

# 基于灰色预测可变裕度 PID 网络自适应算法

尹琦<sup>1,2</sup>, 袁小平<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 淮海工学院计算机科学系, 江苏连云港 222005)

**摘要:** 为了综合控制拥塞链路的队列长度, 提高 AQM 系统对动态网络环境的自适应能力, 提出了一种基于灰色预测和考虑可变裕度 PID 控制的自适应 TCP 网络主动队列管理。首先, 建立相角和幅值裕度与网络参数相关的 PID 自适应主动队列 (TCP/AQM) 控制论模型, 该模型可以根据网络参数的变化而动态改变控制参数, 以提高 AQM 网络动态自适应能力, 及系统的鲁棒性; 其次, 将灰色预测引入该模型, 实现路由器队列长度的超前预测, 补偿带有 PID 反馈模块的 AQM 算法给队列造成的时滞影响。与其他算法的仿真结果相比较, 该设计算法能够使信息流在较短的时间内稳定在期望队列长度阈值附近。

**关键词:** 主动队列管理; PID 控制; 灰色预测; 可变裕度

**中图分类号:** TP393; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)02-0711-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.02.083

## Adaptive algorithm of variable margin PID based on grey prediction

YIN Qi<sup>1,2</sup>, YUAN Xiao-ping<sup>1</sup>

(1. College of Information & Electric Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2. Dept. of Computer Science, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang Jiangsu 222005, China)

**Abstract:** In order to overcome the weakness of existing AQM algorithms based on the control theory and enhance AQM algorithm's self-adapting, this paper designed a new adaptive AQM algorithm of PID with variable gain and phase margins based on grey prediction. First, established the model of PID control for adaptive AQM. In this model, gain and phase margins of PID were changed with the variation of network parameters (round-trip time, link capacity, load factor), in order to enhance algorithm's self-adapting. Second, introduced grey prediction algorithm into model to achieve feedback data's advanced prediction, which could compensate PID feedback control for AQM's delay. Contrasted with traditional PID algorithm, adaptive AQM algorithm of PID with variable gain and phase margins, adaptive AQM algorithm of PID with variable gain and phase margins based on grey prediction can adjust itself to queue's threshold rapidly and stably.

**Key words:** active queue management (AQM); PID control; grey prediction; variable margin

主动队列管理机制 (AQM)<sup>[1]</sup>是为了解决网络拥塞控制问题而提出的一种拥塞恢复机制。该算法的主要思想是:在中间节点的路由器中增加智能预测环节,让路由器在队列满之前对网络拥塞进行早期通知,并在缓冲区满之前对包进行丢弃标记,从而避免网络拥塞的发生。通过在中间路由器部署该策略,其目标是保证网络运行在高吞吐率、低延迟、低丢包率的状态。为此, Floyd 等人<sup>[2]</sup>提出了 RED 算法。RED 算法采用平均队列长度作为拥塞控制的度量,采用随机丢弃包标志来控制队列长度,从而避免网络拥塞,但该算法存在着明显的缺陷,它的有效性严重依赖于控制参数,一旦控制参数选择不当,就会导致网络性能下降,延迟增大,吞吐率下降。为了克服有效性依赖参数的缺点,相继提出了基于动态变化的 RED 算法<sup>[3]</sup>、SRED 算法<sup>[4]</sup>等,其目的都是为了解决网络的稳态性,但都忽略了网络队列的瞬时性能。

除了以上提到的从基于启发式控制策略解决网络拥塞问题以外,许多学者从控制论的角度出发,提出了基于控制论的拥塞控制典型算法有 PI-AQM、自适应 PI-AQM 以及基于稳定裕度的 PID-AQM 等。基于控制论的 AQM 算法的优点就在于,

