

基于终端滑模控制的有限时间拥塞控制

叶成荫, 井元伟, 郑 艳, 褚俊霞

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对 TCP 网络的有限时间拥塞控制问题, 考虑到输入受限、网络参数不确定和非响应流干扰的情况, 提出了一种基于自适应终端滑模控制的主动队列管理算法. 为了使网络系统不确定的界不需要事先获得, 给出一个自适应律对总不确定的界进行了估计. 考虑到系统输入受限的情况, 给出另一个自适应律以补偿输入受限对系统稳定性造成的影响. 为了改善网络系统的收敛性能, 基于终端滑模控制设计了一个有限时间拥塞控制器. 仿真结果表明, 所提出的算法不仅具有有限时间收敛的品质, 而且具有良好的稳定性和鲁棒性.

关 键 词: 拥塞控制; 主动队列管理; 输入受限; 终端滑模控制; 有限时间控制

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)06-0761-05

Finite-Time Congestion Control Based on Terminal Sliding Mode Control

YE Cheng-yin, JING Yuan-wei, ZHENG Yan, CHU Jun-xia

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YE Cheng-yin, E-mail: chengyinye@foxmail.com)

Abstract: To solve the problem of finite-time congestion control for TCP networks with input constraint, network parameter uncertainties and nonresponsive flow disturbances, an active queue management algorithm was presented based on an adaptive terminal sliding mode control. One adaptive law was designed to estimate the certainty bound of the network system so that the certainty bound was not required to be known in advance. Another adaptive law was proposed to compensate for the effects of the system stability under control input saturation. A finite-time congestion controller based on terminal sliding mode control was designed in order to improve the convergent performance of the network system. Simulation results showed that the proposed algorithm not only has the property of finite-time convergence but also has good stability and robustness.

Key words: congestion control; active queue management; input constraint; terminal sliding mode control; finite-time control

随着传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 网络规模的快速增长, 主动队列管理算法的研究成为 TCP 网络领域的一个热点.

文献[1]在对 TCP 网络非线性模型进行线性化的基础上提出了比例积分 (proportional-integral, PI) 控制器, 但由于 TCP 网络中的网络参数存在着不确定性因素, 使得 PI 控制器的鲁棒性较差. 文献[2]利用滑模控制对参数变化和外部干扰具有强鲁棒性的特点设计了一种 AQM 算

法. 文献[3]针对网络系统存在参数变化和非响应流干扰的情况, 给出了一种 H_∞ 状态反馈控制器. 但它们都是基于线性控制的, 不能抓住 TCP 网络的非线性动态本质. 文献[4]针对 TCP 网络的非线性动态模型^[5]提出了一种滑模控制器, 增强了系统对 TCP 连接和往返时延等网络参数变化的鲁棒性, 但没有考虑控制输入受限带来的影响. 文献[6-7]考虑了输入受限的情况, 基于滑模变结构控制方法分别设计了一种 AQM 算法,

收稿日期: 2013-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61304021, 61233002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110404032).

作者简介: 叶成荫(1977-), 男, 辽宁营口人, 东北大学博士研究生, 辽宁石油化工大学讲师; 井元伟(1956-), 男, 辽宁西丰人, 东北大学教授, 博士生导师.

但没有考虑参数变化和非响应流带来的影响,并且只能保证网络系统是渐近稳定的,从而导致较大的排队时延和较低的链路利用率^[8].

本文针对带有输入受限、参数不确定以及非响应流的有限时间拥塞控制问题,给出了一种基于终端滑模控制的 AQM 算法. 将 TCP 网络的非线性动态模型整合成具有总不确定和输入受限的形式,给出一个自适应律对不确定的界进行了估计. 考虑到系统输入受限的情况,给出一个自适应律以补偿输入受限对系统稳定性造成的影响.

1 TCP 网络非线性动态模型

文献[5]给出了基于速率的 TCP 网络非线性动态模型:

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

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.

令 q_d 为期望的队列长度,则队列长度误差 $e_q = q(t) - q_d$. 记 $x_1 = e_q, x_2 = \dot{e}_q, \mathbf{x} = [x_1, x_2]$, 则有

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a(t, \mathbf{x}) + b(t, \mathbf{x})u(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: $u(t) = p(t), a(t, \mathbf{x}) = \frac{N(t)}{((x_1 + q_d)/C_0 + T_p)^2},$
 $b(t, \mathbf{x}) = -\left(\frac{N(t)}{((x_1 + q_d)/C_0 + T_p)^2} + \frac{(x_2 + C_0)^2}{2N(t)} \right).$

