

模糊神经元 PID 在培养箱温控系统中的应用

魏 威¹, 柯沪琦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: 针对传统 PID 控制算法难以实现对非线性、慢时变以及大惯性的婴儿培养箱温度控制系统的高精度控制问题, 设计了一种模糊神经元 PID 控制算法. 采用模糊算法在线调整神经元 PID 控制算法的比例系数、比例学习效率、积分学习效率和微分学习效率, 并结合机理分析和阶跃响应法构建婴儿培养箱温度控制系统数学模型, 运用 MATLAB 进行控制仿真. 实验表明, 该控制算法具有控制精度高、稳定性好以及响应速度快的特点.

关键词: 婴儿培养箱; 温度控制系统; 模糊神经元; PID 控制算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 02-0072-04

婴儿培养箱类似母体子宫, 可以为婴儿制造一个空气温湿度适宜的优良环境, 它的安全可靠关乎早产儿、病患儿以及新生儿的健康成长. 如今市场上使用的婴儿培养箱普遍采用传统 PID 算法, 但这种控制算法运用在温度控制系统这种非线性、慢时变以及大惯性的系统中, 其控制效果不是很理想, 已越来越难以满足婴儿培养箱对于箱内温度控制精度的高要求. 相比之下, 具有自学习能力和自适应能力的神经元 PID 控制算法则更加适合培养箱温度控制系统的高精度控制^[1]. 目前已有一些相关研究, 例如文献[1]在电阻炉温控中提出单神经元 PID 算法, 但由于算法中的各参数都无法自调整, 使得系统的控制效果不够理想. 文献[2]中提出模糊神经元 PID 控制算法, 通过额外引入 3 个参数来动态调整 PID 算法中 3 个参数的比例系数, 实际上就是调整模糊神经元 PID 算法中的比例学习效率、积分学习效率和微分学习效率参数, 一定程度上提高了控制系统的稳定性, 但是并没有实现对模糊神经元 PID 控制的比例系数 K 的动态调整, 也就导致系统响应特性受到影响, 而且额外引入参数使得算法的未知参数变多, 从而使问题变得更复杂. 文献[3]则是直接调整算法的 3 个学习效率, 但是同样没有解决系统快速响应的问题. 文

献[4-5]则只是动态调整算法的比例系数, 并没有调整算法的学习效率, 虽然提高了系统快速响应性, 但是在一定程度上影响了系统的稳定性.

为此, 本文采用模糊算法直接对神经元 PID 控制算法的比例系数、比例学习效率、积分学习效率和微分学习效率 4 个参数进行在线自调整, 不但简化了控制算法, 而且进一步提高了系统的响应特性和稳定性, 并将这种算法运用到通过数学建模所得的二阶惯性滞后培养箱温度控制系统, 相比于前面文献中所假设的一阶系统, 算法的仿真控制效果更加具有真实性.

1 模糊神经元 PID 控制器的设计

1.1 神经元 PID 控制算法

神经元具有自学习以及自适应能力, 将单个神经元和增量式 PID 算法相结合, 便可利用神经元的这种能力根据实际情况在线调整控制器的参数, 从而更好地调节系统控制器的输出, 使得系统的适应能力大大提高, 鲁棒性也进一步提升^[2].

神经元的学习算法采用有监督的 Hebb 学习规则, 从而在线调整神经元的连接权值, 但在实际应用中由于 PID 参数的在线调整能力主要是与 $e(k)$ 和 $e(k) - e(k-1)$ 有关, 因此可以将权值学习算法适

收稿日期: 2016-03-16.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51408323); 宁波市重大科技专项(2015C110033).

第一作者: 魏威(1993-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械电子. E-mail: 1481171408@qq.com

*通信作者: 胡燕海(1966-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 机电产品研发. E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn

当修改, 得到改进的神经元 PID 控制算法^[2]:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 W'_i(k) X_i(k), \\ W'_i(k) = W_i(k) / \sum_{i=1}^3 |W_i(k)|, \\ W_i(k) = W_i(k-1) + \eta_i e(k) u(k) [2e(k) - e(k-1)], \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u(k)$ 为第 k 次采样输出; K 为神经元比例系数; $e(k)$ 为第 k 次采样的偏差; $i=1,2,3$ 时, 可得 $W_1(k), W_2(k), W_3(k)$ 分别为第 $k-1$ 次采样的比例、积分、微分权值系数. $X_1(k) = e(k) - e(k-1), X_2(k) = e(k), X_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$. $\eta_1 = \eta_p, \eta_2 = \eta_i, \eta_3 = \eta_d$ 为比例、积分、微分的学习效率.

