

ABR 流量控制中的变结构控制器*

任丰原¹⁺, 林 闯¹, 王福豹²

¹(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

²(西北工业大学 计算机科学与工程系, 陕西 西安 710072)

Variable Structure Controller for ABR Flow Control

REN Feng-Yuan¹⁺, LIN Chuang¹, WANG Fu-Bao²

¹(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(Department of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-10-62783596, Fax: 86-10-62771138, E-mail: renfy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

<http://www.cs.tsinghua.edu.cn>

Received 2002-01-31; Accepted 2002-05-29

Ren FY, Lin C, Wang FB. Variable structure controller for ABR flow control. *Journal of Software*, 2003,14(3):562~568.

Abstract: Available bit rate (ABR) flow control is an effective measure in ATM network congestion control and traffic management. In high-speed ATM networks, the switch performance lies on the algorithm simplicity in some degree. Although the simplicity of binary flow control is very attractive, the queue length and allowed cell rate (ACR) controlled by the standard EFCI algorithm oscillate with great amplitude, which must have negative impact on the performance, so its applicability is doubted, and then the explicit rate feedback mechanism, which is relatively complex but effective, is introduced and explored. In this study, based on the ABR flow control model, a novel binary ABR flow control algorithm is put forward using the approach for designing the sliding mode variable structure controller in robust control theory, jointly applying the congestion detection mechanism based on the probability. The new algorithm avoids the self-oscillation induced by the nonlinear component in the standard EFCI algorithm, which is very favorable for utilizing the simplicity of binary flow control mechanism to optimize the switch performance. The simulation results show that the sliding mode variable structure controller greatly constrains the oscillations of ACR and queue, smoothes the delay jitter, which provides the reliable implementation mechanism for QoS guarantee in ATM network.

Key words: congestion control; available bit rate flow control; sliding mode variable structure control

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60273009, 69972040 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA112080 (国家高技术研究发展计划); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.G1999032707 (国家重点基础研究发展规划(973)); the NSFC and RGC under Grant No.60218003 (国家自然科学基金与香港研究资助局资助项目)

第一作者简介: 任丰原(1970—),男,甘肃临洮人,博士,讲师,主要研究领域为网络拥塞控制和流量控制,测控网络, Sensor network, Network calculus.

摘要: 自适应比特(available bit rate,简称 ABR)业务的流量控制是 ATM 网络中一种有效的拥塞控制机制和流量管理手段.在高速的 ATM 网络中,算法的简洁性在很大程度上决定着交换机的性能.尽管二进制 ABR 流量控制的简洁性具有相当大的吸引力,但标准的 EFCI 算法控制的队列长度和允许信元速率(allowed cell rate,简称 ACR)却容易出现大幅振荡的现象,这势必会降低链路的利用率,严重影响交换机的性能.进而又有了相对复杂却有效的显式速率反馈机制.在此研究中,以已有的 ABR 流量控制模型为基础,应用概率拥塞判定机制,并借助鲁棒控制理论中滑模变结构控制器的设计方法,为 ABR 流量控制设计了一种新的二进制算法,避免了标准 EFCI 算法中非线性环节诱发的自激振荡,这对于充分发挥二进制流控算法的简洁性以及优化交换机的性能是极为有利的.仿真实验表明:二进制流量控制中的滑模变结构算法大幅度地抑制了 ACR 和队列的振荡,平滑了由此而引入的时延抖动,为实现 ATM 网络中的服务质量提供了可靠的实现机制.

关键词: 拥塞控制; ABR 流量控制; 滑模变结构控制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

