

文章编号: 1001-0920(2012)01-0109-05

不确定时滞 TCP 网络中基于 T-S 模型的滑模 AQM 算法

闫 明¹, 颜闽秀²

(1. 辽宁大学 轻型产业学院, 沈阳 110036; 2. 沈阳化工大学 信息工程学院, 沈阳 110142)

摘要: 针对传输控制协议(TCP)网络中的拥塞控制问题,基于 T-S 模糊模型,提出一种滑模主动队列管理(AQM)算法.考虑到 TCP 网络中存在的时变时滞因素,对非线性 TCP 网络进行了 T-S 模糊模型的建模.利用 LMI 设计了一个渐近稳定的滑模面,并提出一种能更好抑制抖振现象的到达条件,基于该到达条件设计的控制器能有效地抑制路由器中队列长度的振荡.大量仿真结果表明,所提出的算法比普通滑模 AQM 算法具有更好的稳定性和鲁棒性.

关键词: TCP 网络拥塞控制; 主动队列管理; 滑模控制; T-S 模糊模型; 到达条件

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Sliding mode AQM algorithm based on T-S model for TCP networks with uncertainties and time delay

YAN Ming¹, YAN Min-xiu²

(1. College of Light Industry, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China. Correspondent: YAN Ming, E-mail: yanming12345678@163.com)

Abstract: For the problem of congestion control in transmission control protocol(TCP) networks, a sliding mode active queue management(AQM) algorithm based on T-S fuzzy model is proposed. Considering the uncertainties and time-varying delays in TCP networks, a T-S fuzzy model is obtained for nonlinear TCP networks model. An asymptotically stable sliding surface is designed by using LMI. Moreover, a reaching condition is presented in order to further constrain chattering. Based on the reaching condition, the controller can constrain the oscillation of the queue length in router effectively. Simulation results show that the proposed algorithm has better stability and robustness than common sliding mode AQM algorithm.

Key words: TCP networks congestion control; active queue management; sliding mode control; T-S fuzzy model; reaching condition

1 引言

随着传输控制协议(TCP)网络规模爆炸式的增长,拥塞问题已越来越严重地阻碍了网络的健康发展.因此,设计一种有效的拥塞控制算法已成为网络管理中亟待解决的问题.

主动队列管理是一种基于路由器的拥塞控制机制.该机制通过在路由器队列排满之前便以一定的概率标记或丢包,使发送端能够及早作出反应(如减小发送速率等),从而达到抑制拥塞的目的^[1].近年来,相继涌现了许多 AQM 算法^[2-3],并获得了一定的拥塞控制效果.但由于实际的 TCP 网络是一个非常复杂的时

变系统,需要设计一种鲁棒性更强的 AQM 控制器才能取得更好的控制效果.

滑模控制系统中的滑动模态与系统的摄动和外界干扰无关^[4],因此对于时变 TCP 网络而言,滑模控制是相当理想的选择.近年来,出现了一些滑模 AQM 算法^[5-6].文献[5]提出的滑模变结构(SMVS)控制器极大地提高了系统的鲁棒性;文献[6]给出了保证网络系统渐近稳定的最大允许延时边界.但以上文献只适用于线性系统模型,而且直接对非线性 TCP 网络模型进行分析设计十分困难.

T-S (Takagi-Sugeno) 模糊模型被证明能很好地逼近非线性系统,若将滑模控制与 T-S 模糊控制相结合

收稿日期: 2010-07-21; 修回日期: 2010-09-18.

基金项目: 辽宁省教育厅科研基金项目(L2010435); 辽宁大学青年科研基金项目(2008LDQN06).

作者简介: 闫明(1974-),男,副教授,博士,从事网络拥塞控制、滑模变结构控制等研究;颜闽秀(1972-),女,副教授,博士,从事网络拥塞控制、滑模变结构控制等研究.

设计控制器, 则能进一步提高控制效果. 近年来, 这方面的研究取得了一些成果^[7-8], 但这些成果均存在局限性, 如没有考虑时变时滞因素或存在抖振等问题.

