

主动队列管理中 PID 控制器的解析设计方法^{*}

杨吉文⁺, 顾诞英, 张卫东

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

An Analytical Design Method of PID Controller Based on AQM/ARQ

YANG Ji-Wen⁺, GU Dan-Ying, ZHANG Wei-Dong

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-21-62934633, E-mail: jwyang@sjtu.org, http://www.sjtu.edu.cn

Yang JW, Gu DY, Zhang WD. An analytical design method of PID controller based on AQM/ARQ. *Journal of Software*, 2006,17(9):1989–1995. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1989.htm>

Abstract: Active queue management (AQM) is a very active research area in networking. As a complementary mechanism to the congestion control of end-to-end systems, AQM, used on the intermediate nodes, can provide high throughputs for routers and control the queue length effectively at the same time. Based on a model of TCP and AQM, a new PID controller is designed analytically using H_∞ optimal control theory in this paper. The specialty of this controller is that a single parameter tuning method is proposed, through which the nominal performance and robust performance can be adjusted monotonically to achieve the trade-off. The performance of the controller is verified and compared with other methods using NS simulations. The result shows the advantages of the proposed PID controller.

Key words: active queue management; PID controller; congestion control; nominal performance; robustness

摘要: 主动队列管理(active queue management,简称 AQM)是一个非常活跃的研究领域.作为对终端系统上拥塞控制的一种补充,中间节点的 AQM 策略在保证较高吞吐量的基础上可以有效地控制队列长度.基于 TCP/AQM 控制论模型,使用 H_∞ 最优控制理论,以解析的方法设计了新型 PID 控制器.该控制器的特点是:控制器由单参数调节,可以方便地实现系统标称性能和鲁棒性能的折衷.通过 NS 仿真并与其他算法相比较,验证了所设计的控制器的性能.结果显示,所设计的 PID 控制器性能优于其他算法.

关键词: 主动队列管理;PID 控制器;拥塞控制;标称性能;鲁棒性

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

TCP 端到端的拥塞控制机制是确保 Internet 鲁棒性(robustness)的重要因素^[1].尽管 TCP 拥塞控制机制是必须的而且非常强大,但它存在着自相似、效率、公平性等方面的问题,因此需要采用基于路由器的拥塞控制机

^{*} Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60474031 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312200 (国家重点基础研究发展规划(973)); the Science and Technology Phosphor Program of Shanghai of China under Grant No.04QMH1405 (上海科技启明星计划); the New Century Excellent Talents of China under Grant No.04-0383 (新世纪优秀人才支持计划)

Received 2005-09-08; Accepted 2005-12-01

制对基于端节点的拥塞控制机制进行补充.AQM(active queue management)^[12]是作用在网络中间节点上的拥塞控制策略,其目标是使网络运行在高吞吐率、低丢失率和低延迟的状态下,从而为要求时延保证的业务提供一种良好的实现机制.

网络中传输节点最常用的队列管理策略是尾丢弃算法(DropTail).由 Floyd 等人提出的 RED(random early detection)^[3]算法根据平均队列长度计算报文丢弃(或标记)概率.结果显示,RED 的性能优于 DropTail,但是它仍旧存在许多问题^[4,5].尽管后来人们提出了 ARED^[6],SRED^[7]和 BLUE^[8]等算法以解决 RED 算法的不足,但是有关这几种算法的研究都缺少系统的理论作为分析和设计的依据.

除 RED 之外,研究人员还提出了自适应虚缓冲^[9]和 REM^[10]等主动队列管理算法.这些基于优化的方法更多地关注系统的稳态特性,而不是队列的瞬态性能.

文献[11]建立了 TCP/AQM 控制论模型,从而可以使用控制理论研究主动队列管理算法.基于该模型,Hollot 等人对建立的控制论模型进行了合理的线性化处理,提出了 PI(proportional integral)算法^[12],使用经典控制理论频域校正的方法设计用于 AQM 的 PI 控制器,该算法比 RED 算法具有更小的队列抖动,但参数整定上的试凑法使系统的瞬态和稳态性能无法得到可靠的保障.文献[13]通过实时测量链路的报文丢失率获得当前的负载信息,然后动态设置 PI 算法中的有关参数,提出了自适应 PI 算法.文献[14]提出一种基于稳定裕度的 PID 控制算法,可使系统瞬态性能优于 PI 算法,但其参数整定方法是相当复杂的.

