

主动队列管理的约束 H_∞ 状态反馈控制方法

王 萍, 于鸿昶, 刘奇芳, 陈 虹[†]

(吉林大学 控制科学与工程系, 吉林 长春 130025)

摘要: 考虑Internet网络的时滞、物理量变化复杂、物理约束等因素, 将主动队列管理问题(AQM)描述为约束系统的干扰抑制问题, 运用约束 H_∞ 控制理论设计AQM鲁棒控制器. 首先将时变且不可准确测量的可用链路容量建模为已知名义常值加上未知时变干扰; 同时考虑网络中存在的物理约束, 利用双椭圆域方法将时域硬约束转化为一组LMI约束; 最后通过求解LMI约束的优化问题得到状态反馈增益, 解决网络拥塞控制系统的干扰抑制问题. 同时与随机早期检测(RED)和PI算法的仿真结果比较显示, 约束 H_∞ 状态反馈控制器降低了链路容量的不确定性对系统动态特性的影响, 提高了AQM算法的鲁棒性.

关键词: 主动队列管理; 时域硬约束; H_∞ 控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

State-feedback constrained H-infinity control for active queue management

WANG Ping, YU Hong-chang, LIU Qi-fang, CHEN Hong[†]

(Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China)

Abstract: We propose a robust active queue management (AQM) algorithm based on constrained H-infinity control for the Internet system with time-delay, complex variations and physical constraints. Firstly, the available link bandwidth is modeled as a nominal constant value, which is known to the link, plus a time-variant disturbance, which is unknown. Furthermore, the double-ellipsoid method is used to translate time-domain hard constraints into LMI conditions. Then, the problem of AQM algorithm can be converted into the disturbance attenuation problem of constrained systems, and the controller is designed using constrained H-infinity control theory. By solving an optimization problem with a set of linear matrix inequalities, we obtain the state feedback gain. The results show that the proposed approach is robust against the disturbance caused by the link capacity. The transient response and tracking capability of the proposed approach are superior to that of the RED and PI controller. The effectiveness of the proposed approach is validated via simulations in MATLAB and NS2 (network simulator, version 2).

Key words: active queue management; time-domain hard constraints; H-infinity control

1 引言(Introduction)

主动队列管理^[1](active queue management, AQM)技术是一种路由器拥塞控制算法, 能在拥塞发生之前对TCP源端的发送量进行控制, 在保证较高吞吐量的同时, 有效地控制缓存队列的长度. 基于路由器的拥塞控制与TCP端到端的拥塞控制相结合, 是目前解决Internet拥塞控制问题的一个主要途径. 1998年关于“Internet中的队列管理和避免拥塞的建议”的请求注解(request for comments, RFC)报告[RFC2309]中强烈建议在路由器队列管理算法中使用AQM策略, 并推荐随机早期检测(random early detection, RED)^[1]为候选算法. 但RED性能敏感于网络参数, 在一定的网络

负载下依然会导致多个TCP同步, RED的公平性和稳定性也存在问题.

由于TCP/AQM流动态模型的建立^[2], 应用控制理论设计AQM算法中的控制器或补偿器成为拥塞控制研究的趋势. 经典控制理论中的PI/PID控制最早用于设计AQM算法^[3]. 但随着主动队列管理需求的不断提高, 基于先进控制理论设计AQM算法成为目前的研究热点. 例如滑模控制^[4]、模糊控制^[5]、鲁棒控制^[6]等已经用于设计AQM算法.

网络是一个存在实际约束的物理系统, 例如路由器缓冲区的存储容量、链路容量、丢包率等. 尽管这些物理量的最大值和最小值由具体的网络决定, 并且

设计得到的参数在这个范围内才有实际的意义. 但很少有AQM方法在设计过程中考虑这些约束.

另外, 网络参数存在严重的不确定性, 例如可用链路容量是时变且不可准确测量的网络参数. 这些不确定性和干扰将严重影响AQM方法的性能. 因此, 研究鲁棒AQM控制器有更强的实用价值^[7-8]. 文献[9]将所有可用的链路容量建模为系统干扰, 文献[10]将可用的链路容量建模为已知名义常值加上未知时变干扰, 从而设计运用 H_∞ 方法设计AQM鲁棒控制器. 但是以上的研究都没有考虑网络中存在的约束.

本文同时考虑网络参数存在严重的不确定性和网络中存在的约束, 在提高系统性能和满足约束要求这两个目标之间进行折中, 将主动队列管理方法描述为约束系统的干扰抑制问题, 从而运用约束 H_∞ 控制理论设计AQM鲁棒控制器, 解决网络拥塞控制系统的干扰抑制问题, 控制目的就是利用有限的控制量在系统干扰保持在有限范围内的情况下使系统的性能尽可能的好.

