

文章编号: 1001-0920(2012)10-0000-00

基于自适应全局滑模控制的非线性主动队列管理

叶成荫^{1,2}, 井元伟¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 辽宁石油化工大学 计算机与通信工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 针对 TCP 网络系统存在不确定参数和非响应流干扰的情况, 基于自适应全局滑模控制, 设计一种非线性主动队列管理算法. 采用全局滑模控制消除了滑模控制的到达阶段, 保证了网络系统在整个控制过程的鲁棒性. 采用 RBF 网络直接逼近系统的总不确定可有效地减小估计误差. 由于没有使用符号函数或饱和函数, 不仅可以有效抑制系统的抖振, 而且系统的响应更加平稳. 仿真结果表明, 该算法具有较好的鲁棒性和较快的系统响应.

关键词: TCP 网络; 拥塞控制; RBF 网络; 自适应; 全局滑模控制

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Nonlinear active queue management based on adaptive global sliding mode control

YE Cheng-yin^{1,2}, JING Yuan-wei¹

(1. College of Information Science and Technology, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Computer and Communication, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China. Correspondent: YE Cheng-yin, E-mail: ye.chengyin@yahoo.com.cn)

Abstract: For the TCP network systems in the presence of uncertain parameters and unresponsive flows, a nonlinear active queue management algorithm is presented based on adaptive global sliding mode control. The global sliding mode control is used to eliminate the arrival stage of sliding mode control and ensure the robustness of network systems in the whole control process. The RBF network is used to directly approximate the lumped uncertainties of the systems so that the estimation error is effectively reduced. Due to that the sign function and the saturation function are not used, not only the system chattering is effectively eliminated, but also the system response is smoother. Simulation results show that the proposed algorithm has good robustness and fast system response.

Key words: TCP networks; congestion control; RBF network; adaptive; global sliding mode control

1 引言

近年来, 主动队列管理(AQM)成为网络拥塞控制的研究热点, 其中利用控制理论思想实现主动队列管理成为一个研究热点. 由于 TCP/IP 网络系统中的往返时延、TCP 连接数以及链路容量均存在着不确定性因素, 使传统的控制方法^[1]在参数选择及鲁棒性方面遇到了一些困难. 滑模控制在 TCP 网络拥塞控制方面得到了较好的应用^[2-4], 但这些方法都是在小信号线性化的基础上设计的, 存在着局部稳定性的问题. 文献[5-7]针对[8]提出的非线性 TCP/AQM 模型设计了基于滑模控制器的 AQM 算法, 不仅使队列长度具有较好的稳定性, 而且增强了对 TCP 负载和往返时延

的鲁棒性, 但这些算法是基于线性滑模面的传统滑模控制. 传统滑模控制在系统处于滑动运动阶段时, 才具有对参数摄动和外部干扰的不变性; 而系统处于到达阶段时, 对参数摄动和外界干扰就较为敏感. 文献[9]基于全局滑模控制设计了一种 AQM 算法, 保证网络系统在整个控制过程中的鲁棒性, 但该算法未考虑系统的不确定因素以及慢启动和 UDP 流等未建模动态特性对系统造成的影响. 文献[10]考虑了不确定因素以及慢启动和 UDP 流等未建模动态特性对系统造成的影响, 并使用模糊滑模变结构控制方法设计了一种自适应 AQM 算法; 但由于使用了线性滑模面, 不能保证网络系统在整个控制过程中的鲁棒性; 而且该算法是对系统的不确定的界进行在线估计, 这在一定

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009); 国家高技术研究发展计划项目(2004AA412030).

作者简介: 叶成荫(1977-), 男, 博士生, 从事 ; 井元伟(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络通信系统的控制与决策、非线性控制理论等研究.

程度上会造成较大的估计误差.

本文首先将 TCP 网络非线性动态模型的各个不确定参数和非线性补偿以及附加的干扰整合成一个总的确定. 然后, 采用全局滑模面使系统从任意初始状态就被约束在滑模面内, 以保证控制过程全程具有滑动模态特性. 采用 RBF 神经网络直接对系统的总不确定进行自适应学习, 可有效地减小估计误差. 在设计控制器时, 由于没有使用符号函数和饱和函数, 不仅可有效抑制系统的抖振, 而且系统的响将更加平稳. 最后, 不同情况下的仿真结果验证了本文算法的优越性.

