

文章编号:1001-9081(2008)07-1841-03

无线自组网拥塞 PID 算法稳定性研究

陈亮^{1,2}, 张宏¹

(1. 南京理工大学 计算机科学与技术学院, 南京 210094; 2. 南通纺织职业技术学院 信息技术系, 江苏 南通 226007)
(njstchenliang@yahoo.com.cn)

摘要:主动队列管理比例积分微分(PID)算法的稳定性是实现其拥塞控制的基础。目前的 PID 设计及优化大多基于经验,往往得到一些孤立的整定结果,缺乏稳定区域的理论分析。针对 Ad Hoc 网络的多跳、时滞特点,分析了 PID 算法在时延无线网络中的稳定性,在不同的微分系数下,分别给出了大时延系统 PID 算法的稳定区域,与传统的工程整定比较,提供了时滞对象的 PID 稳定理论依据,为整定 PID 参数带来便利。通过 Matlab 和 NS2 仿真,验证了稳定区域的结论及优越性。

关键词:无线自组网;时滞;比例积分微分;稳定

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A

Research of stability of PID active queue management in Ad Hoc network

CHEN Liang^{1,2}, ZHANG Hong¹

(1. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;
2. Department of Information Technology, Nantong Textile Vocational Technology College, Nantong Jiangsu 226007, China)

Abstract: Stability of Proportional Integral Differential (PID) algorithm in Active Queue Management (AQM) is the base of congestion control. Now PID often uses experience and experimentation to design and optimize. These methods lack theoretic analysis of stability region and often get some isolated results. Stability characterization of PID was analyzed in wireless and delay Ad Hoc network because of the multi-hop and delay. Finally, it gave stability regions of PID AQM controllers under different differential coefficients in large-delay networks. Compared with tradition engineering ways, it also gave stability theory of PID delay system and helped to determinate coefficients. Matlab and NS2 simulations indicate that stability regions and its advantage are proved.

Key words: Ad Hoc network; delay; Proportional Integral Differential (PID); stability

0 引言

Ad Hoc 是由一组带有无线收发装置的移动节点组成的、多跳、临时性自组织网络系统,它具有无中心控制、节点移动、多跳无线连接的特点^[1]。由于 Ad Hoc 网络的资源非常有限,而且随着节点的增多以及 TCP 流发送端和接收端跨度的增加,网络有效带宽将变得很小,因此,拥塞研究显得十分重要。

主动队列管理(Active Queue Management, AQM)机制通过动态管理并检测路由中的数据堆栈长度来预知可能产生的网络拥塞,并及时通知源端,使之能够提早采取措施,从而尽量避免更严重的数据丢失^[2]。具有路由器功能的中间节点是 Ad Hoc 网络的重要组成部分,也是网络拥塞状态最直接的感受者,在这些中间节点中引入相应的拥塞控制机制,使网络本身参与资源的控制工作,可以有效地实现对拥塞的监测和预防。而主动队列管理在无线网络中的应用研究尚未充分展开。因此,Ad Hoc 网络中基于主动队列管理的拥塞控制研究是十分必要的。

与传统的 AQM 策略相比,基于控制理论的 AQM 具有稳定性、健壮性的优点,但也存在一些问题,如控制器设计大多使用工程试凑和经验;参数整定方法多种多样,但缺乏对控制的稳定性理论分析;一般没有给出控制器参数稳定区域集合。

为了更好地设计 AQM 控制器,本文在 Ad Hoc 网络环境下,针对主动队列管理的比例积分微分(PID)算法,在考虑控制对象时滞特性的基础上,分析了时延系统的稳定性,由于 PID 控制器具有三个参变量,所以在不同的微分系数下,给出了 PID 控制器参数的稳定区域集合。通过对得到的一组稳定区域进行 Matlab 和 NS2 仿真,同时与传统整定方法结果比较后,验证了方法的有效性。

1 PID 算法简介

自从 1998 年 Braden 等人提出主动队列管理的研究动议后,一系列主动队列管理算法被提了出来。人们从系统的角度分析传输控制协议(TCP)拥塞控制模型,利用经典控制理论中的方法解决如何使用户和网络使用率最大化的问题,同时提高系统的健壮性和稳定性。近年来,人们提出了一系列基于控制理论的 AQM 算法,如比例微分(Proportional Differential, PD)控制器,基于微分先行 PI 算法^[3],结合 Smith 预估器和 Dahlin 算法提出一种预测性的 PI 控制算法^[4]等。可以看出,很多基于队列的 AQM 算法都利用控制理论进行算法的分析设计,这也成为当前 AQM 研究的热点。