ABR(available bit rate)的流量控制是 ATM 网络中一种有效的拥塞控制手段.基于速率的流量控制有两种不同的实现方案:二进制速率反馈(binary rate feedback,简称 BRFB)和显式速率反馈(explicit rate feedback,简称 ERF).前者源于 DECBIT,交换机仅需要支持两种简单的功能:(1) 探测/解除拥塞;(2) 向终端系统提供单比特反馈信息.在二进制流量控制中,“击倒”(beat-down)现象造成的公平性问题用选择性反馈或智能标记技术是可以克服的^[1],但另一个严重的问题是将二进制流控机制推入了进退两难的境地,即队列和 ACR 的振荡降低了链路的利用率,引入了不期望的时延抖动.为此,Charny 提出了称为 MIT 策略的显式速率反馈机制,交换机监测所有的虚连接,并计算带宽公平享用值,任何期望值小于公平享用值的虚连接都能得到保障;如果资源管理(resource management,简称 RM)信元中记录的期望值高于公平享用值,则前者将被后者替代,信源参照返回 RM 信元中的期望值调节实际的信元发送速率.Rai Jain 和 Clark 等人推广了 MIT 方案,使其成为 ATM 论坛流量管理规范中速率流控机制的雏形^[2],随即,相当多的研究工作都集中在这一点上,提出了一系列的实现算法,典型的有 EPRCA^[3],ERICA^[4],DERA^[5]和 Phantom^[6]等.与二进制流控机制相比,显式速率反馈机制的确有更良好的响应性和鲁棒性,但需要牺牲交换机更多的计算资源.大多数 ERF 策略的主要工作都是竭力在算法的性能和复杂度之间寻求一种合理的平衡.面对众多经过理论分析和仿真验证的 ER 算法,主要的设备生产厂商却依旧青睐 BRFB 策略,诸如 Cisco 的 LightStream1010、IBM 8265 ATM 核心交换机和华为的 Radium 8750A 等,一个重要的原因在于需要简洁的算法保证 ATM 交换机的性能.如果我们能有效抑制 ACR 的振荡幅度,并将队长控制在一定的范围内,而不造成过多信元的丢失,那么 BRFB 将具有更大的实用价值.在文献[7]中,基于流体流(fluid flow)理论,我们建立了二进制 ABR 流量调节过程的模型,它是一组非线性方程.之后又用小信号理论在稳定工作点对其进行了局部线性化,得到了 2 阶线性模型,并将标准的 EFCI 算法等价于具有时滞继电器特性的非线性环节,用描述函数方法分析了系统的稳定性,结论是: EFCI 算法中的非线性环节诱发了队列的自激振荡,也就是说, ACR 和队列的振荡不一定是二进制反馈机制的内在属性.因此,从理论上讲,二进制反馈机制的简洁性应该有充分发挥的空间,正是这一点启发我们展开了本文的研究工作.

1 概率拥塞判定机制

标准的 EFCI 算法用队列门限值判定拥塞,构成的非线性的环节诱发了系统的振荡.为了避免这种现象的发生,最直接而有效的方法就是用新的机制来替换它.受 RED 算法^[8]中的分组概率丢弃机制的启发,我们引入概率拥塞判定机制,其工作规程是:节点上的流量控制算法依据队长的期望值和队长的实际变化计算出一个位于 0~1 区间上的控制参量,并与随机生成的概率值比较来确定网络目前是否处于拥塞状态.如果控制参量小于随机概率,则认为网络处于非拥塞状态;反之,则处于拥塞状态,交换机需要将信元信头的 EFCI 位置 1.结合文献[7]中给出的线性模型,我们可以用如图 1 所示的结构框图来描述二进制 ABR 流量控制系统.

其中

$$k(t) = \frac{C(t)[\alpha N(t) + \beta C(t)]}{BN^2(t)},$$

$$b(t) = \frac{\alpha\beta C(t)}{B[\alpha N(t) + \beta C(t)]}.$$

$C(t)$ 为链路容量, $N(t)$ 为激活的连接数, P 为塞判定概率,即系统的控制量, q_0 为望队列长度, B 为邻RM信元间的比特数(32×422), τ 为返时延(RTT), α 为CR的单位增量($PCR \times RIF$), β 为CR的倍乘因子(RDF).

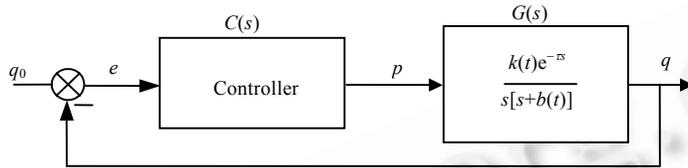


Fig.1 Block diagram of binary ABR flow control system

图1 二进制 ABR 流量控制系统的结构框图

因为网络中的负载和状态是瞬息万变的,所以上面用一个时变线性系统来描述二进制 ABR 流量控制模型.为了使所设计的控制算法更好地抵抗负载扰动和噪声干扰,采用鲁棒控制理论应该是较为适宜的.滑模变结构就是一种理想的鲁棒控制器设计方法.