它能够从理论上实现在线估计网络参数,实时动态调整参数,从而解决了由于网络队列长度瞬时性变化给网络带来的不稳定性,同时减小了大时滞给网络带来的不利影响。

无论从哪个角度解决网络拥塞问题,都不可避免地要面临如何解决由于网络时滞性给网络带来的振荡和不稳定性。因此为了克服时滞性给队列稳定性造成的不利影响,提高网络的动态自适应能力,本文从控制论的角度出发,首先建立考虑相角和相位裕度随网络参数变化而自适应调整的 PID 模型。该模型解决了由于网络队列长度瞬时性变化给网络带来的不稳定性,提高了网络的动态自适应能力,同时引入灰色预测引入该模型实现路由器队列长度的超前预测,补偿带有 PID 反馈模块的 AQM 算法给队列造成的时滞影响。

### 1 自适应 PID 主动队列 (TCP/AQM) 控制模型

文献[5]中 Hollet 提出了线性 TCP/AQM 动态模型,如图 1 所示。其中  $C(s)$  为 AQM 控制器,  $P(s)$  代表被控对象的时滞二阶模型,  $P(s)$  的表达式如下:

收稿日期: 2011-05-31; 修回日期: 2011-07-07

作者简介: 尹琦(1973-),女,陕西西安人,副教授,博士研究生,主要研究方向为网络通信与信息检测 (yinqimail@yahoo.com.cn);袁小平(1968-),男,江苏仪征人,教授,博导,主要研究方向为通信与信息系统、信号与信息处理、电路与系统、煤矿安全监测等。

$$P(s) = \frac{R_0 C^3}{2N(R_0^2 SC + 2N)(SR_0 + 1)} \quad (1)$$

其中:  $C$  表示链路容量,  $R$  表示往返时间,  $N$  表示 TCP 连接数。

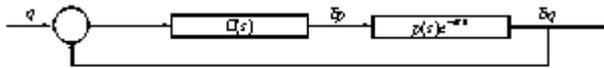


图1 TCP流量的 AQM 控制框图

Hollet 给出的 AQM 控制器的目标主要是满足以下三条网络特性:

- a) 高效队列利用率, 要求路由器缓冲区的队列既不溢出, 也不变空;
- b) 队列延迟及变化要小;
- c) 具有鲁棒性, 当网络参数 TCP 连接数  $N$ , 链路容量  $C$  和回路响应时间  $R$  变化时, 系统仍能保证 a) b) 两条特征。

因此本文从控制论的角度出发基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法, 用于保证以上三个特征。

## 2 考虑裕度可变的自适应 PID 主动队列控制模型

从上文中得到的 TCP/AQM 动态模型是一个带有时滞性的二阶模型系统。针对该模型, 文献[6]提出了一种传统的基于 PID 的主动队列管理方案。该方案通过引入 PID 算法增强了 AQM 系统的稳定性, 缩短了系统的响应时间, 但在复杂网络环境下, 该算法缺乏对动态网络的自适应能力。其主要原因在于, 传统的 PID 控制模型是假定参数固定, 通过某种参数整定方法来完成对  $k_p, k_i, k_d$  的设定, 一旦参数设定后, 无论网络流量、拓扑结构等如何变化, 还是网络中加入扰动环节, 传统的 PID 算法就无法根据网络的变化而实时调整参数。因此在文献[6]传统的 PID 主动队列管理中, 增加了考虑相角和相位裕度可变的自适应 PID 主动队列控制模型。该模型如图 2 所示。

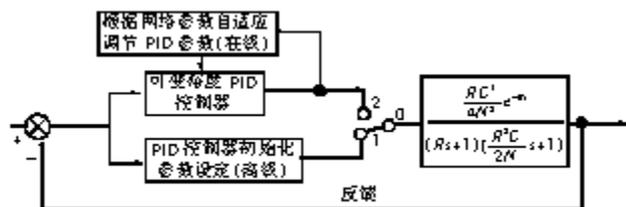


图2 考虑相角和相位裕度可变的自适应 PID 主动队列控制模型

### 2.1 基于裕度的 PID 初始化参数的整定

首先进行控制器参数的初始化整定, 将开关从 0 切换到 1, 在这一步初始假定网络在固定的环境进行。与传统 PID 控制器初始化参数一致, 本文采用文献[6, 7]中已经证明的 PID 控制器参数整定方法。步骤如下:

首先, 进行连续 PID 控制器的离散化

连续 PID 调节器算式为

$$D(t) = k_p e(t) + k_i \int edt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

使用增量式 PID 算法进行离散化, 用一系列的采样时间代替连续时间, 相邻两采样时刻输出的差值即为增量式离散化 PID 的表达式:

$$\Delta D(k) = k_p \left\{ \left[ 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right] e(k) - \left[ 1 + \frac{2T_d}{T} \right] e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right\} \quad (3)$$

其中:  $e(k) = Q(k) - Q_{ref}$ ,  $T_i = k_p/k_i$ ,  $T_d = k_d/k_p$ ,  $Q(k)$  表示缓冲

器队列长度,  $Q_{ref}$  为缓冲器队列长度期望上限值。

其次, 进行增量式离散化 PID 参数的整定。参数的整定采用稳定裕度法来进行  $k_p, k_i, k_d$  参数求解。根据稳定裕度法的定义, 有以下公式:

$$G_p(j\omega_p) \left\{ k_p + j \left[ k_d \omega_p - \frac{k_i}{\omega_p} \right] \right\} = -\frac{1}{A_m} \quad (4)$$

$$G_p(j\omega_g) \left\{ k_p + j \left[ k_d \omega_g - \frac{k_i}{\omega_g} \right] \right\} = -e^{j\varphi_m} \quad (5)$$

在对控制器进行初始化时, 首先要考虑的一个问题是: 对于一个闭环系统来说, 如果系统开环相频特性滞后  $\gamma$  度, 那么开环幅频特性将增大  $h$  倍, 则系统有可能处于临界稳定状态。因此, 要使系统稳定在队列阈值附近, 不超出临界稳定状态, 根据 Nyquist 稳定性要求, 选取  $A_m, \varphi_m$  分别满足  $2 \leq A_m \leq 4, \frac{\pi}{6} \leq \varphi_m \leq \frac{\pi}{3}$ 。在初始化时, 先假定  $A_m, \varphi_m$  为已知, 任意选取幅值裕度和相角裕度的值为 3 和  $\pi/3$ , 使其满足:  $2 \leq A_m \leq 4, \frac{\pi}{6} \leq \varphi_m \leq \frac{\pi}{3}$  即可。

从式(4)(5)可以看出, 在进行初始化参数选取时, 两个方程有五个未知数, 因此给出初始化相角截止频率的表达式为

$$\angle G_p(j\omega_p) = -\pi \quad (6)$$

本文根据所给条件求得系统的初始参数值分别为:  $k_p = 2.9736 \times 10^{-7}, k_i = 2.7326 \times 10^{-6}, k_d = 2.1410 \times 10^{-8}$ 。

### 2.2 考虑相角和幅值裕度可变的动态自适应参数的整定

初始化参数设定结束, 将开关从 0 切换到 2, 进行 PID 参数的在线自适应调整。利用上文所述基于裕度的参数整定方法可以看出, 系统的  $k_p, k_i, k_d$  与  $A_m, \varphi_m$  的值有关, 而  $A_m, \varphi_m$  的值又会随被控对象参数  $N, C, R$  的变化而变化。当网络被控对象参数有较大的变化而使  $A_m, \varphi_m$  落在  $2 \leq A_m \leq 4, \frac{\pi}{6} \leq \varphi_m \leq \frac{\pi}{3}$  的范围之外时, 就要通过 PID 控制器自适应进行参数调节, 使其满足网络稳定性要求, 因此在  $A_m, \varphi_m$  与被控对象参数及  $\omega_p, \omega_g$  之间建立如下关系公式。

$$A_m = \frac{2N\omega_p \sqrt{\omega_p^2 + \left(\frac{2N}{R_0}\right)^2} \sqrt{\omega_p^2 + \left(\frac{1}{R_0}\right)^2}}{C^2 \sqrt{K_p^2 \omega_p^2 + K_d^2 \omega_p^4 + K_i^2}} \quad (7)$$

