

空调系统温度的DRNN神经模糊PID控制器设计

在空调系统温度的控制领域，具有自主学习和自适应优势的神经网络控制成为了未来发展的方向。提出了一种DRNN神经模糊PID控制器，利用DRNN网络的优点，使系统具有更优的动、静态性能。建立了DRNN神经模糊PID控制器的模型，并对PID控制、RBF神经模糊PID控制和DRNN神经模糊PID控制3种不同控制策略的控制效果进行了仿真对比分析。仿真结果表明，采用DRNN神经模糊PID控制器的系统具有响应时间更短和超调量更小等优点。

何天磊¹ 朱其新² 陆 烨¹ 朱永红³ / 1. 苏州科技大学环境科学与工程学院
2. 苏州科技大学机械工程学院 3. 景德镇陶瓷大学机电工程学院

0 引言

近年来，空调系统的节能问题受到越来越多的关注。空调系统是个复杂的系统，可根据所设计的控制策略控制送风风机的转速、冷热水阀门的开度大小等措施来达到设定的空气状态^[1]。在保证生产工艺的要求前提下，使空调系统运行合理、可靠和能耗低，使控制效果达到最优。

空调系统温度控制中应用最广泛的是PID控制器，PID控制系统的控制品质的优劣取决于PID控制器的控制参数^[2]。PID控制器的控制参数常由整定得到，传统的PID控制器参数整定方法有ZN公式法、临界比例度法、衰减曲线法和动态特性法等^[3-5]。在空调系统温度的控制中，使用传统PID控制器受环境干扰的影响大，达到期望温度的时间会较长，而

且参数不能在线调整^[5]。为了克服传统PID控制在空调系统温度控制中的不足，专家系统控制和模糊控制等控制策略相继被引入到空调系统温度的控制中。这些控制策略的优势是响应时间比传统PID控制器快，能够较快速地达到人们所期望的温度，但是这些控制器依旧没有自主学习能力，并带有一定的主观性^[6-9]。针对这些不足，又有学者将模糊PID控制器应用于空调系统的温度控制中^[10-12]。模糊PID控制器具有较好的响应特性且超调较小，但是这类控制器只是在一定程度上解决了环境因素对空调系统温度的影响问题，如果干扰过大空调系统依然会出现不稳定的情况。后来有学者将粒子群算法用于PID控制器的参数整定^[13-15]，虽然优化效果不错，但工程实用性差，将其应用于空调系统中还有一定困难。空调系统温度的控制领域，最近的研究热点是将神经网络用于PID控制器参数的在线自动整定，相比于模糊PID控制器，神经网络PID控制器具有更好的控制效果^[16]。

在空调系统温度控制的研究中，神经模糊PID控制的设计和研究的趋势。目前已有的神经模糊PID控制器有两种：一种利用BP网络；另一种是利用RBF网络。DRNN神经网络是一种具有反馈的动态网络，通过存储和利用反馈的系统运行状态信号使其具备映射动态特征的功能，从而更具有适应时变的能力。目前将DRNN神经网络应用于模糊PID控制器的研究尚未见报道。本文设



何天磊/工程师

关键词/Keywords

空调系统 ·
温度控制 ·
对角回归型神经网络 ·
DRNN神经模糊PID控制 ·

国家自然科学基金 (51375323, 61563022), 江西省自然科学基金重大项目 (20152ACB20009)、江苏省建筑智慧节能重点实验室建设基金、江苏省“青蓝工程”和江苏省“六大人才高峰”资助项目。

计的DRNN神经模糊PID控制器，结合了DRNN神经网络和模糊PID控制器两者的优点。仿真结果证明，本文设计的DRNN神经模糊PID控制器比普通神经模糊PID控制器具有更好的控制效果。

1 空调系统模型

空调系统的实际控制对象多采用高阶的微分方程加以描述。但在实际应用中，为了方便分析，在满足一定控制准确度的情况下，通常采用一个低阶的模型来描述被控对象的动态特性，考虑到温度对象的滞后性，空调系统的简化模型可表示为^[17]