式(2)是一个近似模型,没有考虑非响应流给系统带来的干扰. 为此,引进函数 $d(t, \mathbf{x})$ 作为非响应流给系统带来的干扰. 式(2)可以改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a(t, \mathbf{x}) + b(t, \mathbf{x})u(t) + d(t, \mathbf{x}). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于 TCP 连接负载因子 $N(t)$ 和往返时延 $R(t)$ 是动态变化的,系统参数 $a(t, \mathbf{x})$ 和 $b(t, \mathbf{x})$ 可以表达为

$$a(t, \mathbf{x}) = a_0(t, \mathbf{x}) + \Delta a(t, \mathbf{x}), \quad (4)$$

$$b(t, \mathbf{x}) = b_0(t, \mathbf{x}) + \Delta b(t, \mathbf{x}). \quad (5)$$

其中: $a_0(t, \mathbf{x})$ 为 $a(t, \mathbf{x})$ 的参考值; $b_0(t, \mathbf{x})$ 为 $b(t, \mathbf{x})$ 的参考值; $\Delta a(t, \mathbf{x})$ 和 $\Delta b(t, \mathbf{x})$ 分别为 $a(t, \mathbf{x})$ 和 $b(t, \mathbf{x})$ 的参数不确定.

进一步地,假设参数不确定 $\Delta a(t, \mathbf{x}), \Delta b(t, \mathbf{x})$ 以及非响应流干扰 $d(t, \mathbf{x})$ 满足匹配条

件,即

$$\left. \begin{aligned} \Delta a(t, \mathbf{x}) &= b_0(t, \mathbf{x}) \tilde{\Delta} a(t, \mathbf{x}), \\ \Delta b(t, \mathbf{x}) &= b_0(t, \mathbf{x}) \tilde{\Delta} b(t, \mathbf{x}), \\ d(t, \mathbf{x}) &= b_0(t, \mathbf{x}) \tilde{d}(t, \mathbf{x}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

于是,式(3)可以改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_0(t, \mathbf{x}) + b_0(t, \mathbf{x})(u(t) + e(t, \mathbf{x})). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $e(t, \mathbf{x})$ 为总的不确定,并且满足如下条件:

$$|e(t, \mathbf{x})| < \rho. \quad (8)$$

其中 $\rho > 0$ 为常数.

由于控制输入 $u(t)$ 被限制在 0 和 1 之间,式(7)可以表达为输入受限形式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_0(t, \mathbf{x}) + b_0(t, \mathbf{x})(\text{sat}(u(t)) + e(t, \mathbf{x})). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 $\text{sat}(\cdot)$ 为具有非线性特性的饱和函数,

$$\text{sat}(u(t)) = \begin{cases} u_{\max}, & u(t) \geq u_{\max}, \\ u(t), & u_{\min} \leq u(t) < u_{\max}, \\ u_{\min}, & u(t) < u_{\min}. \end{cases} \quad (10)$$

其中, u_{\min} 和 u_{\max} 分别为控制输入的下界和上界.

根据饱和函数的定义,可将 $\text{sat}(u(t))$ 描述为

$$\text{sat}(u(t)) = \chi(u(t))u(t). \quad (11)$$

其中: $0 < \chi(u(t)) \leq 1$, 并且定义为

$$\chi(u(t)) = \begin{cases} u_{\max}/u(t), & u(t) \geq u_{\max}, \\ 1, & u_{\min} \leq u(t) < u_{\max}, \\ u_{\min}/u(t), & u(t) < u_{\min}. \end{cases} \quad (12)$$

于是,式(9)可以进一步改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_0(t, \mathbf{x}) + b_0(t, \mathbf{x})(\chi(u(t))u(t) + e(t, \mathbf{x})). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2 有限时间拥塞控制器设计

有限时间控制的一个重要分支是终端滑模控制^[9]. 该方法在保证滑模控制稳定性的基础上,使系统状态在有限时间内收敛到平衡点. 终端滑模控制不仅具有普通滑模控制的优点,还具有有限时间收敛的品质.

终端滑模控制器的设计可分为两个步骤. 首先,选取具有良好的动态特性的终端滑动模面,即

$$s(t) = x_1 + \beta |x_2|^\gamma \text{sign}(x_2). \quad (14)$$

其中, β 和 γ 是常数,并且满足 $\beta > 0, 1 < \gamma < 2$.

为了保证正常运动阶段的品质,考虑如下形式的终端滑模趋近律^[10]:

$$\dot{s}(t) = -\tau s - \sigma |s|^\alpha \text{sign}(s). \quad (15)$$

其中, $\tau > 0, \sigma > 0$ 和 $0 < \alpha < 1$ 为常数.

