

ATM 网络中面向 ABR 服务的一种流量控制机制

张孝林, 吴介一, 朱正强, 张飒兵

(东南大学 CIMS 中心, 江苏南京 210096)

摘 要: 在 ATM 网络有效和稳定的运行过程中, 拥塞控制起着重要的作用. 对此, 本文提出一种方法来设计基于速率的流量控制机制以便调节 ABR 服务并有效地控制网络拥塞. 目标是在多个竞争用户间公平分配可用链路带宽、维持瓶颈结点的队列长度在希望值. 该机制基于最小节拍 (DR) 控制并具有非常简单的结构. 仿真结果表明, 该控制机制是公平的并且具有快速收敛、无振荡和高链路带宽利用率的优点.

关键词: ATM 网络; 拥塞控制; 流量控制; 最小节拍控制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 04-0503-05

A Flow Control Mechanism for ABR Service in ATM Networks

ZHANG Xiao-lin, WU Jie-yi, ZHU Zheng-qiang, ZHANG Sa-bing

(CIMS Center, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Congestion control plays an important role in the effective and stable operation of ATM networks. This paper proposes an approach to design a rate-based flow control mechanism in order to regulate the Available Bit Rate (ABR) traffic and effectively control congestion of the networks. The goal is to share the available link capacity fairly among many competitive users to maintain queue length of a bottleneck node at a desired level. The mechanism uses a Deadbeat-Response (DR) controller and has a simple structure. Many simulations show that the mechanism is fair and has the advantages of fast convergence, no oscillation, and high link bandwidth utilization.

Key words: ATM networks; congestion control; flow control; deadbeat-response control

1 引言

近年来, 高速计算机网络的一个主要进展是宽带综合业务数字网 (B-ISDN) 和异步转移模式 (ATM) 的出现, 其中, ATM 网络中的基本数据传输单元是 53 个字节的信元. 当信元通过一个交换结点时, 交换机使用信元头部的虚拟通路标识 (VPI) 和虚拟信道标识 (VCI) 查询交换表以快速确定输出 VPI、VCI 和端口号, 从而完成交换. 在 ATM 网络中, 很多条虚拟连接 (VC) 可以通过统计复用共享一个链路带宽.

为支持具有不同服务质量 (QoS) 需求的业务, 在 ATM 网络中定义了几种服务类型^[1]. 其中, 可用比特速率 (ABR) 服务类型被定义为支持“尽力而为”的应用. 它不提供严格的服务质量保证, 而是试图以延迟为代价最小化信元丢失, 并允许其应用的源端通过调整瞬时发送速率到所允许的值以充分利用可用的网络链路带宽. ATM 论坛业务量管理委员会已经完成了基于速率的流量控制框架的定义来实现上述目标^[1]. 因此, ABR 基于速率的流量控制机制不仅被设计用来控制网络拥塞, 同时也用来保证 ATM 网络中所有 ABR 竞争用户公平地分享可用链路带宽.

各种基于速率的流量控制机制根据所采用的反馈机制可大致分为两类: 二进制反馈机制和显式速率 (ER) 机制. 由于 ER 机制相对于二进制反馈机制的优点, 文献 [2]、[3] 中已经提出了一系列的 ER 机制; 然而这些机制的主要缺陷在于控制机制是直观的、不提供任何形式化的设计方法以保证闭环控制的稳定性. 文献 [4]、[5] 中提出了几种基于控制理论的流量控制机制; 这些机制的主要特点是在设计过程中考虑每个 VC 的往返传输延迟 (RTT) 并在运行中对它们进行测量.

ABR 流量控制框架的选项之一是虚拟源/虚拟目的 (VS/VD) 选项. 这个选项允许交换机把一个 ABR 连接分成两个或更多的分段受控的 ABR 段^[1]; 其结果是, 端-端的流量控制被段-段的流量控制代替. 这种分段流量控制的一个优点是这些段具有较短的反馈回路, 从而可以显著地减小 RTT. 因此, 在设计 ABR ER 控制机制时, 可以忽略 RTT 的影响而将精力集中在流量控制方面, 如文献 [6] 中所述.

