

# 稳定裕度与网络特征参数无关的 AQM 算法

汪 浩<sup>1</sup>, 严 伟<sup>2</sup>, 黄明和<sup>1</sup>, 郭 斌<sup>1</sup>

(1. 江西师范大学软件学院, 南昌 330022; 2. 北京大学信息科学技术学院光纤通信系统与网络国家重点实验室, 北京 100871)

**摘 要:** 针对现有基于控制论的主动队列管理(AQM)算法的不足, 设计一种稳定裕度与网络特征参数(往返时延、通过瓶颈链路的 TCP 连接数、瓶颈链路的容量)无关的基于 PI 控制器的 AQM 算法 GPM-PI。该算法响应速度快、计算开销小, 能用于大时滞网络环境, 抗干扰能力强(对 TCP 短流和 UDP 流有良好的控制能力), 鲁棒性好, 能更好地适应 Internet 环境下的主动队列管理。

**关键词:** 拥塞控制; 主动队列管理; 稳定裕度; 抗干扰

## AQM Algorithm with Stability Margin Independent on Network Feature Parameters

WANG Hao<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>2</sup>, HUANG Ming-he<sup>1</sup>, GUO Bing<sup>1</sup>

(1. School of Software, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022; 2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Information Science and Technology, Peking University, Beijing 100871)

**【Abstract】**To overcome the weakness of existing AQM algorithms based on the control theory, a new AQM algorithm GPM-PI based on PI control is designed with the gain and phase margins constant. For the gain and phase margins of GPM-PI are independent on the network parameters(the RTT, the number of active connections of long lived TCP flows, the capacity of bottleneck), GPM-PI can be used in networks with large delay, has the properties of fast response, anti-disturbance and robustness, and it is more suitable for Internet environment.

**【Key words】** congestion control; Active Queue Management(AQM); stability margin; anti-disturbance

### 1 概述

拥塞控制是保证 Internet 网络有效可靠运行的关键技术之一。Internet 拥塞控制机制由路由器上的主动队列管理(Active Queue Management, AQM)和 TCP 协议的端到端拥塞控制算法组成。AQM 通过网络中间节点随机地丢弃 IP 包, 期望达到较低的排队延时和较高的数据吞吐量的目标。鲁棒的 AQM 算法是目前 Internet 领域的一个研究热点, 相继提出了不少有影响力的算法, 表 1 总结了这些有影响力的 AQM 算法的优缺点。

表 1 若干有影响力的 AQM 算法的优缺点

算法	发表年份	优点	缺点
Hollot-PI <sup>[1-2]</sup>	2001	比 RED 好	响应速度太慢, 抗干扰能力弱
Self-tuning PI <sup>[3-5]</sup>	2007	响应速度快	与 PI 或 PID 相比算法太复杂, 算法计算开销大
R-PI <sup>[6]</sup>	2004	响应速度快	与 PI 或 PID 相比算法复杂, 算法计算开销大
P <sup>2</sup> I <sup>[7]</sup>	2002	响应速度快	与 PI 或 PID 相比算法复杂, 算法计算开销大
Fuzzy PI <sup>[8]</sup>	2004	响应速度快	与 PI 或 PID 相比算法复杂, 算法计算开销大
PI <sup>[9]</sup>	2003	响应速度快, 抗干扰能力强	不能用于大时滞网络环境
PAQM <sup>[10,11]</sup>	2004	响应速度快	不能用于大时滞网络环境
REN-PID <sup>[12]</sup>	2003	响应速度快, 算法简单	抗干扰能力较弱
DC-AQM <sup>[13-14]</sup>	2005	响应速度快, 算法简单	抗干扰能力较弱
IMC-Smith <sup>[15]</sup>	2006	能用于大时滞网络环境	抗干扰能力较弱
Pre-PID <sup>[16]</sup>	2003	响应速度快, 算法简单	抗干扰能力较弱
LQR-PID <sup>[17]</sup>	2004	响应速度快, 算法简单	抗干扰能力较弱

从表 1 可以看出: Hollot-PI 算法的响应速度太慢;

