

基于降维状态观测器的最优拥塞控制研究^①

韩存武^② 刁 奇 常舒瑞 毕 松 刘 蕾 庞中华

(北方工业大学现场总线及自动化北京市重点实验室 北京 100144)

摘要 在 Internet 拥塞控制系统建模的基础上,将降维状态观测引入到拥塞控制中,进而提出了一种基于主动队列管理(AQM)的新的最优拥塞控制方法。该方法利用降维状态观测器来获取无法直接获取的系统状态,从而实现状态反馈,克服传统的基于 AQM 的网络拥塞控制方法无法直接得到状态反馈控制律的缺陷,并通过求解线性矩阵黎卡提方程,得到使性能指标达到最优的状态反馈控制律,实现 Internet 的最优拥塞控制。仿真结果表明,这种新的最优拥塞控制方法具有很好的跟踪性能。

关键词 拥塞控制, 最优控制, 黎卡提方程, 主动队列管理(AQM), 状态观测器

0 引言

随着使用 Internet 的人数的增多,数据流量越来越大,不可避免地会出现网络拥塞,而拥塞控制是克服网络拥塞,使 Internet 正常高效运行的一项重要措施,因而拥塞控制已成为热点研究之一^[1,2]。主动队列管理(active queue management, AQM)是一种有效的网络拥塞控制技术,它能够在保证较高吞吐量的基础上有效地控制队列长度,从而实现拥塞控制,保证网络的服务质量(quality-of-service, QoS)。

早期的基于 AQM 的网络拥塞控制主要基于经典控制理论,例如:随机早期检测(random early detection, RED)^[3,4], 比例-积分(PI)控制^[5], 比例-微分(PD)控制^[6], 以及比例-积分-微分(PID)控制^[7]等。由于经典控制理论本身的缺陷,控制效果并不理想,而基于现代控制理论的网络拥塞控制得到了飞速发展,出现了许多有效的网络拥塞控制方法,例如自适应网络拥塞控制^[8,9]、鲁棒网络拥塞控制^[10-13]以及预测网络拥塞控制^[14-16]等。这些方法

采用状态反馈来改善系统的控制性能。然而,因为实际网络中的窗口大小是无法直接获取的,即系统状态无法直接获取,因此无法直接得到状态反馈控制律。文献[17]提出了一种基于状态观测器的鲁棒主动队列管理算法,该算法利用状态观测器来获取系统的状态,从而实现状态反馈。该文献采用的是全维状态观测器。由于系统中只有窗口大小这一个状态变量不能直接得到,而另一个状态变量(队列长度)可以通过系统输出直接测量得到,因此只要对窗口大小这一个状态变量进行估计就可以了,即可以采用降维状态观测器。这不仅可以节约成本,减少计算量,更重要的是可以避免由于估计值和实际值之间的估计误差给系统性能带来的影响,从而提高了系统的控制精度。另外,文献[17]讨论的是连续时间系统,而计算机控制系统大都是离散时间系统。本文研究了离散时间情况下基于降维状态观测器的 Internet 网络拥塞控制问题。首先,建立了拥塞控制系统的离散时间状态空间数学模型,在此基础上提出了一种带降维状态观测器的基于主动队列管理的最优拥塞控制方法,该方法采用降维状态观测器对实际网络中无法直接获取的窗口大小

^① 国家自然科学基金(61573024, 61203230)和北京市自然科学基金(4142014, 4154068, 4152014)资助项目。

^② 男,1961 年生,博士,教授;研究方向:无线通信网络,计算机网络,网络化控制系统等;联系人,E-mail: cwhan@ncut.edu.cn
(收稿日期:2016-01-06)

进行估计,而队列长度采用系统输出测量直接获得,从而实现状态反馈。然后,给出了系统的二次型最优性能指标,并通过求解线性矩阵黎卡提方程,得到使性能指标达到最优的状态反馈控制律,实现了 Internet 的最优拥塞控制。最后,对所提算法进行了计算机仿真,仿真结果表明,所提出的最优拥塞控制方法能够取得满意的控制效果。

1 系统模型与问题描述

考虑如下的 Internet 拥塞控制系统模型

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t) \times W(t - R(t))}{2R(t - R(t))} p(t - R(t)) \\ \dot{q}(t) = N(t) \frac{W(t)}{R(t)} - c \end{cases} \quad (1)$$