本文中, 提出了一种基于传统控制理论-最小节拍 (DR) 控制器的 ABR 流量控制机制. 它实现简单、运行稳定、带宽利用率高. 通过仿真实验表明该机制是公平的并具有很好的瞬态和稳态性能.

收稿日期: 2000-09-07; 修回日期: 2001-06-29

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69896249); 江苏省自然科学基金 (No. BK 99013)

2 显式速率流量控制机制及其设计目标

ATM 网络中面向 ABR 服务的基于速率流量控制机制运行过程为:每隔固定数目(Nrm)的数据信元,源端周期性地发送一个“前向”资源管理(FRM)信元进入网络.这个 FRM 信元包含几个域,主要有当前信元速率(CCR)域,它在源端产生一个 FRM 信元时被设置为当前允许信元速率(ACR);拥塞标识(CI)域,这是一个二进制位,在源端它被复位,中间交换机可根据其运行状态来置位,该域用来使源端增大或降低速率;显式速率(ER)域,它用一个 15 位的浮点数来表示网络所支持的显式速率.收到 FRM 信元后,目的端将它随同最新的网络信息反馈给源端,此时该 FRM 就成为一个“后向”资源管理(BRM)信元.根据交换机的工作模式,网络信息包含在 CI 和/或 ER 域中.交换机为每个活动 VC 计算其可用容量的平均公平分享值,这个值即被称为显式速率(ER)并被置入 FRM 或 BRM 的 ER 域中直接发往源端.源端基于 BRM 信元中包含的反馈信息调节它的 ACR 值.如果 CI 位被置位,源端根据速率减少因子(RDF)减小其 ACR 值直到建立连接时协商确定的最小信元速率(MCR).反之,源端根据速率增加因子(RIF)增大 ACR 直到建立连接时协商确定的峰值信元速率(PCR).在所有情况下,ACR 不能大于 ER 除非 ER 小于 MCR. FRM 信元的 ER 域由源端初始化为 PCR,中间交换机只能减小它.关于 ER 控制机制的详细说明,读者可参考文献[1].

交换机实现的细节不在 ATM 论坛规范的讨论范围之内,它已成为众多提出的计算每个 VC ER 值机制的课题.很明显,设计这样的机制要达到以下几个主要的目标:

(1) 网络中受控参数的快速收敛和尽量小的振荡;(2) 所有活动 VC 之间链路带宽的公平分配;(3) 控制机制实现简单;(4) 具有较低的信元丢失率(CLR);(5) 带宽利用率高.

3 控制机制的设计与分析

3.1 线性动态模型

图 1 给出了由 DR 控制器和一个交换机输出缓冲区构成的 ER 流量控制机制.为能进行离散时间分析,假设交换机每 T 秒计算一个新的反馈变量 ER 值.交换机在输出缓冲区排队信元直到它们被发送.如果在第 n 个时间区间内,将到达交换机的信元速率 $r(n)$ 设为常数,那么在间隔 T 秒的下一个时刻,缓冲区中队列长度 q 可用以下瞬时近似公式表示:

$$q(n+1) = \text{Sat}_B\{q(n) + r(n) \times T + (n_q - C) \times T\} \quad (1)$$

$$\text{Sat}_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } (x < 0) \\ B & \text{if } (x > B) \\ x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: B 是缓冲区尺寸; C 表示链路带宽; n_q 表示“噪声”以及“确保”服务所占的带宽,如可变比特速率(VBR)服务的合成速率.

