

远程控制系统时延补偿策略研究

李红艳

(湖北经济学院 计算机与电子科学系,湖北 武汉 430205)

摘要: 为了克服互联网时延对系统性能的影响,提出了采用变采样率方法的双层控制系统结构。低层闭环控制结构采用较高的恒定采样频率以保证控制系统的稳定性;而高层的闭环控制结构采用了较低的可变采样频率以减少网络负荷和避免数据丢失。为了更好地处理大时延和数据包丢失的问题,基于双层控制结构利用动态矩阵预测控制器设计了前向时延和反馈时延补偿策略。仿真结果表明在随机互联网时延的环境下采用前向、反馈时延补偿策略能够有效地改善控制系统的动态性能。

关键词: 控制系统; 互联网; 时延; 动态矩阵预测控制器; 补偿策略

中图分类号: TP 393.08

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0062-04

0 引言

网络环境下的控制结构选择及安全性问题已经做了系统化的研究^[1-4],其中互联网时延及其不确定性变化是基于互联网的远程控制系统研究的主要难点^[5-6]。为了解决时变时延对控制系统的影响,国内外学者提出很多有前途的解决方法。文献[7]从控制系统结构出发,提出了虚拟监视参数控制策略来处理互联网时延问题,其实质是将互联网时延环节脱离于控制系统闭环之外,避免了远端直接控制生产过程,不能算是真正意义的远程控制。文献[8]提出事件-时间驱动方式的变采样过程,这种方法的优点是采样周期将随着网络时延的变化而变化,保证了采样数据的实时性和可靠性,缺点是为了接收较大时延数据,而过大时延数据相对于控制系统可以被认为是白噪声,没有接收的必要。文献[9]在传统的控制系统结构中提出了一种动态时延补偿器来改善控制系统的动态性能,然而这种方法的补偿效果主要依赖于互联网时延的精确预测。但是,由于互联网时延由路由时间、网络负荷变化等条件决定,建模和精确预测互联网时延基本是不可能的^[10-11]。文献[12-13]提出了利用队列型缓冲区将随机延迟转化为固定延迟,从而将随机的时延系统转化为确定性系统,这样可以利用现有的确定性系统的设计方法进行控制器的设计,但是没有很好地处理大时延、丢包问题。为了更好地处理互联网时延的影响,提出更加理想的控制结构和控制策略是基于互联网的控制系统设计的关键环节。

笔者在传统网络化控制系统结构基础上,借鉴了文献[7,8,14]的思想,设计了变采样率、双层控制结构,将网络时延环节脱离于本地低层控制结构之外,

降低时延对控制系统动态性能的影响。利用队列型缓冲区将随机通信延迟转化成固定延迟,针对大时延、丢包问题,基于动态矩阵预测控制器(DMC)分别设计了前向、反馈时延补偿策略进行补偿。

1 系统结构

典型的网络化控制系统结构如图 1 所示,由于互联网的飞速发展,从传感器到控制器的传输以及从控制器到执行器的传输网络均采用互联网。由于网络带宽的限制以及传输机制的影响,网络控制系统不可避免地存在信号时延、数据包丢失及多包传输等问题,这些问题都会导致闭环控制系统性能下降,甚至失稳。尤其是不可预测的互联网时延导致难以把握闭环回路的采样频率问题,如采样频率过快,由于信号延迟,控制器不能及时获得被控对象的反馈信息,将严重影响远程控制系统的动态性能;若采样频率过慢,将无法维持控制系统的稳定性。这样,改进网络化控制系统的结构,采用有效的控制方法克服互联网时延的影响将是改善远程控制系统动态性能的有效途径。

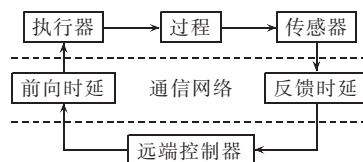


图 1 网络化控制系统

Fig.1 Networked control system

根据文献[7]提出的虚拟参数控制系统结构,本地控制采用了闭环回路,远程操作员仅通过互联网操作本地控制系统,不存在远程控制反馈回路,这样互联网时延环节脱离于本地控制系统闭环之外。因此,互联网时延将对控制系统的动态性能没有任何影响,但是它并不是真正意义上的远程控制。针对该问题,增加了远程控制反馈回路,引入远程控制器,

