

基于精确模型的网络拥塞控制算法

陆锦军^{1,2}, 王执铨¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 南京 210094; 2. 南通职业大学现代教育技术中心, 南通 226007)

摘 要: 针对基于流体流理论提出的网络模型在推导过程中的一些近似使得该模型对网络行为描述的不精确问题, 提出了网络流量的精确模型, 并且基于该模型把一种新的 PID 及类 PID 设计方法用于主动队列管理(AQM)控制器的设计, 利用约束化的数值优化方法寻找控制器参数。理论分析和仿真实验表明, 该控制算法的综合性能优于 PI 算法。

关键词: 网络精确模型; 拥塞控制; 主动队列管理; 类 PID 控制

Network Congestion Control Algorithm Based on Exact Model

LU Jinjun^{1,2}, WANG Zhiqian¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094;
2. Center of Education and Technology, Nantong Vocational College, Nantong 226007)

【Abstract】 Some flaws are inevitable due to its approximation in the model evolution which is based on fluid flow theory. An exact model of network fluid flow is presented. Based on this new model, a novel proportional integral differential (PID) and PID-like controller design method is applied to active queue management(AQM), and a numerical optimization algorithm is used to search the controller parameters. Theoretical analysis and simulation experimental results show that the integrated performance of the proposed algorithm is obviously superior to that of the existing PI algorithm.

【Key words】 Network exact model; Congestion control; Active queue management(AQM); PID-like controller

网络拥塞控制属于自动控制和计算机科学两个学科的交叉点, 是目前Internet研究领域的一个技术热点, 已相继产生了不少有影响力的算法, 如RED^[1]、ARED^[2]、SRED^[3]、BLUE^[4]等, 同时也出现了许多基于网络流量的控制模型, 但较具影响力的是V Misra等人于2000年基于流体流理论提出的网络模型^[5], 该模型较恰当地描述了TCP传输流的行为^[6], 为研究人员广为采用, 根据该模型, 产生了PI^[7]、PID^[8]、改进PID^[10]等AQM算法, 这些算法改善了网络的拥塞性能, 但在大时滞、小期望队列时, 性能有所下降。针对文献[5]所提出的网络模型在某些情况下对网络行为描述的不精确, 提出网络流量的精确模型, 把文献[10]提出的PID及类PID的控制器设计方法用于AQM控制器的设计中, 建立了一种新的PID拥塞控制算法, 采用 $4\sigma + \omega^2 + e \leq 0$ 的抛物线区域作为D稳定域, 根据控制理论, 当系统特征根位于该抛物线左侧时, 系统将获得较好的动、静态性能。理论分析和仿真实验表明, 新的算法与PI等算法相比较, 平均队列长度更趋于期望值, 队列抖动更小, 链路利用率更高, 调节时间更短。

1 TCP/AQM 简化模型及其 AQM 控制性能

V Misra等人在分析网络连续数据流和随机微分方程的基础上, 建立了TCP的动态模型^[6], 用如下一组非线性微分方程来描述:

$$\begin{cases} \frac{dW(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))} p(t-R(t)) \\ \frac{dq(t)}{dt} = \frac{N(t)}{R(t)} W(t) - C(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: W 为预期的 TCP 拥塞窗口的大小(包); q 为预期的队

列长度(包); $R(t)$ 为往返时间; $R(t) = \frac{q(t)}{C(t)} + T_p$, T_p 为传输延时; C 为链路容量; N 为激活 TCP 连接数; P 为分组的丢弃概率, P 的取值范围为 $[0, 1]$; q 和 W 满足 $q \in [0, \bar{q}]$, $W \in [0, \bar{W}]$ 。其中, \bar{q} 、 \bar{W} 分别表示缓存容量和最大窗口尺寸。

