 及其变化率 EC 作为输入，进而调整模糊PID中 K_p 、 K_i 、 K_d 的3个参数并根据预设的模

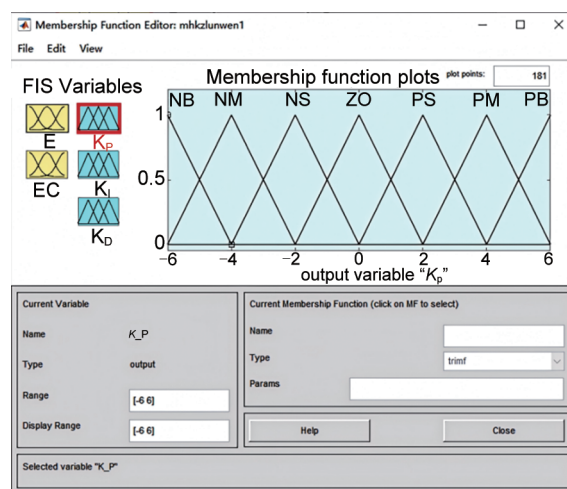


图6 K_p 、 K_i 、 K_d 隶属度函数

Fig. 6 K_p 、 K_i 、 K_d membership function

糊控制规则与隶属度函数进行模糊推理，输出与装置当前温度、压力及流量精准匹配的参数修正量，实时优化PID控制器的动态参数组合，增强系统对环境变化的适应能力，提高控制精度与动态性能。根据镁基固态储氢装置的控制要求，制定出以下三个规则。

(1) 针对温度控制，大误差时，增大 K_p ，减弱 K_i ；中误差时，减小 K_d ，增强 K_i ；小误差时，减小 K_p ，增强 K_i ，中等 K_d 。

(2) 针对压力控制，大误差时，采用中等 K_p 避免超调，减弱 K_i ；中误差时，减小 K_p ，中等 K_i ；小误差时，减小 K_p ，增强 K_i ，中等 K_d 。

(3) 针对流量控制，大误差时，减小 K_p 防止振荡，减弱 K_i ；中误差时，中等 K_p ，减弱 K_i ；小误差时，减小 K_p ，中等 K_i ，增强 K_d 。

以上述规则为基准，采用“IF A and B THEN C and D and E”多重多维的语句得到 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊控制规则^[24]，见表1。

利用MATLAB软件中的模糊逻辑工具箱构建模糊控制器，输入相应的模糊控制规则后，生成 K_p 、 K_i 、 K_d 参数调节曲面，如图7所示。

4 系统仿真分析

利用MATLAB/Simulink平台，结合MATLAB模糊逻辑工具箱进行仿真设计，分别引入温度、压力和流量各环节的传递函数，构建了镁基固态储氢装置控制系统仿真模型，分别对温度、压力及流量3个参数进行PID及模糊PID仿真，通过观察仿真

表 1 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊规则
Table 1 K_p 、 K_i 、 K_d fuzzy rule

$\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	PM/NM/NM	ZO/ZO/NM
	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/NM/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
	ZO	PS/NM/ZO	PB/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	PS/PS/NS	PM/PM/NS	PM/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/PS/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

