

文章编号: 1000-8152(2006)01-0115-04

## 自适应 Smith 补偿器在基于 IP 的网络控制系统中的应用

陈 鹏<sup>1,2</sup>, 戴连奎<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室 智能系统与决策研究所, 浙江 杭州 310027;

2. 上海交通大学 自动化系, 上海, 200240)

**摘要:** 在基于 IP 网络的网络控制系统(NCSs)中,网络诱导时延变化显著且往往大于一个采样周期.本文引用数据通信中应用广泛的网络回程时间来估计 NCSs 中时变的全回路网络诱导时延,并提出了一种新的自适应 Smith 补偿器.仿真结果表明,该补偿器能够有效地消除网络诱导时延变化对控制性能的负面影响;结合该自适应 Smith 补偿器所设计的控制系统能够获得很好的控制性能与较强的鲁棒性.

**关键词:** 网络控制系统; 网络诱导时延; 回程时间; Smith 补偿器

**中图分类号:** TP13      **文献标识码:** A

## Adaptive Smith compensator for NCSs over IP networks

CHEN Peng, DAI Lian-kui

(1. National Key Lab of Industrial Control Technology, Institute of Intelligent Systems and Decision Making,

Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

2. Automation Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In networked control systems (NCSs) over IP networks, the network-induced delay often varies dramatically and might be longer than a sampling period. The concept of round trip time, which is widely used in data communication, is introduced to estimate the varying network-induced delay, and a novel adaptive Smith compensator is developed in this paper. Simulation results show that the proposed compensator can avoid the negative impacts of the varying network-induced delay on control performances, and the control system with the adaptive Smith compensator can provide good performances and strong robustness.

**Key word:** networked control systems; network-induced delay; round trip time; Smith compensator

## 1 前言(Introduction)

近年来,网络控制系统(Networked Control Systems, NCS)的研究者们逐渐意识到,基于 IP 协议的以太网(Ethernet)是最有潜力在未来替代现有的多标准现场总线技术<sup>[1]</sup>.尽管它是一种随机性网络,但是它出众的带宽能力可以满足大多数控制系统的实时性要求,成熟的软硬件技术和低廉的成本也是其不可忽视的优势.然而,IP 网络的随机访问特性也给传统的控制方法应用带来了一些问题,其中最突出的就是较大的不确定时延以及丢包带来的控制品质的降低<sup>[2]</sup>,这给 NCS 中控制器的设计带来了困难.

目前在基于 IP 网络的 NCS 中,针对时延的不确定性,控制器设计主要包括随机控制和确定性控制两类方法.随机控制方法利用随机控制理论,保证

系统在统计意义上的稳定性和性能指标,但前提是已知时延的概率特性<sup>[3]</sup>.如果得到的时间延迟的统计特性只是近似的,据此设计的控制器也难以保证在任何情况下系统均能保持稳定,并且该方法得到的控制系统稳定条件是在假设时延小于一个采样周期的前提下得出的.确定性方法将时延的不确定性通过把带有时间戳的采样数据引入一个信息接收缓冲区来实现时延的确定化<sup>[4,5]</sup>.这种方法的优点是可以利用现有的确定性大时滞系统的设计方法进行控制器的设计,但缺点也是显而易见的:缓冲区人为地将不定时延都扩大成了最大时延,牺牲了系统的灵敏度来换取控制器对时延变化的鲁棒性.对于空间覆盖范围很广的以太网来说,其时延变化范围宽,远大于一个采样周期,同时时延变化的概率分布难以精确获取.为此,怎样动态地消除变化的网络时延

对整个系统的影响,找到一个适宜的控制方法,已成为基于 IP 网络的 NCS 设计中一个迫切需要解决的问题。

本文引入网络回程时间 (Round Trip Time, RTT) 对基于 IP 网络的 NCS 系统的网络诱导时延进行实时估计,避免了节点时钟的不同步带来的时延估计误差,并通过 Smith 补偿器对变化的网络时延进行动态补偿。仿真结果表明,该补偿器可以有效地消除远大于一个采样周期的网络时延对系统性能的影响,在此基础上设计的控制器对 IP 网络中较大的时延变化以及对象参数的变化均具有很好的鲁棒性。

