

# 大时滞网络拥塞控制器的设计

王建新, 荣 亮

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘 要:** 几乎现有的 AQM 算法都忽略了大时滞对网络拥塞控制系统稳定性的负面影响, 以致稳定性、响应性和鲁棒性在大时滞网络中大大降低. 如 PI、REM 等 AQM 算法在大时滞环境下表现出剧烈的队列震荡和频繁的空队列情况, 这些现象直接导致了链路利用率的低下和延时抖动的增大. 而面向大时滞网络拥塞控制的 DC-AQM 算法不够恰当的参数配置使得系统输出偏离了控制的目标, 出现了很高的分组丢弃概率. 为解决大时滞网络拥塞控制的稳定性问题, 本文基于内模控制原理, 提出一种新的鲁棒 AQM 控制器 IMC-PID 来补偿网络时滞对系统稳定性的影响. 仿真分析表明, 随着网络时滞的增大, IMC-PID 在综合性能上胜过其他算法, 获得了较高的链路利用率和较低的延时抖动.

**关键词:** 拥塞控制; 主动队列管理; 内模控制; 大时滞网络; 稳定性

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2007) 11-2105-06

## Design of a Stabilizing Congestion Controller for Large-Delay Networks

WANG Jian-xin, RONG Liang

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** This paper addresses the problem of the stability of congestion control for networks with large round-trip communication delays. Nearly all the existing AQM schemes neglect the impact on system behavior, such as stability, robustness and convergence, caused by large communication delay. The drastic queue oscillations in large delay networks of PI, REM and DC-AQM decrease the link utilization and introduce the avoidable delay jitter. To address this problem, we develop a robust IMC-PID congestion controller based on internal model control principle to restrict the negative impact on the stability caused by the large delay. Simulation results demonstrate that the integrated performance of proposed scheme outperforms others as communication delay increases, and achieves high link utilization and small delay jitter.

**Key words:** congestion control; active queue management; internal model control; large-delay networks; stability

### 1 引言

Internet 的拥塞控制已经成为当前计算机网络研究领域的一个热点. 从控制理论的角度来看, 拥塞控制是一个十分复杂的问题, 因为它呈现出多维性、非线性、动态性等复杂特征, 并且网络中的所有业务流在地理上的分散特性, 使得每个单流无法了解网络的全局信息. 最近, 关于拥塞控制研究的一些数学模型从控制理论上对原有的以及最近研究出来的拥塞控制协议的稳定性、鲁棒性和公平性等进行了详细的研究和讨论<sup>[2-6]</sup>, 其中一个重要的研究问题是拥塞控制系统的渐近稳定性, 也就是在外部扰动(如突发的业务流、反馈延时的变化以及其他的一些瞬态因素), 系统消除震荡而迅速回到稳态的能力. 考虑到反馈延时对系统稳定性的影

响, 分布式拥塞控制系统的稳定性理论证明和结论越来越复杂. 然而, 很多 AQM 算法, 如 RED<sup>[1]</sup>、REM<sup>[7]</sup>、PI<sup>[9]</sup>、AOPC<sup>[10]</sup>等忽略了时滞对稳定性的负面影响, 而 DC-AQM<sup>[11]</sup>虽然考虑了时滞补偿, 但是不够恰当的参数配置使得系统输出偏离了控制的目标. 这些算法导致了大时滞网络环境下的剧烈的系统震荡, 从而降低了瓶颈链路的利用率, 引入了不必要的延时抖动. 本文第二节仔细地考察了大时滞对系统的负面影响, 并指出有必要设计出一种新的控制器能够有效地工作在大时滞网络环境中.

本文采用控制理论中的内模补偿原理设计一种新的 AQM 算法来消除大时滞对路由器队列抖动以及网络端到端延时抖动的负面影响, 以达到在大时滞网络环境下获得稳定性和理想瞬态性能的目的. 与文[11]中使用

的对系统降阶后采用 padé 近似来替代延时单元的方法不同,本文采用泰勒级数展开法,降低了被控对象与内部模型的误差.通过配置合适的 PID 控制参数,本文所设计的 IMC-PID 控制器能够在较大范围的反馈延时情况下比其他 AQM 算法获得更高的链路利用率和更小的队列抖动.

