

基于 P-变论域模糊自适应 PID 的婴儿辐射保暖台温控系统研究

金爱国¹, 杨海仕², 吴海啸², 王 琪², 胡燕海^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波戴维医疗器械股份有限公司, 浙江 宁波 315712)

摘要: 在模糊 PID 算法的基础上提出了一种多模态 P-变论域模糊自适应 PID 算法, 即 P-VFPID (Proportion-Variable Fuzzy PID). 首先采用阶跃响应法及 Matlab 系统辨识工具箱建立婴儿辐射保暖台床面的传递函数模型; 其次利用偏差分级方法对专家经验确定的区间进行改进, 分别得到输入输出伸缩因子的 3 个偏差区间, 结合模糊算法和比例控制(P 控制)构成了 P-VFPID; 最后运用 Matlab 进行仿真. 结果表明, 相较于普通 PID 算法和 VFPID, P-VFPID 具有调节时间短、超调量几乎为零、无稳态误差、抗干扰能力强等特点, 应对婴儿辐射保暖台温控系统具有较好的自适应能力.

关键词: 婴儿辐射保暖台; VFPID; P-VFPID; 伸缩因子; 变论域

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 01-0052-05

婴儿辐射保暖台是指专用于新生儿、早产儿、病危儿、孱弱儿的护理保暖器械, 配备有红外辐射装置用于向婴儿提供持续温暖, 并有数字式肤温传感器, 时刻监控护理过程中婴儿体表温度及床面温度, 其中温度控制系统的稳定性是衡量保暖台性能优劣的重要指标之一. 目前, 我国广泛使用的婴儿保暖台的内置的温控算法主要采用 PID 算法, 然而单一 PID 算法的比例系数、积分系统及微分系数在控制系统中是固定不变的, 对于像保暖台这种非线性、滞后性以及时变性的温控系统, 显然 PID 算法无法很好地满足控制精度要求^[1]. 鉴于此, 一系列改进的控制算法应运而生, 如文献[2-3]提出了模糊PID控制, 主要通过模糊推理的方法动态调整 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的值, 从而实现在线调整 k_p 、 k_i 和 k_d , 在一定程度上提高了响应速度, 减少了调节时间, 但是依旧具有较大的超调量. 针对这一不足, 文献[4]在模糊控制的基础上, 提出了基于函数形式选择伸缩因子实现变论域控制的方法,

进一步减少了调节时间, 且减小了超调量; 然而由于伸缩因子是基于固定的函数形式计算而得, 这不仅需要对控制模型建立一个精确的函数表达式, 而且函数的参数选取也较为繁琐. 文献[5-6]则利用偏差分级的方法划分 4 组偏差区间(采用专家经验偏差区间), 从而选取不同的伸缩因子; 该方法计算量小、控制精度较高, 但依旧不能完全克服调节时间长的问题, 而且仍具有一定的超调量.

本文提出了一种多模态的 P-变论域模糊 PID 控制算法, 当温度偏差大于设定值时, 采用比例控制(P 控制), 确保响应速度足够快; 当温度偏差小于所设定的值时, 切换为变论域模糊 PID 控制. 其中, 变论域控制中引入的伸缩因子采用偏差分级的方法. 结合保暖台的加热模型, 对专家经验确定的区间做出了改进, 将偏差区间划分为 3 组, 并且对偏差和偏差变化率的伸缩因子分别取值. 在以上改进的基础上, 通过 Matlab 仿真, 可以发现 P-变论域模糊 PID 控制算法无论相较于普通 PID 算

收稿日期: 2018-01-16.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51705263); 宁波市重大科技专项(2017C110030).

第一作者: 金爱国(1993-), 男, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机电产品开发及智能算法. E-mail: 1300415814@qq.com

*通信作者: 胡燕海(1966-), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 企业信息化及集装箱运输等. E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn

法, 还是变论域模糊 PID 算法, 各方面的性能都有较大的提升. 温度超调量几乎为零, 调节时间大大缩短, 并且抗干扰能力显著增强, 对于时变系统也具有较好的自适应能力.

1 保暖台温控模型的建立

一般情况下温度控制模型可以简化为一阶惯性环节加比例环节, 但是考虑到婴儿辐射保暖台的工作环境是开放的, 实际工作中是一个多容且具延时的系统, 故将保暖台的温控模型理想化为二阶惯性滞后传递函数^[3]:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}e^{-\tau s}, \quad (1)$$

式中: K 为比例系数; T_1 和 T_2 为时间常数; τ 为滞后时间; e 为欧拉数.

