

不确定滞后扳手劲竞赛系统的优化控制

冯 广¹, 王钦若²

(广东工业大学, 1 网络信息与现代教育技术中心; 2 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 对于网络化控制系统, 不确定的时延使得控制系统稳定性和动态性能急剧下降. 本文基于 Lyapunov 函数和线性矩阵不等式, 导出了闭环系统渐近稳定且满足给定 H_∞ 性能指标的充分条件. 以扳手劲竞赛控制系统为实验平台, 并应用 socket 技术, 建设优化控制器, 经抗外部扰动仿真及实验证明, 本文的策略有效可行, 能够很好地提高网络控制系统的动态性能.

关键词: 不确定时延; 网络控制系统; H_∞ 优化控制

中图分类号: TP202

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2009) 03-0050-04

1 问题的提出

随着因特网的发展和扩大, 基于因特网或者 TCP/IP 协议的控制成为当今主流的控制方式并且是未来控制系统的发展方向. 但是由于控制信息是通过通信网络传送的, 往往会引起信息延时、阻塞及丢失, 这些影响都会严重降低控制系统的性能, 甚至会造成不稳定. 当今网络控制研究热点是在网络控制系统稳定的基础上, 找出更优的控制器, 提高网络系统性能.

在控制器设计方面, 主要有常规、智能及优化控制器 3 种. 常规控制一般设时延为具有某种统计规律的随机量, 借助随机控制理论设计控制器. 但实际系统中时延的概率分布未必可知. 另一种方法是利用接收缓冲区将随机时延转化为固定时延, 采用预测控制设计控制器. 但缓冲区导致所有时延均转化为最大时延, 不利于系统性能.

由于网络时延的不确定性及分布无规律性, 采用智能控制能够取得较好的控制效果, 冯广 (Feng Guang) 等^[1] 使用 PID 与智能算法相结合得出了一种智能控制器, 能有效地减小不确定时延对控制性能的影响, 由于目前智能控制方法在理论研究上尚不完善, 利用各种智能控制方法设计控制器时, 难以进行深入的理论分析.

优化控制是现代控制理论的一个分支, H_∞ 优化控制描述了输入有限能量到输出能量的最大增益, 所以 H_∞ 优化控制比二次型优化控制有着更多的优

点. H_∞ 控制是最近一个比较热门的控制方法, 特别是 IMI 的引入, 使 H_∞ 控制与实现更为便利, 并且应用更为广泛.

本文使用 Lyapunov 方法, 得出网络控制方程的稳定条件, 再研究 H_∞ 优化控制问题, 然后把基于 Internet 扳手劲竞赛实现平台在广东工业大学的互联网上验证该方法的可用性.

2 网络系统模型

2.1 系统结构

网络控制系统 (NCS) 是一种分布式网络实时反馈控制系统. 本文采用的网络控制系统的结构如图 1 所示^[2-5].

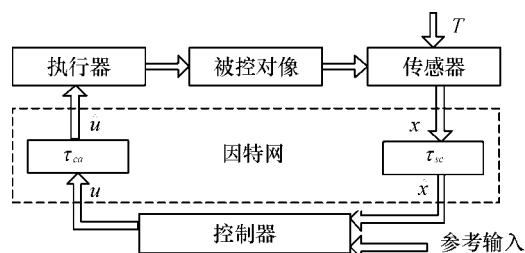


图 1 网络控制系统结构

2.2 系统模型

作为一个基于互联网的网络控制系统, 当系统时延不超过采样周期的时候, 不失一般性及系统实时性, 这里假设: 1) 传感器是时间驱动, 控制器及执行器都是事件驱动; 2) 网络时延小于一个采样周期 T 时变不确定, 并且相互独立及没有固定的分布规

律; 3) 信息是单包传送及无数据包丢失. 实验表明, 上面的假设也是比较容易得到的.

当加入了网络后广义的被控系统就是包括执行器、被控对象、传感器和通讯网络. 由于控制器和网络传输的特殊性, 为了更好地研究, 把广义的网络控制系统建模成离散模型, 上述的广义被控对象加入网络时延影响的模型为^[68]

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_0 x_k + \hat{B}_0(\tau_k) u_k + \hat{B}_1(\tau_k) u_{k-1} + G_w w_k \\ y_k = C x_k \end{cases} \quad (1)$$

从式 (1) 可知, 式中的 $\hat{B}_0(\tau_k)$ 、 $\hat{B}_1(\tau_k)$ 由于都包括不确定时延 τ_k , 它们都是时变的, 所以这个模型 (1) 是时变参数的线性离散系统.

