

文章编号: 1001-0920(2007)02-0198-04

不确定输入延时网络系统的鲁棒拥塞控制

尹凤杰¹, 井元伟², 岳承君², 王 涛¹, 潘 伟³

(1. 辽宁大学 信息科学与技术学院, 沈阳 110036; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 3. 沈阳炮兵学院 电子侦察系, 沈阳 110162)

摘 要: 基于滑模控制(SMC)设计了一种主动队列管理(AQM)算法,该算法可保证具有有界的不确定输入延时网络系统渐进稳定.引入一种状态变换来消除延时的影响,通过 Lyapunov 稳定性分析,给出了保证系统渐进稳定的最大允许的延时边界.仿真结果表明,该方法可以获得良好的暂态和稳态响应,在网络条件变化的情况下,该算法优于传统的 PI 控制和滑模控制.

关键词: 主动队列管理; 滑模控制; 拥塞控制; 输入延时

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Robust congestion control for uncertain input-delay network systems

YIN Feng-jie¹, JING Yuan-wei², YUE Cheng-jun², WANG Tao¹, PAN Wei³

(1. School of Information Science and Technology, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Department of Electric Detection, Shenyang College of Artillery, Shenyang 110162, China. Correspondent: YIN Feng-jie, E-mail: fjyin66@126.com)

Abstract: An active queue management (AQM) scheme based on sliding mode control (SMC) is designed, which ensures asymptotic stability of input-delay network systems with bounded unknown uncertainties. A transformation is used to eliminate the impact of input delay. Through Lyapunov stability analysis, a maximum delay bound is given to make the system globally asymptotically stable in the sliding mode. Simulation results demonstrate that this scheme can obtain good transient and steady state responses, and the scheme outperforms the traditional PI control and SMC.

Key words: Active queue management (AQM); Sliding mode control (SMC); Congestion control; Input-delay

1 引言

网络拥塞控制是网络研究中的一个热点问题,为解决这一问题,人们相继提出了一些主动队列管理算法.随机早期检测(RED)^[1]是最早的 AQM 算法,其缺点是在不同的网络环境下很难调节 RED 参数,并且 RED 参数对网络负载很敏感.

一些基于模型的 TCP/AQM 方案试图克服 RED 的缺点,例如文献[2]系统地分析了 RED,对 RED 的参数调节作了深入研究;文献[3]利用线性系统分析的方法设计了 PI 控制器,作为一种新型的 AQM 方案;文献[4]针对大时滞网络中的拥塞控制问题,提出一种基于内模补偿的控制方法.然而,这些方法在高动态的网络环境下都不能很好地运行,主要原因是这些途径都过于依赖系统模型,并且没有考虑 TCP/AQM 的动态性所带来的时变延时,以

及由 TCP 分组数的变化所带来的不确定性.为此,文献[5,6]设计了一种基于鲁棒变结构的 AQM 算法,在考虑网络的不确定因素影响的情况下,这种方法表现出良好的系统性能和鲁棒性.但他们只考虑了简化的模型,而没有考虑时滞的影响,仅在仿真部分作了简要说明.

本文考虑了对不确定延时的补偿.参照文献[7]的方法,引入一种状态变换来消除延时的影响,定义一个滑模函数,设计 AQM 控制器来保证滑动模式的存在,从而克服在滑模动态过程中时滞和不确定因素的影响.最后通过系统稳定性分析,给出了在给定控制律下保证系统渐进稳定的最大延时边界.

2 具有延时补偿的 AQM 滑模控制器的设计

文献[8]给出了一个线性化的 TCP 模型,本文将将其写成如下形式:

收稿日期: 2005-09-12; 修回日期: 2006-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274099); 国家 863 计划项目(2004AA412030).

