

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.026

基于结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 的 长时延 NCS 研究

袁士丞, 方建安*
(东华大学 信息科技与技术学院, 上海 201620)

摘要: 针对长时延网络控制系统(NCS)中存在时延和被控对象等问题,提出了一种新型结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制器。新型控制器由结构改进 Smith 预估器和单神经元 PSD 控制器组成,结构改进 Smith 预估器通过对传统 Smith 预估器模型结构上的改进,避免了建立网络时延的预估模型,无需对网络时延进行在线测量、估计或辨识,补偿了网络时延对系统的性能带来的影响;单神经元 PSD 控制器解决了结构改进 Smith 预估器的模型失配问题,通过 Matlab 环境下的 TrueTime 工具箱对 NCS 进行仿真实验,并对传统 PID 控制方法、结构改进 Smith 预估 PID 控制方法和结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制方法进行了仿真比较。研究表明,该新型控制器有效地补偿了网络时延对 NCS 的性能带来的影响,在模型失配情况下具有良好的鲁棒性和适应性,是对长时延 NCS 一种可行且有效的控制方法。

关键词: 长时延; 网络控制系统; 结构改进 Smith 预估器; 单神经元 PSD 控制器; TrueTime 工具箱

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1558-06

NCS with long time-delay based on structure improved Smith predictor with single neuron PSD control

YUAN Shi-cheng, FANG Jian-an

(Institute of Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of network time-delay and controlled plant in network control system(NCS)with long time-delay, a new structure improved Smith predictor with single neuron PSD control was proposed. This new controller was composed of structure improved Smith predictor and single neuron PSD controller. Improved by classic Smith predictor model structural adjustment, the structure improved Smith predictor can be used for compensating the influence of network time-delay on the performance of NCS without establishing the prediction model of network time-delay, and network time-delay doesn't need to be measured, estimated or identified on line. The single neuron PSD controller can be used for solving the problems of structure improved Smith predictor model mismatch. The NCS simulation experiment with comparison between classic PID controller, structure improved Smith predictor with PID control and structure improved Smith predictor with single neuron PSD control was emulated by TrueTime toolbox in Matlab. The results indicate that this new controller effectively compensates the influence of network time-delay on the performance of NCS, and has good robustness and adaptability in case of model mismatch, so it is a feasible and effective control method for NCS with long time-delay.

Key words: long time-delay; network control system (NCS); structure improved Smith predictor; single neuron PSD controller; TrueTime toolbox

收稿日期: 2013-06-28

作者简介: 袁士丞(1989-),男,浙江宁波人,主要从事网络控制系统方面的研究. E-mail: rayeva@qq.com

通信联系人: 方建安,男,教授,博士生导师. E-mail: jafang@dhu.edu.cn

0 引言

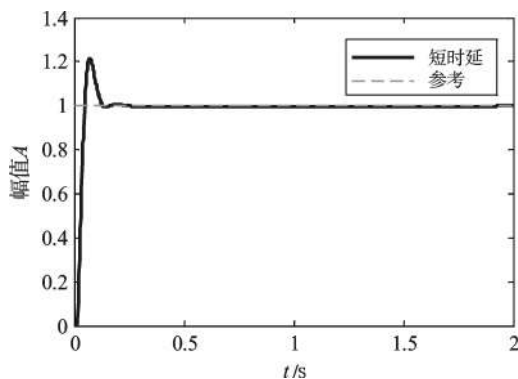
网络控制系统(NCS)^[1]是一种网络化的实时反馈控制系统,是指利用专用或公用数据通信网络代替点对点连接构成的闭环控制系统。近几年来,网络控制系统成为了国内外众多大学和科研院所进行研究的热点。随着众多学者的不懈努力,NCS的研究与实践取得了丰硕的成果,其中主要是针对网络中的时延进行补偿,例如:唐会娟等^[2]针对基于磁悬小球系统的NCS设计了一种改进的Smith预估器与改进的专家PID控制器相结合的控制方案,并假设网络时延为短时延,网络随机负载服从Marko链;张俊等^[3]针对基于Internet的NCS设计了一种改进的非线性PID控制器与带平均时延环节的动态Smith预估器相结合的控制方案,并要求被控对象模型精确;史婷娜等^[4]针对不确定时延NCS设计了一种基于最小二乘估计的Smith预估器与模糊免疫PI控制器相结合的控制方案,但当网络时延随机性较大、变化剧烈时,系统的控制性能将受到影响。上述文献设计的控制方案在NCS的应用中取得了良好的效果,但都是以一定的假设作为前提来实现的。实际上网络时延可能是时变或不确定的,可以大于数个乃至数十个采样周期,要建立准确的时延预估模型几乎是不可能的^[5],并且大多数的工业被控对象中存在缺乏精确模型和参数时变等问题。