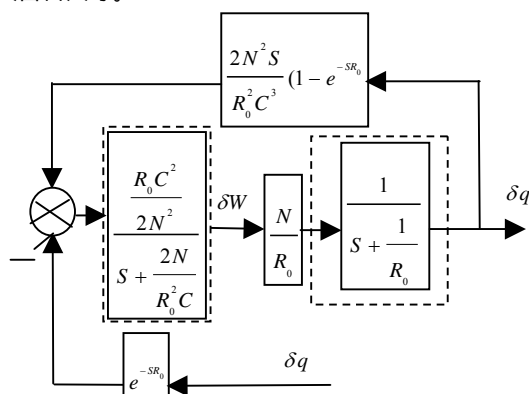


图1 线性化的 TCP 连接

利用稳态工作点附近的小信号线性化处理式(1)得到如图1所示的线性化 TCP 连接的方框图。分析稳态工作点各参

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60374066); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2004132); 博士点基金资助项目(20020288025)

作者简介: 陆锦军(1964-), 男, 副教授, 主研方向: 网络系统的拥塞控制, 智能控制理论与应用; 王执铨, 教授、博导

收稿日期: 2006-03-15

E-mail: lj@mail.ntvc.edu.cn

数之间的关系,在 $W \gg 1$ 时, $e^{-R_0 S} \approx 1$, 忽略高频性能得到如图 2 所示的 TCP 连接的线性化简化框图。在图 2 中加入 AQM 控制算法,最终可得到如图 3 所示的基于简化模型的 AQM 控制系统框图。

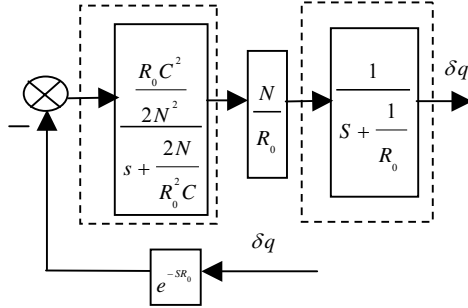


图 2 线性化 TCP 连接的简化

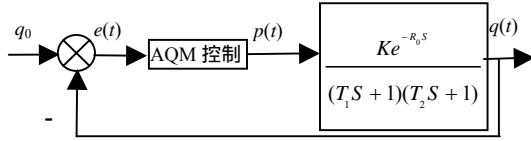


图 3 基于简化模型的 AQM 控制系统

其中 $K = \frac{(R_0 C)^3}{4N^2}$, $T_1 = R_0$, $T_2 = \frac{R_0^2 C}{2N}$ 。

在文献[9]中,把一种新的 PID 及类 PID 设计用于上述基于简化模型的 AQM 控制器,研究表明,基于简化模型的 AQM 算法无法正常运行于大时滞小期望队列的系统中。然而,在现实的网络系统中,跨洲越洋的 TCP 连接中,RTT 时间往往有上百毫秒,在小延时的 LAN 或 MAN 上适应的算法未必能有效工作在大时滞的 WAN 网络环境下,故对大时滞网络下的算法性能进行研究显得十分重要。

2 网络的精确模型

在由式(1)推导至图 2 所示的模型中,曾经作了这样的假设,当拥塞控制达到稳态时,拥塞窗口远远大于 1,即 $W \gg 1$, $e^{-R_0 S} \approx 1$,但是在系统达到稳态前,某些情况无法保证拥塞窗口远大于 1,例如业务流很多或网络总的负载能力较差,这时即使达到稳态,对每个业务流来说,分配到的带宽也较小,小的带宽将导致发送窗口减小,无法保证拥塞窗口远远大于 1,为此,必须对式(1)作精确推导。

$$\delta W = -\frac{1}{S} \left[\frac{N}{R_0^2 C} \left(1 + e^{-R_0 S} \right) \delta W + \frac{R_0 C^2}{2N^2} e^{-R_0 S} \delta p \right]$$

$$\text{即 } \frac{\delta W}{\delta p} = \frac{-\frac{R_0 C^2}{2N^2} e^{-R_0 S}}{S + \frac{N}{R_0^2 C} \left(1 + e^{-R_0 S} \right)} \quad (2)$$