2 TCP 网络非线性动态模型

文献[8]采用 AIMD 的分析方法, 给出了 N 个 TCP 连接共享一个瓶颈路由器的非线性动态模型如下:

$$\begin{cases} \dot{r}(t) = \frac{N(t)}{R^2(t)} - \left(\frac{N(t)}{R^2(t)} + \frac{r^2(t)}{2N(t)} \right) p(t), \\ \dot{q}(t) = r(t) - C_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $r(t)$ 为 TCP 连接的源端的数据发送速率; $q(t)$ 为路由器的瞬时队列长度; $N(t)$ 为 TCP 连接的负载因子; $R(t) = q(t)/C_0 + T_p$ 为往返时延; T_p 为传播时延; C_0 为链路带宽; $0 \leq p(t) \leq 1$ 为分组丢弃/标记概率, 可看作是用于调节发送速率和链路队列长度的控制输入.

令 $e_q = q(t) - q_d$, 其中 q_d 为期望的队列长度. 记 $x_1 = e_q$, $x_2 = \dot{e}_q$, 于是非线性模型 (1) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a(t) + b(x, t)u(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{N(t)}{R^2(t)}, \quad u(t) = p(t), \\ b(x, t) &= -\left(\frac{N(t)}{R^2(t)} + \frac{(x_2 + C_0)^2}{2N(t)} \right). \end{aligned}$$

系统 (2) 为 TCP 网络拥塞避免阶段的动态模型, 忽略了慢启动阶段的非线性动态行为, 未考虑 UDP 流给系统所带来的干扰, 因此系统模型具有很强的不确定性、非线性以及附加的干扰. 为了进一步描述系统 (2), 提出如下假设.

假设 1 往返时延 $R(t)$ 满足

$$T_p \leq T_0 \leq R(t) \leq T_1 \leq \frac{q_{\max}}{C_0} + T_p,$$

其中 q_{\max} 为路由器的最大队列长度; TCP 连接的负载因子 $N(t)$ 满足 $0 < N^- \leq N(t) \leq N^+$.

根据假设 1, 定义 $R(t)$ 的参考值为 $\bar{R} = \frac{T_0 + T_1}{2}$, $N(t)$ 的参考值为

$$\bar{N}(t) = \frac{N^- + N^+}{2}.$$

于是 $a(t)$ 的参考值为

$$a_0(t) = \frac{\bar{N}(t)}{\bar{R}^2(t)},$$

$b(x, t)$ 的参考值为

$$b_0(x, t) = -\left(\frac{\bar{N}(t)}{\bar{R}^2(t)} + \frac{(x_2 + C_0)^2}{2\bar{N}(t)} \right).$$

因此, 系统 (2) 可进一步描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a_0(t) + b_0(x, t)u(t) + e(t, x). \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$e(t, x) = \Delta a(t) + \Delta b(x, t)u(t) + d(x, t)$$

为不确定及干扰之和, 即总的确定; $d(x, t)$ 为慢启动阶段的非线性动态行为和 UDP 数据流给系统带来的干扰的非线性补偿; $e(t, x)$ 满足如下假设.

假设 2 对于所有的 $(t, x) \in \mathbf{R} \times \mathbf{R}^2$, 存在一个正的连续的标量函数 $\rho(\cdot, \cdot) : \mathbf{R} \times \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}_+$, 使得 $\|e(t, x)\| < \rho(t, x)$.

本文将全局滑模控制的设计方法引入到主动队列管理中来, 其特点是不存在趋近模态, 具有全响应过程的鲁棒性. 选取全局滑模面为如下形式:

$$s(x, t) = kx_1(t) + x_2(t) - F(t). \quad (4)$$

其中: $k > 0$, $F(t)$ 为全程滑模因子.

要实现全程滑模运动, 消除滑模控制中的趋近过程, 全程滑模因子 $F(t)$ 的设计必须满足

$$\begin{cases} F(0) = kx_1(0) + x_2(0), \\ \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 0, \\ \dot{F}(t) \text{ 存在且有界.} \end{cases} \quad (5)$$

根据全局滑模因子 $F(t)$ 设计的上述 3 个条件, 选取

$$F(t) = F(0)e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

其中 $\lambda > 0$, 且足够小.

在确定滑模面之后, 下一步是设计滑模控制器, 将系统状态稳定可靠地保持在滑动模态上.

3 自适应全局滑模控制器设计

3.1 全局滑模控制器设计

将全局滑模控制律设计为

$$u(t) = u_{\text{eq}}(t) + u_s(t), \quad (7)$$

$$u_{\text{eq}} = -b_0^{-1}(x, t)(kx_2 + a_0(t) - \dot{F}), \quad (8)$$

$$u_s(t) = -b_0^{-1}(x, t)\rho(t, x)\text{sgn}(s). \quad (9)$$

其中: u_{eq} 为等效控制部分, $u_s(t)$ 为不连续控制部分.