作者简介: 尹凤杰(1965-),女,沈阳人,副教授,博士,从事网络拥塞控制、通信网络优化的研究;井元伟(1956-),男,辽宁西丰人,教授,博士生导师,从事复杂系统对称性、相似性、稳定性等研究.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & (A + \Delta A(t)) x(t) + (A_d + \Delta A_d(t)) x(t - \tau) \\ & + (B + \Delta B(t)) u(t - \tau). \end{aligned} \tag{1}$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{N_0}{R_0^2 C_0} & -\frac{1}{R_0^2 C_0} \\ N_0/R_0 & -1/R_0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -\frac{R_0 C_0^2}{2 N_0^2} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ A_d &= \begin{bmatrix} -\frac{N_0}{R_0^2 C_0} & \frac{1}{R_0^2 C_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, x(t) = (\delta W(t) \quad \delta q(t))^T, \end{aligned}$$

$\tau = R_0, u(t) = \delta p(t), \delta p(t) = p(t) - p_0;$
 $\delta W(t)$ 是窗口偏离平衡点的差值, $\delta q(t)$ 是缓冲器中瞬时队列长度偏离平衡点的差值, R_0 是回路时间, $0 \leq p(t) \leq 1$ 是分组标记/丢失概率, C_0 是链路容量, N_0 是激活的 TCP 分组数量; $\Delta A(t), \Delta A_d(t), \Delta B(t)$ 是不确定项, 它们依赖于网络参数的不确定性.

进一步假设以下匹配条件成立:

$$\begin{cases} \Delta A(t) x(t) + \Delta A_d(t) x(t - \tau) = \\ B[\omega(t) x(t) + \omega(t) x(t - \tau)], \\ \Delta B(t) u(t - \tau) = B\omega(t) u(t - \tau). \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\begin{aligned} \|\omega(t)\| \|x(t)\| + \|\omega(t)\| \|x(t - \tau)\| &\leq \delta_1 \|x(t)\| + \delta_2 \|x(t - \tau)\|, \\ \|\omega(t)\| \|u(t - \tau)\| &\leq \delta_3 \|u(t - \tau)\| \leq \delta_3; \end{aligned}$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 是已知常量.

模型(1) 是一个近似模型, 忽略了超时和慢启动, 因此系统模型具有很强的不确定性、非线性以及附加的噪声. 综合考虑以上因素, 延时补偿滑模控制将是一个理想的鲁棒 AQM 控制方案.

参照文献[7] 的方法, 选择如下状态变换:

$$z(t) = x(t) + \int_{\tau}^0 e^{-A(\theta+\tau)} B u(t + \theta) d\theta, \tag{3}$$

使式(1) 变换为与输入延时无关的系统. 令

$$e(t) = \int_{\tau}^0 e^{-A(\theta+\tau)} B u(t + \theta) d\theta,$$

则 $x(t) = z(t) - e(t)$, $e(t)$ 可看作系统的内部抖动.

$$\begin{aligned} \|e(t)\| &\leq v(\tau) = \\ \tau \max_{0 \leq \theta \leq \tau} \|e^{-A\theta}\| \|B\| \|F\| \|z(t)\|. \end{aligned} \tag{4}$$

引入反馈矢量 F , 使 $\bar{A} = A - e^{-A\tau} B F$ 成为 Hurwitz 的^[9], 则有下式成立:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= (\bar{A} + e^{-A\tau} B F) z(t) + A_d z(t - \tau) \\ &\quad + e^{-A\tau} B u(t) + f(h), \end{aligned} \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned} f(h) &= -A_d e(t - \tau) + \Delta A(t) x(t) + \\ &\quad \Delta A_d(t) x(t - \tau) + \Delta B(t) u(t - \tau). \end{aligned} \tag{6}$$

将式(2) 和(4) 代入, 得

$$\begin{aligned} \|f(h)\| &\leq \\ [KG * 1/3] \delta_1 [1 + v(\tau)] \|B\| \|z(t)\| &+ \delta_2 [1 + \\ [KG * 1/3] v(\tau)] \|B\| \|z(t - \tau)\| &+ \delta_3 \|B\|. \end{aligned} \tag{7}$$

定义滑模面

$$\begin{aligned} s(t) &= \lambda z(t) - \lambda \int_0^t A_d z(\theta) + \\ &\quad A_d z(\theta - \tau) d\theta. \end{aligned} \tag{8}$$

其中: $\lambda = [\lambda_k \quad 1], \lambda_k > 0$.