为了更好地解决 TCP 网络中的拥塞控制问题, 本文基于 T-S 模型提出了一种滑模 AQM 算法. 该算法利用 T-S 模型近似代替非线性 TCP 网络模型, 考虑到网络中存在的不确定和时变时滞因素, 利用 LMI 设计了渐近稳定的滑模面. 另外, 还给出了一种改进的到达条件, 基于该到达条件设计的控制器能有效抑制路由器中队列长度的振荡. 仿真结果表明了本文算法的优越性.

2 TCP 网络动态模型

非线性 TCP 网络动态模型如下所示^[2]:

$$\dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t)}p(t), \quad (1)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{N(t)}{R(t)}W(t) - C(t). \quad (2)$$

其中: $W(t)$ 为 TCP 网络窗口大小, $q(t)$ 为路由器中当前的队列长度, $R(t)$ 为往返时延, $p(t)$ 为分组丢弃/标记概率, $N(t)$ 为激活的 TCP 连接数, $C(t)$ 为主干链路容量.

令 $x_1(t) = q(t) - q_0$, $x_2(t) = W(t) - W_0$, $\tau(t) = R(t)$, $u(t) = p(t) - p_0$. q_0 , W_0 和 p_0 分别为 $q(t)$, $W(t)$ 和 $p(t)$ 的期望值. 假设 $\dot{\tau}(t) \leq d < 1$, 则式 (1) 和 (2) 可化为

$$\dot{x}(t) = F(x, u) = f(x) + g(x)u(t). \quad (3)$$

其中

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}, f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix},$$

$$-p_0 \leq u(t) \leq 1 - p_0, 0 \leq p_0 \leq 1,$$

$$f_1(x) = \frac{N(t)}{\tau(t)}[x_2(t) + W_0] - C(t),$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\tau(t)} - \frac{[x_2(t) + W_0][x_2(t - \tau(t)) + W_0]}{2\tau(t)}p_0,$$

$$g_1(x) = 0,$$

$$g_2(x) = -\frac{[x_2(t) + W_0][x_2(t - \tau(t)) + W_0]}{2\tau(t)}.$$

直接分析式 (3) 十分困难, 因此采用 T-S 模糊模型来近似代替式 (3). T-S 模糊模型采用一组模糊规则来描述式 (3). 由式 (3) 可知, 每条模糊规则对应的模糊状态方程中应包含 $x(t)$ 和 $x(t - \tau(t))$ 项. 考虑到实际的 TCP 网络参数 $N(t)$, $C(t)$ 和 $R(t)$ 都是变化的, 因此用如下带有不确定项的系统来描述第 i 条模糊规则比较合理:

规则 i 如果 $x_1(t)$ 为 Γ_1^i 且 $x_2(t)$ 为 Γ_2^i , 则

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i(t))x(t) +$$

$$(A_{di} + \Delta A_{di}(t))x(t - \tau(t)) + (B + \Delta B(t))u(t), i = 1, 2, \dots, l. \quad (4)$$

其中: $x_1(t)$, $x_2(t)$ 为状态变量; $u(t)$ 为控制且满足 $-p_0 \leq u(t) \leq 1 - p_0$; Γ_1^i , Γ_2^i 为模糊子集; l 为模糊规则数; A_i , A_{di} 和 B 为常数矩阵且取值是依据文献 [9] 中的方法, 即它们是在式 (3) 具有代表性的特征点 (x_0, u_0) 附近进行局部线性化而得到的, 从而可保证所建的 T-S 模糊模型能很好地逼近式 (3); $\Delta A_i(t)$, $\Delta A_{di}(t)$ 和 $\Delta B(t)$ 为不确定项, 其大小由 $N(t)$, $C(t)$ 和 $R(t)$ 的实际变化程度来决定.

注意到实际 TCP 网络参数的变化是有一定范围的, 因此式 (4) 中的 $\Delta A_i(t)$, $\Delta A_{di}(t)$ 和 $\Delta B(t)$ 也应是范数有界的, 不妨设其满足如下不等式:

$$\|\Delta A_i(t)\| \leq \mu_{A_i}, \|\Delta A_{di}(t)\| \leq \mu_{A_{di}}, \|\Delta B(t)\| \leq \mu_B. \quad (5)$$

其中: $\mu_{A_i} > 0$, $\mu_{A_{di}} > 0$, $\mu_B > 0$ 为常数.