通过矩阵原理, 网络控制系统广义的被控对象模型可以描述成具有不确定性的离散控制系统, 模型如下

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_0 x_k + (G_0 + D \hat{B}(\tau_k) E) u_k + (G_1 + D \hat{B}(\tau_k) E) u_{k-1} + G_w w_k \\ y_k = C x_k \end{cases} \quad (2)$$

3 不确定时延 H_∞ 控制算法

定义 1 对于给定正数 γ , 若存在状态反馈控制律

$$u_k = K x_k \quad (3)$$

能够使式 (2) 渐近稳定 ($w_k = 0$), 并且在零初始条件下, 使外部扰动 $w(k)$ 与被调输出 $y(k)$ 满足 H_∞ 范数约束条件 $\|y\|_2 \leq \gamma \|w\|_2$, $\|\cdot\|_2$ 为 $L_2[0, \infty)$ 的标准范数, γ 是任意给定正常数, 则称状态反馈律式 (3) 为系统 (2) 的 γ 次优动态输出反馈控制率.

引理 1 对于实矩阵 $W, M, N, F(k)$, 其中 W 对称, $F(k)$ 满足 $F^T(k)F(k) \leq I$ 当且仅当存在标量 $\varepsilon > 0$ 使得 $W + \varepsilon^{-1} N^T N + \varepsilon M M^T < 0$ 时, $W + N^T F(k) M^T + M F(k) N < 0$

定理 1 若存在标量 $\varepsilon > 0$ 及正定阵 P, Q , 使得不等式

$$\begin{bmatrix} -\varepsilon I & EK & -EK & 0 \\ EK^T & Q - P & 0 & (A_0 + G_0 K)^T \\ -EK^T & 0 & -Q & (G_1 K)^T \\ 0 & A_0 + G_0 K & G_1 K & -P^{-1} + \varepsilon D D^T \end{bmatrix} < 0 \quad (4)$$

成立, 即 (2)、(3) 组成的闭环系统是渐近稳定的.

证明略.

定理 2 若给出标量 $\gamma > 0$ 及存在标量 $\varepsilon > 0$ 正定阵 P, Q , 使得不等式

$$\begin{bmatrix} -\varepsilon I & EK & -EK & 0 & 0 \\ (EK)^T & Q - P + C^T C & 0 & 0 & (A_0 + G_0 K)^T \\ (-EK)^T & 0 & -Q & 0 & (G_1 K)^T \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & H_w^T \\ 0 & A_0 + G_0 K & G_1 K & H_w & -P^{-1} + \varepsilon D D^T \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

成立, 即 (2)、(3) 组成的闭环系统是渐近稳定且具有 H_∞ 性能指标 γ .

证明 根据引理 1 由于 $C^T C > 0$ 式 (5) 可以等同式 (4), 即 (2)、(3) 组成的闭环系统是渐近稳定.

在零初始条件下, 利用 Lyapunov 函数令: $J =$

$$\sum_{k=0}^{\infty} [y_k^T y_k - \gamma w_k^T w_k] = \sum_{k=0}^{\infty} [y_k^T y_k - \gamma w_k^T w_k + \Delta V_k] + V_\infty - V_0; \text{ 对于任意非零的 } w_k \in L_2[0, \infty), \text{ 由于 } V_0 = 0 \text{ 和 } V_\infty \geq 0 \text{ 可以得 } J \leq \sum_{k=0}^{\infty} [y_k^T y_k - \gamma w_k^T w_k + \Delta V_k], \text{ 再由 (2)、(3)、(5) 可得}$$

$$y_k^T y_k - \gamma w_k^T w_k + \Delta V_k = x_k^T (\bar{A}^T P \bar{A} + Q - P + C^T C) x_k + x_k^T \bar{A}^T P \bar{B} x_{k-1} + x_{k-1}^T \bar{B}^T P \bar{A} x_k + x_{k-1}^T (\bar{B}^T P \bar{B} - Q) x_{k-1} +$$

$$w_k^T [G_w^T P G_w - \gamma^2 I] w_k = [x_k^T \ x_{k-1}^T \ w_k^T] \Pi \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ w_k \end{bmatrix},$$