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

式中， T 为被控对象的时间常数； k 为放大系数； τ 为温度对象的延迟时间。

2 DRNN神经模糊PID控制器的设计

DRNN神经模糊PID控制器的基本思想是以温度误差 e 和误差变化率 ec 作为DRNN神经模糊PID控制器的输入，找出PID控制器的三个控制参数之间的模糊关系，在线实时不断通过检测 e 和 ec ，利用DRNN神经网络自主学习和自适应能力，实时对PID控制器的三个控制参数进行修改，满足不同时刻的 e 和 ec 对PID参数的不同要求，从而使被控对象具有良好的动态和静态性能。DRNN神经模糊PID控制器的结构图如图1所示。

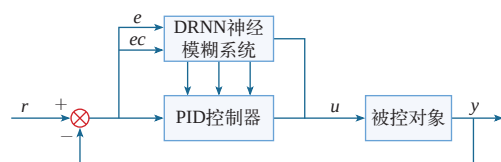


图1 DRNN神经模糊PID控制器

3 DRNN神经模糊系统结构

DRNN神经模糊系统是一种四层前向网络，第三层为回归层。其两个输入量分别为误差 e 和误差变化率 ec ，输出量分别为PID的三个参数 K_p 、 K_i 和 K_d ；第二、三层利用模糊规则对参数的修改和调

整。 W_d 为第三层回归的权值， W_o 为第三层和第四层的权值^[18]。DRNN神经模糊系统结构图如图2所示。

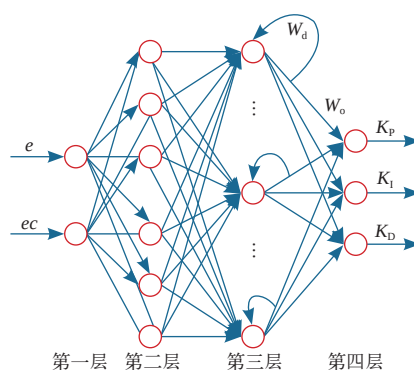


图2 DRNN神经模糊系统结构图

DRNN神经模糊系统中信号传播及各层的功能表示如下。

3.1 第一层：输入层

该层节点数 $i=2$ ，该层各个节点直接与输入量的各个分量连接，目的是将输入变量 e 和 ec 传到下一层。对该层的输入用 x_i 表示，输出用 $f_1(i)$ 表示，所以第一层公式为

$$f_1(i) = x_i \quad (2)$$

3.2 第二层：模糊化层

该层节点数 $j=7$ ，每个节点表示一个模糊语言值，它的作用是把上层的输入变成模糊语言值，计算每个输入量属于模糊语言值的隶属度函数，采用高斯型函数作为隶属度函数。对该层的输入用 $f_1(i)$ 表示，输出用 $f_2(i, j)$ 表示， c_{ij} 和 b_{ij} 分别是第 i 个输入变量第 j 个模糊集合的隶属函数的均值和标准差，第二层的计算公式为

$$f_2(i, j) = \exp \left\{ -\frac{[f_1(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2} \right\} \quad (3)$$

3.3 第三层：模糊推理层

该层通过与模糊化层的连接来完成模糊规则的匹配，各个节点之间实现模糊运算，即通过各个模糊节点的组合得到相应的点火强度。该层节点数 $j=49$ ，每个节点 j 的输出含有前一层节点所有信号的乘积。另外这一层也是神经网络的回归层，所以这层的输出还包含上一次输出并修正后的信号，关于修正的系数1.7和0.3是经过反复试验

得出。该层的输出用 $f_3(k)$ 表示， $f_3(k)$ 表示第 k 次的运行结果，即

$$f_3(k) = \left[1.7 \times \prod_{j=1}^{49} f_2(i, j) + 0.3 \times W_d f_3(k-1) \right] / 2 \quad (4)$$