为了研究局部稳定性,可以移去饱和和非线性来考察动态方程(1)的线性部分,从而得到:

$$q(n+1) = q(n) + r(n) \times T + (n_q - C) \times T \quad (3)$$

分别用 $Q(z)$ 和 $R(z)$ 表示 $q(n)$ 和 $r(n)$ 的 z 变换.从式(3)得到:

$$Q(z) = \frac{T}{z-1} R(z) - \frac{T}{z-1} D(z) \quad (4)$$

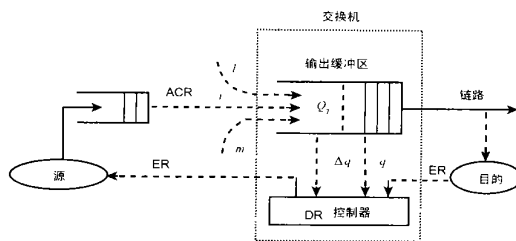


图 1 面向 ABR 服务的 DR 流量控制机制

上式中 $D(z)$ 是干扰量 $C n_q$ 的 z 变换,因此受控过程的传递函数为:

$$\begin{aligned} G(z) &= T/(z-1) = Tz^{-1}/(1-z^{-1}) \\ &= Tz^{-1} + Tz^{-2} + Tz^{-3} + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 DR 控制器的设计

由控制理论可知,设计控制系统主要目标之一是使系统的响应尽可能地达到期望值.这类控制系统被称为时间最优(TO)控制系统或最小时间控制系统.其目标是在系统的阶跃响应中有尽量小的最大超调量和快速的响应时间.最小节拍设计是 TO 控制系统的一种设计工具. DR 设计具有以下设计标准:

- 对于指定的参考输入信号,系统稳态误差必须为零;
- 到达稳定状态的响应时间必须最小;
- 数字控制器 $G_C(z)$ 必须是物理可实现的.

图 2 给出了 DR 流量控制系统的框图.图中 $G_C(z)$ 就是需要设计的 DR 控制器, $Q_T(z)$ 表示队列长度阈值 Q_T 的 z 变换, $E(z)$ 是误差信号 $Q_T - q(n)$ 的 z 变换.由图 2 可得系统的闭环传递函数为:

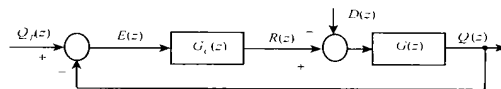


图 2 流量控制系统

$$\frac{Q(z)}{Q_T(z)} = M(z) = \frac{G_C(z) G(z)}{1 + G_C(z) G(z)} \quad (6)$$

从上式中解出 $G_C(z)$, 得到:

$$G_C(z) = \frac{1}{G(z)} \frac{M(z)}{1 - M(z)} \quad (7)$$

误差信号的 z 变换为:

$$\begin{aligned} E(z) &= Q_T(z) - Q(z) = Q_T(z) [1 - M(z)] \\ &= \frac{Q_T(z)}{1 + G_C(z) G(z)} \end{aligned} \quad (8)$$

输入的 z 变换由以下函数描述:

$$Q_T(z) = \frac{Q_{TA}(z)}{(1 - z^{-1})^N} \quad (9)$$

式中 N 是正整数, $A(z)$ 是 z^{-1} 的多项式,它没有 $z=1$ 的零点.例如对单位阶跃函数输入, $A(z) = 1, N=1$; 对单位斜坡函数输入, $A(z) = Tz^{-1}, N=2$. 要使系统响应的稳态误差为零,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(kT) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) E(z)$$

$$= \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) \frac{Q_T(z) [1 - M(z)]}{(1 - z^{-1})^N} = 0 \quad (10)$$

从式(10)中可知,稳态误差为零的必要条件是 $1 - M(z)$ 必须包含因式 $(1 - z^{-1})^N$, 这样, $1 - M(z)$ 具有如下形式:

$$1 - M(z) = (1 - z^{-1})^N F(z) \quad (11)$$

这里 $F(z)$ 是 z^{-1} 的多项式. 从上式中解出 $M(z)$, 得:

$$M(z) = \frac{z^N - (z - 1)^N F(z)}{z^N} \quad (12)$$

由于 $F(z)$ 是 z^{-1} 的多项式, 仅在 $z=0$ 处有极点. 因此, 式(12)明确指出了具有零稳态误差系统的特征方程具有如下形式:

$$z^P = 0 \quad (13)$$

P 是一个 N 的正整数.

