

RBF 辨识 PID 控制器在温室温度控制中的应用研究

贺争汉, 王大为, 史亚维, 屈毅

(咸阳职业技术学院电子信息系, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 针对温室温度控制系统存在的大滞后、大惯性等问题, 提出采 RBF 辨识 PID 控制策略。该控制算法根据径向基函数 (RBF) 网络在线辨识温室温度系统的模型, 获取被控对象 Jacobian 信息, 利用 BP 网络实时调整 PID 控制器的 3 个参数, 实现温室温度控制系统的在线自整定控制。通过仿真验证, 并与 RBF-PID 控制器作对比, 仿真结果表明, 该控制算法有较强的鲁棒性、自适应性, 其追踪性能和控制参数自适应的能力都优于 RBF-PID 控制器。

关键词: 温室温度, PID 控制器, 参数整定, 径向基函数

中图分类号: TP183

文献标识码: A

RBF Based-identification PID Control for Greenhouse temperature system

He Zheng-Han (贺争汉), Wang Da-Wei (王大为), Shi Ya-Wei (史亚维), Qu Yi (屈毅)

(1 Department of Electrionics and information Engineering, Xianyang vocational
Technical college, Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: Radial basis function (RBF) based-identification PID is investigated for greenhouse temperature system existed such characteristic as the big inertia, the big lag. First, RBF network identifies the plant of greenhouse temperature system on-line, which can obtain the Jacobian information of the plant. Then, BP network on-line adaptively adjusts PID three parameters, which achieve adaptively control for greenhouse temperature system. Simulation results show that the control method has better adaptability and robustness, and has the advantages of higher antinterference ability and adaptability to parameters.changing than RBF-PID control.

Keywords: greenhouse temperature system, PID controller, parameter setting, Radical Basis Function.

1 引言

温室能够通过人工模拟生物生长的所需环境，满足生物的最佳生长环境，有效的改善生物生态，提高土地的产出率和社会经济效益。大量的研究表明：合适的生态环境，尤其合适的温度环境，能够大幅提高生物的产量。但温室环境系统由于自身的复杂性，各种环境因素之间相互影响，采用传统的控制方法很难达到最佳的控制效果。

温室生产潜能的发挥，主要取决于温室温度控制系统。在过去十几年，温室温度控制领域的研究引起了许多学者的关注，各种控制技术和控制策略被应用，诸如预测控制^[1]，模糊控制^[2]、遗传算法控制^[3]，神经网络控制^[4]、鲁棒控制^[5]、最优控制^[6]等。但是温室控制系统有别于设定值恒定工业控制，从微观方面分析，它注重生物生长环境温度的控制^[7]。从宏观方面分析，它涉及到市场需求、经济效益、人力成本等温室产业上层指标要求，是一个完整产业链的优化。由于温室温度控制系统的特殊性和复杂性，使得工程师们大多采用算法简单、抗干扰性强、稳定性好的PID控制算法^[8]。但是，由于温室温度系统滞后性，惯性和非线性的存在，使用传统的PID控制很难满足温室温度控制系统的实际要求。将具有并行数据处理、非线性映射、自学习能力神经网络与常规PID控制器相融合构成神经PID控制器，能够优化PID控制器的性能，提高控制系统的稳定性^[7]。在神经网络理论，径向基函数（Radial basis function, RBF）神经网络是一种局部逼近的三层前馈网络，能以较高的精度逼近任意非线性函数，BP网络属于一种全局逼近的神经网络，其泛化能力较好，但具有运算量大、收敛速度慢的缺点。藉此，本文在文献[7]，[9]的基础上，将RBF和BP神经网络有机的结合，提出一种新型神经控制算法，该算法利用径向基函数（RBF）在线被控对象Jacobian信息，然后利用BP网络在线自适应整定PID参数，克服温室温度控制系统的不确定性，获得较好的温度控制效果。

