

网络控制系统的模糊 P 控制方法^{*}

宋传玉

(上海神火铝箔有限公司, 上海 201319)

摘 要: 针对远程网络运动控制系统中普遍存在的时滞问题, 将模糊逻辑补偿算法引入传统 P 控制器的设计, 以消除闭环网络控制系统中由时滞引起的控制性能下降、系统不稳定等不利影响。以模糊补偿器调节 P 控制器的输出, 采用离线寻优与在线自适应相结合的方式, 实现模糊逻辑条件参数与结论参数的全局自整定。以实时性要求较高的无刷直流电机为应用实例, 仿真结果证明了该控制算法的有效性和可行性, 该方法可使具有时滞特性的远程网络控制系统保持良好的动、静态特性和较强的抗干扰能力。

关键词: 网络控制系统; 模糊 PI 复合控制; 时滞补偿

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)08-0033-04

Fuzzy PI Control Strategies of Networked Control System

SONG Chuan-yu

(Shanghai Shenhuo Aluminium Foil Co., Ltd., Shanghai 201319, China)

Abstract: When using a remote networked control system, a network-induced time-delay is generated, which causes adverse effects on the closed-loop networked control system such as performance degradation and system destabilization. In this paper, contraposing the time-delay commonly existing in the remote control system, an intelligent fuzzy logic compensator is introduced to design the traditional networked PI control system. In the full adaptive fuzzy parameter adjustment, off-line optimization and on-line adaptation are applied to the design of the controller, and not only the consequent parameters can be tuned adaptively, but also the membership functions in the antecedent part are tuned adaptively. Simulation results of a networked controlled Brushless DC motor is used to illustrate the effectiveness and feasibility of the proposed fuzzy PI control scheme.

Key words: remote networked motion control system; fuzzy PI synthesis control; time-delay compensation

0 引言

随着现代控制系统规模的扩大, 远程网络控制的应用也日益广泛^[1]。网络运动控制系统将实时网络纳入闭环形成反馈控制系统, 因而具有成本低廉、控制分散、易于扩展与集成、维护与故障诊断简易等优点, 但分时传输的特性使得网络时滞成为影响控制性能和系统稳定性的主要因素之一^[2]。因此, 如何使具有时滞特性的运动控制网络依然保持稳定的高性能, 成为控制算法设计人员迫切需要解决的关键问题^[3-4]。

针对网络时滞的随机时变特性, 本文将智能模糊逻辑引入控制系统, 在不更改传统 PI 控制网

络结构的基础上, 利用模糊补偿器调节 P 控制器的作用力, 以消除网络时滞对控制系统产生的不利影响。将对实时性要求较高的无刷直流电机作为远程控制对象, 仿真结果表明: 这种新型的模糊 PI 时滞补偿算法的收敛速度快, 动、静态控制性能好, 抗负载扰动强, 证明了其有效性与可行性。

1 问题描述

图 1 为网络控制系统的离散时间模型, 可将 R 、 C 细化为 3 类时滞: 传感器 控制器时滞 k, sc 、控制器计算时滞 k, c 和控制器 执行器时滞 k, ca 。

控制上的滞后使得中央控制器的输出信号比被控对象要求的控制信号强, 导致系统控制性能

*国家重点基础研究发展计划 (2005CB221505)

下降,因而网络时滞 $\tau_{k,sc}$ 、 $\tau_{k,ca}$ 对系统性能,如上升时间、调节时间、超调量等,有较大影响,严重时,甚至可能引起系统不稳定。网络时滞的不确定性又使得经典控制理论的应用受到了较多限制,因此,如何将先进控制方法应用于对实时性要求较高的网络运动控制系统,设计出高性能的网络控制器成为研究的热点^[5]。