为确保系统(5) 的滑模存在, 设计如下控制器:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N(t). \tag{9}$$

定理 1 如果选取如下控制律:

$$u_{eq}(t) = -Fz(t), \tag{10}$$

$$\begin{aligned} u_N(t) &= \\ (e^{-A\tau} B)^{-1} B [1 + v(\tau)] (\delta_1 \|z(t)\| &+ \\ \delta_2 \|z(t - \tau)\|) + \delta_3 + \eta \operatorname{sgn}(s(t)), \end{aligned} \tag{11}$$

其中 $\eta > 0$, 则滑动模态 $s(t) = 0$ 总能在有限时间内到达, 因此系统(5) 是渐进稳定的.

证明 选择 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2(t), \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \\ -\|\lambda B\| [(1 + v(\tau)) (\delta_1 \|z(t)\| &+ \\ \delta_2 \|z(t - \tau)\|) + \delta_3 + \eta] \|s(t)\| &+ \\ \|\lambda f(h)\| \|s(t)\|. \end{aligned} \tag{13}$$

将式(7) 代入, 得

$$\dot{V} = -\|\lambda B\| \eta \|s(t)\| < 0. \tag{14}$$

因此证明了动态滑模系统(5) 总能在有限时间内到达滑模面 $s(t) = 0$. $\square$

3 AQM 系统的稳定性分析

在滑动模态下, 控制律(9) 变为

$$u(t) = u_{eq}(t) = -Fz(t). \tag{15}$$

定理 2 网络系统(5) 在控制律(15) 下, 状态 $x(t)$ 是渐进稳定的, 即满足缓冲器队列长度的追踪要求 $q(t) \rightarrow q_d$, 如果存在正定矩阵 $P \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, R \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, Q \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, 使下式成立:

$$\begin{aligned} \lambda_{\min}(Q) &> \frac{\delta_3}{2\delta_1} (\lambda_{\min}(R) - 2\lambda_{\max}(Q)) + \\ \delta_1 \|F\| \|B\| \|P\|, \end{aligned} \tag{16}$$

且时滞项满足

$$\begin{aligned} 0 \leq \tau \leq \bar{\tau} = \\ \frac{\lambda_{\min}(R) - 2\lambda_{\max}(Q)}{2 \|P\| \|B\| \delta_1} - \\ 1) \frac{1}{\|B\| \|F\| \max_{0 \leq \theta \leq \tau} \|e^{-A\theta}\|}. \end{aligned} \tag{17}$$

其中 P 和 R 是下列 Lyapunov 方程的解:

$$P\bar{A} + \bar{A}^T P = -R. \quad (18)$$

证明 选择 Lyapunov 函数

$$V = z(t)^T P z(t) + \int_{\tau} z(t)^T Q z(t) d\theta, \quad (19)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\lambda_{\min}(R) \|z(t)\|^2 + \lambda_{\max}(Q) \|z(t)\|^2 + \\ & 2 \|PA_d\| \|z(t)\| \|z(t-\tau)\| + \\ & 2 \|P\| \|z(t)\| \|f(h)\| - \\ & \lambda_{\min}(Q) \|z(t-\tau)\|^2 \leq \\ & \begin{bmatrix} z^T(t) \\ z^T(t-\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ z(t-\tau) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= -\lambda_{\max}(Q), d = -\lambda_{\min}(Q), \\ b &= c = \\ & \frac{\delta_1}{2\delta_1} (\lambda_{\min}(R) - 2\lambda_{\max}(Q)) + \\ & \delta_2 \|F\| \|B\| \|P\|. \end{aligned}$$

使式(20) 负定的条件为

$$a < 0, ad - bc > 0. \quad (21)$$

由式(3) 和(15) 易得

$$x(t) = z(t) + \int_{\tau} e^{-A(\theta-\tau)} B F Z(t + \theta) d\theta \quad (22)$$

如果式(5) 是渐进稳定的,即 $z(t) \rightarrow 0$,则由上式容易看出 $x(t) \rightarrow 0$. 因此定理得证. $\square$

4 系统仿真

为了进行比较,对 PFAQM 和 SMC-AQM 也作了仿真. 参数选择及网络拓扑结构参见文献[10]. 其中 $N = 50$, $C = 300$ 分组/s, 目标队列长度 $q_d = 100$ 分组. 对于 PFAQM 方案, 参数选择为 $k_p = 0.0023$, $k_i = 0.0004$; 对于 SMC-AQM 方案, 参数选择为 $\lambda = 1$, $K = 0.004$.

