

主动队列管理研究综述

刘明, 窦文华, 张鹤颖

(国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

摘要: 主动队列管理是路由器中支持拥塞控制的主要机制, 也是基于路由器的网络拥塞控制的研究热点, 但目前仍然没有能被普遍接受并获得广泛应用的方案。该文围绕主动队列管理机制的关键技术和当前研究中尚待解决的几个问题进行了论述, 具体包括: 链路特征对主动队列管理的影响, 大延时对主动队列管理的影响, 主动队列管理机制对网络稳定性的影响和主动队列管理在无线网络中的应用。
关键词: 拥塞控制; 主动队列管理; 控制理论

Survey of Active Queue Management

LIU Ming, DOU Wenhua, ZHANG Heying

(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 Much recent work has focused on improving AQM performance through alternate approaches. There are no universally acceptable solutions in this area. This paper reviews the current AQM schemes and provides some open issues including the model, link characteristics, stability of the closed-loop system and wireless networks.

【Key words】 Congestion control; Active queue management; Control theory

1 概述

Sally Floyd 等人于 1993 年提出了随机早检测 (Random Early Detection, RED) 算法, 同时也提出了网络研究的一个新的方向: 主动队列管理, TCP/AQM 在网络协议中的作用如图 1 所示。

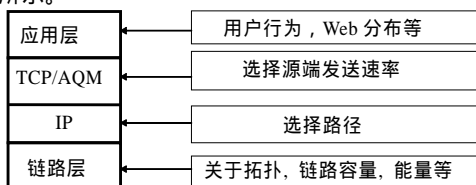


图 1 AQM 在网络协议中的作用

随着网络规模的急剧膨胀, 新出现的网络应用对服务质量的要求越来越高, 在路由器中采用 AQM 机制显得尤其重要。1998 年, IETF 建议在路由器中采用 AQM 机制, 在国际上掀起了研究 AQM 机制的高潮, 在国际范围内有影响的会议和期刊有大量文章发表。至 2005 年 8 月止, 以 AQM 为关键词在 IEEE 的数据库中检索到文章 124 篇, 在 Web of Science 数据库(SCI,SSCI,AHCI)中可以检索到文章 624 篇, 在 EI 数据库中检索到文章 492 篇, 主动队列管理成为网络研究的热点之一。

2 AQM 原理

AQM 机制的主要思想是在路由器中的缓冲区没有溢出之前, 根据网络的拥塞状况, 以一定的概率丢弃报文。TCP 拥塞控制主要根据网络拥塞状况调节拥塞窗口的大小, TCP 与 AQM 的交互作用构成了著名的网络二元模型, 见图 2。

源发送速率 $x_i(t)$ 和拥塞度量 $p_i(t)$ 是模型中的两个元。TCP/AQM 使网络中的源和链路共同参与到网络拥塞控制中, 从而使源端能够更快地得到网络链路的信息, 获得更高的链

路利用率。AQM 机制根据上一时刻的拥塞度量 $p_i(t)$ 和源发送速率 $x_i(t)$ 产生新的拥塞度量 $p_i(t+1)$ 。

$$p(t+1) = G(p(t), Rx(t)) \quad \leftarrow \text{AQM}$$

$$x(t+1) = F(R^T p(t), x(t)) \quad \leftarrow \text{TCP}$$

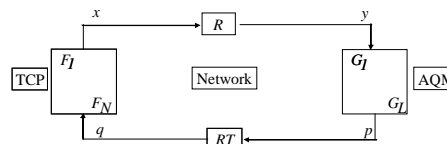


图 2 网络二元模型

AQM 机制的主要性能指标包括链路利用率, 报文丢弃率以及平均队列长度等。平均队列长度决定了报文的排队延迟, 队列长度的起伏 (一般称为队列动荡) 决定了延迟抖动。因此 AQM 机制的性能指标之一是将队列长度控制在较低的水平, 并且使得队列动荡比较小。除此之外 AQM 机制还需要达到如下目标: 消除对突发流的偏见; 采用随机丢弃消除网络的全局同步现象。

3 AQM 研究现状

自 1998 年 IETF 的 RFC2309 建议路由器使用 AQM 机制之后, AQM 成为计算机网络领域的热点之一。在各种文献中共提出了几十种算法, 研究工作主要集中在以下几个方面:

3.1 RED 算法及其变种算法

RED 算法是最早提出的 AQM 机制, 也是基于平均队列长度的主动队列管理机制的典型代表。自从 Sally Floyd 等人提出 RED 算法以来, 在近十年的时间里, RED 的性能分析

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90104001)

