

# 主动队列管理中的智能分组丢弃新机制

任丰原, 林 闯, 魏丫丫, 樊燕飞

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘 要:** 主动队列管理通过网络中间节点有控制的分组丢弃实现了较低的排队延时和较高的有效吞吐量, 是 TCP 端到端拥塞控制近来研究的一个技术热点. 已有的大多数算法在判定分组丢弃时大都沿袭了 RED 的概率丢弃机制, 具有一定计算复杂度的随机数生成过程不利于路由器性能的优化. 在本文中, 我们首先定义了拥塞指数这一新的测度变量来量化描述网络的拥塞状态. 接着, 利用模糊逻辑设计了一种新的智能分组丢弃机制, 离线的合成推理使得分组丢弃的判定仅需要简单的查表操作和比较运算即可完成, 为优化路由器的性能提供了便利. 数字仿真的结果表明: 智能分组丢弃机制的性能优于经典的 RED 算法, 控制队列的能力强, 鲁棒性好, 稳定工作域大, 能很好地抵抗突发性和非弹性业务的干扰, 适合工作在瞬息万变的动态网络环境中.

**关键词:** 拥塞控制; 模糊逻辑; 分组丢弃; 主动队列管理

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12A-1933-05

## An Intelligent Packet Dropping Mechanism for Active Queue Management

REN Feng-yuan, LIN Chuang

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Active Queue Management maintains the smaller queuing delay and higher throughput by purposefully dropping packets at the intermediate nodes, and is becoming a focus in field of TCP end-to-end congestion control. Most of the existing AQM algorithms follow the probability-based packet dropping mechanism originated from RED, which is disadvantage to the router performance optimization because random number generation needs rather computational effort. In this paper, the congestion index is put forward to quantificationally describe the network congestion state. Then, a novel intelligent packet dropping mechanism is designed based on fuzzy logic. The off-line inference greatly simplifies on-line process, and thus it is very beneficial to optimize the router performance. The simulation results show that the intelligent mechanism is superior to the classical RED algorithm. It is insensitive to load variance, and able to resist against the disturbance caused by burst and short-lived http sessions, and non-elastic UDP connections, which is very suitable for the rapidly changeful network environment.

**Key words:** congestion control; fuzzy logical; active queue management

### 1 引言

Internet 自出现以来得到了蓬勃发展, 近年来更以惊人的速度增长, 现有的带宽总难能完全满足用户的要求, 产生拥塞是在所难免的. 面对业务 QoS 保证要求的日益高涨和超高速网络强劲的发展势头, 拥塞控制在网络流量管理中的作用显得尤为重要. 因为很难想象一个时常发生拥塞, 并可能导致拥塞崩溃的网络能为用户提供良好的服务; 超高速网络犹如繁忙的高速公路, 如果没有合理的交通疏导规则, 局部的堵塞很可能酿成级联性的事故, 进而导致系统瘫痪.

1984 年, Nagle<sup>[1]</sup>首次报告了 TCP 连接中没必要的重传诱发的拥塞崩溃现象, 之后拥塞控制就一直是学术界普遍关注的热点问题. 很长一段时间内, 作用于端系统上的基于窗口的

TCP 流量控制一直是拥塞避免和拥塞恢复的主导技术, 期间, 为解决同一窗口中多个丢弃分组对性能产生的负面影响, 也产生了多个增强与改进 TCP 流量控制算法, 诸如 Tahoe, Reno, New Reno, SACK<sup>[2]</sup>等, 但上述所有工作都将研究的注意力集中在终端系统上. 近来的研究表明: 无论采用如何精妙的机制, 端系统在流量管理中所能发挥的作用终究是有限的, 扩展中间节点的功能应该是增强端到端拥塞控制的一种有效的手段. 显式拥塞标识 (ECN) 即是对网络中间节点功能的一种扩展<sup>[3]</sup>, 它显著地提高了连接的有效吞吐量 (Goodput). 此外, 中间节点上的队列管理也严重影响着 TCP 的性能, 例如, 不恰当的队列管理算法可能造成 TCP 连接的全局同步、队列长时间处于满状态、处理突发业务时存在公平性问题等<sup>[4]</sup>. 为此, B

