

基于模糊 PID 算法的恒温水浴控制系统研究

吴 敏¹, 姜玉东¹, 王晓璐¹, 钟 磊², 莫飞扬³

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 江苏时代新能源科技有限公司, 江苏 溧阳 213354;
3. 澄瑞电力科技(上海)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘 要: 为校准温度范围在 0~100 ℃ 的温度传感器, 以恒温水浴控制系统为研究对象, 对经过 Z-N 参数整定后的 PID 算法和模糊 PID 算法进行了仿真分析。搭建水浴模型, 从仿真和实验两方面分析两种算法对恒温水浴控制系统的稳定性和动态性能的影响。结果表明: 模糊 PID 算法能够有效改善恒温水浴的校准性能, 为实践提供参考。

关键词: 模糊 PID 算法; 恒温水浴; 控制系统; 数学模型; 仿真

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)03-0060-06

Research on Control System of Constant Temperature Water Bath Based on Fuzzy PID Algorithm

WU Min¹, JIANG Yu-dong¹, WANG Xiao-lu¹, ZHONG Lei², MO Fei-yang³

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Jiangsu Times New Energy Technology Co., Ltd.,
Liyang 213354, China; 3. Chengrui Power Technology (Shanghai) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to calibrate the temperature sensor with a temperature range of 0~100 ℃, taking the control system of constant temperature water bath as the research object, the PID algorithm and fuzzy PID algorithm after Z-N parameter setting are simulated and analyzed. A water bath model is built, and the effects of the two algorithms on the stability and dynamic performance of the control system of constant temperature water bath are analyzed from two aspects of simulation and test. The results show that the fuzzy PID algorithm can effectively improve the calibration performance of constant temperature water bath and provide guidance and reference for practice.

Key words: fuzzy PID algorithm; constant temperature water bath; control system; mathematical model; simulation

在日常生活和工业生产中经常会用到温度传感器, 对温度传感器精度的校准是一个重要的研究方向。目前, 对于测量范围在 0~100 ℃ 的温度传感器的校准, 恒温水浴应用得最为广泛。文献[1]研究了基于增量式 PID 算法的水浴温度自动控制器; 文献[2]设计了一套可用 STM32 实现的基于 PID 算法的高精度恒温控制系统; 文献[3]采用 DSP 芯片设计了基于 PID 算法的恒温控制系统; 文献[4]基于 PID 控制理论, 以三菱 PLCFX3U-32MT 为控制器, 通过触摸屏、电机搅拌电路、加热电路、供水电路实现水浴的智能恒

收稿日期: 2021-07-23

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151099); 江苏省现代教育技术研究课题(2019-R-78056)

作者简介: 吴敏(1983—), 女, 河南商城人, 讲师, 硕士, 主要从事测控技术、嵌入式技术方面的研究。

温控制;文献[5]对恒温水浴装置的输入进行模糊化处理,并制定输出规则,设计了一种水浴加热温度控制系统并进行了仿真实验。已有的研究表明,目前较为常见的水浴恒温控制大多采用PID算法,少部分采用模糊算法;文献[6]将模糊PID参数自整定控制应用到细胞培养箱的温控系统中。

对于不具备线性描述和复杂模型的校准用的恒温水浴控制系统来说,常见的PID控制方式难以满足其控制要求。文献[7-8]将模糊PID算法应用于恒温水浴控制系统,但均缺少参数整定过程;此外,文献[7]缺少实验论证,文献[8]未能通过实验测得恒温水浴的实际温度阶跃响应曲线和传递函数。本文对基于模糊PID算法的恒温水浴控制系统进行研究,不仅为提高系统性能提供了一个新的参数整定控制方案,而且为系统的推广应用提供了理论和实践指导。

1 模糊PID控制算法

模糊PID控制,是将模糊控制应用到常规PID控制中,使优化比例 P 、积分 I 和微分 D 这3个参数不再是常数,而是可以根据输入作出改变的量^[9]。

模糊PID控制器主要由模糊控制器和PID控制器组成,如图1所示。 r 为系统的输入, y 为系统的输出, e 是系统的偏差, ec 是系统的偏差变化率。模糊PID控制器的核心是根据建立的模糊规则库将实际输入参数模糊化并进行模糊推理,将推理结构清晰化后输出,最后将模糊控制器的输出量输入到PID控制器中,调整比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d ,使这3个系数满足在不同输入条件时的要求,增强系统对被控对象的控制性能^[10]。