Self-tuning PI, R-PI, P<sup>2</sup>I, Fuzzy PI 等算法的计算开销太大, 从而降低了路由器转发 IP 包的效率; PIP, PAQM, Pre-PID 等算法不能用于大时滞网络环境, 从而不能用于 Internet 之类有较大时滞的广域网络; REN-PID, DC-AQM, IMC-Smith 等算法的抗干扰能力较弱(即缺乏对 TCP 短流和 UDP 流的控制能力), 随着 Internet 中多媒体业务流量(IP 电话/视频点播)的增加, 算法会变得不稳定。

一个好的 AQM 控制器(算法)除了满足稳定性的要求外, 还应具备如下特性:

(1)响应速度快(或者调节时间短): 当网络流量发生变化时, 路由器缓存队列瞬时长度回到参考队列长度附近的时间, 调节时间越短越好。

(2)算法简单, 计算开销小: 由于路由器面临转发大量 IP 包的繁重任务, 因此要求 AQM 算法能判断网络是否发生拥塞, 计算“丢包/标记”概率的开销要小, 以提高路由器转发 IP 包的效率。

(3)能用于大时滞网络环境: 由于 Internet 是全球性的广域网络, 往返时延(RTT)变化大, 因此要求 AQM 算法在大时

**基金项目:** 国家“973”计划基金资助项目(2009CB320504); 国家科技支撑计划基金资助项目(2008BAH37B09); 江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ08153); 江西师范大学博士启动基金资助项目“基于控制论的主动队列管理算法研究”; 江西师范大学科研计划基金资助项目“一类基于 PI/PID 控制器的 Internet 拥塞控制新算法”

**作者简介:** 汪 浩(1962-), 男, 教授、博士, 主研方向: 拥塞控制, QoS; 严 伟, 副教授、硕士; 黄明和, 教授; 郭 斌, 副教授

**收稿日期:** 2009-08-23 **E-mail:** wanghao@jxnu.edu.cn

滞网络环境下仍具备良好的性能。

(4)抗干扰能力强：非响应业务流量(即 TCP 短流和 UDP 流)可以看成是对 AQM 控制器的干扰。随着 Web 应用和分布式多媒体应用的普及,非响应业务流量越来越多,要求 AQM 控制器对 TCP 短流和 UDP 流有良好的控制能力。

(5)鲁棒性好：鲁棒性是指当网络特征参数(即 RTT、通过瓶颈链路的 TCP 连接数、瓶颈链路的容量)发生变化时,AQM 控制器仍能保持稳定的能力。

众所周知,控制系统的稳定性可用“稳定裕度”度量。稳定裕度由“相角裕度”和“幅值裕度”组成。如果所设计的 AQM 控制器能使系统的相角裕度和幅值裕度成为与网络特征参数无关的常数,则该 AQM 控制器将有较好的鲁棒性、较强的抗干扰能力且能用于大时滞网络环境。

基于以上考虑,本文设计了一个稳定裕度与网络特征参数无关的基于 PI 控制器的 AQM 算法——GPM-PI,该算法不仅保持了表 1 中各算法的优点,同时也克服了各算法的缺点,即 GPM-PI 算法同时具备响应速度快、计算开销小、能用于大时滞网络环境、抗干扰能力强且鲁棒性好等特点。通过 NS2 仿真实验验证了这些特性。由于 Internet 网络流量由 TCP 长流、TCP 短流和 UDP 流构成,且是大时滞网络,因此 GPM-PI 算法能更好地适应 Internet 网络环境下的主动队列管理。

## 2 GPM-PI 算法的控制论原理

AQM 算法通过随机丢弃 IP 包,实现调节 TCP 窗口大小和路由器队列长度的目标,因此,AQM 算法也称为 AQM 控制器。AQM 控制器的被控对象是 TCP 窗口大小和路由器队列长度。文献[1-2]给出了 AQM 控制器的被控对象的传递函数模型(以下称为 TCP/AQM 传递函数模型)：

$$G(s) = \frac{K_f e^{-sR}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

其中,  $K_f = \frac{(RC)^3}{4N^2}$ ,  $T_1 = R$ ,  $T_2 = \frac{R^2 C}{2N}$ ;  $C$  为瓶颈链路的容量;  $N$  为通过瓶颈链路的 TCP 连接数;  $R$  为 RTT。于是设计 AQM 算法的问题转变成了设计 AQM 控制器的问题,见图 1。

