

带误差补偿的 GPC 对网络控制系统时延的解决

王冬青^{1,2}

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 青岛大学自动化工程学院, 山东 青岛 266071)

[摘要] 针对网络控制系统 (NCS) 具有不确定时延的特性, 提出了将广义预测控制 (GPC) 应用于网络控制系统的思想。为了克服模型失配和系统不确定性的影响, 基于 BP 神经网络建立一个误差的预测模型, 用误差预测值对输出预测值进行补偿, 构成新型的广义预测控制算法, 并采用了平滑滤波的加权输入控制律。在网络控制系统中, 测试了网络数据传输的随机延迟时间特性, 比较了 GPC 和具有 BP 网络预测误差补偿的 GPC 两种控制方法, 验证了具有 BP 网络预测误差补偿的 GPC 在模型失配时的更好的控制性能。

[关键词] 网络控制系统 (NCS); 不确定时延; 广义预测控制 (GPC); 神经网络

[中图分类号] TP273 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2005) 08-0060-05

1 引言

网络控制系统 (NCS) 是计算机技术、通信技术与控制技术发展和融合的产物。实时性是控制系统面临的重要问题之一, 在网络控制系统中, 对由数据传输带来的不确定延迟, 提出了将广义预测控制 (GPC) 应用于网络控制系统的思想, 并用 BP 网络建立了一个误差的预测模型, 结合基于参数模型预测的预测值, 一起构成新型的广义预测控制算法, 其优越性在基于以太网的网络控制系统中得到了验证。

2 网络控制系统及其控制方法

2.1 网络控制系统简介

NCS 概念于 1999 年出现在马里兰大学 G. C. Walsh 等人的论著^[1, 2]中, 但并没有给出确切的定义, 只是用图说明了 NCS 的结构, 如图 1 所示。控制器与传感器通过网络形成闭环。NCS 狭义和广义之分。狭义的 NCS 是指在某个区域内一些现场检测、控制及操作设备和通信线路的集成, 用以提供设备之间的数据传输, 使该区域内不同地点的

设备和用户实现资源共享和协调操作。广义的 NCS 包括狭义的 NCS, 还包括通过企业信息网络对工厂车间、生产线甚至现场设备的监控调度、优化等。

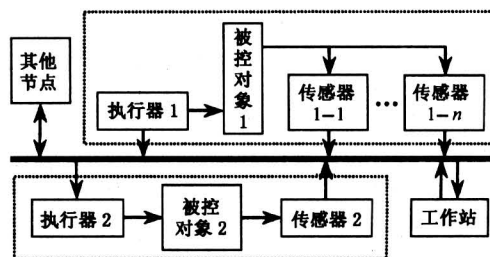


图 1 网络控制系统的结构

Fig.1 Structure of networked control systems

实时性是控制系统面临的重要问题之一, 由于控制网络中传送的数据包通常较短、发送/接收频率高, 因此有限的网络带宽就使数据传输过程中不可避免地存在着时延, 而且随着网络协议、负载等诸多时延因素的影响, 该时延会随机变化。这就容易导致较大的超调量和较长的调节时间, 严重影响生产过程的控制品质, 甚至会降低系统的稳定性。

2.2 带误差补偿的 GPC 用于网络控制系统论述

目前 3 种最有影响的预测控制方法是动态矩阵控制 (DMC)、模型算法控制 (MAC) 和广义预测控制 (GPC)。DMC 和 MAC 是分别以阶跃响应和脉冲响应描述的非参数模型为基础的预测控制算法。二者均适用于渐近稳定的线性过程, 且算法简单、计算量小、鲁棒性较强。GPC 是一种基于参数模型的算法, 是在自适应控制的研究中发展起来的预测控制算法。它的预测模型采用受控自回归积分滑动平均模型 (CARIMA), 克服了阶跃响应模型、脉冲响应模型不能描述不稳定过程和难以在线辨识的缺点。GPC 保持最小方差自校正控制器的模型预测, 在优化中引入了多步预测的思想, 抗负载扰动、随机噪声、时延变化等能力显著提高, 具有许多可以改变各种控制性能的调整参数。它不仅可用于开环稳定的最小相位系统, 而且可用于非最小相位系统、不稳定系统和时滞、变结构系统。它在模型失配情况下仍能获得良好的控制性能。预测控制在时滞控制系统的作用见参考文献[3~5]。正是因为 GPC 内在的鲁棒性, 即对于不确定时延系统的适应性, 它可以很好地应用于带延时的网络控制系统的控制。

