

文章编号: 1001-0920(2005)07-0737-04

网络流量系统的有限拍控制

曾 晖, 张振川, 井元伟

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 应用控制理论方法讨论了ATM网络的ABR通信中基于速率反馈的流量控制问题。针对网络的传播时延提出了有限拍控制策略, 使系统的响应在有限拍的时间内严格地到达稳态, 从而使信源发送速率快速响应网络状态的变化, 较好地克服了时延对流量控制快速性和稳定性的影响。该方法能有效地避免拥塞发生, 同时降低信元丢失率, 且结构简单。仿真结果验证了此算法的有效性。

关键词: ATM网络; 流量; 有限拍控制

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Deadbeat Control of Traffic Systems in Networks

ZEN G Hui, ZHANG Zhen-chuan, JING Yuan-wei

(Faculty of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Correspondent: JING Yuan-wei, E-mail: ywjjing@mail.neu.edu.cn

Abstract: Rate-based traffic control problem for ABR communication in ATM network is discussed by means of control theory. The deadbeat control is provided aiming at the propagation delay in the network, which makes system response reach stabilization in the limited beat strictly. Therefore, it can be achieved that the sent rate of sources responds to the changes of network status rapidly, and the adverse effect in rapidity and stability caused by the delay is overcome. The proposed method with a simple structure can avoid the congestion effectively, and reduce cell loss rate. The simulation result shows the efficiency of the scheme.

Key words: ATM Network; Traffic; Deadbeat control

1 引 言

ATM论坛流量管理规范4.0^[1]定义了一套端到端的、基于速率的拥塞控制框架。信源可根据RM信元提供的网络拥塞信息调整其发送速率。然而, 实际要求的速率进入该缓冲器需经历从源端到目的端的往返时间。这一时延将使源端不能快速响应网络的变化, 从而导致网络拥塞甚至崩溃。

在ATM网络的ABR通信中, 基于速率反馈的流量控制是进行拥塞控制的主要手段之一, 通过交换机排队缓存中的队长变化反映拥塞情况, 从而确定所需的源端速率。文献[2]采用了PD控制器对源端的发送速率进行控制, 提高了源端响应网络负荷状况变化的能力, 但难以克服网络传播时延所带来

的不利影响。文献[3]从理论上证明Kamran算法能够确保网络缓冲器的不溢出及带宽的公平分配和充分利用, 但并没有考虑ABR业务的带宽或缓存发生改变的情况。实际上, 当ABR业务的带宽或缓存被重新分配时, 需要改变ABR源的发送速率, 以适应新的带宽。文献[4]正是针对带宽或缓存的波动性, 提出了基于随动系统的流量控制算法。此算法充分利用缓存及分配的带宽, 且算法简单。

目前有许多应用控制理论^[5~8]方法来设计的控制器, 均取得了较为满意的结果。本文使用控制理论中的有限拍控制方法设计控制器, 较好地克服了时延对流量控制的快速性和稳定性的影响, 提高了流量控制的性能。

收稿日期: 2004-08-02; 修回日期: 2004-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274099); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020145007)。

作者简介: 曾晖(1978—), 女, 长春人, 博士生, 从事通信网络中的控制问题研究; 井元伟(1956—), 男, 辽宁西丰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、通讯网络系统等研究。

2 网络模型

一个具有简单拓扑结构的面向连接的分组交换网络可由图1来表示。图中： S, D 和 SN 分别表示源端、目的端和交换节点； VC_i 代表虚电路， L_j 代表链路。

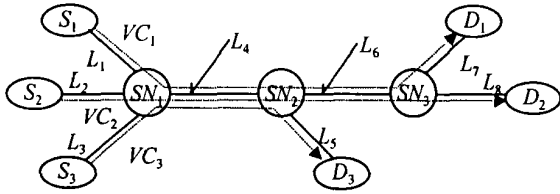


图1 面向连接的分组交换网络

在 ATM 网络的每一交换节点处，为每条输出链路设置一流量控制器（以确保公平性），将当时输出链路缓冲器的队列长度控制在大于零的一定范围内，并由此确定流经该链路所有 VC 的信源发送速率。将此信息填入由源端定期向目的端发送的 RM 信元相应域中，且只减不增。源端由此得知整条 VC 不发生拥塞的发送速率。这种流量控制模式不仅避免了由缓冲队列溢出而引起的信元丢失，而且保证了链路的充分利用，能有效的防止拥塞，并且定期的发送也不会给网络带来太大的负担。

