

基于深度强化学习改进的 Smith 预估器温度控制

高东祥¹, 张 洪^{1,2}, 修伟杰¹, 张 林³

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

3. 江苏惠霖环保科技有限公司, 江苏 无锡 214122)

摘要:针对牛粪发酵过程具有惯性大、时滞性、参数变化非线性特点,提出了一种基于深度确定性策略梯度(DDPG)改进 Smith 模糊 PID 控制器的温度控制方法。首先,针对传统模糊 PID 不能对时滞系统有效控制的问题,建立 Smith 预估模糊 PID 控制器。其次,使用 DDPG 算法改进温度控制器,对设计的智能体进行离线训练。最后,通过仿真对所设计控制器进行实验验证。实验结果表明:DDPG 改进的 Smith 模糊 PID 控制器能有效消除时滞对温度控制的影响,减少超调量和误差,且能避免被控对象参数随时间变化产生动态偏离时造成的系统不稳定。

关键词:温度控制; Smith 预估器; 强化学习; 神经网络; 时滞系统

中图分类号: TP23

文章编号: 1000-0682(2024)03-0054-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.010

Improved smith predictor temperature control based on deep reinforcement learning

GAO Dongxiang¹, ZHANG Hong^{1,2}, XIU Weijie¹, ZHANG Lin³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China;

3. Jiangsu Huilin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of large inertia, time lag and nonlinear parameter change in the fermentation process of cow manure, a temperature control method based on deep deterministic strategy gradient to improve Smith fuzzy PID is proposed. Firstly, to address the issue that traditional fuzzy PID cannot effectively control time-delay systems, a Smith predictive fuzzy PID controller is established. Secondly, use the DDPG algorithm to improve the temperature controller and conduct offline training on the designed intelligent agent. Finally, the designed controller is experimentally validated through simulation. The results show that the Smith PID controller improved by DDPG can eliminate the influence of time delay on temperature control, reduce overshoot and errors, and avoid system instability caused by dynamic deviation of controlled object parameters over time.

Keywords: temperature control; Smith estimator; reinforcement learning; neural network; time lag system

0 引言

我国是农业废弃物产量大国,堆肥发酵是实现废弃物肥料化和基料化处理的重要技术^[1]。发酵

仓堆肥将堆料混合物放置于箱式结构中进行发酵^[2-3],其中温度是评价堆料发酵过程的重要指标,可以为翻抛作业和发酵腐熟度的评价提供依据^[4]。发酵温度控制系统具有时滞性、参数变化非线性、参数耦合性强等特点,难以构建精准的数学模型^[5-6],传统 PID 的应用效果不佳。文献[7]提出粒子群优化神经网络 PID 控制器用于干发酵温度控制,能提高控制精度加快系统响应速度,但缺少对时滞影响的研究。Smith 预估器是一种处理时滞系统的控制

收稿日期: 2024-01-06

第一作者: 高东祥(1999—), 硕士, 主要研究方向为机电控制, 自动化。E-mail: 2397536176@qq.com

通信作者: 张洪(1966—), 副教授, 博士, 主要研究方向为机电测试与控制技术、机器人技术。E-mail: 1105399774@qq.com

补偿器,文献[8]将 Smith 预估控制与变论域模糊自适应 PID 相结合提出一种改进的控制方法,使温控系统有更好的自适应能力;文献[9]将前馈控制原理引入 Smith 预估模糊 PID,消除干扰的影响保证了温控系统的闭环稳定性。但 Smith 预估器适用于被控对象的模型参数精确且不变化的场合^[10]。

强化学习是机器学习的一个分支,它通过与环境的交互自适应地制定策略,文献[11]使用强化学习中 PPO 算法对传统 PID 进行改进,提高了机械臂的控制精度。文献[12]以 PID 控制器作为对象,训练强化学习策略输出 PID 参数作为 actions,取得了良好的控制效果。针对发酵温度控制中不仅存在参数耦合与时滞性可能还有参数的时变问题,该文将强化学习中的深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)应用于 Smith 模糊 PID 控制器,设计了一种 DDPG 改进的 PID 控制系统。控制系统通过 Smith 预估模糊 PID 进行主回路调节,DDPG 控制器辅助调节完成控制。通过建立仿真系统,与传统 PID、Smith 模糊 PID 控制方法进行比较,设计的系统动态响应更快、超调量下降,具有灵敏度高、鲁棒性强等优点。