易知 $\Delta A_i(t)$ 和 $\Delta A_{di}(t)$ 能被分解成如下形式:

$$[\Delta A_i(t) \quad \Delta A_{di}(t)] = D_i F_i(t) [E_i \quad E_{di}]. \quad (6)$$

其中: D_i , E_i 和 E_{di} 为适当维数的常数矩阵; $F_i(t)$ 为适当维数的不确定时变矩阵且满足 $F_i^T(t)F_i(t) \leq I$.

由于式 (4) 中的系数矩阵 B 为如下的等式^[9]:

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \left. \frac{\partial F}{\partial u} \right|_{\substack{x(t)=x_0 \\ u(t)=u_0}}, \quad (7)$$

由式 (7) 不难发现 $b_1 = 0$, 可知 $\Delta B(t)$ 为

$$\Delta B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta b_2(t) \end{bmatrix} = B \Delta \bar{B}(t), \quad (8)$$

其中 $\Delta \bar{B}(t) = \Delta b_2(t)/b_2$.

借助于式 (6) 和 (8), 并对式 (4) 进行单点模糊化、乘积推理和加权平均反模糊化, 可得全局模糊状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \{ (A_i + D_i F_i(t) E_i) x(t) + \\ & (A_{di} + D_i F_i(t) E_{di}) x(t - \tau(t)) + \\ & B(I + \Delta \bar{B}(t)) u(t) \}. \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$h_i(x(t)) = \Phi_i(x(t)) / \sum_{i=1}^l \Phi_i(x(t)),$$

$$\Phi_i(x(t)) = \prod_{j=1}^2 \Omega_{ij}(x_j(t)),$$

$\Omega_{ij}(x_j(t))$ 为 $x_j(t)$ 在 Γ_j^i 中的隶属函数.

3 滑模 AQM 算法设计

算法的设计包括滑模面和控制设计两个步骤: 滑模面的设计需使其上的滑模运动渐近稳定; 控制器的设计需使系统状态从初始位置在有限时间内趋近

到滑模面上,并在以后的时间里维持在该滑模面上,即满足到达条件^[4].这两个步骤可保证系统运动(由趋近过程的系统运动和滑模运动组成)是稳定的.

3.1 滑模面设计

定义滑模面为

$$S(t) = B^T P^{-1} x(t) = Gx(t), \quad (10)$$

其中 $P \in R^{2 \times 2}$ 为待求的对称正定矩阵. 为获得滑模运动方程,对 $x(t)$ 进行如下变换:

$$z(t) = Tx(t). \quad (11)$$

其中

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t)]^T, \quad \tilde{B}^T B = 0, \\ T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\tilde{B}^T P \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T \\ (B^T P^{-1} B)^{-1} B^T P^{-1} \end{bmatrix}.$$

因此

$$z_2(t) = T_2 x(t) = (B^T P^{-1} B)^{-1} S(t).$$

当系统状态运动到滑模面上时, $S(t) = 0$, 此时 $z_2(t) = 0$. 由式(11)得 $x(t) = P \tilde{B} z_1(t)$, 因此滑模运动方程为

$$\dot{z}_1(t) = (\tilde{B}^T P \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \times \\ \{ [A_i + D_i F_i(t) E_i] P \tilde{B} z_1(t) + \\ [A_{di} + D_i F_i(t) E_{di}] P \tilde{B} z_1(t - \tau(t)) \}. \quad (12)$$

引理 1^[10] 给定适当维数的矩阵 Y, D, E , 其中 Y 是对称的, 则 $Y + DF(t)E + E^T F^T(t)D^T < 0$ 对所有满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的矩阵 F 成立, 当且仅当存在一个常数 $\lambda > 0$, 使得 $Y + \lambda DD^T + \lambda^{-1} E^T E < 0$ 成立.