网络流量模型可由如下微分方程^[3]所确定：

$$y_j(t)dt = u_{ij}(t - \tau_{ij}) - f_j(t) \quad (1)$$

其中： y_j 为链路 L_j 缓冲器的队列长度； u_{ij} 为流经链路 L_j 缓冲器的第 i 条 VC 的信源速率； τ_{ij} 为信元从第 i 条 VC 的源端到链路 L_j 缓冲器的时延； f_j 为第 i 条 VC 传输带宽，当 $y_j(t) > 0$ 时， $f_j(t) = bw_j(t)$ ；当 $y_j(t) = 0$ 时， $f_j(t) = \min[u_{ij}(t - \tau_{ij}), bw_j(t)]$ 。

3 系统设计

在 ATM 网络中，ABR 通信的流量控制可看作以信源速率 $u(t)$ 为控制变量，交换节点输出链路的缓冲器队列长度 $y(t)$ 为被控变量，链路的服务速率 $f(t)$ 为扰动，并含有纯滞后环节的单输入单输出 (SISO) 线性反馈控制系统（当缓冲器不溢出时，可作为线性系统）。

根据网络流量模型，控制系统的方框图如图2所示。其中： $D(s)$ 为控制器的传递函数， $1/s$ 为积分器的传递函数， $r(t)$ 为缓冲器队列长度的设定值，

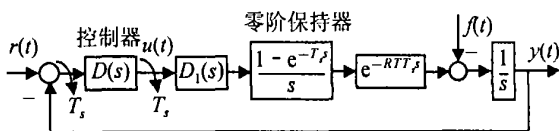


图2 ABR 流量反馈控制系统

RTT_s 为信元从源端到目的端的往返时间， e^{-RTT_s} 为控制滞后环节， T_s 为采样周期。

为接近实际，考虑缓冲器队列长度为二阶系统，即以 $G_1(s) = (as + b)/(cs + h)$ 与积分器的传递函数 $1/s$ 构成二阶传函来描述被控变量 $y(t)$ 。为了对整个系统进行分析，从而用有限拍控制来设计控制器，设

$$G_1(s) = (as + b)/(cs + h),$$

$$G_2(s) = (1 - e^{-T_s s})/s \cdot e^{-RTT_s s} \cdot 1/s,$$

并对其进行 z 变换，即

$$G(z) = Z \left\{ \frac{as + b}{cs + h} \frac{1 - e^{-T_s s}}{s} e^{-RTT_s s} \frac{1}{s} \right\} \quad (2)$$

为便于计算，令

$$\frac{as + b}{cs + h} \left(\frac{1 - e^{-T_s s}}{s} \right) e^{-RTT_s s} \frac{1}{s} = \left(\frac{L}{s} + \frac{K}{s^2} + \frac{L}{cs + h} \right) e^{-RTT_s s} (1 - e^{-T_s s}) \quad (3)$$

其中

$$J = \frac{a}{h} - \frac{bc}{h^2}, K = \frac{b}{h}, L = -\frac{ac}{h} + \frac{bc^2}{h^2}$$

又因在有限拍控制中，有

$$G^*(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d} = \frac{B^*(z^{-1})}{A^*(z^{-1})} z^{-d} \quad (4)$$

并由式(4)中的参数可求出 $q_0 = 1/b_0 + b_1 + \dots + b_m$ ，并最终得到有限拍控制器传函为

$$D^*(z^{-1}) = \frac{q_0 A^*(z^{-1})}{1 - q_0 B^*(z^{-1}) z^{-d}} \quad (5)$$

所以，可将 $G(z)$ 以 z^{-1} 的形式表示为

$$G^*(z^{-1}) = (z^{-d} - z^{-d-1}) \left(\frac{J}{1 - z^{-1}} + \frac{L}{(1 - z^{-1})^2} + \frac{KTz^{-1}}{1 - z^{-1}e^{-\frac{h}{c}T}} \right) = z^{-d} \left(\left(J + \frac{L}{c} \right) + z^{-1} \left(-J - J e^{-\frac{h}{c}T} + KT - \frac{2L}{c} \right) + z^{-2} \left(J e^{-\frac{h}{c}T} - KT e^{-\frac{h}{c}T} + \frac{L}{c} \right) \right) / \left((1 - z^{-1}) (1 - z^{-1} e^{-\frac{h}{c}T}) \right) \quad (6)$$