式中， W_d 为第三层权值向量。

3.4 第四层：输出层

输出层节点数 $j=3$ ，输出就是PID控制器的三个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 组成的一个矩阵用 f_4 表示， W_o 为输出层节点与第三层各节点的连接权矩阵。 W_o 是一个 3×49 的矩阵。 W_o 中第一、二和三行分别对应有关参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的权值，所以下面用 W_{ok_i} 表示 W_o 中第一行所有权值，以此类推，所以这层公式为

$$f_4 = W_o f_3 \quad (5)$$

其实这层输出层输出的就是PID控制器的三个控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d ，所以这三个参数的输出公式如下

$$K_p = \sum_{j=1}^{49} W_o(1, j) f_3(j) = \sum_{j=1}^{49} W_{ok_p}(j) f_3(j) \quad (6)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^{49} W_o(2, j) f_3(j) = \sum_{j=1}^{49} W_{ok_i}(j) f_3(j) \quad (7)$$

$$K_d = \sum_{j=1}^{49} W_o(3, j) f_3(j) = \sum_{j=1}^{49} W_{ok_d}(j) f_3(j) \quad (8)$$

上面一系列公式就是整个DRNN神经模糊PID控制器的算法。所谓神经网络的自主学习能力，就是在整个控制器的算法公式已经出来后，可以实时对系统的权值进行修正，接下来介绍修正权值的算法。

首先取性能指标函数

$$E(k) = \frac{1}{2} \times [r(k) - y(k)]^2 = \frac{1}{2} \times [e(k)]^2 \quad (9)$$

式中， $r(k)$ 为系统设定的温度值； $y(k)$ 为系统第 k 次输出的温度值。

采用梯度下降法来调整权值，首先对输出层的权值 W_o 通过如下方式来调整

$$\begin{aligned} \Delta W_o(k) &= -\frac{\partial E}{\partial W_o(k)} = -\frac{\partial E}{\partial y(k)} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] \frac{\partial U(k)}{\partial f_4(k)} \frac{\partial f_4(k)}{\partial W_o(k)} \\ &= e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] \frac{\partial U(k)}{\partial f_4(k)} f_3(k) \end{aligned} \quad (10)$$

式中， $\Delta W_o(k)$ 为权值在系统运行到第 k 次时的变化值。因为输出层的权值 W_o 是一个 3×49 的矩阵，下面三个公式就是具体的输出层关于PID控制器的三个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 权值调整公式。

$$\Delta W_{ok_p}(k) = e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] [e(k) - e(k-1)] f_3(k) \quad (11)$$

$$\Delta W_{ok_i}(k) = e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] [e(k)] f_3(k) \quad (12)$$

$$\Delta W_{ok_d}(k) = e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] [e(k) + e(k-2) - 2e(k-1)] f_3(k) \quad (13)$$

已经有了 $\Delta W_o(k)$ 的算法，则输出层的权值 W_o 学习算法为

$$W_o(k) = W_o(k-1) + \eta_o \Delta W_o(k) + \alpha [W_o(k-1) - W_o(k-2)] \quad (14)$$

式中， η_o 为 W_o 的学习速率； α 为动量因子； $\eta_o \in [0, 1]$ ， $\alpha \in [0, 1]$ 。

类似于输出层权值的修正算法，第三层的权值 W_d 也是通过梯度下降法来调整

$$\begin{aligned} \Delta W_d(k) &= -\frac{\partial E}{\partial W_d(k)} = -\frac{\partial E}{\partial y(k)} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] \frac{\partial U(k)}{\partial f_4(k)} \frac{\partial f_4(k)}{\partial W_d(k)} \\ &= e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] \frac{\partial U(k)}{\partial f_4(k)} \cdot W_o(k) \cdot f_3(k-1) \end{aligned} \quad (15)$$

式中， $\Delta W_d(k)$ 为权值在系统运行到第 k 次时的变化值。

下面三个公式就是具体的第三层关于PID控制器的三个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 权值调整公式。

$$\Delta W_{dk_p}(k) = e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] [e(k) - e(k-1)] W_o(k) f_3(k-1) \quad (16)$$

$$\Delta W_{dk_i}(k) = e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] [e(k)] W_o(k) f_3(k-1) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{dk_d}(k) &= e(k) \text{sign} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial U(k)} \right] [e(k) + e(k-2) - \\ &\quad 2e(k-1)] W_o(k) f_3(k-1) \end{aligned} \quad (18)$$

有了 $\Delta W_d(k)$ 的算法，权值 W_d 学习算法可表示为

$$W_d(k) = W_d(k-1) + \eta_d \Delta W_d(k) + \alpha [W_d(k-1) - W_d(k-2)] \quad (19)$$

