

传输速率约束下网络控制系统的性能分析

李力雄^{1,2}, 丁 瑾³

(1 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200072;
3 中国工商银行软件开发中心, 上海 201206)

摘要: 针对传输速率约束下的网络控制系统, 文章在传统的网络诱导延时分析的基础上, 对一类被控对象进行了仿真研究, 初步分析了传输速率、延时与控制性能三者之间的关系; 同时, 利用 Matlab 和 VC++ 混合编程技术, 设计并开发了专用的半物理实时仿真软件包, 仿真结果进一步验证了传输速率对控制性能的实际影响。

关键词: 网络控制系统; 传输速率; 控制性能; 实时仿真

中图分类号: TP39

文献标识码: B

文章编号: 1006-2394(2009)09-0007-03

Performance Analysis of Networked Control System under Data Rate Constraints

L I L i-xiong^{1,2}, D I N G J i n³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200072, China;

3. Software Development Center, ICBC, Shanghai 201206, China)

Abstract: In this paper, simulation experiments were conducted to explore the relationship among data rate, network-induced delay and control performance for networked control system under data rate constraints. Furthermore, a real-time simulation package was designed and developed using Matlab/VC++, and the control performance deterioration caused by limited data rate was verified by simulation results.

Key words: networked control system; data rate; control performance; real-time simulation

0 引言

随着信息技术的不断变革和发展, 通信网络作为成熟、低成本的信息传输方式被广泛用于各类控制系统之中, 形成了网络控制系统的概念。在网络控制系统的初期阶段, 为了方便研究, 通常将通信网络等价为网络诱导延时, 由此将网络控制系统简化为延时控制系统。

然而, 随着控制系统规模日益扩大, 传感器、控制器、执行器等控制器件数量的不断增长, 而共享网络带宽资源却又相对有限, 将通信网络简单地等价为延时的方法已经不能完全解决问题。因此, 在通信网络约束下, 特别是针对有限的传输速率和带宽, 开展网络控制系统的性能分析有着重要的学术和工程意义。目前, 国内外已经逐步开始出现相关研究, 并产生了一些理论成果。

本文在网络控制系统延时分析与研究的基础上, 进一步探索传输速率、带宽等通信参量对于控制系统

性能的影响, 并结合利用已有通用仿真工具, 开发出相应的实时仿真软件包进行仿真分析和验证。

1 控制性能研究

1.1 控制系统仿真模型

为了进行相应的仿真分析, 需要建立相应的数值仿真模型。TrueTime 是瑞典隆德工学院开发的一种基于 Matlab 的网络控制仿真工具箱, 本文利用该工具箱以及 Matlab Simulink 中的其他相关模块, 设计了网络控制系统仿真模型。在模型中, 确定被控对象为直流伺服电机, 直流电机模型可以用以下连续时间传递函数进行描述:

$$G(s) = \frac{1000}{s(s+1)}$$

此外, 系统模型中还包含了传感器、执行器、控制器、干扰节点等节点, 各节点均用 TrueTime 内核模块实现, 其中:

® 传感器节点 以时钟驱动方式运行, 对被控对

收稿日期: 2009-07

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目 (06ZR14131); 上海市重点实验室建设资助项目 (08DZ2272400)

作者简介: 李雄力 (1975—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为网络控制及其实验平台的构建。

象进行周期性采样,并经由网络将采样值发送到控制器节点;

® 控制器节点 以事件驱动方式运行,采用离散PD算法,计算获得控制信号后立即将结果发送到执行器节点;

® 执行器节点 以事件驱动方式运行,执行器收到控制信号后,随即执行该控制信号;

® 干扰节点 定时发送信号干扰网络通信,并在各网络节点中执行高优先级任务,以体现网络中存在的相关不确定性。

1.2 控制性能仿真

基于上述网络控制系统模型,传感器、执行器、控制器等节点之间采用以太网连接,并采用 TrueTime 网络模块实现。在传输速率在 125kbit/s 到 10Mbit/s 之间,选取 100 个传输速率采样点,分别利用 TrueTime 工具箱进行仿真。

其中,每个传输速率采样点条件下进行 10 次仿真,计算并记录网络控制系统的平均性能 (ITAE) 及网络平均延时 (delay),最终可获得传输速率与控制系统性能、传输速率与网络延时的关系曲线图,如图 1 所示。