但是, GPC 基本算法是基于系统的数学模型, 没有考虑建模误差的影响。为了保证算法的有效性, 被控对象的数学模型应该非常精确。然而, 在复杂的工业环境下所涉及的对象往往是多输入、多输出的高维复杂系统, 其数学模型可能非常复杂, 再加上环境等不确定因素的影响, 很难建立起精确的数学模型。虽然 GPC 基本算法对模型失配有一定的抑制作用, 但在建模误差较大时, 随着预测长度的增加, 预测误差必然急剧增加, 从而有可能破坏系统的鲁棒性。

在网络控制系统中, 网络时延的存在会使控制对象的实际数学模型与预测模型产生较大偏差, 这势必影响预测的精度, 随着预测长度的增加, 其预测误差也加大。为了克服这一缺点, 考虑引入预测误差对预测输出进行校正, 通过对预测模型的输出校正, 就可以进一步克服模型失配的影响, 提高控制系统的鲁棒性。

具体解决方法: 利用历史数据, 根据已发生的预测偏差, 基于 BP 网络建立一个误差的预测模型, 并结合基于数学模型预测的预测值一起构成改进的广义预测控制算法。

3 广义预测控制 (GPC) 及其改进

3.1 广义预测控制基本算法^[6, 7]

广义预测控制 GPC 是基于参数模型的预测控制, 是以受控自回归积分滑动平均模型 CARIMA (controlled auto-regressive integrated moving average) 为预测模型, 对于多步预测时域 P 和控制时域 L , 输出预测值的向量表示形式为

$$Y_p(K+1) = G\Delta(U(K) + Fy(k) + H\Delta(u(k))) \quad (1)$$

其中 $Y_p(K+1) = (y_p(k+1), y_p(k+2), \dots, y_p(k+P))^T$;

$$\Delta U(K) = (\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M(1)))^T;$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & & & & & \\ g_1 & g_0 & & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \\ g_{M-1} & g_{M-2} & \cdots & g_0 & & \\ g_M & g_{M-1} & \cdots & g_1 & & \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \\ g_{P-1} & g_{P-2} & \cdots & g_{P-M} & & \end{bmatrix},$$

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_P)^T;$$

$$H = (H_1, H_2, \dots, H_P)^T.$$

设参考轨迹为

$$Y_d(K+1) = (y_d(k+1), y_d(k+2), \dots, y_d(k+P))^T,$$

GPC 的目的是使预测输出对参考轨迹的跟踪误差最小, 据此可确定如下性能指标:

$$J = \phi \{ (Y_p(K+1) - Y_d(K+1))^T (Y_p(K+1) - Y_d(K+1)) + \lambda U^T(K) U(K) \} \quad (2)$$

其中 Y_d 表示期望值, λ 为加权因子, 将 $Y_p(K+1)$ 和 $Y_d(K+1)$ 的表达式带入式(2)令 $\partial J / \partial \Delta U(K) = 0$, 得如下的优化控制律:

$$\Delta U(K) = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (Y_d(K+1) - Fy(k) - H\Delta u(k-1)) \quad (3)$$

3.2 加权的控制输入率

现有的 GPC 时域内所求得的控制量, 大多数把第一个控制量 $\Delta u(k)$ 加到系统输入端, 作为 k 时刻滚动优化的结果, 并没有充分利用到剩余的 $M-1$ 个已得到的控制量信息, 采用的一步控制增量 $\Delta u(k)$ 可能受预测误差、噪声和干扰等因素影响, 产生虚假波动。而由此控制增量直接跟踪可能