得到基于网络精确模型的 AQM 控制框图如图 4 所示。

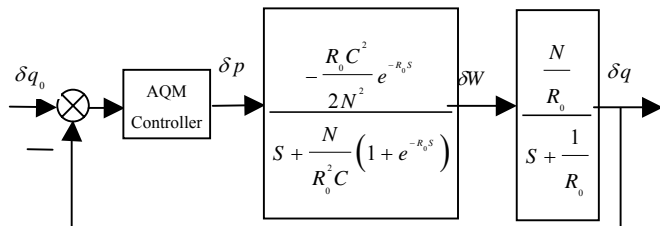


图 4 基于网络精确模型的 AQM 控制

显然,精确网络模型可以更加准确地描述网络行为,但是在模型中引入时滞环节会使阶数增加,计算变得更加复杂。

3 基于精确模型的 AQM 控制器的设计方法

不妨假设图 4 中的 AQM 控制器仍具有 PID 形式,采用文献[10]提出的控制器设计方法,通过调节特征根的分布来获取具有良好性能的控制参数。

设 $G_c(s)$ 为 AQM 控制器,其传递函数为

$$G_c(S) = \frac{N_c(S)}{D_c(S)} = K_p + K_i \frac{1}{S} + K_d S \quad (3)$$

其中, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

$G_p(S)$ 为被控对象传递函数

$$G_p(S) = \frac{N_p(S)}{D_p(S)} = \frac{a_0 + a_1 S + \dots + a_{na-1} S^{na-1} + a_{na} S^{na}}{b_0 + b_1 S + \dots + b_{nb-1} S^{nb-1} + S^{nb}} e^{-R_0 S} \quad (4)$$

其中, $nb > na$, $a_i (i=0,1,\dots,na)$, $b_j (j=0,1,\dots,nb-1)$, 而 R_0 为滞后延迟。

$$e^{-R_0 S} = \frac{1 - \frac{R_0}{2} S}{1 + \frac{R_0}{2} S} = \frac{1 - TS}{1 + TS} \quad (T = 0.5R_0) \quad (5)$$

$$G_p(S) = \frac{c_0 + c_1 S + c_m S^m + c_{na+1} S^{na+1}}{d_0 + d_1 S + d_n S^n + d_{nb+1} S^{nb+1}} = \frac{N_p(S)}{D_p(S)} \quad (6)$$

其中 $c_0 = a_0$, $c_i = a_i - T a_{i-1} (i=1,2,\dots,na)$, $c_{na+1} = -T a_{na}$, $d_0 = b_0$, $d_j = b_j + T b_{j-1} (j=1,2,\dots,nb-1)$, $d_{nb} = 1 + T b_{nb-1}$, $d_{nb+1} = T$ 。

闭环传递函数 $G(S)$ 为

$$G(S) = \frac{N(S)}{D(S)} = \frac{G_c(S)G_p(S)}{1 + G_c(S)G_p(S)}$$

故特征多项式 $D(S)$ 为

$$D(S) = N_c(S)N_p(S) + D_c(S)D_p(S) = [c_0 k_i + (c_0 k_p + c_1 k_i)S + (c_0 k_d + c_1 k_p + c_2 k_i)S^2 + \dots + c_{na+1} k_d S^{na+3}] + [d_0 S + d_1 S^2 + \dots + d_{nb+1} S^{nb+2}] = c_0 k_i + (c_0 k_p + c_1 k_i + d_0)S + \dots + (c_{na+1} k_d + d_{nb+1})S^{nb+2} \quad (7)$$

即闭环系统 n 阶特征多项式

$$D(S, U) = a_0(U) + a_1(U)S + \dots + a_n(U)S^n \quad (8)$$

其中,未知矢量 U , $U = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$ 代表控制器中的 m 个设计参数。在 D 稳定区域及其边界依据式(8)求 n 个特征根便得到 u 。

设特征根 $S_i = \sigma_i + j\omega_i$, $i=1,2,\dots,n$,

令 $\Sigma_i = [\sigma_i, \sigma_2, \dots, \sigma_i]$, $\Omega_i = [\omega_i, \omega_2, \dots, \omega_i]$, $i=1,2,\dots,n$,