本文从 H_∞ 最优控制角度出发,针对 AQM 控制系统提出了一种 PID 控制器的解析设计方法,不仅保证了 TCP/AQM 控制系统的稳定性,而且控制器实现了单参数调节,可以方便、有效地实现系统性能和鲁棒性的折衷.

本文第 1 节介绍 TCP/AQM 控制理论模型.第 2 节阐述 H_∞ PID 控制器的解析设计过程.第 3 节通过实验验证控制器的有效性.第 4 节总结全文并指出下一步的工作.

1 TCP 流量控制模型

在文献[11]中,Misra 等人基于流体流(fluid flow)理论建立了 AQM 作用下的 TCP 连接上拥塞窗口的动态模型.它可以用下面的微分方程组来描述:

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

这里, $\dot{W}(t) = \frac{dW(t)}{dt}$; $\dot{q}(t) = \frac{dq(t)}{dt}$.

为了便于分析系统的稳定性,Hollot 等人^[12]用小信号理论在稳定工作点对其进行了局部线性化,得到其线性化模型如图 1 所示,其中 $C(s)$ 为所使用的控制机制.

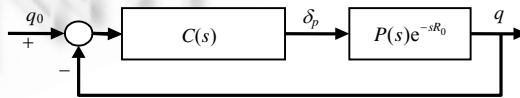


Fig.1 AQM block diagram of the TCP flow

图 1 TCP 流量 AQM 控制方框图

设 $P(s)$ 代表被控对象的非时滞部分,则其可以使用如下的方程来表示:

$$P(s) = \frac{(R_0 C)^3 / (2N)^2}{(R_0^2 C s / 2N + 1)(R_0 s + 1)} \quad (2)$$

其中, C 为链路容量, N 为 TCP 连接数, R_0 是往返时延.

2 使用 H_∞ PID 控制器的主动队列管理算法

2.1 AQM控制系统的内稳定条件

考虑如图 2 所示的 AQM 单位闭环反馈控制回路,其中 r 代表输入, d 是扰动信号,包括 TCP 窗口的变化及其他扰动, $Q(s)$ 是控制器, $P(s)e^{-sR_0}$ 是被控对象.在标称情况下(即对象模型精确时),该单位闭环反馈控制系统可以等效为如图 3 所示的内模控制结构^[15].

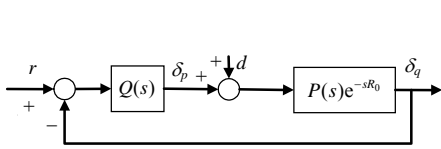


Fig.2 Unity feedback control loop of AQM

图 2 AQM 单位反馈控制回路

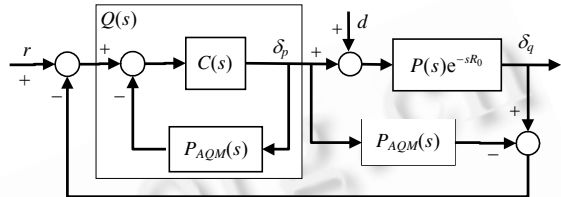


Fig.3 Internal model control structure of AQM

图 3 AQM 内模控制结构

在图 3 中, $P_{AQM}(s)$ 代表 AQM 模型,可以使用如下的方程来表示

$$P_{AQM} = P(s)e^{-sR_0} \doteq \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}e^{-sR_0} \quad (3)$$

其中, $K=(R_0C)^3/(2N)^2$, $T_1 = R_0^2C/2N$, $T_2=R_0$.

由图 3 可知,

$$Q(s) = \frac{C(s)}{1 + P_{AQM}(s)C(s)}$$

即

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - P_{AQM}(s)Q(s)}$$

其中, $Q(s)$ 为内模控制器.