其中 d 为正整数，即 $RTT_{ss} = dT_{ss}$ 。于是可求得

$$q_0 = \frac{1}{KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T})} \quad (7)$$

根据有限拍控制原理，可得

$$D^*(z^{-1}) = \frac{q_0 A^*(z^{-1})}{1 - q_0 B^*(z^{-1}) z^{-d}} =$$

$$(1 - z^{-1})(1 - z^{-1}e^{-\frac{h}{c}T}) / \left(KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T}) - \left(\left(J + \frac{L}{c} \right) + z^{-1} \left(-J - Je^{-\frac{h}{c}T} + KT - \frac{2L}{c} \right) + z^{-2} \left(Je^{-\frac{h}{c}T} - KTe^{-\frac{h}{c}T} + \frac{L}{c} \right) \right) z^{-d} \right), \quad (8)$$

那么, 整个系统闭环传递函数为

$$\frac{DG}{1 + DG} = z^{-d} \left(\left(\left(J + \frac{L}{c} \right) + z^{-1} \left(-J - Je^{-\frac{h}{c}T} + KT - \frac{2L}{c} \right) + z^{-2} \left(Je^{-\frac{h}{c}T} - KTe^{-\frac{h}{c}T} + \frac{L}{c} \right) \right) / KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T}) \right). \quad (9)$$

4 性能分析

4.1 稳定性

有限拍要求系统的输出量和控制量在经过 n 个采样周期后均能严格地达到稳定, 即在 $k = n$ 后输出量和控制量能严格地等于稳态值, 因此不会在采样点之间产生纹波. 于是系统不仅在采样点是稳定的, 在采样点之间也是稳定的.

控制系统在缓冲器队长长度的设定值作阶跃变化, 即 $r_j(t) = r^0 I(t)$ (r^0 为大于零的常数, $I(t)$ 为单位阶跃信号) 时, 输出响应为

$$y_{jr}(z) = \frac{r^0}{1 - z^{-1}} \cdot z^{-d} \left(\left(\left(J + \frac{L}{c} \right) + z^{-1} \left(-J - Je^{-\frac{h}{c}T} + KT - \frac{2L}{c} \right) + z^{-2} \left(Je^{-\frac{h}{c}T} - KTe^{-\frac{h}{c}T} + \frac{L}{c} \right) \right) / KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T}) \right), \quad (10)$$

经 z 反变换所得的离散时间序列为

$$0 \quad y_{jr}(kT_s) \quad r^0.$$

系统在最坏情况的扰动下, 即 $f_j(t) = vI(t)$ (v 为大于零的常数, $I(t)$ 为单位阶跃信号) 时, 输出响应为

$$Y_{jf}(z) = - \frac{Z \left(F_j(s) \frac{1}{s} \right)}{1 + D(z)G(z)} = - \frac{vTz}{(z - 1)^2} \cdot \left(\left(KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T}) - z^{-d} \left[\left(J + \frac{L}{c} \right) + z^{-1} \left(-J - Je^{-\frac{h}{c}T} + KT - \frac{2L}{c} \right) + z^{-2} \left(Je^{-\frac{h}{c}T} - KTe^{-\frac{h}{c}T} + \frac{L}{c} \right) \right] \right) / KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T}) \right), \quad (11)$$

经反变换得离散时间序列

$$y_{jf}(kT_s) = \frac{1}{KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T})} \left(-vkT_s \cdot KT(1 - e^{-\frac{h}{c}T}) + v \left(J + \frac{L}{c} \right) (kT_s - dT_s) I(kT_s - dT_s) + \right.$$

$$\left. v \left(-J - Je^{-\frac{h}{c}T} + KT - \frac{2L}{c} \right) (kT_s - (d + 1)T_s) I(kT_s - (d + 1)T_s) + v \left(Je^{-\frac{h}{c}T} - KTe^{-\frac{h}{c}T} + \frac{L}{c} \right) (kT_s - (d + 2)T_s) I(kT_s - (d + 2)T_s) \right). \quad (12)$$