2 径向基函数神经网络（RBF）模型

RBF神经网络是具有n个输入节点、m隐层节点和一个输出节点的3层前馈网络，由输入层到隐层的变换是非线性映射，隐层到输出的变换是线性映射。该网络具有运算量小、运算速度快、且训练简单等因素，能实现实时控制^[7]。其结构见图1。

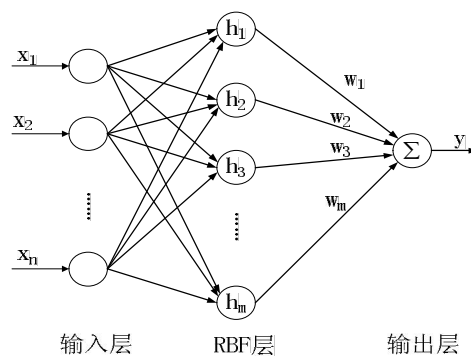


图1 径向基函数神经网络结构图

Fig.1 RBF neural network structure

RBF 神经网络的输出为（见式（1））。

$$y = W^T H = \sum_0^m w_i h_i \quad (1)$$

式中： $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为径向基函数神经网络的输入向量， $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 为径向基函数神经网络权矢量， $H = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ 为径向基矢量，其中 h_j 为高斯函数

$$h_i = \exp\left[-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中 x 为输入向量； c_i 是第 i 个径向基函数的中心，与输入向量 x 的维数相同； σ_i 是第 i 个感知变量，决定该基函数中心宽度； $\|x - c_i\|$ 是向量 $x - c_i$ 的范数，表示 x 与 c_i 之间的距离^[7]。

神经网络的性能指标为式（3）。

$$J = \frac{1}{2}(y(k) - y_m(k))^2 = \frac{1}{2}(ey(k))^2 \quad (3) \quad \text{为了提高径向基函数 RBF 网络辨识}$$

能力，在修正加权系数时，增加了一个惯性项。依据梯度下降法，对径向基函数 RBF 神经网络的节点中心、输出权系数及隐节点的基宽参数做修正，采用的算法如下（见式 4-6）：

$$\begin{cases} \Delta w_i = [y(k) - y_m(k)]h_i \\ w_i(k) = w_i(k-1) + \eta\Delta w_i + \alpha[w_i(k-1) - w_i(k-2)] + \beta[w_i(k-2) - w_i(k-3)] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta b_i = [y(k) - y_m(k)]w_i \frac{\|X - C_i\|^2}{b_i^2} \\ b_i(k) = b_i(k-1) + \eta\Delta b_i + \alpha[b_i(k-1) - b_i(k-2)] + \beta[b_i(k-2) - b_i(k-3)] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta c_{ij} = [y(k) - y_m(k)]w_i h_i \frac{\|X - C_i\|^2}{b_i^2} \\ c_{ij}(k) = c_{ij}(k-1) + \eta\Delta c_{ij} + \alpha[c_{ij}(k-1) - c_{ij}(k-2)] + \beta[c_{ij}(k-2) - c_{ij}(k-3)] \end{cases} \quad (6)$$

式中： α, β 为动量因子， η 为学习效率，且 $\eta, \alpha, \beta \in [0, 1]$

Jacobian 矩阵反映被控对象的输出对控制量输入变化的灵敏度，其值可由 RBF 神经网络

网络辨识而得。取 RBF 网络的第一个输入为 $u(k)$, $x_1 = u(k)$, 则 Jacobian 矩阵的算法见式 (22)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y(k)}{\partial u(k)} &\approx \frac{\partial Y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial w_j h_j}{\partial u(k)} \\ &= \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{j1} - x_1}{b_j^2} \end{aligned} \quad (7)$$