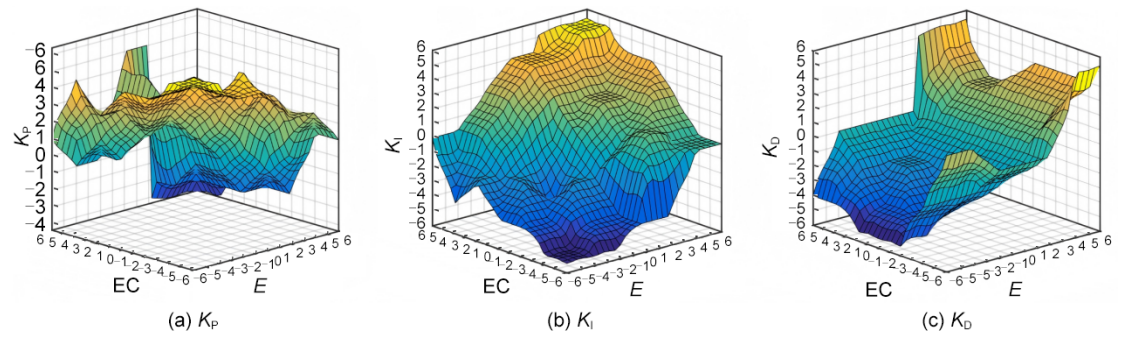


图 7 K_p 、 K_i 、 K_d 调参曲面
Fig. 7 K_p 、 K_i 、 K_d parameter tuning surface diagram

曲线结果，优化控制参数，最终对比分析两种控制策略下的响应速度、稳态误差及超调量，验证模糊PID控制在提升镁基固态储氢装置多参数耦合控制精度与鲁棒性方面的优势，为后续实验平台搭建与工程化应用提供理论依据与参数指导。

4.1 温度模糊PID控制仿真分析

为检验模糊PID控制器对温度控制系统的调控效果，在MATLAB/Simulink中构建并运行仿真模型：在模型中添加Step模块，参数设定350℃作为装置温度设定值，加入Add模块，用于计算设定值与实际值的差值，并分别接入PID及模糊PID控制器中，输出端口连接Transfer Fcn模块，该模块用于模拟温度系统的动态特性，最后将输入及输出分别接入Scope模块，同步观察设定值、实际温度及偏差的动态变化，温度控制仿真模型如图8所示。

在温度控制系统中，将阶跃信号作为温度设定值，并将温度传递函数导入到温度控制仿真模型中。采用经验试凑法^[29]整定PID控制器参数，通过多次参数调整及对响应曲线的对比分析，发现当比例系数 $K_p=5$ 、积分系数 $K_i=0.3$ 、微分系数 $K_d=50$ 时，系统响应迅速、调节时间短，控制性能达到最

优。因此，最终确定将 $K_p=5$ 、 $K_i=0.3$ 、 $K_d=50$ 作为整定后的PID参数初始值。

将整定的PID参数初始值 $K_p=5$ 、 $K_i=0.3$ 、 $K_d=50$ 分别输入到PID控制器和模糊PID控制器中控制温度。传统PID控制存在明显超调20℃，超调量5.7%，调节时间长达1600 s，主要原因是固定参数无法适配温度系统的热惯性滞后特性，采用模糊PID控制上升时间600 s，无超调现象发生，调节时间缩短至800 s，较传统PID缩短50%，核心优势在于实时动态调节参数：大误差阶段通过模糊规则适度降低 K_p ，避免过冲，中误差阶段增大 K_i ，加速偏差消除，小误差阶段优化 K_d 抑制微小波动。得到仿真结果和性能参数如图9和表2所示。

4.2 压力模糊PID控制仿真分析

根据上述仿真模型的构建思路与框架，将压力控制各环节的传递函数嵌入模型中，进一步构建压力控制仿真模型。为对比分析，基于所建模型，分别实施了PID与模糊PID控制的仿真对比，通过观察仿真输出曲线、记录关键数据及迭代优化控制参数，最终使系统实现最优控制性能，压力控制仿真模型如图10所示。