算法中比例系数 K 值的选取对于系统的影响较大, K 值越大, 系统的响应则会越快, 而过大则会导致超调量过大使得系统不稳定; 相反, K 值越小, 则系统的响应变慢. 算法中权值系数的调整也非常重要, 它取决于各个权值系数的学习效率. 系统刚开始调整时, 应当使得 η_p 取较大值, η_i 和 η_d 取较小值; 当系统输出逐渐逼近给定输入时, 可以使 η_p 逐渐减小, 与此同时增大 η_i 和 η_d ; 系统超调过大时, 则应减小 η_p 和 η_i ; 系统上升时间较长, 则应增大 η_p 和 η_i , 减小 η_d ^[3].

在传统的神经元 PID 控制算法中, 这些系数都通过大量的仿真和实验所得, 往往在系统的控制过程中保持不变, 这样便会导致算法的控制效果有所损失, 难以满足那些高精度控制系统的更高要求^[4]. 因此在下文中, 通过模糊算法来在线调整神经元 PID 控制算法的比例系数 K 、比例学习效率 η_p 、积分学习效率 η_i 和微分学习效率 η_d , 从而来优化该控制算法.

1.2 模糊控制算法

模糊控制算法往往是根据人的实际操作经验

和有关专家的知识建立系统的模糊控制结构. 本文主要是根据系统输出的偏差 E 以及偏差的变化率 EC , 通过模糊控制算法的模糊推理得到神经元 PID 控制算法的 K 、 η_p 、 η_i 和 η_d . 输入变量 E 和 EC 的模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 其中各元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中和正大, 结合培养箱温控系统特性和实际情况, 取 E 的实际变化范围为 $[-30, 30]$, 模糊论域为 $[-6, 6]$, 比例因子为 0.2, EC 的实际变化范围和模糊论域均为 $[-6, 6]$, 输出变量 K 、 η_p 、 η_i 和 η_d 的模糊子集为 {Z, S, M, B}, 其中各元素分别代表零、小、中和大, K 的实际变化范围和模糊论域均为 $[0, 30]$, η_p 的实际变化范围和模糊论域均为 $[0, 480]$, η_i 的实际变化范围和模糊论域均为 $[0, 6]$, η_d 的实际变化范围和模糊论域均为 $[0, 120]$. 模糊算法的输入输出隶属函数均采用三角隶属函数, 其中系统输入量偏差 E 的隶属函数曲线如图 1 所示. 模糊推理所得的输出变量采用重心法来进行反模糊化, 从而得到最终的输出量^[6].

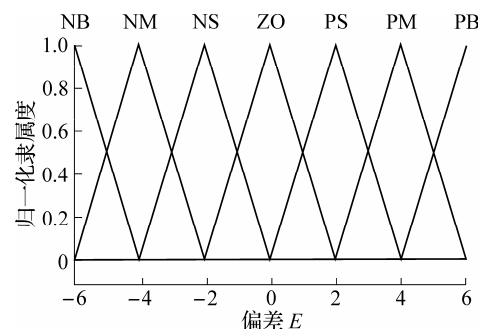


图1 偏差的隶属函数曲线

根据前面所介绍的神经元 PID 控制算法各系数的调整规则, 可以制定出 K 、 η_p 、 η_i 和 η_d 的模糊控制规则表(表 1).

表1 K 、 η_p 、 η_i 、 η_d 模糊控制规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B/B/S/B	M/M/S/M	M/M/S/M	B/M/S/B	B/S/S/S	B/S/S/S	B/Z/Z/Z
NM	B/B/S/B	M/M/S/M	M/M/S/M	M/M/M/S	M/S/M/S	M/Z/Z/Z	B/S/M/S
NS	B/M/M/M	S/M/M/M	S/M/M/M	M/SM/S	M/Z/Z/Z	M/S/M/S	M/S/M/S
ZO	M/M/S/M	S/S/M/S	S/S/M/S	Z/Z/Z/Z	S/S/M/S	S/S/M/M	M/M/S/M
PS	M/S/M/S	S/S/M/S	M/Z/Z/Z	M/S/B/S	S/S/S/M	S/M/S/B	B/B/M/B
PM	B/S/M/S	M/Z/Z/Z	M/S/M/S	M/S/B/S	M/M/M/S	M/M/M/M	B/B/M/B
PB	S/Z/Z/Z	M/S/M/S	M/S/M/S	B/M/B/S	B/M/M/M	M/M/S/M	B/B/S/B

将模糊推理所得的4个参数代入神经元PID控制算法,便可得到模糊神经元PID控制算法,其结构如图2所示.图2中, $r(k)$ 和 $y(k)$ 分别代表被控对象的期望输出和实际输出.