3 RBF 辨识 PID 控制器设计

RBF 辨识 PID 控制器结构图如图 2 所示。该控制器由 3 个部分组成^[10]: (1) RBF 辨识神经网络, 目的是在线建立被控对象的辨识模型, 观测被控对象的辨识信息, 并传送辨识信息于 BP 神经网络; (2) 经典的 PID 控制器, 用于对被控对象进行闭环控制, 其 3 个参数 K_p, K_i, K_d 在线整定; (3) BP 神经网络, 依据辨识信息调整自身的权系数, 在线调整 PID 控制器的 3 个参数, 优化系统的性能指标^[9, 10]。该控制器实质上为一变系数的比例、微分、积分控制器, 学习算法具有自适应性, 其本质是非线性的。这里采用增量式 PID 控制器, 控制学习算法见式 (8-11)。

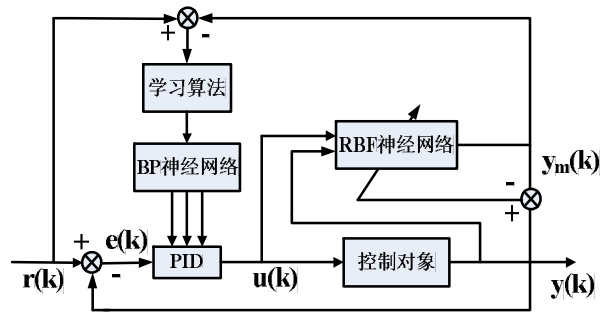


图 2 控制器整定结构图

Fig. 2 The structure controller tuning

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (8)$$

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \\ \Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + \\ \quad K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{cases} \quad (9) \text{PID 控制器的 3 项输入为}$$

$$\begin{cases} x(1) = e(k) - e(k-1) \\ x(2) = e(k) \\ x(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta K_p = -\eta_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\eta_p \frac{\partial J}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_p} = \eta_p e(k) \frac{\partial Y}{\partial u} x(1) \\ \Delta K_i = -\eta_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\eta_i \frac{\partial J}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_i} = \eta_i e(k) \frac{\partial Y}{\partial u} x(2) \\ \Delta K_d = -\eta_d \frac{\partial J}{\partial K_d} = -\eta_d \frac{\partial J}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_d} = \eta_d e(k) \frac{\partial Y}{\partial u} x(3) \end{cases} \quad (11)$$

式中 η_p 、 η_i 、 η_d 分别为比例、积分、

微分的学习速率，用于 BP 神经网络对 PID 控制器 3 个参数进行在线调整。

取神经网络调整的性能指标为

$$E(k) = \frac{1}{2} (e(k))^2 \quad (12)$$

通过 RBF 网络的辨识可获取被控对象的 Jacobian 信息。BP 网络的输出节点对应 PID 控制器的 3 个可调参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。基于上述，RBF 网络辨识的 PID 控制器参数控制算法的步骤如下：

- Step 1.** 确定 RBF 辨识网络的隐含层数目 M ，输节点数目 N 、 α 、 β 为动量因子， η 为学习效率，选取感知变量 σ_i ，径向基函数的中心 C_j 、及径向基函数神经网络权值系数 w_j 的初值；
- Step 2.** 确定 BP 网络构造的自调整 PID 控制器及其权值。
- Step 3.** 采样得到 $y(k)$ 、 $r(k)$ ，用公式 (8) (12) 计算 $E(k)$ ；如果 $E(k)$ (E 是一个给定常数)，则返回 step 3，继续采样。否则进行下一步。
- Step 4.** 由式(11)，计算 BP 网络神经元输出即为 PID 控制器的 3 个可调参数，由公式(9) 计算得到 $u(k)$ ，并将 $u(k)$ 传递给被控对象，实时控制，同时，传入由公式 (7) 得到 Jacobian 信息，计算出下一步输出 $y(k+1)$ ；
- Step 5.** 利用公式 (4, 5, 6)，调整感知变量 σ_i ，径向基函数的中心 C_j 、及径向基函数神经网络权值系数
- Step 6.** 调整 BP 神经网络的权系数；
- Step 7.** 令 $k=k+1$ ，返回步骤 step 3，进行在线辨识与控制。