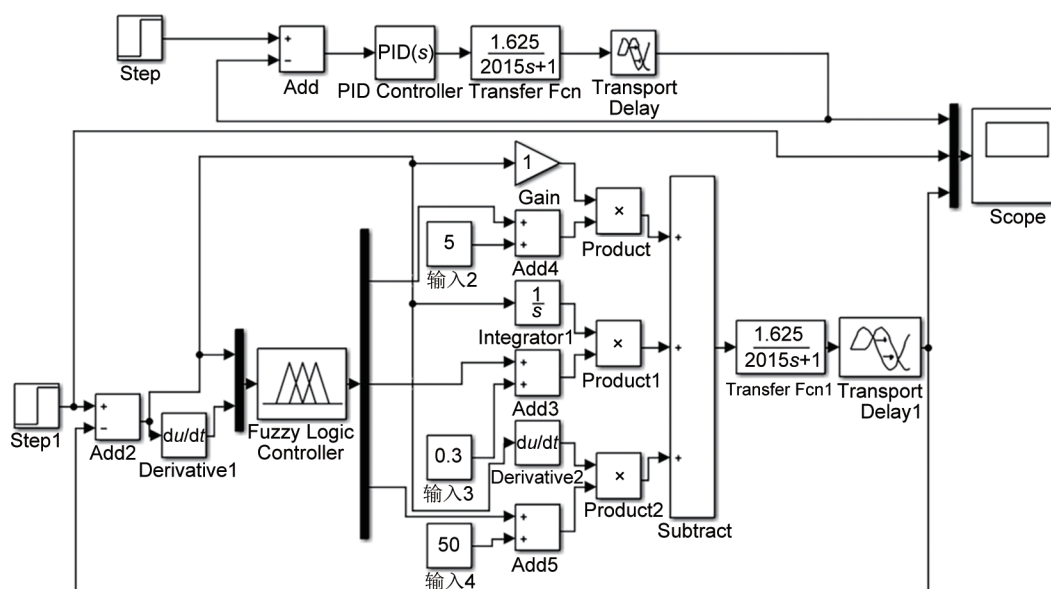


图8 温度控制仿真模型

Fig. 8 Temperature control simulation model

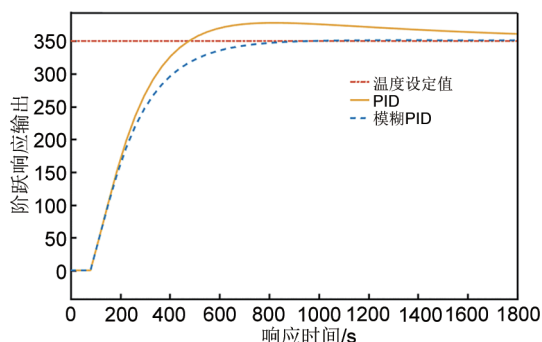


图9 温度PID与模糊PID控制仿真测试曲线

Fig. 9 Simulation test curves for temperature PID and fuzzy PID control

表2 温度控制性能指标参数

Table 2 Temperature control performance specifications

控制类型	上升时间 t_r/s	调节时间 t_s/s
PID	500	1600
模糊PID	600	800

同理，与温度控制过程类似，将阶跃信号代入压力传递函数。对参数进行调整优化并分析，发现当比例系数 $K_p=1$ ，积分系数 $K_i=0.3$ ，微分系数 $K_d=2.5$ 时，系统响应时间及调节时间最快，控制效率最高。故确定 $K_p=1$ ， $K_i=0.3$ ， $K_d=2.5$ 为整定后的初始值。

将整定的PID参数初始值 $K_p=1$, $K_i=0.3$, $K_d=2.5$ 分别输入到PID控制器和模糊PID控制器中控制

制压力。压力系统为二阶惯性环节, 传统PID控制超调量达0.4 MPa, 超调量13.3%, 调节时间20 s, 主要因 K_p 过大导致系统响应过冲, K_D 不足难以抑制振荡。模糊PID控制下, 上升时间缩短至5 s, 较传统PID缩短37.5%, 调节时间8 s, 缩短了60%, 超调量达0.1 MPa, 降至3.3%, 体现了参数动态优化的优势: 大误差阶段采用中等 K_p 避免超调和小 K_i 防止积分饱和, 快速接近目标值; 中误差阶段减小 K_p 、增大 K_i , 逐步消除偏差; 小误差阶段设置小 K_p 、中等 K_i 和 K_D , 提升稳态精度。得到仿真结果和性能参数如图11和表3所示。