1 发酵温度控制策略研究

1.1 发酵温度控制对象模型

发酵仓温度控制系统包括通风系统、曝气机、加热片和翻抛装置等。温控系统在发酵调节过程中,当物料温度低于设定值时,调压模块调高曝气风机和加热片电压,提升吹入空气温度;当物料温度高于设定值,降低输入电压,同时开启通风系统以及运行翻抛装置,达到散热的目的。此外,发酵温控过程还包含复杂的生物反应。对温度控制系统建模时,为了降低模型的复杂程度,对控制对象做出合理的简化,忽略控制过程中热量损失等影响较小的因素。发酵温度控制的数学模型可以用一阶惯性加滞后环节的传递函数来表示:

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

式中: K 为静态增益, T 为时间常数, τ 为纯滞后时间。

1.2 DDPG 改进 PID 控制器结构设计

在 Smith 模糊 PID 控制器的基础上引入深度确定性策略梯度。利用 DDPG 算法离线学习能力,对系统执行器进行辅助控制,通过双控制器实现系统消除时滞影响,抵抗参数变化干扰的功能^[13]。控制

器结构如图 1 所示。

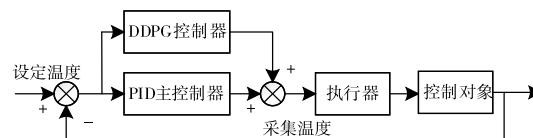


图 1 改进控制器结构图

DDPG 改进的控制器主要包含两部分结构:

(1) Smith 模糊 PID 控制器。

模糊控制对复杂非线性的被控对象有较好的控制效果,但对存在大滞后的温度控制系统效果欠佳。Smith 预估器是处理纯延时系统的常用补偿器之一,在闭环系统中加入 Smith 预估,对系统的稳定性和动态性具有改善效果。

(2) DDPG 辅助控制器。

Smith 预估器可以利用精确的数学模型,在温控系统消除时滞影响,但是当温度调控过程中系统参数产生动态偏离时,控制效果会变差。深度确定性策略梯度以环境温度、温度误差以及误差波动建立奖励函数,进行神经网络的离线训练,最终使策略收敛到一个较好的效果,以弥补参数失配产生的干扰。

2 Smith 模糊 PID 控制研究

传统 PID 是一种基于比例-积分-微分的控制方式:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

其中, $u(t)$ 是输出, $e(t)$ 是误差, K_p 、 T_i 、 T_d 是比例、积分和微分系数,分别用于提高系统响应速度,消除系统稳态误差和对系统误差进行预测。增加了模糊控制和 Smith 补偿器的 PID 结构如图 2 所示。

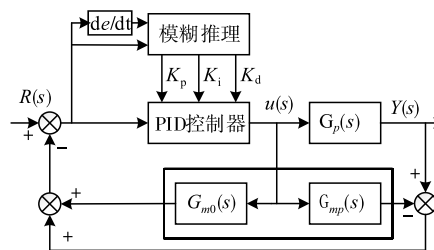


图 2 Smith 预估 PID 控制结构图

图 2 中模糊推理部分以误差 e 以及误差变化率 ec 作为输入,调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出量。通过将调整量代入公式(3)得到 PID 最佳参数^[14-18]。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + G_p \times \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + G_i \times \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + G_d \times \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

Smith 补偿器为图 2 中虚线框所示,以补偿单元

$G_{mp}(s)$ 、控制单元 $G_{m0}(s)$ 组成,传递函数如下式:

$$G_{mp}(s) = \frac{K_m e^{-\tau_m s}}{T_m s + 1}, G_{m0}(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (4)$$

2.1 Smith 预估器补偿原理

当传递环数(1)构成闭环控制系统时,系统闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s)} \quad (5)$$