2 TCP/AQM控制流模型(TCP/AQM control flow model)

AQM作用下动态TCP流量控制的非线性模型^[3]

$$\begin{cases} \frac{dw(t)}{dt} = \frac{w(t-R_0)}{w(t)R(t-R_0)}(1-p(t-R_0)) - \frac{w(t)w(t-R_0)}{2R(t-R_0)}p(t-R_0), \\ \frac{dq(t)}{dt} = -C(t) + n\frac{w(t)}{R(t)}, \end{cases} \quad (1)$$

其中各参数的含义为: w 为TCP窗口大小(单位为包), C 为链路容量, n 为激活的TCP会话数, p 为分组丢弃概率, 即系统的控制量, q 为队列长度, $R=q(t)/C(t)+T_p$ 为往返时延, R_0 为平衡状态下的往返时延, T_p 为固定的传播时延.

另外, 队列长度、发送窗口和丢包率都是正定有界的物理量, 即 $q \in [0, q_{\max}]$, $w \in [0, w_{\max}]$ 和 $p \in [0, 1]$, 其中 q_{\max} 和 w_{\max} 分别表示缓冲区最大容量和最大发送窗口, 而丢包率在 $[0, 1]$ 之间. 在实际网络中, 可用的链路容量是时变而且很难测到的, 因此本文假设链路容量的名义值 C_0 是已知的, 而 $\delta C(t) = C(t) - C_0$ 是未知的, 并视为干扰^[10].

对于TCP拥塞控制系统(1), 取 (w, q) 为状态, p 为输入, q 为输出, 假设激活的TCP会话数为常值, 给出固定的网络参数 (n, C_0, T_p) , 则系统(1)的平衡点定义为 (w_0, q_0, p_0) , 可以通过求解 $\dot{w} = 0$ 和 $\dot{q} = 0$ 得到, 即

$$R_0 = \frac{q_0}{C_0} + T_p, \quad w_0 = \frac{R_0 C_0}{n}, \quad p_0 = \frac{2n^2}{2n^2 + C_0^2 R_0^2}.$$

设 $\delta q = q - q_0$, $\delta p = p - p_0$, $\delta w = w - w_0$, $\delta C =$

$C - C_0$.

忽略时滞 $t - R(t)$ 与队列长度的依赖关系, 模型(1)在平衡点 (w_0, q_0) 附近的泰勒线性化方程的状态空间描述为

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{w}(t) \\ \delta \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2C_0 n}{2n^2 + C_0^2 R_0^2} & 0 \\ \frac{n}{R_0} & -\frac{1}{R_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta w(t) \\ \delta q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2n^2 + R_0^2 C_0^2}{2n^2 R_0} \\ 0 \end{bmatrix} \delta p(t - R_0) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_p}{R_0} \end{bmatrix} \delta C(t). \quad (2)$$

由于模型(2)存在输入时滞, 这里将时滞近似为 $e^{-R_0 s} \approx \frac{1}{1 + R_0 s}$, 则模型(2)近似为

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{w}(t) \\ \delta \dot{w}(t) \\ \delta \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{a}{R_0} & \frac{aR_0 - 1}{R_0} & 0 \\ \frac{n}{R_0} & 0 & -\frac{1}{R_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta w(t) \\ \delta \dot{w}(t) \\ \delta q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{b}{R_0} \\ 0 \end{bmatrix} \delta p(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{T_p}{R_0} \end{bmatrix} \delta C(t), \quad (3)$$

其中: $a = \frac{-2C_0 n}{2n^2 + C_0^2 R_0^2}$, $b = -\frac{2n^2 + R_0^2 C_0^2}{2n^2 R_0}$.

根据上述的线性模型, 定义状态 x 的分量 $x_1 = \frac{\delta w}{D_w}$, $x_2 = \frac{\delta \dot{w}}{D_w}$, $x_3 = \frac{\delta q}{D_q}$; 控制输入 $u = \frac{\delta p}{D_p}$; 系统干扰 $v = \frac{\delta C}{\varepsilon C_0}$; 系统性能输出 $z_1 = x_3$, 约束输出 $z_2 = [x_1 \ x_3 \ u]^T$ (常数 D_w, D_q, D_p 分别表示 w_0, q_0, p_0 在各自的区间内到两端最远的距离; ε 表示干扰 δC 在名义值 C_0 上下变化的最大百分比). 通过归一化, 将方程(3)描述为下列归一化状态空间方程:

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}_v v(t) + \bar{B}_u u(t), \quad (4a)$$

$$z_1(t) = \bar{C}_1 x(t), \quad (4b)$$

$$z_2(t) = \bar{C}_2 x(t) + \bar{D}_{2u} u(t), \quad (4c)$$

其中:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{a}{R_0} & \frac{aR_0 - 1}{R_0} & 0 \\ \frac{nD_w}{R_0 D_q} & 0 & -\frac{1}{R_0} \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\varepsilon T_p C_0}{R_0 D_q} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_u = \begin{bmatrix} 0 \\ bD_p \\ R_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T, \bar{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{D}_{2u} = [0 \ 0 \ 1]^T.$$

考虑系统状态的物理约束, 并将离散化的采样时间取为 T_s , 通过离散化, 可将式(4)描述为线性带约束系统

$$x(k+1) = Ax(k) + B_v v(k) + B_u u(k), \quad (5a)$$

$$z_1(k) = C_1 x(k), \quad (5b)$$

$$z_2(k) = C_2 x(k) + D_{2u} u(k), \quad (5c)$$

其时域约束为

$$|z_{2i}(k)| \leq z_{2i, \max}, \quad i = 1, 2, 3, \quad k \geq 0. \quad (6)$$

系统(5)中:

$$A = e^{AT_s}, \quad B_v = \int_0^{T_s} e^{As} \bar{B}_v ds, \quad B_u = \int_0^{T_s} e^{As} \bar{B}_u ds,$$

$$C_1 = \bar{C}_1, \quad C_2 = \bar{C}_2, \quad D_{2u} = \bar{D}_{2u}.$$

3 约束系统的H_∞状态反馈控制(State-feedback constraint H_∞ control)

设状态反馈增益为 K , 则 $u = Kx$, 系统(5)对应的闭环系统为

$$x(k+1) = A_{cl} x(k) + B_{cl} v(k), \quad (7a)$$

$$z_1(k) = C_{cl,1} x(k), \quad (7b)$$

$$z_2(k) = C_{cl,2} x(k), \quad (7c)$$

其中: $A_{cl} = A + B_u K$, $B_{cl} = B_v$, $C_{cl,1} = C_1$, $C_{cl,2} = C_2 + D_{2u} K$.

令 $G(z)$ 表示从干扰输入 v 到输出 z_1 的闭环传递函数矩阵, 同时定义从干扰输入 v 到输出 z_1 的H_∞范数如下:

$$\|G\| = \sup_{v \in l_2} \frac{\|z_1\|_2}{\|v\|_2},$$

其中 $v \in l_2$ 表示 v 是能量有界信号, 即

$$\|v\|_2 = \left(\sum_{k=0}^{\infty} \|v(k)\|^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

首先考虑网络拥塞控制的需求, 借鉴文献[10]中的结论, 设计控制器增益 K , 使得闭环系统(7)内部稳定, 对某一类干扰输入 $v(k)$, 系统的性能输出 $z_1(k)$ 总能保持是“小”的. 进一步通过双椭圆方法描述系统的时域硬约束(6). 最后, 将主动队列管理问题描述为约束系统的干扰抑制问题, 在LMI优化的框架下进行处理.

考虑状态反馈的情况, 本文先给出如下的结论:

定理 1 如果存在矩阵 $Q = Q^T > 0$, Y , 使得半定规划问题

$$\min_{\gamma, Q, Y} \gamma^2 \text{ 满足不等式} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ 0 & \gamma I & * & * \\ AQ + B_u Y & B_v & Q & * \\ C_1 Q & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} > 0 \quad (9)$$

有最优解 (γ_*, Q_*, Y_*) , 则状态反馈控制器 $K = Y_* Q_*^{-1}$ 使得闭环系统从外部干扰输入 v 到性能输出 z_1 的H_∞性能小于等于 γ .

证 考虑Lyapunov函数 $V(x) = x^T P x$, 其中 $P = P^T > 0$, 如果耗散不等式

$$V(x(k+1)) - V(x(k)) + \gamma^{-1} z_1^T(k) z_1(k) - \gamma v^T(k) v(k) \leq 0 \quad (10)$$

得到满足^[11], 那么闭环系统(7)的H_∞性能不大于 γ .