## 2 基于 IP 网络控制系统的描述 (Description of NCSs over IP Networks)

基于 IP 网络的 NCS 结构如图 1 所示<sup>[6]</sup>,其中 IP 网络代表了从工业现场到控制器所经过的公共通信网络。IP 网络上除与 NCS 有关的过程数据流外,还存在其它的数据流,如 TCP 流、UDP 视频流等。本文假设 NCS 过程数据流使用 UDP (User Datagram Protocol) 作为传输层的协议。在基于 IP 协议的 Ethernet 中,由于网络资源 (链路带宽、网络设备的处理能力和队列缓存等) 的有限,可能导致网络出现拥塞和冲突,从而产生数据的延迟和丢失。

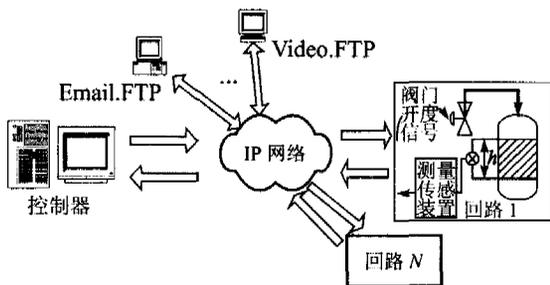


图 1 基于 IP 网络的 NCS 结构

Fig. 1 Structure of networked control systems over IP networks

在图 1 所示的 IP 网络中,同一链路通常为多个 NCS 所共享。为便于讨论,这里仅考虑某一单输入单输出 (Single-Input-Single-Output, SISO) NCS 系统,而将基于同一网络的其它 NCS 系统与其它数据流视为干扰流。一个典型的单输入单输出 NCS 系统可以用图 2 表示,其中  $y_{sp}$  为控制系统的设定值,  $y$  为被控对象的实际输出,  $u$  为控制器输出, Net2 表示从控制器输出到执行器的通信链路,  $u_{com}$  表示经过 Net2 传输后的控制器输出 (即实际有效的控制器输出),  $f$  为执行器的输出 (通常可用执行器开度来描述),  $y_m$  为  $y$  的观测值, Net1 表示从测量装置到控制器输入的通信链路;  $y_{com}$  表示经过 Net1 传输后的对