本文所采用的控制方案(T-SMC) 参数选择参见文献[7]. 其中

$$R = \begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 9 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 2.4 & 0.56 \\ 0.56 & 0.21 \end{bmatrix},$$

$$F = [-0.001 \quad 0.003 \quad 7], \|F\| = 0.0038,$$

$$\delta_1 = 0.5, \delta_2 = 0.3, \delta_3 = 0.1,$$

$$\|B\| = 9, \lambda = [0.9 \quad 1], \bar{\tau} = 1.47.$$

通过比较可知

$$\lambda_{\min}(Q) = 3 >$$

$$\frac{\delta_1}{2\delta_1} (\lambda_{\min}(R) - 2\lambda_{\max}(Q)) +$$

$$\delta_2 \|F\| \|B\| \|P\| = 1.54,$$

满足条件(16). 由定理2 确保了系统的稳定性.

图1 和图2 分析了3 种控制方案对于网络参数

及时延变化的鲁棒性. 图1 中, N 由100 个分组连接变为150 个连接, PFAQM 和 SMC-AQM 都出现大幅度振荡, 趋于不稳定; 只有 T-SMC 保持快速的响应和稳定的鲁棒性.

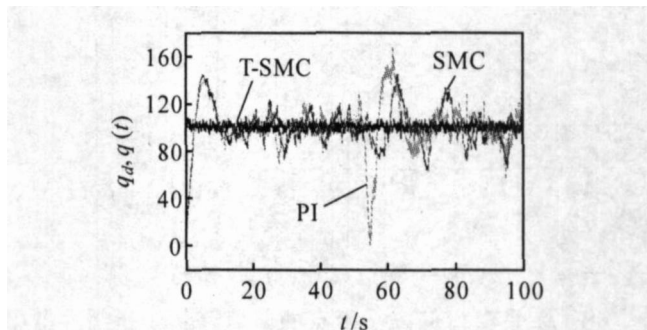


图1 网络参数变化时瞬时队列长度的比较

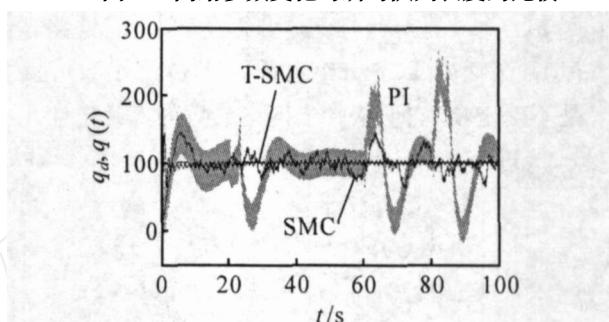


图2 延时变化时瞬时队列长度的比较

图2 考察了3 种方案对于不确定延时的鲁棒性. 当 R_0 从50 ms 变为10 ms 时, T-SMC 在队列的稳定性和响应速度上表现出良好的性能, 优于其他方案. PFAQM 队列剧烈振荡, 表现出强烈的不稳定性; SMC-AQM 也出现大幅度振荡, 趋于不稳定.

5 结 论

本文设计了一种新型的主动队列管理算法. 通过引入状态变换来消除延时的影响. 基于 Lyapunov 稳定性分析方法给出了控制器的设计, 并得到保证系统渐进稳定的最大允许延时估计值. 仿真结果表明, 该方法能获得较快的瞬态响应和较小的稳态误差, 具有较小的分组丢失、较高的链路利用率和较小的队列波动.

