

# 基于半物理仿真的 RBF 神经网络滑模控制

杨鹏, 姜威, 刘品杰, 张燕

(河北工业大学自动化系, 天津 300130)

**摘要:** 针对一类不确定时滞系统研究滑模控制的实现问题。对于实际应用对象的时滞特性采取了特殊的线性变换, 将原时滞系统转化为无时滞系统。通过设计二次型性能指标计算得到了最优的切换函数, 并使用 RBF 神经网络实现了滑模控制的自适应等效控制, 保证了系统能够克服扰动, 系统状态在有限时间能够到达滑模面。系统仿真验证了该方法的有效性和稳定性。

**关键词:** 滑模控制; 不确定时滞系统; 半物理仿真; RBF 神经网络

## RBFNN Siding Mode Control Based on Semi-physical Simulation

YANG Peng, JIANG Wei, LIU Pin-jie, ZHANG Yan

(Department of Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

**【Abstract】** Based on Matlab RTW semi-physical simulation platform, a siding mode control algorithm is presented for a kind of uncertain time-delay system. Through a particular linear transformation, the original uncertain time-delay system is first transformed into a delay-free system. Based on the transformed system, a design method of optimal sliding mode with a quadratic performance index minimized is proposed. An appropriate control law which is approached by a RBF Neural Network(RBFNN) and the weight of the network is tuned on line using adaptive algorithm to force the system states to reach the sliding manifold in finite time. Simulation results show the efficiency and superiority of the proposed method.

**【Key words】** siding mode control; uncertain time-delay system; semi-physical simulation; RBF Neural Network(RBFNN)

### 1 概述

实际控制系统中普遍存在时滞现象, 而时滞的存在致使系统的控制品质变差, 甚至会导致系统的不稳定, 寻找鲁棒性好的控制方法是非常必要的。现有处理时滞系统的方法主要有Smith预估策略、预测控制、输出跟踪控制方法、LQR/LTR算法等<sup>[1-3]</sup>。近年来, 变结构控制逐渐引起学者的重视, 它具有鲁棒性强、降阶、响应快及算法简单等优点, 尤其是滑动模态对系统内部参数变化及外界扰动具有不敏感性, 为复杂系统的设计提供了一种有效途径<sup>[4]</sup>。

本文结合实际应用, 针对一类带有控制时滞的不确定性系统, 利用线性变换将原系统化为线性无时滞的系统, 在新坐标下给出了最优滑模面和利用神经网络实现变结构控制律的设计方法, 并讨论了控制的有效性和系统的稳定性。将滑模变结构控制引入到温度液位控制系统中, 并通过Matlab的RTWT在半物理仿真平台上进行实时仿真<sup>[5-6]</sup>。

### 2 仿真实验平台介绍及被控对象描述

实时仿真系统采用了MathWorks公司提供的Matlab/RTWT仿真环境, 系统分为虚拟控制器与现场系统两部分, 两者之间通过数据采集卡相连<sup>[6]</sup>。

系统中虚拟控制器部分由Matlab结合Simulink工具箱实现, 以Simulink模型作为连接物理目标的接口。Simulink的外部模式与RTWT结合提供了一个图形用户接口。Simulink模型和实时应用程序之间保持着一个校验机制, 实时内核使用这个校验机制来判断Simulink模型结构在代码生成的过程中是否和实时应用程序的结构保持一致。这就确保了在线修改模型参数的时候, Simulink模型的参数可以正确地映射到

实时应用程序相应的参数上。控制试验平台主要是辅助计算机完成对控制信号的执行。

为了完成不同控制器的快速原型化设计, 可将不同的硬件系统引入到仿真回路里, 在此以浙江天煌科技实业有限公司的THJ-3型高级过程控制对象系统实验装置为硬件系统, 其中控制对象配有水槽、锅炉、三相磁力泵等各种模拟工业现场的装置, 并安装了各类监测变送装置和执行机构, 使其更加接近工业现场。该装置配有多个手动阀门, 通过手动阀门组的切换可将整套对象分解组合成多种不同的控制对象系统。实验平台提供工业控制中标准的4 mA~20 mA和1 V~5 V信号接口, 可以方便地将信号接到数据采集卡的端子上, 为仿真平台的搭建提供方便。通过对这些环节的任意组合可以得到二阶及高阶系统。

由于在控制过程中不可避免地存在内部参数的变化和外界干扰, 为不失一般性, 本文研究对象为如下形式的不确定时滞系统<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t-h) + d(x,t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $h > 0$  为时滞项;  $x(t) \in R^n$  为状态变量;  $u(t) \in R^m$  为控制变量;  $d(x,t) \in R^n$  为不确定项, 包括系统内部参数的扰动和外部扰动, 实际应用中主要是执行机构和数据采集产生的扰动。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60575009)