将状态反馈控制 $u = Kx$ 作用的闭环系统(7)代入式(10)中, 可得

$$\begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F & A_{cl}^T P B_{cl} \\ B_{cl}^T P A_{cl} & B_{cl}^T P B_{cl} - \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \leq 0, \quad (11)$$

其中 $F = A_{cl}^T P A_{cl} - P + \gamma^{-1} C_{1cl}^T C_{1cl}$. 那么, 条件(11)可进一步简化为

$$\begin{bmatrix} A_{cl}^T P A_{cl} - P + \gamma^{-1} C_{1cl}^T C_{1cl} & A_{cl}^T P B_{cl} \\ B_{cl}^T P A_{cl} & B_{cl}^T P B_{cl} - \gamma \end{bmatrix} \leq 0. \quad (12)$$

根据Schur公式, 不等式(12)等价于

$$\begin{bmatrix} P & * & * & * \\ 0 & \gamma I & * & * \\ P(A + B_u K) & P B_v & P & 0 \\ C_1 & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0. \quad (13)$$

如果存在 $P > 0$ 和 K 满足式(13), 那么, 耗散不等式(10)得到满足. 将 $Q = P^{-1}$ 和 $Y = KQ$ 代入式(13), 且用 $\text{diag}\{Q, I, Q, I\}$ 左乘和右乘式(13), 可得式(9).

证毕.

下面考虑系统中存在的约束. 本文用椭圆域来得到满足时域硬约束的充分条件. 图1给出了双椭圆域的简单描述, 它是指找到初始状态所在的一个椭圆域, 再找到在能量小于某个界的干扰作用下, 能够包括系统轨迹所有可达集的另一个椭圆域. 通常来说, 这个椭圆域的缩放意味着闭环系统性能的提高或降低, 椭圆域越小, 系统性能就越高, 因此, 应尽可能寻找到最小的椭圆域.

假设干扰的能量满足 $\sum_{i=0}^{\infty} \|v(i)\|^2 \leq \beta$, 那么对于所有的 $k \geq 0$, 式(10)可变为

$$V(x(k)) + \gamma^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} \|z_1(i)\|^2 \leq V(x(0)) + \gamma \beta. \quad (14)$$

对于满足 $\gamma\beta + V(x(0)) \leq \alpha$ 的任意给定 $x(0)$, 式(14)表明, 起始于 $x(0)$ 的状态轨迹保持在由 $\alpha := \gamma\beta + V(x(0))$ 定义的椭圆域

$$\Omega_2(P, \alpha) := \{x \in \mathbb{R}^n | V(x) \leq \alpha, \alpha := \gamma\beta + V(x(0))\} \quad (15)$$

内. 这意味着椭圆域 $\Omega_2(P, \alpha)$ 包含了全部状态的可达集.

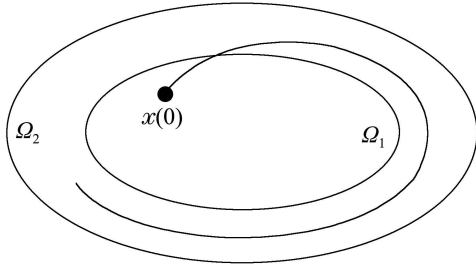


图1 双椭圆域描述

Fig. 1 Double-ellipse description

引理 1 假设

- 存在 (γ, Q, Y) 满足优化问题(8);
- 外部干扰输入信号能量有界, 且满足

$$\sum_{i=0}^{\infty} \|v(i)\|^2 \leq \beta;$$

- 系统初始状态 x_0 属于一个由 P, α 定义的椭圆域(其中 $P = Q^{-1}$), 即

$$\Omega_1(P, \alpha, \beta) := \{x \in \mathbb{R}^n | \gamma\beta + V(x) \leq \alpha\}, \quad (16)$$

则控制器 $u(k) = YQ^{-1}x(k)$ 使闭环系统状态轨迹保持在另一个由 P 和 α 定义的椭圆域(15)内, 且系统的输出能量有界.

基于上述描述的双椭圆域, 讨论有约束(6)时的情况.

定理 2 如果系统状态 $x(t) \in \Omega_2(P, \alpha)$ 且存在 $Q = P^{-1}, Q = Q^T > 0$ 和 Y 满足矩阵不等式

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\begin{array}{cc} \frac{z_{2i, \max}^2}{\alpha} & e_i^T (C_2 Q + D_{2u} Y) \\ (C_2 Q + D_{2u} Y)^T e_i & Q \end{array} \right) \geq 0, \\ & i = 1, 2, 3, \end{aligned} \right. \quad (17)$$

则状态反馈控制器 $K = YQ^{-1}$ 使得闭环系统(7)满足系统约束(6).