4.3 流量模糊PID控制仿真分析

根据上述仿真模型的建立，代入流量控制各环节的传递函数，搭建流量控制仿真模型，对流量控制进行PID及模糊PID仿真，并观察仿真曲线、记录数据及优化参数，达到最好的控制效果，流量控制仿真模型如图12所示。

同理, 与温度控制过程类似, 将阶跃信号代入流量传递函数。对参数进行调整优化并分析, 发现当 $K_p=0.8$, $K_i=0.5$, $K_D=1$ 时, 系统响应时间及调节时间最快, 控制效率最高。故确定 $K_p=0.8$, $K_i=0.5$, $K_D=1$ 为整定后的初始值。

将整定的PID参数初始值 $K_p=0.8$, $K_i=0.5$, $K_d=1$ 分别输入到PID控制器和模糊PID控制器中控制流量。流量受管道流体惯性影响较大, 传统PID控

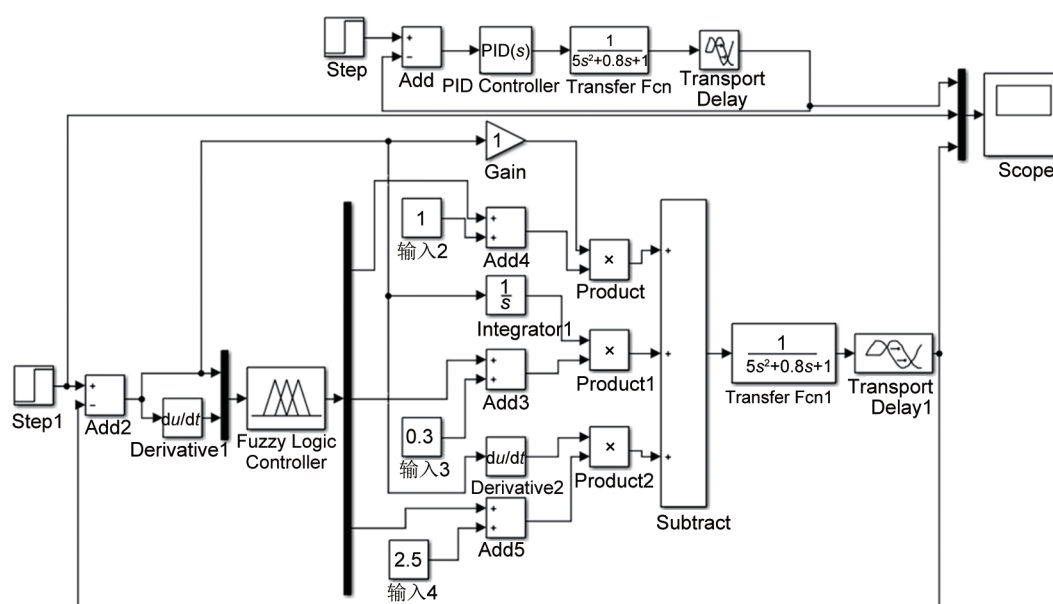


图 10 压力控制仿真模型

Fig. 10 Pressure control simulation model

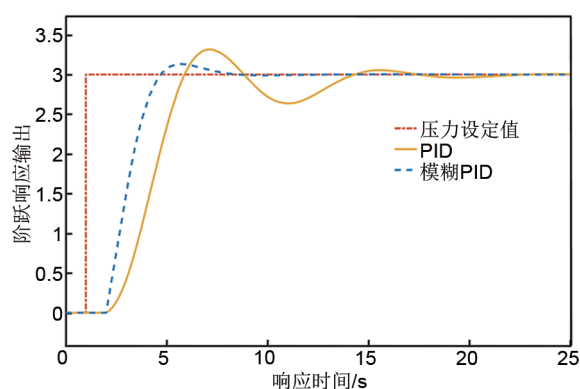


图 11 压力PID与模糊PID控制仿真测试曲线

Fig. 11 Simulation test curves for pressure PID and fuzzy PID control

表 3 压力控制性能指标参数

Table 3 Pressure control performance specifications

控制类型	上升时间 t_r/s	调节时间 t_s/s
PID	8	20