## 2 大时滞对 TCP/AQM 反馈控制系统的影响

拥塞控制实际上是一个带有反馈延时的闭环控制系统.这种系统的一个基本控制问题就是围绕反馈延时时对系统稳定性的影响而展开的,当反馈延时很大的时候,稳定性很难得到保证. AQM 就是为稳定拥塞控制系统而需要设计的控制器.之前的大多数 AQM 控制器<sup>[1,7,9,10]</sup>都是在小时延网络下进行设计的,在忽略反馈延时的情况下,这些算法能够获得很好的稳定性和瞬态响应性的性能折衷.然而,当反馈延时增大的时候,系统的稳定性则受到很大的影响.表 1 给出了从中

表 1 RTT 统计值

URL	最小值(ms)	最大值(ms)	平均值(ms)
www. ieeec. org(61. 200. 81. 134)	411	432	419
www. acm. org(63. 118. 7. 16)	1101	1155	1131
www. yahoo. com(209. 73. 186. 238)	347	355	352
www. mit. edu(18. 7. 22. 83)	298	308	302

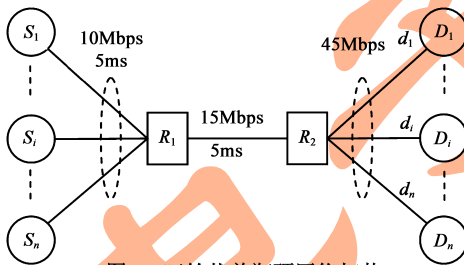


图 1 哑铃状单瓶颈网络拓扑

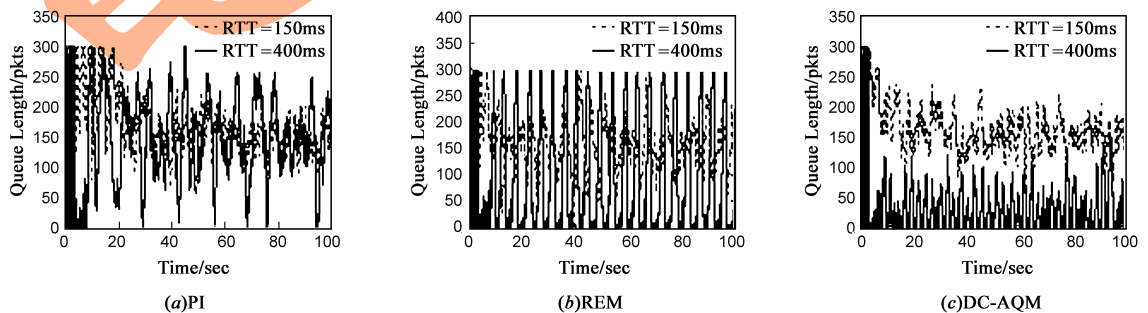


图 2 RTT=150ms 和 RTT=400ms 情况下的队列长度

## 3 TCP/AQM 控制系统和内模控制

### 3.1 TCP/AQM 反馈控制系统

文[2]用一对非线性微分方程描述了 TCP 流和 AQM 的瞬态行为, Hollot 等人对它们进行线性化处

理<sup>[8]</sup>,得到了图 3 所示的 TCP/AQM 时滞反馈控制系统.图 3 中,  $q_0$  为目标队列长度, AQM 控制器的作用就是以某个概率  $p$  标记(或丢弃)到达路由器的分组.被控过程的传递函数  $P(s) = P_{tcp}(s) P_{que}(s)$  分为两个部分:  $P_{tcp}(s)$  描述了 TCP 的瞬态行为,  $P_{que}(s)$  描述了路由器

南大学访问国外站点的延时统计情况,从中可以看到,最大的 RTT 超过了 1 秒.