证 根据 $x(k) \in \Omega_2(P, \alpha)$ 和 $u(k) = YQ^{-1}x(k)$, 可以利用 Cauchy-Schwarz 不等式推导下列关系^[12-13]:

$$\begin{aligned} \max_{k \geq 0} |z_{2i}(k)|^2 &= \max_{k \geq 0} |e_i^T (C_2 + D_{2u} Y Q^{-1}) x(k)|^2 \leq \\ & \max_{x \in \Omega_2} |e_i^T (C_2 + D_{2u} Y Q^{-1}) x|^2 \leq \\ & \alpha \|e_i^T ((C_2 + D_{2u} Y) Q^{-\frac{1}{2}})\|_2^2, \quad (18) \end{aligned}$$

其中 e_i 为引入的约束输出空间 \mathbb{R}^3 上的第 i 个标准向量

基. 由 Schur 补性质, 上式等价于式(17).

因此, 如果系统状态 $x(k) \in \Omega_2(P, \alpha)$, 且存在 $Q = Q^T > 0$ 和 Y 满足矩阵不等式(17), 则闭环系统(7)满足系统约束(6). 证毕.

定理 3 给定 $\alpha = \alpha_0$, 假设 LMI 优化问题

$$\begin{aligned} & \min_{\gamma, Q=Q^T, Y} \gamma \text{ 满足下列不等式:} \\ & \left(\begin{array}{cccc} Q & 0 & * & * \\ 0 & \gamma I & * & * \\ A Q + B_u Y & B_1 & Q & 0 \\ C_1 Q & 0 & 0 & \gamma I \end{array} \right) > 0, \quad (19a) \\ & \left(\begin{array}{cc} \frac{z_{2i, \max}^2}{\alpha} & e_i^T (C_2 Q + D_{2u} Y) \\ * & Q \end{array} \right) \geq 0, \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (19b)$$

而且(几乎)存在优化解 (γ_*, Q_*, Y_*) , 同时干扰的能量满足

$$\sum_{i=0}^{\infty} \|v(i)\|^2 \leq \beta, \quad \beta \leq \frac{\alpha_0 - x^T(0) P_* x(0)}{\gamma_*}, \quad P_* = Q_*^{-1}.$$

那么, 反馈控制为 $u = K_* x$ 而且增益为 $K_* = Y_* P_*$ 的被控系统(5)有下列结论:

- 该系统是渐近稳定的;
- 时域约束(6)可以得到满足;
- 干扰 v 到性能输出 z_1 的传递矩阵的 H_∞ 范数不大于 γ_* .

4 仿真分析(Simulation analysis)

考虑网络模型(1), 模型参数为: $n = 120, C_0 = 3750 \text{ packets/s}, T_p = 0.05 \text{ s}, q_{\max} = 600 \text{ packets}, w_{\max} = 20, C$ 在名义值 C_0 上下变化的最大百分比 $\varepsilon = 6.4\%$, 采样时间为 $T_s = 0.15 \text{ s}$. 控制目标是在稳态 $q_0 = 300 \text{ packets}$ 附近, 将外部干扰 $\delta C(t)$ 到性能输出 $q(t)$ 的 H_∞ 范数最小.

系统(1)的平衡点为

$$q_0 = 300, w_0 = 4.0625, p_0 = 0.1081, R_0 = 0.13,$$

在该平衡点进行线性化, 得到系统(5)具体参数为

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} 0.7392 & 0.0682 & 0 \\ -1.7715 & -0.0156 & 0 \\ 4.3123 & 0.2868 & 0.2147 \end{pmatrix}, \\ B_v &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.0393 \end{pmatrix}, B_u = \begin{pmatrix} -5.4957 \\ -43.7970 \\ -14.6205 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

选择定理3中 $\alpha = 5.5$, 初始状态为 $(0.2051, 0, 0.5)$, 求解优化问题(19)得到 $Y_* = [0.0003 \ 0.0640 \ -0.0001]$,

$$Q_* = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0015 & -0.0003 \\ 0.0015 & 3.2274 & -0.0301 \\ -0.0003 & -0.0301 & 0.0020 \end{bmatrix}, \text{ 控制器增益}$$

$K_* = [1.5483 \ 0.0242 \ 0.5508]$, 优化性能指标 $\gamma_* = 0.0851$.

4.1 MATLAB 仿真分析(MATLAB simulation analysis)

为了进行控制效果的对比, 采用文献[2]中的RED算法作为对比算法. RED算法采用当前广泛使用的参数配置方案^[14]: $w_q = 0.002$, $p_{max} = 0.01$, $T_{min} = 120 \text{ packets}$, $T_{max} = 360 \text{ packets}$, $B = 600 \text{ packets}$.