分母中包含时滞项,特征方程中有纯延迟环节,因而闭环系统有可能不稳定,控制精度和稳定性降低。Smith 预估器是一种处理时滞系统的控制补偿器^[19]。由图 2 可知来自 PID 控制器的信号为:

$$u(s) = \{ R(s) - [G_p(s) - G_{mp}(s) + G_m(s)] u(s) \} G_c(s) \quad (6)$$

式中 $G_c(s)$ 代表 PID 控制单元传递函数,则有输出信号 $Y(s) = G_p(s) u(s)$, 得到闭环传递函数的表达式:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) G_p(s)}{1 + G_c(s) [G_{m0}(s) + G_p(s) - G_{mp}(s)]} \quad (7)$$

当预估器传递函数参数等于被控对象的参数时即 $K_m = K$ 、 $T_m = T$ 和 $\tau_m = \tau$, 闭环传递函数式(6)分母中含时滞项的 $G_p(s)$ 将被 $G_{mp}(s)$ 抵消,得到系统的闭环传递函数如下式:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) G_p(s)}{1 + G_c(s) G_{m0}(s)} \quad (8)$$

则该闭环系统的特征方程为:

$$1 + G_c(s) G_{m0}(s) = 0 \quad (9)$$

相比于式(5)可知,补偿后的系统特征方程中消除了纯滞后项,系统稳定性得到改善。

2.2 模糊控制规则建立

结合发酵温度控制实例设计模糊控制器,控制器输入变量为温度误差 e 和误差变化率 ec , 模糊论域设为 $[-10, 10]$ 。输入与输出模糊子集划分为 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 七个等级,隶属度函数采用高斯函数。输出模糊论域设为: $\Delta K_p \in [-0.6, 0.6]$, $\Delta K_i \in [-0.1, 0.1]$, $\Delta K_d \in [-4, 4]$ 。模糊规则采用“If e is 1 and ec is 2, then ΔK_p is 3 and ΔK_i is 4 and ΔK_d is 5”的语句,其中数字代表模糊等级,模糊规则表如下表所示。

表 1 模糊控制规则表

e	ec	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
NB	NB	PB	NB	PS
NB	NM	PB	NB	NS
NM	NB	PB	NB	PS

续表 1

e	ec	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
NS	NM	PM	NM	NS
ZO	PS	NS	PS	NS
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
PB	NB	ZO	ZO	PB
PS	PB	NM	PB	ZO
PM	NS	NS	PS	PS
NS	PS	ZO	ZO	NS
NM	PB	NM	PS	PS

2.3 Smith 预估模糊 PID 存在的问题

如果预估器模型参数与被控对象参数接近时,利用 Smith 预估模糊 PID 可以消除时滞影响。然而发酵温控系统的数学模型难以确定,参数估计可能存在偏差,温控过程中参数也可能随之发生变化进而产生动态偏离。补偿器模型和被控对象的参数的偏差不仅会降低 Smith 预估器的补偿效果,还会破坏系统的稳定性^[20]。

3 DDPG 自适应调控设计

本节提出将深度确定性策略梯度算法应用于 Smith 预估器的改进控制方法。通过设计 DDPG 控制器补偿预估器模型和被控对象的参数偏差,从而改善 Smith 预估模糊 PID 的控制性能,防止发酵过程中控制对象参数失配对温控系统稳定性产生影响。

3.1 DDPG 算法

深度确定性策略梯度算法是一种基于 Actor - Critic 框架的强化学习方法, Actor 为策略网络, Critic 为价值网络。算法结构如图 3 所示。 s_i, r_i, a_i 为 i 时间的状态、奖励以及动作, μ 表示策略。