模糊PID	5	8

制超调量达 0.15 L/min, 超调量 15%, 调节时间 12 s, 主要因 K_p 过大导致流体振荡, K_D 不足难以快速抑制波动。模糊PID控制下, 上升时间缩短至 4 s, 较传统PID缩短 33.3%, 调节时间 8 s, 缩短了 33%, 超调量达 0.05 L/min, 降至 5%, 体现了参数动态优化的优势: 大误差阶段减小 K_p 防止振荡, 减弱 K_i ; 中误差阶段采用中等 K_p 逐步消除偏差; 小误差阶段设置小 K_p 、中等 K_i 和大的 K_D , 抑制微小

波动。得到仿真结果和性能参数如图 13 和表 4 所示。

5 结 论

以镁基固态储氢装置中温度、压力及流量作为采集和控制对象, 分别设计了控制原理及传递函数, 并基于 MATLAB/Simulink 平台搭建温度、压力及流量控制仿真模型, 对传统PID及模糊PID在控制中的上升时间和调节时间进行分析。结果表明:

(1) 构建了温度、压力、流量的数学模型, 分别对应一阶惯性+纯滞后、二阶惯性+纯滞后特性, 为控制系统设计提供了精准的被控对象模型; 设计了 7 种语言值三角形隶属度函数及针对性模糊规则库, 实现了PID参数的实时动态优化。仿真结果表明, 模糊PID控制显著优于传统PID: 温度调节时间缩短 50%, 无超调现象; 压力调节时间缩短 60%, 超调量从 13.3% 降至 3.3%; 流量调节时间缩短 33%, 超调量从 15.0% 降至 5.0%, 有效解决了传统PID响应迟缓、超调量大、稳态精度不足的问题, 为储氢装置与材料的核心性能提升奠定了工艺控制基础。