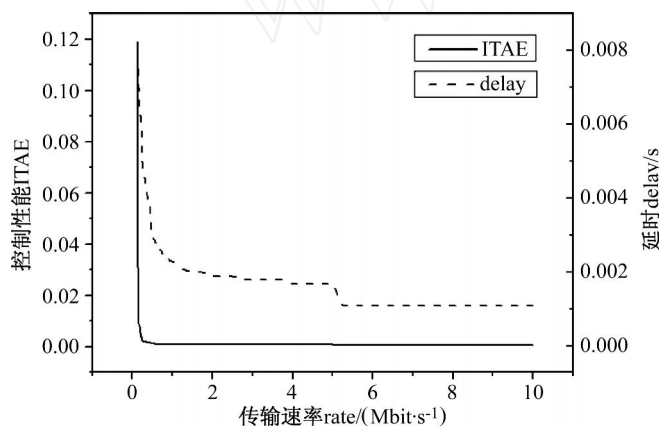


图 1 以太网控制系统性能仿真结果

2 TrueTime 仿真结果初步分析

2.1 数据传输速率 vs 网络诱导延时

由以上仿真结果可见,网络轻载情况下,网络诱导延时和传输速率大致呈反比关系。主要原因是:网络轻载时,等待延时较小,而以太网数据块长度较大,发送延时在总延时中占主导地位,由此整体趋势呈反比趋势。

当网络负载较重时,以太网等待延时明显增大而且不确定;同时,网络重载还会引发队列溢出,使分组丢失,有可能发生丢包现象,这相当于等待延时为无穷大。随着最大传输速率逐渐减小,网络利用率变大,网络负载相对增加,数据包碰撞几率增大,等待延时变

长。因此随着传输速率减小,传输速率 - 延时曲线出现了突然跳跃或者抖动的现象,延时为增长趋势。

2.2 数据传输速率 vs 控制性能

传输速率对网络控制性能也有一定程度的影响。当传输速率较大时,网络诱导延时基本可以忽略不计,控制性能的变化不大。而随着传输速率的逐渐减小,数据在通信网络中传输所耗费的延时增大,甚至发生数据丢包现象,网络控制性能因此下降。另外,由仿真结果中可以发现,当传输速率经过某一个转折点,网络控制性能的变化尤其明显。

3 实时仿真软件包的设计与开发

以上的仿真分析主要基于 TrueTime 工具箱实现,属于纯数值仿真研究方法。为了进一步验证实际网络传输速率约束下的网络控制系统性能,设计并开发了一套网络控制系统半物理实时仿真软件包。

3.1 仿真架构设计

采用半物理仿真设计方案,将实际物理网络引入到仿真之中。网络控制系统仿真架构由 3 部分组成,即服务器 (含被控对象部分仿真软件)、客户机 (含控制器部分仿真软件) 以及连接两者的实际物理通信网络 (以太网),其架构如图 2 所示。本文主要实现了仿真软件和物理以太网的实时连接,其他通信网络也可采用不同的网络硬件接口卡实现。

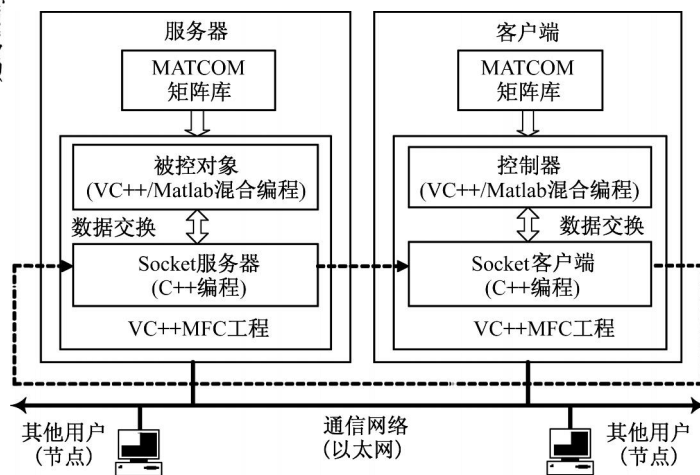


图 2 网络控制系统实时仿真架构

3.2 仿真软件包的开发

仿真软件包采用 Matlab 和 VC++ 联合编程方法实现,其中 Matlab 主要实现被控对象和控制器的数值模型,以及完成被控对象及控制算法的仿真;VC++ 主要实现服务器端与客户端的应用程序,以及用户仿真界面的构建。

针对被控对象及控制算法的仿真,利用 Visual C++ 调用 Matcom 矩阵函数库实现 Matlab 与 VC++

的混合编程,由此服务器端的被控对象及客户端的控制算法可以方便、可靠地实现。此外,服务器与客户端之间的通信用 Windows Socket 技术实现,节点间传输速率的限制采用专门限速软件实现。