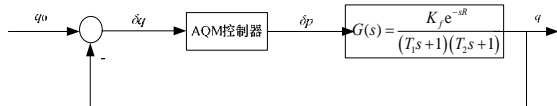


图 1 AQM 控制器和被控对象构成的闭环系统

TCP/AQM 传递函数模型近似地刻画了 TCP 长流在拥塞避免阶段拥塞窗口大小和路由器队列长度之间的变化规律,但与实际的网络存在较大误差,主要体现在：

(1)TCP/AQM 传递函数模型仅考虑了 TCP 长流在拥塞避免阶段对路由器队列长度变化的影响,没有考虑 TCP 长流在慢速启动阶段对路由器队列长度变化的影响。

(2)TCP/AQM 传递函数模型没有考虑 TCP 短流和 UDP 流对路由器队列长度变化的影响。

(3)在 TCP/AQM 传递函数模型中,网络特征参数  $N$  和  $R$  是常数,但在实际网络中  $N$  和  $R$  是随机变化的。

因此,在设计 AQM 控制器的过程中,希望 AQM 控制器具有良好的稳定性和鲁棒性。控制系统的稳定性通常以稳定裕度(即相角裕度和幅值裕度)度量。一般,相角裕度和幅值裕度与被控对象(如 TCP/AQM 的传递函数模型)的参数相关。如果能通过整定 AQM 控制器的参数,使控制系统的相角裕度和幅值裕度成为常数,与 TCP/AQM 传递函数模型的

参数(即网络特征参数  $N, C, R$ )无关,那么这样设计出的 AQM 控制器不仅具有良好的稳定性和鲁棒性,也能更好地应用于实际的 Internet 网络环境中。

由于 TCP/AQM 传递函数模型是二阶时滞系统,因此为了设计 GPM-PI,需要用一阶时滞系统对其进行拟合。按文献[14]的方法,可以用式(2)对应的一阶时滞系统拟合式(1)对应的二阶时滞系统：

$$\hat{G}(s) = \frac{K e^{-sL}}{Ts + 1} \quad (2)$$

其中,  $K = K_f, T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}, L = T_1 + T_2 + R - \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$ 。

利用式(2)对应的一阶时滞系统,按文献[18]的方法,可以设计一个相角裕度和幅值裕度是常数的基于 PI 控制器的 AQM 算法 GPM-PI。因此,将 PI 控制器的传递函数写为

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

其中,  $k_p = k_c, k_i = \frac{k_c}{T_i}$ 。

同时将图 1 改为图 2。

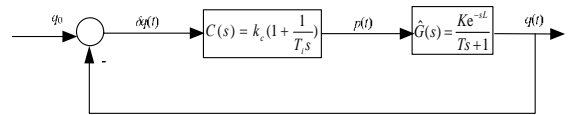


图 2 AQM PI 闭环控制系统

根据定义,图 2 所示的控制系统的相角裕度  $\phi_m$  和幅值裕度  $A_m$  为

$$\phi_m = \pi - 0.5\pi + \arctan(\omega_g T_i) - \arctan(\omega_g T) - \omega_g L \quad (4)$$

$$A_m = \frac{\omega_p T_i \sqrt{1 + \omega_p^2 T^2}}{k_c K \sqrt{1 + \omega_p^2 T_i^2}} \quad (5)$$

且  $\omega_g, \omega_p$  满足：

$$\frac{K k_c \sqrt{1 + \omega_g^2 T_i^2}}{\omega_g T_i \sqrt{1 + \omega_g^2 T^2}} = 1 \quad (6)$$

$$-0.5\pi + \arctan(\omega_p T_i) - \arctan(\omega_p T) - \omega_p L = -\pi \quad (7)$$