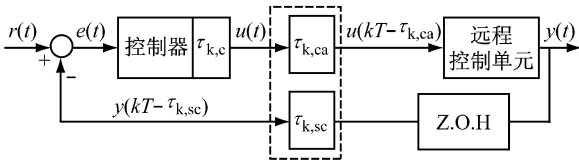


图 1 网络控制系统离散时间模型的结构框图

2 模糊 P 时滞补偿算法的设计

传统的 P 网络控制系统的传递函数为:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

若考虑网络时滞,则有:

$$u_R(t) = u_C(t - \tau_R), \quad y_C(t) = y_R(t - c)$$

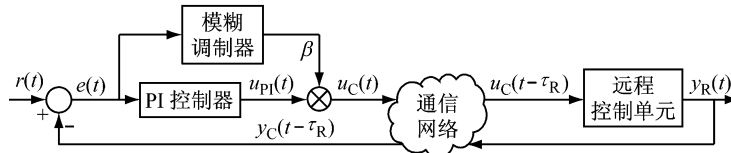


图 2 模糊调制的网络控制系统结构框图

设计模糊逻辑调制器的输入为参考信号 $r(t)$ 与网络反馈信号 $y_C(t - \tau_R)$ 的差值 $e(t)$, 输出为补偿网络时滞对 PI 控制器影响的调制参数。模糊补偿器的设置仅两条规则语句:

If $e(t)$ is Small, then $\beta = \beta_1$;

If $e(t)$ is Large, then $\beta = \beta_2$;

其中: β_1 、 β_2 为结论参数。

模糊调制器的输入、输出隶属度函数满足:

$$\mu_{\text{small}}(e) = \begin{cases} 1 & , e/r \leq \tau_{11} \\ \frac{\tau_{12} - e/r}{\tau_{12} - \tau_{11}} & , \tau_{11} < e/r < \tau_{12} \\ 0 & , e/r > \tau_{12} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{large}}(e) = \begin{cases} 1 & , e/r \geq \tau_{21} \\ \frac{e/r - \tau_{22}}{\tau_{22} - \tau_{21}} & , \tau_{21} < e/r < \tau_{22} \\ 0 & , e/r > \tau_{22} \end{cases}$$

定义 $e(t) = r(t) - y_R(t - c)$, 则 PI 控制器可采用以下表示形式:

$$u_{PI}(t) = u_C(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt = K_p [r(t) - y_R(t - c)] + K_i \int [r(t) - y_R(t - c)] dt$$

网络系统的通信具有随机性和非线性时变的特点,因此难以建立精确的数学模型。当被控对象的参数和结构不确定或未知时,传统控制方法很难确保理想的控制性能,而采用模糊逻辑控制则是有效的解决方法。

图 2 为带有模糊调制作用的远程网络控制系统框图,此时,中央控制器的输出满足关系式:

$$u_C(t) = \beta u_{PI}(t) \quad (1)$$

式中: β 为模糊调制器输出的调制参数,用于提高网络时滞变化时 P 控制器的性能表现。

模糊调制的基本原理是:通过对远程被控单元输入量的调制,如减小 PI 控制的增益,使中央控制器的输出符合控制对象所需的控制量,防止进入不稳定的运行状态,同时确保获得理想的动态响应特性。

式中: $0 < \tau_{11} < \tau_{12} < \tau_{21} < \tau_{22} < 1, 0 < \beta_1 < \beta_2 < 1$ 。

模糊调制参数 β 采用中心解模糊方法获得:

$$\beta = \frac{\beta_1 \mu_{\text{small}}(e) + \beta_2 \mu_{\text{large}}(e)}{\mu_{\text{small}}(e) + \mu_{\text{large}}(e)}$$

采用离线方式寻找模糊调制器参数的优化设置,选择性能指标函数:

$$J = J_1 + (1 - \lambda) J_2$$

其中:

$$J_1(p) = \frac{\sum_{k=0}^N e(k)^2}{J_1(p)}; \quad J_2(p) = \frac{\sum_{i=0}^M e_b(k)^2}{J_2(p)};$$

$$p = [\beta_1, \beta_2, \tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22}];$$

$$\{ e_b(i) \} = \{ e(k) \mid e(k), e(k) > 0 \};$$

J_1 ——系统的响应速度和收敛特性;

