

## 基于自抗扰技术的网络化无刷直流电机控制系统时延补偿

张文安, 刘凯, 俞立, 董辉

(浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 采用自抗扰控制技术解决网络化无刷直流电机转速控制系统的时延补偿问题. 首先, 建立含有时变网络诱导时延的无刷直流电机控制系统模型, 并将时变时延引起的不确定动态描述为系统模型的不确定性; 然后, 设计自抗扰控制器, 对时延引起的不确定动态进行动态线性化补偿, 从而消除时变时延对系统性能的影响; 最后, 通过仿真研究表明了所设计的自抗扰补偿方法的有效性和优越性.

**关键词:** 网络化控制系统; 时延补偿; 无刷直流电机; 自抗扰控制

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Delay compensation for networked brushless DC motor control systems based on active disturbance rejection technique

ZHANG Wen-an, LIU Kai, YU Li, DONG Hui

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China. Correspondent; ZHANG Wen-an, E-mail: wazhang@zjut.edu.cn)

**Abstract:** The active disturbance rejection control technique is applied to solve the delay compensation problem of the networked brushless DC motor speed control system. Firstly, an uncertain system model is presented to describe the DC motor control system with time-varying network induced delay, where the dynamics induced by the uncertain part of the delay is described by the model uncertainties. Then, an extended state observer(ESO) is designed to estimate the uncertainty of the motor speed control system model. Finally, an example is presented to show the effectiveness and superiority of the proposed active disturbance control method.

**Keywords:** networked control systems; delay compensation; brushless DC motor; active disturbance rejection control

### 0 引言

随着工业生产规模的不断扩大, 对生产过程的安全要求的不断提高, 传统的运动控制系统越来越无法满足实际需求. 现代网络控制技术的发展, 使得网络化控制取代传统控制方式成为可能. 目前, 网络化运动控制已广泛地应用于数控机床、工业机械手等领域<sup>[1]</sup>. 在网络控制系统中, 用通讯网络连接传感器、控制器和执行器<sup>[2]</sup>, 与传统的控制系统相比, 它具有诸多优点, 例如可以远程操控、减少系统的连线、便于安装与维护以及系统信息集成和共享等. 但是, 将通信网络引入控制回路也带来一些新的问题. 由于信息传递的分时复用原则, 并限于网络的带宽和承载能力, 必然会造成信息的冲撞、重传等现象, 从而导致信息在控制回路的传输过程中产生网络诱导时延, 而且时

延是随着网络负载变化而变化的, 是时变的、不确定的. 这种时变网络诱导时延使得系统控制输入不能及时更新, 从而导致系统性能下降甚至失稳<sup>[3-4]</sup>. 特别地, 对于快变的运动控制系统, 该问题显得尤为严峻, 亟需提出有效的时延补偿方法.

网络诱导时延通常分为两类, 即大于一个采样周期的长时延和小于一个采样周期的短时延. 其中, 长时延的情况在实际系统中出现的频率并不高, 但长时延对运动控制系统会有很大的影响, 工程上一般通过改善网络协议和结构等措施将时延尽可能地减小, 但是短时延的存在往往是不可避免的. 针对短时延, 目前常用的时延补偿方法有: 鲁棒控制方法<sup>[5-6]</sup>、Smith 预估器补偿方法<sup>[7]</sup>和采用时间驱动执行器进行人为延长时延的方法等. 其中: 鲁棒控制方法不需要

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2015-01-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273117); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0998).

作者简介: 张文安(1982-), 男, 教授, 博士, 从事网络化控制等研究; 刘凯(1987-), 男, 硕士生, 从事网络控制、机械臂控制的研究.

精确知道网络时延的大小,且鲁棒控制器具有较好的抗干扰能力,但保守性较大;Smith预估器方法是用一个预估模型对时延进行补偿,但是它了对电机模型的精确性要求较高,这在实际中往往难以实现;采用时间驱动执行器的人为延长时延的方法能够将时变时延转化为定常时延,有利于控制器的设计,但会导致系统的控制输入不能及时更新,降低了系统的控制性能.时变时延的存在使得电机控制系统中含有不确定性动态,以上提及的方法都不能准确地对不确定动态进行估计和补偿.

本文采用自抗扰技术解决网络化无刷直流电机控制系统的时延补偿和转速控制问题.其主要思想是将时变时延引起的电机控制系统不确定动态描述为系统的不确定性,进而将这种不确定转化为系统的加性噪声,通过设计扩张状态观测器可以较准确地估计这些加性噪声.进一步,设计自抗扰控制器,对这些噪声和其他模型不确定性进行动态线性化补偿,从而可以消除时变时延对系统性能的影响,实现时变时延的实时补偿和电机转速的实时跟踪控制.最后,通过仿真研究将自抗扰的时延补偿方法与Smith预估器补偿方法进行比较,验证了本文所提出方法的有效性和优越性.