2 基于滑模变结构的流量控制算法

2.1 滑模变结构控制

在建模研究中,人们总期望能够用数学模型完全精确地描述实际系统的行为,但用直观且易处理的简单模型近似实际系统的复杂行为却是一种有效的方法;再者,系统中的有些行为是根本无法用模型来描述的,不得不忽略,因此,模型与实际系统之间存在差别是不可避免的,我们在第1节中给出的模型也如此.从控制器的设计角度而言,理想的控制器应该不敏感模型的匹配误差.鲁棒控制理论对这类问题的处理有一个好的结果.滑模变结构控制是鲁棒控制的一个分支,顾名思义,在控制过程中,控制的结构不是确定的,而是随着状态的变化而变化的,目的是约束系统的状态变量,使其始终位于切换函数定义曲线(或曲面)的邻域内.这里,我们结合如图2所示的系统,对滑模变结构控制的机理作简单的介绍.

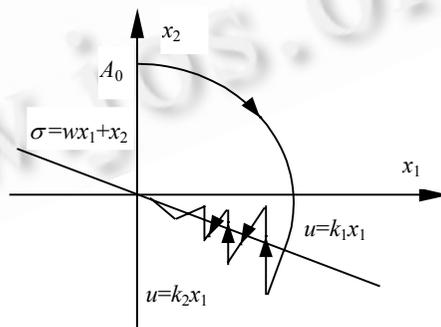


Fig.2 Typical sliding mode variable structure system

图2 典型的滑模变结构系统

假定在 t_0 时刻系统位于初始状态 A_0 ,之后在控制律 $u = k_1 x_1$ 的作用下,沿着一定的相轨迹运动.当 $t_1 > t_0$ 时,系统到达并穿越了切换线 $\sigma = wx_1 + x_2$;随后,控制律被切换成 $u = k_2 x_1$,系统无疑将沿着另一条相轨迹运动,再次穿越直线 $\sigma = 0$ 后,控制律 $u = k_1 x_1$ 迫使系统第3次穿越切换线...如此不断穿越、切换,系统沿着切换线 $\sigma = 0$ (又称为滑模线)振荡,最终滑向原点.因为滑模线可以被设计成与系统自身无关,因此,系统的运动也与自身参数的变

化和外干扰无关,对于瞬息万变的网络,这是一个非常有用的特性.因为在实际的网络中,由于连接的不断建立与拆除、业务量的不断变化和网络结构调整等因素,网络特征参数是随时间变化的.常规的控制理论对于这种时变系统的处理不是特别有力,但滑模变结构控制利用随时变化的开关特性迫使系统在一定条件下沿预定的“滑动模态”轨迹作小幅度、高频率振荡运动,运动本身与被控制对象的参数及扰动无关,因此能够很好地适应参数的变化和负载的扰动,具有强的鲁棒性.

2.2 算法设计

令 $x_1 = e$, $x_2 = \frac{d}{dt}e = \frac{d}{dt}x_1$, 忽略时延的影响(在 LAN/MAN 中,RTT 在几毫秒至几十毫秒之间,这种忽略有一定的合理性),得到图 1 描述系统的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -b(t)x_2 - k(t)p + b(t)\frac{d}{dt}q_0 + \frac{d^2}{dt^2}q_0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $b_{\min} \leq b(t) \leq b_{\max}$, $k_{\min} \leq k(t) \leq k_{\max}$.

采用比例切换控制策略^[9]:

$$\begin{aligned} p &= \psi x_1, \\ \psi &= \begin{cases} \alpha, & x_1 \sigma > 0 \\ \beta, & x_1 \sigma < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,取切换函数:

$$\sigma = wx_1 + x_2. \quad (3)$$

下式给出了如上系统中滑模线存在的必要条件^[9]:

$$\begin{aligned} \alpha &> \max_{b,k} \{ [wb(t) - w^2] / k(t) \}, \\ \beta &< \min_{b,k} \{ [wb(t) - w^2] / k(t) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

为了确保系统从任何初始状态出发,在有限时间内必然到达切换线 $\sigma = 0$, 引用文献[9]中给出的定理:即系统(1)在任何初始点必定能到达切换线 $\sigma = 0$ 的充分必要条件是系统的特征方程(5)无非负实根.