显然,如果 $s(0) \neq 0$, 那么由式(15)可以得到系统状态从任意初始状态到达终端滑模面的时间 t_{t_0} 为

$$t_{t_0} = \frac{1}{\tau(1-\alpha)} \ln \frac{\tau s^{1-\alpha}(0) + \sigma}{\sigma}. \quad (16)$$

在确定终端滑动模面之后设计终端滑模控制器 $u(t)$, 使得系统状态在控制输入受限, 无响应流干扰以及参数不确定存在的情况下能够从任意初始位置在有限时间内趋近到终端滑模面上。

在设计 AQM 控制器时, 式(8)中总不确定 $e(t, x)$ 的界 ρ 是保证 TCP 网络系统稳定的一个重要因素。但是, 由于 TCP 网络系统的高度非线性及时变性, 系统总不确定的界很难事先获得。

此外, 由于限制在 0 和 1 之间的分组丢弃概率被看作是 TCP 网络的控制输入, AQM 控制器的设计必须考虑到控制输入受限所带来的影响。

考虑以上因素, 基于自适应终端滑模控制的 AQM 控制器可以设计为

$$u(t) = -\frac{1}{b_0}(\tau s + \sigma |s|^\alpha \text{sign}(s) + \varepsilon \hat{\delta} (\beta^{-1} \gamma^{-1} |x_2|^{2-\gamma} + |a_0| + |b_0| \hat{\rho}) \text{sign}(s)). \quad (17)$$

其中: $\hat{\rho}$ 为总不确定的界 ρ 的估计值; $\hat{\delta}$ 为与变量 $\chi(u(t))$ 有关的自适应估计值。 $\hat{\rho}$ 和 $\hat{\delta}$ 可以设计为下面的微分方程形式:

$$\dot{\hat{\rho}}(t) = \eta \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} |b_0| |s|, \hat{\rho}(0) > 0, \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\delta}}(t) = \varepsilon \hat{\delta}^3 (|x_2| + \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} (|a_0| + |b_0| \hat{\rho})) |s|, \hat{\delta}(0) > 0. \quad (19)$$

其中, $\varepsilon > 1, \eta > 0$ 为自适应因子。

引理 1^[10] 如果存在连续的、正定的函数 $V(t)$ 满足下面的微分不等式:

$$\dot{V}(t) \leq -\alpha V^\eta(t), \forall t \geq 0, V(0) \geq 0. \quad (20)$$

其中: $\alpha > 0, 0 < \eta < 1$ 均为常数, 那么 $V(t)$ 满足下面的不等式

$$V^{1-\eta}(t) \leq V^{1-\eta}(0) - \alpha(1-\eta)t, 0 \leq t \leq t_r. \quad (21)$$

并且

$$V(t) = 0, \forall t \geq t_r; \quad (22)$$

$$t_r \leq \frac{V^{1-\eta}(0)}{\alpha(1-\eta)}. \quad (23)$$

定理 1 对于具有输入受限的 TCP 网络系统(13), 如果采用控制律式(17)和自适应律式(18)和(19)的形式, 则系统状态能在有限时间内收敛到平衡点。

证明: 1) 证明系统状态可以在有限时间内到达终端滑动模面。选取如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) + \frac{1}{2} \eta^{-1} \hat{\rho}^2 + \frac{1}{2} \hat{\delta}^2. \quad (24)$$

其中: $\hat{\rho} = \rho - \hat{\rho}, \hat{\delta} = \kappa - \hat{\delta}^{-1}$, 参数 κ 满足式(28)。对

$V(t)$ 关于时间 t 求导, 并利用式(13), 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & s(x_2 + \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} (a_0 + b_0(\chi u + e))) + \\ & \eta^{-1} \hat{\rho} \dot{\hat{\rho}} + \hat{\delta} \dot{\hat{\delta}} \leq |s| |x_2| + \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} |s| (|a_0| + \\ & |b_0| |e|) + \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} s b_0 \chi u + \eta^{-1} \hat{\rho} \dot{\hat{\rho}} + \hat{\delta} \dot{\hat{\delta}}. \end{aligned} \quad (25)$$

由式(8)和式(18)可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & (|x_2| + \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} (|a_0| + |b_0| \hat{\rho})) |s| + \\ & \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} s b_0 \chi u + \hat{\delta} \dot{\hat{\delta}}. \end{aligned} \quad (26)$$

将式(17)代入式(26)的右端, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & (|x_2| + \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} (|a_0| + |b_0| \hat{\rho})) |s| - \\ & \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} \chi (\tau s^2 + \sigma |s|^{\alpha+1}) - \varepsilon \hat{\delta} \chi (|x_2| + \\ & \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} (|a_0| + |b_0| \hat{\rho})) |s| + \hat{\delta} \dot{\hat{\delta}}. \end{aligned} \quad (27)$$