带来大幅超调而导致长时间振荡，导致瞬态响应性能下降。为了改善控制效果，充分利用多步预测中的现有信息，可采用平滑滤波的加权输入控制律：

$$u(k) = \left[\sum_{i=1}^M \lambda(i) u(k | k - i + 1) \right] / \sum_{i=1}^M \lambda(i) \tag{4}$$

式中 $\lambda(i)$ 为控制量加权系数, M 为控制时域长度。

3.3 神经网络误差预测和对预测输出的补偿^[8]

广义预测控制基本算法是基于系统的参数模型，没有考虑建模误差的影响。在网络控制系统中，网络时延的存在会使控制对象的实际参数模型与预测模型产生较大偏差，这势必影响预测的精度（即式（1）的预测结果与实际系统的输出产生偏差），随着预测长度的增加，其预测误差也加大。

取 BP 网络作为预测模型，以系统的期望输出和控制量作为输入样本，实际输出与预测输出之差作为输出样本，不断修正网络中神经元的连接权值，使网络所表示的映射逐步逼近输入输出关系，学习结束后，网络就可以作为误差预测模型使用。

选用 3 层 BP 网络，如图 2 所示，中间层节点选用 Sigmoid 函数，输出层节点选用线性函数。

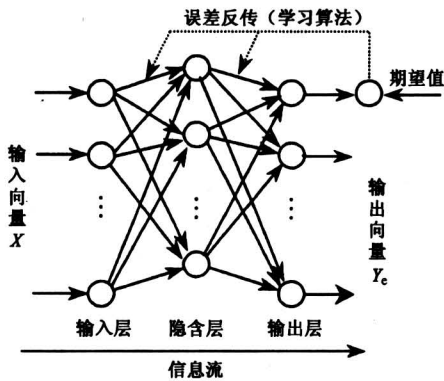


图 2 BP 网络示意图

Fig.2 BP network schematic plan

输入向量

$$X = [y_d(k), y_d(k - 1), \dots, y_d(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]^T,$$

其中 $[y_d(*)]$ 为系统的期望输出值, $u(*)$ 为系统的控制量; n 和 m 分别是系统的期望输出量和控制量的阶数。

输出向量为误差预测值：

$$Y_e = [y_e(k), \dots, y_e(k - j)]^T,$$

$$y_e(k - j) = y(k - j) - y_p(k - j | k - j - d),$$

$$j = 1, 2, \dots, L,$$

其中 $y(k - j)$ 是在 $k - j$ 时刻系统的实际输出值, $y_p(k - j | k - j - d)$ 是在 $k - j - d$ 时刻基于数学模型的系统输出预测值, d 为系统时滞, L 为训练样本数。

用误差的反向传播算法进行连接权值调整，训练好的神经网络即可进行误差的预测，将误差的预测值记为 $y_e(k + j | k)$ ，系统输出预测值记为 $y_p(k + j | k)$ ，则经误差补偿的系统预测输出为

$$\tilde{y}_p(k + j | k) = y_p(k + j | k) + y_e(k + j | k) \tag{5}$$

用上式替换式（1）作为预测值，即

$$\tilde{Y}_p(k + 1) = G\Delta U(K) + Fy(k) + H\Delta u(k) + Y_e \tag{6}$$

其中 $Y_e = [y_e(k + 1 | k), y_e(k + 2 | k), \dots, y_e(k + P | k)]^T$ 。

采用神经网络误差补偿后得到的最优解为

$$\Delta U(K) = [G^T G + \lambda I]^{-1} G^T (Y_d(K + 1) - Fy(k) - H\Delta(u(k - 1)) - Y_e) \tag{7}$$

4 基于以太网的网络控制系统

4.1 控制系统整体结构

为了验证控制效果，设计了一个基于以太网的网络控制系统，如图 3 所示。网络控制系统是由连在校园网上的 2 台计算机（节点）构成。其中一台计算机作为控制器，另一台作为智能传感器/执行器。此系统的数据流向由 2 个环组成：一个是和硬件直接打交道的 I/O 环，一个是负责网络传输的通信环。