J_2 ——系统超调、欠调、振荡的现象;

λ —— J_1 、 J_2 之间的权重系数。

给定一个搜索领域,即可在其中搜索出性能

指标函数最小时的模糊调制器参数 ($\mu_1, \mu_2, \mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{22}$), 获得不同给定条件下的调制器优化参数。

运用离线寻优, 对于每一对给定的采样周期、时滞参数对 (h, τ) 和给定的 ω , 都可采用查表法来选择优化的模糊调制器参数, 但当网络上出现了表中未包含的状态时, 就需使模糊调制器具有在线自适应的功能。在线实时控制时, 全局自适应调制通过中间件监测系统状态和网络服务品质 $QOS(t)$, 使之与期望的控制性能作对比, 设计自适应控制律, 实时更新模糊调制器的条件参数 ($\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{22}$) 和结论参数 (μ_1, μ_2), 确保性能指标函数为最小。

应用梯度下降算法设计模糊调制器的全局自适应控制律, 瞬时性能指标函数选择为:

$$J(k) = e(k)^2$$

模糊 PI 复合控制器的输出控制力可用差分方程表示为:

$$u(k) = u(k-1) + \left[K_p + \frac{K_i h}{2} \right] e(k) + \left[-K_p + \frac{K_i h}{2} \right] e(k-1)$$

式中: h ——采样周期。

3 应用实例

以无刷直流电机为被控对象进行网络控制系统的仿真研究, 验证模糊 PI 时滞补偿算法的有效性。若令状态向量 $x = [x_1 \ x_2]^T = [i_a \ \omega]^T$, 则由无刷直流电机的数学模型^[6]可得被控对象的状态空间方程为:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d i_a}{dt} \\ \frac{d \omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L-M} & -\frac{K_b}{L-M} \\ \frac{K}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \ 1]x$$

式中: i_a ——电枢绕组电流;
 ω ——电机机械转速;
 R ——电枢绕组电阻;
 L ——电枢绕组电感;

M ——电枢绕组互感;
 J ——转动惯量;
 B ——阻尼系数;
 K ——转矩常量;
 K_b ——反电动势常量。

设网络时滞随机, 且最大时滞不超过 10 个采样周期, 即 $\tau < 10 h_0$ 。考虑网络时滞及系统噪声, 在 MATLAB/Simulink 中搭建远程网络控制无刷直流电机的仿真模型, 系统参数设置为: 采样周期 $h = 0.001$ s, 电枢绕组电阻 $R = 1$ Ω , 自感 $L = 0.02$ H, 互感 $M = -0.0067$ H, 转动惯量 $J = 0.005$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$, 阻尼系数 $B = 0.002$ $\text{N} \cdot \text{m}$, 转矩常量 $K = 1.538$ $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$, 反电动势常量 $K_b = 0.763$ $\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$, 网络时滞在 $[0 \ 10 h_0]$ 内随机分布。系统带 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载转矩起动, 待进入稳态后, 在 $t = 0.2$ s 时突加负载转矩至 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在 $t = 0.4$ s 时突减负载转矩至零, 系统进入空载运行, 在 $t = 0.5$ s 时改为反转运行, 带有 $-2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩, 在 $t = 0.7$ s 时突增负载转矩至 $-5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在 $t = 0.9$ s 时突减负载转矩至零, 系统再次进入空载运行, 可得到系统在参考转速为 $2000 \text{ r}/\text{min}$ 时的转速、a 相电流波形如图 3~6 所示。

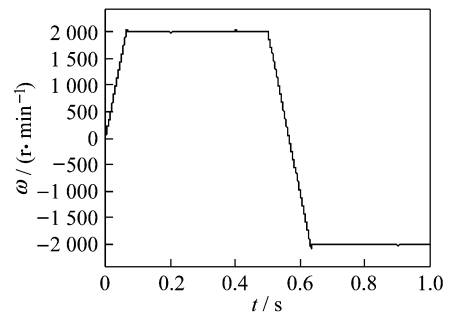


图 3 电机转速波形 (模糊 PI 控制)