## 1 网络化无刷直流电机控制系统的建模

由于网络的引入,数据在传输过程中存在时延,主要包括从传感器到控制器之间的时延和控制器到执行器之间的时延<sup>[8]</sup>.假设网络不存在丢包情况,典型的网络控制系统结构如图1所示.其中: $\tau_k^{sc}$ 、 $\tau_k^{ca}$ 分别表示传感器到控制器和控制器到执行器之间的时延,控制回路总时延为 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$ .考虑时延小于一个采样周期的情况,即 $0 \leq \tau_k < T$ .传感器节点采用时间驱动,以固定的采样周期 $T$ 对被控对象进行采样.控制器节点和执行器节点均为事件驱动<sup>[9]</sup>.

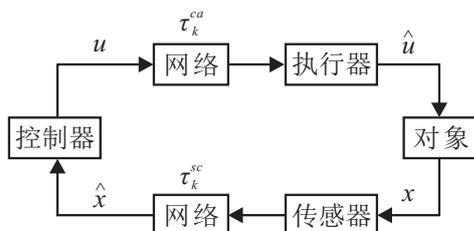


图1 具有时延的网络控制系统结构

无刷直流电机系统模型可由如下传递函数模型描述<sup>[10]</sup>:

$$\frac{N(s)}{U(s)} = \frac{b}{s^2 + as + c}. \quad (1)$$

其中: $a = \frac{r}{L - M}$ ,  $b = \frac{30K_e}{J(L - M)\pi}$ ,  $c = \frac{2K_e^2}{J(L - M)}$ ,  $r$ 是定子相绕组的电阻,  $L$ 是绕组的自感,  $M$ 是两相绕组间的互感,  $K_e$ 是电动势系数,  $J$ 是电机转动惯量.将

式(1)所示的传递函数模型写成如下状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -cx_1 - ax_2 + bu. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_1$ 和 $x_2$ 分别是直流电机的转速和加速度,  $u$ 是控制量.

考虑时延是在一个采样周期内变化的短时延情况,由网络控制系统数据传输的时序可知

$$u(t) = \begin{cases} u_{k-1}, & t_k \leq t \leq t_k + \tau_k; \\ u_k, & t_k + \tau_k \leq t \leq t_k + T. \end{cases} \quad (3)$$

其中 $t_k$ 表示第 $k$ 个采样时刻.因此含有时变时延网络系统的离散时间模型为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k), \\ x_2(k+1) = \\ e^{-aT}x_2(k) - \frac{b}{a}(e^{-a(T-\tau_k)} - 1)u(k) - \\ \frac{b}{a}(e^{-aT} - e^{-a(T-\tau_k)})u(k-1) + \\ \frac{c}{a}(e^{-aT} - 1)x_1(k). \end{cases} \quad (4)$$

为便于后续扩张状态观测器的设计,对式(4)进行变换,得

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2, \\ x_2(k+1) = \\ x_2(k) + T\left(-ax_2(k) - \frac{b}{aT}(e^{-a(T-\tau_k)} - 1)u(k) - \right. \\ \left. \frac{b}{aT}(e^{-aT} - e^{-a(T-\tau_k)})u(k-1) + \right. \\ \left. u(k-1) + \frac{c}{aT}(e^{-aT} - 1)x_1(k)\right). \end{cases} \quad (5)$$

令

$$x_3(k) = -ax_2(k) - \frac{b}{aT}e^{-a(T-\tau_k)}u(k) + \frac{c}{aT}(e^{-aT} - 1)x_1(k) - \frac{b}{aT}(e^{-aT} - e^{-a(T-\tau_k)})u(k-1),$$

并记 $x_3(k+1) = x_3(k) + Tw(k)$ ,其中 $w(k) = (x_3(k+1) - x_3(k))/T$ ,则由式(5)可得如下包含扩张状态 $x_3(k)$ 的新的系统模型:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k), \\ x_2(k+1) = x_2(k) + T\left(x_3(k) + \frac{b}{aT}u(k)\right), \\ x_3(k+1) = x_3(k) + Tw(k). \end{cases} \quad (6)$$

## 2 自抗扰控制器的设计

为如式(6)所示的网络化无刷直流电机控制系统设计自抗扰控制器,其中包括跟踪微分器<sup>[11]</sup>、扩张状态观测器<sup>[12]</sup>和状态误差反馈控制律<sup>[13]</sup>三部分,其设计过程如下.