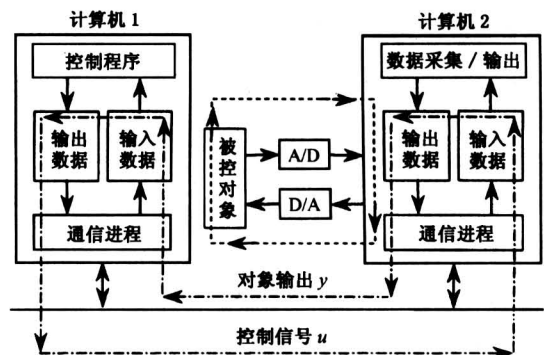


图 3 基于以太网的网络控制系统

Fig.3 Networked control system based on Ethernet

传感器/执行器端的硬件部分主要由 PC 机和基于 PCI 总线的数据采集卡组成；软件部分主要是通信进程和数据采集/处理进程。通信进程主要是利用 Windows Socket 的流式套接字技术，支持以太网的 TCP/IP 协议，提供可靠的点对点的通信。数据采集和输出部分主要是利用 Windows 的多媒体定时器实现高精度定时采样，对被控对象进行控制。控制器端的控制程序是采用有 BP 网络预测误差补偿的广义预测控制方法设计的，在编写 BP 神经网络算法和广义预测控制算法时，使用了 MATCOM 的矩阵运算函数库。

4.2 网络延迟分析

假设条件：传感器节点采用时间驱动 (time-driven) 方式，对被控对象进行等周期采样，采样周期为 T ；控制器节点和执行器节点采用事件驱动 (event-driven) 方式，即信息的到达时间即为相应节点的动作时间；整个控制回路总的时间延迟 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$ ，且 $\{\tau_k\}$ 为一相互独立的随机变量序列，其中， τ_k^{sc} 表示从传感器到控制器的时延， τ_k^{ca} 表示从控制器到执行器的时延，如图 4 所示。

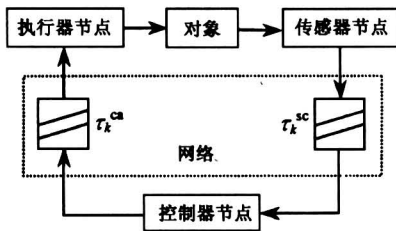


图 4 带延迟的控制系统

Fig.4 Control system with time delay

在校园网测试网络延迟特性，主要过程是：第一个节点向第二个节点发送数据，记录发送时刻 t_1 ，第二个节点接收到数据后立即返回信息，第一个节点收

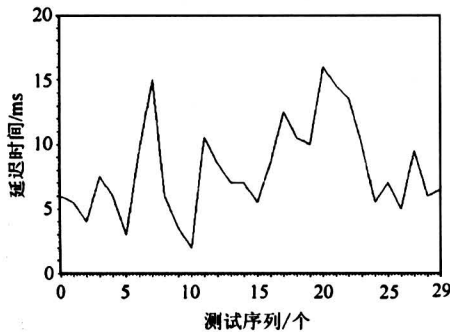


图 5 网络控制系统的延迟测试曲线 1

Fig.5 Delay testing curve 1 in NCS

到确认信息的时刻记为 t_2 ，则延迟近似表示为 $t = (t_1 - t_2)/2$ 。实验结果表明网段不同，所得到的延迟是不同的。图 5 为相距 15 m 两直连节点间延迟曲线 (测试 30 个数据)，最小延迟大约为 4 ms 左右，而最大延迟达到 15 ms 左右；图 6 为相距 200 m 中间连有诸多其他节点的 2 节点间延迟曲线 (测试 350 个数据)，最大延迟达到 200 ms。可见，网络的时延具有很大不确定性和随机性，随着节点距离的增大，网段中节点数增多，节点间的网络延迟时间加长。