实验前将室温稳定在 23°C , 接着对保暖台进行阶跃响应实验. 首先将保暖台的辐射头加热比例控制为 60%, 此时控制电压为 $u_1=132\text{ V}$, 当温度上升并稳定 0.5 h 后测得保暖台床面的温度为 $y(0)=32.35^\circ\text{C}$; 之后将加热比例调节到 90%, 此时控制电压为 $u_2=196\text{ V}$, 记录之后的温度数据直到稳定状态 $y(\infty)=36.2^\circ\text{C}$, 系统阶跃响应曲线如图 1 所示.

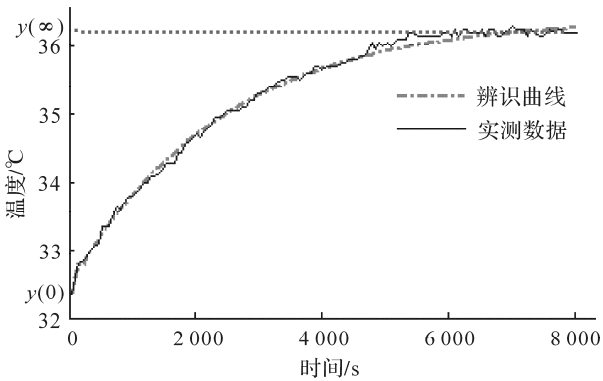


图1 系统温度阶跃响应曲线

图 1 中实线测得的数据为保暖台的床面温度, 由肤温探头测得, 有一定的波动性. 在此利用 Matlab 系统辨识工具箱对其进行辨识, 可得一条光滑的辨识曲线(辨识率为 93.89%). 在工程应用中辨识率超过 80%即为可信, 因此认为本辨识曲线可靠.

根据二阶阶跃响应两点法^[7], 在拟合曲线 $y(t)$ 上选取两点 $(t_1, y(t_1))$ 和 $(t_2, y(t_2))$, 其中:

$$\begin{cases} y(t_1) = 0.4(y(\infty) - y(0)), \\ y(t_2) = 0.8(y(\infty) - y(0)), \end{cases} \quad (2)$$

根据辨识曲线以及式(2)可得: $t_1=1\,140\text{ s}$, $y(t_1)=33.89^\circ\text{C}$, $t_2=3\,240\text{ s}$, $y(t_2)=35.43^\circ\text{C}$, $t_1/t_2 \approx 0.352$, 故进一步验证了被控对象为二阶系统^[7], 结合式(3):

$$\begin{cases} K = \frac{y(\infty) - y(0)}{u_2 - u_1}, \\ T_1 + T_2 \approx \frac{t_1 + t_2}{2.16}, \\ \frac{T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2} \approx \frac{1.74 t_1}{t_2} - 0.55, \end{cases} \quad (3)$$

发现系统大约经过 60s 后温度才开始变化, 故取 $\tau=60\text{ s}$. 联立式(1)~(3)可得:

$$G(s) = \frac{0.06}{212625s^2 + 2056s + 1}e^{-60s}. \quad (4)$$

2 P-变论域模糊自适应 PID 控制器的设计

2.1 P-变论域模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器主要是在初始化参数 k_{p0} 、 k_{i0} 及 k_{d0} 的基础上, 通过引入 Δk_p 、 Δk_i 及 Δk_d 三个变量, 在线调节 PID 的 3 个参数, 确保控制精度^[8]. 但是由于模糊系统自身存在的粗造性和冗余性, 使得调节时间相对较长^[4], 故而引入变论域思想^[9]. 根据变论域原理, 如果通过引入输入输出伸缩因子, 且动态调节这些因子大小, 相当于动态调节输入输出变量的模糊论域范围. 以输入偏差 E 为例, 其模糊论域为 $[-E_{\max}, E_{\max}]$, 经过论域变换之后, 新的模糊论域变为 $[-\alpha E_{\max}, \alpha E_{\max}]$, 其中 α 称为偏差的输入伸缩因子, 通过改变 α 值可以收缩或扩张偏差的模糊论域. 当偏差较大时, 取较大的 α , 偏差论域扩张; 当偏差变小时, 取较小的 α , 偏差论域收缩. 这种伸缩变化间接地增加(减少)了偏差较小(较大)时的模糊规则的密度, 提高了控制精度和响应速度. 其他变量的论域变换类似. 为了兼顾响应速度, 加入比例调节 P, 最终设计 P-变论域模糊 PID 控制器原理图(图 2).