为解决上述问题,本研究设计一种新型结构改进Smith预估单神经元PSD控制器。新型控制器不再含有时延预估模型,适用于无法在线测量、估计或辨识网络时延,同时缺乏精确被控对象模型的长时延NCS应用场合。

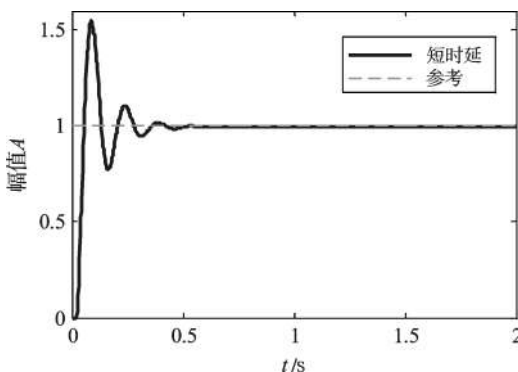
1 网络时延对NCS性能的影响

NCS由于网络的引入导致了許多新问题,而时延是NCS区别于传统控制系统中最关键的一点。NCS的时延主要由3个部分组成:传感器到控制器之间的时延 τ_{sc} 、控制器到执行器之间的时延 τ_{ca} 和控制器运算产生的时延 τ_c ,一般情况可将 τ_c 忽略,因此系统总时延 $\tau = \tau_{sc} + \tau_{ca}$,并且在NCS中可将时延区分为短时延和长时延^[6]。在短时延NCS中,短时延是指网络时延在 $[0, \tau]$ 内分布并且 $0 \leq \tau \leq T$ (T 为采样周期)。在长时延NCS中,长时延是指网络时延在 $[0, \tau]$ 内分布并且 $\tau > T$,不同延时NCS响应曲线如图1所示。

可见,短时延NCS控制性能较好,响应曲线超调较小、调节时间较短;长时延NCS控制性能较差,响应曲线超调较大、调节时间较长。



(a) 短时延NCS响应曲线



(b) 长时延NCS响应曲线

图1 不同延时NCS响应曲线

由此可知,时延的大小对系统的性能起到很大的影响,网络时延越大,系统的控制性能越差,甚至会使系统变得不稳定,因此需要做出相应的改进以补偿时延带来的影响,改善系统的性能。

2 新型结构改进Smith控制

1957年,史密斯(O.J.M Smith)提出了一种以模型为基础的预估器补偿控制方法以改善大纯滞后系统的控制品质。为了考察Smith预估器在NCS中的应用,本研究先从一般的NCS开始讨论。NCS的典型结构图如图2所示。

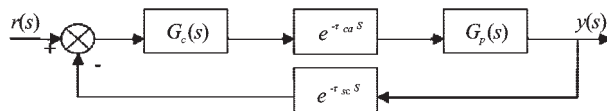


图2 一般NCS结构图

该系统的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_{ca}s}}{1 + G_c(s)e^{-\tau_{ca}s}G_p(s)e^{-\tau_{sc}s}} \quad (1)$$

式中: $G_c(s)$ —控制器的传递函数, $G_p(s)$ —被控对象的传递函数, τ_{sc} —传感器到控制器的网络时延, τ_{ca} —控制器到执行器的网络时延。