比例积分(Proportional Integral, PI)控制作为最早提出的基于控制理论的 AQM 算法,由于具有鲁棒性和降低稳态误差的特点,PI 控制成为 AQM 控制器较理想的方案。但通过

收稿日期:2008-01-28;修回日期:2008-03-19。 基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2007593)。

作者简介:陈亮(1982-),男,江苏南通人,博士研究生,主要研究方向:无线自组网、网络拥塞控制;张宏(1956-),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要研究方向:数据挖掘、信息安全。

工程设计可以发现,它的响应速度等性能表现还不尽如人意,对被控对象的变化也比较敏感,这些对 Ad Hoc 网络的时变特点是不利的。而 PID 控制器的调节性能指标对于受控对象的稍许变化不很敏感,适应性较强,这就极大地保证了调节的有效性^[5]。但在参数的整定上,PID 控制也大多采用试凑法,设计大多根据过去的经验,优化则往往利用软件和公式,缺乏在时滞系统稳定性方面的理论依据,从而导致系统的动态和稳态性能得不到可靠保障。

在大时滞网络中,所有典型算法控制的队列均出现了大幅度振荡。队列的大幅度振荡一方面增加了端到端的时延抖动,同时由于空闲队列出现概率的加大,链路利用率的降低是肯定的,这两点都违背了最初提出的 AQM 设计目标^[6]。对于 Ad Hoc 网络而言,无线多跳网络的特点决定其传输时延往往不能忽略,因此,必须针对大时滞的网络,分析其 PID 控制系统的稳定性。

2 PID 算法稳定区域分析

2.1 控制模型

基于流体流理论,文献[7]把 Internet 中的信息流看作一个连续的流体,给出了 TCP/AQM 的微分方程。文献[8]又对该微分方程做了线性化处理,建立了 AQM 作用下 TCP 连接的拥塞窗口的非线性动态模型。文献[7]提出的 Internet 非线性动态模型如下:

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

其中:

$$\dot{W}(t) = \frac{dW(t)}{dt}$$

$$\dot{q}(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

W 为 TCP 拥塞窗口大小(单位:分组); q 为队列长度(单位:分组); R 为往返时间(单位:秒); C 为链路容量(单位:分组/秒); N 为负载(TCP 连接数量); $p(t)$ 为分组丢弃概率。设系统稳态下的往返传输时间是 R_0 , TCP 连接数目是 N ,理想队列长度是 q_0 ,丢包率是 p_0 ,在此,认为研究对象为具有延时的网络,经过线性化和拉普拉斯变换,得到受控对象的传递函数:

$$P(s) = \frac{(R_0 C)^3 / (2N)^2}{\left(\frac{R_0^2 C s}{2N} + 1\right)(R_0 s + 1)} e^{-sR_0} = \frac{L}{(s+a)(s+b)} e^{-sR_0} \quad (2)$$

其中: $L = C^2 / (2N)$, $a = 2N / (CR_0^2)$, $b = 1/R_0$ 。

令 $P_0(s) = \frac{L}{(s+a)(s+b)}$, 为被控对象非时滞部分。

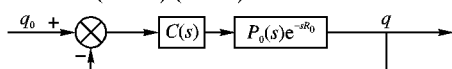


图 1 控制系统方框图

线性化后的 TCP/AQM 结构如图 1 所示,其中 $C(s)$ 是控制器, $P_0(s) e^{-sR_0}$ 是被控对象 TCP/AQM 系统。

根据控制理论,设计 PID 控制器,其传递函数为:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (3)$$

其中: $k_i = \frac{k_p}{T_i}$, $k_d = k_p T_d$ 。

根据 Ad Hoc 网络环境,参数设置为: $q_0 = 25$ packet, $R_0 = 0.25$ s, $C = 1$ Mbps = 250 pps (500 Byte/packet), $N = 20$ 。