为了研究现有的 AQM 算法在大时滞网络环境下的性能,本文选择了具有代表意义的 PI、REM 和 DC-AQM 三种 AQM 算法,对它们在 RTT = 150ms 的小时滞网络和 RTT = 400ms 的大时滞网络下分别进行了性能的仿真比较.仿真拓扑如图 1 所示, R1 为瓶颈路由器,其缓冲大小设为 300 个分组,目标队列长度设为 150 个分组.所有发送端在  $t = 0$  时刻同时开始发送 FTP 业务流,整个仿真时间为 100s.图 2 给出了这些 AQM 算法在 RTT = 150ms 和 RTT = 400ms 时的队列长度的变化过程.图 2 表明,这些 AQM 算法在 RTT = 150ms 时都能够在一段时间后稳定队列长度到 150 个分组周围,然而,当 RTT 增加到 400ms 时,PI 和 REM 出现了剧烈的队列震荡,尤其是 REM 频繁地出现空队列和满队列的情况.而 DC-AQM 却在 RTT = 400ms 时无法稳定到目标队列附近,这并不是它的设计初衷.这些 AQM 算法的一些相关性能数据如链路利用率、平均队列长度和队列抖动方差在表 2 中给出.由图 2 和表 2 可以看出,尽管 PI 在 RTT = 400ms 的网络环境下仍能够保持相对较高的链路利用率,但是它的队列抖动方差却增加了 20 个分组.而 REM 的队列抖动方差却增加了 70 个分组. DC-AQM 的平均队列从 157 个分组骤缩为 33 个分组,这直接导致了较低的链路利用率.

表 2 链路利用率和队列长度统计值

AQM 算法		PI	REM	DC-AQM	IMC-PID
链路利用率	RTT = 150ms	99.34%	99.31%	99.40%	99.33%
	RTT = 400ms	97.27%	91.14%	95.50%	97.30%
平均队列长度	RTT = 150ms	162.42	154.22	157.25	175.88
	RTT = 400ms	150.80	102.67	32.98	149.72
队列标准差	RTT = 150ms	44.23	45.16	28.16	46.52
	RTT = 400ms	63.89	112.26	30.81	42.16

的队列变化过程.

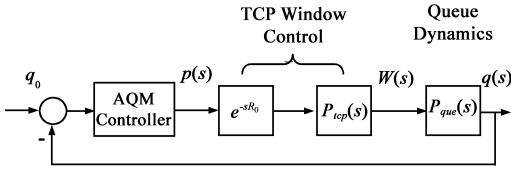


图3 TCP/AQM 反馈控制系统

$$P_{tcp}(s) = \frac{R_0 C^2}{2N^2} \frac{1}{s + \frac{1}{R_0 C}}, P_{que}(s) = \frac{N}{R_0} \frac{1}{s + \frac{1}{R_0}} \quad (1)$$

其中,  $R_0$  为往返传输时间,  $N$  为激活的 TCP 连接的数目,  $C$  为链路容量.

被控过程  $P(s)$  描述了分组丢弃概率  $p$  如何影响路由器的瞬时队列长度  $q$ . 由式(1)和图3可知

$$P(s) = \frac{K_m e^{-sR_0}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (2)$$

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

### 3.2 内模控制

Garcia 和 Morari 在 1982 年提出了内模控制<sup>[12]</sup>, 这一控制结构的美妙之处能够将 PID 控制、Smith 预估控制、确定性线性二次最优反馈控制和多种预测控制等归纳在同一架构之下. 基于内模控制的 PID(IMC-PID) 控制器只需要整定一个参数, 就能兼顾闭环性能指标和鲁棒性的优点. 内模控制与反馈控制具有图4所示的结构关系. 图4中,  $G_i(s)$  为内模控制器,  $G_c(s)$  为反馈控制器,  $G_p(s)$  和  $\hat{G}_p(s)$  分别为被控过程对象和过程对象模型. 被控过程对象与模型之间的误差可能由于降阶处理或者系统外部的干扰而造成的. 从图4中, 可以得到  $G_i(s)$  与  $G_c(s)$  的关系如下:

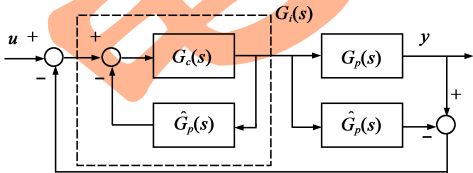


图4 IMC 等效反馈控制结构

$$G_i(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) \hat{G}_p(s)} \quad (3)$$

$$G_c(s) = \frac{G_i(s)}{1 + G_i(s) \hat{G}_p(s)} \quad (4)$$

对时滞系统的控制一直都是控制理论学科研究的热点. Smith 预估器<sup>[13]</sup> 是一种被广泛采用的时滞补偿器, 然而其敏感于模型误差. IMC 克服了 Smith 预估器的弱点, 并增强了鲁棒性和抗干扰能力. IMC 的设计过程非常简单, 通常具有以下两个步骤:

(1) 模型分解:

$$\hat{G}_p(s) = \hat{G}_{p^+}(s) \cdot \hat{G}_{p^-}(s) \quad (5)$$

式中,  $\hat{G}_{p^+}(s)$  为一个全滤波器传递函数, 包含所有的 RHP 零点和纯滞后环节,  $\hat{G}_{p^-}(s)$  为具有最小相位特征的传递函数.

(2) 定义内模控制器  $G_i(s)$  为:

$$G_i(s) = \hat{G}_{p^-}^{-1}(s) \cdot g(s) \quad (6)$$

式中  $\hat{G}_{p^-}^{-1}(s)$  为  $\hat{G}_{p^-}(s)$  的逆,  $g(s)$  为一个低通滤波器的传递函数,

$$g(s) = \frac{1}{(\epsilon s + 1)^\gamma} \quad (7)$$

其中,  $\epsilon$  为一个待调节的滤波器常数, 决定了系统的响应速度.  $\gamma$  为与过程模型  $\hat{G}_p(s)$  相对的阶次. 由式(4), (6)和(7)可知:

$$G_c(s) = \frac{\hat{G}_{p^-}^{-1}(s)}{(\epsilon s + 1)^\gamma - \hat{G}_{p^+}(s)} \quad (8)$$

## 4 IMC-PID 拥塞控制器的设计

### 4.1 IMC-PID 参数调整方法

拥塞控制本身是一个时滞系统, 采用内模控制自然可以对延时进行补偿, 消除延时时对系统稳定性的负面影响. 已有的研究中, 基于内模控制的 PID 控制器参数调节方法多数是用于 FOPTD (First Order Plus Time Delay) 系统<sup>[14]</sup>, 而在更高阶的过程控制上很少有 IMC-PID 的研究. 本文提出了一种用于高阶的 IMC-PID 参数整定方法, 并将该方法成功地应用到了网络拥塞控制中. 为方便叙述, 这里先给出 IMC-PID 控制器的参数调整定理.

**定理 1** 给定一个模型  $\hat{G}_p(s) = \hat{G}_{p^+}(s) \cdot \hat{G}_{p^-}(s)$ , 假设其被分解成  $\hat{G}_{p^+}(s)$  和  $\hat{G}_{p^-}(s)$  两部分,  $\hat{G}_{p^+}(s)$  包含所有的 RHP 零点和纯滞后环节,  $\hat{G}_{p^-}(s)$  为模型的稳定部分是最小相位的. 令  $f(s) = \hat{G}_{p^-}^{-1}(s) \left/ \frac{(\epsilon s + 1)^\gamma - \hat{G}_{p^+}(s)}{s} \right.$ , 如果  $\hat{G}_{p^+}(0) = 1$ , 则可以采用理想 PID 控制器  $G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$  来对系统进行校正, PID 控制器的参数配置如下:

$$K_c = f'(0), T_i = \frac{f'(0)}{f(0)}, T_d = \frac{f''(0)}{2f'(0)} \quad (9)$$

其中,  $f'(0)$  和  $f''(0)$  分别为函数  $f(s)$  在  $s=0$  处的一阶与二阶导数.

