

分数阶 PID 控制在网络控制系统中的应用

王莉¹ 郭伟¹

摘要

分数阶 PID 控制器较传统整数阶 PID 控制器增加了 2 个可调参数,使得其控制器的设计更加灵活,控制性能更加优良. 针对网络控制系统(NCS)中的时延以及数据包丢失问题,提出对系统采用分数阶 PID 控制方法进行补偿,利用 MATLAB/True Time 仿真工具箱对 NCS 进行仿真研究. 仿真实验结果表明,采用分数阶 PID 控制方法可以对时延以及数据包丢失问题进行有效的补偿,且控制效果明显优于整数阶 PID 方法.

关键词

网络控制系统;分数阶 PID 控制;整数阶 PID 控制;时延;数据包丢失

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

0 引言

Introduction

网络控制系统(Networked Control System, NCS)不同于常规的控制系统,其所有信息(参考输入、控制输入和设备输出)的传递交换都是通过网络进行的,而数据在网络传输过程中,不可避免会产生时延以及数据包丢失问题. 因此,如何在 NCS 中尽量减少网络时延以及数据包丢失对控制系统的影响,是目前控制界研究的热点问题之一.

文献[1]利用在控制器和执行器接收端设置缓冲区的方法,将随机时延转化为固定时延,采用预测控制方法设计补偿控制器,但是该方法中缓冲区的引入导致所有的时延都转化为最大时延,人为地扩大了时延,降低了系统的性能. 文献[2]提出了基于模型的网络时延补偿方法,基本思想是减少网络上信息的传输量,减少系统对网络的依赖,但是这种方法也只是考虑传感器—控制器时延,没有考虑控制器—执行器之间的时延问题,而且也忽略了数据在传输过程中可能会发生数据包丢失的情况. 因此有必要研究一种方法可以在不影响 NCS 自身时延的情况下,改进系统的控制性能;同时,该方法对数据包丢失还应具有一定的鲁棒性. 考虑到众多研究都未脱离整数阶 PID 控制方法,而分数阶 PID 比整数阶 PID 多出 2 个可调参数,其控制器参数的整定范围变大,控制器能够更灵活地控制受控对象;同时考虑到现实的许多系统是属于分数阶而非整数阶的,因而在网络控制系统中引入分数阶 PID 控制方法,探讨分数阶 PID 的参数设计对其控制性能的影响具有重要的理论意义与实际应用价值.

本文结合网络控制系统实例,采用分数阶 PID 控制方法,利用工具箱 True Time 对 NCS 进行仿真,验证了分数阶 PID 控制的优越性.

1 网络控制系统

Networked control system

网络控制系统是指通过网络将分布于不同地理位置的传感器、执行机构和控制器连接起来,形成闭环的一种全分布式实时反馈控制系统. 控制器通过网络与传感器和执行机构交换信息,并实现对远程被控对象的控制.

图 1 所示为网络控制系统的组成示意,一个网络控制系统往往由多个子控制系统构成,通信信道为系统中各个设备共有,智能化输入/

收稿日期 2009-10-27

资助项目 国家 863 计划(2006AA040308)

作者简介

王莉,女,硕士生,主要研究方向为计算机控制与仿真. harveywk@126.com

郭伟(通信作者),男,教授,主要从事计算机控制与仿真,预测控制方法等方面的研究. guowei@nuist.edu.cn

¹ 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

输出设备如传感器、执行器与控制设备都通过通信网络进行连接,实现信息共享.