将式(11)代入式(8), 误差信号的 z 变换可写为:

$$E(z) = Q_T(z) \times F(z) \quad (14)$$

由于 $A(z)$ 和 $F(z)$ 都是 z^{-1} 的多项式, 式(14)中 $E(z)$ 是具有有限项的 z^{-1} 的幂级数展开式. 因此误差信号将会在确定的采样周期之后变为零, 队列长度收敛到稳态值 Q_T .

式(12)表明对于给定输入设计 DR 控制器首先必须选择 $F(z)$ 函数. 一旦 $M(z)$ 由式(12)决定, DR 控制器的传递函数就可由式(7)得到. 然而, 对于 $G_C(z)$ 物理可实现性的要求以及 $G(z)$ 是一个物理过程的传递函数的特点, 从而对闭环传递函数 $M(z)$ 施加了限制.

由于 $G(z)$ 在 $z=1$ 的单位圆上有极点, 并且 $G(z)$ 展开式的第一项是 Tz^{-1} , 因此

$$M(z) = M_1 z^{-1} + M_2 z^{-2} \quad (15)$$

对于一个单位斜坡函数输入, $1 - M(z)$ 应该包含因式 $(1 - z^{-1})^2$. 这样, $1 - M(z)$ 应具有如下形式:

$$1 - M(z) = (1 - z^{-1})^2 F(z) = (1 - z^{-1})^2 \quad (16)$$

为使物理可实现的 $G_C(z)$ 的响应为最小节拍, $1 - M(z)$ 必须包含常数项 1, 这样就有 $F(z) = 1$. 由于 $M(z)$ 现在最小次数 2, 暂态响应将在两个采样周期后稳定下来, 这是该系统可能最短达到稳态的时间.

现在有两个未知数和两个独立的等式, 因此 M_1 和 M_2 可从等式(15)和式(16)中解出. 将式(15)代入式(16)得到如下等式:

$$M(z) = M_1(z) + M_2(z) = 2z^{-1} - z^{-2} \quad (17)$$

将式(17)和(5)代入式(7)得到数字控制器的传递函数

$$G_C(z) = \frac{R(z)}{E(z)} = \frac{2 - z^{-1}}{T(1 - z^{-1})} \quad (18)$$

从以上等式, 得到:

$$R(z) = z^{-1} R(z) + \frac{2}{T} E(z) - \frac{1}{T} z^{-1} E(z) \quad (19)$$

在上式两边作逆 z 变换可得 DR 控制器为

$$r(n) = r(n-1) + \frac{2}{T} e(n) - \frac{1}{T} e(n-1) \quad (20)$$

这里 $e(n) = QT - q(n)$.

对于单位斜坡输入, 输出的 z 变换为:

$$Q(z) = M(z) \frac{Tz^{-1}}{(1 - z^{-1})^2} = T(2z^{-2} + 3z^{-3} + 4z^{-4} + \dots) \quad (21)$$

当采用单位阶跃函数输入时, 输出的 z 变换为:

$$Q(z) = M(z) \frac{1}{1 - z^{-1}} = 2z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots \quad (22)$$

由上可知, 系统的单位阶跃响应有一个最大为 100% 的超调. 为了限制这个会带来高 CLR 的超调, 我们引入非线性饱和函数来对控制器的 $r(n)$ 施加限制. 于是, 可得到:

$$r(n) = \text{Sat}_c \{ r(n-1) + \frac{2}{T} e(n) - \frac{1}{T} e(n-1) \} \quad (23)$$

式中 Sat_c 是一个略大于 1 的系数. 在下面的实验中, 使用的值是 1.1.