因为 $0 < \chi(u(t)) \in R \leq 1$, 所以存在参数 κ 满足:

$$0 < \kappa \leq \chi(u(t)) \leq 1. \quad (28)$$

由 $\hat{\delta} = \kappa - \hat{\delta}^{-1}$, 可以得到 $\dot{\hat{\delta}} = \hat{\delta}^{-2} \dot{\hat{\delta}}, \kappa \hat{\delta} - \hat{\delta} \dot{\hat{\delta}} = 1$, 并将式(19)和式(28)代入式(27), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -\beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} \delta (\tau s^2 + \sigma |s|^{\alpha+1}) - (\varepsilon - 1) (|x_2| + \\ & \beta \gamma |x_2|^{\gamma-1} (|a_0| + |b_0| \hat{\rho})) |s|. \end{aligned} \quad (29)$$

当参数 $\varepsilon > 1$ 时, $\dot{V}(t) < 0$ 。因此, 系统状态能在有限时间内到达终端滑动模面上, 该到达时间由趋近律式(15)保证。

2) 证明系统状态在有限时间内沿终端滑动模面收敛到原点。定义 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \frac{1}{2} x_1^2(t). \quad (30)$$

由终端滑动模面 $s(t) = 0$, 可得

$$\dot{x}_1 = -\beta' |x_1|^{\gamma'} \text{sign}(x_1). \quad (31)$$

其中: $\beta' = \beta^{-1/\gamma} > 0; \frac{1}{2} < \gamma' = \frac{1}{\gamma} < 1$ 。 $V(t)$ 沿终端

滑动模面对时间 t 求导, 并利用式(31), 可得

$$\dot{V}(t) = x_1(t) \dot{x}_1(t) = -\beta' |x_1|^{\gamma'+1} = -\alpha V^\eta. \quad (32)$$

其中: $\alpha = 2^{\frac{\gamma'+1}{2}} \beta' > 0; 0 < \eta = \frac{\gamma'+1}{2} < 1$ 。由引理 1

知, 当 $t \geq t_{t_1}$ 时, $V(t) = 0$, 且系统状态终端滑动模面到达平衡点的时间 t_{t_1} 为

$$t_{t_1} = \frac{V^{1-\eta}(0)}{\alpha(1-\eta)} = \frac{|x_1(0)|^{1-\gamma'}}{\beta'(1-\gamma')}. \quad (33)$$

其中 $x_1(0)$ 为 $x_1(t)$ 的初始值。

由式(1)和式(2)可知, 系统状态能在有限时间内收敛到平衡点, 收敛到平衡点的有限时间为

$$t_r = t_{t_0} + t_{t_1}. \quad (34)$$

3 仿真研究

采用网络仿真器 NS2 对如图 1 所示的网络

进行了仿真. 瓶颈链路位于路由器 R_1 和 R_2 之间, 链路容量 10 Mb/s, 时延 20 ms; TCP 源端 S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 和 TCP 接收端 D_i 均采用持久性 FTP 业务源; TCP 连接 N 为 100; TCP 源端和路由器 R_1 之间的链路容量为 10 Mb/s, 时延 40 ms; 路由器 R_2 和 TCP 接收端之间的链路容量为 10 Mb/s, 时延 40 ms; 为了便于性能分析, 瓶颈链路的队列分别采用本文提出的自适应终端滑模控制 (ATSM) 算法、PI 算法^[1]和滑模控制 (SMC) 算法^[7]进行控制; 所有结点的缓冲区大小为 300 包, 路由器 R_1 的期望队列长度为 100 packets. 终端滑动模面的参数为 $\beta = 0.1, \gamma = 1.1$; 终端滑模趋近律的参数为 $\tau = 30, \sigma = 30, \alpha = 0.9$; 自适应因子分别为 $\varepsilon = 3, \eta = 1$; 自适应估计的初始值分别为 $\hat{\rho}(0) = 1, \hat{\delta}(0) = 0.001$.

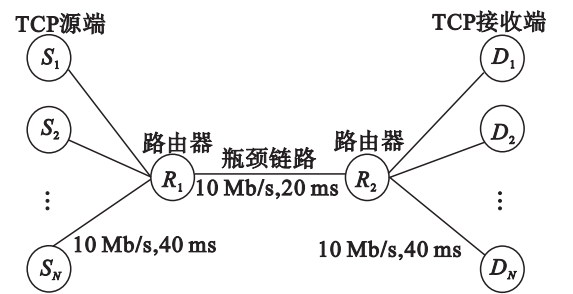


图 1 网络拓扑结构
Fig. 1 Network topology structure

首先, 研究 TCP 连接固定时 AQM 算法的性能. 如图 2 所示, 在仿真开始时, 由于系统处于慢启动阶段, 瞬时队列长度发生了剧烈的震荡. PI 控制器需要较长的时间才能收敛到期望值, ATSM 控制器同 SMC 控制器相比能较快地收敛到期望值附近.