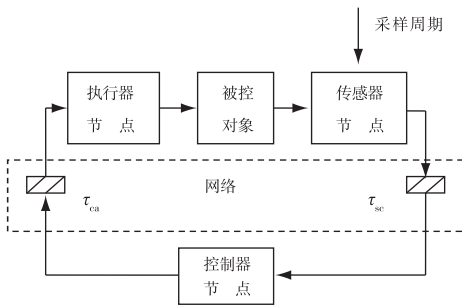


图1 网络控制系统的结构

Fig. 1 The framework of NCS

NCS 可以增加系统可靠性,降低权重、空间以及布线要求.然而,网络中的信息源很多,当系统各个节点通过网络传输信息时,要分时共享网络通信信道,待发送的信息只有等到网络空闲或设备的优先级相对较高时才能被发送出去,这就不可避免地导致数据传输时延^[3]——网络诱导时延的发生.从控制的角度来看,网络时延的存在会降低系统性能,甚至会引起系统的不稳定;从调度的角度来看,网络时延会使信息不能按时到达,丢失截止期.因此,必须在 NCS 中利用有限的网络资源达到最优控制的目的,以尽量减少网络时延对控制系统的影响.

通常,由于受到网络所采用的通信协议、网络当时的负荷状况、网络的传输速率和信息包大小等诸多因素的影响,网络诱导时延是随机变化的,呈现出或固定、或随机、或有界、或无界的特征,这对 NCS 的闭环性能和稳定性会产生不利影响.数据包排队等待时延、信息产生时延以及传输时延构成了网络诱导时延的主要部分^[4].当传感器、控制器和执行器之间通过网络传递消息时,在经过路由器时还有排队等待时延,以及不同网段间传输时延等.另外,有些网络协议在发生数据包丢失或出错时允许重发数据包,这又增加了数据传输时延.总的来说,在进行控制系统分析时,需要考虑到3种重要时延,包括传感器到控制器的时延 τ_{sc} 、控制器到执行器的时延 τ_{ca} 以及控制器的计算时延 τ_c .

在 NCS 中,当节点发生故障和信息发生冲突时会发生数据包丢失的现象.因此,分布式的结构可能会引起不同处理器间的数据缺乏一致性,这意味着控制程序可能会根据错误的的数据运行.虽然大多数网络具有重传机制,但重传受时间限制,超过限定的时间,数据包仍然会丢失.研究表明,一个稳定运行

的 NCS 容许有一定量的数据包丢失,但数据包丢失率超过一定值时将使系统失稳.

因此,NCS 必须根据网络诱导延迟的特征以及网络和控制参数进行建模.另外,设计控制器必须要基于 NCS 的模型并且要考虑到延迟信息.

2 分数阶 PID 控制器

Fractional-order PID controller

分数阶控制是对传统的整数阶控制理论的一种概括和补充.分数阶微积分指微分、积分的阶次是分数的或者说任意的,它扩展了所熟知的整数阶微积分的描述能力.通常用分数阶微积分方程来描述分数阶系统:

$$a_n D^{\alpha_n} y(t) + \dots + a_1 D^{\alpha_1} y(t) + a_0 D^{\alpha_0} y(t) = b_m D^{\beta_m} u(t) + \dots + b_1 D^{\beta_1} u(t) + b_0 D^{\beta_0} u(t). \quad (1)$$

其中: $\alpha_n > \alpha_{n-1} > \dots > \alpha_1 > \alpha_0 \geq 0$, $\beta_m > \beta_{m-1} > \dots > \beta_1 > \beta_0 \geq 0$ 为任意实数; $a_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 和 $b_j (j=0, 1, 2, \dots, m)$ 为任意常数.

由于现实的许多系统是属于分数阶而非整数阶的,基于分数阶被控系统,众多学者提出了分数阶控制器.如 Podlubny^[5] 在 1999 年提出了分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器.

分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的传递函数为

$$G_{ic}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_I s^{-\lambda} + K_D s^\mu. \quad (2)$$

式(2)中: λ, μ 分别是控制器的积分阶次和微分阶次, $\lambda, \mu \geq 0$; K_p 是比例增益; K_I 是积分系数; K_D 是微分系数; $U(s)$ 是控制器的输出; $E(s)$ 是控制器的误差输入.可见传统的整数阶 PID 控制器是分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器在 $\lambda = 1$ 和 $\mu = 1$ 时的特殊情况.当 $\lambda = 1, \mu = 0$ 时,就是 PI 控制器;当 $\lambda = 0, \mu = 1$ 时,就是 PD 控制器.