作者简介: 刘明(1977-), 男, 博士生, 主研方向: 计算机网络; 窦文华, 博导; 张鹤颖, 博士、讲师

收稿日期: 2006-02-28 **E-mail:** liutomorrow@hotmail.com

及改进方法一直是国内外研究的热点。对于每一个到达的报文，RED 采用指数加权平均方法计算平均队列长度：

$$avg_{new} = (1 - w_q) \times avg_{old} + w_q \times q$$

然后，根据平均队列长度计算报文丢弃概率 p ：

$$p = \begin{cases} 0 & avg \leq \min_{th} \\ \frac{avg - \min_{th}}{\max_{th} - \min_{th}} \max_p & \min_{th} < avg < \max_{th} \\ 1 & avg \geq \max_{th} \end{cases}$$

在 RED 被广泛应用于路由器之前，全面了解它在各种网络条件和流量条件下的性能是非常重要的。Martin May 等人利用两台实现了 RED 算法的 CISCO7500 路由器和 16 台 PC 建立了实际的网络环境，研究了 RED 在 FTP 流、HTTP 流和 UDP 流下的性能。研究结果表明当缓冲区比较小时，RED 的性能并不比 DT 好，而且 RED 的参数配置是有待研究的问题。文献[1]研究发现 RED 的稳定性主要由最大报文丢弃概率决定，队列动荡主要由队列的最小阈值和最大阈值之间的差值决定，建立了 RED 的参数与网络带宽、延迟、TCP 流的数目之间的关系表达式，用于设置 RED 的参数。

针对 RED 静态参数配置的限制性，Wu-chang Feng 等提出了自配置 RED、Sally Floyd 提出了自适应 RED (ARED)。James A 采用线性系统理论分析了 RED 模型，指出 RED 在网络条件大范围变化的情况下，不能稳定队列长度的原因在于没有提出明确的控制目标 - 目标队列长度，提出了动态 RED (DRED) 算法，根据队列长度与目标值的误差调节丢弃率，从而将队列长度控制在目标值附近。

此外，许多学者对 RED 在设计时没有考虑到的细节问题进行了补充。例如，RED 在计算报文丢弃概率时没有考虑报文大小对流的吞吐量和丢弃率的影响，导致 RED 对 MTU 比较大的连接丢弃率较高。如果用报文长度与 MTU 的比值对 RED 的丢弃率进行调节，能够保证不同流之间在吞吐量和丢弃率方面的“公平性”。

虽然 RED 是为了改善尽力服务网络的拥塞控制而提出来的，但是 RED 及其改进算法还被广泛应用于区分服务体系结构中。David D. Clark 等人提出了区分服务体系结构中的 RED 改进算法 RIO (RED with In and Out)，在网络边缘将报文标记为 in 或 out，对两类流量采用不同的 RED 参数和丢弃率，以区分它们的优先级。

3.2 基于控制理论的主动队列管理机制

通常 RED 的改进方法在增强 RED 性能的同时，增加了算法的复杂度。不论是对 RED 参数设置的研究还是在 RED 基础上的改进最终都不能得到令人满意的效果，学术界开始摆脱 RED 结构框架的束缚，寻找新的简单、鲁棒的 AQM 控制器。

随着对 TCP 协议运行机制认识的深入和计算机网络建模技术的发展，将控制理论应用于主动队列管理机制的设计成为可能，并且已经成为目前研究的热点。2000 年，Vishal Misra 等建立了 TCP 与队列变化的非线性微分方程模型。2001 年，C.V.hollot 采用小信号线性化方法将该模型线性化，并且导出了线性模型的传递函数，在此基础上分析了 RED 的参数设置并设计了比例积分(PI)控制器。

基于控制理论设计主动队列管理机制具有许多优越性：

(1)设计方法更加科学，参数配置变得容易。控制理论是在系统数学模型的基础上建立起来的完善的理论体系，可以根据系统的稳态和动态性能要求选择合适的控制器，根据系统的稳定性、准确性、快速性、鲁棒性等要求决定控制器的

参数。

(2)算法的性能对网络条件的敏感性降低，在控制器的设计阶段就已经将系统的稳态精度、响应速度、稳定裕度、抗干扰能力等作为设计目标。

(3)大部分基于控制理论设计的 AQM 机制的复杂程度与 RED 相当，实现简单，适用于高速网络。特别是从经典控制理论推导出的控制器，其报文丢弃率通常是瞬时队列长度的线性函数。