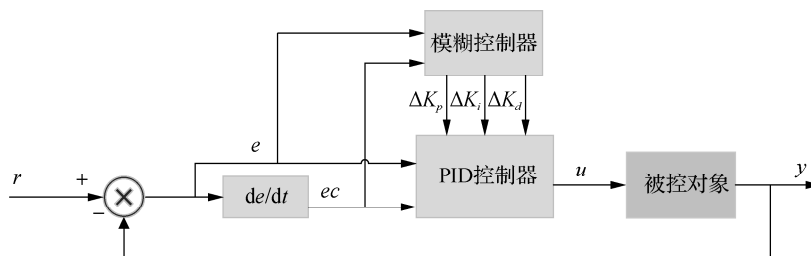


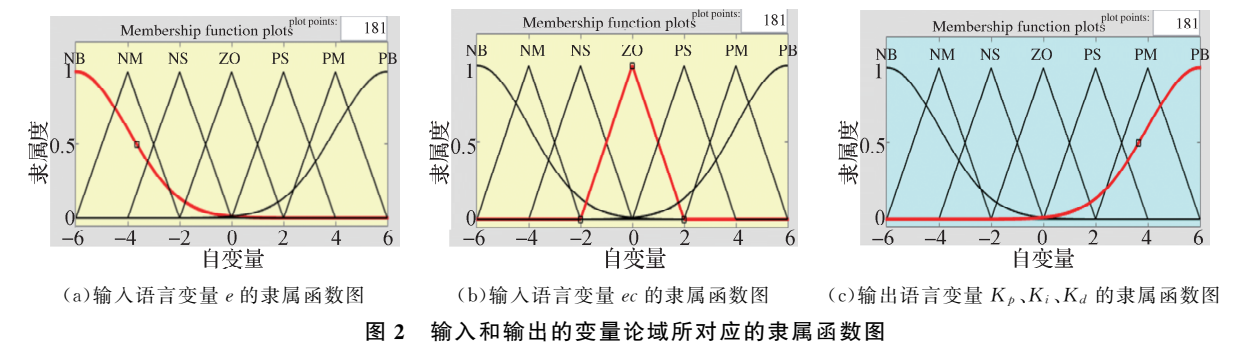
图1 模糊PID控制结构

1.1 参数设定

本文所研究的基于模糊PID的控制系统既要满足控制要求,又要便于计算,所以将模糊PID控制系统设定为:负大NB、负中NM、负小NS、零ZO、正小PS、正中PM、正大PB等7个语言变量值。恒温水浴槽控制系统的温度变化范围是 $0 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度偏差 e 的实际范围是 $-100 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,则 e 的论域可定为 $[-100, 100]$ 。由于温度变化缓慢,温度偏差变化率 ec 的基本论域大致为 $[-2, 2]$ 。经参数整定分析,输出量 K_p 、 K_i 、 K_d 实际论域分别为 $[-1, 1]$ 、 $[-0.02, 0.02]$ 、 $[-0.3, 0.3]$,则输入、输出的模糊论域可设为 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 。

将确切量转化为模糊量时,需要将确切量化到模糊论域中。偏差 e 的量化因子为 $K_e = 6/100 = 0.06$,偏差变化率 ec 的量化因子 $K_{ec} = 6/2 = 3$, K_p 的比例因子为 $K_{K_p} = 1/6 = 0.167$, K_i 的比例因子为 $K_{K_i} = 0.02/6 = 0.003\ 33$, K_d 的比例因子为 $K_{K_d} = 0.3/6 = 0.05$ 。

为了使计算机对数据处理的同时满足数据的合理性,本系统对所有变量论域的“负大NB”和“正大PB”选用gaussmf(高斯隶属)函数,对其他的选用trimf(三角形隶属)函数进行描述,模糊PID控制系统的输入和输出的变量论域所对应的隶属函数如图2所示^[11]。从图2可以看出,NB和PB均采用高斯隶属函数,NB的模糊论域为 $[-6, -5, -4, -3, -2]$,PB的模糊论域正好相反为 $[2, 3, 4, 5, 6]$;其他全部采用三角形隶属函数,即NM的模糊论域为 $[-6, -5, -4, -3, -2]$,NS的模糊论域为 $[-4, -3, -2, -1, 0]$,ZO的模糊论域为 $[-2, -1, 0, 1, 2]$,PS的模糊论域为 $[0, 1, 2, 3, 4]$,PM的模糊论域为 $[2, 3, 4, 5, 6]$ 。共7个隶属函数,对应7个模糊语言变量。