收稿日期: 2002-05-10; 修回日期: 2002-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60273009 和 90104002); 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 (No. G1999032707); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 2001AA112080); 清华大学信息学院 985 基础创新研究基金

.Braden 等人于 1998 年首先提出了主动队列管理(AQM)的研究动议<sup>[5]</sup>,作为端到端拥塞控制的一种增强手段,期望 AQM 在减小排队时延的同时保证较高的吞吐量.因为 S.Floyd 提出的 RED 算法<sup>[6]</sup>满足 AQM 的技术目标,RFC2309<sup>[5]</sup>将其推荐为 AQM 的唯一候选算法,随后围绕着 AQM 和 RED 的应用与研究逐渐丰富起来.在业界出于产品性能的考虑,路由器厂商纷纷在自己的产品中支持 RED 算法,如 Cisco 7500 等系列路由器,Juniper 的 M40,M80 等.但随着研究的深入,人们开始认识到 RED 算法本身依旧存在着许多不完善的地方,主要表现在稳定性和公平性这两个方面<sup>[7,8]</sup>,譬如 RED 算法的性能敏感于配置参数和网络状态,在特定的网络负载状况下依然会导致多个 TCP 的同步,造成队列震荡,吞吐量降低和时延抖动加剧.为了完善和改进 RED 存在的缺陷,出现了不少 RED 的变种算法,较有影响力的有 RED-gentle<sup>[9]</sup>、Stabilize-RED<sup>[10]</sup>、Self-configuration RED<sup>[11]</sup>、Adaptive-RED<sup>[12]</sup>、FRED<sup>[13]</sup>、和 Balanced-RED<sup>[14]</sup>.其中 FRED 和 Balanced-RED 侧重解决 RED 存在的公平性问题,其余均意在增强 RED 的稳定性,如 RED-gentle 在最大门限值与队列长度之间用斜线代替了原来竖直的工作曲线,以避免队列工作在该区间上时由于丢弃概率的突变而容易导致队列的震荡.为克服负载变化对 RED 稳定性的影响,Stabilized-RED 用称为 Zombie 的列表来估计激活的 TCP 连接数;Self-configuring RED 用队长作为观测负载的状态参数,并依据负载状态,动态调整分组丢弃概率.作为对 Self-configuring RED 的进一步改进,在调整丢弃概率时,Adaptive RED 用加倍增加倍乘减小(AIMD)策略替代了倍乘增加倍乘减小(MIMD)策略,并提出了目标队长的概念.除了改进的 RED 算法,新的 AQM 策略也不断涌现,诸如 BLUE<sup>[15]</sup>、PI 控制器<sup>[16]</sup>、REM<sup>[17]</sup>、GKVQ<sup>[18]</sup>、AVQ<sup>[19]</sup>等.BLUE 通过监测链路的空闲状态和分组丢失事件,以增量形式动态调整分组丢弃概率,稳定性虽有所增强,但在某些状态下队列依旧会发生振荡.PI 控制器虽增强了系统的稳定性和适应能力,但却存在不少问题,比如瞬态性能差,过分依赖缓存空间的大小.REM 利用了 F. Kelly 提出的网络流量优化理论中“价格”(price)的概念<sup>[20]</sup>来探测和控制网络的拥塞状态,为流量控制开辟了一个新的领域.因为 REM 算法是梯度寻优的解,虽然能实现 AQM 的技术目标,但目前的性能还不甚理想.GKVQ 和 AVQ 采用虚拟链路容量小于实际容量的逻辑队列辅助决策分组的丢弃.只是 GKVQ 的链路利用率总小于某个定常值,AVQ 采用了虚拟链路容量的自适应技术.从本质上讲,虚拟队列策略也是早期分组丢弃技术的一种,因为没有对队长的显式控制,很难在高吞吐量和低时延之间做出合理的平衡.