本文采用文献[1]中 74 页介绍的公平标准 3 来处理 DR 机制的公平性. 因此, 对于 ABR VC, 如果在第 n 个采样间隔中有至少一个信元到达交换机, 就定义其为活动的. 这样, 对于每一个活动的 ABR VC, 其交换机可用带宽容量的平均公平分享值计算:

$$\text{Fair_share} = \frac{r(n) - \text{limited_VC_Capacity}}{\text{active_VCs_num} - \text{limited_VCs_num}} \quad (24)$$

这里 active_VCs_num 是活动 ABR VC 的总数; limited_VCs_num 是受限 VC 的数量, 受限 VC 是指由于 PCR 限制或其连接上某处存在瓶颈而不能使用它们的带宽公平分享值的 VC; $\text{limited_VC_Capacity}$ 是受限 VC 所用带宽的总和. 当一个后向 RM 信元到达交换机时, 其相应 VC 的显式速率由下式计算:

$$\text{Fair_share} = \max(\text{MCR}, \text{Fair_share}) \quad (25)$$

$$ER = \min\{ER, \text{Fair_share}\} \quad (26)$$

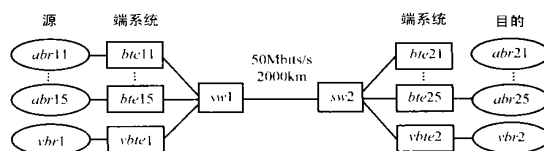


图3 单一瓶颈链路网络仿真模型

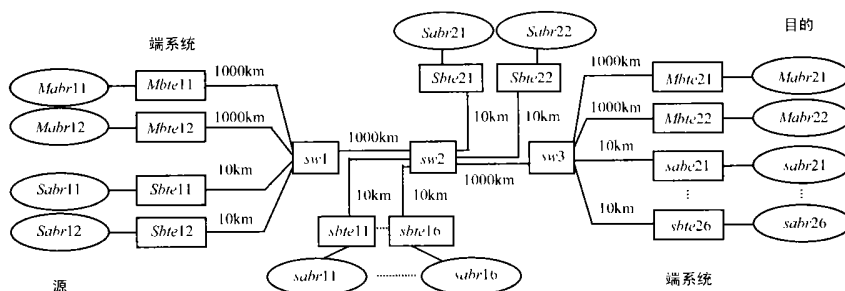


图4 停车场网络仿真模型

4 仿真实验

4.1 仿真模型

4.1.1 网络模型

考虑两种网络模型: 图3是单一瓶颈链路模型, 其中 5 个 ABR VC 和一个合成的 VBR VC 共享一条瓶颈链路. 这种模型用来研究 DR 机制的稳定性, ABR 反馈控制和 VBR VC 速率变化之间的相互作用以及它们对瓶颈交换机缓冲区队列长度的影响. 停

车场模型用来研究 DR 机制的公平性,如图 4 所示。

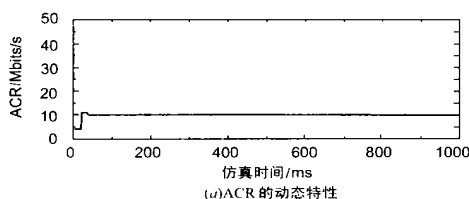
图 3 中,所有源端/目的端系统与交换机之间的链路距离均为 10km,速率为 149.79Mbits/s,主干瓶颈链路参数如图 4 所示。图 4 中所有链路速率均为 150Mbits/s。

4.1.2 业务源模型 实验中使用了两种类型的业务源。对于 ABR 业务,使用具有贪婪性质的源,这样可以使每个源端系统能够充分利用其可用带宽。表 1 列出了图 3 中 ABR 端系统所用的主要参数值,图 4 中 ABR 端系统所用参数值与表 1 参数值基本相同,唯一区别是其 PCR = 200Mbits/s。图 3 中,VBR 业务源是一个属于泊松随机过程的 ON-OFF 源。在 ON 状态时间内,它以 20Mbits/s 的速率产生信元,该状态的平均持续时间为 2.5ms。在 OFF 状态下其产生信元的速率为 0,该状态的平均持续时间也为 2.5ms,因此 VBR 源产生信元的平均速率是 10Mbits/s。两种状态的实际持续时间服从指数分布。