令：

$$k_c = \frac{\beta T}{KL} \quad (8)$$

$$T_i = T \quad (9)$$

其中,  $\beta$  为大于 0 的常数。将式(9)代入式(7),得

$$\omega_p = \frac{\pi}{2L} \quad (10)$$

将式(8)~式(10)代入式(5),得

$$A_m = \frac{\pi}{2\beta} \quad (11)$$

将式(9)代入式(6),得

$$\omega_g = \frac{K k_c}{T} \quad (12)$$

将式(8)、式(9)和式(12)代入式(4),得

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (13)$$

由此可见,如果用式(8)和式(9)作为 PI 控制器的参数整定公式,则控制系统的相角裕度和幅值裕度分别由式(13)和式(11)给出,这 2 个公式是与网络特征参数无关的常数,其中,常数  $\beta$  可以根据相角裕度和幅值裕度的需要取值。

为了得到 PIGPM-PI 算法的参数,用网络特征参数的典型值<sup>[2,13]</sup>  $N=60, R=0.21, C=3750$  packets/s(15 Mb/s)代入式(1)

得  $T_1=0.21, T_2=1.378, K_f=33\ 914.795$  ; 将  $T_1, T_2$  和  $K_f$  的值代入式(2)得  $T=1.394\ 033\ 2, L=0.404\ 092, K=33\ 914.795$ 。为了使得控制系统的相角裕度和幅值裕度分别为  $30^\circ$  和  $1.5^\circ$ , 取  $\beta=1.047$  且将  $T, L$  和  $K$  的值代入式(8)和式(9), 并注意到式(3)中的  $k_p = k_c, k_i = \frac{k_c}{T_i}$ , 得

$$k_p = 1.065\ 002\ 292 \times 10^{-4}, k_i = 7.639\ 719\ 807 \times 10^{-5} \quad (14)$$

于是 PIGPM-PI 算法的传递函数为

$$C(s) = 1.065\ 002\ 292 \times 10^{-4} + \frac{7.639\ 719\ 807 \times 10^{-5}}{s} \quad (15)$$

为了用计算机程序实现 PIGPM-PI 算法, 需要得到式(3)所示的 PI 控制器的传递函数  $C(s)$  的等效离散传递函数  $C(z)$ , 这可以通过式(16)的双线性变换法实现:

$$C(z) = C(s) \Big|_{s=\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = k_p + \frac{k_i}{s} \Big|_{s=\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = \frac{(2k_p + k_i T)z - (2k_p - k_i T)}{2(z-1)} \quad (16)$$

其中,  $T$  为采样周期。因此, GPM-PI 可用如下递推公式实现:

$$p(kT) = p((k-1)T) + a\delta q(kT) - b\delta q((k-1)T) \quad (17)$$

$$p(0) = 0 \quad (18)$$

其中,

$$a = \frac{2k_p + k_i T}{2}, b = \frac{2k_p - k_i T}{2} \quad (19)$$

且  $\delta q(kT) = q(kT) - q_0$ ,  $q_0$  为参考队列长度或期望队列长度,  $p(\cdot)$  为丢包概率。将式(14)代入式(19), 并取  $T=1/160\text{ s}$ <sup>[2,13]</sup> 得

$$a = 1.067\ 389\ 704 \times 10^{-4}, b = 1.062\ 614\ 88 \times 10^{-4} \quad (20)$$

由式(17)可知, 为了确定丢包概率, GPM-PI 只需执行 2 次乘法和 3 次加(减)法, 因此, 计算开销小。

### 3 GPM-PI 算法性能验证

由于 TCP 拥塞窗口变化和路由器队列变化之间的关系本质上是非线性和随机的, 因此需要利用 NS2 验证 GPM-PI 算法的性能。

实验采用常用的哑铃拓扑(图 3)。其中, 瓶颈链路 N-D 的带宽为 15 Mb/s, 延迟为 5 ms; 发送数据的源节点为  $S_1, S_2, \dots, S_n, S_i$  到 N 间的带宽为 15 Mb/s( $i=1, 2, \dots, n$ ), 延迟在 160 ms~240 ms 或 400 ms~800 ms 均匀分布; 接收数据的目标节点为  $F_1, F_2, \dots, F_n, D$  到  $F_i$  间的带宽为 45 Mb/s( $i=1, 2, \dots, n$ ), 延迟为 5 ms 或 190 ms; 参考队列长度(也称期望队列长度)  $q_0$  设置为 200 个 IP 包; 瓶颈链路 N-D 缓冲区大小为 800 个 IP 包。