**作者简介:** 杨鹏(1960—), 男, 教授, 主研方向: 计算机控制; 姜威、刘品杰, 硕士研究生; 张燕, 副教授

**收稿日期:** 2008-02-14 **E-mail:** liupinjie@gmail.com

### 3 最优切换函数的设计

#### 3.1 线性变换的提出

针对系统不确定时滞的特性，特别地对系统进行如下线性变换：

$$z(t) = x(t) + \int_{t-h}^t e^{A(t-h-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (2)$$

其中， $z$  表示对  $x$  的线性变换，并对两边取  $t$  的微分，可得

$$\dot{z}(t) = \dot{x}(t) + A \int_{t-h}^t e^{A(t-h-\tau)} B u(\tau) d\tau + e^{Ah} B u(t) - B u(t-h) \quad (3)$$

将式(1)、式(2)代入式(3)整理得到提取了无时滞项的不确定系统：

$$\dot{z}(t) = A z(t) + B_h u(t) + d(x, t) \quad (4)$$

其中， $B_h = e^{-kA} B$ 。整个线性变换是将系统时滞项  $e^{-kA}$  从  $u$  中提取出来，使得原时滞系统变成了无时滞的系统。

#### 3.2 切换函数的设计

将式(4)写成标准形式：

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= A_{11} z_1(t) + A_{12} z_2(t) \\ \dot{z}_2(t) &= A_{21} z_1(t) + A_{22} z_2(t) + B_h u(t) + d(x, t) \end{aligned} \quad (5)$$

由  $(A, B)$  完全可控，可以得到  $(A_{11}, A_{12})$  必是可控对。为获得最优的切换函数，定义二次型性能指标：

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [z_1^T(t) Q_1 z_1(t) + z_2^T(t) Q_2 z_2(t)] dt \quad (6)$$

其中， $Q_1 \in R^{(n-m) \times (n-m)}$ ， $Q_2 \in R^{m \times m}$  为加权正定矩阵； $t_0$  为滑模运动开始的时间。最优滑模设计问题是确定一个最优的切换函数  $s(t) = s(z_1, z_2) = C \cdot z(t)$ ，其中， $s \in R^m$ ，使得系统在滑动模态上能够使二次型性能指标  $J$  取得最小值。在式(5)中，把  $z_1(t)$  视为状态，把  $z_2(t)$  视为控制，整个最优滑模设计的问题变成了求取状态反馈  $z_2(t) = \alpha \cdot z_1(t)$  使  $J$  取最小值。由于  $(A_{11}, A_{12})$  是可控对，那么由式(5)、式(6)可以解得

$$z_2(t) = -Q_2^{-1} A_{12}^T P \cdot z_1(t) \quad (7)$$

其中， $P \in R^{(n-m) \times (n-m)}$  为正定常数阵，是下述 Riccati 代数方程的解：

$$-P A_{11} - A_{11}^T P + P A_{12} Q_2^{-1} A_{12}^T P = Q_1 \quad (8)$$

由此，可以得到最优切换函数：

$$s(z_1, z_2) = z_2(t) + c \cdot z_1(t) = \dot{z}_1(t) + c \cdot z_1(t) \quad (9)$$

其中， $c = Q_2^{-1} A_{12}^T P$ 。

### 4 RBF 滑模控制器的设计

#### 4.1 基于神经网络的滑模控制率的实现

RBF神经网络是一种具有单隐层的3层前馈网络，它克服了BP网络存在的局部最优、收敛速度慢及效率低等问题，其隐层使用高斯函数，具有结构简单、能够拟合任意非线性函数、收敛速度快等特点<sup>[7]</sup>，其网络结构如图1所示。

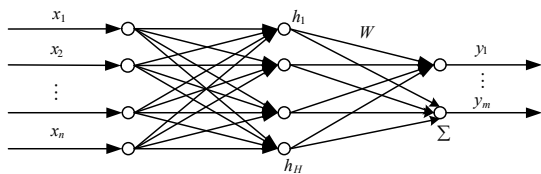


图1 RBF神经网络结构

等效控制率  $u_{eq}$  在  $s=0$  且  $\dot{s}=0$  时作用。由于  $z_1$  是经过线性变换的误差量，又由式(9)知，只需要使用一个单输入单输出的RBF神经网络来拟合等效控制率。

设神经网络传递函数

$$G(s) = \sum_{j=1}^n w_j \phi_j(s - m_j) \quad (10)$$

其中， $s$  代表输入的滑模变量； $m_j$  代表隐层中第  $j$  个神经元中心位置； $w_j$  是隐层中第  $j$  个神经元的权值； $\phi_j(s)$  是隐层中第  $j$  个神经元的高斯函数：

$$\phi_j(s - m_j) = \exp\left(-\frac{\|s - m_j\|^2}{\sigma_j^2}\right) \quad (11)$$