因此特征多项式:

$$D(S) = \prod_{i=1}^n (S - S_i) = [\alpha_0(\Sigma_n, \Omega_n) + j\beta_0(\Sigma_n, \Omega_n)] + [\alpha_1(\Sigma_n, \Omega_n) + j\beta_1(\Sigma_n, \Omega_n)]S + \dots + [\alpha_{n-1}(\Sigma_n, \Omega_n) + j\beta_{n-1}(\Sigma_n, \Omega_n)]S^{n-1} + S^n \quad (9)$$

其中 $\alpha_i(\Sigma_n, \Omega_n)$, $\beta_i(\Sigma_n, \Omega_n)$, $i=0,1,2,\dots,n-1$, $\Sigma_n = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$,

$\Omega_n = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 。

当 $n=1$ 时, $\alpha_0(\Sigma_1, \Omega_1) = -\sigma_1$, $\beta_0(\Sigma_1, \Omega_1) = -\omega_1$;

当 $n>1$ 时,

$$\alpha_0(\Sigma_n, \Omega_n) = -\alpha_0(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\sigma_n + \beta_0(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\omega_n$$

$$\beta_0(\Sigma_n, \Omega_n) = -\beta_0(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\sigma_n + \alpha_0(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\omega_n$$

$$\begin{aligned}\alpha_j(\Sigma_n, \Omega_n) &= \alpha_{j-1}(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1}) - \alpha_j(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\sigma_n \\ &\quad + \beta_j(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\omega_n, j=1, \dots, n-2 \\ \beta_j(\Sigma_n, \Omega_n) &= \beta_{j-1}(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1}) - \beta_j(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\sigma_n \\ &\quad - \alpha_j(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1})\omega_n, j=1, \dots, n-2 \\ \alpha_{n-1}(\Sigma_n, \Omega_n) &= \alpha_{n-2}(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1}) - \sigma_n \\ \beta_{n-1}(\Sigma_n, \Omega_n) &= \beta_{n-2}(\Sigma_{n-1}, \Omega_{n-1}) - \omega_n\end{aligned}\quad (10)$$

式(8)和式(9)有同样的特征根, 故

$$a_n(U)\alpha_j(\Sigma_n, \Omega_n) = a_j(U), \beta_j(\Sigma_n, \Omega_n) = 0, j=0, 1, \dots, n-1 \quad (11)$$

D 稳定区域用 $g(\sigma, \omega) \leq 0$ 表示, 故

$$g(\sigma_i, \omega_i) \leq 0, i=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

上式包含了所有待求的特征根 (Σ_n, Ω_n) , 令向量

$X = [U, \Sigma_n, \Omega_n]$ 并且同时满足式(11)、式(12)就可以得到在 D 区域稳定的控制器, 求解控制器参数就转化成为一个带有约束的数值优化问题^[11,12], 限于篇幅, 在此不详述。

4 算例

根据上述方法设计 AQM 控制器^[10], 得到精确模型的传递函数:

$$G_p(S) = \frac{\delta q}{\delta p} = -\frac{\frac{R_0 C^2}{2N^2} e^{-R_0 S}}{S + \frac{N}{R_0^2 C} (1 + e^{-R_0 S})} - \frac{\frac{N}{R_0}}{S + \frac{1}{R_0}} \quad (13)$$

将式(3)、式(5)、式(13)代入式(8), 得到系统的特征多项式:

$$D(S, U) = a_4 S^4 + a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0 \quad (14)$$

其中: $a_4 = NR_0$, $a_3 = 3NR_0 + \frac{1}{2}R_0^2 C^2 k_d$,

$$a_2 = \frac{4N^2}{CR_0} + 2N + \frac{1}{2}R_0^2 C^2 k_p - R_0^2 C^2 k_d, \quad a_1 = \frac{4N^2}{CR_0} - R_0^2 C^2 k_p + \frac{1}{2}R_0^2 C^2 k_i, \quad a_0 = -R_0^2 C^2 k_i$$