证明: 在无静差控制系统中, 要求控制器具有积分项.  $\hat{G}_{p^-}(0) = 1$  时, 式(8)中  $G_c(s)$  的分母为 0, 这就表明  $G_c(s)$  中一定存在积分项  $1/s$ , 进而令  $G_c(s) = \frac{1}{s} f(s)$ , 则

$$f(s) = \frac{\hat{G}_p^{-1}(s)}{(\varepsilon s + 1)^\gamma - \hat{G}_p^+(s)}$$

将  $f(s)$  按泰勒级数展开, 则得到

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{1}{s} (f(0) + f'(0)s + f''(0)s^2 + \dots) \\ &= K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s + \dots \right) \end{aligned}$$

待定多项式系数, 则可以整定出  $K_c = f'(0)$ ,  $T_i = \frac{f''(0)}{f'(0)}$ ,

$$T_d = \frac{f''(0)}{2f'(0)}$$

由定理 1 可知, TCP/AQM 时滞反馈控制系统的稳定性在采用内模补偿时, IMC-PID 控制器的参数是根据泰勒级数展开法计算出来的, 这和以前先对系统降阶, 进而采用 padé 近似延时单元的方法<sup>[11]</sup>完全不一样. 这样可以降低被控过程对象与模型失配的误差.

现在, IMC-PID 控制器的参数仅仅决定于函数  $f(s)$  及其在  $s=0$  处的导数. 下面讨论如何求得  $f(0)$ 、 $f'(0)$  和  $f''(0)$ .

令  $D(s)$  为函数  $f(s)$  的分母部分, 即

$$D(s) = \frac{(\varepsilon s + 1)^\gamma - \hat{G}_p^+(s)}{s} \quad (10)$$

利用泰勒级数对  $D(s)$  进行展开, 得到

$$D(0) = \gamma\varepsilon - \hat{G}'_p^+(0) \quad (11)$$

$$D'(0) = \frac{\gamma(\gamma-1)\varepsilon^2 - \hat{G}''_p^+(0)}{2!} \quad (12)$$

$$D''(0) = \frac{\gamma(\gamma-1)(\gamma-2)\varepsilon^3 - \hat{G}'''_p^+(0)}{3!} \quad (13)$$

根据以上三式, 求得函数  $f(s)$  及其一阶、二阶导数在  $s=0$  处的值为:

$$f(0) = \frac{1}{K_m D(0)} \quad (14)$$

$$f'(0) = \frac{\hat{G}'_p^-(0) D(0) + K_m D'(0)}{(K_m D(0))^2} \quad (15)$$

$$f''(0) = f'(0) \left( \frac{\hat{G}''_p^-(0) D(0) + 2\hat{G}'_p^-(0) D'(0) + K_m D''(0)}{\hat{G}'_p^-(0) D(0) + K_m D'(0)} + \frac{2f'(0)}{f(0)} \right) \quad (16)$$

其中,  $K_m = \hat{G}_p^-(0)$  为过程模型的比例放大倍数.

## 4.2 内模控制在 TCP/AQM 控制系统中的应用

根据前面讨论的内模 PID 控制器的设计原理, 本节将根据定理 1 设计一个用于 TCP/AQM 拥塞控制系统的时滞补偿器. 假设拥塞控制的过程模型为:

$$\hat{G}_p(s) = P(s) = \frac{K_m e^{-sR_0}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (17)$$

根据内模控制器的设计步骤, 将  $\hat{G}_p(s)$  分解为:

$$\hat{G}_p^+(s) = e^{-sR_0}, \hat{G}_p^-(s) = \frac{K_m}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (18)$$

因此,

$$\hat{G}_p^-(0) = K_m \quad (19)$$

$$\hat{G}'_p^-(0) = -K_m(T_1 + T_2) \quad (20)$$

$$\hat{G}''_p^-(0) = 2K_m(T_1^2 + T_2^2 + T_1 T_2) \quad (21)$$

$$\hat{G}_p^+(0) = 1, \hat{G}'_p^+(0) = -R_0, \hat{G}''_p^+(0) = R_0^2, \hat{G}'''_p^+(0) = -R_0^3 \quad (22)$$

滤波器的  $g(s)$  的阶次  $\gamma=2$  来保证内模控制器  $G_i(s)$  的合理性, 将  $\gamma=2$  代入式(11)~(13), 得到

$$D(0) = 2\varepsilon + R_0, D'(0) = \frac{2\varepsilon^2 - R_0^2}{2}, D''(0) = \frac{R_0^3}{6}$$

将以上三式代入式(14)~(16), 便可以得到  $f(0)$ ,  $f'(0)$  和  $f''(0)$  的值. 进而, 根据式(9)可以计算出 IMC-PID 拥塞控制器各参数的值.