总结已有的 AQM 算法,除 GKVQ 和 AVQ 之外,其余算法无一例外的沿用了 RED 的概率丢弃机制,它的有效性毋庸置疑.从本质上讲,判定分组丢弃的过程实质上是一个基于一定目标的决策过程,在智能决策技术的支持下,应该能发掘出新颖而高效的分组丢弃/标记机制,因为分组概率丢弃机制中随机数的生成毕竟需要不小的计算开销,不利于优化网络设备的性能.基于这一点,在本文的研究中,我们将利用模糊逻辑这一智能计算技术,设计一种新颖而高效的智能分组丢弃机

制,来进一步优化路由器的传输性能.

## 2 基于模糊逻辑的分组丢弃机制

在文献[21]中,考虑到网络状态参数的时变性和 PI 控制器设计过程中采用 AQM/TCP 模型<sup>[22]</sup>的粗糙性,利用模糊控制不依赖控制对象模型的特点,AQM 设计了具有较高鲁棒性的模糊控制器(FLC).仿真试验表明:模糊控制器增强了 AQM 系统的鲁棒性,但没有充分发挥模糊逻辑智能处理的潜力,在分组丢弃/标记的判决上依旧沿用了 RED 的概率丢弃/标记机制,FLC 只是用来动态调节丢弃概率的大小.实际上,就分组丢弃这一判决过程而言,模糊逻辑应该有这种处理能力.为此,本文将试图省略概率丢弃机制,利用模糊逻辑的智能处理能力和强鲁棒性特点,为 AQM 设计一种新的分组丢弃/标记机制,简化路由器的处理.

定义路由器中的队列长度以及队列长度的变化作为网络拥塞状态的观测变量.假定期望的队列长度为  $EQ = 50\text{packets}$ ,不失一般性,取队列长度  $q$  的基本论域为  $[-EQ, 2EQ]$ ;单位采样时间内,队列长度变化  $\Delta q$  的基本论域为  $[-200\text{packets}, 200\text{packets}]$ .

设定队列长度语言变量  $Q$  的论域为:  $X = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ;队长变化语言变量  $QC$  的论域为:  $Y = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ,那么  $q$  和  $\Delta q$  的量化因子分别是:  $k_1 = 4/EQ = 0.08$  和  $k_2 = 4/200 = 0.02$

表 1 变量  $Q$  的模糊赋值表

$Q$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
NB	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.67	1

变量  $Q$  和  $QC$  的隶属函数定义如图 1 和 2 所示,模糊赋值表分别对应于表 1 和 2.

迄今为止,对网络的拥塞状态还没有一个较好的定量描述,V. Jacobson 在他那篇著名的有关拥塞控制的论文中将网络的运行状态

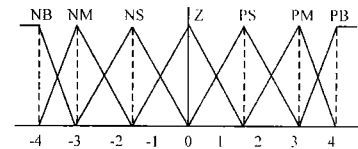


图 1 变量  $Q$  的隶属函数

大致分为拥塞避免、拥塞恢复和拥塞崩溃三个阶段<sup>[22]</sup>, Rai Jain 进一步指出网络工作在轻度拥塞状态时最有效<sup>[23]</sup>.这些定性的描述虽然对设计具体的拥塞控制策略具有一定的指导意义,但直接参照网络的拥塞状态设计控制算法应该是一种有效的方法.为此,我们定义拥塞指数  $CI$  作为网络拥塞状

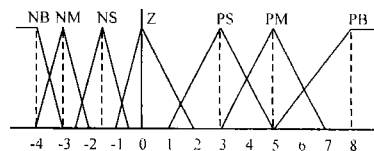


图 2 变量  $QC$  的隶属函数

态时最有效<sup>[23]</sup>.这些定性的描述虽然对设计具体的拥塞控制策略具有一定的指导意义,但直接参照网络的拥塞状态设计控制算法应该是一种有效的方法.为此,我们定义拥塞指数  $CI$  作为网络拥塞状

态的测度,它的值域是  $[-1, 1]$ ,  $CI$  为负,表征网络处于轻载; $CI$  为正,表征网络处于拥塞状态,且值越大意味着网络越拥塞.以  $CI$  作为模糊推理的输出变量  $U$ ,定义相应语言变量的论域为:  $Z = \{-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ,则量化因子  $k_3 = 8$ ,输出变量的隶属函数定义如图 3.