象输出的观测值,  $D_1, D_2$  分别表示通信链路上的干扰数据流,  $D_w$  是被控对象的外界扰动。

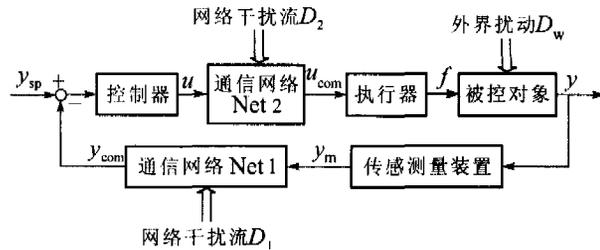


图 2 单输入单输出 NCS 系统的组成

Fig. 2 Configuration of an SISO networked control system

## 3 基于回程时间的自适应 Smith 动态补偿器 (Adaptive Smith compensator based on round trip time)

### 3.1 网络时延的动态估计 (Estimation of the network-induced delay)

在计算机网络中,网络回程时间 RTT 定义为信号源从发出一个数据包开始,到目的端收到该数据包后发出的确认信号重新回到信号源端所经历的时间。我们可以利用 IP 网络协议的开放性用回程时间来估计网络的动态时延。具体实现方法为:假设在控制器和执行器都为事件驱动、传感器为时间驱动、过程数据采用单包传输的 NCS 中,在控制器所发出的控制信号数据包中增加一个字段,存放该控制信号发出时控制器节点的时间  $T_k$ ; 当该数据包到达执行器节点时,执行器解包得到该时间,并立即执行控制命令,当采样时间到达时,传感器采集现场信号并加上原控制器节点时间  $T_k$  打包通过通信网络传回控制器。由于我们使用 UDP 作为网络层的传输协议,网络中并没有直接的确认信号返回信号源端,因此将控制器实际获得的带有节点时间  $T_k$  的采样数据包看作是目的端发出的确认信号。控制器得到采样数据包后解出时间戳字段并与当前控制器节点时间相减,即可得到该数据包的回程时间,我们把它记为此时的网络诱导时延估计值  $\hat{\tau}(t)$ 。时延估计值  $\hat{\tau}(t)$  直接反映了通信网络 Net 1 与 Net 2 的总的传输时延。

基于上述网络诱导时延的估计值  $\hat{\tau}(t)$ , 我们可以通过 Smith 补偿器对采样数据序列进行动态补偿,以消除网络诱导时延对控制系统的影响。

### 3.2 自适应 Smith 补偿器设计 (Design of adaptive Smith compensator)

对于如图 2 所示的单输入单输出 NCS, 自适应 Smith 预估补偿器的工作原理如图 3 所示,  $y_{sp}$  为控制系统的设定值,  $y_m(t)$  为实际对象输出  $y$  在  $t$  时刻

的采样观测值;  $y_{com}(t)$  表示  $t$  时刻到达控制器节点的采样值;  $D_w(t)$  表示外界对实际对象的扰动输入,  $G_p(s)e^{-\tau_p}$  表示从执行器到测量变送环节的实际对象,  $\tau_p$  表示实际对象的纯滞后;  $\hat{G}_p(s)$  表示不含纯滞后后的对象估计模型,  $e^{-\hat{\tau}_p}$  表示广义对象纯滞后特性的估计模型。

对于任一采用线性定常控制器的 SISO 系统, 控制性能主要取决于自控制器输出至控制器输入的控制通道的动态特性, 其中控制通道纯滞后时间的大小对控制性能的影响至关重要。对于 SISO 网络控制系统, 控制通道的纯滞后时间由被控对象本身的纯滞后时间与通信网络 Net 1、Net 2 所产生的数据传输时延叠加而成。因此, 当被控对象的动态特性基本不变时, NCS 的控制性能主要与 Net 1、Net 2 产生的数据传输时延之和有关。然而, 实际被控过程的动态特性总是会在一定范围内变化, 为了提高控制系统的鲁棒性, 图 3 引入了估计误差的一阶滤波环节  $\frac{1}{T_f s + 1}$ 。

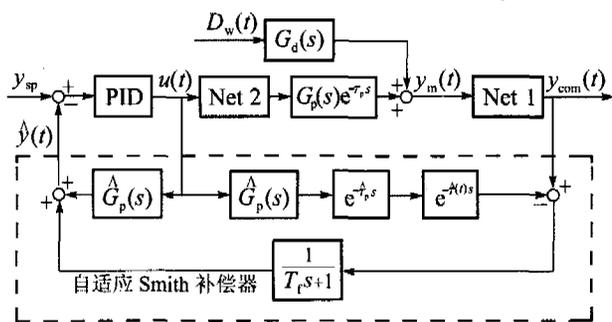


图 3 自适应 Smith 预估补偿器的工作原理图

Fig. 3 Control diagram of adaptive Smith compensator

### 4 仿真及结果 (Simulation results)

#### 4.1 仿真系统的构造 (Construction of simulation system)

假设图 3 中实际对象的传递函数  $G_p(s)$  可描述为

$$G_p(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (1)$$

纯滞后环节描述为  $e^{-\tau_p}$ 。图 3 中外界扰动输入  $D_w(t)$  对测量值  $y_m$  的干扰通道传递函数取为

$$G_d(s) = \frac{K_{dw}}{T_{dw} s + 1}, \quad (2)$$

而设 PID 控制器采用如式(3)所示的实际微分 PID 控制器,

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \frac{T_d s + 1}{A_d s + 1}. \quad (3)$$