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{K_p K_d \omega_g}{K_i} \right] - \arctan \left[ \frac{\omega_g}{\frac{2N}{R^2}} \right] - \arctan \left[ \frac{\omega_g}{\frac{1}{R_0}} \right] - \omega_g R_0 \quad (8)$$

其中  $\omega_p, \omega_g$  定义如下:

$$\omega_g^6 + \left[ \left( \frac{2N}{R_0^2 C} \right) + \left( \frac{1}{R_0} \right)^2 \right] \omega_g^4 + \left[ \left( \frac{2N}{R_0^3 C} \right)^2 - \frac{K_p^2 K_d^2 C^4}{4N^2} \right] \omega_g^2 - \frac{K_i^2 C^4}{4N^2} = 0 \quad (9)$$

$$- \arctan \left( \frac{\omega_p}{\frac{2N}{R_0^2 C}} \right) - \arctan \left( \frac{\omega_p}{\frac{1}{R_0}} \right) - \omega_p R_0 = -\frac{\pi}{2} - \arctan \left( \frac{K_p K_d}{K_i} \right) \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 当  $0 \leq \omega_p R_0 \leq \frac{\pi}{4}$  时, 有  $\tan(x) \approx x$ , 因此求解  $\omega_p$  分两种情况:

- a) 当  $0 \leq \omega_p R_0 \leq \frac{\pi}{4}$  时,  $\omega_p$  有如下公式:

$$\omega_p^4 + \left\{ \frac{2K_i}{R_0 K_p K_d} \left[ 1 + \frac{N}{R_0 C} \right] - \frac{1}{R_0^2} \left[ 1 + \frac{4N}{R_0 C} \right] \right\} \omega_p^2 - \frac{2NK_i}{R_0^4 CK_p K_d} = 0 \quad (11)$$

系统先根据式(11)计算出  $\omega_p$  的值,然后判断  $\omega_p R_0$  的值是否在  $0 \leq \omega_p R_0 \leq \frac{\pi}{4}$  范围内,若不在该范围内则采用式(12)计算出  $\omega_p$  的值。

b) 当  $\frac{\pi}{4} \leq \omega_p R_0 \leq \frac{\pi}{2}$  时,  $\omega_p$  有如下公式:

$$\omega_p^4 + \left[ \frac{2N}{R^2 C} + \left[ 2 - \frac{\pi}{4} \right] \frac{1}{R} - \frac{K_i}{K_p K_d} \right] \omega_p^2 - \frac{1}{R_0} \left[ \left[ 2 + \frac{\pi}{4} \right] \frac{2N}{R_0^2 C} + \left[ 1 + \frac{\pi}{4} - \frac{2NK_i}{CK_p K_d} \right] \frac{1}{R_0} - \left[ 2 + \frac{\pi}{4} \right] \frac{K_i}{K_p K_d} \right] \omega_p - \frac{1}{R^2} \left[ \left[ 1 - \frac{\pi}{4} \right] \frac{2N}{R^2 C} - \left[ 2 - \frac{\pi}{4} \right] \frac{2NK_i}{R_0 CK_p K_d} - \left[ 1 - \frac{\pi}{4} \right] \frac{K_i}{K_p K_d} \right] \omega_p - \frac{2NK_i}{R_0^4 CK_p} \left[ 1 + \frac{\pi}{4} \right] = 0 \quad (12)$$