分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的积分阶次 λ ,微分阶次 μ 为实数,比整数阶 PID 多出 2 个可调参数,所以控制器参数的整定范围变大,控制器能够更灵活地控制受控对象.合理调节 5 个参数 K_p, K_I, λ, K_D 和 μ ,设计出的分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器,与整数阶 PID 控制器相比,能够更好地控制分数阶被控系统.

3 仿真实例及分析

Simulation and analysis

3.1 时延仿真分析

利用 True Time 工具箱对网络控制系统进行仿真.传感器、执行器、控制器和干扰节点可分别用一

个 True Time Kernel 模块表示,因此,使用 4 个 True Time Kernel 模块与 1 个 True Time Network 模块构建如下仿真系统,系统结构如图 2 所示.该仿真模型中传感器通过网络将控制对象的信息传递给控制器,控制器经计算将处理过的信息又经过网络传递给执行器,如此构成一个反馈网络控制系统.被控对象传递函数为 $\frac{1\ 000}{4s^2+s+1}$,传感器节点设置为时钟驱动型

(到了采样周期即驱动设备工作);控制器节点和执行器节点均设置为事件驱动型(特定数据到达或是发送完毕等事件来驱动设备工作).该网络控制系统的信息传输时序如图 3 所示.图 3 中横轴为时间轴, $k-3, k-2, k-1$ 等代表采样时刻.由图 3 也可以看出:传感器节点为时钟驱动,定时采样信号并进行相应的动作;控制器为事件驱动,传感器节点的信号一旦到达控制器节点,该节点立即执行相应的操作.在信息通过网络传输的过程中,不可避免地会发生时延,主要的 2 个时延为传感器到控制器的时延 τ_{sc} 以及控制器到执行器的时延 τ_{ca} .

文献[6]将传感器到控制器的接收延时、控制器计算时间时延、控制器到执行器的发送时延都设为 0.001 s,网络干扰节点带宽设为 40%,对存在时延情况下 PID 控制的稳定性进行了分析.文献[7]将网络干扰节点带宽设为 50%,当把控制器节点到执行器节点的延迟设置为 0.025 s 时,系统失去稳定状态,说明了 PID 控制系统在处理带有网路延迟的控制对象时效果较差,延迟稍大系统就不能稳定.另外,类似的文献均在采样周期为 0.01 s 的情况下,把时延的范围设置在 $[0\ s, 0.01\ s]$,网络干扰节点带宽设为 40% 或 50%,对各控制性能进行比较,得出当时延超过一个采样周期时,系统震荡加剧甚至会失去稳定的结论.参考上述参数设置,本仿真实验中,网络采用 CAN 网协议,即根据优先权来决定信息的传输顺序,调度策略采用 prioFP,数据传输速率为 80 kbps,设置网络干扰节点带宽为 40%,规定干扰节点产生的信息具有最高优先级,采样时间设为 0.01 s,同时,将网络时延的值控制在 $[0\ s, 0.01\ s]$.被控系统在整数阶 PID 控制以及在分数阶 PID 控制下的单位阶跃响应如图 4、5 所示.

分析图 4、5 可以得出,随着时延的增大,系统的输出超调会增大、调节时间增加、稳定性降低.在存在相同时延的情况下,分数阶 PID 控制器的控制效果明显优于传统的整数阶 PID 控制器的控制效果,