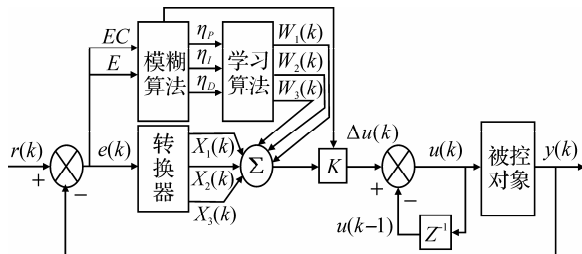


图2 模糊神经元PID控制算法结构

2 婴儿培养箱温度系统模型的建立

首先采用机理建模方法,根据能量守恒定律,在不考虑系统的时间延迟以及将系统看成单容的情况下,构建婴儿培养箱温度系统的数学模型:

$$CdT_1/dt = Q_1 - Q_2, \quad (2)$$

式中, C 为箱内空气的热容量; T_1 为箱内空气的温度; Q_1 为单位时间箱内加热量; Q_2 为单位时间箱体向外传递热量.

$$Q_2 = pA(T_1 - T_0), \quad (3)$$

式中, p 为箱体热量传递系数; A 为箱体向外传递热量的表面积; T_0 为箱外空气的温度.

可得该模型的增量微分方程^[7]:

$$Cd\Delta T_1/dt + pA\Delta T_1 = \Delta Q_1 + pA\Delta T_0. \quad (4)$$

假设箱外空气温度不变,则 $\Delta T_0 = 0$.

对式(4)进行拉氏变换,可得:

$$G(s) = \frac{T_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{1/(pA)}{Cs/(pA) + 1} = \frac{B}{Ts + 1}, \quad (5)$$

式中, B 为放大系数; T 为时间常数; s 为拉普拉斯算子.

(5)式为简化后的婴儿培养箱温度系统模型.然而实际工作中,培养箱是个多容并具有时间延迟的控制对象,考虑到这些因素,因此取婴儿培养箱温度系统理想模型为一个二阶滞后传递函数^[7]:

$$G(S) = Be^{-\tau s} / ((T_1 s + 1)(T_2 s + 1)), \quad (6)$$

式中, T_1 和 T_2 为时间常数; τ 为滞后时间; e 为欧拉数.

在此基础上,采用阶跃响应法来确定模型的参数.在婴儿培养箱系统温度稳定的情况下(室温24℃,箱内温度32℃,湿度50%RH),使系统的加

热比例增加20%(即 $\Delta Q = 0.2$),测量系统的温度变化,系统温度阶跃响应曲线如图3所示.

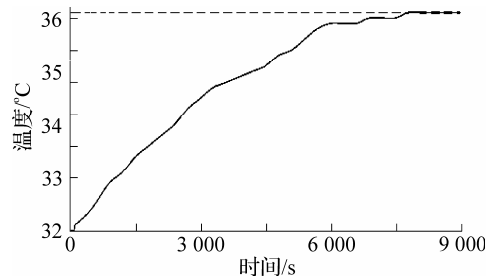


图3 系统温度阶跃响应曲线

由二阶系统的阶跃响应两点法可知^[8]:

$$\begin{cases} B = \Delta T / \Delta Q, \\ y^*(t) = (y(t) - 32) / \Delta T, \\ y^*(t) = 1 - T_1 e^{-t/T_1} / (T_1 - T_2) + T_2 e^{-t/T_2} / (T_1 - T_2), \end{cases} \quad (7)$$

式中, ΔT 为系统温度的增量; $y(t)$ 为系统温度; $y^*(t)$ 为 $y(t)$ 的无量纲形式; t 为时间.