定理 1 如果存在对称正定矩阵 P 和 Q , 以及常数 $\lambda > 0$, 使得如下的 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} \Psi & * & * \\ \tilde{B}^T P A_{di}^T \tilde{B} & -(1-d)Q & * \\ E_i P \tilde{B} & E_{di} P \tilde{B} & -\lambda I \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2, \dots, l. \quad (13)$$

其中: $\Psi = \tilde{B}^T A_i P \tilde{B} + \tilde{B}^T P A_i^T \tilde{B} + Q + \lambda \tilde{B}^T D_i D_i^T \tilde{B}$, $*$ 为矩阵中的对称项. 则滑模运动方程(12)渐近稳定.

证明 取李亚普诺夫函数为

$$V(t) = z_1^T(t) \tilde{B}^T P \tilde{B} z_1(t) + \int_{t-\tau(t)}^t z_1^T(s) Q z_1(s) ds,$$

其中 P, Q 为对称正定矩阵. 则 $V(t)$ 沿式(12)的微分为

$$\dot{V}(t) = \\ 2z_1^T(t) \tilde{B}^T P \tilde{B} \dot{z}_1(t) + z_1^T(t) Q z_1(t) - \\ z_1^T(t - \tau(t)) Q z_1(t - \tau(t)) (1 - \dot{\tau}(t)) \leq$$

$$\sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_1(t - \tau(t)) \end{bmatrix}^T \Theta \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_1(t - \tau(t)) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Psi_1 & * \\ \tilde{B}^T P [A_{di} + D_i F_i(t) E_{di}]^T \tilde{B} & -(1-d)Q \end{bmatrix},$$

$$\Psi_1 = \tilde{B}^T [A_i + D_i F_i(t) E_i] P \tilde{B} +$$

$$\tilde{B}^T P [A_i + D_i F_i(t) E_i]^T \tilde{B} + Q.$$

因此, 式(12)渐近稳定等价于

$$\Theta < 0 \quad (15)$$

成立. 易知, 式(15)可重写为如下形式:

$$\Theta_1 + \bar{D} F_i(t) \bar{E} + \bar{E}^T F_i^T(t) \bar{D}^T < 0. \quad (16)$$

其中

$$\Theta_1 = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T A_i P \tilde{B} + \tilde{B}^T P A_i^T \tilde{B} + Q & * \\ \tilde{B}^T P A_{di}^T \tilde{B} & -(1-d)Q \end{bmatrix},$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T D_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{E} = [E_i P \tilde{B} \quad E_{di} P \tilde{B}].$$

由引理 1 知, 若使式(16)成立, 当且仅当存在常数 $\lambda > 0$, 使得下式成立:

$$\Theta_1 + \lambda \bar{D} \bar{D}^T + \lambda^{-1} \bar{E}^T \bar{E} < 0. \quad (17)$$

对式(17)进行整理并由矩阵的 Schur 补性质知, 式(17)成立等价于式(13)成立. \square

注 1 可用 Matlab 软件中的 LMI 工具箱求出式(13)中的矩阵 P , 从而完成滑模面 $S(t)$ 的设计.

3.2 到达条件的设计

文献[4]提出了如下形式的到达条件:

$$\begin{cases} \dot{S}(t) \leq -kS(t) - \varepsilon \text{sign}S(t), & S(t) > 0; \\ \dot{S}(t) \geq -kS(t) - \varepsilon \text{sign}S(t), & S(t) < 0. \end{cases} \quad (18)$$

其中: k, ε 均为大于零的常数. 然而使用上述到达条件的系统在平衡点附近存在一定幅度的抖振, 这意味着路由器中的队列长度只能在期望值附近来回振荡, 抖振的存在对抑制拥塞显然是不利的. 存在抖振的原因解释如下: 当系统状态运动到平衡点附近时, $S(t) \approx 0$, 此时式(18)中的 $|\dot{S}(t)| \approx \varepsilon$. 因为 ε 为大于零的常数, 故 $|\dot{S}(t)|$ 不为零, 这意味着平衡点附近的趋近速度不为零, 由于惯性的作用使得平衡点附近存在一定幅度的抖振. 为克服这一缺点, 本文提出了如下形式的到达条件:

$$\begin{cases} \dot{S}(t) \leq -kS(t) - \varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \text{sign}S(t), \\ \quad S(t) > 0; \\ \dot{S}(t) \geq -kS(t) - \varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \text{sign}S(t), \\ \quad S(t) < 0. \end{cases} \quad (19)$$

其中: k, ε 均为大于零的常数.