式中， η_d 为 W_d 的学习速率； α 为动量因子； $\eta_d \in$

$[0,1]$; $\alpha \in [0,1]$ 。

通过以上算法可以完成权值的自我修正。接下来就剩隶属函数参数的修正和调整,隶属函数参数调整的方法和权值相同

$$\Delta C_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} \delta^2 \frac{2[x(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2} \quad (20)$$

$$\Delta b_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial b_{ij}} \delta^2 \frac{[x(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^3} \quad (21)$$

$$\delta^2 = \frac{\partial E}{\partial \left\{ -\frac{[f_1(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2} \right\}} = -e(k)W_o(k)f_3(k) \quad (22)$$

$$C_{ij}(k) = C_{ij}(k-1) + \Delta C_{ij}(k) + \alpha[C_{ij}(k-1) - C_{ij}(k-2)] \quad (23)$$

$$b_{ij}(k) = b_{ij}(k-1) + \Delta b_{ij}(k) + \alpha[b_{ij}(k-1) - b_{ij}(k-2)] \quad (24)$$

式中, η 为学习速率; α 为动量因子; $\eta_o \in [0,1]$; $\alpha \in [0,1]$ 。

正是由于系统中这些参数和权值可以实现自我的调整和修正,使得系统可以实现在线自动调整,从而增加了系统的抗干扰的能力。

本文采用增量式PID控制器,增量式PID控制器的算法为

$$U(k) = U(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_p[e(k)] + K_p[e(k) + e(k-1) - 2e(k-2)] \quad (25)$$

式中, $U(k)$ 为PID控制第 k 次输出值; $e(k)$ 为第 k 次温度误差值。

4 系统仿真

为了验证DRNN神经模糊PID控制器的效果,用Matlab对该算法进行模拟仿真^[19]。利用公式(1),本文取时间常数为 $T=200$,延迟时间取 $\tau=10$,所以传递函数模型为

$$G(s) = \frac{1}{200s+1} e^{-10s} \quad (26)$$

该控制器输入为温差 e 和温差变化率 ec ,输出为PID三个参数,最后利用PID控制器进行控制输出,利用DRNN神经网络反馈的优势,达到最优输出结果。图4、图5和图6是理想条件下传统PID, RBF神经模糊PID和DRNN神经模糊PID控制的空调房间温度的仿真曲线。仿真初始值设为 10°C ,采样周期为 5 s ,仿真时间为 500 s 。传统PID的比例、

积分和微分三个参数是按Ziegler-Nichols整定。由图4~图6可以明显看出应用DRNN神经网络模糊PID控制器的系统超调相比应用传统PID控制器和普通神经模糊PID控制器的系统超调都小很多,而且DRNN神经模糊PID经过 100 s 就可以将温度稳定在设定的 26°C ,所以DRNN神经网络模糊PID控制器响应速度更快,到达稳态所需时间更短,系统超调较小。因此,本文提出的DRNN神经模糊