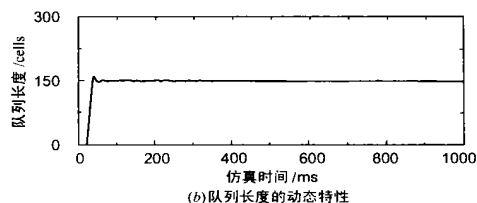
另外,用于计算 ER 的采样时间 $T = 1\text{ms}$,所有源在时刻 0 开始发送信元,队列长度阈值为 150 cells。所有交换机输出缓冲区尺寸为 5000 cells。

表 1 ABR 端系统参数

参 数	值
NRM	32
ICR	4Mbits/s
MCR	1.49Mbits/s
PCR	149.79Mbits/s
RIF	1
RDF	1/16



(a) ACR 的动态特性

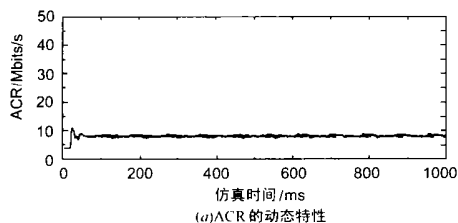


(b) 队列长度的动态特性

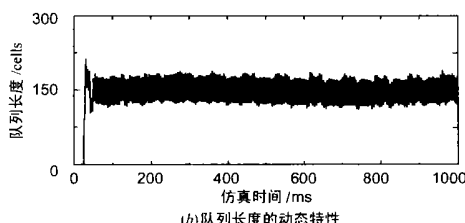
图 5 稳定性实验:VBR VC 关闭

由图 6(a)可知 ACR 值在 $(50 - 10)/5\text{Mbit/s}$ 即 8Mbit/s 的稳态值附近振荡。与 ACR 相似,图 6(b)所示的队列长度在希望值 Q_T 附近振荡。由于队列长度控制在目标值附近,所以可

用链路容量得到了充分的利用。由上可以得出结论,我们的流量控制机制可以应用于 ABR 和 VBR 共存的网络环境中并可充分地利用可用链路带宽。

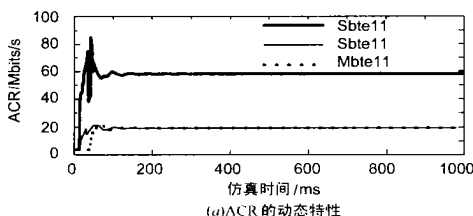


(a) ACR 的动态特性

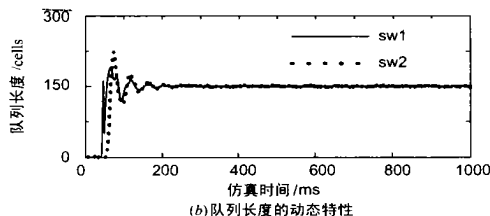


(b) 队列长度的动态特性

图 6 ABR 和 VBR 互操作实验



(a) ACR 的动态特性



(b) 队列长度的动态特性

图 7 公平性实验

4.2 实验结果

4.2.1 稳定性实验 上一节证明了瓶颈交换机输出缓冲区队列长度在一个有限的时间内收敛到所希望的队列长度阈值 Q_T 。因为 DR 流量控制机制可随时调节 ABR 源端系统的速率,因此我们特别关心网络受控参数的瞬态和稳态特性。