图 2 在模糊 PID 控制算法的基础上, 引入了伸缩因子调节模块, 克服模糊控制的不足. 其中 α_1 和 α_2 分别为偏差 E 和偏差变化率 EC 的输入伸缩因子, β_1 、 β_2 和 β_3 分别为 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的输出伸缩因

子, 经多番调试, ε 确定为 $0.6E_{\max}$. 同时, 结合 P 控制, 使得系统的响应速度大大提高.

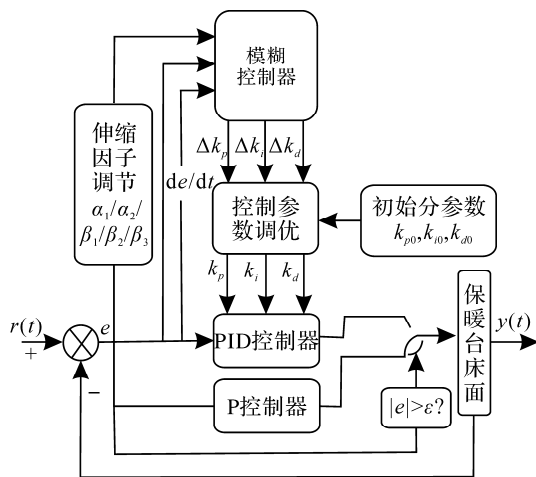


图2 P-变论域模糊PID控制器原理图

2.2 输入输出伸缩因子的设计

伸缩因子是变论域模糊控制的关键因素^[10]. 设计伸缩因子的方法通常有3种, 分别为基于函数形式、基于模糊推理和基于偏差分级选取^[5]. 基于函数形式必须建立函数关系式, 由于辐射采暖台是处于开放的加热环境中, 显然难以确定精准的函数; 基于模糊推理是根据设定好的采样周期, 每一个周期计算一次伸缩因子, 计算量大, 实时性差; 显然这2种方法都不适用.

为此选用基于偏差分级方法, 通过将偏差 E 划分不同的区间, 每个区间对应一组输入输出伸缩因子. 在专家经验基础上, 对其做出改进, 将温度偏差分3个区间, 分别记为区间1: $[-0.6E_{\max}, -0.4E_{\max}]$ 和 $[0.4E_{\max}, 0.6E_{\max}]$; 区间2: $[-0.4E_{\max}, -0.2E_{\max}]$ 和 $[0.2E_{\max}, 0.4E_{\max}]$; 区间3: $[-0.2E_{\max}, 0.2E_{\max}]$. 其中

$E_{\max}=r$, r 为参考输入.

结合PID参数整定原则, 在设计伸缩因子时应遵守以下的规律^[6]: 变量 Δk_p 和 Δk_d 伸缩因子应与偏差的单调性相同; Δk_i 伸缩因子应与偏差的单调性相反. 伸缩因子选取值见表1.

表1 偏差区间伸缩因子变化

偏差 区间	伸缩因子				
	α_1	α_2	β_1	β_2	β_3
1	0.6	0.8	1	0.5	0.8
2	0.4	0.6	0.8	0.6	0.5
3	0.3	0.2	0.4	0.8	0.2

2.3 模糊自适应PID控制算法

模糊PID控制是根据偏差及偏差变化率的变化, 结合模糊控制算法在线调节PID控制器的3个参数. 而模糊控制算法主要有模糊化、模糊推理和解模糊3部分组成^[11].

结合婴儿辐射采暖台的实际工作情况, 取温度偏差 E 的基本论域为 $[-30, 30]$, 模糊论域为 $[-6, 6]$, 偏差变化率 EC 的基本论域和模糊论域都为 $[-6, 6]$, 比例系数变化量 Δk_p , 积分系数变化量 Δk_i 和微分系数变化量 Δk_d 的基本论域分别为 $[-90, 90]$ 、 $[-1, 1]$ 、 $[-80, 80]$, 对应的模糊论域均取为 $[-6, 6]$. 所有变量的模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 其中每个元素分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 模糊算法的输入输出隶属函数均采用三角隶属函数, 解模糊方法采用重心法^[12].