定理 1 如果假设 2 成立, 则系统 (3) 在控制律 (7)~(9) 的作用下能够一直稳定在滑动模面上, 因此系统是渐近稳定的.

证明 选取 Lyapunov 函数如下:

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

则

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s(t)\dot{s}(t) = \\ & s(t)(k\dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) - \dot{F}(t)).\end{aligned}$$

将式(7)~(9)代入可得

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s(t)(-\rho(t, x)\text{sgn}(s) + e(t, x)) \leq \\ & -|s(t)|(\rho(t, x) - \|e(t, x)\|).\end{aligned}$$

由假设 2 可得 $\rho(t, x) - \|e(t, x)\| > 0$, 于是有

$$\dot{V} \leq -|s(t)|(\rho(t, x) - \|e(t, x)\|) < 0.$$

因此, 全局滑模控制器能够满足可达条件, 一直维持系统的状态在滑动模面上. \square

3.2 自适应全局滑模控制器设计

由于 TCP 网络系统具有高度地非线性和时变性, 使得总不确定 $e(t, x)$ 上界 $\rho(t, x)$ 的选取比较困难. 为此, 本文采用 RBF 神经网络直接对系统的总不确定 $e(t, x)$ 进行自适应学习, 这样可有效地减小估计误差. 此外, 由于没有使用符号函数和饱和函数, 不仅可有效抑制系统的抖振, 而且系统的响应更加平稳.

本文使用具有两个输入和一个输出的 RBF 神经网络作为系统的总不确定 $e(t, x)$ 的估计器, RBF 网络的输出

$$y(x, \omega) = \omega^T \varphi(x). \quad (10)$$

其中: $x = [x_1, x_2]$ 为输入状态向量; $\omega \in R^n$ 为 RBF 神经网络的权向量; 向量 $\varphi(x) \in R^n$ 为高斯型函数, 即

$$\varphi_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{\sigma_i^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

这里: $c_i \in R^{2n}$ 为第 i 个神经元的中心位置; $\sigma_i \in R^1$ 为第 i 个神经元的宽度.

由 RBF 神经网络的逼近特性可知, 存在一个最优权向量 ω^* 使下式成立:

$$e(t, x) = y(x, \omega^*) + \varepsilon = \omega^{*T} \varphi(x) + \varepsilon, \quad (12)$$

其中 ε 为逼近误差, 且 $|\varepsilon| < \delta, \forall \delta > 0$.

应用 RBF 神经网络将控制律(7)中的不连续控制部分定义为

$$u_s = -b_0^{-1}(\hat{\omega}^T \varphi + \hat{\varepsilon} + \xi s(t)). \quad (13)$$

其中: $\hat{\omega}$ 为最优权向量 ω^* 的估计, 由式(14)进行在线调整; $\hat{\varepsilon}$ 为逼近误差的估计, 由式(15)进行在线调整; ξ 为正常数. 对 $\hat{\omega}$ 和 $\hat{\varepsilon}$ 求导可得

$$\dot{\hat{\omega}} = \eta_\omega s \varphi, \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\varepsilon}} = \eta_\varepsilon s, \quad (15)$$

其中 η_ω 和 η_ε 为正的学习率.

定理 2 系统(3)在控制律(7), (8)和(13)以及自适应律(14)和(15)的作用下, 系统状态能够一直稳

定在滑动模面上, 因此系统是渐近稳定的.

证明 考虑如下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\eta_\omega^{-1}\tilde{\omega}^T\tilde{\omega} + \frac{1}{2}\eta_\varepsilon\tilde{\varepsilon}^2. \quad (16)$$

其中: $\tilde{\omega} = \omega^* - \hat{\omega}$, $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \hat{\varepsilon}$. 对 V 关于时间 t 求导, 并将式(7), (8)和(13)代入可得

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s\dot{s} - \eta_\omega^{-1}\tilde{\omega}^T\dot{\tilde{\omega}} - \eta_\varepsilon^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\tilde{\varepsilon}} = \\ & s(k\dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) - \dot{F}(t)) - \eta_\omega^{-1}\tilde{\omega}^T\dot{\tilde{\omega}} - \eta_\varepsilon^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\tilde{\varepsilon}} = \\ & s(kx_2(t) + a_0(t) + b_0(x, t)u(t) + e(t, x) - \dot{F}(t)) - \\ & \eta_\omega^{-1}\tilde{\omega}^T\dot{\tilde{\omega}} - \eta_\varepsilon^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\tilde{\varepsilon}} = \\ & s(\tilde{\omega}^T\varphi + \tilde{\varepsilon} - \xi s(t)) - \eta_\omega^{-1}\tilde{\omega}^T\dot{\tilde{\omega}} - \eta_\varepsilon^{-1}\tilde{\varepsilon}\dot{\tilde{\varepsilon}}.\end{aligned}$$

