

文章编号: 1001-0920(2012)03-0477-04

基于 AR 模型时延预测的改进 GPC 网络控制算法

时维国^{1,2}, 邵 诚¹, 孙正阳²

(1. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连交通大学 电气信息学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 针对网络随机时延等不确定因素导致网络控制系统的控制性能下降甚至不稳定, 提出一种新的网络控制算法. 首先建立网络时延的自动回归模型; 然后采用参数自校正的最小均方算法对网络时延进行在线预测; 最后采用一种考虑时延的改进广义预测控制算法对网络时延进行补偿. 仿真实验结果表明, 该方法对网络时延具有较好的补偿效果, 且在线计算量小, 有很好的实时性, 同时对干扰和丢包等因素具有良好的鲁棒性.

关键词: 网络化控制系统; 自动回归模型; 时延预测; 广义预测控制; 干扰

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Improved GPC network-control algorithm based on AR model time-delay prediction

SHI Wei-guo^{1,2}, SHAO Cheng¹, SUN Zheng-yang²

(1. School of Control and Science Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. College of Electrical and Information, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China. Correspondent: SHI Wei-guo, E-mail: swgdl@163.com)

Abstract: In the network control system, uncertain factors such as network delays can usually deteriorate the control performance and stability of networked control systems. Therefore, a new network control algorithm is proposed. First, the auto regressive model for network time delays is established, and parameter self-tuning LMS algorithm is used for online prediction. Then improved generalized predictive control based on state-space model is adopted to compensate the time-delay. Finally, simulation results show that this method has a good effect on time delays compensation and has a good real-time because of the small amount of on-line calculation, at the same time, the method has good robustness according to interference and data loss.

Key words: network control system; auto regressive model; time-delay prediction; generalized predictive control; interference

1 引 言

网络控制系统(NCS)是通过通信网络形成的闭环反馈控制系统,以其成本低、连线少、易于扩展和维护、高效和灵活、资源共享等优势具有广泛的应用前景.但是,通信网络的引入使得控制系统出现了许多新的有待于解决的问题,包括网络诱导时延、数据包丢失、通信受限等^[1-2].网络延时、丢包的存在增加了分析和设计NCS的难度,降低了系统的控制性能,甚至引起系统的不稳定,网络时延从而成为NCS中亟需解决的关键问题.网络时延的随机性给时延补偿算法的设计带来了很大困难,很多学者做了大量工作,文献[3]提出用线性二次型高斯最优控制策略的方法

来补偿时延,但仅限于补偿一个采样周期内的时延.文献[4]提出用广义预测控制方法解决时延问题,虽然可以补偿大于一个采样周期的时延,但传统的广义预测控制(GPC)算法由于以下两方面的原因很难取得理想的控制效果^[5]:一方面,传统的GPC算法需要Diophantine方程求解和矩阵求逆等运算而导致在线计算量过大;另一方面,由于网络时延是随机的不确定量,GPC算法的参数在选择时要求在GPC算法中有较大预测步长,从而增加了计算时间,降低了系统的实时性.

基于以上分析,本文首先采用实时性好的时延预测算法来估计网络时延,根据时延的估计值确定

收稿日期: 2010-10-14; 修回日期: 2011-07-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074020); 国家 973 计划项目(2007CB006714).

作者简介: 时维国(1973-),男,副教授,博士生,从事网络控制技术、智能控制的研究;邵诚(1958-),男,教授,博士生导师,从事复杂系统建模、网络控制技术等研究.

GPC 算法的预测步长; 然后采用改进的快速 GPC 算法来补偿网络时延提高算法的实时性, 以此取得良好的控制效果。

2 NCS 在线时延预测算法

针对本文的研究作如下假设: 1) NCS 中的各节点是时钟同步的, 且控制回路中传输的数据均采用单包传输; 2) 传感器、执行器采用时钟驱动方式, 控制器采用事件驱动方式; 3) 设 NCS 中的前向通道时延为 τ_k^{ca} , 后向通道时延为 τ_k^{sc} , 只考虑通道时延, 其他时延不计, 因此, 总时延为两者之和, 表示为 τ_k 。

数据传输过程中, 由于网络拥塞和网络干扰的影响, 会出现数据延迟、数据包错乱、数据丢失等情况. 针对 NCS 的这种不确定性, 本文采用时间戳机制, 在控制输入和执行输入部分重构数据序列, 使控制器可以辨别出最新的测量数据, 得到准确的输出预测值, 同样执行器节点也能够利用最新的控制数据进行相应的动作. 另外, 在执行器节点设立一个数据缓冲区, 贮存着最新的控制量。