## 4.3 IMC-PID 拥塞控制器的实现

现在来考虑如何设计一个用于拥塞控制的离散 IMC-PID 控制器, 以消除网络大时滞对拥塞控制系统的负面影响. 由于网络拥塞控制本身是一个时间离散的系统, 而前面已经设计出的 IMC-PID 控制器被用于校正时间连续系统. 那么要实现拥塞控制, 还必须将其离散化, 令  $T$  表示采样时间, 初始的分组丢弃概率为 0, 以一系列的采样时刻点  $kT$  代表连续时间  $t$ , 以和式代替积分, 以增量代表微分, 得到离散的 PID 表达式, 也即第  $k$  次采样到达路由器的分组的丢弃概率计算表达式:

$$\begin{aligned} p(kT) &= p((k-1)T) + K_c \left\{ \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(kT) \right. \\ &\quad \left. - \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e((k-1)T) + \frac{T_d}{T} e((k-2)T) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

其中,  $e(kT) = q(kT) - q_0$ .

为计算出控制器的参数, 还需要知道滤波器参数  $\varepsilon$  和采样周期  $T$  的值. 这里将  $T$  的值近似设为平均 RTT 的值. 为检查参数  $\varepsilon$  对系统性能的影响, 对  $\varepsilon$  取不同值, 采用不同的网络参数, 在 MATLAB 下进行了多个系统仿真. 图 5 给出了在两套网络参数下,  $\varepsilon$  取不同值时, 系统的阶跃响应曲线. 仿真表明当  $\varepsilon = 0.3R_0 \sim 0.5R_0$

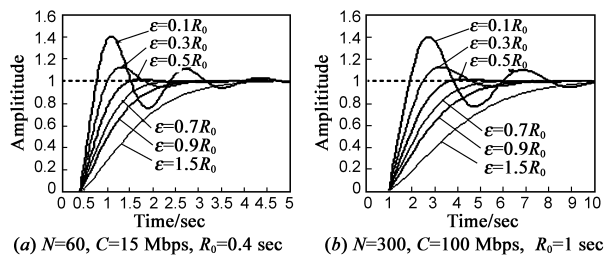


图 5 两种网络配置下,  $\varepsilon$  对系统阶跃响应的影响

时,具有较小超调量和过渡过程时间,系统能够较快地进入稳定状态.

假设网络环境如下<sup>[11]</sup>:瓶颈链路容量为  $C = 15\text{Mbps}(3750 \text{ packet/sec})$ ,激活的 TCP 连接数为  $N = 60$ ,平均 RTT 时间  $R_0 = 0.40\text{sec}$ ,选择  $\epsilon = 0.5R_0$ ,则 IMC-PID 拥塞控制器为:

$$G_c(s) = 2.9067 \times 10^{-5} \left( 1 + \frac{1}{5.45s} + 0.4157s \right) \quad (24)$$

根据式(23),计算出分组丢弃概率的计算表达式如下:

$$p(kT) = p((k-1)T) + 6.14111 \times 10^{-5} e(kT) - 8.94889 \times 10^{-5} e((k-1)T) + 3.21111 \times 10^{-5} e((k-2)T) \quad (25)$$

### 5 性能仿真

最后,我们在 NS 仿真平台上对所设计的 IMC-PID 拥塞控制器进行了详细的性能研究.仿真采用的网络拓扑图为图 1 所示的哑铃状单瓶颈网络.

#### (1) 队列稳定性

为考察 IMC-PID 的队列稳定性,我们采用相同的网络配置,对 IMC-PID 分别在  $RTT = 150\text{ms}$  和  $RTT = 400\text{ms}$  情况下进行了仿真.图 6 给出了 IMC-PID 的队列变化进程,从图 2 和图 6 中可以看到,IMC-PID 在  $RTT = 400\text{ms}$  时获得了比 PI、REM 和 DC-AQM 更稳定的队列变化,消除了大时滞对系统稳定性的负面影响.