其次, 研究 TCP 连接变化时 AQM 算法的鲁棒性. 150 个 TCP 连接在 $t = 0$ 时发送数据, 其中 50 个 TCP 连接在 $t = 20$ 时停止发送数据, 在 $t =$

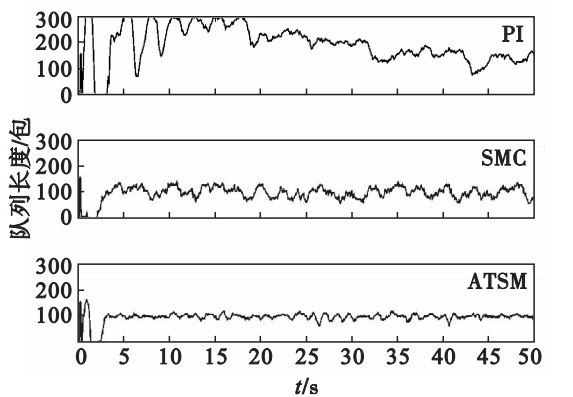


图 2 TCP 连接固定时的队列长度

Fig. 2 The queue length for constant TCP sessions

40 时重新开始发送数据. 如图 3 所示, 在 PI 控制器的作用下, 瞬时队列长度不能较好地收敛到期望值; SMC 控制器在时, 由于 TCP 连接的增大使得瞬时队列不能较好地到达期望值附近. ATSM 控制器不仅能够使瞬时队列长度快速地稳定到期望值附近, 而且队列变化平缓.

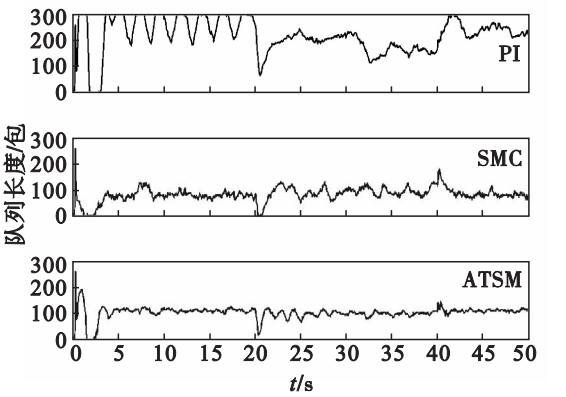


图 3 TCP 连接变化时的队列长度

Fig. 3 The queue length for dynamic TCP sessions

最后, 研究网络中具有无响应 UDP 流干扰时 AQM 算法的鲁棒性. 网络中除了具有 100 个 TCP 连接之外, 还有 1 个带宽为 4 Mb/s 在 $0 \leq t \leq 20$ 传送数据的 UDP 流. 如图 4 所示, PI 控制器受到 UDP 流干扰的影响较大. ATSM 同 SMC 相比, 具有较好的暂态性能和稳态性能.

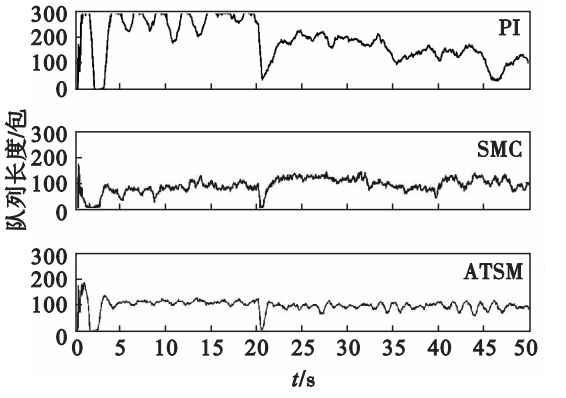


图 4 具有无响应 UDP 流干扰时的队列长度

Fig. 4 The queue length with unresponsive UDP flows

4 结 论

针对 TCP 网络存在输入受限、网络参数不确定以及 UDP 流干扰的有限时间拥塞控制问题, 提出了一种基于自适应终端滑模控制的 AQM 算法. 给出了一个自适应律对总不确定的界进行了估计, 使得 AQM 算法易于实现; 考虑到控制输入

(下转第 769 页)