其中， $\sigma_j$  反映了高斯曲线的分布宽度。由此，可以得到一个单输入单输出的RBF神经网络输出控制率  $u_o$ ：

$$u_o = \sum_{j=1}^n w_j \exp\left(-\frac{\|s - m_j\|^2}{\sigma_j^2}\right) \quad (12)$$

为了确保系统运动在滑模运动段，采用自适应算法在线调整权值  $w$ ，并以控制目标  $E = s(t) \cdot \dot{s}(t) \rightarrow 0$  作为网络权值的调整指标。则

$$\begin{aligned} \dot{w}_j &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_j(t)} = -\eta \frac{\partial s(t) \cdot \dot{s}(t)}{\partial w_j(t)} = \\ &= -\eta \frac{\partial s(t) \cdot \dot{s}(t)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{\partial w_j(t)} = \eta b s(t) \frac{\partial u(t)}{\partial w_j(t)} = \\ &= \gamma \cdot s(t) \cdot \exp\left(-\frac{\|s - m_j\|^2}{\sigma_j^2}\right) = \gamma \cdot s(t) \cdot \phi_j(s) \end{aligned} \quad (13)$$

其中， $\eta$  是自适应率； $b$  是系统的输入参数；两者的积  $\gamma$  是系统的学习速率。

当使用5个高斯基函数，权值初值取为零、函数中心点位置及函数的分布宽度设为  $[-1, 1]$  之间的任意常值时，可以很好地满足控制性能。由此可见，采用RBF神经网络拟合等效控制律具有结构简单、易于实现等特点。

#### 4.2 系统性能分析

##### 4.2.1 内部参数和外部扰动的不变性

将式(11)系统的最优切换函数代入，可以得到最优滑动模态的动态方程：

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = (A_{11} - A_{12} c) z_1(t) \\ \dot{z}_2(t) = -c z_1(t) \end{cases} \quad (14)$$

可以看到，系统中不再含有不确定项  $d(x, t)$ ，说明系统对内部参数和外部扰动具有不变性。而且，在滑动模态满足匹配条件时，滑模运动是渐进稳定的。

##### 4.2.2 等效控制率的稳定性分析

如果神经网络所取的权值  $w$  和最优的权值  $\bar{w}$  之间存在一个很小的误差  $\xi$ ，那么设  $u_{eq} = \bar{w}^T \phi + \xi$  近似成立。

由参考文献[6]可知：

$$b[u_{eq} - u_o] = \dot{s}(t) + \lambda s(t) = 0 \quad (15)$$

得

$$\dot{s}(t) = -\lambda s(t) + b(\bar{w}^T \phi + \xi) \quad (16)$$

构造一个正定的 Lyapunov 函数：

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{h}{2\gamma} \bar{w}^T \bar{w} \quad (17)$$

所以有

$$\dot{V} = \dot{s}s + \frac{h}{\gamma} \bar{w}^T \dot{\bar{w}} = -\lambda s^2 + sb\xi \quad |s| \cdot (-\lambda |s| + b\xi) \quad (18)$$

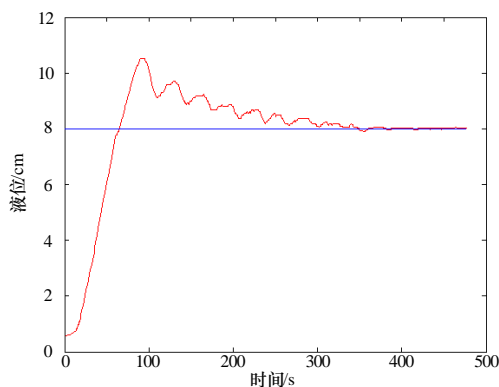
由式(18)可以得到，当  $|s| > b\xi/\lambda$  时， $\dot{V} < 0$ ，即 Lyapunov 函数将逐渐趋近于零，滑模面变量  $s$  将逐渐收敛到状态空间中滑模面  $s=0$  附近的边界层  $b\xi/\lambda$  的范围内。