其闭环特征方程为:

$$1 + G_c(s)e^{-\tau_{ca}s}G_p(s)e^{-\tau_{sc}s} = 0 \quad (2)$$

可见,闭环特征方程中包含时延的指数项,时延将降低系统的稳定性,如果时延较大甚至会使系统不稳定。

为此,本研究在NCS的基础上加入Smith预估器,基于Smith预估的NCS结构图如图3所示。

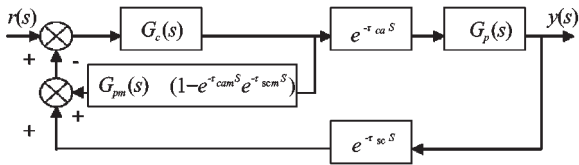


图3 基于Smith预估的NCS结构图

加入Smith预估器后,该系统的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_{ca}s}}{1 + G_c(s)G_{pm}(s)(1 - e^{-\tau_{cam}s}e^{-\tau_{scm}s}) + G_c(s)e^{-\tau_{ca}s}G_p(s)e^{-\tau_{sc}s}} \quad (3)$$

式中: $G_{pm}(s)$ —被控对象 $G_p(s)$ 的预估模型, τ_{scm} —时延 τ_{sc} 的预估模型, τ_{cam} —时延 τ_{ca} 的预估模型。

其闭环特征方程为:

$$1 + G_c(s)G_{pm}(s)(1 - e^{-\tau_{cam}s}e^{-\tau_{scm}s}) + G_c(s)e^{-\tau_{ca}s}G_p(s)e^{-\tau_{sc}s} = 0 \quad (4)$$

可见,闭环方程中包含时延环节,网络时延将降低系统的性能。当 $\tau_{cam} = \tau_{ca}$, $\tau_{scm} = \tau_{sc}$, $G_{pm}(s) = G_p(s)$, 代入公式(3),该系统的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_{ca}s}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (5)$$

其闭环特征方程为:

$$1 + G_c(s)G_p(s) = 0 \quad (6)$$

可见,闭环特征方程中不再包含时延环节,与无网络的控制系统相比,只是将控制过程推迟了时间 τ_{ca} ,网络时延将不再对系统的控制性能造成影响,实现了时延补偿。然而NCS的网络时延往往是随机、不确定和时变的,一般不太可能得到网络时延精确的预估模型,因此在NCS中使用传统Smith预估器并不是一个有效的方法。基于上述考虑,可以将传统Smith预估器在模型结构上做相应的改进来解决网络时延无法准确预估的问题。

为此,在NCS中采用结构改进Smith预估器,基于结构改进Smith预估的NCS结构图如图4所示。

可见,结构改进Smith预估器由两个预估模型组成,这两个预估模型分别位于通信网络的两侧,被控对象侧的预估模型为对真实被控对象的预估模型

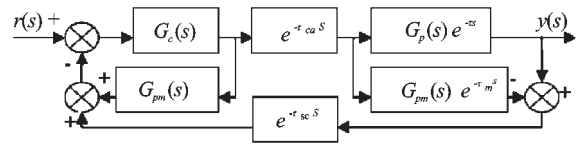


图4 基于结构改进Smith预估的NCS结构图

$G_{pm}(s)e^{-\tau_{cam}s}$,控制器侧的预估模型为不带纯滞后项的真实被控对象模型 $G_{pm}(s)$ 。该系统的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_{ca}s}e^{-\tau_{sc}s}}{1 + G_c(s)G_{pm}(s) + G_c(s)e^{-\tau_{cam}s}(G_p(s)e^{-\tau_{ca}s} - e^{-\tau_{cam}s}G_{pm}(s))e^{-\tau_{sc}s}} \quad (7)$$

其闭环特征方程为:

$$1 + G_c(s)G_{pm}(s) + G_c(s)e^{-\tau_{cam}s}(G_p(s)e^{-\tau_{ca}s} - e^{-\tau_{cam}s}G_{pm}(s))e^{-\tau_{sc}s} = 0 \quad (8)$$

当 $\tau_{cm} = \tau$, $G_{pm}(s) = G_p(s)$ 时,将其代入公式(7),该系统的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_{ca}s}e^{-\tau_{sc}s}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (9)$$

其闭环特征方程为:

$$1 + G_c(s)G_p(s) = 0 \quad (10)$$

可见,闭环特征方程中不再包含时延环节,实现了时延补偿。

可以看到,结构改进Smith预估器避免了传统Smith预估器需要对网络时延进行精确地预估,而只需要得到被控对象的预估模型即可。从公式(8)中可看到,如被控对象的预估模型发生偏差,那么网络时延仍将对系统造成影响。因此,在使用结构改进Smith预估器补偿了时延的同时,仍需要一种控制方法,当被控对象的预估模型与真实模型发生偏差时,使系统保持良好的控制性能,具有较强的鲁棒性。