令矩阵 $H(s)$ 为 r 和 d 相对于 δ_q 和 δ_p 的传递函数矩阵:

$$H(s) = \begin{bmatrix} P_{AQM}(s)Q(s) & P_{AQM}(s)(1 - P_{AQM}(s)Q(s)) \\ Q(s) & P_{AQM}(s)Q(s) \end{bmatrix}$$

闭环系统内部稳定的充要条件是:矩阵 $H(s)$ 中的所有传递函数都是稳定的.由于 $P_{AQM}(s)$ 是稳定对象,则系统内稳定的条件等价于 $Q(s)$ 稳定.

2.2 H_∞ PID 控制器解析设计过程

上文得到的 TCP/AQM 控制理论模型是一个稳定时滞对象,传统的 PID 控制器设计方法是:首先利用有理逼近得到有理控制对象,然后针对有理对象进行设计 PID 控制器.本节将采用解析方法提出一种精度更高的设计方法.

基于 H_∞ 最优控制,我们预先选择期望的闭环传递函数如下:

$$T(s) = \frac{e^{-sR_0}}{(\lambda s + 1)^n}$$

这里, λ 为一个正常数.通过调节 λ ,可以实现对控制系统的标称性能和鲁棒性的调节.对 AQM 模型 $P_{AQM}(s)$,有

$$Q(s) = \frac{T(s)}{P_{AQM}(s)} = \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{K(\lambda s+1)^n}$$

可见, $Q(s)$ 是稳定的,因此,闭环系统内稳定.式中, n 应选择合适正整数,从而使 $Q(s)$ 正则.我们取最小值 $n=2$,则

$$Q(s) = \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{K(\lambda s+1)^2}.$$

闭环传递函数为

$$T(s) = \frac{e^{-sR_0}}{(\lambda s+1)^2}.$$

进一步得到反馈控制系统的控制器为

$$C(s) = \frac{1}{K} \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{(\lambda s+1)^2 - e^{-sR_0}}.$$

尽管得到的控制器是物理可实现的,但它不具有 PID 控制器的形式.经典的 PID 控制器的结构为

$$C_{PID}(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \frac{1}{T_F s + 1}.$$

所以需要寻找逼近上述理想控制器的 PID 控制器参数.由上述内稳定条件可知:

$$\lim_{s \rightarrow 0} ((\lambda s+1)^2 - e^{-sR_0}) = 0.$$

所以, $C(s)$ 在原点处存在一个极点.设 $C(s) = \frac{f(s)}{s}$, 其中,

$$f(s) = \frac{s}{K} \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{(\lambda s+1)^2 - e^{-sR_0}}.$$

利用 Maclaurin 级数展开 $C(s)$, 有

$$C(s) = \frac{1}{s} \left[f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2!} s^2 + \dots \right] \quad (4)$$

注意到,控制器中有比例项、积分项、微分项和无穷多个高阶微分项.取其前 3 项,可以得到相应的 PID 控制器^[15],其参数为

$$T_F = 0,$$

$$T_I = T_1 + T_2 - \frac{2\lambda^2 - R_0^2}{2(2\lambda + R_0)} \quad (5)$$

$$T_D = -\frac{2\lambda^2 - R_0^2}{2(2\lambda + R_0)} + \frac{T_1 T_2 - R_0^3 / (12\lambda + 6R_0)}{T_I} \quad (6)$$

$$K_C = \frac{T_I}{K(2\lambda + R_0)} \quad (7)$$

由上述表达式可以看出,当 $K=(R_0 C)^3 / (2N)^2$, $T_1 = R_0^2 C / 2N$, $T_2 = R_0$ 都已知时, PID 控制器由参数 λ 唯一确定.通过调节 λ , 就可以方便地实现对控制器的调节.事实上,可调参数 λ 与系统的标称性能(比如超调、响应时间等)和鲁棒性有着直接的关系,它表示了两者的折衷.增大 λ 可使系统鲁棒性变好,代价是标称性能变差;相反地,减小 λ 意味着系统标称性能趋于最优,但鲁棒性变差.在 AQM 控制系统中,一般推荐 λ 的取值在 $1.9R_0 \sim 2.5R_0$ 之间.