$$p^2 + b(t)_{\min} p + \inf_t \{ k(t) \alpha \} = 0. \quad (5)$$

若仅取复根,则由定理得到如下条件:

$$\alpha > [b(t)_{\min}]^2 / 4k(t)_{\min}. \quad (6)$$

对于一般理想的无零点、无纯滞后单输入变参数的二阶线性系统,若采用满足条件(4)和条件(6)的比例切换控制方式(2),就可以实现很好的控制性能;但对采用概率拥塞判定机制的二进制 ABR 流量控制系统而言, $p(t)$ 为概率,因此,控制量是受限制的,应该处于 0 和 1 之间.为此,我们采用比例切换控制和恒值控制相结合的控制策略:

$$p = \begin{cases} \psi x_1, & |x_1| < M \\ \theta, & |x_1| > M \end{cases}, \quad (7)$$

其中, $\theta = \begin{cases} M, & \sigma > 0 \\ m, & \sigma < 0 \end{cases}$, M, m 分别是控制量的最大值和最小值, ψ 的意义与式(2)中的相同.为方便实现,不妨令 $k = \alpha > 0 > \beta = -k$.

为了设计出适用于较宽范围的 ABR 流量控制算法,下面假定各参量的变化范围分别为: $N(t)$: 5~500, $C(t)$: 25~622(Mbps), q_0 : 10~2000(cells).其他相关参数的定义是: PCR=155Mbps, RIF=1/16, RDF=1/16.经计算,得到式(1)中各参数的上下界:

$$\begin{aligned} 0.2295 &= b_{\min} \leq b(t) \leq b_{\max} = 557.0620, \\ 3.448 \times 10^7 &= k_{\min} \leq k(t) \leq k_{\max} = 1.574 \times 10^{11}. \end{aligned}$$

令切换函数(3)中的参数 $w=3$,由滑模存在性条件(4),得到

$$\alpha > 4.82 \times 10^{-5}; \quad \beta < -5.28 \times 10^{-11}. \tag{8}$$

由滑模到达条件(6),得到

$$\alpha > 1.53 \times 10^{-9}. \tag{9}$$

综合式(8)和式(9),可以取 $k = \alpha = -\beta = 5.0 \times 10^{-5}$,又 $M=1$ 和 $m=0$,将这些参数代入式(7)后,即可得基于模变结构的二进制 ABR 流量控制算法.为了叙述方便,我们将之命名为 VS 算法.用差分代替微分,不难得到算法的离散形式.图 3 是 VS 算法的伪码.

```

/* VS Algorithm */
q(k): queue length      q0: expected length
T: sampling time       x1(k)=q(k)-q0
z(k)=3.0x1(k)+x2(k)    x2(k)=(x1(k)-x1(k-1))/T
If (x1(k)>1.0)
  If (z(k)>0.0)
    p(k)=1.0
  else
    p(k)=0.0
else
  If (x1(k)z(k)>0.0)
    p(k)=5.0E-5*x1(k)
  else
    p(k)=-5.0E-5*x1(k)
    
```

Fig.3 Pseudo code of VS algorithm

图 3 VS 算法的伪码

3 仿真试验

下面我们在 NIST 的 ATM 仿真平台^[10]上,采用具有哑铃拓扑结构的仿真网络配置(如图 4 所示)研究 VS 流量控制算法的性能.给定 $N=5$,且业务源均为持久性 ABR 源,速率均为 45Mbps,交换机的缓存为 1000cells.在使用 VS 算法时,期望的队列长度为 400cells;标准 EFCI 算法中用于判定和解除拥塞的队列门限值分别为 700cells 和 300cells.其他控制参数见表 1,没有说明的参数为 TM4.1^[11]中定义的缺省值.

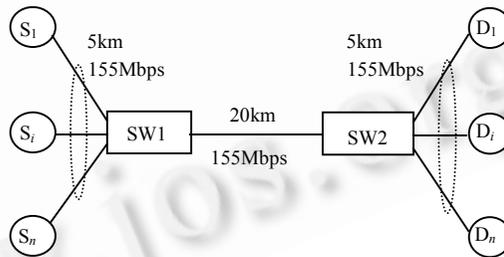


Fig.4 Configuration of simulation network

图 4 仿真网络配置

Table 1 Control parameters of ABR end system in simulation experiments

表 1 仿真研究中 ABR 终端系统控制参数

RIF	RDF	PCR	MCR	ICR
1/16	1/16	149Mbps	1.49Mbps	1.49Mbps
NCR	CRN	ADTF	CDF	TRM
32	32	5000ms	1/16	100ms