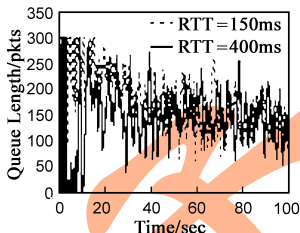


图 6 IMC-PID 在  $RTT=150\text{ms}$  和  $RTT=400\text{ms}$  时的队列长度

#### (2) 分组丢弃概率

导致 PI 和 REM 的队列震荡以及 DC-AQM 的不符合设计意图的队列输出的一个可能的原因就是控制器

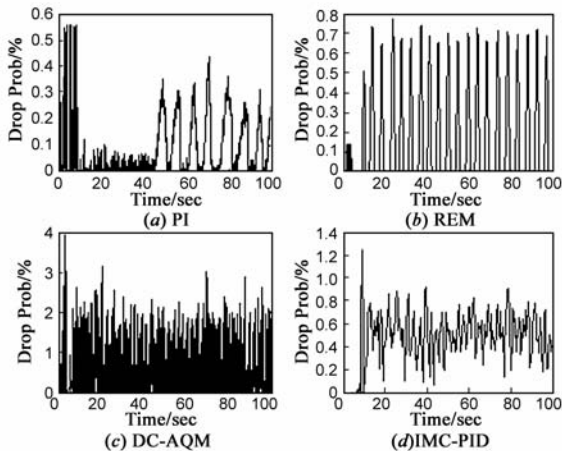


图 7 分组丢弃概率

的不稳定性,即分组丢弃概率的震荡变化造成的.根据文[15]中提出的 TCP 吞吐量公式  $C/N = \sqrt{3/2}/(R_0 \sqrt{p_0})$  可以知道,在这个实验中,稳定的分组丢弃概率约为 0.6%.图 7 给出了每个 AQM 控制器的输出(分组丢弃概率),从中可以看到,除了 IMC-PID 的输出比较稳定之外,其他三种 AQM 控制器的输出出现不同程度的震荡.DC-AQM 的丢弃概率过大,导致无法控制队列长度到设定的目标值.

#### (3) 链路利用率与目标队列长度、RTT 的关系

为了研究 RTT 和目标队列长度对链路利用率的影响,我们将 RTT 从 50ms 以 50ms 的间隔变化到 1000ms,  $q_0$  从 25 个分组到 150 个分组分成 5 等分,在 XY 平面上形成一个  $19 \times 5$  的网格.以网格顶点处的参数配置图 1 所示的仿真网络,记录每次仿真后瓶颈链路的利用率,结果显示在图 8 中.比较而言,IMC-PID 有明显的优势,利用率曲面随 RTT 和目标队列长度的变化比较平滑,而且在 RTT 很大和目标队列长度设置得很小的时候,仍然能够获得近 80% 的链路利用率,在相同的 RTT 下,利用率也不会随目标队列长度的变化产生很大的影响.而其他算法则存在或多或少的缺陷,PI 在小队列长度和大时滞网络中,链路利用率迅速下降;REM 则在 RTT 稍微较大时急剧下降,而且利用率曲面也呈现出沟壑状;DC-AQM 虽然也有较平缓的曲面,但利用率要比 IMC-PID 低.