(4)具有明确的控制目标，消除了队列长度与负载的耦合，减小了队列振荡。

应用控制理论进行可以将现有的有代表性的 AQM 机制按照它们的控制特征分类^[2]见表 1。

表 1 几种应用用控制理论分析和设计的 AQM 机制

AQM	控制模型	特点
BLUE	On-off	改进的 on-off 控制，动态微调报文丢弃概率：当报文发生丢弃时增加报文丢弃率，当链路出现空闲降低报文丢弃率
RED	I	使用加权平均队列长度，控制目标 $[\min_{th}, \max_{th}]$
DRED	I	使用加权平均队列长度，将常值 Q_{ref} 参考队列长度作为控制目标
AVQ	P	改进的 token bucket 模型：维持一个虚拟队列 (VQ)，根据报文到达速率调整 VQ 容量
PI	PI	将常值 Q_{ref} 参考队列长度作为控制目标，引入 P 控制可以获得更快的响应速度，引入积分控制消除稳态误差
PAQM	PID	使用当前队列长度和报文丢弃率，使用 PI 控制获得较快的响应速度和更高的稳态精度，引入 D 控制器获得控制量变化趋势，引入有效的早期修正

应用控制理论设计主动队列管理机制是目前学术界研究的热点。许多常用的控制方法被应用到 AQM 设计中来，例如比例控制器 (P)、比例积分控制器 (PI)、比例积分微分控制器 (PID)、比例微分控制器 (PD) 等。此外，许多先进控制理论也被用于 AQM 机制的设计，例如鲁棒控制、模糊控制、基于状态反馈的现代控制、神经网络控制等，这些控制器的性能有待进一步的分析和证明。

3.3 其它 AQM 机制

最近，许多学者试图利用其它理论和方法来解决主动队列管理研究中的一些问题，主要包括基于最优化理论和经济学的方法，还包括基于仿生的方法，基于博弈论的方法等等。但上述算法仅仅作为一种新方法被提出来，没有成为研究的主流。

4 AQM 研究中尚待解决的几个问题

4.1 现有基于控制理论的 AQM 算法的不足

基于控制理论的 AQM 算法是当前研究的热点和主流，但是大量仿真结果表明，几种代表性的算法的性能并不能满足应用的需求，通过理论分析和仿真试验，我们认为现有基于控制理论的典型算法存在如下的不足之处：

(1)没有充分考虑被控对象模型的不精确性，导致所设计的算法不能达到预期的性能指标，主要表现在以下几个方面：

1)近似模型只考虑了 TCP 流，而没有考虑 UDP 等采用其它协议的流。

2)只考虑了 TCP 协议的拥塞避免阶段，忽略了慢启动和超时阶段。实际上，持续时间比较长的 TCP 流主要工作在拥

塞避免阶段。相反,持续时间比较短的 TCP 流通常在慢启动阶段就已经完成了数据传输。

3)在模型线性化过程中,假设活跃的 TCP 连接数目、TCP 连接的 RTT 等参数在较长时间内保持不变。

(2)对被控对象缺乏深入的分析,导致 AQM 控制器不能很好地保证系统的稳态性能和暂态性能。例如目前对网络流量的测量表明网络流量是长相关的,任何时间的流量与未来的流量之间具有非零概率的正相关性。网络流量的自相似特征将会导致大的排队延迟、高丢弃率以及持续拥塞。目前无线网络的快速发展导致 Internet 在结构和传输介质方面的异构性越来越显著。当传输延迟比较大的无线网络接入到高速有线网络中,构成了与当前网络不同的高带宽延迟积网络。仿真实验中现有的算法在这些复杂的网络环境中不能取得令人满意的效果。

(3)当前的控制模型忽略了网络中多个路由器采用异种 AQM 机制时报文标记效果的相互影响,而这是 AQM 获得应用必须要解决的问题。

4.2 尚待解决的几个问题

(1)网络流量特性对 AQM 性能的影响

网络端节点的数据传输协议与路由器中的 AQM 机制组成了一个典型的闭环反馈控制系统,使得采用控制理论分析和设计 AQM 机制成为可能。但是,由于 Internet 流量的在组成和变化方面的复杂性,建立 Internet 流量的精确数学模型是困难的,控制理论的应用面临很大的挑战。

深入研究网络流量特性,以此作为评价 AQM 控制器性能的基础,成为研究中的挑战之一。网络自相似理论和非线性理论可能成为设计 AQM 算法的有力工具,目前利用非线性理论研究网络模型的简化对 AQM 性能的影响和设计对被控对象模型的精确度和模型的参数变化不敏感的算法仍然处于起步阶段,有许多问题亟待解决。

(2)大延迟条件下 AQM 机制的性能

TCP/AQM 闭环系统是一个典型的时滞系统。在目前的 AQM 机制设计中为了简化设计,通常忽略系统中的延迟环节。在延迟比较小的情况下,忽略延迟对系统性能的影响比较小。但是在延迟比较大的情况下,忽略延迟往往会导致系统不稳定。