由图3可知, $\Delta T = 4.1^\circ\text{C}$,可得 $B = 20.5$.系统温度大概在120s后才有所变化,可得 $\tau = 120\text{ s}$.当 $y^*(t_1) = 0.4$ 时, $y(t) = 33.6^\circ\text{C}$, $t_1 = 1650\text{ s}$.当 $y^*(t_2) = 0.8$ 时, $y(t) = 35.2^\circ\text{C}$, $t_2 = 4440\text{ s}$.因为 $t_1/t_2 \approx 0.37$,所以可得^[8]:

$$\begin{cases} T_1 + T_2 \approx (t_1 + t_2) / 2.16 \approx 2819, \\ T_1 T_2 \approx (T_1 + T_2)(1.74t_1/t_2 - 0.55) \approx 281. \end{cases} \quad (8)$$

因此根据(6)~(8)式可得:

$$G(s) = 20.5 / (281s^2 + 2819s + 1) \times e^{-120s}. \quad (9)$$

3 仿真实验

由理论分析和MATLAB仿真调试可得模糊神经元PID控制算法的各参数,实验中取比例、积分和微分所对应权值系数的初值分别为10、5、5.仿真中,令培养箱初始温度为20℃,每隔30s采样1次,得到如图4所示的系统温度响应曲线.从图4可见,模糊神经元PID控制系统几乎没有超调量,温度上升速度比较快,调节时间较短,系统很快趋于稳定状态.而在稳定时加入扰动量,系统很快就趋于稳定,可见该算法的抗干扰能力较强.

为对比设计的控制算法优越性,图5为采用传统增量式PID控制的MATLAB仿真图.从图5可见,增量式PID控制虽然温度上升速度相对较快,但仍存在较大超调量(0.5℃);系统的稳定性也不够理想,达到设定温度后也一直在波动;在系统相

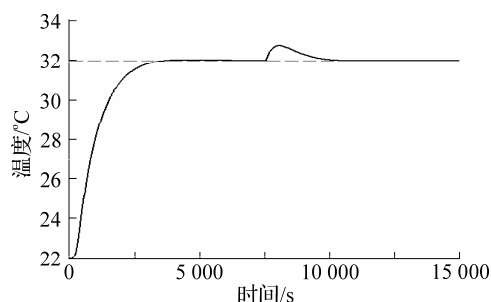


图4 模糊神经元 PID 控制响应曲线

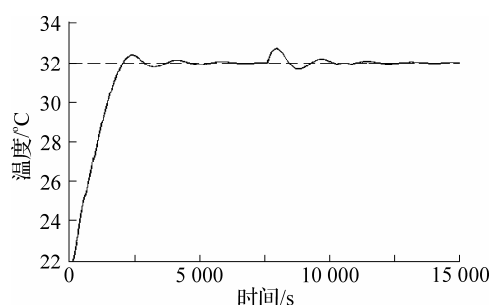


图5 增量式 PID 控制响应曲线

对稳定的时候加入干扰量时, 增量式 PID 控制系统的温度也是一直在波动。

4 结论

通过仿真实验可知, 本文针对婴儿培养箱温度控制系统所设计的模糊神经元 PID 控制算法相比于传统增量式 PID 控制算法, 其自适应能力和抗

干扰能力更好, 更重要的是可进行无超调量, 调节时间短, 且达到稳定更快速, 把此种算法运用到培养箱温控系统可进一步提高系统的控制精度和稳定性。

参考文献:

- [1] 孙健. 基于单神经元 PID 电阻炉温智能控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [2] 陈磊, 林明. 模糊单神经元 PID 在车间温度控制系统中的应用[J]. 机床与液压, 2013, 41(21):97-100.
- [3] 吕楠楠, 曾荣周, 肖珊. 基于单神经元模糊自适应 PID 控制的加热炉温度控制器设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(23):161-164.
- [4] 王振臣, 赵莎, 张聪, 等. 基于改进单神经元 PID 控制的主动悬架系统研究[J]. 模糊系统与数学, 2014, 28(3): 89-96.
- [5] 金林骏, 方建安, 潘磊宁. 单神经元 PID 模糊控制在水位系统中的建模与仿真[J]. 电子设计工程, 2015, 23(13):90-92.
- [6] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8):81-87.
- [7] 张瑜. 婴儿培养箱智能监控系统研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [8] 万春红, 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.

Application of fuzzy neuron PID in temperature control system of incubator

WEI Wei¹, KE Hu-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: For the temperature control system of the infant incubator, the problems with nonlinearity, slow time-varying and large inertia are difficult to tackle when a traditional PID control algorithm is adopted, which makes the precision temperature control hard to achieve. In this paper, a fuzzy neural PID control algorithm is designed. The fuzzy algorithm is used to adjust the proportion coefficient, the proportion learning efficiency, the integral learning efficiency and the differential learning efficiency of the neural PID control algorithm. The model of the temperature control system of infant incubator is constructed on the basis of the mechanism analysis and the step response method, and is simulated with MATLAB. The experimental results suggest that the proposed system features higher precision, better stability and faster response.

Key words: infant incubator; temperature control system; fuzzy neuron; PID control algorithm

(责任编辑 章践立)