图 5 和图 6 分别描绘出了队列长度和信元允许速率的变化曲线(为了节省篇幅,我们仅以信源 S_3 作为代表).不难看出,VS 算法作用下的队列基本上在期望值附近抖动,而 EFCI 算法却使队列呈现出明显的振荡现象,一方面,这势必会加剧虚连接端到端的时延抖动,另一方面,大幅振荡导致队列溢出,零信元丢失难以得到保障.稳定的队长避免了信元的丢失,同时,方便了准确估计信元在队列中的排队等待时间,更重要的是期望队长是可以人

为设定的,这意味着能对排队延时加以控制,这些都有利于 ATM 网络中 QoS 保证的实现.就 ACR 而言,在 SV 算法的作用下, S_3 的信元允许速率不再像 EFCI 中一样剧烈地振荡,而是围绕着公平享用值(31Mbps)上下波动.ACR 的大幅振荡,一方面对有效利用 CBR(恒定比特业务)和 VBR(可变比特业务)剩余的网络带宽是不利的,另一方面,容易在交换节点上加剧聚合流的突发度.上面的仿真结果表明:二进制流控机制中的 VS 算法达到了它预想的设计目标,有效地抑制了队列和 ACR 的振荡,从而克服了造成二进制流控机制低效的因素,为发挥它的简洁性优势提供了必要的保障.

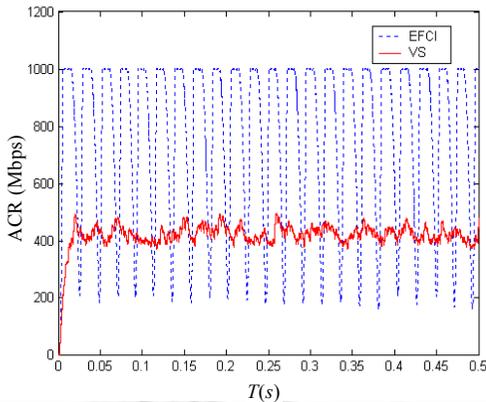


Fig.5 Evolution of queue length

图 5 队列长度的变化

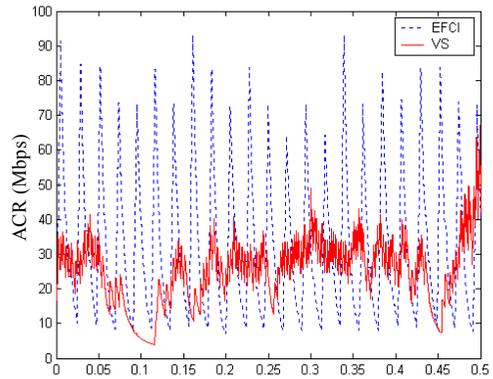


Fig.6 Evolution of allowed cell rate

图 6 信元允许速率的变化

凭借着 Internet 强大的推动力,IP 技术得到了迅速的推广与普及,大有一统各种网络技术的趋势.因此,在近来各种网络技术的研究中,都将如何有效地承载 IP 业务作为一个主要的研究内容.在 ATM 网络中,IP over ATM 技术也受到特别的关注,就流量控制而言,如何使基于滑窗的 TCP 流控机制与基于速率的 ABR 流控机制协调工作,是一个需要解决的问题,这也逐渐变成了评价 ABR 流控算法优劣的指标.这里,我们通过仿真试验来比较 EFCI 算法和 VS 策略在支持 TCP 业务流时的性能.将上面仿真中的 5 个持久性 ABR 业务源用 TCP 业务源代替,TCP 的流控机制采用标准的 Reno 算法,IP 分组的最大长度定为 8 192 个字节.用有效吞吐量(goodput)和分组重传率作为评价指标.图 7 和图 8 表述了仿真结果.显然,当承载 TCP 业务流时,VS 算法比标准的 EFCI 算法有更好的性能.