将自适应律(14)和(15)代入可得

$$\dot{V} = -\xi s(t)^2 \leq 0, \quad (17)$$

显然, \dot{V} 是负半定的. 令 $W(t) = -\xi s(t)^2$, 于是有

$$\int_0^t W(\tau) d\tau = V(s(t)) - V(s(0)). \quad (18)$$

因为 $s(t)$, $s(0)$ 是有界的, 所以

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t W(\tau) d\tau < \infty, \quad (19)$$

由 Barbalat 引理^[11]可得, $\lim_{t \rightarrow \infty} W(t) = 0$.

综上所述, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s(t) \rightarrow 0$. 因此, 系统是渐近稳定的. \square

4 仿真研究

为了比较, 对自适应 PI 控制器^[12], 自适应滑模控制^[10](SMC)和本文所设计的滑模控制器(ASMC)进行了仿真. 网络参数的选择参照文献[5]. 取 $\bar{N} = 100$, $C_0 = 1250$ 分组/s, $\bar{R} = 0.2$ s, $q_d = 100$ 分组; $\lambda = 0.0001$, $k = 10$, $\eta_\omega = 0.1$, $\eta_\varepsilon = 0.1$, $\xi = 20$, $e(t, x) = 10 \sin(t)$. 神经网络采用 2 个输入节点, 10 个隐层节点, 1 个输出节点, 神经元的中心 c_i 在 0 和 1 之间随机取值, 神经元的宽度 σ_i 都取 1. 对于自适应 PI 控制器参数选择为 $K_P = 1.822 \times 10^{-5}$, $K_I = 1.816 \times 10^{-5}$.

图 1 和图 2 给出了系统的控制输入和 RBF 神经网络逼近不确定的情况. 从两图可知, ASMC 控制器较好地抑制了系统的抖振, 并且 RBF 神经网络能较好地逼近不确定.

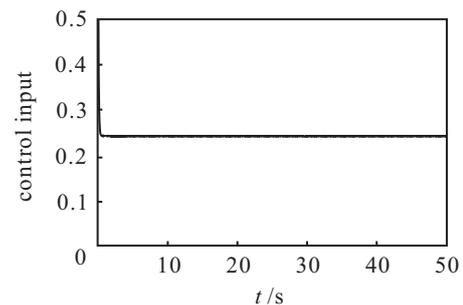


图 1 系统的控制输入

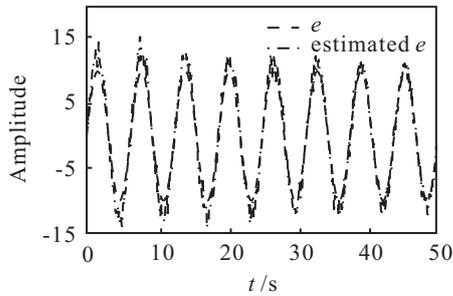


图 2 系统的不确定估计

从图 3 可以看出, 当网络参数固定时, 自适应 PI 控制器、SMC 控制器和 ASMC 控制器都能使队列长度稳定在参考值附近. 但是, 自适应 PI 控制器产生的波动较大, 收敛速度也比较慢; ASMC 控制器同 SMC 控制器相比具有较好的暂态性能且能较快地收敛到目标值附近.

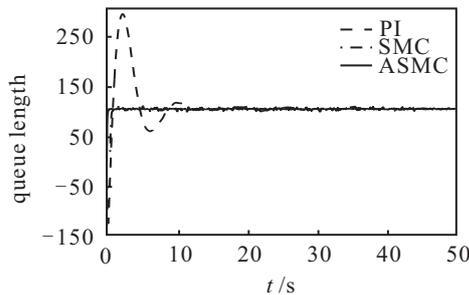


图 3 网络参数固定时队列长度比较

从图 4 可以看出, 当网络参数发生变化时, 自适应 PI 控制器显示出较大的振荡和较慢的暂态响应; SMC 虽然能较快的收敛到目标值附近, 但有较大幅度的振荡; 而 ASMC 能很快地收敛到目标值附近而且震荡平缓.