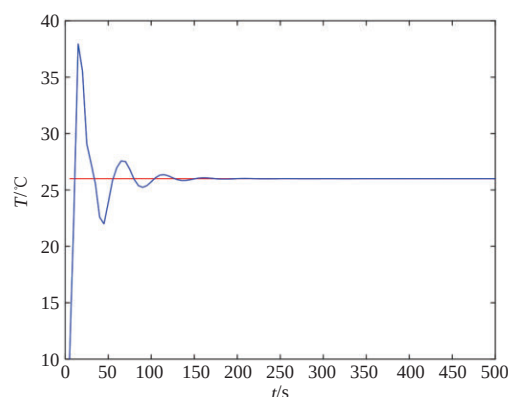


图4 传统PID控制器仿真图

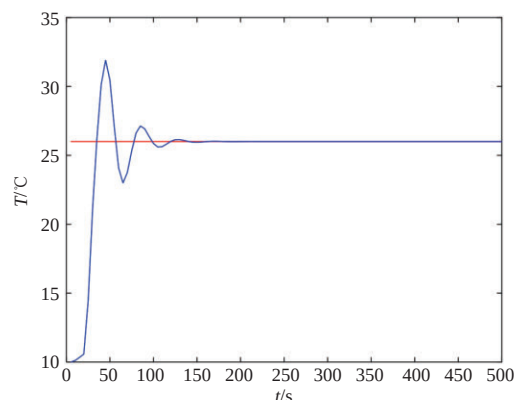


图5 RBF神经模糊PID控制器仿真图

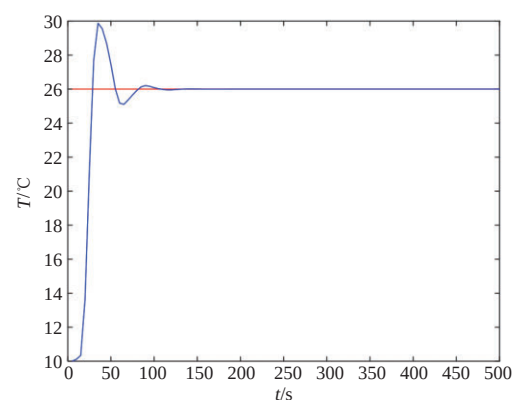


图6 DRNN神经模糊PID控制器仿真图

PID控制器自适应能力强,控制系统的响应速率和准确性能明显优于传统PID控制器和普通神经模糊PID控制器。

5 结束语

本文提出的DRNN神经模糊PID控制器,结合了DRNN神经网络和模糊PID控制器两者的优点。仿真结果证明,DRNN神经模糊PID控制器相对于传统PID控制器和普通神经模糊PID可以明显提高空调系统运行的响应速率。如何将小脑模型神经网络等其他高级神经网络应用于空调系统温度控制中有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 付强,胡振杰,等.基于实测的温度湿度独立控制空调系统节能效果评估[J].暖通空调,2014,44(6):107-111.
- [2] Astrom K J, Hagglund T. PID controllers: theory, design and tuning [M]. 2nd ed. NC, USA: Instrument Society of America, 1995.
- [3] 周宝林,朱建跃,蔡宁生,等.过程控制系统中PID控制器参数优化的研究[J].能源技术,2010,22(5):194-197.
- [4] 刘镇,姜学智,李东海.PID控制器参数整定方法综述[J].电力系统自动化,2005,21(8):79-83.
- [5] 杨平,邓亮,等.PID控制器参数整定方法及应用[M].北京:中国电力出版社,2016.
- [6] 苗敬利,李华德.模糊控制和传统PID控制的仿真研究[J].控制系统,2010,19(7):25-26.
- [7] Soyguder S, Karakose M, Alli H. An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach [J]. Energy and Buildings, 2015, 41(8): 814-822.
- [8] Chiou C H, Lin S L, et al. The application of fuzzy control on energy saving for multi-unit room air-conditioners [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 29(2/3): 310-316.
- [9] Soyguder S. Fuzzy adaptive control for the actuators position control and modeling of an expert system [J]. Expert System with Application, 2010, 37(3): 2072-2080.
- [10] 许云明,张伟平.参数自调整模糊控制器在空调控制中的应用[J].制冷与空调,2010,2(7):72-75.
- [11] 胡玉玲,曹建国.变风量空调系统末端的变论域模糊PID控制[J].控制工程,2010,15(5):564-567.
- [12] Gordan H, Vosoughi S, Balochian S. Self-tuning fuzzy PID decoupling controller for VAV air-condition system [J]. International Journal of System Control and Information Processing, 2014, 1(3): 246-260.
- [13] 杨晓庆,左为恒,李昌春.改进PSO算法在中央空调控制系统中的应用[J].计算机仿真,2011,11(28):201-204.
- [14] 张建立,马泳涛,马胜钢.基于改进PSO算法的目标温度模糊神经网络控制器[J].计算机工程与应用,2010,45(9):227-240.
- [15] 贺师超,孔峰,等.改进粒子群的模糊神经PID控制研究与应用[J].控制系统,2012,5(4):35-39.
- [16] Soyguder S, Karakose M, Alli H. Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 4566-4573.
- [17] 温彩霞,陈天及,等.神经元PID在空调机组性能实验室温度控制中的建模与仿真[J].制冷与空调,2010,1(7):31-34.
- [18] 刘金琨.智能控制[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [19] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2016.

(收稿日期:2017-02-10) EA