由线性离散系统的叠加性得缓冲器队长长度的离散时间序列

$$y_j(kT_s) = y_{jr}(kT_s) + y_{jf}(kT_s) \quad y_{jr}(kT_s) \quad r^0. \quad (13)$$

控制系统的输出在采样点之间无波动, 所以其连续时间量 $y_j(t) = r^0$, 其中 r^0 是缓冲器队长长度的设定值. 因此, 一方面为了有效利用缓冲器容量, 使其既不溢出 (已证明), 又能充分利用资源, 即队长长度接近其容量; 另一方面为适应 ATM 网络的复杂性, 需要实际的队长随缓冲器门限值变化而快速变化. 于是, 有效控制信源输入速率成为关键的问题.

4.2 信源输入速率

由于 ATM 网络所接纳的网络业务是种类繁多的多媒体业务, 业务范围涵盖了语音业务、数据业务和图像业务. 因此, 针对 ATM 网络不同业务的要求需做出快速的反应. 文献 [4] 提出了一种基于随动系统的 ABR 流量控制算法, 应用跟踪系统的反馈机制, 通过检验缓存中的队长长度来控制源端速率. 这样不仅提高了缓存的利用率, 而且大大降低了信元丢失率以及拥塞产生的可能. 于是, 结合有限拍方法, 本文将这种基于自动控制中随动系统的思想引入对缓冲器队长的控制中.

设 $u_i(t)$ 为该 ABR 业务的输入速率, $u_o(t)$ 为该 ABR 业务的输出速率, $r(t)$ 为给定的队长门限值, $y(t)$ 为该 ABR 业务的实际排队长度, 则可得以下关系:

$$y_{t+\Delta t} = y_t + (u_i - u_o)\Delta t, \quad (14)$$

两边同除以 Δt , 并取 Δt 趋近于 0 时的极限, 得

$$\dot{y} = u_i - u_o. \quad (15)$$

又因为对象传函

$$G(s) = \frac{as + b}{cs + h} \cdot \frac{1}{s} = \frac{y}{r}, \quad (16)$$

于是, 对其做拉氏反变换, 有

$$\dot{y} = (ar + br - cy) / h. \quad (17)$$

综上, 可推出

$$(ar + br - cy) / h = u_i - u_o, \quad (18)$$

即

$$u_i = (ar + br - cy) / h + u_o. \quad (19)$$

因此, 当输入速率为 u_i 时, 队长 y 可随 r 变化而变化. 即由此确定的输入速率, 能快速响应网络的变化, 具

有较好的跟踪性

实际应用中,采用当前的 y° 值与上一时刻存储在缓存中的 y° 的差来代替 y° 。由式(19)可以看出,当到达稳态后, $(ar + br - cy^{\circ})/h$ 会非常小,从而 u_i 基本与 u_o 保持一致,即保证了分配带宽的利用率^[4]。因此,如果已知此时此刻的 u_o ,就可以求出下一时刻的 u_i ,提前将所需的信源速率通知给发送端,从而实现了网络的快速响应

5 仿 真

设图1中各链路的带宽均为100M bit/s,3条虚电路 VC_1, VC_2 及 VC_3 用于ABR通信,且均流经链路 L_4 ,可见 L_4 将成为瓶颈链路。为验证缓冲器队长控制的有效性,考虑最坏情况下ABR带宽的变化,即阶跃变化。也就是,链路 L_4 上实际ABR通信的带宽为

$$f(t) = 10I(t) + 100I(t-3) - 100I(t-5) + 100I(t-7) - 105I(t-10).$$

其中采样时间 $T_s = 0.15\text{ms}$, $RTT_s = 0.3\text{ms}$,用于链路 L_4 的缓冲器队列长度的设定值 $r_0 = 55\text{cell}$,以及对对象函数 $G_1(s) = (2.73s + 60)/(s + 15.35)$ 。