由式(9)可知 $D(S)$ 也可表示为

$$D(S) = \prod_{i=1}^n (S - S_i) \quad (15)$$

将式(15)展开与式(14)比较, 可得

$$a_4(\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4 + \omega_1\omega_2\omega_3\omega_4 - \sigma_1\sigma_2\omega_3\omega_4 - \sigma_1\sigma_3\omega_2\omega_4 - \sigma_1\sigma_4\omega_2\omega_3 - \sigma_2\sigma_3\omega_1\omega_4 - \sigma_2\sigma_4\omega_1\omega_3 - \sigma_3\sigma_4\omega_1\omega_2) = a_0$$

$$a_4(\sigma_1\sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_2\sigma_4 + \sigma_1\sigma_3\sigma_4 + \sigma_2\sigma_3\sigma_4 - \sigma_3\omega_1\omega_2 - \sigma_4\omega_1\omega_2 - \sigma_4\omega_1\omega_3 - \sigma_4\omega_2\omega_3 - \sigma_1\omega_2\omega_3 - \sigma_1\omega_2\omega_4 - \sigma_1\omega_3\omega_4 - \sigma_2\omega_3\omega_4 - \sigma_2\omega_1\omega_3 - \sigma_2\omega_1\omega_4 - \sigma_3\omega_1\omega_4 - \sigma_3\omega_2\omega_4) = -a_1$$

$$a_4(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_1\sigma_4 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_2\sigma_4 + \sigma_3\sigma_4 - \omega_1\omega_2 - \omega_1\omega_3 - \omega_1\omega_4 - \omega_2\omega_3 - \omega_2\omega_4 - \omega_3\omega_4) = a_2$$

$$a_4(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4) = -a_3$$

$$\sigma_1\sigma_2\sigma_3\omega_4 + \sigma_1\sigma_2\sigma_4\omega_3 + \sigma_1\sigma_3\sigma_4\omega_2 - \sigma_1\omega_2\omega_3\omega_4 + \sigma_2\sigma_3\sigma_4\omega_1 - \sigma_2\omega_1\omega_3\omega_4 - \sigma_3\omega_1\omega_2\omega_4 - \sigma_4\omega_1\omega_2\omega_3 = 0$$

$$\begin{aligned}&\sigma_1\sigma_2\omega_3 + \sigma_1\sigma_2\omega_4 + \sigma_1\sigma_3\omega_4 + \sigma_2\sigma_3\omega_4 - \omega_1\omega_2\omega_3 - \omega_1\omega_2\omega_4 \\ &- \omega_1\omega_3\omega_4 - \omega_2\omega_3\omega_4 + \sigma_1\sigma_3\omega_2 + \sigma_1\sigma_4\omega_2 + \sigma_1\sigma_4\omega_3 + \sigma_2\sigma_4\omega_3 \\ &+ \sigma_2\sigma_3\omega_1 + \sigma_2\sigma_4\omega_1 + \sigma_3\sigma_4\omega_1 + \sigma_3\sigma_4\omega_2 = 0 \\ &\sigma_1\omega_2 + \sigma_2\omega_1 + \sigma_1\omega_3 + \sigma_3\omega_1 + \sigma_1\omega_4 + \sigma_4\omega_1 + \sigma_2\omega_4 + \sigma_4\omega_2 \\ &+ \sigma_2\omega_3 + \sigma_3\omega_2 + \sigma_3\omega_4 + \sigma_4\omega_3 = 0 \\ &\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 0\end{aligned}\quad (16)$$

设计一个稳定域 D, 使得所有的特征根 S_i 位于 D 稳定域内或其边界上时, 系统具有良好的性能:

$$D \cup \partial D: 4\sigma_i + \omega_i^2 + e \leq 0 \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (17)$$

若向量 $X = [K_p, K_i, K_d, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]^T$ 同时满足式(16)和式(17), 那么就可以得到一个满足 D 稳定域要求的控制器, 利用带有约束的数值优化的理论及方法^[11,12]可以求出控制器的设计参数。

设 $C=15\text{Mbps}$, $N=60$, $R=400\text{ms}$, 据上述方法, 得到不同 e 下的 K_p, K_i, K_d 的控制参数如表 1 所示, 不同的控制参数便得到不同的 D 稳定区域。

表 1 不同 e 下的 PID 控制参数

e	0	1	2	3	4	5	6
$K_p(10^{-5})$	2.599	2.682	2.984	3.113	3.196	2.965	2.984
$K_i(10^{-6})$	2.599	5.802	10.152	13.428	14.519	13.495	12.805
$K_d(10^{-6})$	8.599	8.762	9.408	9.886	9.912	9.719	9.699