1) 安排过渡过程.给定信号 $v_0$ 作为参考输入.通

过安排过渡过程,一方面可以获得转速的过渡信号,解决转速跟踪快速性与超调之间的矛盾;另一方面,可以获得转速的近似微分信号.过渡过程安排和参考输入微分信号的提取可通过如下跟踪微分器获得:

$$\begin{cases} e(k) = v_1(k) - v_0(k), \\ fh = fhan(e(k), v_2(k), r_0, h_0), \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k), \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hfh. \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $fhan(e, v_2, r_0, h_0)$  为最速跟踪控制综合函数,参数  $r_0$  为跟踪微分器的快速因子,参数  $h_0$  为跟踪微分器的滤波因子,  $h$  为积分步长.

2) 设计扩张状态观测器. 扩张状态观测器可以将时变时延引起的不确定动态作为总和扰动的一部分予以估计,则有

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - v_1(k), fe = fal(e(k), 0.5, \delta), \\ fe1 = fal(e(k), 0.25, \delta), \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k)), \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fe + b_0u(k)), \\ z_3(k) = z_3(k) + h(-\beta_{03}fe1). \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $fal(e(k), 0.25, \delta)$  为非线性函数,  $\delta, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$  为一组待整定的参数.

3) 状态误差反馈控制律. 通过状态观测器对总和扰动的估计,在求出的控制量中减去总和扰动,即  $u_0(k) - z_3(k)$ . 当控制量作用到对象时可以消除时变时延对系统性能的影响,有

$$\begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k), e_2(k) = v_2(k) - z_2(k), \\ u_0(k) = -fhan(e_1(k), ce_2(k), r, h), \\ u(k) = aT(u_0(k) - z_3(k))/b. \end{cases} \quad (9)$$

步骤 2) 中的非线性函数  $fal(e, a, \delta)$  描述如下:

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{a-1}}, |e| \leq \delta; \\ |e|^a \text{sign}(e), |e| > \delta. \end{cases} \quad (10)$$

步骤 1) 和步骤 3) 中的最速跟踪控制综合函数  $fhan(x_1, x_2, r, h)$  的具体形式为

$$\begin{cases} d = rh; \\ d_0 = hd; \\ y = x_1 + hx_2; \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|}; \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y), |y| > d_0; \\ x_2 + \frac{y}{h}, |y| \leq d_0; \end{cases} \\ fhan = - \begin{cases} r \text{sign}(a), |a| > d; \\ r \frac{a}{d}, |a| \leq d. \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

### 3 仿真示例

考虑如式(1)所示的无刷直流电机系统模型. 在仿真实验中,取参数  $a = 125, b = 3814, c = 500$ . 给定电机转速  $2000 \text{ r/min}$  作为参考值,采样周期  $T = 0.01 \text{ s}$ ,考虑网络诱导时延小于一个采样周期的情况,即  $0 \leq \tau_k < T$ . 跟踪微分器中快速因子  $r_0 = 120$ ,滤波因子  $h_0 = 0.01$ ,积分步长  $h = T$ ; 状态观测器中参数  $\beta_{01} = 100, \beta_{02} = 300, \beta_{03} = 8000, \delta = 0.01, b_0 = 3051.2$ ; 非线性反馈控制律中取  $c = 1, r = 100, h = 0.01$ .

图 2 给出了自抗扰控制电机转速跟踪曲线. 由图 2 可以看出,在有时变时延的无刷直流电机控制系统中,采用自抗扰控制方法对时延进行补偿后,电机转速跟踪具有很快的响应速度,而且跟踪曲线稳定,没有超调和稳态误差,说明由网络诱导时延产生的不确定动态得到有效补偿,电机控制系统基本不受时变时延对其性能的影响.

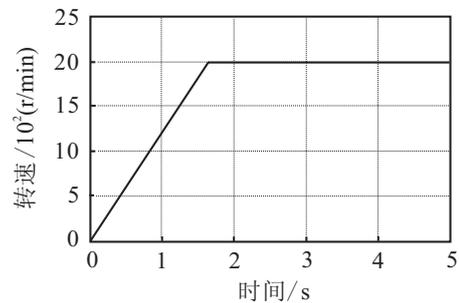


图 2 自抗扰控制电机转速跟踪曲线

图 3 给出了自抗扰控制电机转速跟踪曲线(加随机外扰). 由图 3 可以看出,转速同样能很快地跟踪上给定的参考值,且达到稳定值后没有出现明显抖动,这表明在有外部扰动时仍然能使具有时变时延影响的网络控制系统稳定.