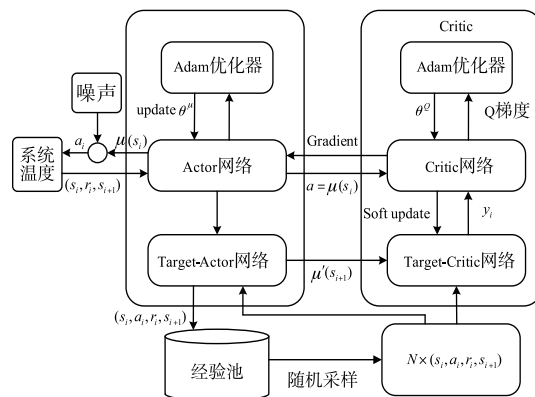


图 3 DDPG 算法结构图

策略网络 Actor 在每个训练批次中,根据价值

网络 Critic 对自身输出动作的评价 Q 优化网络的参数 θ^c , 目标是使下一次输出的动作更好, 以提高评价 Q ; 价值网络 Critic 则根据 Actor 网络输出的动作获得的环境反馈 reward 值来优化评价策略, 调整自身神经网络的参数 θ^c 并输出动作评价 Q [21-23]。

训练中当经验池的样本数量到达设定数值时, 从中提取一定数量样本: $N \times (s_i, a_i, r_i, s_{i+1})$, 通过最小化损失函数如下式来更新 Critic 网络的参数 θ^c 。

$$y_i = r_i + \gamma Q'(s_{i+1}, \mu(s_{i+1} | \theta^{c'}) | \theta^{c'}) \quad (10)$$

$$J(\theta^c) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - Q(s_j, \mu(s_j | \theta^c) | \theta^c))^2 \quad (11)$$

式中: $J(\theta^c)$ 为 Critic 网络损失函数; y_i 为 Critic 网络计算的动作价值。Actor 网络的参数 θ^a 通过策略梯度来更新, 如下式:

$$\nabla_{\theta^a} J = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \nabla_{a_j} Q(s_j, a_j | \theta^a) \nabla_{\theta^a} \mu(s_j | \theta^a) \quad (12)$$

Critic 与 Actor 网络参数更新频繁, 为了提高收敛速度避免学习过程不稳定, 还需分别为 Actor 和 Critic 网络搭建目标网络。目标网络的参数 $\theta^{c'}$, $\theta^{a'}$ 通过软更新的方式获得, 更新公式如下, 改变更新系数 τ 可调整参数更新速度。

$$\theta^{c'} = \tau \theta^c + (1 - \tau) \theta^{c'} \quad (13)$$

$$\theta^{a'} = \tau \theta^a + (1 - \tau) \theta^{a'} \quad (14)$$

3.2 控制器训练过程

控制器通过温度环境获得样本数据 (s_i, a_i, r_i, s_{i+1}) , s_i 是在 t 时刻环境的温度值, a_i 是智能体在 s_i 时间下所执行的动作, r_i 是智能体执行动作 a_i 后获得的奖励, s_{i+1} 是温控系统在执行 a_i 后的环境温度值 [24]。

算法执行过程如下:

(1) 初始化经验回放池容量, 随机采样样本数量 N , 训练轮次 R , 轮迭代次数 T ;

(2) 由 Actor 网络生成动作, 并加入噪声;

(3) 系统将之后状态 s_{i+1} 输入到奖励函数中, 将 (s_i, a_i, r, s_{i+1}) 存入经验池;

(4) 从经验回放缓冲区抽取 N 个样本, 分别将 s_i, s_{i+1} 输入到 Actor 网络, 将 (s_i, a_i, r, s_{i+1}) 输入到 Critic 网络迭代更新;

(5) Target - Actor 网络接收 s_i, s_{i+1} , 将动作 a_i 和噪声输入到智能体与环境交互, 将下一个动作 a_{i+1} 输出到 Target - Critic 网络, 接收动作值 Q , 对网络进行更新;

(6) Target - Critic 网络接收 s_{i+1}, a_{i+1} 并计算 Q 值, 然后将 Q 与奖励 r 结合计算, 网络迭代更新;

完成离线训练后 DDPG 控制器的动作为:

$$a_i = \mu(s_i | \theta^a) + N' \quad (15)$$

式中: N' 是随机噪声; $\mu(s_i | \theta^a)$ 是最优行为策略。DDPG 辅助控制器主要用于补偿温度控制系统参数发生动态偏离时产生的误差, 改善主控制器的控制性能。