(2) 温度控制时, 模糊PID算法控制实现了温度无超调且调节时间缩短 50%, 能将储氢装置的温度精准、稳定地控制在热力学最优值, 保证了吸/

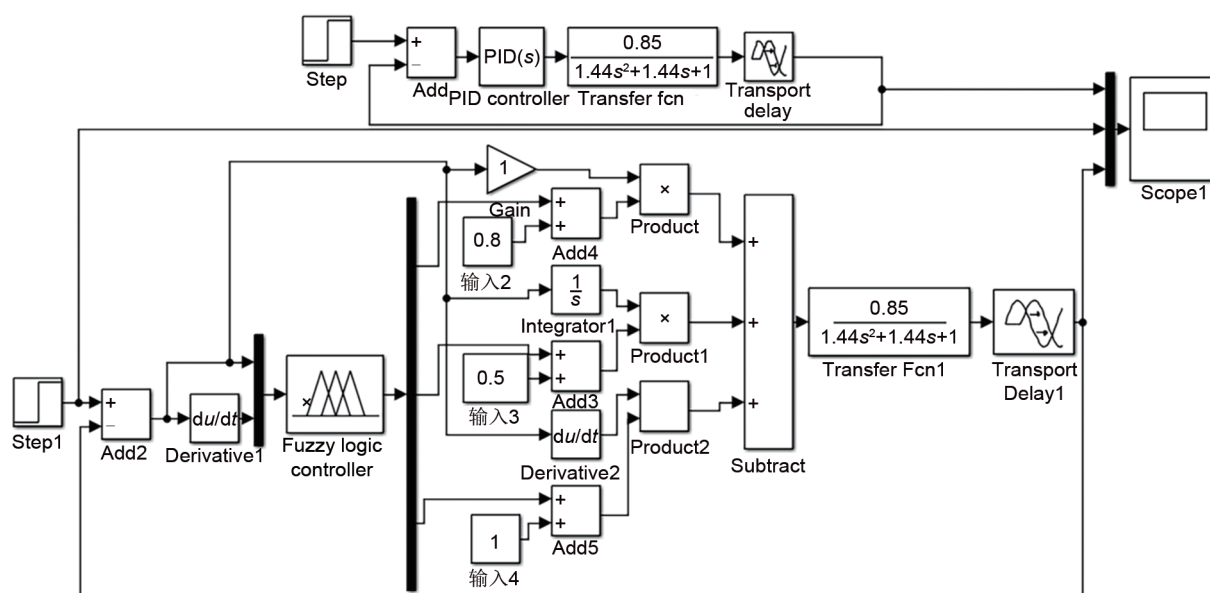


图 12 流量控制仿真模型

Fig. 12 Flow control simulation model

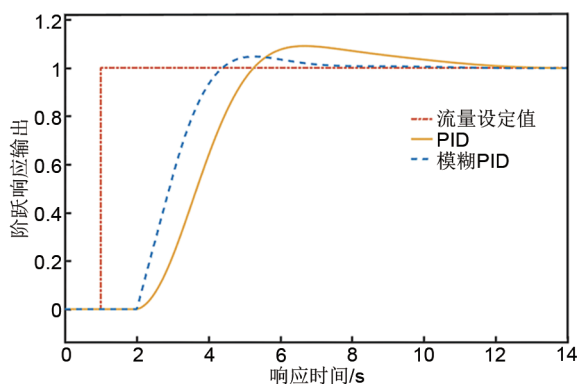


图 13 流量PID与模糊PID控制仿真测试曲线

Fig. 13 Flow PID and fuzzy PID control simulation test curves

表 4 流量控制性能指标参数

Table 4 Flow control performance metrics

控制类型	上升时间 t_r/s	调节时间 t_s/s
PID	6	12
模糊PID	4	8

放氢反应始终在最佳温度区间进行, 显著提升镁基材料的吸/放氢速率和有效储氢容量。

(3) 压力控制时, 模糊PID算法控制将压力超调量降至3.3%、调节时间缩短60%, 能快速将压力稳定至设定值3 MPa, 且压力波动幅度显著降低, 保证了储氢反应动力学驱动力的持续、稳定, 使镁基材料的吸/放氢反应更充分, 大幅提升装置的储氢/放氢效率。

(4) 流量控制时, 模糊PID算法控制将流量超调量降至5%、调节时间缩短33%, 实现了氢气流量的平稳、精准控制, 使氢气在储氢罐内形成均匀流场, 保证氢气与镁基材料的充分、均匀接触, 使储氢材料吸/放氢循环反应更完全, 大幅提升材料的利用效率; 避免了局部快速反应导致材料粉化与活性位点覆盖, 显著提升了镁基材料的活性位点保留率, 降低装置储氢容量的循环衰减率, 提升循环稳定性。

后续研究将基于已设计的控制系统方案搭建实物实验平台, 开展控制性能-储氢性能的联动实验, 量化分析模糊PID控制下温度、压力、流量的精准控制对镁基储氢材料储氢容量、循环次数、吸/放氢速率的具体提升幅度; 同时将进一步优化模糊规则库, 结合粒子群优化、遗传算法等智能算法提升参数整定精度, 开展变工况下的控制实验, 增强控制系统的鲁棒性与工程适用性, 推动模糊PID控制在镁基固态储氢装置产业化应用中的落地。

参考文献

- [1] 李致朋, 叱干东东, 肖仪卓, 等. 中国氢能产业关键技术与应用探究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2026, 54(1): 147-156, F0002, I0028.
- LI Z P, CHIGAN D D, XIAO Y Z, et al. Exploration of key technologies development and application in China's hydrogen energy industry[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2026, 54(1): 147-156, F0002, I0028.