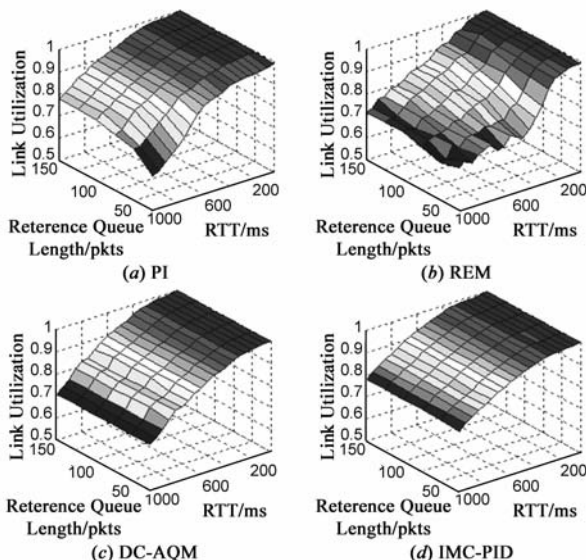


图 8 RTT 和期望队列长度对链路利用率的影响

### 6 结论

针对 AQM 控制器在大时滞网络中,不能很好地稳定路由器队列长度,导致链路利用率降低和延时抖动增大的问题.本文基于内模控制原理提出了一种 IMC-

PID 控制器,消除了网络拥塞控制中大时滞对系统性能的负面影响.通过引入内模控制,根据泰勒级数展开法配置 PID 控制器的参数,消除了大时滞对网络性能造成的负面影响,稳定了系统的输出.本文在 NS2 网络仿真平台上,对所设计的 IMC-PID 控制器进行了大量的性能仿真,并和其他 AQM 算法如 PI、REM 和 DC-AQM 进行了详细的性能比较.仿真结果表明 IMC-PID 在整体性能上要超过其他 AQM 算法,获得了较高的链路利用率和很好的队列稳定性.我们所采用的设计方法虽然简单但却十分有效,能够在 RTT 大范围变化的环境中获得较好的瞬态响应并维持队列的稳定性.为我们今后对高带宽延时网络(High Bandwidth-Delay Product Networks)上结合 AQM 设计更好的传输协议来补偿大时滞产生的负面影响和提供 RTT 公平性奠定了基础.同时,设计网络状态自适应的拥塞控制器也是我们进一步的研究工作.

#### 参考文献:

- [1] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397 - 413.
- [2] Misra V, Gong W, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM [C]. Stockholm: ACM Press, 2000. 151 - 160.
- [3] Kelly F P, Maullo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness, and stability[J]. J Oper Res Soc, 1998, 49(3): 237 - 252.
- [4] Kunniyur S, Srikant R. End-to-End congestion control schemes: utility functions, random losses and ECN marks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 689 - 702.
- [5] Yuping Tian. Stability analysis and design of the second-order congestion control for networks with heterogeneous delays[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(5): 1082 -

1093.

- [6] Paganini F, Wang Z, Doyle J C, Low S. Congestion control for high performance, stability, and fairness in general networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(1): 43 - 56.
- [7] Athuraliya S, Low S, Li V. REM: active queue management[J]. IEEE Network Magazine, 2001, 15(3): 48 - 53.
- [8] Hollot C, Misra V, Towsley D. A control theoretic analysis of RED[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Anchorage: IEEE Press, 2001. 1510 - 1519.
- [9] Hollot C, Misra V, Towsley D. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Anchorage: IEEE Press, 2001. 1726 - 1734.
- [10] Jianxin Wang, Liang Rong. AOPC: an adaptive optimized proportional controller for AQM[A]. Proceedings of IEEE ICPP [C]. Columbus: IEEE Press, 2006. 164 - 171.
- [11] 任丰原, 林闯, 任勇, 山秀明. 大时滞网络中的拥塞控制算法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 503 - 511.  
Ren Fengyuan, Lin Chuang, Ren Yong, Shan Xiuming. Congestion control algorithm in large-delay networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 503 - 511. (in Chinese)
- [12] Garcia C E, Morari M. Internal model control. 1. a unifying review and some new results[J]. Industry and Engineering Chemical Process Design and Device, 1982, 21(2): 308 - 323.
- [13] Smith O J M. A controller to overcome dead time[J]. ISA Journal, 1959, 6(2): 28 - 33.
- [14] Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning [J]. Journal of Process Control, 2003, 13(4): 291 - 309.
- [15] Padhye J, Firoiu V, Towsley D, Krusoe J. Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM [C]. Vancouver: ACM Press, 1998. 304 - 314.

#### 作者简介:



王建新 男, 1969 年生于湖南邵阳. 中南大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师. 研究方向为计算机网络优化算法.  
E-mail: jxwang@mail.csu.edu.cn



荣亮 男, 1982 年生于湖南株洲. 中南大学信息科学与工程学院硕士生. 研究方向为计算机网络的拥塞控制、主动队列管理.  
E-mail: csulrong@gmail.com