4 实验与分析

为了验证 DDPG 改进 Smith 预估模糊 PID 稳定控制策略的优越性, 在 MATLAB 中搭建神经网络, 在 SIMULINK 中搭建温度环境模型, 为训练神经网络提供仿真环境。根据实际发酵温度系统设定发酵温度模型参数为 $K=8, T=1300 \text{ s}, \tau=110 \text{ s}$, 离线训练中超参数设置如表 2 所示。训练奖励曲线如图 4 所示, 当训练轮次到 592 时, 平均奖励值达到期望, 算法趋于稳定训练停止。

表 2 超参数设定表

参数名称	数值
Actor 学习率	0.001
Critic 学习率	0.001
折扣系数 γ	0.99
软更新系数 τ	0.01
经验池容量	10 000
最大训练轮次 R	2000
轮迭代次数 T	200

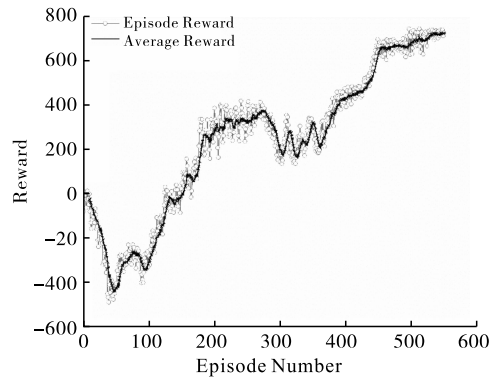


图 4 训练奖励曲线

4.1 对模型参数匹配时的测试

Smith 预估 PID (S-PID)、Smith 模糊 PID (SF-PID) 以及 DDPG 改进的 Smith 模糊 PID (DSF-PID) 三种控制策略进行单位阶跃响应测试, 实验结果如图 5 所示。

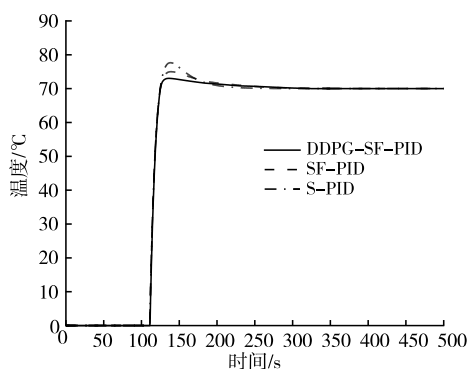


图 5 仿真结果比较

表 3 仿真结果指标对比

控制方式	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s	稳态误差/%
DSF - PID	4.32	136	291	0
SF - PID	7.16	139	307	0
S - PID	10.9	140	302	0

由图 5 和表 3 对比可知,DSF - PID 控制效果最好,传统 Smith 预估 PID 效果最差。相较于 SF - PID 控制器,DSF - PID 控制器达到稳态所需时间缩短 11 s,且系统超调量降低 2.84 %。综上,DDPG 改进的 Smith 模糊 PID 控制策略调节速度更快,且调节过程稳定。

4.2 对模型参数失配时的测试

在理想情况下,温控系统的预估器补偿模型与控制模型是完全匹配的,但现实中往往不能做到模型参数的一致。因此,建立温度控制系统扰动模型检验 DSF - PID 控制系统的鲁棒性。在三种不同失配参数条件下,扰动模型表达式如下:

$$G_1(s) = \frac{7}{1300s + 1} e^{-110s} \quad (16)$$

$$G_2(s) = \frac{8}{1250s + 1} e^{-110s} \quad (17)$$

$$G_3(s) = \frac{8}{1300s + 1} e^{-107s} \quad (18)$$

$G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$ 分别表示仿真过程模型参数 K , T 与 τ 与预测参数存在误差。由上述仿真可知,传统的 Smith 预估 PID 抗干扰效果不佳。故分别使用 SF - PID 和 DSF - PID 模拟扰动模型的阶跃响应,仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看到当参数存在偏差时,Smith 预估器控制效果不好。验证了 2.3 节所述,预估器模型和系统参数失配时,补偿效果不满意且系统稳定性变差。作为比较,系统结合 DDPG 辅助控制器后,三个参数偏离的模型中均有较好的调控效果,提高了控制系统的稳定性。