3 基于结构改进Smith预估单神经元PSD的长时延NCS

为了解决模型误差的影响,本研究提出将结构改进Smith预估器,单神经元PID控制器^[7]和PSD控制器^[8]结合到一起,成为一种新型结构改进Smith预估单神经元PSD控制器来解决比较复杂的长时延NCS控制问题。在这种新型控制器的控制过程中,使用结构改进Smith预估器来消除网络时延带来的影响;使用单神经元PSD控制器用来控制系统对象、适应系统参数变化、自动调整控制参数、降低模型误差的影响、提高系统的响应速度和稳态性能。基于结构改进Smith预估单神经元PSD的长时延NCS结构图如图5所示。

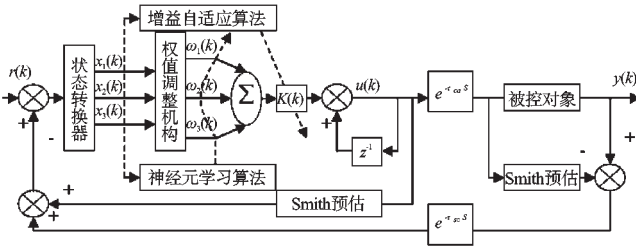


图 5 基于结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 的长时延 NCS 结构图

新型控制器中的单神经元 PSD 控制器是在单神经元 PID 控制的基础上加入 PSD 控制算法,来对增益 K 进行自动调整而构成的。与单神经元 PID 控制相比,单神经元 PSD 控制中 K 的自适应调整使得该控制器自学习、自组织能力和鲁棒性都有了明显提高^[9]。图 5 中, $x_i(k)$ 为神经元学习控制所需要的状态量, $\omega_i(k)$ 为对应于 $x_i(k)$ 的加权系数。控制器采用有监督 Hebb 学习算法^[10]并考虑到加权系数 $\omega_i(k)$ 和神经元的输入、输出和输出偏差相关函数有关,得:

$$\omega_i(k+1) = (1-c)\omega_i(k) + \eta v_i(k) \quad (11)$$

$$v_i(k) = z(k)u(k)x_i(k) \quad (12)$$

式中: $v_i(k)$ —递进信号, $z(k)$ —输出误差信号, η —学习速率, c —0~1 之间的常数。

大量的实际应用中 PID 参数的在线学习修正主要与 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 有关,可将控制器的加权系数学习算法修正部分进行修改,即: $x_i(k)$ 改为 $e(k) + \Delta e(k)$ 。

综合上述算法,得到单神经元 PSD 控制算法如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta u(k) &= K(k) \sum_{i=1}^3 \omega'_i(k)x_i(k) \\ x_1(k) &= e(k) \\ x_2(k) &= \Delta e(k) \\ x_3(k) &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \\ \omega'_i(k) &= \frac{\omega_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)|} \\ \omega_1(k+1) &= \omega_1(k) + \eta_1 z(k)u(k)[e(k) + \Delta e(k)] \\ \omega_2(k+1) &= \omega_2(k) + \eta_2 z(k)u(k)[e(k) + \Delta e(k)] \\ \omega_3(k+1) &= \omega_3(k) + \eta_3 z(k)u(k)[e(k) + \Delta e(k)] \\ K(k) &= K(k-1) + C \frac{K(k-1)}{T_v(k-1)} \\ (\text{当 } \text{sgn } e(k) &= \text{sgn } e(k-1) \text{ 时}) \\ K(k) &= 0.75K(k-1) \\ (\text{当 } \text{sgn } e(k) &\neq \text{sgn } e(k-1) \text{ 时}) \\ T_v(k) &= T_v(k-1) + L \text{sgn} [|\Delta e(k)| - T_v(k-1)] |\Delta^2 e(k)| \\ 0.025 &\leq C \leq 0.05 \quad 0.05 \leq L \leq 0.1 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