其中 $W(t)$ 是窗口大小(包), $q(t)$ 是队列长度(包), $p(t)$ 是分组丢弃概率,即系统的控制量, $N(t)$ 是激活的 TCP 会话数, c 是链路容量(包/秒), $R(t)$ 是往返时延(秒),包括传输时延和队列时延。

当队列时延远小于传输时延时, $N(t) = N$, $R(t) = R$ 。由于 $p(t)$ 和队列长度成正比,即 $p(t) = Eq(t)$, 所以式(1)可写成

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t) \times W(t)}{2R(t)} Eq(t) \\ \dot{q}(t) = N(t) \frac{W(t)}{R(t)} - c \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)在平衡点 (W_0, q_0, p_0) 处线性化,得

$$\begin{cases} \Delta \dot{W}(t) = -\frac{2NE}{R_0^2c} \Delta W(t) - \frac{2E}{R_0^2c} \Delta q(t) - \frac{R_0c^2E}{2N^2} \Delta p(t) \\ \Delta \dot{q}(t) = \frac{N}{R_0} \Delta W(t) - \frac{1}{R_0} \Delta q(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\Delta W = W - W_0$, $\Delta q = q - q_0$, $\Delta p = p - p_0$, 平衡点可令 $\dot{W}(t) = 0$ 和 $\dot{q}(t) = 0$ 得到, 为 $W_0 = (R_0C)/N$ 和 $p_0 = 2/W_0^2$ 。

将式(3)写成状态空间形式,得

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $x(t) = [\Delta W(t), \Delta q(t)]^\top$ 是系统的状态,

$u(t) = \Delta p(t)$ 是系统的输入, $y(t) = \Delta q(t)$ 是系统的输出,而 A_1, B_1, C 则用下式表示:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{2NE}{R_0^2c} & -\frac{2E}{R_0^2c} \\ \frac{N}{R_0} & -\frac{1}{R_0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_0c^2E}{2N^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = [0 \ 1] \quad (7)$$

应用零阶保持器,以采样周期 kT 对式(4)进行离散化,可以得到离散时间网络拥塞控制模型为^[18]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $A = e^{A_1 T}$, $B = \int_0^T e^{A_1 t} B_1 dt$ 。

为了使系统的输出 $y(k)$ 跟踪期望输出 $y^*(k)$,由线性系统理论^[19],设 $y^*(k)$ 为如下稳定的离散时间线性定常系统的输出:

$$\begin{cases} z(k+1) = Fz(k) \\ y^*(k) = Hz(k) \end{cases} \quad (9)$$

其中,系统(式(8))为能控和能观测, C 满秩, 系统(式(9))为能观测。

引入如下的二次型性能指标:

$$J(u(k)) = \sum_0^{\infty} [(y - y^*)^\top Q (y - y^*) + u^\top S u] \quad (10)$$

其中,加权阵 Q 为半正定对称阵, S 为正定对称阵。

本文所要解决的问题是:在系统的状态无法直接得到的情况下,针对网络拥塞控制系统的数学模型(式(8))和参考输入模型(式(9)),设计一个状态观测器和基于 AQM 的状态反馈最优控制器 $u^*(k) = Kx(k)$, 使性能指标(式(10))最小。

2 最优拥塞控制算法

因为实际网络中的窗口大小是无法直接获取的,即系统的状态 $x_1(k)$ 无法直接获取,因此无法直接得到状态反馈控制律,而另一个状态(队列长度)是可以通过系统输出直接测量得到的。为此,采用

降维状态观测器对系统的状态 $x_1(k)$ 进行估计,方法如下:

首先,构造降维观测器的变换矩阵 $\{D, G\}$, 可按如下方式组成。基于 $\text{rank}C = r$, 任选一个 $M \in \Re^{(n-r) \times n}$, 使 $n \times n$ 矩阵

$$D \triangleq \begin{bmatrix} C \\ M \end{bmatrix} \quad (11)$$

为非奇异;求出矩阵 D 的逆记为 G , 再将其作分块化表示:

$$G \triangleq D^{-1} = [G_1 \quad G_2] \quad (12)$$

其中, G_1 为 $n \times r$ 阵, G_2 为 $n \times (n-r)$ 阵。

对系统引入非奇异变换 $\bar{x} = Dx$, 并将结果向量做分块表示:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 \bar{x}_1 为 r 维分状态, \bar{x}_2 为 $n-r$ 维分状态。则有

$$y = \bar{x}_2 \quad (14)$$

状态方程的形式变换为

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix} u \quad (15)$$

其中, \bar{A}_{11} 为 $r \times r$ 阵, \bar{A}_{21} 为 $(n-r) \times r$ 阵, \bar{A}_{12} 为 $r \times (n-r)$ 阵, \bar{A}_{22} 为 $(n-r) \times (n-r)$ 阵, \bar{B}_1 和 \bar{B}_2 为 $r \times p$ 和 $(n-r) \times p$ 阵。