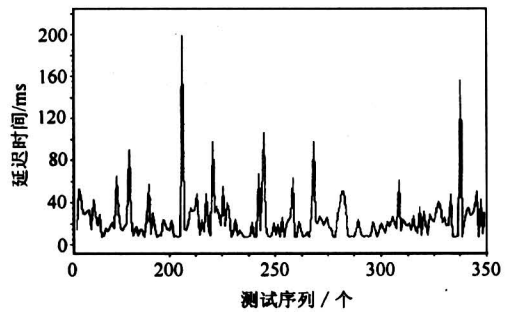


图 6 网络控制系统的延迟测试曲线 2

Fig.6 Delay testing curve 2 in NCS

4.3 控制算法效果验证

选二阶对象的模型为 $G(s) = \frac{0.2s + 1}{(0.4s + 1)(0.1s + 1)}$ 。2 节点距离 15 m，传统的 GPC 算法的响应曲线如图 7 示，具有神经网络误差补偿 GPC 算法的响应曲线如图 8 示。

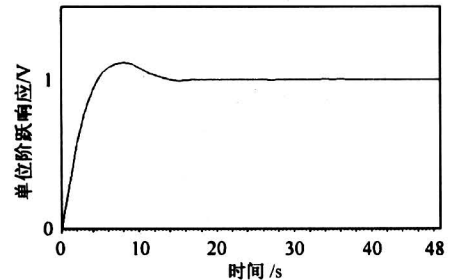


图 7 传统的 GPC 算法的响应曲线

Fig.7 Response curve of conventional GPC algorithm

当 2 节点相距 200 m，即模型发生明显失配时，分别得到如图 9 和图 10 所示的传统的 GPC 和带补偿的 GPC 响应曲线。

显然，当模型失配时，普通的广义预测控制，输出不能尽快逼近给定值。而具有神经网络误差补偿的广义预测控制，有比较快的响应时间，超调较小，有良好的控制效果。

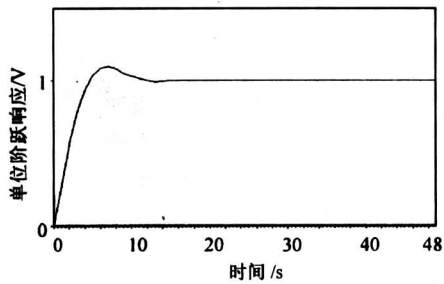


图 8 具有误差补偿 GPC 算法的响应曲线

Fig.8 Response curve of GPC algorithm with error compensation

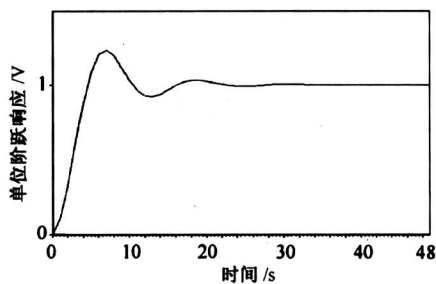


图 9 模型失配时传统的 GPC 算法的响应曲线

Fig.9 Response curve of conventional GPC algorithm under modeling mismatch

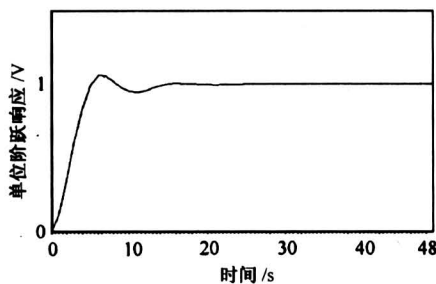


图 10 模型失配时带误差补偿的 GPC 算法的响应曲线

Fig.10 Response curve of GPC algorithm with error compensation under modeling mismatch

5 结论

笔者以网络控制系统为研究对象, 针对网络控制系统具有不确定时延的特性, 提出了具有误差补偿的广义预测控制思想。克服了系统不确定性和一般的广义预测控制的建模误差的影响, 实验结果表明当模型发生失配时, 具有神经网络误差补偿的广义预测控制比一般的 GPC 算法的控制效果有明显的改善。这说明了前者对变时滞系统的适应性以及对网络控制系统控制的有效性。