其中,

$$\Pi = \begin{bmatrix} \bar{A}^T P \bar{A} - P + Q + C^T C & \bar{A}^T P \bar{B} & \bar{A}^T P G_w \\ \bar{B}^T P \bar{A} & \bar{B}^T P \bar{B} - Q & \bar{B}^T P G_w \\ G_w^T D \bar{A} & G_w^T P \bar{B} & G_w^T P G_w - \gamma^2 I \end{bmatrix}$$

经过 Schur 补等定理的转换, 可以得到 (5). 即当 $\Pi < 0$

时, $J = \sum_{k=0}^{\infty} [y_k^T y_k - \gamma w_k^T w_k + \Delta V_k] < 0$, 等价于 $J < 0$

因此可得

$$\|y\|_2^2 = \sum_{k=0}^{\infty} y_k^T y_k < \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} w_k^T w_k = \gamma^2 \|w\|_2^2.$$

证毕.

定理 2 给出了闭环系统渐近稳定且具有 H_∞ 性能指标 γ 的充分条件. 对式 (5) 进行转换, 利用 LM I 工具箱, 即可以得出反馈增益 K .

4 仿真

通过 Internet 的扳手竞赛则是一个非常典型的远程操作问题^[9], 为了研究基于 Internet 的远程控制实时性问题, 本文建立了基于 Internet 扳手劲控制系统, 然后提炼出系统的控制结构.

被控对象是一个伺服系统, 该系统向量主要由电机伺服放大器、执行电机、齿轮减速器和受信仪组成. 本文通过对伺服电机的结构分析, 得出伺服电机的数学表达式, 再加上各个系统, 经过分析简化后, 得出无时延连续系统的数学模型 (6):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -600 & 0 & -16 & 800 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [u(t) + w(t)] \\ y_k = [0 \quad 0 \quad 480 \quad 000] x_k \end{cases} \quad (6)$$

假设传感器节点的采样周期为 $T = 10 \text{ ms}$, 在时间间隔 $[0 \ 2] \text{ s}$ 中, 取 200 个采样点网络中的信息传输总时延 $\tau_k \in [0 \ 0.01]$, 且时变、不确定, 也不符合某种分布. 给定 $\gamma = 0.64$ 要求设计一个状态反馈控制律, 使得闭环系统渐近稳定且满足给定的干扰抑制性能.

将系统按照传感器采样周期进行离散化, 可得系统的等效于不确定离散时间模型为

$$x_{k+1} = A_0 x_k + (G_0 + D \hat{\beta}(\tau_k) E) u_k + (G_1 + D \hat{\beta}(\tau_k) E) u_{k-1} + G_w w_k$$

得到 $A_0 = \begin{bmatrix} -0.0001 & -0.0002 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0.0357 & 1 \end{bmatrix}$, $G_0 =$

$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.0059 \\ 0.0057 \end{bmatrix}$ 等参数, 再由式 (6) 变换成线性不等式, 再

通过 Matlab R2007a 的 LMI 工具箱, 可得状态反馈控制率

$$u_k = [-142 \ 885 \ 3 \ -91 \ 656 \ 9 \ -1 \ 986 \ 256 \ 4] x_k.$$

当系统初始状态是 $[-2 \ 1 \ 1]$, 在外部干扰为 $w(t) = \begin{cases} 1 & 0.050 \leq t \leq 0.060 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$ 时, 系统的状态响应如图 2 所示.

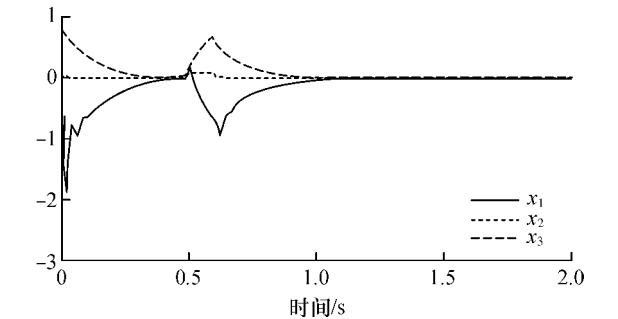


图 2 仿真结果

5 系统实现

本文在实验室建设了基于 Internet 扳手竞赛的控制系统 (AW CCS) 硬件实验平台. 先在实验室做模拟实验, 将二个扳手劲放在一起, 再把 PLC 控制器分别连接一台电脑的二个网卡, 在这台电脑运行一个 VB 程序, 随机产生延时, 进行模拟测试. 在测试成功后, 再在二个校区分别放置二个扳手, 并且使用二台电脑连接起来, 电脑通过网卡接入校园网, 再通过另一个网卡与控制器的以太网模块相连. 扳手竞赛控制系统结构如图 3 所示.