结合专家经验和辐射采暖台的升温特性, 经多次仿真调试得到模糊规则表(表2).

表2 模糊控制规则

偏差	偏差变化率						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PM	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NM/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/PS	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/ZO	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PB	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

3 仿真分析

利用 Matlab 软件,分别设计普通增量式 PID 算法、VFPID 和 P-VFPID. 结合保暖台的实际工作情况,仿真调试,最终得到 $k_p=80$, $k_i=0.08$, $k_d=50$. 为了充分验证 P-VFPID 的自适应能力,将其初始参数选为 $k_{p0}=80$, $k_{i0}=0.08$, $k_{d0}=50$.

3.1 动态性能及抗干扰能力分析

仿真时考虑到实际环境因素,将初始温度设定为 22°C ,将目标温度设定为 37°C ,仿真时间 $10\,000\text{ s}$,采样时间 1 s . 为了模拟外界环境的变化,在 $5\,000\text{ s}$ 时给 PID 算法和 VFPID 加入相同的干扰. 增量式 PID 算法、VFPID 及 P-VFPID 响应曲线如图 3 所示.

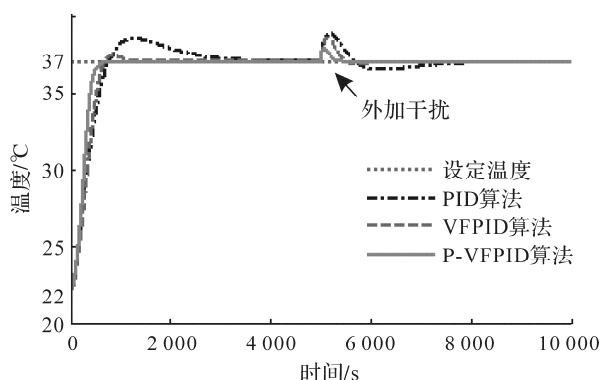


图3 不同控制方法的响应曲线

3 种不同控制方法的各项参数对比见表 3. 结合图 3, 经比较可以发现, P-VFPID 控制相比于 VFPID 和普通增量式 PID 控制, 调节时间显著缩短, 实现零超调, 零稳态误差. 当系统稳定时, 对于相同的外加扰动, P-VFPID 的扰动峰值较小, 且恢复稳态时所用的时间较短.

表3 偏差区间伸缩因子变化

控制方法	性能参数				
	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s	稳态误差/ $^{\circ}\text{C}$	扰动峰值/ $^{\circ}\text{C}$
PID	771	4.1	4 200	0.01	38.86
VFPID	700	1.6	1 800	0	38.23
P-VFPID	850	0	850	0	37.88

3.2 被控对象改变后性能分析

考虑到婴儿辐射保暖台工作是在开放环境中, 外界环境容易改变, 且辐射罩在不同的加热功率

时都可能导致控制系统参数发生变化. 根据实际经验, 在式(4)基础上, 将传递函数改为:

$$G_2(s) = \frac{0.03}{285000s^2 + 3000s + 1} e^{-80s},$$

和

$$G_3(s) = \frac{0.15}{300800s^2 + 1500s + 1} e^{-80s},$$

依旧采用上述 3 种控制方法, 相应的控制条件同 3.1 节, 控制效果如图 4 和图 5 所示.