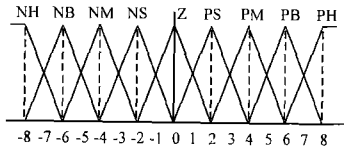


图 3 输出变量的隶属函数

$\mu_Z(2, 1) = 0.33$ ;  $\mu_{PS} = 0.5$ ,如图 4 所示.再依据力矩法,对输出模糊量进行模糊判决,求得:

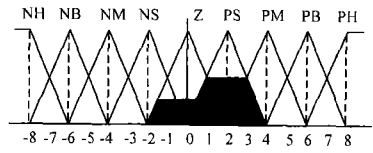


图 4 推理示例

$$\begin{aligned} \mu^* &= \frac{\sum_i \mu(u_i) \times u_i}{\sum_i \mu(u_i)} \\ &= \frac{-1 \times 0.33 + 0 \times 0.33 + 1 \times 0.5 + 2 \times 0.5 + 3 \times 0.5}{-1 + 0 + 1 + 2 + 3} \\ &= 0.534 \approx 1 \end{aligned}$$

那么,相应的拥塞指数应该是:  $CI = \mu^* / k_3 = 0.13$

表 2 变量  $QC$  的模糊赋值表

$QC$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
NB	1	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	1	0.33	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.67	0.67	0	0	0	0	0
Z	0	0	0	0.33	1	0.33	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0.67	0.67	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0.33	1	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	1

根据需要将  $Q$  和  $QC$  分成 7 档模糊集合,分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB);分  $U$  为 9 档,增加 NH 和 PH 两档.写成模糊子集为:

$$Q \in \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$$

$$QC \in \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$$

$$U \in \{NH, NB, NS, NM, Z, PS, PM, PB, PH\}$$

二维模糊推理规则  $R_k$  可表示为:

$$R_j: \text{if } Q_i \text{ and } QC_j \text{ then } U_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m$$

用模糊关系  $R$  来描述即为:  $R = \bigcup_k Q_i \otimes QC_j \otimes U_{ij}$

$R$  的隶属函数为:

$$\mu_R(q, qc, u) = \bigvee_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \mu_{Q_i}(q) \wedge \mu_{QC_j}(qc) \wedge \mu_{U_{ij}}(u)$$

采用 Mamdani 推理,则输出变量为:  $U = (Q \otimes QC) \circ R$

$U$  的隶属函数为:

$$\mu_U(u) = \bigvee_{\substack{q \in Q \\ qc \in QC}} \mu_R(q, qc, u) \wedge [\mu_Q(q) \wedge \mu_{QC}(qc)]$$

其中:  $\bigvee$  表示“max”,  $\wedge$  表示“min”,  $\otimes$  表示模糊逻辑中的叉积,表示模糊近似推理

通过大量的仿真实验和反复调试与修改,总结出表 3 所示的模糊推理规则.假定  $Q = 2, QC = 1$ ,参照表 1, 2 和 3,有两条推理规则是有效的,输出变量模糊截集的隶属函数分别为;

表 3 模糊推理规则

$e \setminus \Delta e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NH	NH	NH	NB	NB	NM	NM
NM	NH	NB	NB	NM	NM	NS	NS
NS	NB	NM	NS	Z	Z	Z	PS
Z	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
PS	NS	Z	Z	Z	PS	PM	PB
PM	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB
PB	PM	PM	PB	PB	PB	PH	PH

