

文章编号: 1001-0920(2007)07-0735-05

二进制 ABR 流量控制的离散滑模控制算法

闫 明, 井元伟

(东北大学 a. 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, b. 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 针对 ATM 网络的拥塞控制问题, 考虑网络中的不确定性因素, 借助离散滑模控制理论的设计方法, 提出一种二进制 ABR(可用比特率)流量控制算法. 该算法利用线性矩阵不等式设计了一个稳定的滑模面, 同时给出了一种能够明显减小滑模面附近抖振的离散趋近律, 基于该趋近律的控制律能有效抑制 ATM 交换机中的队列长度和允许信元速率的振荡. 仿真算例证实了所提出算法的有效性.

关键词: ABR 流量控制; 离散滑模; 非匹配不确定系统; 线性矩阵不等式; 趋近律

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Discrete sliding mode structure control algorithm for binary ABR flow control

YAN Ming, JING Yuan-wei

(a. Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, b. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: YAN Ming, E-mail: yanming12345678 @163.com)

Abstract: For the problem of congestion control in ATM networks, considering the uncertainty in networks, a binary available bit rate (ABR) flow control algorithm is proposed by using the approach of designing discrete sliding mode controller. The stable sliding surface is designed by using linear matrix inequality (LMI). Meanwhile, a discrete reaching law that can obviously reduce chattering around the sliding surface is also proposed. Based on the reaching law, the control law can effectively constrain the oscillation of the queue length in ATM switch and the allowed cell rate (ACR). The simulation results show the effectiveness of the algorithm.

Key words: ABR flow control; Discrete sliding mode; Mismatched uncertain system; Linear matrix inequality; Reaching law

1 引 言

ABR(可用比特率)是 ATM 网络的一种服务类型,其流量控制是一种有效的网络拥塞控制手段. ABR 主要有二进制和 ERF(显式速率反馈)两种流控机制^[1]. 前者典型的代表是 EFCI(显式前向拥塞标识)算法,其特点是实现起来非常简洁,但同时也存在着一个严重的问题,即 ATM 交换机中的队列长度和 ACR(允许信元速率)存在大幅度的振荡,这势必会降低链路的利用率. 虽然 ERF 在一定程度上可以克服这一问题,但其实现十分复杂. 因此,如果能有效地抑制队列长度和 ACR 的振荡,二进制流控机制将具有更大的实用价值.

近年来,人们在积极探索二进制流控机制的改进算法,取得了一些研究成果. 文献[2]基于经典的控制理论分析了队列长度和 ACR 振荡的原因,提出一种概率拥塞判定机制,有效地抑制了这二者的振荡,但没有考虑到系统中存在的不确定性因素的影响. 文献[3]提出了 E-EFCI 算法,缩短了端到端的延时,提高了链路的利用率,但控制器参数需要精确调节,这在实际中存在着很大的困难. 文献[4]提出一种基于拥塞概率标识的 p-EFCI 算法,用控制理论中的描述函数法分析了算法的稳定性,在理论上证明了 p-EFCI 算法的鲁棒性优于传统的二进制算法,但无法根据网络的实际情况动态调整拥塞概

收稿日期: 2006-06-02; 修回日期: 2006-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009); 教育部博士点基金项目(20020145007).

作者简介: 闫明(1974—),男,辽宁开原人,讲师,博士生,从事网络拥塞控制、滑模控制等研究; 井元伟(1956—),男,辽宁西丰人,教授,博士生导师,从事复杂系统的对称性、相似性及稳定性等研究.

率标识.文献[5]提出了 i-EFCI 算法,认为依赖于直觉的启发式非线性控制算法诱发的自激振荡是造成队列长度和 ACR 振荡的本质原因,通过修改交换机参数配置策略来优化性能的方案取得了较好的控制效果,但没有考虑队列门限参数的动态配置问题.文献[6]在交换机中通过队列的长度设置 EFCI 来传递网络的排队信息,不仅反映了网络的阻塞情况,而且反映了网络的排队情况,具有较高的性能价格比,但对系统的稳定性缺乏理论上的论证.

ATM 网络是一个复杂的时变系统,一旦系统发生改变,上述各种改进的二进制流控算法的控制效果并不理想.因此,需要设计一种鲁棒性强的控制器,以取得好的控制效果.滑模系统中的滑动模态因其具有理想的鲁棒性而引起广大学者的关注,出现了许多研究成果^[7-11].对于 ATM 网络这种复杂的时变系统,滑模控制是相当理想的选择,但目前将滑模控制算法应用于 ATM 网络流量控制的文献并不多见.文献[10]设计了一个比例切换滑模控制器,使 ATM 网络的稳态特性得到了很大的改善,但对队列长度和 ACR 振荡的抑制效果还有待提高.