在长时延 NCS 中使用结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制器具有如下优点:从网络时延出发,可以同时实现对从控制器到执行器之间的网络时延与从传感器到控制器之间的网络时延的动态补偿。结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制器中不再包含网络时延的预估模型,无须知道所有网络时延及其变化规律。因此在网络时延是随机、时变、不确定、大于数个乃至数十个采样周期的情况下,只要被控对象的预估模型与被控对象的真实模型完全相同,那么就可以对 NCS 做到时延的完全补偿。从被控对象出发,要取得清晰的被控对象模型实际上比较困难。结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制器中的单神经元 PSD 用来控制系统对象、适应系统参数变化、自动调整控制参数、提高系统的响应速度和稳态性能,使得系统在被控对象的预估模型与真实模型发生偏差或被控对象为时变时仍保持良好的控制性能。

4 系统仿真实验

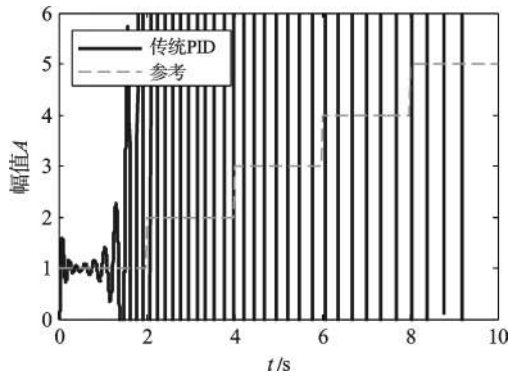
为了验证结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制器在长时延 NCS 中的有效性,本研究通过使用 Matlab 环境中的 TrueTime 工具箱,进行了基于结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 的长时延 NCS 的仿真实验。TrueTime 工具箱是瑞典隆德(Lund)大学自动化系的 Dan Henriksson 和 Anton Cervin 等学者设计的一种基于 Matlab/Simulink 的 NCS 仿真工具箱^[11-12]。

仿真使用 Matlab 环境中的 TrueTime 1.5 工具箱^[13],在基于 CAN 网络的长时延 NCS 中使用直流电机作为系统被控对象,其传递函数为:

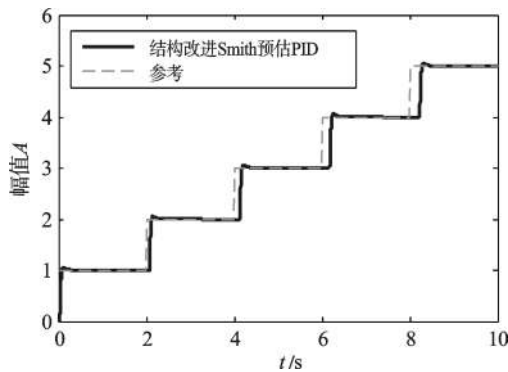
$$G(s) = \frac{1 \ 000}{s^2 + 10s + 10} \quad (14)$$

本研究利用 TrueTime Kernel 和 TrueTime Network 构建传感器、控制器、执行器和网络节点。控制器分别采用传统 PID 控制、结构改进 Smith 预估 PID 控制和结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制的 3 种控制策略。其中,结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制的初始加权系数可任意选取,即可将初始加权系数设为 rand 函数来模拟 0~1 之间的随机数,学习速率为 $\eta_p = 2 \ 200.5, \eta_i = 22.6, \eta_d = 20 \ 200.4$,比例系数 $K(0)$ 初值为 3.05, $T_v(0)$ 初值为 50。通过观察长时延 NCS 在模型匹配与模型失配时 3 种控制器的系统响应曲线,来验证结构改进 Smith 预估单神经元 PSD 控制器在长时延 NCS 中的有效性。

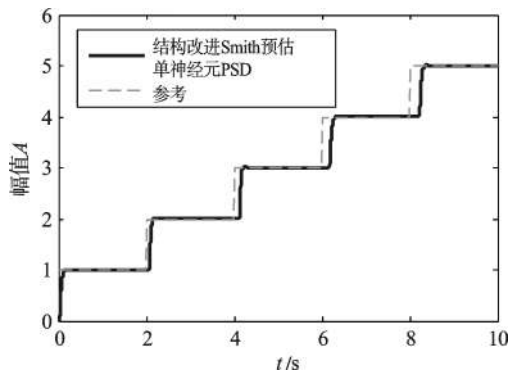
首先,当系统模型匹配时,使用不同控制策略的长时延 NCS 仿真结果如图 6 所示。可见,基于传统