1.2 模糊规则

在模糊化处理过程中,一般选择的方法是面积重心法,该方法用隶属度函数的曲线与坐标轴所围图形的重心坐标作为参数的模糊推理值,再根据控制系统总结出的控制规则进行推理运算^[12]。该系统模糊控制规则如表 1—表 3 所示。模糊控制器经过模糊规则推理处理后,需要通过清晰化处理转换成确切量。通过图 3 所示的模型逐个进行测试并取整,可以得到模糊控制器经过清晰化后的输出控制表。

表 1 输出语言变量 K_p 的模糊控制规则

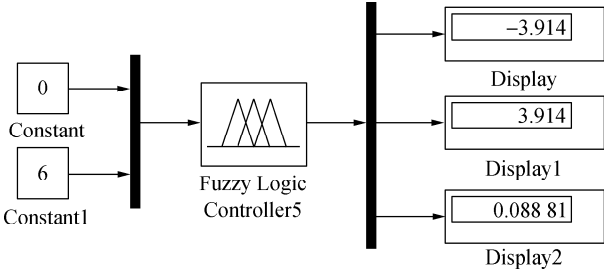
e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 输出语言变量 K_i 的模糊控制规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

表 3 输出语言变量 K_d 的模糊控制规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	NS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB



2 恒温水浴控制系统数学模型分析

恒温水浴控制系统的数学模型能准确反映水浴温度的实际特性,可以为水浴槽温度控制的设计和参数整定提供充分的理论依据。恒温水浴控制系统为单输入、单输出系统,该系统具有纯滞后环节和自平衡功能,其数学模型可以使用一阶系统加纯滞后环节来描述,传递函数为:

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

(1)

其中 K 表示静态增益, τ 表示时间常数, T 表示纯滞后时间。

2.1 恒温水浴温度阶跃响应曲线的测定

为了使本系统的数据结果更具有科学性,实验采用了文献[13]的模型仿真数据,利用 fluent 软件,采

用重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型,对大容量恒温水浴槽内的流场和温度场进行三维数值模拟。

恒温水浴的模型为:恒温水浴槽采用搅拌区和工作区分离的方式(图4),恒温水浴槽计算域结构为550 mm×350 mm×550 mm(长×宽×高)长方体,搅拌直径81 mm,搅拌器长410 mm。

当被控对象或者被测系统从一个稳定状态到另一个稳定状态,其动态特性才会表现出来。本系统采用了时域测定的分析方法对系统进行测量,传递函数的测量实验过程如下:1)将恒温水浴的水温调整到一个稳定的值,并保持一段时间;2)待系统温度稳定一段时间后,为恒温水浴控制系统施加一个10%的PWM脉冲信号;3)施加脉冲信号后,恒温水浴的水温会发生相应的变化,通过上位机软件每隔1 s记录温度响应的变化,通过实验数据绘制出响应曲线如图5所示。

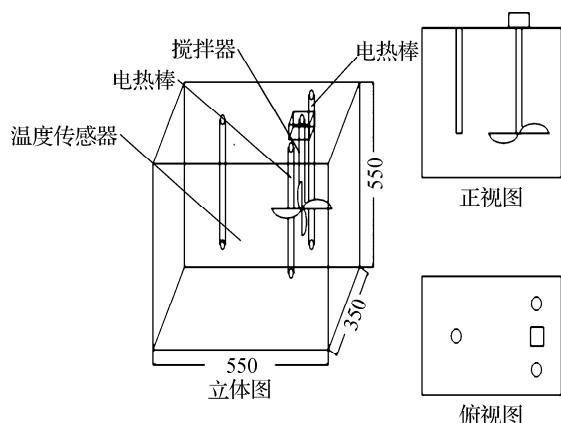


图4 恒温水浴槽模型(单位:mm)