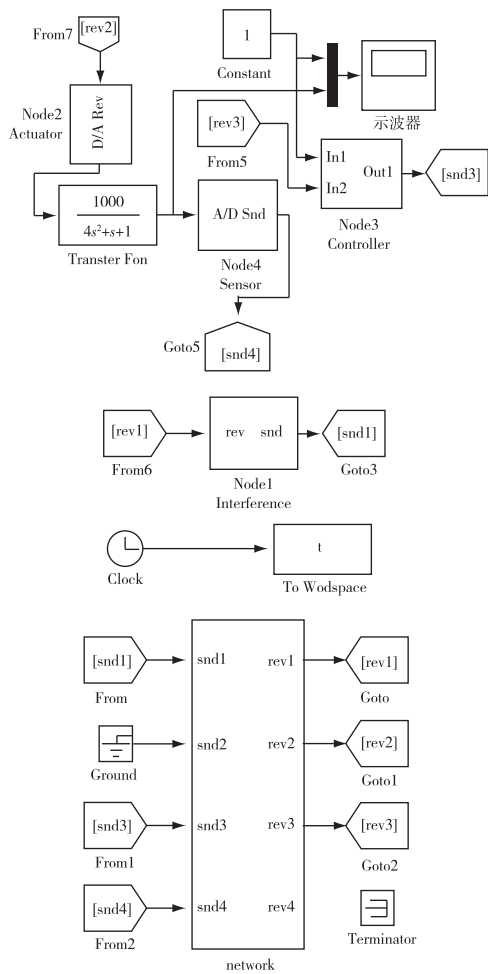


图 2 NCS 仿真结构

Fig. 2 The simulation structure of NCS

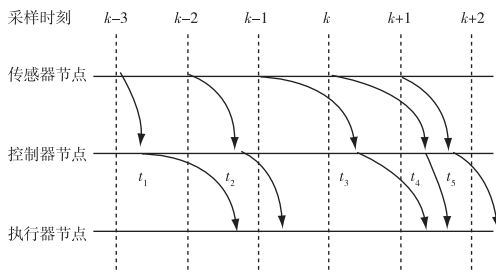


图 3 NCS 信息传输时序

Fig. 3 Transmission timing of the information in NCS

分数阶 PID 控制下系统的超调量比整数阶 PID 控制下系统的超调量少 0.32, 并且提前 0.5 s 左右达到平衡,且前者的震荡次数明显少于后者,这说明分数阶 PID 控制器对时延做了很好的补偿,控制的稳定性得到了很大的提高,控制效果良好.

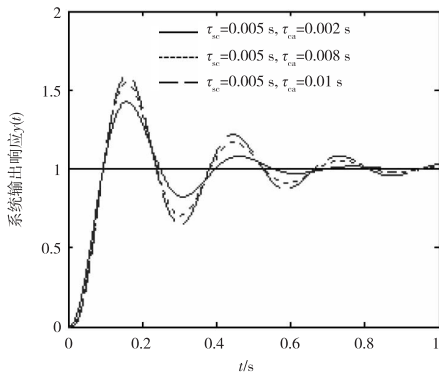


图4 整数阶 PID 控制性能随时延变化
Fig.4 Variation of integer-order PID control performance with time-delay

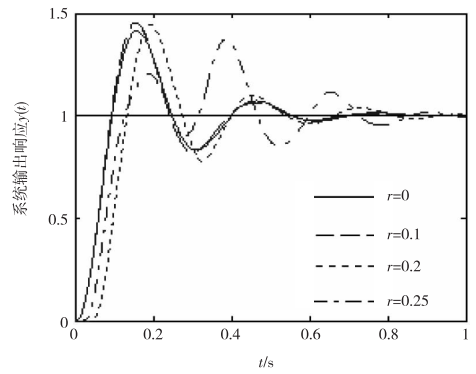


图6 存在数据包丢失时整数阶 PID 控制性能仿真
Fig.6 Simulation of integer-order PID control performance in the case of data packet dropout

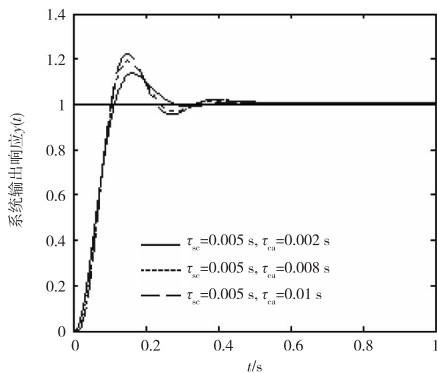


图5 分数阶 PID 控制性能随时延变化
Fig.5 Variation of fractional-order PID control performance with time-delay