2.2 时延系统的 PID 控制器整定

传统的 PID 控制器的参数整定可利用 Ziegler-Nichols 经验公式。但使用 Ziegler-Nichols 整定方法设计 PID 控制器的前提,是被控广义对象的传递函数模型为 $G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$ 这种表达形式。对于 Ad Hoc 网络,其被控对象模型 $P(s)$ 不是这种一阶时滞模型,所以要将该网络模型 $P(s)$ 拟合成上面的标准形式。

$$\text{根据式(2),并令 } K' = \frac{(R_0 C)^3}{(2N)^2}, T_1 = \frac{R_0^2 C}{2N}, T_2 = R_0。$$

$$\text{再根据近似拟合公式,则 } K = K' = \frac{(R_0 C)^3}{(2N)^2}, \tau = T_1 +$$

$$T_2 + R_0 - \sqrt{T_1^2 + T_2^2}, T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}。$$

由 2.1 节中的参数设置,则 $K = 152.6$, $\tau = 0.427$, $T = 0.464$ 。

根据 Ziegler-Nichols 公式: $k_p = 1.2T / (K\tau) = 0.008545$, $T_i = 2.2\tau = 0.9394$, $T_d = 0.5\tau = 0.2135$ 。

由式(3)中的定义, $k_p = 1.2T / (K\tau) = 0.008545$, $k_i = k_p / T_i = 0.009096$, $k_d = k_p T_d = 0.002$ 。

可以发现:传统的整定由于拟合与经验公式的使用,尽管可以获得 PID 参数,但缺少稳定理论的支持,且只能获得一个孤立的结果,无法得知上述整定出的系数是否较优,当某个系数改变时,也无法获知控制系统的性能趋势。这些都是工程整定的不足。

2.3 时延系统的 PID 稳定性分析

从式(2)来看,系统中时延项的加入,使得经典控制理论利用劳斯阵列的稳定性分析变得不再适用。对于含时延的控制系统,其闭环特征方程为 $1 + P_0(s)C(s) e^{-sR_0} = 0$ 。

根据 2.1 节中式(2)和式(3)的定义,化简得:

$$s^3 + (a+b)s^2 + abs + L(k_p s + k_i + k_d s^2) e^{-sR_0} = 0 \quad (4)$$

令 $s = j\omega$, 则

$$(ab\omega - \omega^3)j - (a+b)\omega^2 + L(k_p \omega j + k_i - k_d \omega^2) e^{-j\omega R_0} = 0 \quad (5)$$

由欧拉方程 $e^{-j\omega R_0} = \cos(\omega R_0) - j \sin(\omega R_0)$, 其中 $\omega \in (0, +\infty)$, 式(5)化为:

$$\left\{ \begin{aligned} &-(a+b)\omega^2 + L[k_p \omega \sin(\omega R_0) + (k_i - k_d \omega^2) \cdot \cos(\omega R_0)] \\ &+ j\{(ab\omega - \omega^3) + L[k_p \omega \cos(\omega R_0) + (k_d \omega^2 - k_i) \cdot \sin(\omega R_0)]\} = 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

对式(6)而言,复数为零,则其实部、虚部都为零,可得

$$\begin{cases} k_p \omega \sin(\omega R_0) + (k_i - k_d \omega^2) \cos(\omega R_0) = \frac{(a+b)\omega^2}{L} \\ k_p \omega \cos(\omega R_0) - (k_i - k_d \omega^2) \sin(\omega R_0) = \frac{\omega^3 - ab\omega}{L} \end{cases} \quad (7)$$

联立上述两式解得,

$$\begin{cases} k_p = \frac{(a+b)\omega \sin(\omega R_0) + (\omega^2 - ab) \cos(\omega R_0)}{L} \\ k_i = \frac{(a+b)\omega^2 \cos(\omega R_0) - \omega(\omega^2 - ab) \sin(\omega R_0)}{L} + k_d \omega^2 \end{cases} \quad (8)$$

根据上式,两个方程却有三个未知变量,因此要固定 k_d 数值,在 $k_p - k_i$ 平面上绘出时延系统的 PID 控制器稳定区域,如图 2 所示。通过观察可以发现,当 k_d 一定时,曲线即为临界稳定线,曲线与 $x-y$ 轴围成的区域为系统的稳定区域;同时,随着 k_d 值的增大,对应的时滞系统稳定区域逐渐扩大。当然,如果 k_d 值持续增大,闭环系统的超调会变大,并使响应速度有所变慢,继而可能放大系统内部噪声,因而 k_d 也不宜取得过大。