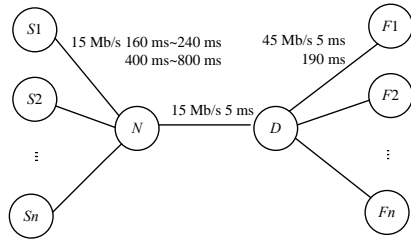


图 3 网络拓扑结构

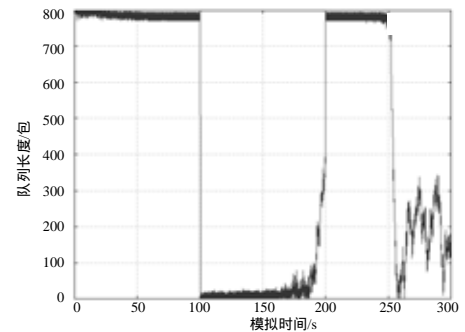
模拟实验中以有代表性的 Hollot-PI<sup>[2]</sup>和 REN-PID<sup>[12]</sup>作为比照算法, 给出反映算法动态特性的“瞬时队列长度变化图”和反映算法统计特征的统计量, 其中“瞬时队列长度变化图”反映了“模拟时间和瞬时队列长度”的关系, 能用于观察网络流量或特征参数变化时算法的响应速度、稳定性、抗干扰能力等。统计量包括: (1)平均队列长度: 用于衡量瞬时队列长度与  $q_0$  的接近程度, 反映了端到端的平均时延。平均队列

长度越短越好。(2)队列长度的标准差: 用于衡量瞬时队列长度在  $q_0$  附近的振荡程度, 反映了端到端的时延抖动。队列长度的标准差越小越好。(3)丢包率: 反映 IP 包被丢弃的概率, 丢包率越小越好。(4)链路利用率: 反映瓶颈链路不空闲的概率, 链路利用率越大越好。

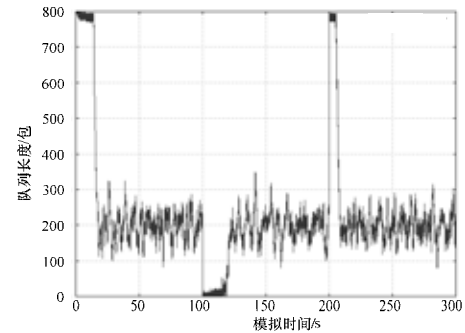
受篇幅限制, 本文仅给出反映 REN-PID 算法统计特征的统计量, 不给出 REN-PID 算法的瞬时队列长度变化图。

**实验 1 验证聚合业务流量下 GPM-PI 算法的响应速度、稳定性和抗干扰能力**

实验场景设置如下: 采用由 TCP 长流、TCP 短流和 UDP 流构成的混合业务流量。其中, “响应流量”由 200 个 TCP 长流组成, “非响应流量”由 500 个 TCP 短流和 100 个 UDP 流组成。以上流量在  $t=0\text{ s}$  时创建; 在  $t=100\text{ s}$  时停止 100 个 TCP 长流和 50 个 UDP 流;  $t=200\text{ s}$  时重新加入以上流量; 模拟时间为 300 s。实验结果见图 4 和表 2。



(a)Hollot-PI



(b)GPM-PI

图 4 聚合业务流量下瞬时队列长度变化

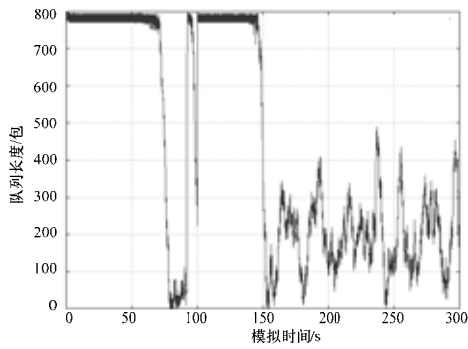
表 2 实验 1 中 3 种算法的统计量

算法	平均队列长度/包	队列长度的标准差	链路利用率/(%)	丢包率/(%)
Hollot-PI	438.14	359.01	92.94	67.70
REN-PID	246.41	233.96	94.95	66.00
GPM-PI	226.71	163.85	97.39	65.22