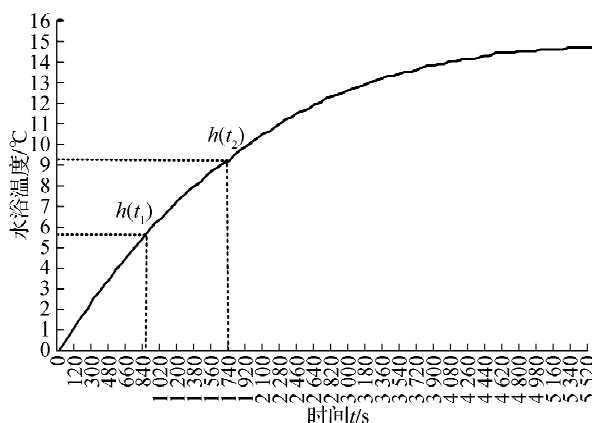


图5 水浴温度响应曲线

2.2 恒温水浴系统数学模型的建立

在求解恒温水浴系统的传递函数时,通过实验确定纯滞后的一阶系统的时间常数 T 。当 $t=\tau+1/2T$ 时,输出达到系统终值的39%;当 $t=\tau+T$ 时,输出达到系统终值的63%,具体如下:

1)由图5可得出响应曲线的稳定值为 $h(\infty)=14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,在响应曲线上取两点 $h(t_1)$ 和 $h(t_2)$,这两点满足式(2):

$$\begin{cases} h(t_1)=0.39h(\infty)=5.73 \\ h(t_2)=0.63h(\infty)=9.26 \end{cases} \quad (2)$$

2)由图5可查得 $t_1=928\text{ s}$, $t_2=1760\text{ s}$, $h(0)=0$ 。根据 $T=2(t_2-t_1)$, $\tau=2t_1-t_2$, $K=h(\infty)-h(0)$,可计算得 $K=14.7$, $T=1664$, $\tau=96$ 。

3)结合式(1)可得恒温水浴控制系统的传递函数为:

$$G(s)=\frac{14.7e^{-96s}}{1664s+1} \quad (3)$$

2.3 PID控制器参数的Z-N(Ziegler-Nichols)整定

PID控制器中, K_p 影响着系统的稳定性和响应速度, K_p 过大虽然会加快系统的响应速度,但也会破坏系统的稳定性; K_i 可以调整系统的稳态误差,但会增加超调; K_d 关系着系统的响应速度和稳定性。因此合理的调节参数关系着系统的调节性能^[14]。

Z-N整定法中的被控制对象大多采用近似的一阶惯性加纯滞后环节表示,其传递函数为式(1)。对于典型的PID控制器有:

$$G(s)=K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s\right) \quad (4)$$

根据Z-N整定公式可得: $K_p=\frac{1.2T}{K\tau}$, $T_i=2\tau$, $T_d=0.5\tau$ 。根据公式(3)的结果求出 K_p 、 T_i 、 T_d ,进而根据 $K_i=K_p/T_i$, $K_d=K_p \cdot T_d$,求出该系统整定PID初始参数为 $K_p=1.41$, $K_i=0.0074$, $K_d=67.7$ 。

3 模糊 PID 算法在恒温水浴控制系统中的应用分析

在 50 °C 信号下,对采用了模糊 PID 算法的恒温水浴控制系统进行仿真,并与传统的 PID 控制算法进行对比,如图 6 所示。高精度恒温水浴控制系统的仿真结果如图 7 所示,红色实线是模糊 PID 控制器输出的响应变化曲线,蓝色实线为对比用的 PID 控制器输出的响应变化曲线。

在阶跃输入作用下,超调量 σ 表示为:

$$\sigma = \left| \frac{h(t_p) - h(\infty)}{h(\infty)} \right| \times 100\%$$

其中 $h(t_p)$ 表示被测量响应曲线与输入阶跃函数的最大偏移量, $h(\infty)$ 表示被调量的稳态值。

所以,模糊 PID 的超调量 $\sigma_1 = \left| \frac{57-50}{50} \right| \times 100\% = 14\%$, PID 的超调量 $\sigma_2 = \left| \frac{63-50}{50} \right| \times 100\% = 26\%$ 。模糊 PID 算法的超调量比传统 PID 算法的降低了 12 个百分点。