已有的大多数关于 AQM 机制的文献在验证算法的性能时都设定网络的延时为几十毫秒,我们用 NS 仿真 ARED、PI、REM、AVQ 等算法在大延时条件下的结果表明,几种算法在延时较大的情况下存在一些共同的特点,首先是队列的大幅震荡,增加了端到端的延时抖动;其次是链路利用率低;最后是队列长度不能收敛到目标值附近。

预测控制是近年来发展起来的一种较新的方法,它不需要被控对象的精确的数学模型,利用数字计算机的计算能力实行在线的滚动优化计算,从而取得好的综合效果。它可能在 AQM 的设计中成为克服大时延的工具之一,但是其在复杂网络环境中的应用还有许多未解决的问题,例如预测控制在对模型失配有较强鲁棒性的同时,也存在对随机突发干扰难以及时控制的不足。

(3)AQM 对网络稳定性的影响

主动队列管理机制改善了端到端拥塞控制的性能,但是增加了网络的复杂性,对整个 Internet 的稳定性和鲁棒性产生了深刻的影响。目前 AQM 机制都是基于局部网络状态信

息设计的,一般只考虑了单个路由器的稳定性,而 AQM 机制对于整个网络稳定性的影响尚未得到重视和研究。作为 Internet 中主要的拥塞控制机制,TCP 拥塞控制的稳定性已经引起了许多研究者的兴趣,这些研究中所采用的网络模型比较简单,例如忽略网络的传输延迟或者假设所有连接的回返时间相同,采用最简单的单个源单个链路的网络拓扑,或者多个源单个链路的网络拓扑等。

建立包括多个链路多个源的网络系统模型,研究源端的拥塞控制机制与路由器中的 AQM 机制组成的闭环反馈系统在反馈延迟存在时的全局稳定性,给出全局稳定的条件,成为 AQM 研究中的理论难点之一。

(4) AQM 在无线网络拥塞控制中的应用

近年,无线局域网、无线自组网络(AdHoc)、卫星网络等异构(heterogeneous)网络得到了快速发展和广泛应用,导致 Internet 在结构和连接介质方面的异构性越来越显著。这些异构网络的共同特点是传输延迟大,而现有的有线网络互连设备的端口速度越来越快,当传输延迟比较大的异构网络接入到高速有线网络中,构成了与当前网络不同的高带宽延迟积网络。在无线网络中,由于无线链路的高误码率和传输的不连续性,经常导致报文丢失,这种报文丢失一般称为无线丢失。由网络拥塞导致的报文丢失一般称为拥塞丢失,AQM 中未作充分考虑将会导致性能的严重下降。

AQM 在无线网络中的应用在 AQM 研究中尚未充分展开,AQM 研究尚未考虑无线网络中的跨层优化设计以及与有线网络不同的物理层和 MAC 层对上层协议的约束。XuHeng 等提出适用于 WLAN 的 AQM 机制,但是其性能分析局限于无线网络的传输延迟。Q.Peng 等分析了不同的 TCP 版本与 DT 和 RED 算法在无线网络中的性能,结果表明适用于有线网络的 RED 在无线网络中并没有表现出其对于弃尾队列的优越性。

5 结论

由于 Internet 传输的突发性和弃尾队列管理方法的不足,IETF 建议在路由器中采用主动队列管理机制,以克服 DT 的缺陷,并且在尽力服务网络中提供低延迟、低丢失率的服务。尽管多数路由器支持 RED 等算法,例如 Cisco 的多数路由器部署了 RED 的变种算法 Cisco's WRED,但是 AQM 机制在路由器的默认配制中都是禁止的。因此目前为止 AQM 的应用情况仍然很难估计。

自 1999 年以来研究者提出了近百种的 AQM 算法,尽管该领域的研究已经持续了几年,但仍然没有获得广泛认可和应用的方案,仍然存在许多尚未充分展开和尚待解决的问题。包括流量模型、稳定性、多 AQM 协同工作等理论难题,以及在无线网络、区分服务、组播等环境下的应用问题,都需要研究者的进一步关注。

参考文献

- 1 Thomas Z, Christof B, Serge F. A Quantitative Model for Parameter Setting of RED with TCP Traffic[C]. Proceedings of IWQoS, Karlsruhe, Germany, 2001: 15-30.
- 2 Ryu S, Rump C, Qiao C. Advances in Internet Congestion Control[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2003, 5(1): 28-39.
- 3 Low S, Chiang M. Optimization and Control of Communication Networks[Z]. Keynote Speech of IEEE Infocom. 2005. <http://www.ieee-infocom.org/2005/tutorials.htm#Low>.