2.3 控制器离散形式及数字实例

在实际应用中,需要控制器的离散化形式,对上文中设计的控制器:

$$C_{PID}(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \frac{1}{T_F s + 1}.$$

由于 $T_F=0$, 故可得到

$$C_{PID}(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right).$$

其离散的 PID 表达式为

$$\Delta p(k) = K_C \left\{ \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_D}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_D}{T} e(k-2) \right\} \quad (8)$$

其中, K_C, T_I, T_D 分别由式(5)~式(7)得出; T 为采样时间.

假定瓶颈链路容量 C 为 15Mbps, TCP 连接数 N 为 60, 往返时间 R_0 为 0.253s, 则

$$P(s) = \frac{1.17126 \times 10^5}{(s+0.53)(s+4.1)}$$

根据式(5)~式(7), 取控制参数 $\lambda=2.0R_0$, 我们可以得到依据上述对象模型所设计的 PID 控制器的相应参数值分别为: $K_C=2.760052 \times e^{-5}$; $T_I=2.081556$; $T_D=6.5722786 \times e^2$. 设定采样频率为 160Hz, 相应的采样时间 $T=0.00625s$, 由式(8)可以得到该 PID 控制器的离散化形式为

$$p(k)=3.179207 \times 10^{-4} e(k)-6.080752 \times 10^{-4} e(k-1)+2.902373 \times 10^{-4} p(k-1) \quad (9)$$

这里, $e(k)=q(k)-q_0$; $p(k)$ 为控制器的输出; $q(k)$ 是 k 时刻的队列长度值; q_0 为期望队列长度.

3 算法的仿真与性能评价

下面用仿真实验来评估所得到的 PID 控制器的性能, 仿真平台采用 NS-2^[16], 采用如图 4 所示的仿真网络拓扑结构, 其中, $S_1 \sim S_n$ 为发送节点; $D_1 \sim D_n$ 为接收节点; R_1, R_2 为路由器; $S_i \rightarrow R_1$ 和 $R_2 \rightarrow D_i$ 的链路带宽为 100Mbps; 传输延迟均为 20ms; $R_1 \rightarrow R_2$ 的链路构成瓶颈. 链路容量为 10Mbps(2500packet, 报文大小为 500 字节); 传输延迟为 20ms; 除 R_1 的队列由本文方法(记为 NPID, $\lambda=2.0R_0$)、PID 和 PI 控制器控制外, 其余队列均为 DropTail, 所有节点的缓存大小为 300packet. 路由器队列长度的期望值为 25packets; TCP 业务流使用 Reno; 采样频率为 160Hz, HTTP 业务流使用 NS 提供的 HTTP 模块.

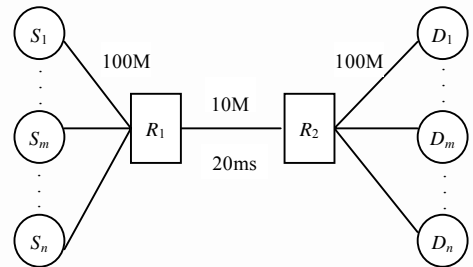
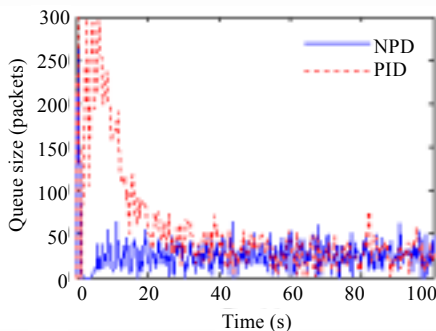
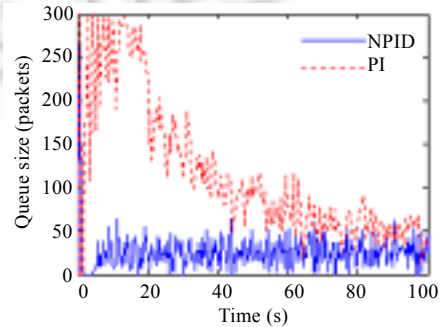


Fig.4 Simulation topology
图 4 模拟拓扑

实验 1 研究算法的动态响应. 实验过程: 取输入为 100 个 TCP(长程), 除 R_1 的队列由 NPID, PID 和 PI 控制器控制以外, 其余队列均为 DropTail. 3 种算法的瞬时队列长度随时间变化的过程如图 5(a)和图 5(b)所示. 从图中可以看出, 本文的算法明显优于另外两种算法, 能够迅速地将队列长度调节到期望值附近; 而另外两种控制器却需要相当长的时间. 而且, 本文所提算法拥有更小的队列抖动.