式(19)能够明显地抑制抖振,具体解释如下:当队列长度距期望值较远,即 $\|x(t)\|$ 很大时, $\varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \approx \varepsilon$,此时式(19)非常接近于式(18),即能够保持式(18)的所有优点;当队列长度被控制器驱动到距期望值较近,即 $S(t)$ 和 $\|x(t)\|$ 均很小时, $|\dot{S}(t)| \approx \varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \approx 0$,这意味着平衡点附近的趋近速度很低,惯性很小,显然可以大大降低抖振。

3.3 滑模 AQM 控制器的设计

定理 2 如果为式(9)设计的滑模 AQM 控制器具有如下形式:

$$u(t) = -(GB)^{-1} \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) [\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 \text{sign}S(t)], \quad (20)$$

则该控制器能够满足式(19)。其中

$$\begin{aligned} \pi_1 &= GA_i x(t) + GA_{di} x(t - \tau(t)), \\ \pi_2 &= kS(t) + \varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \text{sign}S(t), \\ \pi_3 &= \mu_{A_i} \|G\| \|x(t)\| + \mu_{A_{di}} \|G\| \times \\ &\quad \|x(t - \tau(t))\| + \mu_B \|G\|, \end{aligned}$$

k 和 ε 为大于零的常数。

证明 利用式(6),(9),(10)和(20),可得

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \sum_{j=1}^l h_j(x(t)) \{ \pi_1 - \pi_4 - \pi_2 + \\ &\quad G\Delta A_i(t)x(t) + G\Delta A_{di}(t)x(t - \tau(t)) - \\ &\quad \pi_5 \text{sign}S(t) + G\Delta B(t)u(t) \}. \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} \pi_4 &= GA_j x(t) + GA_{dj} x(t - \tau(t)), \\ \pi_5 &= \mu_{A_j} \|G\| \|x(t)\| + \mu_{A_{dj}} \|G\| \times \\ &\quad \|x(t - \tau(t))\| + \mu_B \|G\|. \end{aligned}$$

注意到 $-p_0 \leq u(t) \leq 1 - p_0$, $0 \leq p_0 \leq 1$, 因此 $\|u(t)\| \leq 1$ 。结合式(5),有

$$\begin{aligned} G\Delta A_i(t)x(t) + G\Delta A_{di}(t)x(t - \tau(t)) + \\ G\Delta B(t)u(t) \leq \pi_3. \end{aligned} \quad (22)$$

又注意到 $\sum_{i=1}^l h_i(x(t)) = 1$, $\sum_{j=1}^l h_j(x(t)) = 1$, 因此:

$$\begin{aligned} 1) \text{ 当 } S(t) > 0 \text{ 时, 有} \\ \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \sum_{j=1}^l h_j(x(t)) \{ G\Delta A_i(t)x(t) + \\ G\Delta A_{di}(t)x(t - \tau(t)) - \pi_5 \text{sign}S(t) + \\ G\Delta B(t)u(t) \} \leq 0. \end{aligned} \quad (23)$$

易知 $\sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \sum_{j=1}^l h_j(x(t)) (\pi_1 - \pi_4) = 0$, 因此有

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) \leq - \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \sum_{j=1}^l h_j(x(t)) \pi_2 = -\pi_2 = \\ -kS(t) - \varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \text{sign}S(t). \end{aligned} \quad (24)$$

2) 当 $S(t) < 0$ 时, 有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \sum_{j=1}^l h_j(x(t)) \{ G\Delta A_i(t)x(t) + \\ G\Delta A_{di}(t)x(t - \tau(t)) - \pi_5 \text{sign}S(t) + \\ G\Delta B(t)u(t) \} \geq 0, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) \geq - \sum_{i=1}^l h_i(x(t)) \sum_{j=1}^l h_j(x(t)) \pi_2 = -\pi_2 = \\ -kS(t) - \varepsilon(1 - e^{-\|x(t)\|^2}) \text{sign}S(t). \end{aligned} \quad (26)$$