提出了双层控制系统结构,如图 2 所示。由被控过程、传感器、本地控制器和执行器组成本地低层控制回路;而由操作员、互联网、本地回路和远程控制器组成高层控制回路。在该模型中,低层回路控制器主要实现本地控制、调节功能;而高层控制器主要实现全球控制功能。与图 1 只用一个远程控制器不同的是,图 2 所示的结构在高层远程端和低层本地端分别采用了不同的控制器。其中,低层采用 PID 控制器,它负责被控对象正常运行的调节;高层远端采用模型预测控制器,一旦由于环境的扰动或者运行环境的改变导致低层本地控制器性能的衰变,高层远端模型预测控制器被用来调整低层本地控制器的控制参数和期望输入。这样,即使断开互联网通信连接,仍能通过低层闭环系统保证本地控制系统的稳定性,增强了远程控制系统运行的安全性。

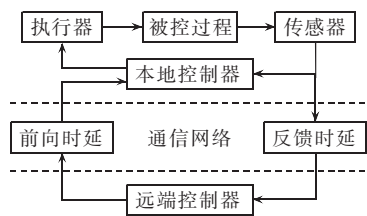


图 2 双层控制结构

Fig.2 Two-level control system

2 变采样率策略

在双层控制系统结构中,本地低层闭环控制回路保证远程控制的稳定性。在低层闭环回路中,通常情况下,采样频率越快越好,因为频繁的采样将使离散控制系统的性能更接近于连续控制系统。但是,在远程控制系统高层控制闭环回路中,一个太快的采样频率将会加大网络的负荷,加大信号的延迟。倘若整个双层远程控制系统均采用单速率控制方法,即低层闭环控制回路和高层闭环控制回路采用相同的采样频率,将难以把握系统采样频率的快慢。如果采样频率过快,互联网时延大于采样间隔会导致高层控制器不能根据最新的测量值调节控制参数;倘若采样频率过慢,将严重影响远程控制系统的动态性能。

为解决这个问题,提出了一种变采样率方法,低层控制和高层控制闭环回路分别采用不同的采样频率,低层闭环控制回路采用恒定的较高的采样频率以保证控制系统的稳定性;而高层的闭环控制回路采用较低的可变采样频率以减少网络负荷和避免数据丢失,增加及时接收网络数据的可能性。图 3 给

出了基于变采样率方法的远程控制系统的闭环结构。对于网络控制系统中的延迟,可以采用引入缓存器的方法,把时变的系统变成时不变系统。低层控制回路和高层控制回路的采样间隔取值如下:

$$t_{\text{remote}} = n t_{\text{local}} - \Delta t, \quad n \in \{2, 3, 4, \dots\}$$

式中 t_{remote} 指高层控制回路的采样间隔取值; t_{local} 表示本地低层控制回路的采样间隔取值; Δt 为高层控制回路采样间隔时间调整值; n 是高层控制回路的采样间隔相对于低层控制回路的采样间隔取值的基准。

引入可变参数 Δt 的目的是尽量保证采样周期将随着网络时延的减少而变化,提高采样数据的实时性,但是当网络时延增加,即使 $\Delta t = 0$ 网络时延仍超过采样周期的基准值时,则会出现空采样现象。

因此,在双采样率方法的远程控制系统中,当互联网传输时延 t_{delay} 低于或等于远程控制器的采样间隔 t_{remote} 时,在每一个采样间隔内将没有数据丢失,此时互联网传输时延对远程控制器的性能没有影响;当互联网时延 t_{delay} 高于远程控制器的采样间隔 t_{remote} 时,会出现空采样现象,采样值将延迟一个采样周期作用于远程控制器,互联网传输延迟将影响控制系统的动态性能。此时如果通过进一步扩大高层远端控制回路的采样间隔 t_{remote} ,满足 $t_{\text{delay}} < t_{\text{remote}}$ 条件,可以保证在每一个采样间隔内将没有数据丢失,但是由于采样频率过慢,远程控制系统的动态性能同样被严重影响。为了解决这个问题,假定数据包在极限采样间隔取值内仍未到达目的地,相对于控制系统可以认为是数据包丢失。因此,需要提供有效策略补偿数据包丢失问题。