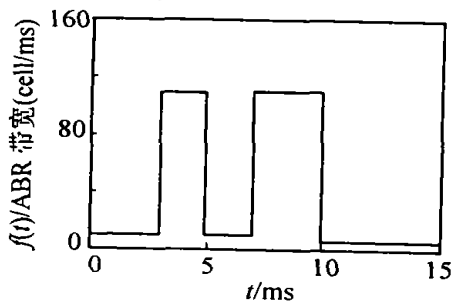


图3 阶跃变化的ABR通信带宽图

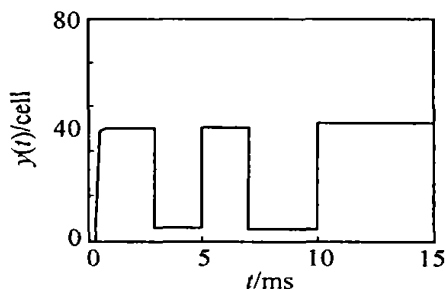


图4 缓冲器的队列水平

图3所示为实际的ABR通信带宽。本文采用随动系统控制方法,使系统缓冲器的队列水平控制在大于零且不大于设定值($r_0 = 55\text{cell}$)的范围内。从图4中可以看到,其排队水平 r_0 ,既保证了缓冲器容量的充分利用,又没有发生溢出,确保了其控制的效率性。另外,从图5中的控制器输出可以看出,此

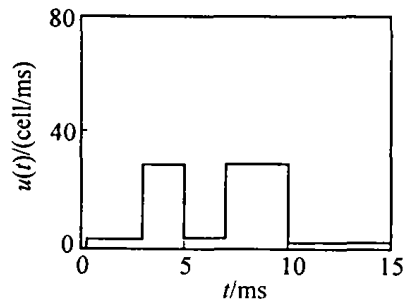


图5 控制器输出

即为所需的信源速率。信源速率能快速响应网络状态的变化,实现了有限拍控制的有效性。

比例控制的比例增益取得较大时,虽然输出响应的速度较快,但会出现超调,将造成缓冲器溢出;而比例增益取得较小时,虽然不会出现超调,但输出响应的速度缓慢,不能及时响应网络状态的变化。当采用PD控制时虽然在增加了微分环节后,增强了快速性,但超调较大。文献[3]的Kalman算法虽使性能明显优于比例控制和PD控制,但缓冲器的利用率最高只有92.75%,最低为85.5%,而本文的有限拍控制的缓冲器利用率最高为96%,最低时也能达到91.8%。

6 结 语

本文提出的有限拍控制能使系统的响应在有限拍的时间内严格地到达稳态,较好地克服了时延对于ATM网络的不利影响。另外,为了有效利用缓冲器容量,讨论了基于随动系统的控制以适应ATM网络的复杂性和多变性的特点,从而使信源快速响应网络状态的变化。由于ATM网络的复杂性,对象传函还有待进一步改善。

参考文献 (References)

- [1] ATM Forum. *Traffic Management Specification Version 4.0*[S]. 1996
- [2] Ilhem Lengiz, Farouk Kamoun. A Rate-based Flow Control Method for ABR Service in ATM Networks [J]. *Computer Networks*, 2000, 34: 129-138
- [3] 沈伟, 胡立生, 邵惠鹤. 网络流量控制系统的设计——Kalman 算法[J]. *通信学报*, 2003, 4(24): 49-57. (Shen W., Hu L. S., Shao H. H. The Design of Traffic Control System in Networks—Kalman Control Algorithm [J]. *J. of China Institute Communications*, 2003, 4(24): 49-57.)
- [4] 杨磊, 陈秋双. 一种新型的ABR流量控制算法[J]. *通信学报*, 2003, 5(24): 38-43. (Yang L., Chen Q. S. A New ABR Flow Control Algorithm [J]. *J. of China Institute Communications*, 2003, 5(24): 38-43.)