4 温室温度控制系统仿真研究及结果分析

以文献[7]中的模型为基础进行研究，温室温度模型见式 (13)。

$$T_m(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (13)$$

在 RBF 辨识 PID 控制器中，RBF 辨识网络选取 3-6-1 结构，RBF 网络辨识器的输入为 $u(k)$ ， $y(k)$ ， $y(k-1)$ ，输出为 $y_m(k)$ ，RBF 网络基函数中的 $\sigma = 0.65$ ，加权系数初值 $w_1=0.01$ ， $w_2=0.02$ ， $w_3=0.01$ ，BP 网络取 4-5-3 结构。温度控制系统数学模型的相关参数取值 $1/k' = 4356.3$ ， $T=856.35$ ， $\tau = 108$ 。经过多次训练试验后，最终参数选择为学习效率 $\eta = 0.32$ ，动量因子 $\alpha = 0.06$ ，比例、积分、微分的学习速率 $\eta_p = 0.5$ ， $\eta_i = 0.45$ ， $\eta_d = 0.4$ 。取陕西关中泾阳地区元月份某一天 200 个不同时段温度值为样本值，分别输入到 RBF 辨识 PID 控制器和 RBF-PID 控制器，进行仿真研究，结果如图 3-6 所示。

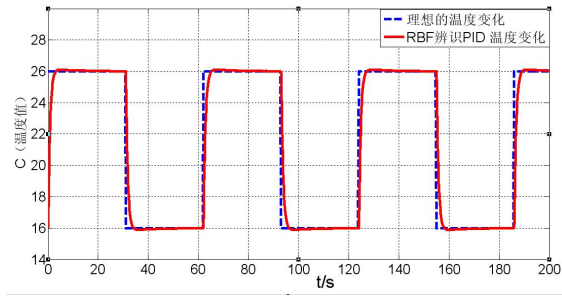


图3 RBF 辨识 PID 控制系统的方波响应

Fig.3. RBF- PID based on Identification Control system square wave response

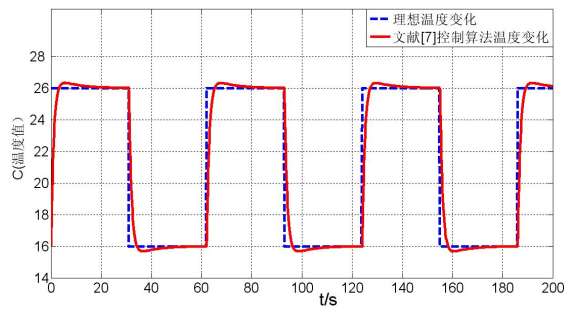


图4 RBF-PID 控制系统的方波响应

Fig.4. RBF-PID Control system square wave response

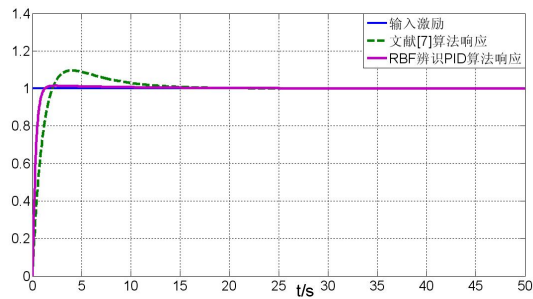


图5 三种控制器系统响应

Fig.5. two kinds of control system response

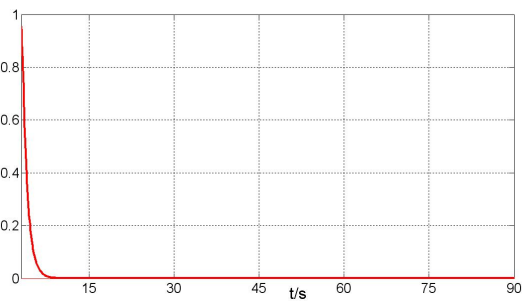


图6 性能指标函数J的优化过程

Fig.6. Optimization process of objective function J

对图 3-4 进行分析, RBF 辨识 PID 控制器与 RBF 控制器相比较, RBF 辨识 PID 控制器能使温度控制系统实现无静差跟踪, 鲁棒性好、抗干扰性强, 并能依据环境要求迅速调整室内温度, 为生物的生长在提供合适的环境温度。由图 5, 6 可分析, RBF 辨识 PID 控制系统能,