在这里, 我们采用数据流模型建立 NCS 中通信

网络环节的动态模型, 以模拟数据在网络中传输的时延和丢包<sup>[7]</sup>。通过设置不同的网络干扰流强度来模拟不同的网络负载。

假设系统的采样周期为 1 s; 被控对象的输入输出稳态值分别为  $u = 50\%$ ,  $y_m = 40\%$ 。在 10 s 时闭环系统的设定值  $y_{sp}$  由 40% 跳变至 60%, 在 200 s 时加入阶跃幅度为 20 的外界干扰  $D_w(t)$ , 当仿真进行至 440 s 时加入幅度为 20 的反向干扰。在 440 s 之前网络负载较轻, 时延在 3 s 到 10 s 之间, 丢包率比较小; 440 s 之后网络负载加大, 时延在 3 s 到 30 s 之间变化, 丢包率也增大。

假设控制器参数恒定为  $K_c = 0.7$ ,  $T_i = 12$  s,  $T_d = 3$  s,  $A_d = 10$ ; 滤波环节  $T_f = 4$  s。另外, 这里假设不含纯滞后的对象估计模型传递函数  $\hat{G}_p(s)$  恒定为

$$\hat{G}_p(s) = \frac{1}{(20s + 1)(2s + 1)}, \quad (4)$$

纯滞后环节为  $e^{-\hat{\tau}_p}$ ,  $\hat{\tau}_p$  恒定为 3 s。下面针对 Smith 预估模型和实际对象特性是否一致来分析仿真结果。

#### 4.2 模型与实际对象相符时的仿真结果 (Simulation results with an accurate model)

当 Smith 预估模型和实际精确匹配时, 即  $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$ , 被控对象  $G_p(s)$  和  $\hat{G}_p(s)$  中参数同为  $T_1 = 20$  s,  $T_2 = 2$  s,  $K = 1$ ,  $\tau_p = \hat{\tau}_p = 3$  s 时, 仿真结果如图 4 所示。

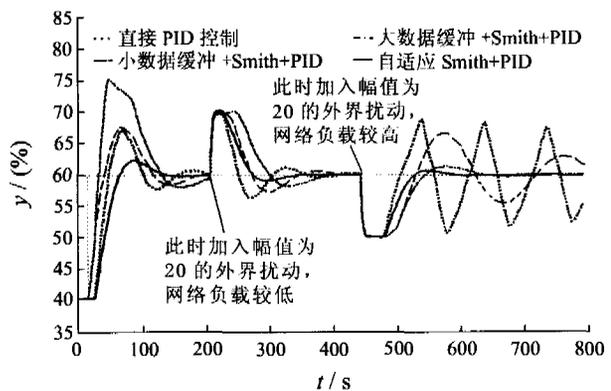


图 4 模型精确时不同控制方法的仿真结果

Fig. 4 Simulation results using different control methods with an accurate model

由图 4 可见, 网络负载较小时, 各种方法均具有良好的抑制扰动的效果, 在跟踪设定值变化时, “自适应 Smith 预估器 + PID 控制” 方法的超调量明显小于其它 3 种方法; 当网络负载加大时, 只有 “自适应 Smith 预估器 + PID 控制” 和 “大数据缓冲 + Smith 预估补偿 + PID 控制” 依然保持稳定, 其余两种方法出现了发散振荡。

### 4.3 模型与实际对象存在偏差时的仿真结果 (Simulation results with an inaccurate model)

当  $G_p(s)$  中的参数缓变为  $T_1 = 10\text{ s}$ ,  $T_2 = 2\text{ s}$ ,  $K = 1.25$ ,  $\tau = 5\text{ s}$ ; 而对象模型  $\hat{G}_p(s)$  与纯滞后环节  $e^{-\tau s}$  不变时, 仿真结果如图 5 所示。