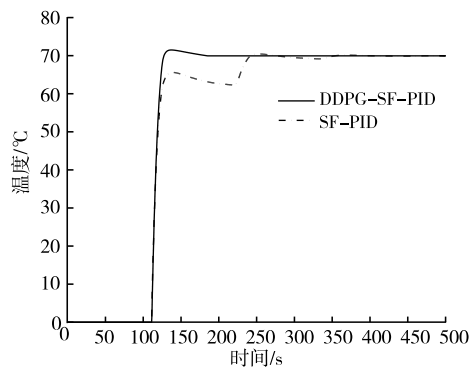
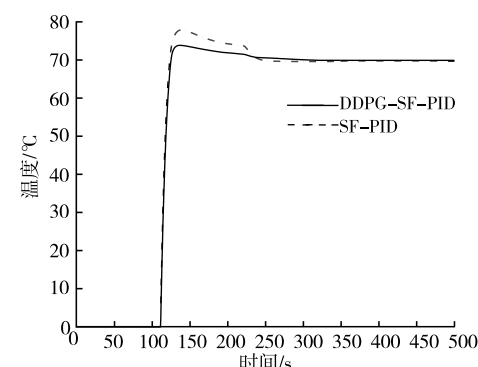
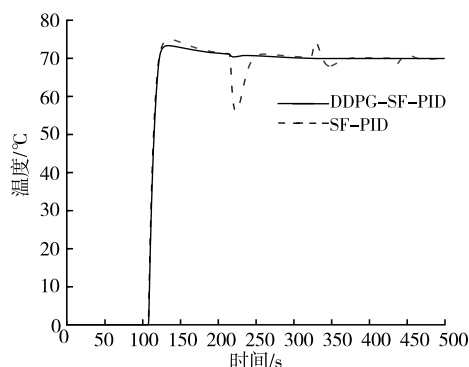
(a) K 参数偏离时阶跃响应(b) T 参数偏离时阶跃响应(c) τ 参数偏离时阶跃响应

图 6 模型参数失配时阶跃响应

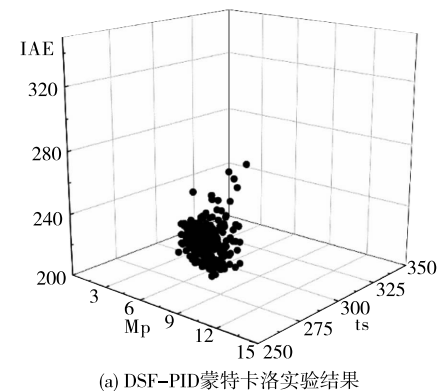
此外采用蒙特卡洛方法分析模型参数偏离时 Smith 模糊 PID 和 DDPG 改进的 Smith 模糊 PID 的控制效果。记录调节时间 t_s 、超调量 M_p 、积分绝对误差 IAE 作为评价指标,积分绝对误差计算公式如下:

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (19)$$

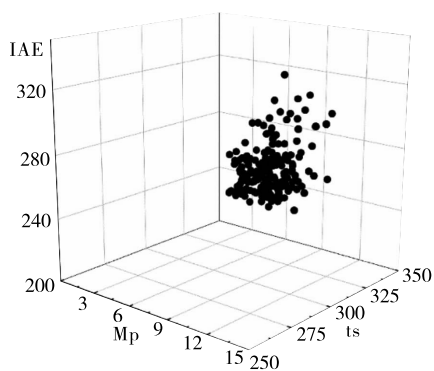
设定参数 K , T 与 τ 分别在区间 $[7, 9]$ 、 $[1250, 1350]$ 、 $[107, 113]$ 浮动,对两控制器分别进行 200 次实验并记录,结果如图 7 所示。

如图 7 实验结果所示,在 DSF - PID 控制下各点位数值较小且更为紧密,表明相较于 Smith 预估器,经 DDPG 改进的 Smith 模糊 PID 控制器拥有更好的调控效果,且抗干扰能力强。综上,改进的