干扰如图2所示. 图3-5中实线是该算法的MATLAB仿真结果, 虚线是RED算法的控制效果.

可以看出, 当网络中的队列长度, TCP窗口等初始状态远离平衡点时, 约束H_∞状态反馈控制方法能将其快速收敛到平衡点附近, 而RED算法无法使队列长度稳定在期望值附近, 同时约束H_∞状态反馈控制方法的超调明显小于RED算法. 但是约束H_∞状态反馈控制方法存在一定的网络振荡.

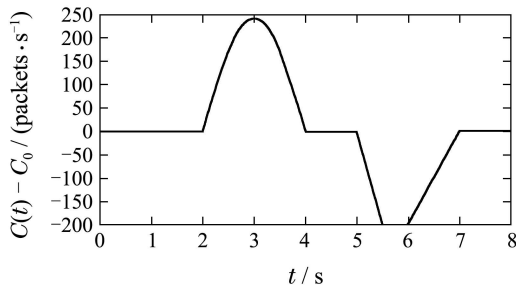


图 2 系统干扰

Fig. 2 System disturbances

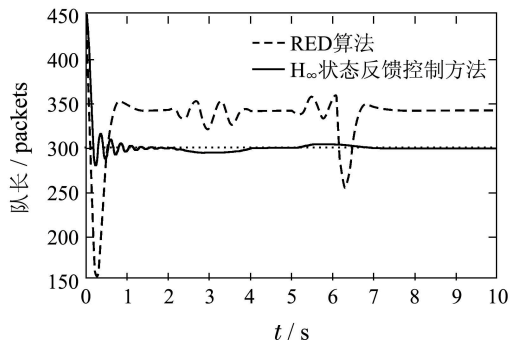


图 3 缓冲区队列长度对比

Fig. 3 Buffer queue length comparison

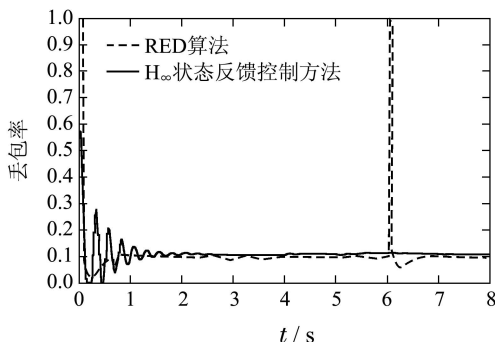


图 4 分组丢失率对比

Fig. 4 The drop probability comparison

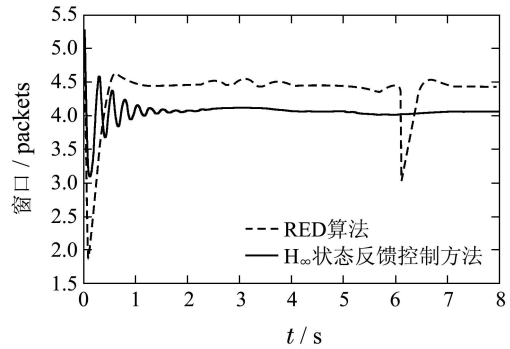


图 5 TCP窗口对比

Fig. 5 TCP window comparison

当系统受到图2所示的干扰时, 约束H_∞状态反馈控制方法很好的抑制了干扰对队列长度以及TCP窗口的影响, 保证了队列长度很好地稳定在期望值附近. 而RED算法的抗干扰能力则明显劣于约束H_∞状态反馈控制方法, 在干扰出现时, 队列长度出现明显的振荡, 丢包率也出现较大的波动, 甚至接近1, 这意味着数据的完全丢失.

4.2 NS2仿真分析(NS2 simulation analysis)

由于本文设计的是状态反馈控制器, 在进行NS2仿真时, 系统(5)的状态无法全部测量, 这里本文将干扰视为白噪声, 采用卡尔曼滤波方法设计一个简单的状态估计器, 将卡尔曼滤波的C++程序嵌入到NS2底层, 重新调试后进行仿真实验. 在如图6所示的哑铃结构中, 网络参数和控制参数与4.1节中相同, 数据包分组大小为500 byte, TCP连接的发送数据窗口大小为30 packets, 缓冲区的最大队列长度为600 packets. 设计非响应流和TCP流同时经过图6所示的网络拓扑的中间节点, 非响应流对链路容量的影响作为干扰, 加入遵循UDP传输协议的20个传输固定码率(constants bit rate, CBR)流的连接, 传输时间为10 ~ 30 s.