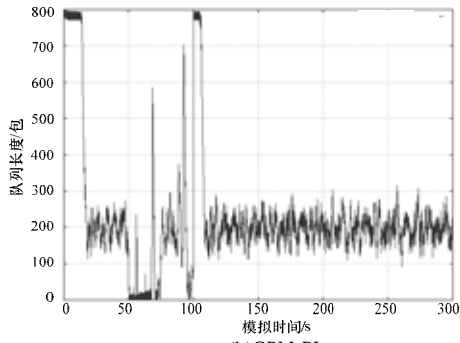
**实验 2 验证非响应业务流量条件下 GPM-PI 算法的抗干扰能力**

TCP/AQM 模型仅反映了响应业务流量(即 TCP 长流)与路由器队列长度变化之间的关系, 而没有反映非响应业务流量(即 TCP 短流和 UDP 流)与路由器队列长度变化之间的关系。从控制论的观点看, 可以将非响应业务流量认为是作用于闭环控制系统的干扰。因此, 本实验将验证非响应业务流量条件下 GPM-PI 算法的抗干扰能力。

实验场景设置如下: 在  $t=0$  时, 启动 300 个 TCP 短流、100 个 UDP 流; 在  $t=50\text{ s}$  时, 启动 400 个 TCP 短流, 停止 50 个 UDP 流;  $t=100\text{ s}$  时重新加入 50 个 UDP 流, 模拟时间为 300 s。实验结果见图 5 和表 3。



(a)Hollot-PI



(b)GPM-PI

图5 非响应业务流量条件下瞬时队列长度变化

表3 实验2中3种算法的统计量

算法	平均队列长度/包	队列长度的标准差	链路利用率/(%)	丢包率/(%)
Hollot-PI	439.07	302.58	99.53	67.54
REN-PID	259.53	206.21	99.32	89.75
GPM-PI	226.39	168.85	97.54	67.99

### 实验3 验证瓶颈链路容量变化时 GPM-PI 算法的鲁棒性

在计算 GPM-PI 控制器的参数时,使用了网络特征参数的典型值  $N=60$ ,  $R=0.21$ ,  $C=3\ 750$  packets/s(=15 Mb/s)。为了验证算法的鲁棒性,将网络特征参数中的瓶颈链路速率调整为 30 Mb/s(即  $C=7\ 500$  packets/s),且使用与实验 2 相同的网络流量,模拟时间为 300 s。实验结果见图 6、图 7 和表 4。