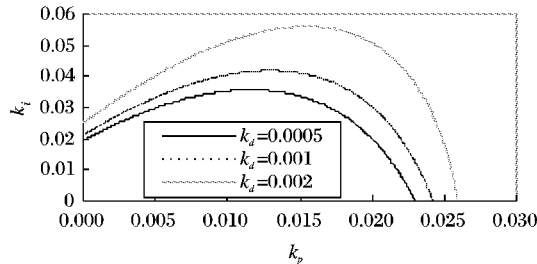


图 2 时滞系统稳定区域

3 仿真

3.1 Matlab 仿真

针对时延系统,在如图 2 中,当 k_d 分别为 0.0005、0.001、0.002,取点 $(k_p, k_i) = (0.01, 0.0406)$ 。可以看出:

- 1) 在 $k_d = 0.0005$ 时,选取的该点在对应的稳定区域外。
- 2) 在 $k_d = 0.001$ 时,该点恰好在对应的稳定边界线上。
- 3) 在 $k_d = 0.002$ 时,该点在对应的稳定区域内。

利用 Matlab 进行仿真,分别绘制三种情况下时域的单位阶跃响应曲线,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,选择稳定区域内的点 $(k_p, k_i, k_d) = (0.01, 0.0406, 0.002)$ 设计的 PID 控制器能稳定 TCP/AQM 时滞系统;稳定边界线上的点 $(k_p, k_i, k_d) = (0.01, 0.0406, 0.001)$ 使得时滞系统临界稳定,出现等幅震荡的情况;而稳定区域外的点 $(k_p, k_i, k_d) = (0.01, 0.0406, 0.0005)$ 则使得时滞系统震荡剧烈并最终发散。

2.2 节中利用 Ziegler-Nichols 经验公式整定的 $k_p = 0.008545, k_i = 0.009096, k_d = 0.002$ 也在对应的稳定区域内,验证了稳定区域的分析。需要说明的是,尽管当 k_d 确定时,只要点 (k_p, k_i) 在对应的稳定区域内,系统都是稳定的,但 k_p 过大会使闭环系统的超调量加大,出现尖锐的波峰,而且会使系统的稳定裕量变小,所以在优化设计 PID 控制器时,要尽量选取稳定区域内左下方的点,使得超调量和响应速度达到满意的效果。

由于 Ad Hoc 网络的信道特性,考虑其信道容量为时变。对 $(k_p, k_i, k_d) = (0.01, 0.0406, 0.002)$ 设计的 PID 控制器,当信道容量改变时,仿真结果如图 4。可以发现:

信道容量减小时, $C = 125$ pps, 则 $L = 391, a = 5.12, b = 4$, 系统控制效果改善明显;

信道容量增大时, $C = 500$ pps, 则 $L = 6250, a = 1.28, b = 4$, 系统控制效果恶化,最终震荡失效。

可以看出, PID 经典控制算法性能表现还不尽如人意,设计 PID 控制器往往是基于定常的网络对象,当 Ad Hoc 网络参数超过设计时的最大预期,在一个比较大的范围内变化时, PID 控制很难适应这种变化,只能针对新的环境重新设计 PID。另一方面,由于 PID 控制还是在很大程度上依赖比例、积分和微分系数的选取,而这三个系数之间不一定是线性关

系。PID 控制规律是一种线性的控制规律,它具有经典控制理论的弱点。无论采用何种方法, PID 控制本身存在缺点。这就需要一种可以针对被控对象性能变化的在线调整拥塞控制算法,而神经网络控制具有任意非线性的表达能力,可以将神经网络与 PID 结合,通过神经网络对系统性能的自学习来获得某一最优的 PID 控制参数,以达到更好的控制效果,这是今后研究的方向。