2.1 最小方差拟合的自动回归模型

下面将建立网络时延的自动回归 (AR) 模型. 该模型结构简单, 模型参数计算量小, 对于实时性要求较高的 NCS 而言具有重要的应用价值. 网络时延的 AR 模型可以表示为

$$y_k = \sum_{i=1}^p a_{ki} \tau_{k-i}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_k = \tau_k - y_k. \quad (2)$$

其中: p 为模型的阶数, $a_{ki} (i = 1, 2, \dots, p)$ 为模型的加权系数, ε_k 为拟合残差, τ_k 为时延的真实值. 时延预测值 y_k 可以通过 k 时刻前的 p 个时延值加权得到, 根据新的时延值动态地调整加权系数 a_{ki} 可以使 ε_k 的方差最小。

设 k 时刻的加权系数和 k 时刻以前的 p 个时延值分别为

$$\Phi_k = [a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kp}]^T, \quad (3)$$

$$\Gamma_k = [\tau_{k-1}, \tau_{k-2}, \dots, \tau_{k-p}]^T, \quad (4)$$

则式 (1) 可以改写为

$$y_k = \Phi_k^T \Gamma_k. \quad (5)$$

2.2 模型参数的确定

2.2.1 阶数 p 的确定

模型阶数 p 的选择是建模中较为重要的一步, 只有当系统处于最佳阶数时才能获得最佳的性能, 目前主要有最终预测误差 (FPE) 准则和 Akaike 信息准则 (AIC)^[7]. 本文在确定阶数 p 时, 一方面将前述的判定准则作为确定阶数 p 的依据之一; 另一方面, 阶

数 p 往往与推导 Φ_k 的算法计算量有关, 一般来说, 阶数 p 越大, 计算量也越大. 考虑到 NCS 对实时性的要求, 本文将以在一般准则的基础上兼顾算法的实时性作为确定阶数 p 的主要依据。

2.2.2 加权系数的确定

Φ_k 值需要根据新的网络时延值不断更新, 确定 Φ_k 的算法不仅要考虑预测精度, 还要考虑到算法的实时性. 改进的协方差法具有较好的预测精度, 但是计算量较大; 最小均方算法 (LMS) 简单且具有较好的实行性和预测精度, 但收敛速度较慢. 基于以上分析, 本文首先离线用改进的协方差法求得 Φ_k 初始值, 然后在线根据 LMS 算法递推求出 Φ_k , 进而预测时延。

由式 (2) 和 (5) 可得

$$E[\varepsilon_k^2] = E[\varepsilon_k^2] - 2R_{\Gamma\Gamma}^T \Phi_k, \quad (6)$$

其中 $R_{\Gamma\Gamma}$ 为输入信号自相关矩阵, 可以由下式确定:

$$R_{\Gamma\Gamma} = E[\Gamma_k^T \Gamma_k] = E \begin{bmatrix} \tau_{k-1}\tau_{k-1} & \tau_{k-1}\tau_{k-2} & \cdots & \tau_{k-1}\tau_{k-p} \\ \tau_{k-2}\tau_{k-1} & \tau_{k-2}\tau_{k-2} & \cdots & \tau_{k-2}\tau_{k-p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{k-p}\tau_{k-1} & \tau_{k-p}\tau_{k-2} & \cdots & \tau_{k-p}\tau_{k-p} \end{bmatrix}.$$

由式 (6) 可知时延的均方误差是 Φ_k 的二次函数, 可以用梯度法求其最小值, 经推导可得基于最速下降法 Φ_k 的迭代公式为

$$\Phi_{k+1} = \Phi_k - \mu \nabla(k) = \Phi_k + 2\mu \varepsilon_k \Gamma_k, \quad (7)$$

其中 μ 为步长因子, 使 LMS 算法收敛的 μ 的取值范围为 $0 < \mu < \lambda_{\max}$, λ_{\max} 为输入信号自相关矩阵的最大特征值, 即 $R_{\Gamma\Gamma}$ 的最大特征值. 根据式 (2), (5) 和 (7) 能够对时延进行预测。

3 基于改进的 GPC 网络控制算法

3.1 对象状态空间观测器模型^[8]

对象状态空间观测器模型为

$$X(t+1) = AX(t) + B\Delta u(t - \tau_k) + g\xi(t), \quad (8)$$

$$y(t) = CX(t) + \xi(t). \quad (9)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_{n-1}]^T, \ C = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T,$$

$$g = [-a_1 \ -a_2 \ \cdots \ -a_{n-1}]^T,$$

τ_k 为系统的时延, 由第 2 节时延预测算法求取。

3.2 滚动优化

使用对输出误差和控制增量加权性能指标, 即如下目标函数最小:

$$J = E \left\{ \sum_{j=1}^p [y(t+j) - y_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^M \lambda [\Delta u(t+j - \tau_k - 1)]^2 \right\}. \quad (10)$$