### 2.3 考虑裕度可变的自适应 PID 主动队列算法步骤

a) 根据图 2 所示,进行 PID 初始化参数整定。首先估计网络参数  $N, R, C$  的值,给出  $A_m, \varphi_m$  初始化值,在这一步选取  $A_m = 3, \varphi_m = \frac{\pi}{3}$ , 根据式(2)~(6)计算出系统  $k_p, k_i, k_d$  的初始参数值。

b) 根据图 2 进行在线参数整定。利用式(7)~(10)在线调节  $A_m, \varphi_m$  的值。当  $N, C, R$  变化使  $A_m, \varphi_m$  落在  $2 \leq A_m \leq 4, \frac{\pi}{6} \leq \varphi_m \leq \frac{\pi}{3}$  范围之外时,返回到步骤 a), 以重新满足网络的稳定性要求。

c) 虽然考虑相角和幅值裕度可变的 PID 调节可以解决网络的稳定性问题,但网络的时滞性并不能得到很好的改善,因此本文章在第 3 章引入灰色预测来解决网络滞后问题。

### 3 基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法

考虑裕度可变的自适应 PID 主动队列控制模型解决了网络的稳定性问题,但是对于基于控制论的 AQM 算法对队列管理算法不可避免地都有网络滞后性问题,因此将灰色预测引入该模型,以实现路由器队列长度的超前预测,补偿带有 PID 反馈模块的 AQM 算法给队列造成的时滞影响,如图 3 所示。

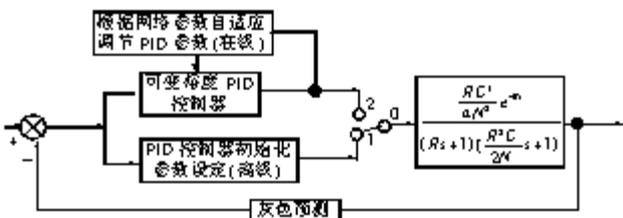


图 3 灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 框图

本文灰色预测主要借鉴文献[8]的方法,采用等维信息滚动算法。等维信息滚动算法的主要思想是:将系统的扰动考虑进 GM(1,1)中,重建 GM(1,1)进行预测,在建立的新信息模型中,要求每补充一个新信息的同时去掉一个老信息,以便在滚动建模时维持数据个数不变,防止随时间的推移老信息会淹没新信息。

本文将该算法应用于网络路由器的队列长度的提前预测中,用以补偿由于以上所述方法给网络带来的滞后。

设系统  $K$  时刻的采样值为  $Q^{(0)}(k)$ , 与此前的  $m-1$  个采样数据形成序列:

$$Q^{(0)} = (Q^{(0)}(k-m+1), Q^{(0)}(k-m+2), \dots, Q^{(0)}(k)) \quad (13)$$

根据 GM(1,1)模型解析解可得超前一步预测式为

$$Q^{(0)}(k+1) = \left[ Q^{(0)}(h-m+1) - \frac{b}{a} \right] e^{-am} + \frac{b}{a} \quad (14)$$

$d$  步预测为

$$Q^{(0)}(k+d) = \left[ Q^{(0)}(h-m+1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(m-d-1)} + \frac{b}{a} \quad (15)$$

其中:  $m$  为建模维数;  $a, b$  为  $K$  时刻辨识所得参数;  $d$  为预测步数。在进行灰色预测时,选取  $m=8, d=5$ 。

### 4 仿真结果及分析

仿真使用瓶颈链路网络拓扑如图 4 所示。参数选取如下: 链路带宽  $C_0 = 10$  Mbps,  $T_0 = 20$  ms, 节点到路由器带宽  $C_1 = C_2 = 10$  Mbps,  $T_1 = T_2 = 40$  ms。链路缓冲器最大容量 200 packets, 其中每个 packets = 1 000 Byte。往返时延  $R = 0.32$  s。采样时间  $t = 0.01$  s,  $Q$  缓冲器队列长度期望上限值 = 80 packets。在本文的仿真中选取最优幅值裕度和相角裕度分别为 3 和  $\pi/4$ 。本文对基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法、考虑裕度可变的自适应 PID 主动队列算法,以及传统的 PID 主动队列算法进行了比较分析。