- [2] 郑新宇, 徐咏, 谢睿杰, 等. 中国氢能发展路径及突破口: 基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(12): 4654-4671. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575.
ZHENG X Y, XU Y, XIE R J, et al. Pathways and breakthroughs in China's hydrogen development: Lessons from US strategy evolution and China-US comparative analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4654-4671. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575.
- [3] 倪耀琪, 朱恒恺. "双碳"目标下氢能发展机遇、难点与路径选择[J]. 现代化工, 2024, 44(2): 1-8.
NI Y Q, ZHU H K. Opportunities, difficulty and path choice for hydrogen energy development under "carbon dioxide emission peaking and carbon neutrality" goal[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(2): 1-8.
- [4] 邹建新, 丁文江. 2023 年镁基储氢材料研究热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 204-216. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.013.
ZOU J X, DING W J. Review of research hotspots in magnesium-based hydrogen storage materials in 2023[J]. Science & Technology Review, 2024, 42(1): 204-216. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.013.
- [5] 张中卫, 杨彦奇, 杨海坤. 基于自适应模糊 PID 的输液温度控制系统研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 137-145.
ZHANG Z W, YANG Y Q, YANG H K. Study on infusion temperature control system based on adaptive fuzzy PID[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(3): 137-145.
- [6] 蒋凌云, 魏庆来, 张峰华, 等. 基于改进粒子群优化算法的 PID 控制器参数整定[J]. 控制工程, 2024, 31(3): 470-477. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210776.
JIANG L Y, WEI Q L, ZHANG F H, et al. PID controller parameter tuning based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Control Engineering of China, 2024, 31(3): 470-477. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210776.
- [7] QI R M, LI J R, LIN J, et al. Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 19008-19021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.356.
- [8] RAHMANI A, DIBAJ M, AKRAMI M. Design and simulation of battery thermal management systems for electric vehicles using MATLAB Simulink[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 111: 115398. DOI: 10.1016/j.est.2025.115398.
- [9] VEYNA U, BLASCO X, HERRERO J M, et al. Parameter uncertainty modeling for multiobjective robust control design. Application to a temperature control system in a proton exchange membrane fuel cell[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 119: 105758. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105758.
- [10] WEI H Y, ZHU N, SUN Z Y, et al. Research on the intelligent control strategy of pressurizer pressure in PWRs based on a fuzzy neural network PID controller[J]. Nuclear Engineering and Design, 2025, 433: 113875. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2025.113875.
- [11] 李亦仲, 虎恩典, 王振. 基于模糊 PID 的烘干炉温度控制研究[J]. 仪表技术, 2024(5): 74-76.
LI Y Z, HU E D, WANG Z. Research on temperature control of drying furnace based on fuzzy PID[J]. Instrumentation Technology, 2024(5): 74-76.
- [12] 张博, 高晓红, 吕宝传, 等. 基于模糊 PID 的太阳能供热控制系统设计和仿真[J]. 信息技术与信息化, 2021(7): 161-163.
ZHANG B, GAO X H, LÜ B C, et al. Design and simulation of solar heating control system based on fuzzy PID[J]. Information Technology and Informatization, 2021(7): 161-163.
- [13] 陈季云. 基于 MATLAB/Simulink 的纯电动汽车动力学建模与仿真分析[J]. 时代汽车, 2025(8): 91-93.
CHEN J Y. Dynamic modeling and simulation analysis of pure electric vehicles based on MATLAB/Simulink[J]. Auto Time, 2025 (8): 91-93.
- [14] 李永涛, 木合塔尔·克力木, 杨波. 基于 MATLAB/Simulink 的压裂泵流量脉动抑制研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(2): 169-173.
LI Y T, MUHETAER K, YANG B. Study on flow pulsation suppression of fracturing pump based on MATLAB/Simulink[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(2): 169-173.
- [15] HUANG H, ZHANG Z J, XU B, et al. Monitoring and fault diagnosis of breathing valves in atmospheric storage tank under fuzzy PID[J]. Procedia Computer Science, 2024, 243: 59-66. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.009.
- [16] 刘宁, 柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2272-2285. DOI: 10.16383/j.aas.c220795.
LIU N, CHAI T Y. An optimal tuning method of PID controller parameters[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(11): 2272-2285. DOI: 10.16383/j.aas.c220795.
- [17] KUMAR L, MANDAL N P. Pressure control of fixed displacement variable speed radial piston pump using PID controller[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 1840-1846. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.034.
- [18] 丁惠忠, 陈凯峰. 基于 PLC 的啤酒发酵温度模糊 PID 控制系统[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 71-76, 82. DOI: 10.3969/j.issn.1005-1295.2022.06.012.
DING H Z, CHEN K F. Fuzzy PID control system of beer fermentation temperature based on PLC[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 71-76, 82. DOI: 10.3969/j.issn.1005-1295.2022.06.012.
- [19] 丁兆驿, 赵斌, 张晓刚, 等. 流量反馈型电液比例阀的模糊 PID 控制特性[J]. 机床与液压, 2022, 50(22): 119-124. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2022.22.023.
DING Z Y, ZHAO B, ZHANG X G, et al. Fuzzy PID control characteristics of flow feedback type electro-hydraulic proportional valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(22): 119-124. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2022.22.023.
- [20] 吴敏, 翟力欣, 李启跃, 等. 灰色预测与模糊 PID 的恒温水浴协同温度控制[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11): 123-129, 137. DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2023.11.019.