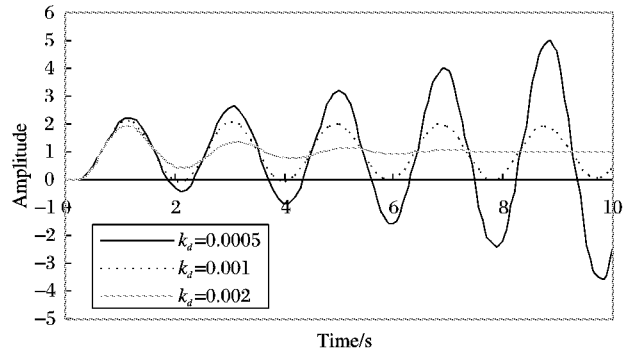


图 3 时延系统的阶跃响应曲线

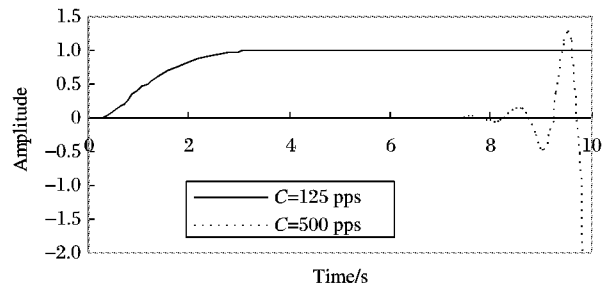


图 4 链路容量 C 为 125 pps 和 500 pps 时的控制系统阶跃响应

3.2 NS2 仿真

本文的网络仿真环境为 Windows 2000 + cygwin + NS 2.27。NS2 是一种面向对象的网络仿真器,它本身含有一个虚拟时钟,采用离散事件驱动作为引擎^[9]。

无线环境配置如下:在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的平面上,无线节点 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ 通过瓶颈节点 R 向节点 D 发送数据,其应用层上运行 FTP 服务, MAC 层参数取 NS2.27 中 802.11 MAC 默认设置:

```

Mac/802_11 set basicRate_ 1Mbps
Mac/802_11 set dataRate_ 1Mbps
Mac/802_11 set delay_ 64μs
Mac/802_11 set ifs_ 16μs
Mac/802_11 set slotTime_ 16μs
Mac/802_11 set cwmin_ 16
Mac/802_11 set cwmax_ 1024
Mac/802_11 set rtxLimit_ 16
Mac/802_11 set bssId_ -1
Mac/802_11 set sifs_ 8μs
Mac/802_11 set pifs_ 12μs
Mac/802_11 set difs_ 16μs
Mac/802_11 set rtxAckLimit_ 1
Mac/802_11 set rtxRtsLimit_ 3
    
```

无线节点 R 为瓶颈节点,其接口队列长度为 50 Packets, $N = 20$, 具体参数配置同 2.1 节。节点 R 的接口队列采用 PI 和 PID 算法,令 $(k_p, k_i, k_d) = (0.01, 0.01, 0.001)$, 仿真时间 100 s。如图 5 所示,与 PI 算法相比, PID 控制器抖动更小,队列长度维持在理想值 $q_0 = 25$ packet 附近,取得了较好的控制效果。

(下转第 1853 页)

2)调用 oracle 提供的接口 InspectDb()与每个数据库建立链接,若返回值为 0,表示链接成功,若返回 1 表示链接失败。

3)若发现某数据库无法链接成功,失效管理中心会尝试多链接几次,若仍然无法成功则对该数据库表示一次失效怀疑。

4)一次失效怀疑并不能代表该数据库一定失效,由于网络的一时的阻塞或者监测中心与该数据库之间网络连接失败都可能引起这种情况出现,因此需要采用了从失效检测器的相关机制来确认该失效是否可靠。

5)DBManager 通知所有服务器上的 HM 上的 LocalHostManager_impl 类中的 HM_DbLiveReport()方法,每个 HM_DbLiveReport()方法均向怀疑失效的数据库发出空表查询请求,然后将查询结果返回失效管理中心,将所有结果进行或操作,只要有一个 HM 与该数据库链接成功,就认为该数据库仍然有效。

6)若所有返回的结果都认为该数据库失效,则将监测的结果送往报表显示类 TableList,并发出报警。

值得注意的是失效检测中超时值的选择对于失效检测达到正确性和完整性的能力非常关键。短的超时时间使得监测系统可以很快检测到失效,但是增加了错误判断的概率,可能导致破坏正确性。因此,在反应时间(短超时)和正确性(长超时)之间存在折衷。

7 结语

随着大规模事务处理系统规模的不断扩展,解决管理问题的前提和依据是对系统的运行情况进行有效监测和分析。本文对基于 CORBA 的大规模事务处理监测系统中的主从式失效检测机制的设计与实现进行了研究。本机制的检测粒度