对降维状态观测器,综合的基本思路是在利用输出 y 的基础上,再对 $n-r$ 维分状态 \bar{x}_1 构造全维状态观测器。

对给定系统, $\{A, C\}$ 为完全能观测, C 满秩, 则分状态 \bar{x}_1 的 $n-r$ 维状态观测器为

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (\bar{A}_{11} - L\bar{A}_{21})s + [(\bar{A}_{12} - L\bar{A}_{22}) \\ &\quad + (\bar{A}_{11} - L\bar{A}_{21})L]y + (\bar{B}_1 - L\bar{B}_2)u \end{aligned} \quad (16)$$

且 \bar{x}_1 的重构状态为

$$\hat{x}_1 = s + Ly \quad (17)$$

其中, $(n-r) \times r$ 阵 L 满足期望极点配置。

最后,确定系统状态 x 重构状态 \hat{x} 的关系式

$$\hat{x} = G_1 y + G_2(z + Ly) \quad (18)$$

其中 L 是状态观测器增益矩阵, $\hat{x}_1(k)$ 是 $x_1(k)$ 的估计值。则最优控制器可由 $u^*(k) = K\hat{x}(k)$ 得到。

为了求出最优控制器 $u^*(k)$, 定义

$$\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ z(k) \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} C^T Q C & -C^T Q H \\ -H^T Q C & H^T Q H \end{bmatrix}, \bar{S} = S \quad (20)$$

则

$$\bar{x}(k+1) = \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{B}u(k), \bar{x}(0) = \bar{x}_0, t \geq 0$$

$$J(u(k)) = \sum_0^\infty (\bar{x}^T \bar{Q} \bar{x} + u^T \bar{S} u) \quad (21)$$

由式(8)能控和式(9)稳定可知 (\bar{A}, \bar{B}) 为能稳,由式(8)和式(9)能观测以及 $Q \geq 0$ 可保证 Q 为半正定,而 $\bar{S} = S$ 按假定为正定。

进而,最优控制 $u^*(k)$ 为^[19]

$$u^*(k) = \bar{K}^* \hat{x}^*(k), \bar{K}^* = -\bar{S}^{-1} \bar{B}^T \bar{P} \quad (22)$$

最优轨线 $x^*(\cdot)$ 为如下闭环状态方程的解

$$\begin{aligned} \dot{x}^*(k+1) &= (\bar{A} - \bar{B}\bar{S}^{-1}\bar{B}^T\bar{P})x^*(k), \\ x^*(0) &= \bar{x}_0 \end{aligned} \quad (23)$$

最优性能值 J^* 为

$$J^* = \bar{x}_0^T \bar{P} \bar{x}_0, \quad \forall \bar{x}_0 \neq 0 \quad (24)$$

其中, \bar{P} 为如下矩阵黎卡提代数方程的唯一正定对称解阵

$$-\bar{P} + \bar{Q} + \bar{A}^T \bar{P} \bar{A} - \bar{A}^T \bar{P} \bar{B} (\bar{S} + \bar{B}^T \bar{P} \bar{B})^{-1} \bar{B}^T \bar{P} \bar{A} = 0 \quad (25)$$

以下给出用迭代法解黎卡提方程的基本思路。

给定精度 δ , 计算初试矩阵 $\bar{P}^{(0)}$

$$\bar{P}^{(0)} = \bar{Q} \quad (26)$$

利用迭代格式

$$\bar{P}^{(k)} = \bar{A}^T [(\bar{P}^{(k-1)})^{-1} + \bar{B}\bar{S}^{-1}\bar{B}^T]^{-1} \bar{A} + \bar{Q} \quad (27)$$