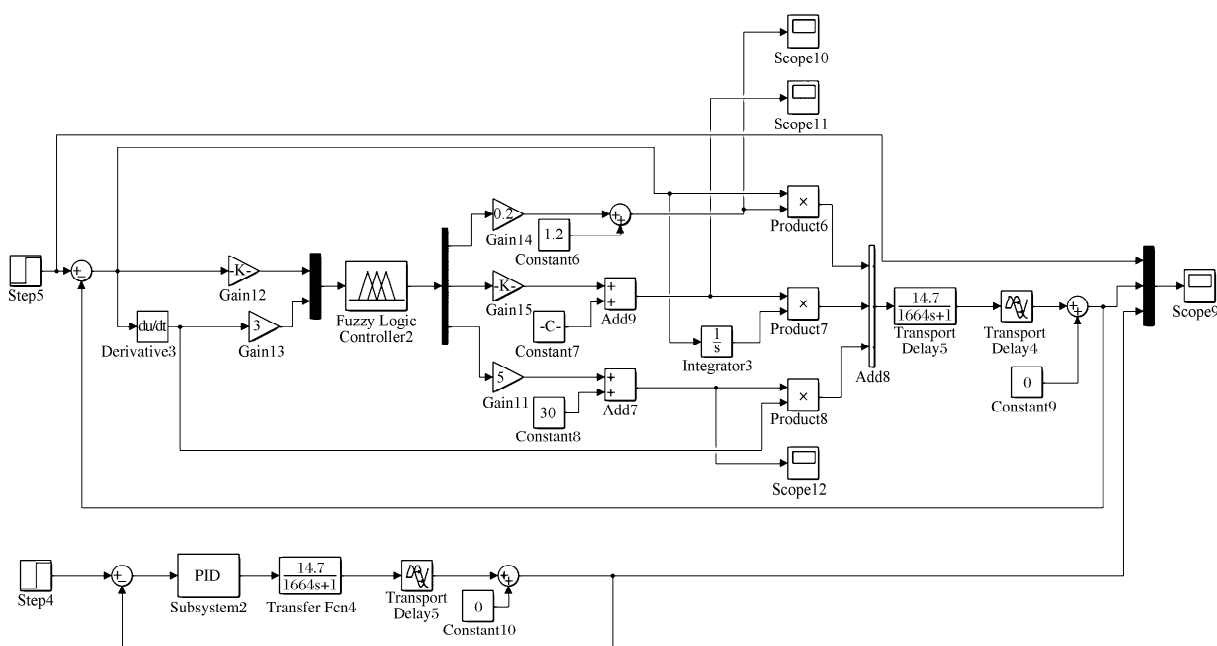


图 6 恒温水浴控制系统模糊 PID 和 PID 对比仿真模型

从图 7 可以看出,模糊 PID 的上升时间 $t_{r1} \approx 260$ s, PID 的上升时间 $t_{r2} \approx 200$ s, $\Delta t_r = t_{r1} - t_{r2} = 60$ s。从上升时间来看,模糊 PID 要比传统 PID 慢 60 s。模糊 PID 的调节时间 $t_{s1} \approx 430$ s, PID 的调节时间 $t_{s2} \approx 500$ s, $\Delta t_s = t_{s2} - t_{s1} = 70$ s。从调节时间来看,模糊 PID 要比传统 PID 快 70 s。

在恒温水浴槽中对两种算法的控制效果进行实验,将目标控制温度设定为 37.5 °C,结果如图 8 所示。可以看出,在进行温度调节的过程中,由于受模型和加热电源功率的影响,实验开始时并不能体现出模糊 PID 超调量小和调节时间快的优势,但是随着时间的推移,模糊 PID 的温度曲线每隔 5 °C

会有一次阶跃性变化,这表明模糊 PID 控制器在不同的温度区间内,输出的 PID 3 个参数会发生相应的变化,自适应能力比 PID 控制器好。当控制温度都达到 37.5 °C 时, PID 算法控制的水浴温度会在 37.6 °C 附近波动,模糊 PID 算法控制的水浴温度会稳定在 37.5 °C 附近,波动范围在 0.1 °C 以内。相比于文献[4]

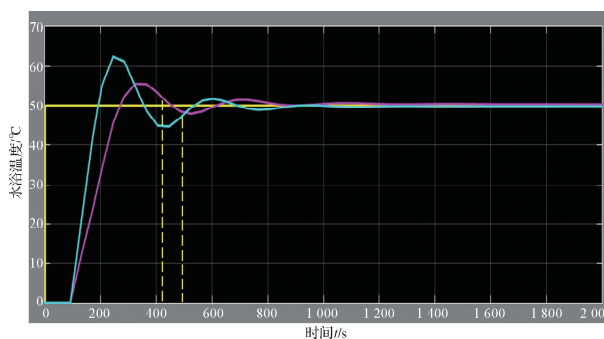


图 7 恒温水浴控制系统的模糊 PID 和传统 PID 的仿真结果

中的“经PID处理后温度稳定误差在 $0.163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内”、文献[5]中的“利用模糊规则控制方法的恒温最大误差为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”要改善不少,因此模糊PID相对传统PID而言稳定性更高。