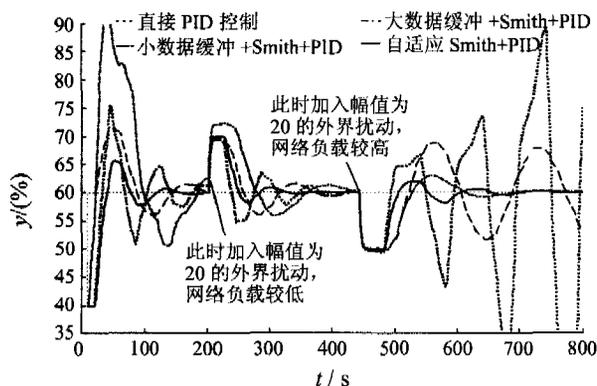


图5 模型不精确时不同控制方法的仿真结果

Fig. 5 Simulation results using different control methods with an inaccurate model

由图 5 可见, 在采用相同的 PID 参数的前提下, “自适应 Smith 预估器 + PID 控制” 对实际对象参数在一定范围内的变化并不敏感, 无论是跟踪还是抗扰动能力均要好于其它三种方法. “小数据缓冲 + Smith 预估补偿 + PID 控制” 和 “直接 PID 控制” 在网络负载加重后出现了发散振荡; “大数据缓冲 + Smith 预估补偿 + PID 控制” 虽然能够保持重网络负荷下的稳定性, 但在网络负载较轻的情况下, 控制效果就显得比 “自适应 Smith 预估器 + PID 控制” 或者采用小数据缓冲的方法差了很多, 其原因在于: 大的数据缓冲人为地加大了系统的纯滞后, 使系统的可控性下降. 总的来说, 数据缓冲加 Smith 预估补偿方法是一种相对保守的控制方法. 而自适应的 Smith 补偿方法则最大程度地利用了采样数据的 “实时性”, 因而具有较好的控制品质.

上述仿真结果表明: 使用自适应 Smith 预估补偿方法可以随着网络负荷的改变动态地对网络诱导时延进行补偿, 可以获得比数据缓冲加 Smith 预估补偿方法更好的控制效果; 而且此方法对不同的网络负荷

以及实际对象特性的变化均有着良好的鲁棒性.

## 5 结论 (Conclusion)

本文针对基于 IP 网络的 NCS 中网络诱导时延变化范围大, 时延往往远大于一个采样周期且存在数据丢失的特点, 提出了一种自适应 Smith 补偿器. 仿真结果表明, 该补偿器能够有效地消除网络诱导时延变化对控制性能的负面影响; 结合该自适应 Smith 补偿器所设计的控制系统能够获得很好的控制性能与较强的鲁棒性.

## 参考文献 (References):

- [1] KAPLAN G. Ethernet's winning ways [J]. *IEEE Spectrum*, 2001, 38 (1): 113-115.
- [2] CHOW M Y, TIPSUWAN Y. Network-based control system: a tutorial [C] // *Proc of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Denver, CO: IEEE Press, 2001: 1593-1602.
- [3] NILSSON J, BERNHARDSSON B, WITTENMARK B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays [J]. *Automatica*, 1998, 34 (1): 57-64.
- [4] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11 (10): 1099-1111.
- [5] CHAN H, OZGUNER U. Closed-loop control of systems over a communication network with queues [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Baltimore, MD: AACC, 1994: 811-815.
- [6] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. On the gain scheduling for networked PI controller over IP network [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9 (3): 491-498.
- [7] 陈鹏, 戴连奎. 基于 IP 网络的 NCS 中通信网络动态模型的建立 [J]. *化工自动化及仪表*, 2005, 32 (1): 37-40.  
(CHEN Peng, DAI Liankui. Modeling of communication network based on IP Networks in NCS [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2005, 32 (1): 37-40.)

## 作者简介:

陈鹏 (1980—), 男, 主要研究方向为网络控制系统的建模与控制器设计, E-mail: chenpeng@zj139.com;

戴连奎 (1963—), 男, 教授, 主要研究方向为工业过程建模、预测控制、计算机网络控制与优化.