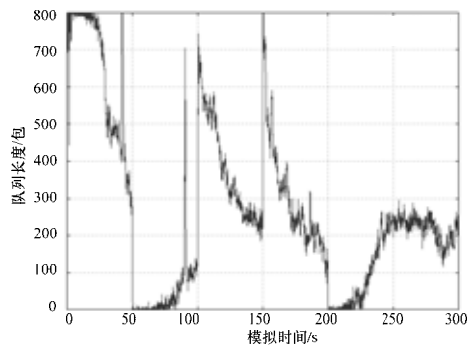


图6 瓶颈链路容量变化时 Hollot-PI 瞬时队列长度变化

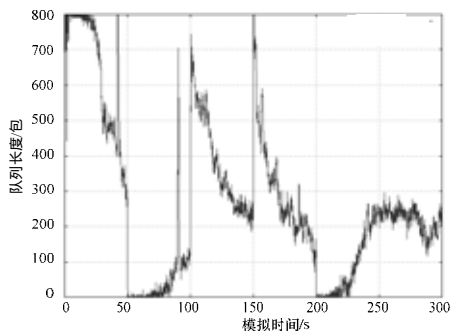


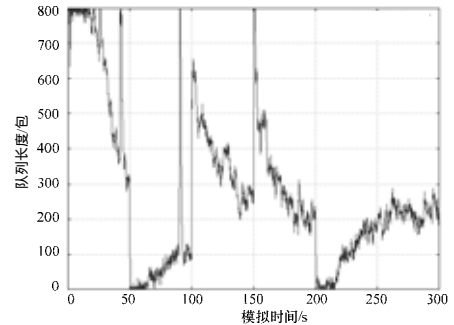
图7 瓶颈链路容量变化时 GPM-PI 瞬时队列长度变化

表4 实验3中3种算法的统计量

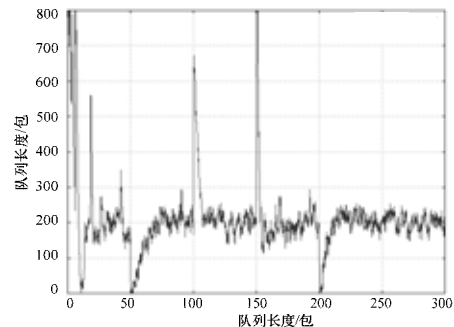
算法	平均队列长度/包	队列长度的标准差	链路利用率/(%)	丢包率/(%)
Hollot-PI	275.82	231.91	91.86	21.42
REN-PID	214.78	129.08	97.94	21.82
GPM-PI	207.92	92.08	99.39	21.84

### 实验4 验证大时滞网络环境下 GPM-PI 算法的鲁棒性

实验场景设置如下:为了验证算法在大时滞网络环境下的性能,将发送端的传播延迟改为在 400 ms~800 ms 均匀分布,接收端传播延迟改为 190 ms,使用与实验 2 相同的网络流量,模拟时间为 300 s。实验结果见图 8 和表 5。



(a)Hollot-PI



(b)GPM-PI

图8 大时滞网络环境下瞬时队列长度变化

表5 实验4中3种算法的统计量

算法	平均队列长度/包	队列长度的标准差	链路利用率/(%)	丢包率/(%)
Hollot-PI	283.85	223.03	97.36	23.18
REN-PID	216.36	134.49	98.57	24.05
GPM-PI	209.12	105.74	99.52	24.09

## 4 结束语

针对现有基于控制论的主动队列管理算法存在的不足,本文设计了一个稳定裕度与网络特征参数无关的基于 PI 控制器的 AQM 算法 GPM-PI,该算法具备响应速度快、计算开销小、能用于大时滞网络环境、抗干扰能力强且鲁棒性好等特点。因此,该算法能更好地应用于存在 TCP 短流和 UDP 流的网络环境(如 Internet 网络),也能更好地应用于大时滞网络环境,如 Internet 和卫星网络。

## 参考文献

- [1] Misra V, Gong W B, Towsley D. Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2000, 30(4): 151-160.