同样的方法,对论域  $X, Y$  中全部元素的所有组合计算出相应的拥塞指数,结果列于表 4 中.这种离线计算大大减小了繁琐的在线合成推理,通过简单的查表操作即可得到不同网络状态下的拥塞指数,结合简单的门限机制即可判决分组的丢弃与否,即:如果拥塞指数大于某个恒定值  $const$ ,则丢弃刚刚到达的分组,否则接收之.通过仿真试验,我们确定  $const$  的理想值为 0.依照拥塞指数的定义,这是有一定物理意义的,因为“0”代表网络处于轻载和拥塞的临界状态.为了方便论述,我们将这种基于模糊逻辑的智能分组丢弃机制命名为 FIPD(Fuzzy-based Intelligent Packet Drop)机制.

在实际的主动队列管理策略中,我们可以非常方便的利用 FIPD 机制来有效的控制分组的丢弃.实时采样路由器队列的长度  $q$ ,以前后两次采样值之差作为队列长度的变化量  $\Delta q$ ;分别乘以量化因子  $k_1$  和  $k_2$ ,四舍五入后映射为模糊变量  $Q$  和  $QC$  论域中的变量  $i$  和  $j$ ,查表 4,求得拥塞指数,依此判定分组丢弃与否.整个过程需要的运算与操作非常简单,避免了 RED 等类似算法中需要生成均匀

表 5 生成随机数的计算复杂度

	Ranrot W	Mother-of-all	Mersenne
指令周期	41	59	50
内存(bytes)	224	192	512

表 4 模糊判决表

$QC \setminus Q$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
-4	-1	-1	-0.75	-0.75	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0.25	0.38	0.5	0.5
-3	-1	-0.75	-0.5	-0.5	-0.25	-0.25	0	0	0.13	0.25	0.38	0.5	0.5
-2	-1	-0.75	-0.38	-0.38	0	-0.13	0	0	0.25	0.38	0.5	0.63	0.63
-1	-0.88	-0.63	-0.25	-0.25	0	0	0	0	0.25	0.5	0.6	0.75	0.75
0	-0.75	-0.5	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.63	0.75	0.75
1	-0.75	-0.5	0	0	0	0	0.13	0.5	0.38	0.63	0.75	0.75	0.75
2	-0.63	-0.38	0	0	0	0.13	0.38	0.38	0.5	0.75	0.75	0.88	0.88
4	-0.5	-0.25	0	0	0.25	0.25	0.5	0.5	0.63	0.75	0.75	0.88	1
4	-0.5	-0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1	1

分布的随机数的过程.表 5 总结了在使用汇编语言时,一些典型的随机数生成方法需要的指令周期和内存大小<sup>[24]</sup>,而对于 FIPD 机制,仅仅意味着 468bytes 的内存和一次内存访问操作.因此,新机制在优化路由器性能方面的优势是显见.

### 3 仿真验证

为验证智能分组丢弃机制的有效性,我们在 NS2<sup>[25]</sup>平台上采用图 5 所示的哑铃(Dumbbell)拓扑结构进行仿真实验.瓶颈链路位于节点 N21 和 N31 之间,容量 15Mbps(3750packets/s,分组的缺省大小为 500packtes),延时 1ms;为了使仿真配置更接近真实的网络,将业务源分为三组,每一组具有不同的往返延时,分别为 10ms,50ms 和 100ms;每一组中又分别包含  $N_1$  个持久性的 FTP 业务源,  $N_2$  个突发而短暂的 HTTP 业务源和  $N_3$  个非弹性的 UDP 业务源,其中每个 http 会话产生 10 个连接,每个连接平均传输 3 幅页面;UDP 业务源服从 ON/OFF 模型,“ON”和“OFF”的平均持续时间分别为 1s 和 10s,“ON”期间的业务速率为 40kbps.除节点 N21 和 N31 的队列由 FIPD 机制或 RED 算法控制外,其余均为 DropTail 队列;所有路由器的缓存大小均为 150packets. RED 算法中,最大/最小门限为 75/30packets. FIPD 的采样周期是 5ms,期望队列长度为 50packets.