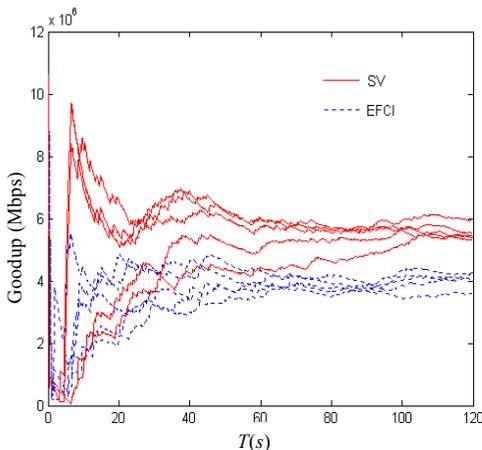


Fig.7 Goodput

图 7 有效吞吐量

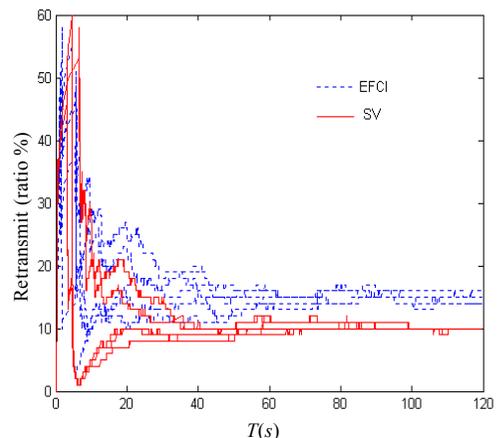


Fig.8 Ratio of packet retransmission

图 8 分组重传率

4 结 论

在 ATM 网络中,ABR 的流量控制是平衡统计复用增益和服务质量保证这一对相互对立的技术目标的最有力的手段.二进制反馈控制中的大幅振荡使人们怀疑 EFCI 算法的有效性,进而产生了显式速率反馈机制,但随之引入的计算复杂性又使人们割舍不下二进制反馈算法的简洁性.应用控制理论分析的结论认为,EFCI 算法中 ACR 和队列长度大幅振荡的主要原因在于判定和解除拥塞时引入的具有继电器特性的非线性环节.为了克服这一弊端,在本研究中,我们引入了概率拥塞的判定方法,并应用鲁棒控制中滑模变结构控制器的设计方法给出了拥塞判定概率的更新算法.仿真试验的结果表明,用于二进制 ABR 流量控制的 SV 算法在很大程度上削弱了队列和信元允许速率的振荡幅度,为充分发挥二进制流控机制的简洁性,优化交换机性能提供了必要的技术保障.最后的试验还表明,在支持 TCP 业务流时,SV 算法也强于标准 EFCI 算法的性能.

References:

- [1] Kalampoukas L. Congestion management in high speed networks [Ph.D. Thesis]. Department of Computer Engineering, University of California Santa Cruz, 1997.
- [2] Charny A, Clark DD, Jain R. Congestion control with explicit rate indication. In: Proceedings of the IEEE International Communication Conference. Seattle: IEEE Computer Society, 1995. 1954~1963.
- [3] Hiroyuki O, Masayuki M. Rate-Based congestion control for ATM networks. ACM Computer Communication Review, 1995,25(2): 60~72.
- [4] Kalyanaraman S, Jain R, Fahmy S, Goyal R, Vandalore B. The ERICA switch algorithm for ABR traffic management in ATM networks. Part I : Description. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000,8(1):87~98.
- [5] Charny A, Ramakrishnan KK. Time scale analysis of explicit rate allocation in ATM networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1996,4(4):569~581.
- [6] Afek Y, Mansour Y, Ostfeld Z. Phantom: a simple and effective flow control scheme. In: Proceedings of the ACM SIGCOMM'96. 1996. 169~182.
- [7] Ren, FY, Ren Y, Shan XM. Modeling and analysis of binary ABR flow control. Chinese Journal of Computers, 2002,25(6): 651~656 (in Chinese with English Abstract).
- [8] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4):397~413.
- [9] Itkis U. Control System of Variable Structure. Keter Publishing House Jerusalem Ltd., 1976.
- [10] Golmie N, Mouveaux F, Hester L, Saintillan Y, Koenig A, Su D. The NIST ATM/HFC network simulator operation and programming guide Version4.0. 1998. <http://hsnt.nist.gov/>.
- [11] ATM Forum. ATM Traffic Management Specification Version 4.1. 1999. <http://www.atmforum.org/>.

附中文参考文献:

- [7] 任丰原,任勇,山秀明.二进制 ABR 流量控制算法的建模与分析.计算机学报,2002,25(6):651~656.