3 时延补偿

当互联网传输时延大于高层远程控制器的采样间隔时,将使远程控制器无法及时得到最新的测量值或者将导致数据丢失现象发生,严重影响控制系统的稳定性和动态性能。为了解决这个问题,双层控制结构中的远程控制器采用动态矩阵预测控制器 DMC,并利用 DMC 算法实现远程闭环回路中的前向、反馈时延补偿策略。

其中,前向时延补偿克服本地控制器接收远程控制器控制信号的时延;反馈时延补偿克服被控对象输出的反馈时延。通过全球时钟同步机制设定互联网通信数据的时间标志,数据接收时间与通过互联网发送该数据的时间标志相比较来确定互联网传输时延,并判定互联网传输是否正常。

3.1 动态矩阵控制 DMC^[15]

在远程控制器接收端,首先对接收的数据进行处理,总是保留最新的输出值和其时间标志,同时修改预测模型的输出预测值和参考轨迹曲线,使得在模型修正时总是采用最新输出来进行修正。下面是其具体算法。

假定用阶跃响应模型描述过程见方程(1),DMC

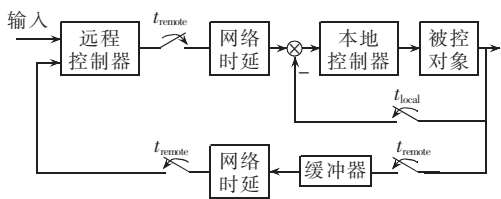


图 3 基于变采样率方法的双层控制结构

Fig.3 Two-level control with variable sampling rate

的预测模型采用在实际工业中较易获得的阶跃响应模型:

$$y(k) = \sum_{i=1}^N a_i \Delta u(k-i) \quad (1)$$

式中 $y(k)$ 是预测过程输出变量; $\Delta u(k-i)$ 是输入控制增量; a_i 是阶跃响应系数。

DMC 控制算法的最优控制率为

$$U = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q (W - Y_m) \quad (2)$$

式中 $Q = \text{diag}(q_1, \dots, q_p)$, $R = \text{diag}(r_1, \dots, r_m)$ 为加权阵; A 是由阶跃响应系数 a_i 组成的动态矩阵。

其中, 未来 m 个时刻的一组最优控制向量为 U , m 为控制时域。

$$U = [\Delta u(k) \ \Delta u(k+1) \ \dots \ \Delta u(k+m-1)]^T \quad (3)$$

未来 p 个时刻的期望值可用向量表示为 W, p 为输出预测时域。

$$W = [w(k+1) \ w(k+2) \ \dots \ w(k+p)]^T \quad (4)$$

被控过程在控制增量作用下, 未来 p 个时刻输出预测值。

$$Y_m = [y_m(k+1) \ y_m(k+2) \ \dots \ y_m(k+p)]^T \quad (5)$$

$$y_m(k+l) = y_0(k) + \sum_{i=1}^N (a_{l+i} - a_i) \Delta u(k-i) \quad (6)$$

其中 $y_0(k)$ 是过程输出变量的测量值, N 是建模的时域长度。假定控制器的设定值为 $y_d(k+l)$, 参考轨迹曲线计算如式(7)所示, 其中收敛参数 α 的值是 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

$$\begin{aligned} w(k) &= y_0(k) \\ w(k+l) &= \alpha w(k+l-1) + (1-\alpha) y_d(k+l) \\ l &= 1, \dots, N \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 反馈时延补偿

在反馈环节, 时延补偿的目标是减少由于网络传输时延所导致的控制反馈信号不能及时到达远程控制器而对控制系统所造成的影响。如果远程闭环回路中的反馈信号 $y_0(k)$ 被网络延时, 预测模型的输出预测值和参考轨迹计算方程需做调整, 具体是利用方程(1)所得出的预测值 $y(k)$ 代替方程(6)(7)中的 $y_0(k)$ 。