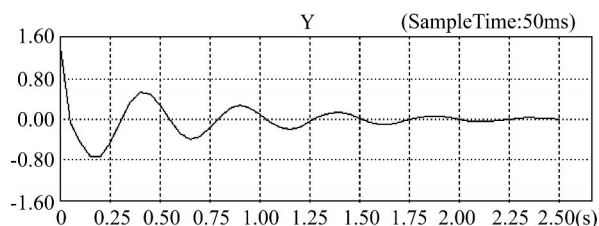
针对用户仿真界面的开发,分别为服务器端和客户端开发了相应的应用程序界面,其中服务器端界面见图 3。在服务器端,用户可以实现被控对象参数设置、采样周期选择以及传输速率的选择。在客户端,用户可选择所需控制器及相关参数,实时仿真曲线及仿真数据实时显示在客户端界面上。



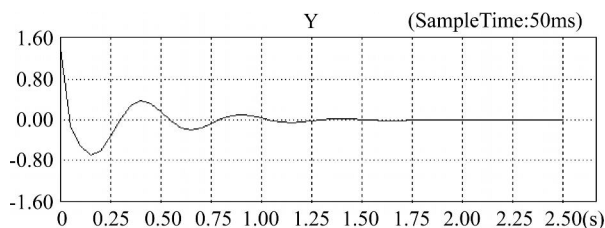
图 3 服务器端应用程序界面

3.3 仿真软件包使用案例

被控对象沿用前文中的直流伺服电机,服务器端采样周期设置为 50ms,客户端选择状态反馈控制器。然后,通过调用限速软件将带宽限制为 5kbit/s 及 5Mbit/s,分别得到不同速率下的实时仿真结果,如图 4 所示。



(a) 带宽限为 5kbit/s ($J = 0.5140$)



(b) 带宽限为 5Mbit/s ($J = 0.1737$)

图 4 传输速率约束下系统输出响应曲线

显然,在其他实验条件相同的情况下,带宽限制为 5kbit/s 时性能指标 $J = 0.5140$,带宽限制为 5Mbit/s 时性能指标 $J = 0.1737$ 。由此也从半物理仿真层面验

证了传输速率约束对于控制性能的影响。

4 结束语

本文针对传输速率约束下的网络控制系统,采用数值仿真和半物理仿真 2 种方式,初步研究了传输速率与网络控制性能的关系。首先,对典型的以太网控制系统进行了数值仿真,分析了传输速率与网络诱导延时以及控制性能的关系;此外,设计、开发了包含实际通信网络的半物理实时仿真软件包,实际应用结果也初步验证了传输速率和带宽对于控制性能的影响,为有限速率通信网络在实时控制系统中的进一步应用,以及相关控制系统的分析和设计方法进行了初步的探索。

参考文献:

- [1] Murray R. M., Åström K. J., Boyd S. P., Brockett R. W. and Stein G. Future directions in control in an information-rich world [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23 (2): 20 - 33
- [2] 岳东, 彭程, Qinglong Han 网络控制系统的分析与综合 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] Girish N. Nair, Fabio Fagnani, Sandro Zampieri, and Robin J. Evans Feedback control under data rate constraints: an overview [J]. Proceeding of the IEEE, 2007, 95 (1): 108 - 137.
- [4] Cervin, A., Henriksson, D., Lincoln, B., Eker, J., Arzen, K -E How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23 (3): 16 - 30

(许雪军编发)

(上接第 6 页)

和分析。测试结果表明,该测量电路方案达到 IEC61850 标准中规定的 0.2 级要求。本方案的提出,有助于促进光学电流互感器在电力测量系统中得到广泛地应用。

参考文献:

- [1] 李庆波,王慧丽,冯瑞颖,等. 全光纤及其他光学电流互感器技术发展现状 [J]. 传感器技术, 2002, 21 (7): 1 - 4
- [2] 邓向阳,李泽仁,彭其先,等. 测量脉冲大电流的双光路光学电流传感器技术 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27 (1): 45 - 49.
- [3] 程玉琪,董林军. 干涉型光纤传感器 PTAC 法相位检测研究 [J]. 传感技术学报, 1992 (3): 22 - 27.
- [4] 王照峰,王仕成,苏德伦. 锁相环电路的基本概念及应用研究 [J]. 电气应用, 2005, 24 (8): 46 - 48
- [5] 张艳. 光学电流传感器数字信号处理系统的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004

(许雪军编发)