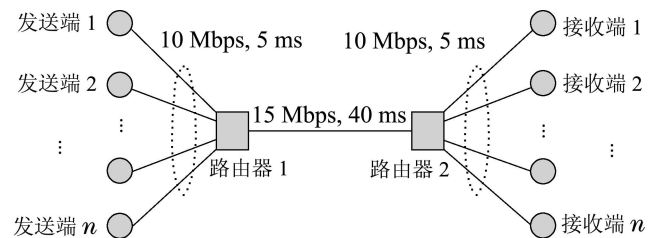


图 6 单瓶颈网络系统的仿真拓扑

Fig. 6 The single bottleneck topology

采用RED和PI算法作为对比算法. RED算法的参数在4.1节中已经给出, PI算法中 $a = 1.369 \times 10^{-5}$, $b = 1.356 \times 10^{-5}$ ^[15]. 仿真结果见图7-12.

根据NS2的仿真结果可以看出, 在干扰出现时, 3种AQM算法的丢包率都明显增加, 以此来保证缓冲区的队列长度接近期望值. 但是队列长度的变化则有明显的区别, 在干扰存在的整个区间, RED和PI算法的

队列长度都出现明显的震荡,而约束 H_∞ 算法则只是在干扰出现和消失时造成了队列的短时间震荡,然后很快回到期望值附近,表现出了明显的鲁棒性.