(a) 传统PID控制



(b) 结构改进Smith预估PID控制



(c) 结构改进Smith预估单神经元PSD控制

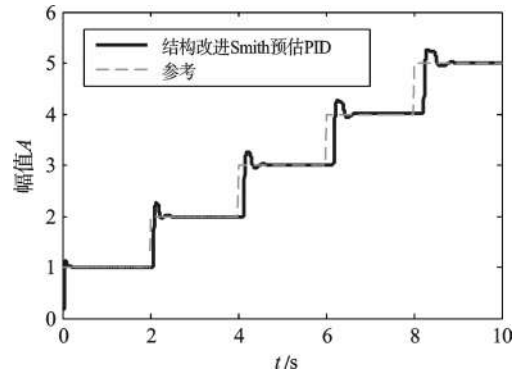
图6 不同控制策略的长时延NCS响应曲线(模型匹配)

PID的长时延NCS在大时延的作用下系统发散不稳定。这说明传统PID控制无法对长时延NCS中的网络时延进行补偿,该控制器并不适用于长时延NCS。基于结构改进Smith预估PID的长时延NCS和基于结构改进Smith预估单神经元的长时延NCS在模型匹配的情况下均获得了良好的控制效果。相比而言,基于结构改进Smith预估PID的长时延NCS的控制性能略差,响应曲线超调将近3.5%,而基于结构改进Smith预估单神经元的长时延NCS的控制性能较好,响应曲线几乎无超调。

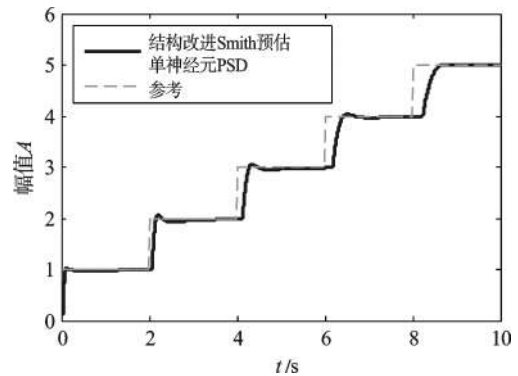
其次,当系统模型失配时,即系统被控对象的传递函数改为:

$$G(s) = \frac{1\ 200}{s^2 + 10s + 10} \quad (15)$$

仿真结果如图7所示。可见,基于结构改进Smith预估PID的长时延NCS响应曲线在模型失配的情况下,随着时延的增加,超调逐渐增大,10 s内的最大超调将近26.5%;基于结构改进Smith预估单神经元PSD的长时延NCS响应曲线在模型失配的情况下,仍就获得了良好的控制性能,最大超调将近6.7%、响应结果稳定。



(a) 结构改进Smith预估PID控制



(b) 结构改进Smith预估单神经元PSD控制

图7 不同控制策略的长时延NCS响应曲线(模型失配)

综合上述实验结果可知,相比使用3种不同控制策略的长时延NCS,基于结构改进Smith预估单神经元的长时延NCS在系统模型匹配和失配的情况下均表现出了更好的控制性能,验证了结构改进Smith预估单神经元PSD控制器在解决长时延NCS的时延和被控对象等问题中是有效且可行的。

5 结束语

通过研究长时延NCS控制器的设计问题,在分析了网络时延对NCS性能的影响之后,本研究提出了新型结构改进Smith预估单神经元PSD控制器。以结构改进Smith预估器来对难以预估的网络时延进行补偿,同时结合单神经元PSD控制器来解决结构改进Smith预估器的模型失配问题。通过仿真实验验证了新型控制器的有效性,研究结果表明,使用新型控制器的长时延NCS响应曲线超调小、调节时间短,当模

型失配时,系统仍保持了良好的控制性能,达到了较好的控制效果。新型控制器有效地解决了长时延NCS中的时延和被控对象等问题,且控制性能理想,在工业过程控制和航空等领域的长时延NCS控制器设计方案中具有一定的参考意义和工程实用价值。