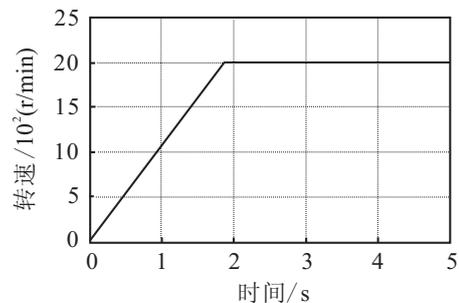


图 3 自抗扰控制电机转速跟踪曲线(加随机外扰)

为了更好地说明自抗扰控制算法的优越性,将其与 Smith 预估器方法进行比较. 给定相同参考值,分别对没有外部扰动和加入外部扰动时进行仿真,对应的仿真曲线分别如图 4 和图 5 所示. 从图 4 可以看出,系统响应存在一定的延时,同时曲线上升过程有超调,而且达到稳定的时间明显比自抗扰方法时间

长. 图5中加入了外部扰动, 当达到稳定值时有明显的波动, 抗干扰能力也较差.

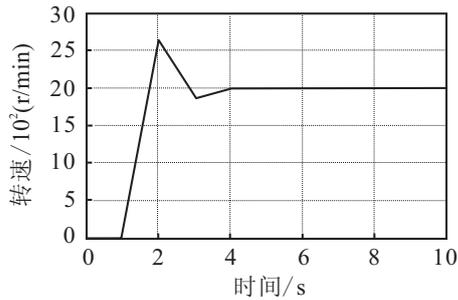


图4 Smith 预估计电机转速跟踪曲线

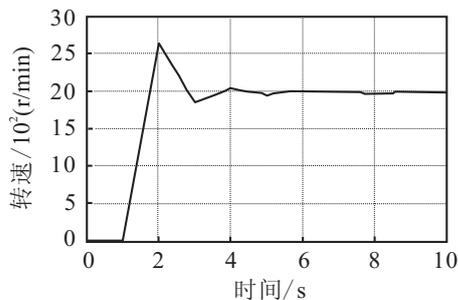


图5 外部扰动时Smith 预估计电机转速跟踪曲线

综上所述, 本文所设计的自抗扰控制器能够实现对外部扰动具有一定的抗干扰能力, 相较于改进后的Smith 预估计方法具有一定的优势.

## 4 结论

本文采用自抗扰控制方法设计了网络化无刷直流电机系统的时延补偿控制器, 该方法可以有效地将时变网络诱导时延引起的不确定动态用扩张状态观测器实时估计并补偿. 仿真过程中加入随机噪声, 系统依然可以获得很好的控制品质, 从而验证了所设计的自抗扰算法对时延引起的不确定性和系统内外扰动以及模型不确定性均具有很强的抑制能力.

## 参考文献(References)

- [1] 俞立, 张文安. 网络化控制系统分析与设计——切换系统处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
(Yu L, Zhang W A. Networked control system analysis and design — Switched systems processing method[M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [2] Li S H, Bai T, Shi P, et al. Sampled-data control of networked linear control systems[J]. Automatic, 2007, 43(5): 903-911.
- [3] Zhang W A, Yu L. A robust control approach to stabilization of networked control systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2009, 45(10): 2440-2445.
- [4] Gao H J, Chen T W, Lam J. A new delay system approach to network-based control[J]. Automatica, 2008, 44(1): 39-52.
- [5] Yu M, Wang L, Chu T G, et al. An LMI approach to networked control systems with data packet dropout and transmission delays[J]. IEEE Conf on Decision & Control, 2004, 4(5): 3545-3550.
- [6] Pan Y J, Marquez, Chen H J. Stabilization of remote control systems with unknown time varying delays by LMI techniques[J]. Automation and Control System, 2005, 79(7): 752-763.
- [7] Dragolj E, Brankovic A, Velagic J, et al. Compensation of time-varying delay acting in networked control systems using adaptive Smith predictor and parallel fuzzy-PI controller[C]. IEEE Int Conf on. 2011: 979-984.
- [8] 聂雪媛, 王恒. 网络控制系统补偿器设计及稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 217-222.  
(Nie X Y, Wang H. Compensator design & stability analysis for networked control systems[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 217-222.)
- [9] Xie D, Wu Y, Chen X. Stabilization of discrete-time switched systems with input time delay and its applications in networked control systems[J]. Circuits, Systems Signal Processing, 2009, 28(4): 595-607.
- [10] 王雷, 蒋静坪. 无刷直流电机自适应补偿最优状态反馈速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 101-107.  
(Wang L, Jiang J P. Brushless direct-current motor option state feedback drive control with adaptive compensation[J]. Proc of the CSEE, 2008, 28(24): 101-107.)
- [11] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1: 24-31.  
(Han J Q. Auto disturbances rejection control technique[J]. Frontier Science, 2007, 1: 24-31.)
- [12] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.  
(Han J Q. The extended state observer of a class of uncertain system[J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.)
- [13] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律——NLSEF[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 221-225.  
(Han J Q. Nonlinear state error feedback control law — NLSEF[J]. Control and Decision, 1995, 10(3): 221-225.)

(责任编辑: 李君玲)