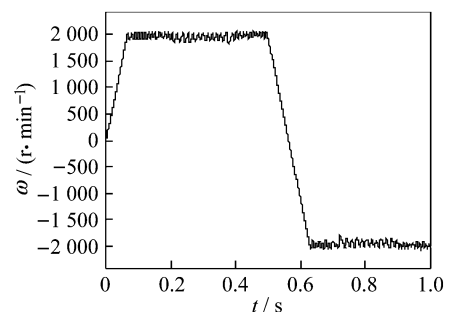


图 4 电机转速波形 (传统 PI 控制)

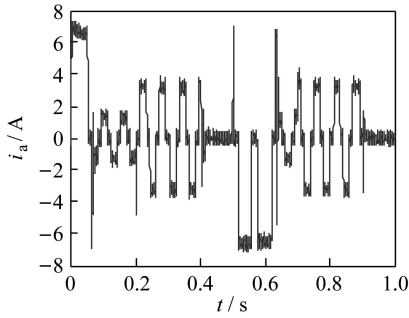


图 5 a相电流波形 (模糊 P 控制)

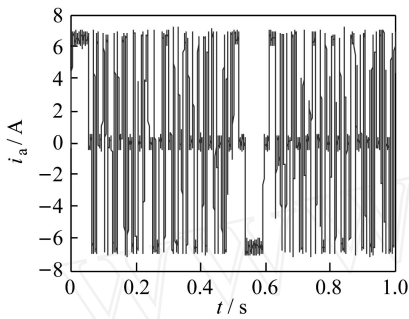


图 6 a相电流波形 (传统 P 控制)

仿真结果表明:采用模糊 P 时滞补偿算法的网络控制系统,在 2 000 r/min 的参考转速下,响应快速且平稳,相电流和转速波形较为理想;在 $t=0.2$ s 或 0.7 s 时突加负载,转速发生突降,但又能迅速恢复到平衡状态;同样,在 $t=0.4$ s 或 0.9 s 时将负载转矩突减至零,转速发生突增,但也能够迅速恢复到平衡状态,稳态运行无静差,动、静态性能令人满意。较传统 PI 控制,这种新型控制方法响应快、超调小、鲁棒性较强、脉动幅度小、抗干扰能力好,仿真结果证明了该方法的有效性和可行性。

4 结 语

基于模糊逻辑理论,设计了模糊 P 时滞补偿算法,模糊调制器充分利用了模糊控制理论规则少、应用简单灵活的特点,与离线寻优方法相结合,在保证系统稳定性的同时,有效削弱了控制系统中由不确定性时滞造成的脉动与振荡,在改善远程网络控制系统的动、静态性能方面表现出了较传统 P 控制更强的功能特性。将这种新型的补偿算法应用于实时性要求较高的无刷直流电机远程调速系统,仿真结果证明了该方法的正确性和有效性,它为分析和设计远程网络控制系统提供了有效的手段和新的思路。

【参考文献】

- [1] 王飞跃,王成红. 基于网络控制系统的若干基本思考和分析[J]. 自动化学报, 2002(28): 60-65.
- [2] Wei Zhang, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [3] Nilsson J, Bernhardtsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. Automatica, 1998(34): 57-64.
- [4] Walsh G C, Hong Ye. Scheduling of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 57-65.
- [5] 戴冠中, 郑应平. 网络化系统及其建模、分析、控制与优化[J]. 自动化学报, 2002, 28(S1): 60-65.
- [6] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 基于 MATLAB 无刷直流电机系统仿真建模的新方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(12): 1745-1749.

收稿日期: 2008-03-19

(上接第 32 页)

- [24] 秦峰, 贺益康, 刘毅. 两种高频信号注入法的无传感器运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 116-121.
- [25] Batzel T D, Lee K Y. A diagonally recurrent neural network approach to sensorless operation of the permanent magnet synchronous motor[C]. IEEE Power

Engineering Society Summer Meeting, 2000(4): 2441-2445.

- [26] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.

收稿日期: 2008-04-24