参考文献(References):

- [1] 邱占芝,张庆灵,杨春雨. 网络控制系统分析与控制[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 唐会娟,谢佩章. 基于改进专家PID和预整定Smith预估控制器的磁悬浮球系统的网络控制仿真[J]. 自动化技术与应用,2009,28(4):4-7.
- [3] 张俊,刘克,薛燕. 基于时延预估的网络控制系统研究[J]. 控制工程,2007,14(1):82-84,110.
- [4] 史婷娜,王素娟,方红伟,等. 基于预估补偿的网络控制系统模糊免疫PI控制[J]. 天津大学学报,2009,42(11):959-964.
- [5] 杜峰,钱清泉,杜文才. 基于新型Smith预估器的网络控制系统[J]. 西南交通大学学报,2010,45(1):65-69,81.
- [6] 王宏文,唐永学,朱桂梅,等. 网络控制系统不同节点驱动方式的时延研究[J]. 计算机测量与控制,2011,19(6):

1432-1434,1437.

- [7] 申亮,谢伟东. 永磁直流无刷电机改进的单神经元PID自适应控制仿真研究[J]. 机电工程,2011,28(3):369-373.
- [8] 关守平,周玮,尤富强. 网络控制系统与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [9] 施志钢,胡松涛,王刚,等. 应用神经元自适应PSD控制变频空调系统的仿真研究[J]. 暖通空调HV&AC,2006,36(11):18-21.
- [10] 陈坤,刘星桥. 张力伺服控制系统张力环超调的研究[J]. 微电机,2011,44(10):69-73.
- [11] HENRIKSSON D, CERVIN ARZEN K E. True Time: real-time control system simulation with Matlab/simulink [C]. Proceedings of the Nordic Matlab Conference, Copenhagen:Denmark,2003.
- [12] CERVIN A, HENRIKSSON D, LINCOLN B, et al. Jitter-bug and TrueTime: analysis tools for real-time control system [C]. Proceedings of the 2nd Workshop on Real-Time Tools. Copenhagen:Denmark,2003.
- [13] 沈永增,贾莲莲,陈宣扬. 基于TrueTime的无线网络仿真模型研究[J]. 机电工程,2011,28(7):855-858,886.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

袁士丞,方建安. 基于结构改进Smith预估单神经元PSD的长时延NCS研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1558-1563.

YUAN Shi-cheng, FANG Jian-an. NCS with long time-delay based on structure improved Smith predictor with single neuron PSD control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(12):1558-1563.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1553页)

的电磁兼容型式试验技术进行了系统地阐述,为相关人员特别是制造商提供了参考,以便依据试验方法及要求,在设计阶段就采取合理的措施,如确保电感电容元件接地良好、合理设计PCB布线、提高元件焊接工艺等,以提高电磁兼容性型式试验的一次性通过率,避免后期改动设计造成时间和成本上的损失。

参考文献(References):

- [1] 吴光亮,杜战. 浅谈万能式断路器在我国的发展与创新[J]. 电器工业,2011(4):56-58.
- [2] 戴水东. 新型配用电用低压万能式断路器的研发[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.
- [3] 曾庆军,金升福,黄巧亮,等. 关于万能式断路器智能控制器[J]. 电力自动化设备,2004(2):79-83.
- [4] 万绍尤,陈正馨,顾惠民,等. GB 14048. 2-2008 低压开关设备和控制设备 第2部分:断路器[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [5] 国网武汉高压研究院. GB/T 17626. 13-2006 电磁兼容试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信

号的低频抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

- [6] 王英,洪齐晔,寿建霞,等. GB/T 17626. 2-2006 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [7] 国家标准委员会. GB/T 17626. 3-2006 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [8] 王英,万保权,翁海丰,等. GB/T 17626. 4-2008,电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [9] 信息产业部电子工业标准化研究所. GB/T 17626. 5-2008 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [10] 朱琳,林京平,曲林,等. GB/T 17626. 6-2008,电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [11] 国家标准委员会. GB 4824-2004 工业、科学和医疗(ISM) 射频设备 电磁骚扰特性 限值和测量方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[编辑:洪炜娜]