参考文献(References)

- [1] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(4): 397-413.
- [2] Holtt C, Misra V, Towlsey D, et al. A control theoretic analysis of RED [C]. Proc of IEEE INFOCOM '01. Alaska: IEEE Press, 2001: 1510-1519.
- [3] Holtt C, Misra V, Towlsey D, et al. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows [C]. Proc of IEEE INFOCOM '01. Alaska: IEEE Press, 2001: 1726-1734.
- [4] 任丰原, 林闯, 任勇, 等. 大时滞网络中的拥塞控制算法

[J]. 软件学报,2003,14(3):503-511.
(Ren F Y, Lin C, Ren Y, et al. Congestion control algorithm in large-delay networks[J]. J of Software, 2003,14(3):503-511.)

[5] Ren F, Ying X, Ren Y, et al. A robust active queue management algorithm based on sliding mode variable structure control [C]. Proc of IEEE INFOCOM '02. New York: IEEE Press,2002:13-20.

[6] Yan P, Gao Y, Ozbay H. A variable structure control approach to active queue management for TCP with ECN [C]. Proc of IEEE ISCC '03. Turkey: IEEE Press,2003:203-215.

[7] Saleh A, Al S, Oscar D, et al. An approach to stabilize linear systems with state and input delay [C]. Proc of the American Control Conf. Colorado: IEEE Press, 2003:875-880.

[8] Holot C, Misra V, Towsley D, et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows[J]. IEEE ACM Trans on Automatic Control, 2002,47(6):945-959.

[9] Shyu K, Yan J. Robust stability of uncertain time-delay systems and its stabilization by variable structure control [J]. Int J of Control,1993,57(1):237-246.

[10] Quet P F, Ozbay H. On the design of AQM supporting TCP flows using robust control theory[J]. IEEE Trans on Automatic Control,2004,49(6):1031-1036.

(上接第 197 页)

5 结 语

本文通过建立分布参数最优控制模型,得出了企业对于 n 种可变质产品的最优经营管理策略. 该模型的构造针对于 n 种可变质产品,更贴近实际情况,给出的各部分解的经济学解释亦非常明确. 分布参数模型对于指导大、中、小零售企业的采购经营工作具有广泛的实际应用价值. 值得指出的是,本文模型是在订购批量不带来折扣的假设下展开的,在现实的零售业采购过程中,订购批量与折扣往往有一定的比例关系,单位进价成本 $C_2(t,s)$ 可采用分段函数表示,进而展开更进一步的研究.

参考文献(References)

[1] 胡运权,郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京:清华大学出版社,1998:322-344.
(Hu Y Q, Guo R H. Course in operational research [M]. Beijing: Publication of Tsinghua University, 1998: 322-344.)

[2] Harvey M Wagner, Thomson M Whitin. Dynamic version of the economic lot size model[J]. Management Science, 1958,5(11): 89-96.

[3] Sethi S P, Thompson G L. Optimal control theory, applications to management science[M]. J C Leiden of the Netherlands: Martinus Nijhoff Publishing,1981:16-37.

[4] 赵中奇,王浣尘,潘德惠. 管理中常见的半群结构及其应用[J]. 上海交通大学学报,2003,37(4):585-588.
(Zhao Z Q, Wang H C, Pan D H. The semi-group construction of distributed parameters systems and its application [J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2003,37(4): 585-588.)

[5] Bensoussan A, Nissen G, Tapiero C. Optimum inventory and product quality control with deterministic and stochastic deterioration — An application of distributed parameters control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1975, 20(3): 407-412.

下 期 要 目

蚁群算法硬件实现的研究进展.....	段海滨,等
极点与状态方差约束下的动态输出反馈可靠控制	张 刚,等
离散线性系统高阶积分观测器设计.....	段广仁,等
一类基于 FSP 问题 Block 性质的快速 TS 算法.....	金 锋,等
粒子群优化粒子滤波方法	方 正,等
持续时态数据挖掘的研究	潘 定,等
考虑环境因素的分布式系统可靠性建模及其分析.....	原菊梅,等