Smith 预估器控制效果更优秀,具有较好的鲁棒性与动态响应性能。



(a) DSF-PID蒙特卡洛实验结果



(b) SF-PID蒙特卡洛实验结果

图7 蒙特卡洛分析图

5 结论

该文将 Smith 模糊 PID 控制器与 DDPG 算法结合,建立发酵仓温控模型对 DDPG 辅助控制器离线训练,并进行了参数匹配与失配时的响应测试。研究结果如下:

(1)参数匹配时,相较于 Smith 模糊 PID 控制,采用 DDPG 改进的 Smith 模糊 PID 控制策略可使系统达到稳态所需时间缩短 11 s,且超调量降低 2.84% ;

(2)相较于 Smith 模糊 PID,经过 DDPG 改进的 Smith 模糊预估 PID 在三个参数偏离的模型下均取得更好的温度调控效果,且在参数小范围浮动时具有良好的抗干扰能力,鲁棒性好控制过程更稳定。

参考文献:

- [1] 谢光辉,包维卿,刘继军,等. 中国畜禽粪便资源研究现状述评[J]. 中国农业大学学报, 2018,23: 75-87.
- [2] MICHEL F, O'Neill T, RYNK R, et al. Chapter 7 - Contained and in-vessel composting methods and methods summary [C]//R. RYNK. The Composting Handbook. Academic Press, 2022:271-305.
- [3] 苏佳佳,李凤鸣,李伟,等. 畜禽粪污堆肥技术装备发

展现状与趋势[J]. 农业工程, 2022,12: 12-18.

- [4] 刘泽龙,王选,曹玉博,等. 立式筒仓反应器堆肥技术工艺优化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020,28: 1979-1989.
- [5] AJMAL M, SHI A, AWAIS M, et al. Ultra-high temperature aerobic fermentation pretreatment composting: Parameters optimization, mechanisms and compost quality assessment [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021,9: 105453.
- [6] MU D, QU F, ZHU Z, et al. Effect of Maillard reaction on the formation of humic acid during thermophilic phase of aerobic fermentation [J]. Bioresource Technology, 2022,357: 127362.
- [7] 刘浩,沈星,曲浩丽,等. 粒子群优化的神经网络 PID 沼气干发酵温度控制[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(03):784-788.
- [8] 贺自名,牛江川,张静. 基于 Smith 变论域模糊自适应 PID 蒸发器温度控制[J]. 控制工程, 2021,28: 1308-1314.
- [9] 张皓,高瑜翔. 前馈反馈 Smith 预估模糊 PID 组合温度控制算法[J]. 中国测试, 2020,46: 132-138 + 168.
- [10] 郑仰东. 采用 Smith 预估器模型的时滞系统自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2021,38: 416-424.
- [11] 周志勇,莫非,赵凯,等. 基于 PPO 的自适应 PID 控制算法研究[J/OL]. 系统仿真学报, 1-8 <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0137>.
- [12] LAWRENCE N P, FORBES M G, LOEWEN P D, et al. Deep reinforcement learning with shallow controllers: An experimental application to PID tuning [J]. Control Engineering Practice, 2022,121: 105046.
- [13] 吴敏,王晓璐,姜玉东,等. 深度确定性策略梯度与模糊 PID 的协同温度控制[J]. 控制理论与应用, 2022,39: 2358-2365.
- [14] BU Q, CAI J, LIU Y, et al. The effect of fuzzy PID temperature control on thermal behavior analysis and kinetics study of biomass microwave pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, 158: 105176.
- [15] 孙军,张典,黄青山,等. 基于串级模糊自适应 PID 的蒸发器温度控制系统设计[J]. 过程工程学报, 2023,23(09):1290-1299.
- [16] 荆中亚,陈为. 基于 STM32 的密炼机自整定 PID 温控系统设计[J]. 电子设计工程, 2024,32(5):51-55.
- [17] 杨智显,胡安杰,刘东. 基于 STM32 的冷暖两联供控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2023,31(21):1-6.