- WU M, ZHAI L X, LI Q Y, et al. Collaborative temperature control of constant temperature water bath based on grey prediction and fuzzy PID[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(11): 123-129, 137. DOI: 10.13733/j. jcam. issn. 2095-5553.2023.11.019.
- [21] 陈广庆, 辛金泽, 张磊, 等. 基于串级模糊PID控制的NB-IoT智能保温箱[J]. 现代电子技术, 2024, 47(20): 170-176. DOI: 10.16652/j. issn.1004-373x.2024.20.027.
- CHEN G Q, XIN J Z, ZHANG L, et al. NB-IoT intelligent incubator based on cascade fuzzy PID control[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(20): 170-176. DOI: 10.16652/j. issn. 1004-373x.2024.20.027.
- [22] 刘豫飞, 刘德军. 基于模糊PID技术的复合结构温室系统设计[J]. 农机化研究, 2023, 45(12): 45-49.
- LIU Y F, LIU D J. Design of compound structure greenhouse system based on fuzzy PID technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(12): 45-49.
- [23] 杨洪涛, 金磊, 姜西祥, 等. 基于DBO优化模糊PID的高低温试验箱温度控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 235-243. DOI: 10.13382/j.jemi.B2407536.
- YANG H T, JIN L, JIANG X X, et al. Temperature control method of high and low temperature test chamber based on DBO optimization fuzzy PID[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 235-243. DOI: 10.13382/j. jemi. B2407536.
- [24] 段玉龙, 许洪振, 刘姣娣, 等. 基于自适应模糊PID算法的蔗种调向装置定位控制[J]. 控制工程, 2025, 32(2): 242-250. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20220382.
- DUAN Y L, XU H Z, LIU J D, et al. Positioning control of sugarcane seed steering device based on adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Control Engineering of China, 2025, 32(2): 242-250. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20220382.
- [25] 杨茂华, 谭飞, 尹宋麟. 基于随机差分进化算法的最优PID参数整定方法[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2022, 35(6): 50-56.
- YANG M H, TAN F, YIN S L. Optimal PID parameter tuning method based on stochastic differential evolution algorithm[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2022, 35(6): 50-56.