计算 $\bar{P}^{(k)}$, 其中 $k = 1, 2, \dots$

若

$$\|\bar{P}^{(k)} - \bar{P}^{(k-1)}\|_{\infty} = n \cdot \max_{1 \leq i, j \leq n} |P_{ij}^{(k)} - P_{ij}^{(k-1)}| < \delta \quad (28)$$

则停止迭代,取 $\bar{P} = \bar{P}^{(k)}$, 否则取 $k = k + 1$, 继续计算式(27),直至满足式(28),停止计算。

将矩阵 \bar{P} 分块

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中, $P \in \Re^{n \times n}$, $P_{12} \in \Re^{n \times m}$, $P_{22} \in \Re^{m \times m}$ 。

由最优控制理论可知,使 J 取最小的最优跟踪

控制 $u^*(k)$ 为

$$u^*(k) = K_1^*x(k) + K_2^*z(k) \quad (30)$$

其中

$$K_1^* = -S^{-1}B^TP, K_2^* = -S^{-1}B^TP_{12} \quad (31)$$

最优性能值 J^* 为

$$J^* = x_0^T Px_0 + z_0^T P_{22} z_0 + 2x_0^T P z_0 \quad (32)$$

3 仿真结果

为了验证所提出的最优拥塞控制算法的有效性和最优性,下面应用 Matlab 对所提算法进行计算机仿真。

考虑图 1 所示的具有哑铃状拓扑结构的单瓶颈链路计算机网络,两端分别为 TCP 的源端和接收端。网络的瓶颈为路由器 1 和路由器 2 之间的链路,链路带宽为 15Mbps,传输延时为 20ms。每个包的大小为 500 字节,缓冲队列长度为 200 个包。源端与路由器 1 以及路由器 2 与接收端之间的带宽为 10Mbps,传输延时也为 20ms。仿真参数取为: $N = 100$, $c = 15 \text{ Mb/s}$, $R_0 = 0.18$, 则平衡点为 $W_0 = 6.75$, $p_0 = 0.04$, $F = [0.8 \ 0; 0 \ 0.8]$, $H = [0 \ 1]$, Q 和 S 均为常数,期望队列长度取为 100,期望窗口大小取为 50。图 2 给出了仿真程序的流程图。

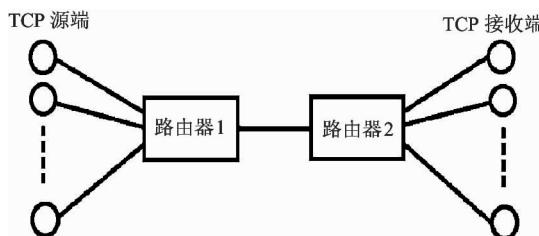


图 1 单瓶颈链路计算机网络

因为实际网络中的窗口大小无法直接获取,即系统状态 $x_1(k)$ 无法直接获取,因此采用降维状态观测器对系统状态 $x_1(k)$ 进行估计。图 3 给出了状态 $x_1(k)$ 的估计值和实际值的响应曲线,从图中可以看出,由状态观测器获取的状态估计值 $\hat{x}_1(k)$ 可以很快地逼近状态的实际值 $x_1(k)$ 。