至此, 我们得到了具有时滞补偿能力的 AQM 控制器参数, 其离散的 PID 表达式为

$$p(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (18)$$

其中 $e(k) = q(k) - q_0$, $q(k)$ 是第 k 时刻的队列长度采样值, q_0 为期望队列长度, $p(k)$ 为 k 时刻的丢包概率。

其增量形式为

$$\Delta p(k) = K_p \left\{ \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right\} \quad (19)$$

其中 $T_i = \frac{K_p}{K_i}$, $T_d = \frac{K_d}{K_p}$, $T=0.00625\text{s}$

$$c(k) = c(k-1) + \Delta p(k) \quad (20)$$

分组丢包概率

$$p(k) = \begin{cases} 0 & c(k) < 0 \\ c(k) & 0 \leq c(k) \leq 1 \\ 1 & c(k) > 1 \end{cases} \quad (21)$$

5 仿真实验及其分析

我们运用 NS2 网络仿真器验证本算法的性能。网络拓扑结构如图 5 所示, 仿真实验结果与 PI 典型算法进行比较。

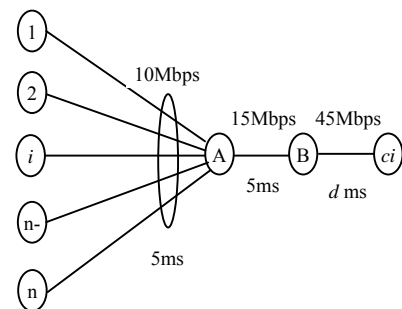


图 5 网络拓扑结构

节点A和节点B之间的瓶颈链路容量 15Mbps, 延时 5ms。 n 个持久性的 FTP 业务源与节点 A 之间的链路容量均为 10Mbps, 通常情况之下延时 5ms, 节点 B 和节点 C 之间的延时为 d ms。PI 和 PID 的队列长度的期望值为 150packets; 各节点缓存大小均为 300packets^[7]。

实验 1 考察大时滞对算法性能的影响。 n 取 60, 时延 d 取 220ms, 所有 FTP 业务源均在 0 时刻启动。瓶颈链路的容量为 15Mbps, RTT 时间约为 0.6s, 主要包括传播时延、排队时延等。实验仿真结果如图 6 所示。

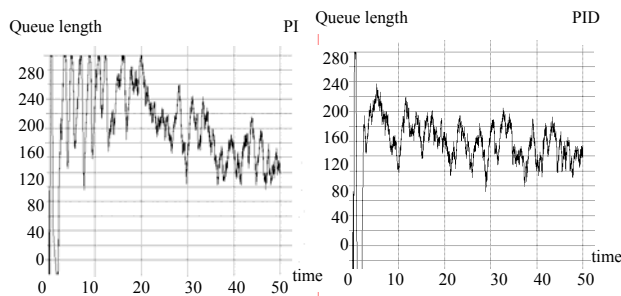


图 6 PI、PID 队列长度($d=220$ ms)

从实验结果可以看出, PI 抖动厉害, 调整到稳定状态需要的时间较长, 丢包率较高, 相比之下, PID 算法具有较快的响应速度, 综合性能较好。

实验 2 考察延时变化对算法性能的影响。 n 取 60, 所有的 FTP 业务源均在 0 时刻启动, d 从 2ms 到 220ms 变化, 实验仿真结果如图 7 所示, 由于延时的改变, 各算法均受到影响, 但 PID 调整到稳态最快, 抖动小, 空队列出现率和丢包率均较少, 体现了更好的性能。

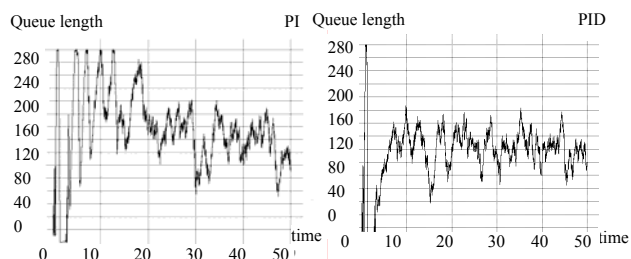


图 7 PI、PID 队列长度(d 从 2ms 到 220ms 变化)