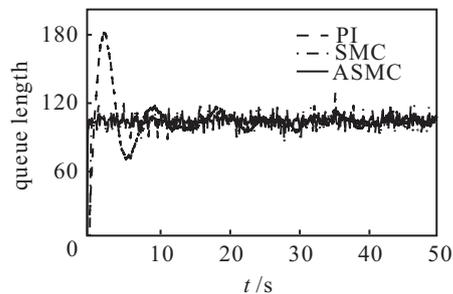


图 4 网络参数变化时队列长度比较

从图 5 可以看出, 当在网络中加入无响应的 UDP 流干扰而且网络参数发生变化时, 自适应 PI 控制器和 SMC 控制器虽然能较快地收敛到目标值附近, 但自适应 PI 控制器具有较大的超调量和较大幅度的队列振荡, SMC 控制器在稳态过程中队列变化也较大; ASMC 控制器对网络参数变化和 UDP 流的干扰具有较好的自适应性, 在稳态过程中队列变化较小. 由此可以看出, ASMC 控制器比 SMC 控制器具有更小的估计误差.

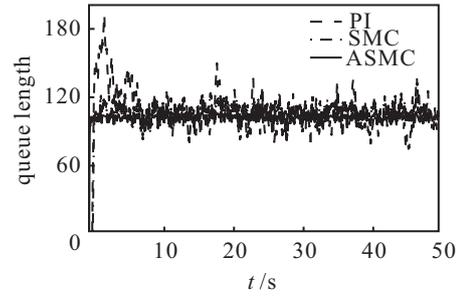


图 5 网络参数变化和具有 UDP 干扰时队列长度比较

5 结 论

针对网络本身存在参数不确定因素和非响应流的干扰, 本文基于自适应全局滑模控制设计了一种非线性 AQM 算法. 采用全局滑模面可使系统从任意初始状态就被约束在滑模面内, 从而避免趋近模态的出现, 使系统具有更优良的鲁棒性. 在设计全局滑模控制器时, 采用 RBF 神经网络直接逼近系统的总不确定, 且没有使用符号函数和饱和函数, 不仅可有效抑制系统的抖振, 而且系统的响将更加平稳. 仿真结果验证了本文算法对 TCP 网络的复杂变化具有较好的鲁棒性和较快的系统响应.

参考文献(References)

- [1] Hollot C, Misra V, Towsley D, et al. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[C]. Proc of the IEEE INFOCOM. Anchorage, 2001: 1726-1734.
- [2] Ren F Y, Lin C, Ying X H. Design a congestion controller based on sliding mode variable structure control[J]. Computer Communications, 2005, 28(9): 1050-1061.
- [3] Yin F J, Dimirovski G M, Jing Y W. Robust stabilization of uncertain input delay for Internet congestion Control[C]. Proc of the 2006 American Control Conf. Minneapolis, 2006: 5576-5580.
- [4] 尹凤杰, 井元伟, 岳承君, 等. 不确定输入延时网络系统的鲁棒拥塞控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 198-201. (Yin F J, Jing Y W, Yue C J, et al. Robust congestion control for uncertain input delay network systems[J]. Control and Decision, 2007, 22(2): 198-201.)
- [5] Yan P, Gao Y, Özbay H. A variable structure control approach to active queue management for TCP with ECN[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2005, 13(2): 203-215.
- [6] Yin F J, Xue J S, Ren X X. Design a stabilizing AQM controller based on fuzzy sliding mode control[J]. Knowledge Acquisition and Modeling Workshop, 2008: 440-443.
- [7] Chen C K, Liao T L, Yan J J. Active queue management controller design for TCP communication networks: Variable structure control approach[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 40(1): 277-285.

- [8] Kelly F P. Mathematical modeling of the internet[C]. Mathematics Unlimited-2001 and Beyond, 2001: 685-702.
- [9] Wang H W, Dimirovski G M, Jing Y W, et al. A robust active queue management scheme based on global sliding mode control[C]. Proc of the 47th IEEE Conf on Decision and Control. Cancun: IEEE, 2008: 3003-3007.
- [10] 魏涛, 张顺颐. 基于非线性控制方法的 AQM 算法[J]. 通信学报, 2009, 30(12): 58-67.
(Wei T, Zhang S Y. Active queue management algorithm based on nonlinear control method[J]. J on Communications, 2009, 30(2): 58-67.)
- [11] Narendra K S, Annaswamy A M. Stable adaptive systems[M]. NJ: Prentice Hall, 1989.
- [12] Wang C G, Li B, Sohraby K. API: Adaptive proportional-integral algorithm for active management under dynamic environments[C]. Proc of the 2004 Workshop on High Performance Switching and Routing. New York: IEEE, 2004: 51-55.