综上,所设计的滑模 AQM 控制器(20)能够满足式(19)的到达条件。□

4 仿真研究

采用 NS2 仿真平台的网络拓扑结构如图 1 所示,本文提出的模糊滑模控制算法(FSMC)工作于路由器 1 中。

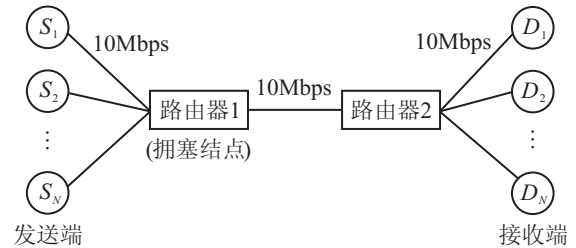


图 1 仿真网络拓扑结构

网络参数为: $N = 200$, 即 $C = 10 \text{ Mbps}$, $R = 100 \text{ ms}$, TCP窗口的最大值为 10 packets, 期望值为 5 packets, 路由器的最大缓存为 500 packets, q_0 为 300 packets, 初始的队列长度为 10 packets。

选择式(3)两个具有代表性的特征点: 一个是系统的平衡点, 记为 (x_{01}, u_{01}) , 显然 $x_{01} = [0 \ 0]^T$; 另一个是 $q(t)$ 在期望值附近且 TCP 网络的窗口大小在最大值附近的点, 记为 (x_{02}, u_{02}) , 根据前述参数易求得 $x_{02} = [0 \ 5 \times 10^3]^T$ 。在这两个特征点附近对式(3)进行局部线性化, 得到如下的两条模糊规则:

规则 1 如果 $x_1(t)$ 在 0 附近且 $x_2(t)$ 在 0 附近, 则

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_1 + D_1 F_1(t) E_1) x(t) + \\ &\quad (A_{d1} + D_1 F_1(t) E_{d1}) x(t - \tau(t)) + \\ &\quad (B + \Delta B(t)) u(t); \end{aligned}$$

规则 2 如果 $x_1(t)$ 在 0 附近且 $x_2(t)$ 在 5×10^3 附近, 则

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & (A_2 + D_2 F_2(t) E_2) x(t) + \\ & (A_{d2} + D_2 F_2(t) E_{d2}) x(t - \tau(t)) + \\ & (B + \Delta B(t)) u(t). \end{aligned}$$

根据上述网络参数并利用文献 [9] 中的方法, 得

$$\begin{aligned} A_1 = & \begin{bmatrix} 0 & 2 \times 10^3 \\ 0 & -2 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, A_{d1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -2 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, \\ A_2 = & \begin{bmatrix} 0 & 2 \times 10^3 \\ 0 & -6 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, A_{d2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -6 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, \\ B = & \begin{bmatrix} 0 \\ -1.25 \times 10^8 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

令 $\tilde{B} = [1 \ 0]^T$, $d = 0.5$, $k = 10$, $\varepsilon = 0.1$. 假设 $N(t)$ 的变化幅度在 170~230 之间, $C(t)$ 的变化幅度在 $0.8 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^4$ packet/s 之间, $R(t)$ 的变化幅度在 80~120 ms 之间, 可得 $\mu_{A_1} = 8.75 \times 10^2$, $\mu_{A_{d1}} = 2.4922 \times 10^{-3}$, $\mu_{A_2} = 8.75 \times 10^2$, $\mu_{A_{d2}} = 7.477 \times 10^{-3}$, $\mu_B = 7.66 \times 10^7$. 根据以上参数及定理 1, 得

$$P = \begin{bmatrix} 77.2633 & -0.0224 \\ -0.0224 & 77.2633 \end{bmatrix}.$$

隶属函数选为

$$\begin{aligned} \Omega_{11}(x_1(t)) = \Omega_{21}(x_1(t)) = & e^{-x_1^2/3}, \\ \Omega_{12}(x_2(t)) = & e^{-x_2^2/3}, \\ \Omega_{22}(x_2(t)) = & \begin{cases} e^{-(x_2 - 5 \times 10^3)^2/3}, & x_2(t) < 5 \times 10^3; \\ 0, & x_2(t) \geq 5 \times 10^3. \end{cases} \end{aligned}$$

为了验证滑模控制与 T-S 模糊控制相结合的优势, 在相同的网络背景条件下, 将本文控制器与文献 [5] 中的 SMVS 控制器 (单纯的滑模 AQM 控制器) 进行仿真对比.