所以，RBF滑模控制器是稳定的，其输出误差限定在一个很小的范围内。

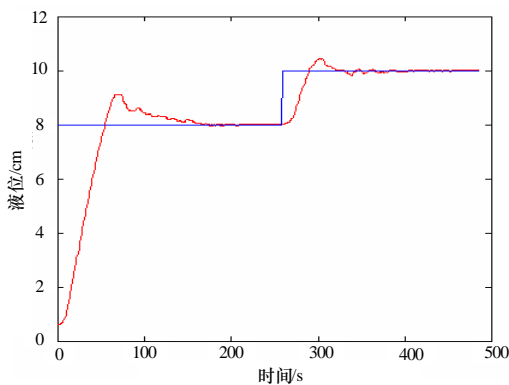
## 5 仿真实验

在 Simulink 的仿真算法中,使用 C 语言编写了 2 个 S-Function 来完成控制算法,第 1 个 S-Function 是 transform 模块,用来完成线性变换,输出的信号以及求得的信号的导数输入第 2 个 S-Function。第 2 个 S-Function 则是神经网络控制器模块,通过它系统实现变结构控制率。

在仿真过程中,首先选取二阶水槽为控制对象,通过控制进水流量控制水槽中的液位高度检验控制算法。为了展示算法的控制效果,使用没有加入线性变换的简单变结构控制(图 2(a))和带有线性变换的 RBF 变结构算法(图 2(b))进行比较。可以看出没有使用线性变换的变结构算法超调量过大,由于系统的惯性和时滞特性使得系统动态过程中抖动过大,而使用了线性变换的 RBF 变结构控制算法动态性能则好得多。最后,给出 RBF 滑模控制在锅炉系统中的相应曲线(图 3),也显示出优良的控制效果。



(a)简单的滑模控制



(b)带有线性变换的 RBF 滑模控制

图 2 二阶系统液位响应曲线

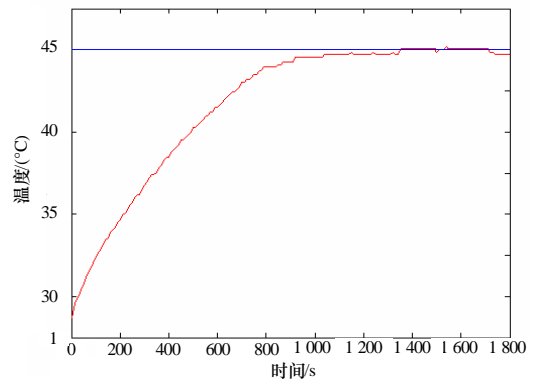


图 3 锅炉温度响应曲线

## 6 结束语

本文基于 Matlab 的半物理仿真实验平台,设计了一个时滞系统的神经网络滑模变结构控制算法。通过特殊的线性变换,将原时滞系统化为无时滞系统,应用 RBF 神经网络拟合最优切换函数完成控制。应用该算法对二阶液位系统和锅炉温度控制系统进行实时控制仿真实验,结果表明该方法实用,系统超调少,能够在有限时间能够到达滑模面,对于不确定时滞系统,能够很好地克服执行机构的非线性等干扰与不确定性对系统产生的影响。

## 参考文献

- [1] Henson M A, Seborg D E. Time Delay Compensation for Nonlinear Processes[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1994, 33(4): 1493-1500.
- [2] Efe M O, Kaynak O, Yu Xinghuo. Variable Structure Control of a Class of Uncertain Systems[J]. Automatica, 2004, 40(1): 59-64.
- [3] Chen Qizhong, Peng Shidian. Design of a Sliding Mode Control System for Chemical Processes[J]. Journal of Process Control, 2005, 55(15): 515-530.
- [4] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] Kojima A, Uchida K, Shimemura E, et al. Robust Stabilization of a System with Delayed in Control[J]. IEEE Trans. on Automat. Control, 1994, 39(6): 1694-1698.
- [6] 李永富, 杨鹏, 张燕, 等. 基于 Matlab 的高级过程控制实时混合仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4150-4153.
- [7] 罗婷婷, 刘金琨. 一种使用 RBF 网络的自适应滑模控制器[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1106-1109.

(上接第 196 页)

文对语义 Web 及其体系结构进行了介绍,在此基础上对各层次作了具体的描述,并重点说明和比较分析了其中的关键技术。此外,对语义 Web 的逻辑基础描述逻辑进行了一定的阐述,深入分析了其语法语义及推理任务。从语义 Web 研究来看,本文的研究仅仅是一个起点,其他方面还有待于进一步研究,诸如:本体技术如何与语义 Web 的更完美结合;本体的映射、进化、集成等问题将会是未来的研究热点;语义 Web 的实用性还有赖于证明和信任模型的开发等。

## 参考文献

- [1] Lee T B. The Semantic Web——XML 2000[Z]. (2005-12-31). <http://www.w3c.org>.
- [2] 史忠植,董明楷,蒋运承,等. 语义 Web 的逻辑基础[J]. 中国科学(E 辑): 信息科学, 2004, 34(10): 1123-1138.
- [3] Baader F, Calvanese D, McGuinness D, et al. The Description Logic Handbook[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.