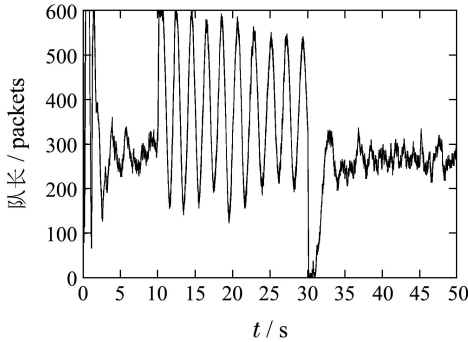


图7 单瓶颈混合流场景下RED算法的队列长度

Fig. 7 The queue length of RED under mixture flows

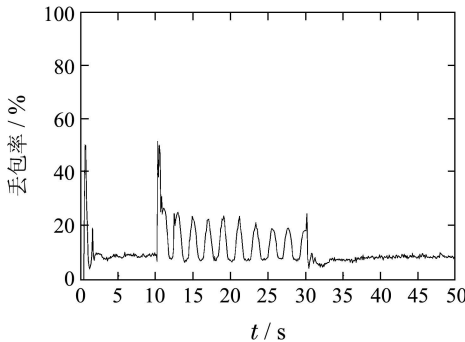


图8 单瓶颈混合流场景下RED算法的丢包率

Fig. 8 The drop probability of RED under mixture flows

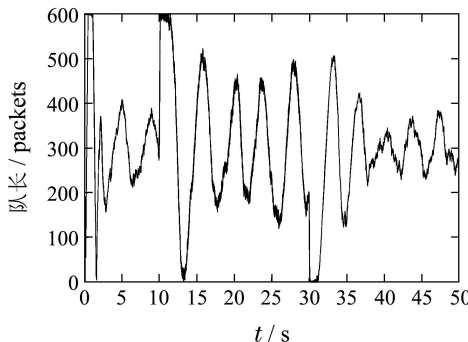


图9 单瓶颈混合流场景下PI算法的队列长度

Fig. 9 The queue length of PI under mixture flows

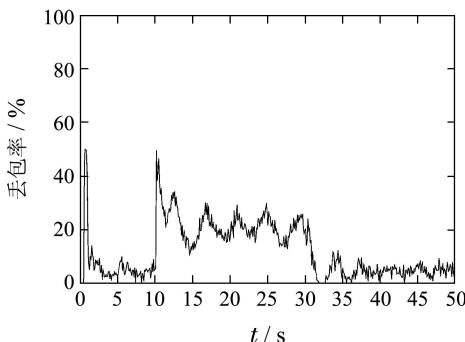


图10 单瓶颈混合流场景下PI算法的丢包率

Fig. 10 The drop probability of PI under mixture flows

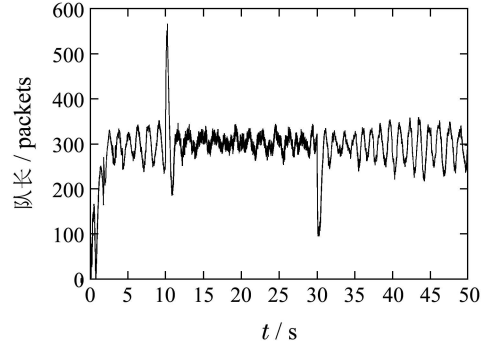


图11 单瓶颈混合流场景下约束 H_∞ 算法的队列长度

Fig. 11 The queue length of constrained H_∞ algorithm under mixture flows

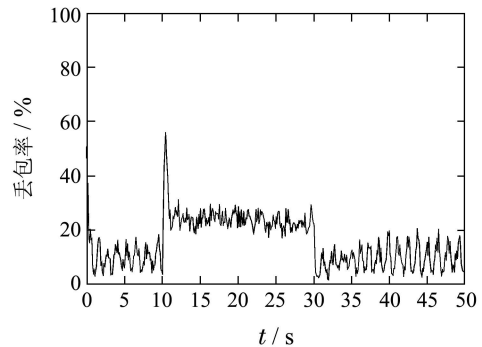


图12 单瓶颈混合流场景下约束 H_∞ 算法的丢包率

Fig. 12 The drop probability of constrained H_∞ algorithm under mixture flows

5 结论(Conclusions)

本文针对网络时滞,时变且不可准确测量的可用链路容量等对AQM算法的不利影响,基于约束 H_∞ 状态反馈控制理论,提出了一种新的主动队列管理算法. 将其建模为已知名义常值加上未知时变干扰,同时基于双椭圆域方法考虑网络中存在的约束,将主动队列管理方法转化为约束系统的干扰抑制问题,并推导得到基于LMI方法的优化问题描述.

仿真表明约束 H_∞ 状态反馈控制算法使瞬时队列保持稳定,且较快速地到达期望值,提高了网络系统的干扰抑制能力,降低了链路容量的不确定性对系统动态特性的影响.

参考文献(References):

- [1] BRADEN B, CLARK D, CROWCROFT J, et al. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [EB/OL]. 1998. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2309>.
- [2] MISRA V, GONG W, TOWSLEY D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED [C] // *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*. New York: ACM, 2000: 151 – 160.
- [3] KIM K. Design of feedback controls supporting TCP based on the state-space approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(7): 1086 – 1098.

- [4] WANG H, MENG B, JING Y. An adaptive fuzzy sliding mode control for AQM systems [C] // *American Control Conference*. USA: IEEE, 2008: 4445 – 4450.
- [5] SUN J S, LI B. State feedback control AQM algorithm based on T-S fuzzy model [C] // *2011 Chinese Control and Decision Conference*. China: IEEE, 2011: 3663 – 3667.
- [6] MANFREDI S, BERNARDO M, CAROFALO F. Reduction-based robust active queue management control [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(2): 177 – 186.
- [7] CHAVAN K, KUMAR R G, BELUR M N, et al. Robust active queue management for wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(6): 1630 – 1638.
- [8] 周川, 何俊伟, 陈庆伟. 不确定TCP流模型的离散 H_∞ 鲁棒主动队列管理算法 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(2): 222 – 228. (ZHOU Chuan, HE Junwei, CHEN Qingwei. Discrete-time H_∞ robust active queue management scheme for uncertain TCP flow model [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(2): 222 – 228.)
- [9] YAN J, BITMEAD J R. Incorporating state estimation into model predictive control and its application to network traffic control [J]. *Automatica*, 2005, 41(4): 595 – 604.
- [10] ZHENG F, NELSON J. An H_∞ approach to the controller design of AQM routers supporting TCP flows [J]. *Automatica*, 2009, 45(3): 757 – 763.
- [11] LIN W, BYRNES C. H_∞ control of discrete time nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(4): 494 – 510.
- [12] BOYD S, GHAOUI EI L, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [13] CHEN H, SCHERER C W. Moving horizon H_∞ control with performance adaptation for constrained linear systems [J]. *Automatica*, 2006, 42(6): 1033 – 1040.
- [14] 翟双. 网络中基于路由器的拥塞控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2002. (ZHAI Shuang. *A study of congestion control based on the router in the internet* [D]. Changchun: Jilin University, 2002.)
- [15] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(6): 945 – 959.

作者简介:

王萍 (1982-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为预测控制、通信网数据流的优化控制, E-mail: wangping12@jlu.edu.cn;

于鸿昶 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为鲁棒控制及应用, E-mail: yhc19890307@163.com;

刘奇芳 (1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为非线性控制及其应用, E-mail: liuqf_2008@126.com;

陈虹 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为预测控制、鲁棒控制及非线性控制的理论与应用, E-mail: chenh@jlu.edu.cn.