其中: E 为数学期望; τ_k 为最小预测长度; p 为最大预测长度; M 为控制长度, 且 $M \leq p$; λ 为大于零的控制增量加权系数; $\Delta u(k+j - \tau_k)$ 为控制增量; $y_r(k+j)$ 为输入参考轨迹. 为了提高实时性, 避免 Diophantine 方程求解等复杂的计算, 采用文献 [9] 的算法, 系统未来 j 步输出最优预报值为

$$y(t+j) = CA^{j-1}(A - gC)X(t) + \sum_{i=1}^j CA^{j-i}B\Delta u(t+i - \tau_k - 1) + CA^{j-1}gy(t), \quad (11)$$

其中 $X(t)$ 为 n 维状态预测向量, 不需要用到状态观测器, 只需用如下公式即可推导得到:

$$X(t) = PY_1 + Q\Delta U_1, \quad (12)$$

Y_1 为 $y(t)$ 和 $y(t)$ 以前的输出, ΔU_1 为 $\Delta u(t - \tau_k)$ 以前的输入, 且有

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -a_2 & -a_3 & -a_4 & \cdots & -a_n \\ 0 & 0 & -a_3 & -a_4 & \cdots & -a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -a_n \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 & b_4 & \cdots & b_n \\ 0 & 0 & b_3 & b_4 & \cdots & b_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & b_n \end{bmatrix}.$$

将式 (12) 带入 (11) 中可得到新的未来 j 步输出最优预报值为

$$y(t+j) = CA^{j-1}(F_k Y_1 + H_k \Delta U_1) + \sum_{i=1}^j CA^{j-i}B\Delta u(t+i - \tau_k - 1). \quad (13)$$

其中

$$F_k = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 & \cdots & -a_n \\ -a_2 & 0 & -a_3 & -a_4 & \cdots & -a_n \\ -a_3 & 0 & 0 & -a_4 & \cdots & -a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_n & 0 & 0 & 0 & \cdots & -a_n \end{bmatrix},$$

$$H_k = \begin{bmatrix} b_2 & b_3 & b_4 & \cdots & b_n \\ 0 & b_3 & b_4 & \cdots & b_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & b_n \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}.$$

按照上述二次型指标函数优化求得即时控制律为

$$U = (G_k^T G_k + \lambda I)^{-1} G_k^T [Y_r - f(F_k Y_1 - H_k \Delta U_1)]. \quad (14)$$

其中: I 为单位矩阵, 且有

$$\Delta U_1 = [\Delta u(t - \tau_k) \quad \Delta u(t - \tau_k + 1) \quad \cdots \quad \Delta u(t - \tau_k + M - 1)]^T,$$

$$Y_r = [y_r(t + \tau_k) \quad y_r(t + \tau_k + 1) \quad \cdots \quad y_r(t + P)]^T,$$

$$f = [C \quad CA \quad \cdots \quad CA^{N-1}]^T,$$

$$G_k = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \cdots & CB \end{bmatrix}.$$

定义 K_1 为矩阵 $(G_k^T G_k + \lambda I)^{-1} G_k^T$ 的第 1 行, 则控制量输出为

$$\Delta u(t) = K_1 [Y_r - f(F_k Y_1 - H_k \Delta U_1)],$$

$$u(t - \tau_k) = u(t - \tau_k) + \Delta u(t). \quad (15)$$

式 (15) 即为基于状态空间形式的广义预测控制律.

4 仿真实验分析

被控对象为一 直流伺服系统 (考虑随机干扰噪声序列), 其传递函数为 $1000/(s^2 + s)$. 在 Matlab 环境下采用 True Time 工具箱构建模拟实际的 NCS. 包括 4 个 True Time Kernel 模块 (分别对应传感器、执行器、控制器和干扰节点) 和 1 个 True Time Network 模块 (网络类型采用 CDMA/CD(Ethernet), 速率为 80 000 bit/s, 丢包率为 10 %).

针对无干扰无丢包情况和有干扰丢包情况, 分别采用文中提出的改进 GPC 算法和基本 GPC 算法进行仿真, 以跟踪方波信号为基准, 对比算法时延补偿控制效果, 如图 1 和图 2 所示.