使温度控制系统在控制精度、收敛速度等性能得到较大的提高, 其控制效果优于 RBF-PID 控制器。

5 结论

本文提出采用 RBF 辨识 PID 控制器控制温室温度的方法, 该方法针对温室内生物生长环境要求, 利用 径向基函数(RBF)神经网络的辨识能力, 跟踪控制对象的变化, 在此基础上, 利用 BP 网络在线自适应整定 PID 控制器的 3 个参数有效地抑制外界环境的干扰, 提高了温度控制系统的收敛速度, 和控制精度。通过仿真结果及实验数据分析表明 RBF 辨识 PID 控制能充分发挥了神经网络具非线性映射能力和自学习、自适应, 构成了自适应能力很强的神经网络 PID 控制策略, 提高了温室温度系统的动态响应速度, 能获得满意的控制效果。

参考文献:

- [1] Gruber J K, Guzman J L, Rodriguez F, et al. Nonlinear MPC based on a Volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(1) : 354-366.
- [2] Goggos V, King R E. Qualitative-evolutionary design of greenhouse environment control agents [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(3) : 271-282.
- [3] Blasco X, Martínez M, Herrero J M, et al. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1) : 49-70.
- [4] Fathi Fourati, Mohamed Chtourou. A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(8) : 1016-1028.
- [5] Bennis N, Duplaix J, G Enea, et al. Greenhouse climate modeling and robust control [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2) : 96-107.
- [6] Christelle Lopes, Thierry Spataro, Laurent Lapchin. Optimal release strategies for the biological control of aphids in melon greenhouses [J]. Biological Control, 2009, 48(1) : 12-21.
- [7] 屈毅, 宁铎, 赖展翅. 温室温度控制系统的神经网络 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2) : 307-311.
Qu Yi, Ning Duo, Lai Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2) : 307-311. (in Chinese)
- [8] 李永博, 周伟, 汪小昆. 基于奇异摄动理论的综合温室控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5) : 184-189
Li Yongbo, Zhou Wei, Wang Xiaochan. Greenhouse Control System Design Based on Singular Perturbation Theory. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):184-189
- [9] 张静, 裴雪红. 基于 RBF 在线辨识的 PID 整定[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1):158-160.
ZHANG Jing, PEI Xue-hong. Self tuning PID controller of RBF based on-line identification neural network[J]. ELECTRIC MACHINES AND CONTROL, 2009, 13(1):158-160
- [10] SUN D, MILLIS J. Adaptive synchronized control for coordination of multi-robot assembly tasks [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(4): 498-510.

第一作者姓名贺争汉（1979-），男（汉族），陕西礼泉人，教师，助教，硕士研究生，主要研究领域为计算机仿真与教学。

第二作者姓名王大为（1972-），男（汉族），陕西泾阳人，教师，助教，硕士研究生，主要研究领域电路仿真与装置建模，集成电路（IC）设计。

第二作者姓名史亚维（1983-），女（汉族），陕西咸阳人，教师，助教，硕士研究生，主要研究领域为光电集成与传感技术。

第二作者姓名屈毅（1975-），男（汉族），陕西乾县人，教师，讲师，博士研究生，主要研究领域为线性与非线性评估的设计，随机与自适应控制等等。

第一作者	导师/通讯作者
姓名贺争汉 手机 18091078915 邮箱 hezh1203@163.com	姓名 手机 邮箱
详细通信地址咸阳职业技术学院电信系	邮编 712000
省市区路号 陕西省西咸新区 沣西新城统一大道	