- [2] Hollot C V, Misra V, Towsley D, et al. On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows[C]//Proc. of IEEE INFOCOM'01. Alaska, USA: IEEE Press, 2001: 1726-1734.
- [3] Yang Hong, Oliver W W Y. Design of Adaptive PI Rate Controller for Best-effort Traffic in the Internet Based on Phase Margin[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(4): 550-561.
- [4] Yang Hong, Oliver W W Y, Huang Changcheng. Self-tuning PI TCP Flow Controller for AQM Routers with Interval Gain and Phase Margin Assignment[C]//Proc. of IEEE GLOBECOM'04. Texas, USA: IEEE Press, 2004: 1324-1328.
- [5] Zhang Honggang, Hollot C V, Towsley D. A Self-tuning Structure for Adaptation in TCP/AQM Networks[C]//Proc. of IEEE GLOBECOM'03. San Francisco, CA, USA: IEEE Press, 2003: 3641-3646.
- [6] Chang Xiaolin, Muppala J K, Jen-te Y. A Robust Nonlinear PI Controller for Improving AQM Performance[C]//Proc. of 2004 IEEE Int'l Conf. on Communications. Paris, France: IEEE Press, 2004: 2272-2276.
- [7] 章 淼, 吴建平, 林 闯. P<sup>2</sup>I: 一种新的主动队列管理算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(10): 1288-1294.
- [8] Zhang Miao, Ren Fengyuan, Wu Jianping, et al. Using Fuzzy-PI Controller in Active Queue Management[C]//Proc. of ISCC'04. Alexandria, Egypt: IEEE Press, 2004: 742-747.
- [9] Zhang Heying, Liu Baohong, Dou Wenhua. Design of a Robust Active Queue Management Algorithm Based on Feedback Compensation[C]//Proc. of ACM SIGCOMM'03. Karlsruhe, Germany: ACM Press, 2003: 277-285.
- [10] Liu Ming, Dou Wenhua. Does Fast Responsive AQM Scheme Always Do Better[C]//Proc. of the 5th International Conference on Grid and Cooperative Computing. Beijing, China: IEEE Press, 2006: 245-248.
- [11] Ryu S, Rump C, Qiao Chunming. Advances in Active Queue Management(AQM)-based TCP Congestion Control[J]. Telecommunication Systems, 2004, 25(3/4): 317-351.
- [12] Fan Yanfei, Ren Fengyuan, Lin Chuang. Design a PID Controller for Active Queue Management[C]//Proc. of IEEE ISCC'03. Antalya, Turkey: IEEE Press, 2003: 985-990.
- [13] Ren Fengyuan, Lin Chuang, Wei Bo. A Robust Active Queue Management Algorithm in Large Delay Networks[J]. Computer Communication, 2005, 28(5): 485-493.
- [14] 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.
- [15] He Ling, Zhu Haiyu, Jing Yuanwei, et al. Application of IMC-Smith Controller in the Large-delay Network Congestion Control[C]//Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China: IEEE Press, 2006: 4595-4599.
- [16] Zhu Ruijun, Teng Haitao, Fu Jindan. A Predictive PID Controller for AQM Router Supporting TCP with ECN[C]//Proc. of IEEE ISCC'03. Antalya, Turkey: IEEE Press, 2003: 356-360.
- [17] Agrawal D, Granelli F. Redesigning an Active Queue Management System[C]//Proc. of GLOBECOM'04. Dallas, Texas, USA: IEEE Press, 2004: 702-706.
- [18] O'Dwyer A. PID Controller Tuning Methods: A Novel Teaching Approach[R]. Dublin Institute of Technology, Tech. Rep.: AOD-00-12, 2000.

编辑 张正兴

(上接第 11 页)

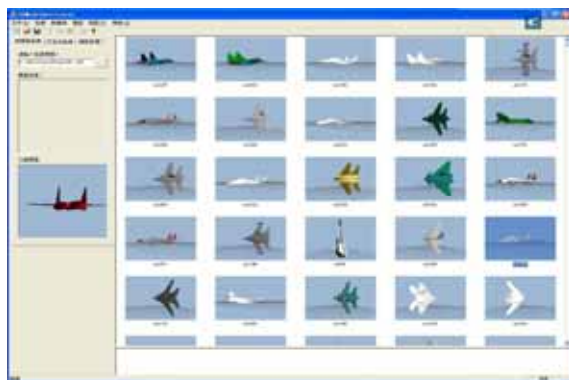


图 3 飞机模型的检索结果

#### 4 结束语

检索和复用是实现三维模型广泛应用的前提,但三维模型往往比二维图像具有更多、更丰富的视觉感知细节,特征提取复杂,实现检索的难度较大,检索效率低。本文提出一种基于正视图描述符的特征提取方法,降低了提取难度,比较符合人的视觉特征。同时,该方法具有较高的效率,可用

于交互的检索系统。

#### 参考文献

- [1] Min P, Chen Joyce, Funkhouser T, et al. A 2D Sketch Interface for a 3D Model Search Engine[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002 Annual Conference on Computer Graphics. San Antonio, Texas, USA: ACM Press, 2002.
- [2] Pu Jiantao, Liu Yi, Xin Guyu, et al. 3D Model Retrieval Based on 2D Slice Similarity Measurements[C]//Proc. of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. Thessaloniki, Greece: IEEE Press, 2004.
- [3] Chen Ding-Yun, Tian Xiao-Pei, Shen Yu-Te, et al. Visual Similarity Based 3D Model Retrieval[C]//Proc. of Eurographics'03. Granada, Spain: [s. n.], 2003: 223-232.
- [4] Mahmoudi S, Daoudi M. A Probabilistic Approach for 3D Shape Retrieval by Characteristic Views[J]. Pattern Recognition, 2007, 28(13): 1705-1718.
- [5] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape Distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807-832.

编辑 张正兴