(a) Queue evolution of exp.1 (NPID vs. PID)
(a) 实验 1 队列变化(NPID vs. PID)



(b) Queue evolution of exp.1 (NPID vs. PI)
(b) 实验 1 队列变化(NPID vs. PI)

Fig.5 Simulation results of Exp.1

图5 实验1仿真结果

实验 2 分析算法在重负载情况下的性能. 实验过程: 在 0 时刻启动 400 条 TCP 连接. 仿真结果如图 6(a)和图 6(b)所示. 从实验结果可以看出, 在重负载情况下, PI 算法的收敛速度很慢; PID 算法虽然略优于 PI 算法, 但也需要

相当长的时间,但是本文的 NPID 算法仍然可以控制队列长度很快地收敛到目标值.

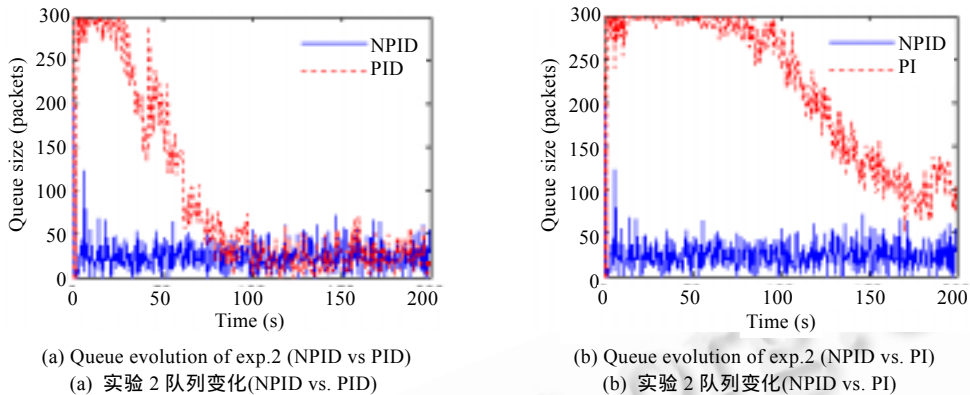


Fig.6 Simulation results of exp.2

图6 实验2仿真结果

实验 3 评估算法在混合业务流情况下的性能.具体的模拟过程是:在 0s 启动 150 条 FTP 连接;在 30s 时启动 200 条 HTTP 连接;在 60s 时再启动 100 条 FTP 连接;90s 时再启动 100 条 HTTP 连接;在 120s 时再启动 50 条 FTP 连接.模拟结果如图 7(a)和图 7(b)所示.从实验 3 可以看出,在有短连接(HTTP)存在的情况下,我们的方法对负载变化的敏感程度明显低于另外两种算法,算法仍然具有较快的收敛速度和较小的队列长度抖动,性能优于其他两种算法.

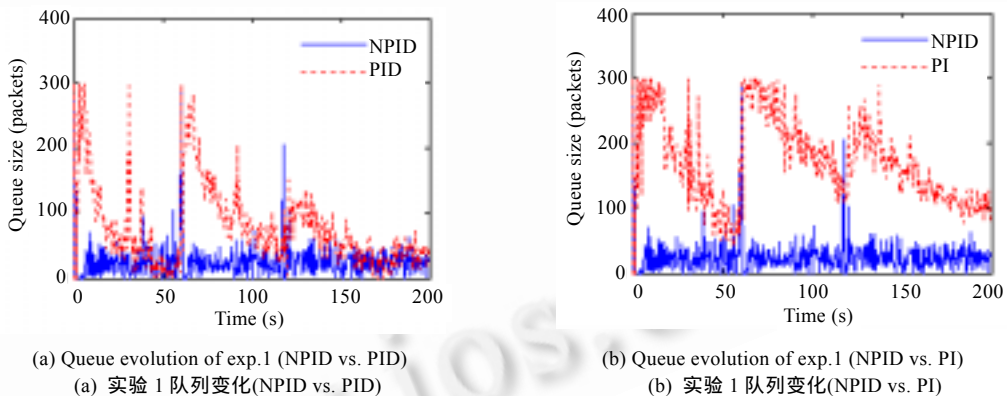


Fig.7 Simulation results of exp.3

图 7 实验 3 仿真结果

综合以上仿真结果可以看出,本文的方法优于 PI 和 PID 方法,具有更好的队列特性,包括更快的收敛速度以及更好的鲁棒性和稳定性.