当反馈信号传输恢复正常时, 采用前一个时延周期内的所有过程采样值与相应的预测模型计算值的累积误差和 $\varepsilon(k)$ 来修正预测模型的修正预测值 $y_m(k+l)$ 。假定时延周期为 T , 累积误差 $\varepsilon(k)$ 表达式如方程(8)所示。

$$\varepsilon(k) = \sum_{i=1}^T (y_0(k-i) - y(k-i)) \quad (8)$$

修正后的预测模型的输出预测值 $y_m(k+l)$ 表达式如方程(9)所示, β 为修正系数。

$$y_m(k+l) = y_0(k) + \beta \varepsilon(k) + \sum_{i=1}^N (a_{l+i} - a_i) \Delta u(k-i) \quad (9)$$

3.3 前向时延补偿

前向时延补偿的目标是减少由于网络传输时延所导致的控制信号不能及时到达本地控制器而对控

制系统性能造成的影响。在方程(3)中, U 是由目前控制增量 $\Delta u(k)$ 与 $m-1$ 个未来控制增量所组成的矢量, 一般情况下, 仅仅 $\Delta u(k)$ 控制增量起作用, 而从控制增量 $\Delta u(k+1)$ 到 $\Delta u(k+m-1)$ 并没有被利用。如果前向控制输入被延迟一个采样间隔时, 本地控制器不能及时接收到下一个控制增量, 则可采用方程(10)中的矢量 $\hat{U}$ 进行预测计算, 假设被延迟 l 个采样间隔时, $\hat{U}$ 中的向量整体向左平移 l 步, 通过这种策略解决前向互联网时延对最优控制向量 U 的影响。

$$\hat{U} = [\Delta u(k+1) \ \dots \ \Delta u(k+m-1) \ 0]^T \quad (10)$$

4 仿真研究

本仿真实验的目的是在模拟互联网传输环境下, 研究互联网时延对控制系统性能的影响, 并评估所提出的前向、反馈时延补偿策略的补偿性能。仿真实验在 3 种环境下被执行, 分别是前向、反馈端不存在互联网时延(情况 1), 前向、反馈端存在时延并且没有时延补偿(情况 2)以及前向、反馈端存在时延并采用补偿策略(情况 3)。因为本仿真研究主要评估时延补偿策略的补偿性能, 本地端闭环回路(包括本地控制器、被控对象模型)采用离散过程模型为 $0.28z^{-1}/(1-0.84z^{-1})$, 如图 4 所示。假定前向和反馈端通信均存在互联网时延, 在 Matlab 的 Simulink 环境下进行系统仿真实验, 其中互联网最大时延是 10 s; 远程控制器的控制时域 $m=6$, 输出预测时域 $p=10$, 收敛参数 $\alpha=0.6$, 修正系数 $\beta=1$; 远程控制器的采样间隔 $t_{\text{remote}}=1$ s; 阶跃输入设定值为 1; 扰动值为 0.5。

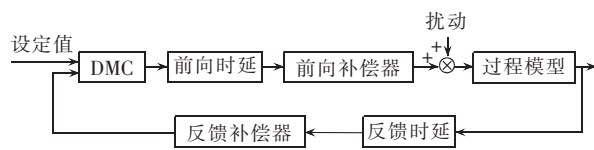


图 4 仿真实验
Fig.4 Simulative experiment

图 5、6 分别给出了 3 种情况的仿真实验的实验结果(图中纵坐标 M_{out} 、 K_{out} 分别为模型输出和控制器输出)。相比较无时延的情况, 前向、反馈端存在互联网时延严重影响了控制系统的性能。正如期望的一样, 相比较无时延补偿的控制系统, 带有时延补偿的远程控制系统明显地降低了超调量, 减少了调节时间, 将控制系统的性能维持在可以接收的水平。因此, 基于 DMC 控制器设计的时延补偿策略是一种