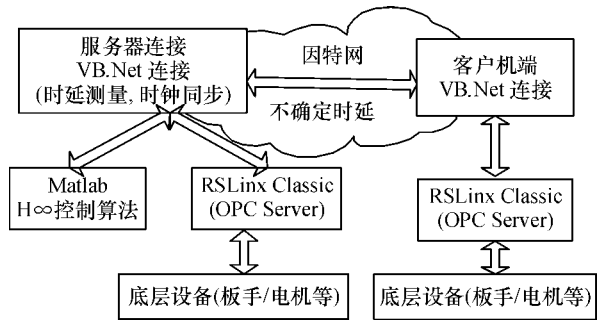


图 3 扳手竞赛控制系统结构

实现方案: 1) 通过 RSLinx Classic 组态软件, 实现计算机与 ControlLogix 控制器之间通过通信, 可以对控制系统组态, 与底层硬件设备通信. 通过 OPC、VB 和 Matlab 程序可以与 Rockwell 底层硬件设备实时交换数据; 2) 服务端和客户端通过 VB.net 的 Windows Sockets 通信, 实现基于互联网远程扳手劲控制系统数据传输、网络时延测量和时钟同步; 3) 控制算法直接在 Matlab 中运行, VB 程序调用 Matlab 后台服务、执行时控制算法程序, 计算出系统的控制量, 并提交给 VB 程序, 发送给客户端执行, 实现系统的控制策略.

平台搭建解决的问题: 1) OPC Server 与 VB 数据传输; 2) VB 调用 Matlab 算法程序设计; 3) VB 环境下用 Winsocks 控件实现两台 PC 之间的通讯; 4) 随机产生时延程序编写; 5) 二部 PC 机的时间同步问题.

系统搭建完成后, 在网络繁忙及空闲时间分别进行远程的扳手竞赛, 效果理想.

6 总结

在网络控制系统中, 最突出的问题就是由于通

讯带宽限制及节点等待发送数据而引起的网络诱导时延, 这些时延会对动态系统的稳定性及性能都有一定的影响. 本文研究了在不确定时延网络上的网络控制系统的稳定性问题和在时延和扰动双重影响下的最优控制方案, 经过仿真证实有效后, 架设了基于 Internet 的扳手竞赛控制系统, 并且在实验室及互联网上通过远程的扳手竞赛, 实验验证其效果能达到性能指标.

参考文献:

[1] Feng Guang, Liu Hong-wei. Internet-based Intelligence Time-delayed Networked Control Systems[C]// The Sixth IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, ICA, 2007: 806-808
[2] Song Jian-qiang, Li Sheng-ping. Research on control experiments for time-delayed networked control systems[J]. Jour-

nal of Shantou University, 2003(08): 39-43
[3] Gregory C Walsh, Ye H, Linda G B. Stability Analysis of Networked Control Systems[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2002, 10 (3): 438-446
[4] Kang Bing, Zhao Hong-wei, Ren Li-li, et al. Survey on Modeling of Networked Control Systems[J]. Journal of Jilin University, 2006(9): 42-49
[5] 樊卫华. 网络控制系统的建模与控制[D]. 南京, 南京理工大学自动化学院, 2004
[6] 陈克斌. 具有实时保障的 Internet 远程控制系统设计[J]. 微型电脑应用, 2005(11): 44-46
[7] 王晓峰. 基于因特网的液压系统远程控制的基础研究[J]. 兵工学报, 2004(5): 581-585
[8] 黄杰. 基于 Internet 的实时控制系统的传输协议[J]. 计算机工程, 2005(2): 110-111
[9] 曾远立. 基于 Internet 网络诱导滞后的扳手劲竞赛控制系统研究[D]. 广州, 广东工业大学自动化学院, 2008

Optim ized Control of Uncertain Delay Am
W restling Contest Control System s

Feng Guang¹, Wang Q in-mo²

(1. Center of Network Information & Modern Education Technology;

2. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract For the Internet-based networked control, long and uncertain time delay causes the performance of control systems to degrade quickly. It uses the Lyapunov function and linear matrix inequality to derive the stability condition and the sufficient conditions of H_{∞} performance criterion. It also designs and develops the Internet-based arm wrestling contest control system by socket technology. The experiments indicate that the algorithm can improve the performance of the networked control system.

Key words uncertain time delay; networked control systems; H_{∞} optimized control