4 结束语及下一步工作

我们对具有时滞环节的 TCP 流量 AQM 模型进行了研究,根据经典控制理论给出了一种简便的 PID 控制器参数的解析整定方法,并通过引入单参数 λ 作为系统标称性能和鲁棒性的综合调节参数,在 AQM 领域的应用中显示出良好的性能.控制器的整定具有单参数调节的优点,便于实际操作.由于控制器的性能可以通过单一的参数 λ 进行控制,因此,如何设计相应的控制机制,使之能够自动调节控制器的参数 λ 以适应更加复杂的网络环境,这将是我們下一步要做的工作.

References:

- [1] Jacobson V. Congestion avoidance and control. ACM SIGCOMM, 1988. 314–329.
- [2] Braden B, Clark D, Crowcroft J, Davie B, Deering S, Estrin D, Floyd S, Jacobson V, Minshall G, Partridge C, Peterson L, Ramakrishnan, Shenker S, Wroclawski J, Zhang L. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet. RFC2309, Internet Engineering Task Force, 1998. 1–17.
- [3] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1993,1(4): 397–413.
- [4] Christiansen M, Jeffay K, Ott D, Smith FD. Tuning RED for Web traffic. In: Proc. of the SIGCOMM 2000. Stockholm: ACM, 2000. 139–150.
- [5] Diot C, Iannaccone G, May M. Aggregate traffic performance with active queue management and drop from tail. Technical Report, TR01-ATL-012501, Sprint Advanced Technology Laboratories, 2001. <http://www.sprintlabs.com/People/diot/publications.html>
- [6] Feng W C, Kandlur D, Saha D. A self-configuring RED gateway. In: Proc of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE, 1999. 1320–1328.
- [7] Ott T J, Lakshman TV, Wong LH. SRED: Stabilized RED. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE, 1999. 1346–1355.
- [8] Feng W, Kandlur D, Saha D, Shin KG. Blue: A new class of active queue management algorithms. Technical Report, CSE-TR-387-99, University of Michigan, 1999. <http://www.eecs.umich.edu/~wuchang/blue/>
- [9] Kunniyur S, Srikant R. A time scale decomposition approach to adaptive ECN marking. In: Ammar M, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Communications Society, 2001. 1330–1339.
- [10] Athuraliya S, Low S, Li VH, Yin QH. REM: Active queue management. IEEE Network, 2001,15(3):48–53.
- [11] Misra V, Gong WB, Towsley D. Fluid-Based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2000. Stockholm, 2000. 151–160. <http://gaia.cs.umass.edu/fluid/>
- [12] Hollot CV, Misra V, Towsley D, Gong W. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows. In: Ammar M, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Communications Society, 2001. 1726–1734.
- [13] Lu XC, Zhang MJ, Zhu PD. An adaptive PI active queue management algorithm. Journal of Software, 2005,16(5):903–910 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/903.htm>
- [14] Fan YF, Ren FY, Lin C. Design a PID controller for active queue management. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Symp. (ISCC 2003). 2003. 985–990.
- [15] Zhang WD, Yang GK, Xi YG, Xu XM. Design PID controllers for desired time-domain or frequency-domain response. ISA Transactions 42 (2003) 1-0.
- [16] NS-2 Network simulator. 2001. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

附中文参考文献:

- [13] 卢锡城,张明杰,朱培栋.自适应 PI 主动队列管理算法.软件学报,2005,16(5):903–910. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/903.htm>



杨吉文(1980 -),男,新疆昌吉人,主要研究领域为鲁棒控制理论和应用。



张卫东(1967 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为过程控制理论,鲁棒控制理论与应用,系统辨识。



顾廷英(1979 -),女,博士生,主要研究领域为过程鲁棒控制理论,闭环辨识和建模。