1) 网络的静态性能. 网络参数的选择同上所述并假设参数是不变的, 仿真结果如图 2 和图 3 所示.

从图 2 和图 3 中可以看出, SMVS 稳态时存在一定的抖振现象; 由于 FSMC 采用改进的到达条件, 有效地抑制了抖振现象, 经过较短时间的调整后, 队列长度基本达到了期望值.

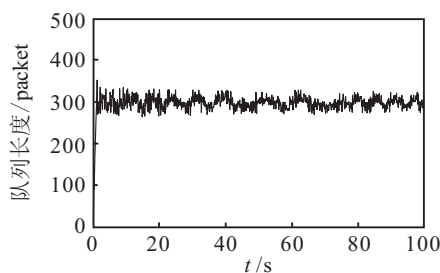


图 2 使用 SMVS 时的队列长度

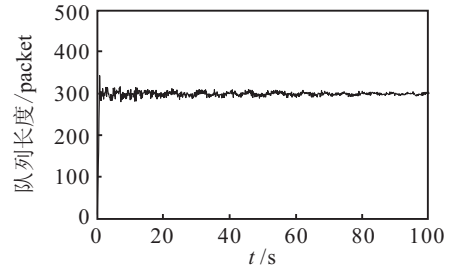


图 3 使用 FSMC 时的队列长度

2) 网络的鲁棒性能. 令网络参数 $N(t)$, $C(t)$ 和 $R(t)$ 在如前所述的范围内随机变化, 仿真结果如图 4 和图 5 所示.

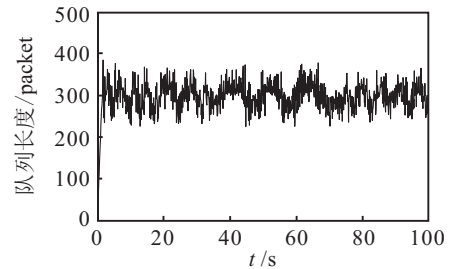


图 4 使用 SMVS 时的队列长度

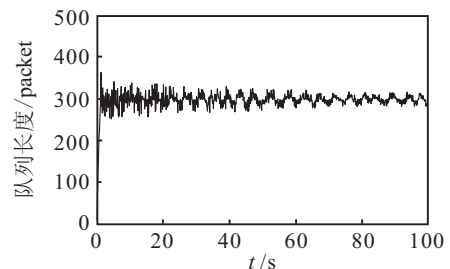


图 5 使用 FSMC 时的队列长度

从图 4 和图 5 中可以看出, SMVS 达到稳态所需的时间更长, 振荡也较大; 由于 FSMC 所基于的数学模型更为精确且考虑了不确定和时滞因素的影响, 队列长度经过短暂的调整后迅速地接近于期望值.

5 结 论

本文针对 TCP 网络中的拥塞控制问题, 基于 T-S 模型提出了一种滑模 AQM 算法. 该算法将非线性 TCP 网络模型用 T-S 模糊模型来近似代替, 并考虑到网络中存在的 uncertain 和时变时滞因素, 利用 LMI 设计了滑模面. 此外, 还设计了能有效抑制抖振的到达条件, 从而使得滑模 AQM 控制器能够有效地抑制队列长度的振荡. 仿真对比证实了本文算法的优越性.

参考文献(References)

- [1] RFC 2309. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet[S].
- [2] Misra V, Gong W B, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[C]. Proc of ACM/SIGCOMM. Sweden, 2000: 151-160. (下转第 119 页)