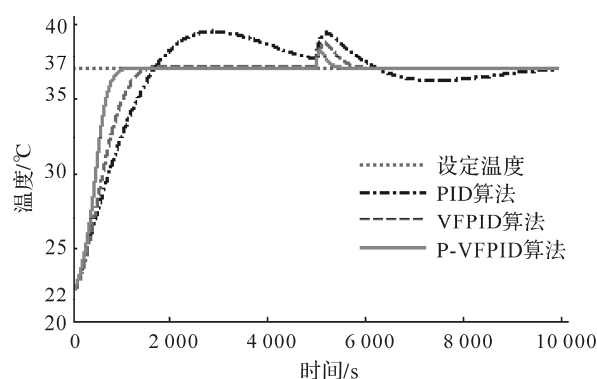


图4 传递函数为 $G_2(s)$ 时的响应曲线

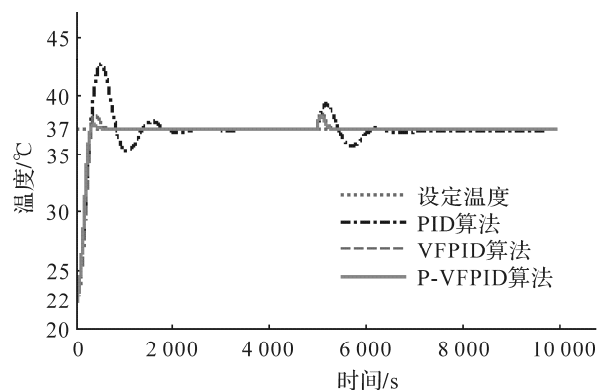


图5 传递函数为 $G_3(s)$ 时的响应曲线

比较图 4 和图 5 可发现, 当控制系统参数在适当范围内变化时, 普通增量式 PID 控制的响应曲线随传递函数的变化较敏感, 调节能力差, VFPID 有较大的提升, 但仍有一定的超调. 改进的 P-VFPID 则具有较强的自适应能力, 应对外来干扰时也更容易恢复稳定.

4 结论

提出了一种多模态 P-VFPID, 通过模型建立以及仿真分析发现, P-VFPID 无论是相较于普通增量式 PID 还是 VFPID, 其控制性能更佳. 主要表现在

调节时间短,几乎实现零超调,稳态情况下无误差,应对相同程度的外界干扰时也能迅速响应并快速恢复到稳态值。当被控对象参数改变时,P-VFPID 也表现出优异的自适应能力,故此算法对于婴儿辐射保暖台温控系统具有较大的研究价值。

参考文献:

- [1] 孙凯,李元科.电阻炉温度控制系统[J].传感器与微系统,2003,22(2):50-52.
- [2] Lin L, Wang H J. Adaptive fuzzy PID control method based on identification structure[J]. International Journal of Systems & Control, 2006(1):15-21.
- [3] 张瑜. 婴儿培养箱智能监控系统研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [4] 于越,宋文龙,王琢. 变论域模糊 PID 在微碳汇测量系统中的仿真研究[J]. 森林工程, 2017, 33(4):44-48.
- [5] 陈果,刘金根,韩世鹏. 基于导管机器人的变论域模糊 PID 控制研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 35(2):471-474.
- [6] 赵希梅,任成一,刘浩,等. 微创手术导管机器人系统变论域模糊 PID 控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(1):357-360.
- [7] 万春红,束洪春,张东宁,等. 水泥分解炉温度控制过程的阶跃响应建模与仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(12):1420-1424.
- [8] Sun J, Zhang D H, Xu L. Smith prediction monitor AGC system based on fuzzy self-tuning PID control[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 17(2):22-26.
- [9] 郭海刚,李洪兴,胡凯. 一类变论域自适应模糊控制器[J]. 模糊系统与数学, 2011, 25(6):1-9.
- [10] 郭海刚. 变论域自适应模糊控制的几种新方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [11] 王海青,姬长英,刘同召,等. 模糊自整定 PID 温度控制系统的建模与仿真[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 233-235.
- [12] Liu F C, Liang L H, Gao J J. Fuzzy PID control of space manipulator for both ground alignment and space applications[J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11(4):353-360.

Study on temperature control system of infant radiant warmer based on proportion-variable universe fuzzy adaptive PID

JIN Ai-guo¹, YANG Hai-shi², WU Hai-xiao², WANG Qi², HU Yan-hai^{1*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo David Medical Device Co. Ltd., Ningbo 315712, China)

Abstract: The multi-modal proportion-variable fuzzy adaptive PID (P-VFPID) algorithm is proposed in this paper based on fuzzy PID. First of all, the step response method and Matlab system identification toolbox are used to obtain the transfer function model of the radiant thermal insulation bed. Secondly, the interval determined by the expert experience is improved based on the deviation grading method, and the three error intervals of the input and output scaling factors are obtained respectively. The P-VFPID is formed by combining the fuzzy algorithm and the proportional control. Finally, Matlab is used to conduct simulation. The results show that the P-VFPID has features of short adjustment time, almost zero overshoot, no steady-state error, strong anti-interference ability compared with the ordinary PID algorithm and the VFPID. It also has a good adaptive ability to cope with the temperature control system requirement of infant radiant warmer.

Key words: infant radiant warmer; VFPID; P-VFPID; scaling factors; variable universe

(责任编辑 史小丽)