是对象级的。软构件(Software Component)技术是增大系统可重用粒度和管理粒度、改善系统可重用性和可管理性的主流技术,因此基于构件级的失效检测机制有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李小勇.大规模分布式环境下动态信任模型研究[J].软件学报,2007,18(6):1510-1521.
- [2] KIM H C, NAIR V S S. Software fault tolerance for distributed object based computing[J]. Journal of Systems and Software, 2000, 39(2):103-117.
- [3] GAMPEL O. Workload management, IBM Component Broker Connector Overview[J/OL]. [2006-12-10]. <http://www.ibm.com/public/pubs/bookmgr/redbooks/-sg242022.book>.
- [4] 仲盛,汲化,谢立.基于多服务器的分布对象系统的设计与实现[J].计算机学报,1998,21(Z):218-224.
- [5] KROEGER R. Automated CORBA-based Application Management [C]//DAIS 99. Helsinki, Finland: [s. n.], 1999.
- [6] BABU S, SUBRAMANIAN L, WIDOM J. A Data Stream Management System for Network Traffic Management[C]//NRDM. Santa Barbara, CA: [s. n.], 2001.
- [7] 李永丽.基于CORBA的分布式应用服务器的设计与实现[J].东北师大学报:自然科学版,2007,39(2):46-49.
- [8] 国防科技大学计算机学院网络所.分布计算软件平台 StarBus 3.0程序员指南手册[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.
- [9] 苏洋.软件新技术 CORBA[EB/OL]. [2008-01-02]. <http://resource.51cmm.com/NewTech/No011.htm?ID=256>.
- [10] OTS Specification 1.2[EB/OL]. [2008-01-02]. <http://www.omg.org>.
- [11] 朱幸辉,杨树强.基于CORBA的分布式对象监测系统的研究与实现[J].计算机应用研究,2005,22(10):39-41.
- [12] 曾春平,王超,张鹏.XML从入门到精通[M].北京:希望电子出版社,2002.

(上接第1843页)

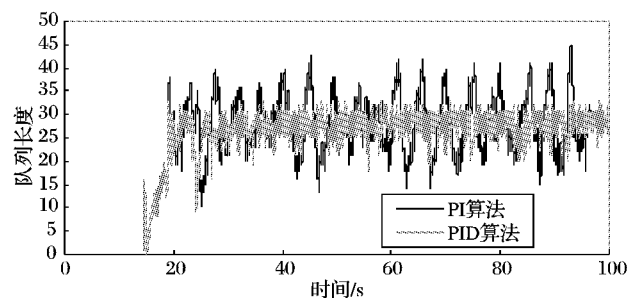


图5 PI算法和PID算法的队列长度曲线

4 结语

传统的PID工程整定方法往往只提供结果,缺乏稳定的理论依据。本文根据Ad Hoc网络环境的特点,分析了带时滞环节的TCP/AQM被控对象,针对不同的 k_d ,通过在 $k_p - k_i$ 平面上绘制PID控制器的稳定边界线,分别得出了 $k_p - k_i$ 平面上的PID算法稳定区域。通过与PID控制器传统整定方法的比较,稳定区域分析为TCP/AQM时滞系统的优化设计提供了理论依据。Matlab和NS2仿真表明,稳定区域分析可以有效辅助PID控制器设计,为进一步设计优化Ad Hoc网络的改进PID算法带来了方便。

参考文献:

- [1] CHLAMTAC I, CONTI M, LIU J. Mobile Ad Hoc networking: im-

- peratives and challenges [J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(1): 13-64.
- [2] HOLLOT C, MISRA V, TOWSLEY D. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[C]//Proceedings of the INFOCOMM 2001. Alaska: IEEE Computer Society, 2001: 1726-1734.
- [3] 吴启祥,胥布工,彭达洲.基于微分先行PI的主动队列管理算法[J].计算机应用,2004,24(11):16-18.
- [4] 钱艳平,李奇,刁翔.预测PI时滞网络拥塞控制算法设计及性能分析[J].控制理论与应用,2006,23(2):161-168.
- [5] LEE C H. A survey of PID controller design based on gain and phase margins[J]. International Journal of Computational Cognition, 2004, 2(3): 60-100.
- [6] RFC2309, Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [S]. 1998.
- [7] 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]//Proceedings of the ACM SIGCOMM. Stockholm: ACM Press, 2000: 151-160.
- [8] HOLLOT C, MISRA V, TOWSLEY D, et al. A control theoretic analysis of RED[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Press, 2001: 1510-1519.
- [9] FALL K, VARADHAN K. The Ns manual [EB/OL]. [2002-04-10]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html>.