仿真过程如下,在  $t_0 = 0$  时刻,启动 50 个 TCP, 从仿真结果图 5~7 可以看出,基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法,响应速度快,很快稳定在队列的期望值附近。在  $t_0 = 25$  s 时,又加入 40 个 FTP, 从图中可以看到,传统的 PID 主动队列算法出现了大幅的振荡,丢包情况明显,需要很长一段时间才能稳定下来,而可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法和基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法丢包率小,响应速度快,并且基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法更优于可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法。该算法既保持了较快的动态响应时间,也表现出了良好的稳定性,在业务干扰到来时,动态队列能快速地低超调地趋近于期望值 80 packet。

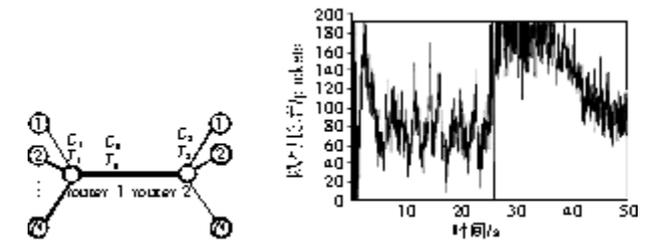


图 4 网络拓扑

图 5 传统 PID 主动队列算法

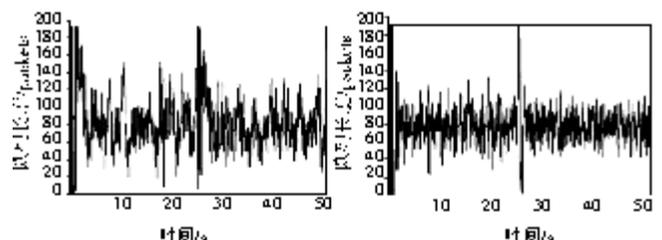


图 6 可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法

图 7 基于灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法

性能获得极大提升的同时,检测效果受到的负面影响极为微小;采用基于锦标赛选择的主动学习方法选择样本后,算法在使用相同数量训练样本情况下获得了更高的检测性能,从而能够有效控制所需训练样本的规模,并且算法的耗时更少。

另外,互联网在不断变化,需要周期性地获取训练样本。实验表明,采用本文所述的主动学习方法后,能够有效控制需要标注的样本数量,减少训练样本标注的工作量。

## 5 结束语

快速准确地识别 P2P 类型的流对于网络的维护与运营都具有重要意义,利用机器学习技术识别流是当前重要的研究方向之一,但该类方法的有效性严重依赖于训练样本的数量与质量,而训练样本的标注是非常困难且耗费人力的工作。本文引入主动学习方法筛选训练样本,能够以少量的训练样本,保证较好的召回率,极大地降低了由样本标注所耗费的工作量以及使用大量训练样本给算法带来的过大计算开销。实验表明:该方法行之有效,具有较高的召回率和较低的误报率,与同领域的有指导 P2P 识别方法相比,在减少建模成本,降低计算开销方面具有显著优势。

本文所提出的方法在实践应用中还需根据实际情况作进一步改进,以提高性能。如何将所述的算法应用于实际网络环境,并依据实际情况加以优化以及将该方法试用于其他类别流的识别,是下一步工作的重点。

### 参考文献:

- [1] MADHUKAR A, WILLIAMSON C. A longitudinal study of P2P traffic classification [C]//Proc of the 14th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation. 2006:179-188.
- [2] ESTEA A, GRINGOLIA F, SALGARELLI L. Support vector machines for TCP traffic classification [J]. *Computer Networks*, 2009, 53(14):2476-2490.
- [3] 邓河, 阳爱民, 刘永定. 一种基于 SVM 的 P2P 网络流量分类方法

[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(14):122-126.