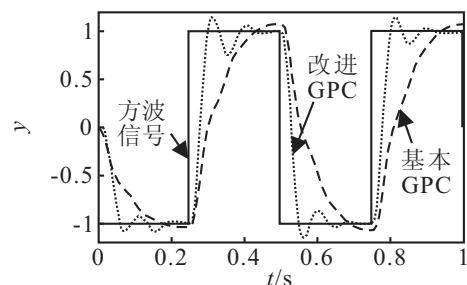


图 1 无干扰无丢包下控制结果对比

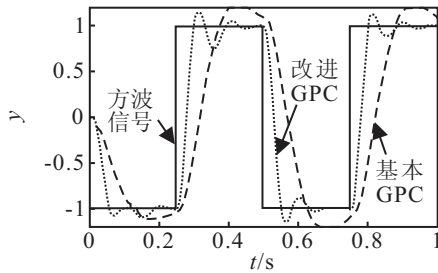


图 2 随机干扰下(丢包率 10%)控制结果对比

仿真结果表明:采用结合在线时延预测的改进 GPC 控制策略具有较好的控制效果和实时性,能够更好地跟踪系统的输入,对随机时延进行较好的补偿,同时对随机干扰和丢包(实验结果表明丢包率需小于 10%)等因素具有良好的鲁棒性。

5 结 论

针对网络时延问题,首先建立了网络时延的 AR 模型,在兼顾预测精度和实时性的基础上,确定了模型参数,给出了时延预测算法;然后根据时延的预测值,利用改进的 GPC 控制算法针对具有网络干扰和丢包的的网络控制系统进行时延补偿;最后通过仿真验证了本文算法对时延具有较好的补偿效果,且具有较好的实时性,但对于丢包率过高的情况需要进一步研究丢包的本质及解决方法。

Ethernet 已在国内外的城轨车辆上开始应用,欧洲正在制定列车上以太网的应用标准,这是未来动车的应用趋势。但由于以太网存在不确定的时延和相对较高的丢包率等问题,目前以太网还不能完全取代高速动车上应用的其他总线,因此解决时延和丢包问题是目前控制研究的重中之重。

参考文献(References)

[1] 李德伟, 席裕庚. 预估网络控制系统的设计和分析[J]. 控制与决策, 2007, 22(9): 1065-1069.
(Li D W, Xi Y G. Design and analysis of predictive networked control system [J]. Control and Decision, 2007, 22(9):1065-1069.)

[2] Zhang W, Branicky M S, Philips M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(2): 84-99.

[3] Ray A. Introduction to networking for integrated control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1989, 9(1): 76-79.

[4] 陈虹, 严法高, 史旺旺. 网络控制系统中考虑动态延时的广义预测控制算法[J]. 信息与控制, 2008, 37(2): 224-227.
(Chen H, Yan F G, Shi W W. Generalized predictive control algorithm with dynamic delay in networked control system[J]. Information and Control, 2008, 37(2): 224-227.)

[5] 李奇安, 褚健. 对角 CARIMA 模型多变量广义预测控制改进算法[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 423-426.
(Li Q A, Chu J. Improved algorithm for multivariable generalized predictive control of diagonal CARIMA model[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 423-426.)

[6] 张海勇, 马孝江, 盖强. 一种新的时变参数 AR 模型分析方法[J]. 大连理工大学学报, 2002, 23(2): 238-241.
(Zhang H Y, Ma X J, Gai Q. A new method for time-varying AR model[J]. J of Dalian University of Technology, 2002, 23(2): 238-241.)

[7] 杨绿溪. 现代数字信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 212-220.
(Yang L X. Modern digital signal processing[M]. Beijing: Science Press, 2007: 212-220.)

[8] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 28-34.
(Wang W. Theory and application of eneralized predictive control[M]. Beijing: Science Press, 1998: 28-34.)

[9] 梁晓明, 刘福才, 王娟. 基于状态空间模型的广义预测控制快速算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(4): 335-338.
(Liang X M, Liu F C, Wang J. A fast algorithm for generalized predictive control based on state space model[J]. Computer Simulation, 2009, 26(4): 335-338.)

(上接第476页)

[11] 孙瑜, 李志安, 林辉. 一类含控制时滞非线性系统在任意初值下的开环PD型迭代学习控制[J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 837-841.
(Sun Y, Li Z A, Lin H. Open-loop PD-type iterative learning control for a class of nonlinear systems with control delay and arbitrary initial value[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(6): 837-841.)

[12] 徐敏, 林辉, 刘震. 可变学习增益的迭代学习控制律[J].

控制理论与应用, 2007, 24(5): 856-860.
(Xu M, Lin H, Liu Z. Iterative learning control law with variable learning gain[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(5): 856-860.)

[13] 孙明轩, 黄宝健. 迭代学习控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 271.
(Sun M X, Huang B J. Iterative learning control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 271.)