AQM 的技术目标是低延时和高吞吐量,如果能稳定地将队列长度维持在较小的恒定值附近,便可实现这一目标.已有的各种 AQM 策略在确定的网络状态和参数配置下都不难实现这一点,但对于状态和负载瞬息万变的网络环境,稳定工作

域宽,抗扰动能力强的 AQM 策略有更强的适应性.从本质上讲,SRED、Self-configuring RED 和 Adaptive RED 等变种算法的主要目的就是采用不同的估计和自适应技术来拓展 RED 相对较小的稳定工作域.文[26]的研究结论表明:RED 的稳定工作域受负载(连接数)的制约.通过不同配置参数的仿真试验,我们考察了智能分组丢弃机制的稳定性.结论是:与 RED 不同,FIPD 基本上不敏感负载的变化.作为示例,设定  $N_1 = 100$ ,  $N_2 = N_3 = 0$ ,得到如图 6 和图 7 所示的仿真结果,不难看出,除个别尖峰之外,FIPD 能够很好地将队列控制在恒定值附近,一方面实现了 AQM 的技术目标,另一方面避免了引入不必要的延时抖动,有利于 QoS 保证的实现;相反,RED 队列则显然是不稳定的.

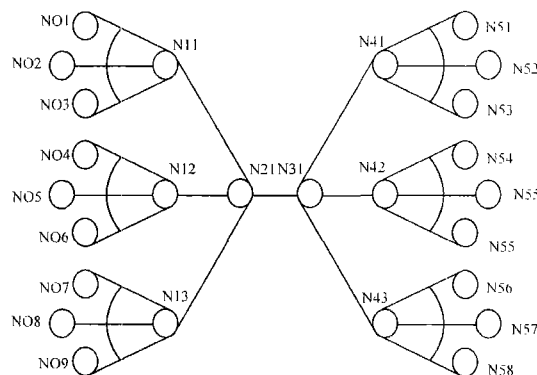


图 5 仿真网络配置图

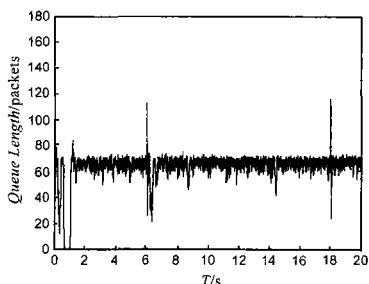


图 6 FIPD(FTP)

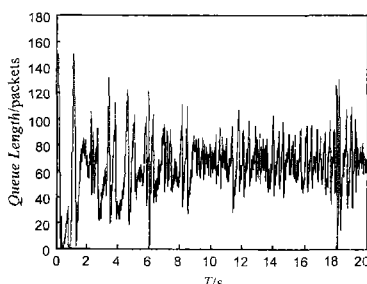


图 7 RED(FTP)

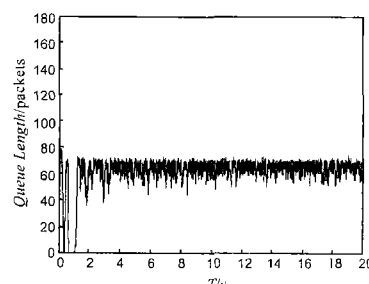


图 8 FIPD(FTP + HTTP)

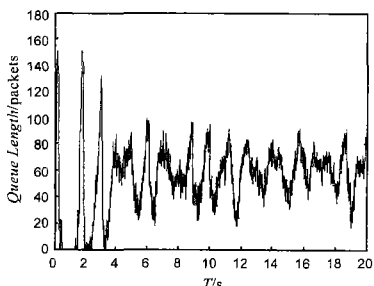


图 9 RED(FTP + HTTP)