(下转第745页)

- Xi'an Jiaotong University*, 2002, 22(4): 33-38)
- [3] Ruefli T, Collins J, Lacugna J. Risk Measures in Strategic Management Research: Auld Lang Syne? [J] *Strategic Management Journal*, 1999, 20(2): 167-194
- [4] Clarke C, Vama S. Strategic Risk Management: The New Competitive Edge [J] *Long Range Planning*, 1999, 32(4): 414-424
- [5] Miller K, Bromiley P. Strategic Risk and Corporate Performance: An Analysis of Alternative Risk Measures [J] *Academy of Management Journal*, 1990, 33(4): 756-779
- [6] 杨华江, 席酉民. 集团公司战略风险管理模型研讨 [J] *中国软科学*, 2002, (8): 61-66
(Yang H J, Xi Y M. Study on the Risk Management Model in a Group Company [J] *China Soft Science*, 2002, (8): 61-66)
- [7] 刘海潮, 李垣. 战略风险管理——战略管理研究的新前沿 [J] *管理工程学报*, 2003, 17(3): 4-7.
(Liu H C, Li Y. Strategic Risk Management——Another Edge of Strategic Management [J] *J of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2003, 17(3): 4-7.)
- [8] Morgan I, Rao J. How Restaurant Owners Manage Strategic Risk [J] *The Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 2000, 41(6): 64-74
- [9] Kim Y, Sanders G. Strategic Actions in Information Technology Investment Based on Real Option Theory [J] *Decision Support Systems*, 2002, 33(1): 1-11
- [10] Hall J. Owning the Future: Integrated Risk Management in Practice [J] *Structural Safety*, 2000, 22(3): 293-294
- [11] Barton S. A Proposed Strategic Decisionmaking Process for Management of Strategic Risk in Small Entrepreneurial Firms [A] *Risk, Strategy and Management* [C]. Greenwich: JAI Press, 1990: 55-81
- [12] Lubatkin M, Neill H. Merger Strategy, Antitrust Policy and Two Components of Risk [A] *Risk, Strategy and Management* [C]. Greenwich: JAI Press, 1990: 161-181.
- [13] 庄新田, 黄小原. 委托代理框架下实物期权最优投资策略研究 [J] *控制与决策*, 2003, 18(3): 332-335
(Zhuang X T, Huang X Y. Research on Optimal Investment Tactics of Real Option Under Trust-agent Conditions [J] *Control and Decision*, 2003, 18(3): 332-335)
- [14] Miller K, Waller H. Scenarios, Real Options and Integrated Risk Management [J] *Long Range Planning*, 2003, 36(1): 93-107.
- [15] Black F, Scholes M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities [J] *J of Political Economy*, 1973, 81(3): 637-654
- [16] Botteron P, Chesney M, Gibson-Arner R. Analyzing Firms' Strategic Investment Decisions in a Real Options' Framework [J] *J of Int Financial Markets, Institutions and Money*, 2003, 13(5): 451-479
- [17] 姜继娇, 杨乃定, 贾晓霞. 多心理账户的项目组合风险集成管理研究 [J] *管理评论*, 2003, 15(9): 51-55
(Jiang J J, Yang N D, Jia X X. Study on Integrated Management of Portfolio Risk With Multiple Mental Accounts [J] *Management Review*, 2003, 15(9): 51-55)
- [18] Nelsen R B. *An Introduction to Copulas* [M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [19] Hoel P G. *Introduction to Mathematical Statistics* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1984
- [20] 张明恒. 多金融资产风险价值的 Copula 计量方法研究 [J] *数量经济技术经济研究*, 2004, (4): 67-69
(Zhang M H. Study on the Copula Measuring Method of Multiple Financial Capital Value-at-risk [J] *Quantitative and Technical Economics*, 2004, (4): 67-69)
- [21] Dixit A, Pindyck R. *Investment Under Uncertainty* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1994

(上接第 740 页)

- [5] Kamolphiwong S, Karbowiak A E, Mehropour H. Flow Control in ATM Networks: A Survey [J] *Computer Communications*, 1998, 21(8): 951-968
- [6] Roberts J W. A Survey on Statistical Bandwidth Sharing [J] *Computer Networks*, 2004, 45(6): 319-332
- [7] Jing Y W, Chen B, Dinirovski Georgi M. On Leader-follower Model of Traffic Rate Control for Networks [J] *Control Theory and Applications*, 2001, 18(6): 817-822
- [8] Raj Jain. Congestion Control and Traffic Management in ATM Networks: Recent Advances and a Survey [J] *Computer Networks and ISDN systems*, 1996, 28(3): 1723-1738