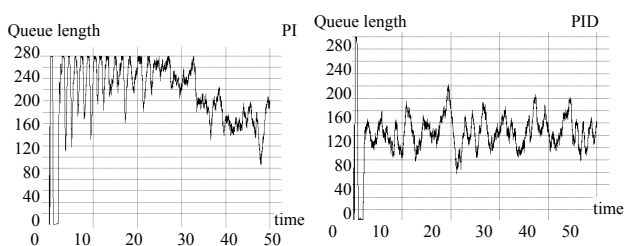


图 8 PI、PID 队列长度(n 增长至 70)

实验 3 考察突发业务流的冲击对算法的影响, n 取 70, 时延 d 取 220ms, 有 60 个 FTP 业务源均在 0 时刻启动, 还有 10 个在 15 时启动, 发送 100KB 后停止。仿真结果如图 8 所示。由图看出, 当引入突发业务流时, PI 影响最大, 队列

长度有所上升, 而这些突发业务量终止时, 其队列有所下降, 出现较大振荡, 相比之下, PID 体现了较强的抗干扰能力, 性能较好。

6 结论

本文针对文献[5]所提出的网络模型在某些情况下对网络行为描述不精确, 提出了网络流量的精确模型, 并且把文献[10]提出的 PID 及类 PID 的控制器设计方法用于 AQM 控制器的设计中, 建立了一种新的 PID 拥塞控制算法, 采用 $4\sigma + \omega^2 + e \leq 0$ 的抛物线区域作为 D 稳定域。当 e 增大时, 抛物线将向复平面左侧平移, 特征根的选择区域减小, 当系统特征根位于该抛物线左侧时, 系统将获得较好的动、静态性能。仿真实验表明, 新的 PID 算法具有较好的综合性能, 表现为平均队列长度更趋于期望值; 调节时间更短, 队列长度的抖动更小, 链路利用率更高, 自适应能力更强。

参考文献

- Christiansen M, Jeffay K, Ott D, et al. Turing RED for Web Traffic[J]. ACM Computer Communication Review, 2000, 30(4): 139-150.
- Feng W, Kandlur D, Saha D, et al. A Self-configuration RED Gateway[C]. Proceedings of the INFOCOM'99, 1999: 1320-1328.
- Ott T J, Lakshman T V, Wong L H. SRED: Stabilized RED[C]. Proceedings of the INFOCOM'99, 1999: 1346-1355.
- Athuraliya S, Low S, Li V H, et al. REM: Active Queue Management[J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48-53.
- 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]. Proc. of ACM/SIGCOMM, 2000: 151-160.
- Hollot C V, Misra V, Towsley D, et al. A Control Theoretic Analysis of RED[C]. Proc. of IEEE INFOCOM, Alaska, USA, 2001: 1510-1519.
- Hollot C V, Misra V, Towsley D, et al. On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows[C]. Proc. of IEEE INFOCOM, Alaska, USA, 2001: 1726-1734.
- 任丰原, 林 闯, 任 勇等. 大时滞网络中的拥塞控制算法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 503-511.
- Wang Y J, Wang X L, Zhou J H, et al. Congestion Control of AQM Routers by an Improved PID Controller[C]. Proceedings of the 4th International Symposium on Communication Systems, Network and Digital Signal Processing, Newcastle, UK, 2004: 332-325.
- Wang Y J, Schinkel M, Hartmann S T, et al. PID and PID-like Controller Design by Pole Assignment Within D-stable Regions[J]. Asian Journal of Control, 2002, 4(4): 423-432.
- Dennies J R, Schanabel R B. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations[M]. Amsterdam: Prentice-Hall, 1989.
- Leva L, Colombo A M. Method for Optimizing Set-point Weights in ISA-PID Auto Tuners[J]. IEE Proceedings of Control Theory and Applications, 1999, 146(2): 137-146.