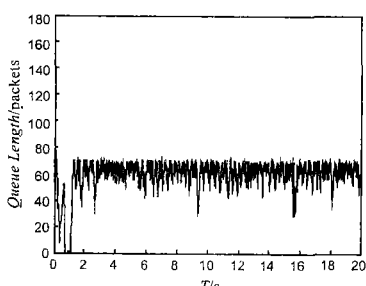


图 10 FIPD(FTP + UDP)

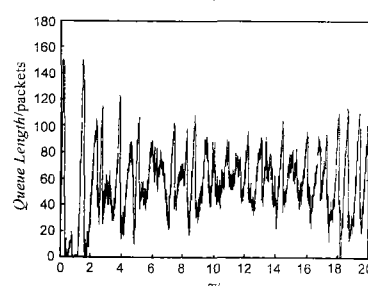


图 11 RED(FTP + UDP)

表 6 队列长度的统计特性

	FTP		FTP + HTTP		FTP + UDP	
	FIPD	RED	FIPD	RED	FIPD	RED
均值	65.31	66.38	63.55	57.82	61.21	59.22
标准差	8.01	22.55	7.44	19.89	9.31	24.57

在实际网络中,大量具有突发性和短持续时间的 HTTP

连接给队列管理带来了挑战,如何吸收突发业务流,避免 TCP 全局同步导致的队列振荡,也是 AQM 策略面临的问题之一.为验证 FIPD 机制抗扰动的能力,设定  $N_1 = 20$ ,  $N_2 = 80$ ,  $N_3 = 0$ ,得到如图 8 和图 9 所示的仿真结果,很显然,FIPD 和 RED 都能稳定工作,只是 RED 控制队列的摆动稍大一些,FIPD 具有理想的工作特性.

AQM 策略的鲁棒性还应表现在抵抗噪声的能力方面.从控制系统的角度分析,非响应性的 UDP 业务流可被等效为 AQM 控制系统的噪声,良好的控制算法应该不受噪声的影响.敏感噪声(UDP 业务)的 AQM 策略无法正常工作在实际网络中.在  $N_1 = 20, N_2 = 0, N_3 = 10$  的参数配置下进行仿真,得到如图 10 和图 11 所示的结果,在抵抗非弹性业务 UDP 的干扰方面,FDIP 要比 RED 强许多.UDP 业务的存在对 FIDP 产生的影响是很有限的,但在 RED 控制的路由器,队列呈现出不稳定的特性.为了更加清晰地比较 FIDP 和 RED 性能,计算上述仿真试验中队列长度的统计特性,并将结果列于表 6 中.

#### 4 小结

主动队列管理通过网络中间节点有控制的分组丢弃实现了较低的排队延时和较高的有效吞吐量,是 TCP 端到端拥塞控制近来研究的一个技术热点.已有的大多数策略和算法在判定分组丢弃时大都沿袭了 RED 的概率丢弃机制,具有一定计算复杂度随机数生成过程不利于优化路由器的性能.在本研究中,我们定义了拥塞指数来量化描述网络的拥塞程度,并在此基础上,利用模糊智能处理技术设计了一种新的智能分组丢弃机制,离线的合成推理使得在线的判决过程只需简单的查表操作和比较运算即可完成.此外,仿真试验表明:相对于经典的 RED 算法而言,新机制的稳定工作域较大,抗突发性和非弹性业务的能力较强,更加适合工作在瞬息万变的动态网络环境中.