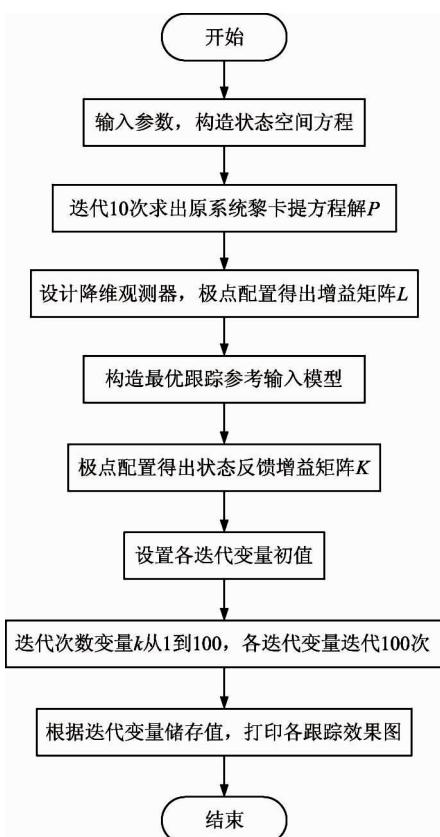


图 2 仿真程序流程图

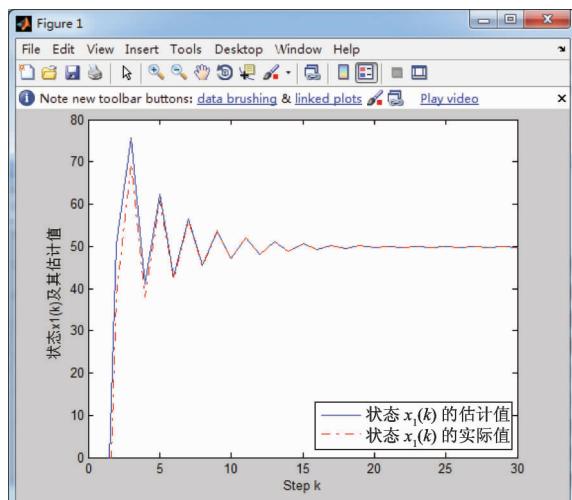


图 3 状态 $x_1(k)$ 及其估计值的响应曲线

图 4 和图 5 分别给出了系统状态 $x_1(k)$ (即窗口大小) 和系统状态 $x_2(k)$ (即队列长度) 的响应曲线,而系统的输出为 $y(k) = x_2(k)$ 。从图中可以看出,经过短时间的调节后,系统的状态和输出可很好地跟上期望输出,表明本文所提出的拥塞控制方法具有很好的跟踪性能和满意的控制效果,可以有效

地避免网络拥塞。

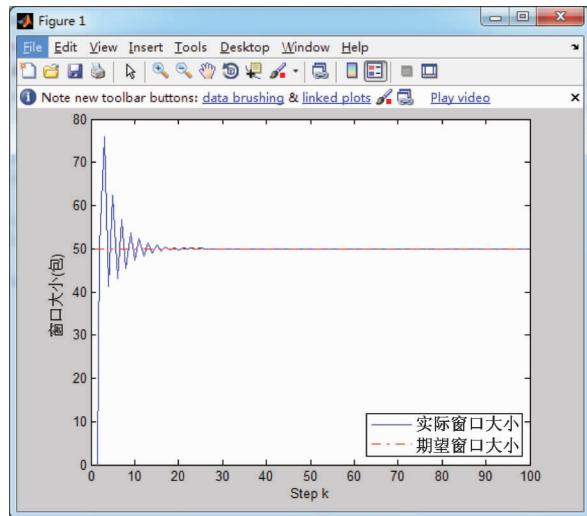


图4 窗口大小的响应曲线

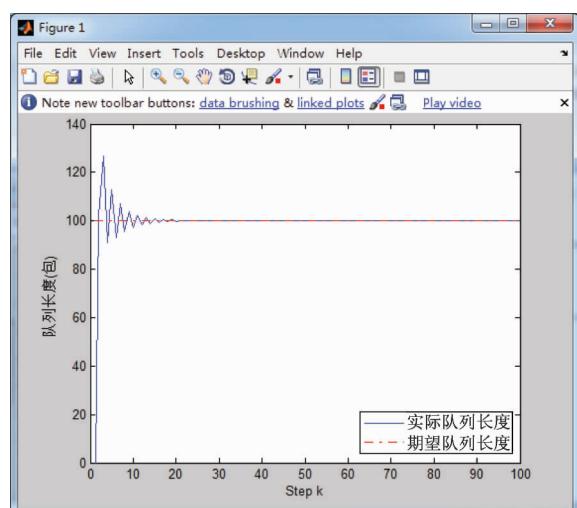


图5 队列长度的响应曲线

经过仿真验证,本文所提出的最优拥塞控制算法对于参考信号的跟踪效果优于PID等其他算法,实现完全跟踪的步数也较短。因此,相较于其他常规算法,本文所使用的算法在网络拥塞控制问题上有其独特的优越性。

4 结论

本文首先从控制理论出发,建立了Internet拥塞控制系统的离散时间状态空间数学模型。在此基础上,应用最优控制理论,提出了一种基于主动队列

管理的最优拥塞控制算法。该算法利用降维状态观测器对实际网络中无法直接获取的窗口大小进行估计,而队列长度采用系统输出测量直接获得,从而实现了状态反馈最优拥塞控制。最后,对所提出的最优拥塞控制算法进行了计算机仿真,仿真结果表明,该算法具有很好的控制性能。