参考文献

- [1] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L. Asymptotic behavior of networked control systems [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Applications [C]. Hawaii, 1999. 1448~1454
- [2] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems [A]. Proc Amer Control Conf [C]. San Diego, CA, 1999. 2876~2880
- [3] Hur H R, Lee J M, Lee S, Lee M H. Compensation of time delay using a predictive controller [A]. ISIE '99 Proceedings of the IEEE International Symposium Vol 3 [C]. Bled, Slovenia, 1999. 1087~1092
- [4] Kowalczyk Z, Suchomski P. Continuous-time generalized predictive control of delay systems. Control Theory and Applications [A]. IEEE Proceedings Vol 146, Issue 1 [C]. 1999. 65~75
- [5] Huang Jinqun, Lewis F L. Neural-network predictive control for nonlinear dynamic systems with time-delay [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14 (2): 377~389
- [6] 王伟. 广义预测控制理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [7] 诸静. 智能预测控制及其应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002
- [8] 李少远, 刘浩, 袁著祉. 基于神经网络误差修正的广义预测控制 [J]. 控制理论与应用, 1996, 13 (5): 677~680

Solution of Network-induced Delay Using GPC With Predictive Error Compensation

Wang Dongqing^{1, 2}

- (1. School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

[Abstract] With regard to the characteristics of uncertain network-induced delay, an idea of using Generalized Predictive Control (GPC) is proposed in networked control systems. To overcome the influence of

modeling mismatch and uncertainty of a system, an error predictive model is further built based on BP neural network, and error predictive value is used to compensate output predictive value, which forms a new control algorithm of GPC, and smooth filtering weighted controlled input variable is adopted. Random-delay-time characteristic of data transmission is tested in a networked control system. GPC and GPC with error compensation are compared in the system. GPC with BP error compensation is verified to have better performance in a modeling mismatch system.

[Key words] networked control systems (NCS); uncertain delay; GPC; neural network

(上接第 46 页)

参考文献

- [1] 董春雨, 姜 璐. 层次论: 系统思想与方法的精髓 [J]. 自然辩证法研究, 2001, (1): 1~4
- [2] 欧阳首承, 魏绍远. 形势数值天气预报及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1993
- [3] Bergson H. L' evolution Créatrice [M]. In Oeuvres Editions du Centenaire. Paris: PUF, 1963
- [4] Koyré I. Etudes Newtoniennes [M]. Paris: Gauimard, 1968
- [5] Prigogine I. From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Science [M]. Brussels: W H Freeman and Company, 1980
- [6] OuYang S C, Lin Y, Wang Z, Peng T Y. Evolution science and infrastructural analysis of the second stir [J]. London, Kybernetes, 2001, 30 (4): 463~479
- [7] 欧阳首承, 麦克内尔 D H(美), 林 益(美). 走进非规则 [M]. 北京: 气象出版社, 2002
- [8] 爱因斯坦. 爱因斯坦文集, 第三卷 [M]. 上海: 商务印书馆, 1976
- [9] 欧阳首承. 天气演化与结构预测 [M]. 北京: 气象出版社, 1988
- [10] Fjörtoft R. On the changes in the spectral distribution of kinetic energy for two dimensional nondivergent flow [J]. TelLus, 1953, (5): 225~230

Stability and Instability of Systems—An Extended Discussion on Stir Kinetic Energy Conservation Law

Chen Gangyi¹, Ouyang Bolin², Yuan Dongsheng¹, Hao Liping³, Zhou Lirong³

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China;

2. Chengdu the General Developing Company, Chengdu 610072, China;

3. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610071, China)

[Abstract] It is an extended discussion on the stir kinetic energy conservation law, which is proposed by OuYang Shoucheng. The authors think that stir kinetic energy conservation law is an important principle and analysis method for stability and evolutionism of systems. It is not only an approach for explaining stability of system, but also the analysis method for evolutionism of system, and it points out some problems in Newton's theories as well.

[Key words] system construction; stir kinetic energy; stability and evolutionism