#### 参考文献:

- [1] J Nagle. Congestion Control in IP/TCP Internetworks [S]. RFC 896, Jan. 1984.
- [2] Stevens. TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery [S]. RFC 2001, January 1997.
- [3] S Floyd. TCP and explicit congestion notification [J]. ACM Computer Communication Review, 1994, 24(5): 10 - 23.
- [4] ManKim, Ramakrishnan. Gateway Congestion Control Survey [S]. RFC1254, August 1991.
- [5] B Braden et al. Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet [S]. RFC2309, April 1998.
- [6] S Floyd and V. Jacobson. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397 - 413.
- [7] S Floyd. A report on some recent development in TCP congestion control [EB/OL]. <http://www.aciri.org/floyd/papers/TCPReport1.ps>.
- [8] M May, T Bonald, T Bolot. Analytic evaluation of RED performance [A]. Proc. of IEEE INFOCOM 2000 [C]. Tel Aviv, Israel: 2000. 1415 - 1424.
- [9] S Floyd, K Fall. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet [J]. IEEE/ACM Transaction Networking, 1999, 7(4): 458 - 472.
- [10] Teunis J Ott, T V Lakshman, Larry H Wong. SRED: Stabilized RED [A]. Proc. of IEEE INFOCOM 1999 [C]. New York, USA: 1999. 1346 - 1355.
- [11] W Feng, D Kandlur, D Saha, K Shin. A self-configuring RED gateway [A]. Proc. of IEEE INFOCOM 1999 [C]. New York, USA: 1999. 1320 - 1328.
- [12] Sally Floyd, Ramakrishna Gummadi, Scott Shenker. Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management [EB/OL]. <http://www.aciri.org/floyd/papers/adaptiveRed.ps>
- [13] D Lin, R Morris. Dynamics of random early detection [A]. Proc. ACM SIGCOMM 1997 [C]. Cannes France: 1997. 127 - 137.
- [14] F Anjum, L Tassiulas. Balanced-RED: An algorithm to achieve fairness in internet [EB/OL]. <http://www.isr.umd.edu/CSHCN>.
- [15] W Feng, D Kandlur, D Saha, K Shin. Blue: A new class of active queue management algorithm [R]. University of Michigan Technical Reports CSE - TR - 387 - 99, April 1999.
- [16] C Hollot, V Misra, D Towsley, W B Gong. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows [A]. Proc. of IEEE INFOCOM 2001 [C]. Anchorage, Alaska, 2001. 1726 - 1734.
- [17] Sanjeeva Athuraliya, Steven H Low, Victor H Li, Qinghe Yin. REM: Active queue management [J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48 - 53.
- [18] R J Gibbens, F P Kelly. Distributed connection acceptance control for a connectionless network [A]. Proc. of the 16<sup>th</sup> International Teletraffic Congress [C]. Edinburgh, Scotland: 1999.
- [19] S Kunniyur, R Srikant. Analysis and design of an adaptive virtual queue algorithm for active queue management [A]. Proc. of ACM SIGCOMM 2001 [C]. San Diego, USA, 2001.
- [20] R J Gibbens, F P Kelly. Resource pricing and the evolution of congestion control [EB/OL]. <http://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/evol.html>, 1998.
- [21] Ren Fengyuan, Ren Yong, Shan Xiuming. Design a fuzzy controller for active queue management [J]. Computer Communication, 2002, 25: 874 - 883.
- [22] V Jacobson, M Karels. Congestion avoidance and control [A]. Proc. ACM SIGCOMM 1988 [C]. Stanford, CA, 1988. 314 - 329.
- [23] Raj Jian. Congestion control and traffic management in ATM networks: Recent advances and survey [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1996, 28(13): 1723 - 1738.
- [24] Agner Fog. Uniform random number generators [EB/OL]. <http://www.agner.org/random/>
- [25] UCN/LBL/VINT. Network simulator-NS2 [EB/OL]. <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns>.
- [26] C V Hollot, Vishal Misra, Don Towsley, Wei-Bo Gong. A control theoretic analysis of RED [A]. Proc. of IEEE INFOCOM 2001 [C]. Anchorage, Alaska, 2001. 1510 - 1519.

#### 作者简介:



任原丰 男, 1970 年生于甘肃临洮, 讲师, 主要研究方向为网络流量的控制与管理, network calculus, 测控网络, 传感器网络等. E-mail: renfy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn.

林 闯 (见本期第 1922 页).

魏丫丫 女, 1979 年生于湖北公安, 清华大学博士研究生. 感兴趣的方向有计算机网络, 系统性能评价, Web QoS 等.