(下转第 99 页)

方法控制下的汽车质心侧偏角变化情况,最终得到图7所示的对比结果。

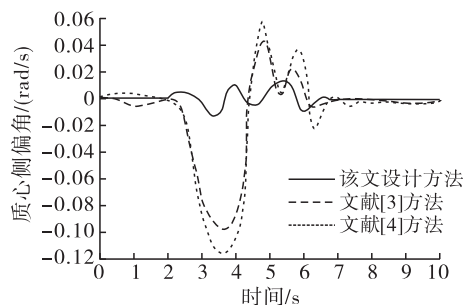


图7 不同方法控制后汽车质心侧偏角对比

从图7可以看出,应用多传感器融合控制技术后,混合动力汽车转向过程中,车辆的质心侧偏角保持在 ± 0.012 rad/s之间,满足了车辆行驶稳定性要求。而应用另外2种控制方法汽车质心侧偏角最大值达到了0.097 rad/s和0.118 rad/s。这一对比结果充分显示了该文研究的控制技术的优越性,可以更好地解决汽车转向带来的不稳定性问题。

3 结语

混合动力汽车的推出,满足了市场的节能、环保发展要求,但汽车转向稳定性问题依旧未能解决。对此,该研究从构建转向动力学模型入手,给出一种结合神经网络和PID算法的新型控制策略,并引入多传感器融合思想看,获取实时车辆转向控制误差,以此来优化控制参数,取得更优的稳定性控制效果。

参考文献:

- [1] 刘平,刘自斌,杨明亮,等.考虑道路曲率的多约束高速无人驾驶汽车横向跟踪控制方法[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(02):120-134.
- [2] 高伟,罗金涛,邓召文,等.分布式电驱动汽车“人-车-路”闭环横向稳定性控制[J].制造业自动化,2023,45(06):116-123.
- [3] 王家钊,常九健.基于线控转向的差动转向控制策略研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(08):1064-1069+1108.
- [4] 杜云雷,王先云,韩忠良,等.考虑转向意图的分布式电驱动汽车横摆稳定性控制[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(08):101-108.
- [5] 陈松,王剑.基于载荷识别的汽车转向机电制动稳定性控制[J].计算机仿真,2022,39(09):136-139+424.
- [6] 熊剑波,汪怡平,梁宝钰,等.基于主动前轮转向控制的汽车侧风稳定性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(01):21-27.
- [7] 张利鹏,段嘉瑶,苏泰,等.电动轮驱动汽车空间稳定性底盘协同控制[J].机械工程学报,2022,58(10):209-221.
- [8] 邓召文,易强,高伟,等.四轮转向汽车闭环LQR控制仿真研究[J].机械设计与制造,2022(01):20-25.
- [9] 徐飞翔,周晨,王军,等.基于变传动比的全轮线控转向车辆可拓 H_∞ 控制方法研究[J].中国公路学报,2021,34(09):133-145.
- [10] 郭烈,许林娜,孙大川.独立驱动电动汽车转向稳定性控制方法研究[J].机械设计与制造,2021(09):66-69+74.
- [11] ca, 2022,48: 1816-1823.
- [12] SIRASKAR R. Reinforcement learning for control of valves[J]. Machine Learning with Applications, 2021, 4: 100030.
- [13] XU J, ZHANG H, QIU J. A deep deterministic policy gradient algorithm based on averaged state-action estimation[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022,101: 108015.
- [14] KANG J-L, MIRZARI S, ZHOU J-A. Robust control and training risk reduction for boiler level control using two-stage training deep deterministic policy gradient[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2022,130.
- [15] (上接第59页)
- [16] Al-Dhaifallah M. Fuzzy fractional-order PID control for heat exchanger[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023,63: 11-16.
- [17] OLIVEIRA F S S, SOUZA F O, PALHARES R M. PID Tuning for Time-Varying Delay Systems Based on Modified Smith Predictor 11This work has been supported by the Brazilian agencies CAPES, CNPq, and FAPEMIG [J]. IFAC-PapersOnLine, 2017,50: 1269-1274.
- [18] LEE D, LEE M, SUNG S, et al. Robust PID tuning for Smith predictor in the presence of model uncertainty [J]. Journal of Process Control, 1999,9: 79-85.
- [19] SHI S, LIU Q. Deep Deterministic Policy Gradient With Classified Experience Replay[J]. Acta Automatica Sini-