- [4] MOORE D, ZUEV D. Internet traffic classification using Bayesian analysis techniques [C]//Proc of the 2005 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2005:50-60.
- [5] FRANK J. Machine learning and intrusion detection: current and future directions [C]//Proc of the the 17th Computer Security Conference. 1994.
- [6] DUNNIGAN T, OSTROUCHOV G. Flow characterization for intrusion detection [R]. [S. l.]: Oak Ridge National Laboratory, 2000.
- [7] ROUGHAN M, SEN S, SPATSCHECK O, *et al.* Class-of-service mapping for QoS: a statistical signature-based approach to IP traffic classification [C]//Proc of the 4th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2004:135-148.
- [8] AULD T, MOORE A W, GULL S F. Bayesian neural networks for Internet traffic classification [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2007, 18(1):223-239.
- [9] WILLIAMS N, ZANDER S, ARMITAGE G. A preliminary comparison of five machine learning algorithms for practical IP traffic flow classification [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2006, 36(5):5-16.
- [10] PARK B, HONG J W, WON Y J. Toward fine-grained traffic classification [J]. *Communications Magazine*, 2011, 49(7):104-111.
- [11] SIMON H A, LEA G. Problem solving and rule reduction, a unified view [J]. *Knowledge and Cognition*, 1974, 15(2):63-73.
- [12] VALIANT L G. A theory of learnable [J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(11):1134-1142.
- [13] BALDRIDGE J, OSBORNE M. Active learning for HPSG parse selection [C]//Proc of the 7th Conference on Natural Language Learning. 2003:100-108.
- [14] TONG S, KOLLER D. Support vector machine active learning with applications to text classification [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2002, 2(11):45-66.

(上接第 713 页)

## 5 结束语

本文研究的主要目的是将经典的控制论应用于网络控制中的主动队列管理算法研究中,通过在网络参数与可变裕度之间建立的关系,来适应网络实时动态变化,同时引入灰色预测来补偿由于可变裕度 PID 调节所引起的网络时滞性。从仿真的结果来看,灰色预测的可变裕度 PID 网络自适应 AQM 算法改进了 AQM 算法的动态适应能力,同时补偿了网络的时滞性问题。

### 参考文献:

- [1] BRADEN B, CLARK D, CROWCROFT J, *et al.* RFC 2309, Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [S]. 1998.
- [2] FLOYD S, JACOBSON V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1993, 1(4):397-413.
- [3] FENG W, KANDLUR D, SAHA D, *et al.* A self-configuration RED gateway [C]//Proc of the INFOCOM'99. New York: IEEE Computer

Society, 1999:1320-1328.

- [4] OTT T J, LAKSHMAN T V, WONG L H. SRED: stabilized RED [C]//Proc of the INFOCOM'99. New York: IEEE Computer Society, 1999:1346-1355.
- [5] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, *et al.* A control theoretic analysis of RED [C]//Proc of IEEE/INFOCOM. 2001:1235-1339.
- [6] 任丰原, 王福豹, 任勇, 等. 主动队列管理中 PID 控制器 [J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(1):94-99.
- [7] 任丰原, 林闯, 王福豹, 等. ATM 网络拥塞控制中 PID 控制器的设计 [J]. *软件学报*, 2002, 25(10):1024-1029.
- [8] 王军平, 王安, 敬忠良, 等. Fuzzy-Gray 预测控制算法及应用 [J]. *系统工程理论与实践*, 2002(8):132-135.
- [9] 孙雁飞, 张顺颐, 周雷. 基于模糊免疫 PID 的时滞网络自适应主动队列管理 [J]. *通信学报*, 2005, 26(8):36-42.
- [10] WU Wei, REN Yong, SHAN Xiu-ming. A self-configuring PI controller for active queue management [C]//Proc of the 7th Asia-Pacific Communication Conference (APCC'2001). 2001.
- [11] FUNG H K, WANG Q G, LEE T H. PI tuning in terms of gain and phase margins [J]. *Automatica*, 1998, 34(9):1145-1149.
- [12] 汪浩, 严伟, 黄明和, 等. 稳定裕度与网络特征参数无关的 AQM 算法 [J]. *计算机工程*, 2010, 36(4):12-15.