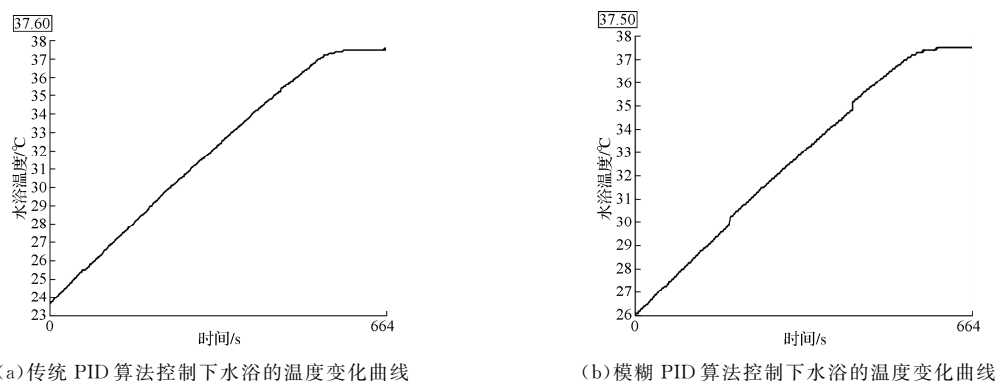


图8 恒温水浴槽内两种算法的控制效果对比

4 结 语

以恒温水浴控制系统为研究对象,本文基于传统PID和模糊PID控制算法,通过Z-N整定法对算法的参数进行优化,在同样的阶跃输入信号下进行仿真分析。另通过恒温水浴实际温度响应曲线,建立实验数学模型,对两种控制算法的控制效果进行对比。仿真和实验结果表明:对于恒温水浴控制系统来说,模糊PID控制相较传统的PID控制,虽然系统的上升时间稍慢,但系统的超调量和进入稳态后的稳定性有明显的改善和提高,为此类系统性能的提升提供了参考。

参考文献:

- [1] 文波,孟令军,张晓春,等.基于增量式PID算法的水温自动控制器设计[J].仪表技术与传感器,2015(12):113-116
- [2] 黄琦,韩广源,吴瑞东,等.基于STM32的高精度恒温控制系统设计[J].仪表技术与传感器,2017(5):71-74
- [3] 何园涛,李瑞君,冯建,等.基于DSP芯片的高精度恒温控制系统设计[J].仪表技术与传感器,2017(1):70-73
- [4] 吴敏,王晓璐,姜玉东.高精度恒温水浴控制系统的设计[J].金陵科技学院学报,2018,34(4):38-42
- [5] 王德元.基于模糊规则的快速恒温水浴控制系统研究[J].时代农机,2017,44(12):132,151
- [6] 刘大军,胡舜迪,史振志,等.基于模糊PID参数自整定的细胞培养箱温度控制算法[J].计算机测量与控制,2017,25(6):45-48
- [7] 何慧,侯国强.模糊PID控制在恒温水浴加热器中的应用[J].仪器仪表用户,2010,17(5):41-42
- [8] 贺敬峰.基于模糊PID控制的恒温水浴控制器的研究[D].长春:吉林大学,2011
- [9] 沈金权.基于ZigBee的食用菌生长环境监控系统的设计与实现[D].银川:北方民族大学,2021
- [10] 祝相泉.基于模糊PID的矫平机控制系统的设计与研究[D].锦州:辽宁工业大学,2020
- [11] 陈建军,谢峰,汪小武,等.基于模糊自适应PID控制算法的螺栓扳手扭矩控制系统设计[J].现代制造工程,2021,45(3):113-119
- [12] 高文璇.基于滑模观测和模糊逻辑的永磁同步电机控制技术及应用[D].广州:华南理工大学,2020
- [13] 甄瑞英,尹建国,赵贯甲,等.大容量液体恒温槽温度场和流场的数值模拟[J].河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(5):38-41
- [14] 宋平冈,杨长榄,龙日起,等.考虑功率裕度的MMC-MTDC改进下垂平坦控制策略[J].电工电能新技术,2021,40(6):22-31

(责任编辑:湛 江)