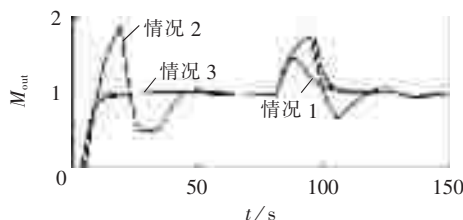


图 5 过程输出的仿真结果
Fig.5 Simulative result of process output

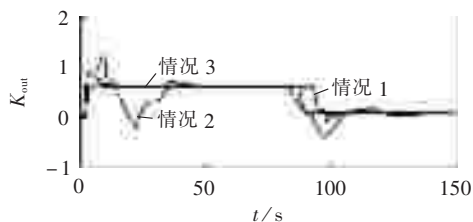


图6 控制器输出的仿真结果

Fig.6 Simulative result of controller output

有前途的补偿互联网时延影响控制系统动态性能的方法。

5 结语

针对不确定性的互联网传输时延影响基于互联网的远程控制系统动态性能的问题,在已有的研究成果基础上,改进传统的网络化控制系统结构,提出了采用变采样率方法的双层控制系统结构。利用变采样率方法解决单一恒定采样频率难以把握控制系统的采样频率快慢问题;基于双层控制系统结构利用动态矩阵预测控制器分别设计了前向和反馈时延补偿策略,并在 Matlab 的 Simulink 环境下对时延补偿进行仿真研究,实验结果表明在随机互联网时延的环境下采用前向、反馈时延补偿策略能够有效地改善控制系统的动态性能。

参考文献:

- [1] OVERSTREET J W, TZES A. An Internet-based real-time control engineering laboratory[J]. IEEE Control Systems, 1999, 19(5): 19-33.
- [2] LI Hong-yan. Web-based remote monitoring and control for process plants[C]// Proceeding of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, China: [s.n.], 2005: 936-941.
- [3] HAN K H, KIM S, KIM Y J, et al. Internet control architecture for Internet-based personal robot[J]. Autonomous Robots, 2001 (10): 135-147.
- [4] 柯于辉, 李红艳, 李承军. 基于互联网的过程控制系统的安全性设计[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(9): 31-33.

- KE Yu-hui, LI Hong-yan, LI Cheng-jun. Safety design of process control systems based on Internet[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(9): 31-33.
- [5] GOLDBERG K. Collaborative teleoperation via the Internet[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA: IEEE, 2000: 2019-2024.
- [6] BRADY K, TZYH J T. Internet-based remote teleoperation[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 65-70.
- [7] YANG S H, CHEN X, ALTY J L. Design issues and implementation of Internet-based process control systems[J]. Control Engineering Practice, 2003(11): 709-720.
- [8] 黄杰, 吴平东, 修震, 等. 基于因特网的运动控制系统中变采样过程的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 755-759.
- [9] 李红艳. 基于互联网的过程控制系统的时延补偿[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(8): 51-53.
- LI Hong-yan. Time-delay compensation for Internet-based process control systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2005, 33(8): 51-53.
- [10] LUO R C, CHEN T M. Development of a multibehaviour-based mobile robot for remote supervisory control through the Internet[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2000, 5(4): 376-385.
- [11] LIU Ding, DU Jin-hua. Study on the time-delay of Internet-based industry process control system[C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China: [s.n.], 2004: 1376-1380.
- [12] LUCK R, RAY A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems[J]. International Journal of Control, 1994, 59(6): 1357-1372.
- [13] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. Automatica, 1990, 26(5): 903-908.
- [14] YANG S H, ZUO X, YANG L. Controlling an Internet-enabled arm robot in an open control laboratory[J]. Assembly Automation, 2004, 24(3): 280-288.
- [15] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

(责任编辑: 李玲)

作者简介:

李红艳(1978-), 女, 湖北襄樊人, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为基于互联网的远程控制以及网络信息安全(E-mail: hongyanli78@yahoo.com.cn)。

Research on time-delay compensation strategy for Internet-based remote control system

LI Hong-yan

(Department of Computer and Electronic Science,
Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China)

Abstract: Two-level control system with variable sampling rate is proposed to reduce the influence of uncertain Internet time-delay on control system performance. The close-loop control structure at lower level adopts higher constant sampling rate to ensure the control system stability, while the close-loop control structure at higher level adopts lower variable sampling rate to reduce network load and avoid data loss. For long Internet time-delay and data package loss, both feedback and feedforward time-delay compensation strategies are designed using the DMC(Dynamic Matrix Controller). The simulative results prove that, the compensation strategies improve efficiently the dynamic performance of control system in the Internet environment with random time-delay.

The project is supported by the Key Scientific Research Project of Hubei Education Office(B200519001).

Key words: control system; Internet; time-delay; DMC; compensation strategy