在这个实验中,假设 VBR VC 不起作用,因此网络中可用带宽容量和活动 VC 数都是固定的;所用网络模型如图 3 所示。图 5 给出了瓶颈交换机 ($sw1$) 输出缓冲区队列长度和一个 ABR 源端系统 (如 $bte11$) ACR 的动态特性。从图 5(b) 中知道队列长度在 58ms 收敛到目标值 Q_T ,在 41ms,有一个最大超调量 12 个 cells (8%)。图 5(a) 表明 $bte11$ 的 ACR 在 52ms 处收敛到瓶颈链路容量 50Mbits/s 的 1/5 即 10Mbits/s。这表明全部 ABR 源端系统的 ACR 之和等于瓶颈链路带宽容量,因此该机制具有很高的带宽利用率。此外,从图中还可以看到这两个网络参数不存在震荡。由上可以得出结论:DR 控制机制是稳定的、可充分利用链路带宽并具有极好的瞬态和稳态性能。

4.2.2 变化的可用链路容量影响实验 在这个实验中,研究当可用链路容量改变时,瓶颈交换机队列长度和 ABR 源端 ACR 值的动态特性。为此,使 ABR VC 和 ON-OFF VBR VC 共享一个瓶颈链路,所用网络模型如图 3。图 6 所示为一个 ABR 源端系统如 $bte11$ 的 ACR 和交换机 $sw1$ 队列长度的动态特性。

4.2.3 公平性实验

这个实验的主要目的是检查 DR 机制的公平性. 我们利用 ACR 的动态特性来考察公平性. 从图 7(b) 可以看到对交换机队列长度的紧密控制使每个源端系统的 ACR 收敛到各自 VC 组的期望公平分享值, 如图 7(a) 中所示. 同一组中不同 VC 间的公平性同样可以达到, 这里由于版面所限仅画出了每组中一个 VC 的速率 ACR.

另外, 从图 7 中也可以知道, 对于不同组的 VC, 它们各自的距离 (或 RTT) 也大不一样, 而瓶颈交换机的队列长度均是收敛的. 由此可以得出结论, DR 机制对于距离 (或 RTT) 的影响也是鲁棒的.

5 结论

本文提出了一种 ABR 显式速率流量控制机制的形式化设计方法, 所得出的控制机制适用于“确保”服务如 VBR 服务和“尽力而为”服务如 ABR 服务共存的 ATM 网络环境中. 该机制基于传统控制理论中的 DR 控制器, 从而可获得时间最优控制并具有很快的响应时间. 通过几个仿真实验表明该机制是稳定的、公平的、网络链路带宽利用率高并具有极好的瞬态和稳态性能.

参考文献:

[1] ATM Forum. Traffic Management Specification Version 4.0 [EB/OL].

<http://www.atmforum.com>. 1996.

- [2] 戚文芽, 程时昕. 一个用于 VBR + ABR 的集中式流量控制方案 [J]. 电子学报, 1998, 26(4): 91 - 93.
- [3] R Jain, S Kalyanaraman, R Goyal, S Fahmy, R Viswanathan. The ERF-CA switch algorithm for ABR traffic management in ATM networks [J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2000, 8(1): 87 - 98.
- [4] A Kolarov, G Ramamurthy. A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR service [J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 1999, 7(5): 741 - 753.
- [5] C F Su, G D Veciana, J Walrand. Explicit rate flow control for ABR services in ATM networks [J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2000, 8(3): 350 - 361.
- [6] 张孝林. 高速计算机网络中流量控制机制的研究 [D]. 南京: 东南大学研究生院, 2001.

作者简介:

张孝林 男, 1963 年生于安徽蚌埠, 1985 年毕业于安徽机电学院, 1995 年在南京东南大学获工业自动化硕士学位, 现为东南大学 CIMS 中心信息系统与集成技术博士研究生, 研究领域包括信息系统与集成技术、高速计算机网络、计算机控制技术.

吴介一 男, 1941 年生于江苏无锡, 1963 年毕业于南京工学院自动控制专业, 现为东南大学副校长、教授、博士生导师、东南大学 CIMS 中心副主任, 主要研究领域包括信息系统与集成技术、CIMS (计算机集成制造系统)、计算机网络等.