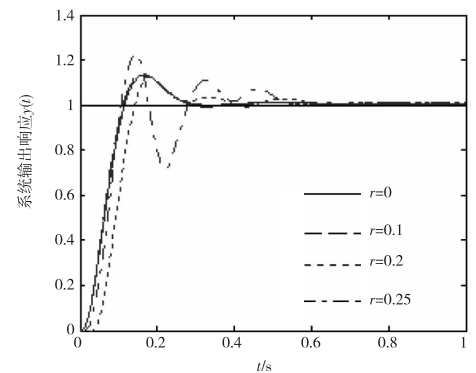


图7 存在数据包丢失时分数阶 PID 控制性能仿真
Fig.7 Simulation of fractional-order PID control performance in the case of data packet dropout

3.2 数据包丢失仿真分析

在 NCS 各参数设置的基础上,分析当网络控制系统中存在数据包丢失时分数阶 PID 控制器以及整数阶 PID 控制器的控制效果. 仿真结果如图 6、7 所示,图中 r 表示数据包丢失率.

由图 6、7 可以看出,在一个稳定运行的 NCS 中允许有一定量的数据包丢失,但当数据包丢失率逐步增大时,系统的性能逐渐恶化,超调逐渐增大,响应时间逐渐变慢,随着数据包丢失率的进一步增大,系统失去稳定. 比较图 6 和图 7 发现,分数阶 PID 控制下的 NCS 的性能要优于整数阶 PID 控制下的性能,与整数阶 PID 控制相比,分数阶 PID 控制具有较强的鲁棒性.

4 结语

Concluding remarks

在网络控制系统中,网络诱导时延以及数据包

丢失是不可避免的,针对这种现象,本文采用分数阶 PID 控制方法替代了传统的整数阶 PID 控制,使系统的控制性能得到了很好的改善. 但在实际的工业控制中,控制和输出的时延往往会由于执行器群和传感器群的不同而具有不同的网络特性,且通常会出现时延大于采样周期的情况,而且,在实际的网络控制系统中,数据包丢失率往往会由于控制系统所采用的网络控制协议的不同而出现较大的差异. 因此,需进一步研究控制策略以期使时延与数据包丢失得到更好的补偿.

参考文献

References

- [1] Rogelio L, Asok R. An observer-based compensator for distributed delays [J]. Automatic, 1990, 6(5): 903-908
- [2] Montestruquel A, Antsaklis P J. On the model-based control of network systems [J]. Automatic, 2003, 39: 1837-1843
- [3] Nikolai V, Jean-Philippe G, Christophe A, et al. Network control

- with delay measurement and estimation [J]. Control Engineering Practice, 2008, 17(2):231-244
- [4] 张庆灵, 邱占芝. 网络控制系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 34-36
ZHANG Qingling, QIU Zhanzhi. Network control system [M]. Beijing: Science Press, 2007: 34-36
- [5] Podlubny I. Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1):208-214
- [6] 程启明, 郭瑞青, 杜许峰, 等. 基于 True Time 工具箱的网络控制系统及其在电机控制上的应用 [J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(1):23-27
CHENG Qiming, GUO Ruiqing, DU Xufeng, et al. The network control system based on True Time toolbox and its application in DC motor control [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2009, 25(1):23-27
- [7] 崔桂梅, 李翔. 利用 True Time 仿真软件研究网络控制系统的性能 [J]. 自动化与仪器仪表, 2008(4):88-91
CUI Guimei, LI Xiang. Study on performance of network control system using True Time [J]. Automation and Instrument, 2008(4):88-91

Application of fractional-order PID control in networked control system

WANG Li¹ GUO Wei¹

1 School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Compared with the traditional integer-order PID controller, the fractional-order PID controller has two more adjustable parameters, so the latter can be designed flexibly and its control performance is better. Aimed at the existence of time-delay and data packet dropout in networked control system, a compensation method called fractional-order PID control is provided. Through the simulation using MATLAB/True Time toolbox, the efficiency of fractional-order PID control compensation method is confirmed, and this method is obviously more effective than integer-order PID control in compensating for time delay and data packet dropout.

Key words networked control system; fractional-order PID control; integer-order PID control; time-delay; data packet dropout