本文的主要创新之处在于,在建立离散时间状态空间数学模型的基础上,将降维状态观测器引入到拥塞控制中,从而实现了网络拥塞的状态反馈最优控制。但是,本文并没有考虑不确定性和时滞的影响。由于实际网络中还存在不确定性和时滞,而这是最优控制策略无法解决的问题,因此,需要寻找其它的控制方法,比如自适应控制、鲁棒控制和预测控制等,这使网络拥塞控制具有很大的挑战性,这也是我们下一步将要研究的问题。

参考文献

- [1] Amol D, Rajesh P. A review on active queue management techniques of congestion control. In: Proceedings of the International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies, Nagpur, India, 2014. 166-169
- [2] Soelistijanto B, Howarth M P. Transfer reliability and congestion control strategies in opportunistic networks: A survey. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 2014, 16(1): 538-555
- [3] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1993, 1: 397-413
- [4] Chen W, Yang S H. The mechanism of adapting RED parameters to TCP traffic. *Computer Communications*, 2009, 32: 1525-1530
- [5] Hollot C V, Misra V, Towsley D, et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(6): 945-960
- [6] Sun J, Chen G, Ko K, et al. PD-controller: a new active queue management scheme. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, USA, 2003, 6: 3103-3107
- [7] Fan Y F, Ren F Y, Lin C. Design a PID controller for

- Active Queue Management. In: Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Computer and Communication, Antalya, Turkey, 2003, 2: 985-990
- [8] Zhang H, Towsley D, Hollot C V, et al. A self-tuning structure for adaptation in TCP/AQM networks. *Performance Evaluation Review*, 2003, 32: 302-307
- [9] Barzamini R, Shafiee M, Dadlani A. Adaptive generalized minimum variance congestion controller for dynamic TCP/AQM networks. *Computer Communications*, 2012, 35(2): 170-178
- [10] Quet P F, Özbay H. On the design of AQM supporting TCP flows using robust control theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49: 1031-1036
- [11] Chen Q, Yang O W W. Robust controller design for AQM router. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52: 938-943
- [12] Zheng F, Nelson J. An H_∞ approach to the controller design of AQM routers supporting TCP flows. *Automatica*, 2009, 45: 757-763
- [13] Han C W, Sun D H, Liu L, et al. Discrete-time robust H_∞ congestion control with nonlinear disturbance. In: Proceedings of the 26th Chinese Control Conference (CCC), Nanjing, China, 2014. 5476-5480
- [14] Marami B, Haeri M. Implementation of MPC as an AQM controller. *Computer Communications*, 2010, 33 (2): 227-239
- [15] Wang P, Chen H, Yang X, et al. Design and analysis of a model predictive controller for active queue Management. *ISA Transactions*, 2012, 50: 120-131
- [16] Han C W, Sun D H, Liu L, et al. A new robust model predictive congestion control. In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Shenyang, China, 2014. 4189-4193
- [17] Zhou C, He J W, Chen Q W. An observer-based robust active queue management scheme. In: Proceedings of Chinese Control Conference, Hefei, China, 2012. 5536-5541
- [18] Astrom K J, Wittenmark B. Computer Controlled Systems: Theory and Design. 3rd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 26-36
- [19] 郑大钟著. 线性系统理论(第二版). 北京: 清华大学出版社, 2010. 334-354

Study of optimal congestion control based on reduced-order state-observer

Han Cunwu, Diao Qi, Chang Shurui, Bi Song, Liu Lei, Pang Zhonghua
 (Beijing Key Laboratory of Fieldbus Technology and Automation,
 North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract

Based on the modeling of Internet congestion control systems, the concept of reduced-order state-observation was introduced into the congestion control, and then a new optimal congestion control method based on active queue management (AQM) was presented. The new method uses a reduced-order state-observer to obtain the system state which cannot be obtained directly, so as to realize the state-feedback to overcome the drawback of traditional AQM based congestion control methods that they cannot directly obtain the state-feedback control law. And it can obtain the state-feedback control law capable of optimizing the performance index by solving the Riccati equations, and achieve the optimal congestion control for Internet. The simulation results verified the proposed method's good tracking performance.

Key words: congestion control, optimal control, Riccati equation, active queue management (AQM), state-observer