本文采用离散滑模控制方法设计控制器,考虑了网络存在的各种不确定性因素,利用线性矩阵不等式设计了一个渐近稳定的滑模面.同时给出一个改进的离散趋近律,该趋近律能克服传统趋近律固有的使系统稳态特性不够理想的不足.基于该趋近律设计的控制律使得 ATM 交换机中的队列长度和 ACR 的振荡大大降低,提高了系统的稳定性和鲁棒性,改善了 ATM 网络的服务质量.

2 二进制 ABR 流量控制的模型

二进制 ABR 流量控制的模型可用下面的微分方程组描述^[4]:

$$\begin{cases} \dot{\delta y}_{\alpha}(t) = \\ \frac{1}{N_m S} [\alpha p_0 - 2\beta(1 - p_0) y_{\alpha 0}] \delta y_{\alpha}(t) + \\ \frac{1}{N_m S} (\alpha y_{\alpha 0} - \beta y_{\alpha 0}^2) \delta p(t - \tau_f), \\ \dot{\delta q}(t) = N \delta y_{\alpha}(t - \tau_d). \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta y_{\alpha}(t) &= y_{\alpha}(t) - y_{\alpha 0}, \delta p(t) = p(t) - p_0, \\ \delta q(t) &= q(t) - q_0, y_{\alpha 0} = \frac{C}{N}, p_0 = \frac{\beta C}{\alpha N + \beta C}. \end{aligned}$$

式(1)中: $y_{\alpha}(t)$ 为当前的允许信元速率, $y_{\alpha 0}$ 为期望的允许信元速率; $p(t)$ 为当前的非拥塞概率, p_0 为临界非拥塞概率; $q(t)$ 为 ATM 交换机中当前的队列长度, q_0 为 ATM 交换机中期望的队列长度; C 为链路容量, N 为激活的连接数, α 为 ACR 的单位

增量(数值上为峰值信元速率 PCR 与速率增加因子 RIF 的乘积), β 为 ACR 的倍乘因子(数值上等于速率减少因子 RDF); N_m 为相邻两个资源管理信元之间的信元数,通常取为 32; S 为单个 ATM 信元包含的比特数,即 424; τ_f 为资源管理信元自进入拥塞交换机到返回信源所经历的时间, τ_d 为信源与发生拥塞的交换机之间的传输时延.

令 $x_1(t) = \delta q(t)$, $x_2(t) = \delta y_{\alpha}(t)$, $u(t) = \delta p(t)$.在 LAN/MAN 中,时延通常在几毫秒至几十毫秒之间,忽略时延的影响有一定的合理性.因此,忽略式(1)中的时延后得到系统的状态空间表达式为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t). \quad (2)$$

其中

$$-p_0 \leq u(t) \leq 1 - p_0, 0 \leq p_0 \leq 1,$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & N \\ 0 & -b \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ k \end{bmatrix},$$

$$b = \frac{\alpha \beta C}{N_m S (\alpha N + \beta C)}, k = \frac{C}{N_m S N^2 (\alpha N + \beta C)}.$$

因为网络中的各种设备大多是数字的,所以研究离散系统更具有实际意义.将式(2)在保持可控性条件下进行离散化可得

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k). \quad (3)$$

其中

$$-p_0 \leq u(k) \leq 1 - p_0, 0 \leq p_0 \leq 1,$$

$$G = e^{AT}, H = \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) \times B,$$

T 为采样周期.

基于习惯,在不引起混淆的情况下,仍用 A 和 B 表示参数矩阵 G 和 H ,即

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k). \quad (4)$$

实际上,由于二进制 ABR 流量控制系统是一个时变系统,式(4)中的 A 和 B 均是时变的,可将这些时变因素看成是系统参数的摄动,分别用 ΔA 和 ΔB 表示.此时,式(4)可改写成如下形式的离散时间线性不确定系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ (A + \Delta A)x(k) &+ (B + \Delta B)u(k). \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中,易知 (A, B) 是可控的且 $B = [B_1, B_2]^T$ 满足 $\det(B_2) \neq 0$.

假设 1 在式(5)中,假设 ΔA 不满足匹配条件, ΔB 满足匹配条件,即 $\Delta B = B \times \Delta \tilde{B}$.

由假设 1,式(5)可化为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ (A + \Delta A)x(k) &+ B(I + \Delta \tilde{B})u(k). \end{aligned} \quad (6)$$

为便于求出滑模运动方程,受文献[7]的启发,

对式(6) 进行如下线性变换：

$$z = T X = \begin{bmatrix} I_{n-m} & -B_1 B_2^{-1} \\ 0 & B_2^{-1} \end{bmatrix} x, \tag{7}$$

使得式(6) 化为如下形式：

$$\begin{aligned} z(k+1) &= (\overline{A} + \Delta \overline{A}) z(k) + (\overline{B} + \Delta \overline{B}) u(k) = \\ &(\overline{A} + \Delta \overline{A}) z(k) + \overline{B} (I + \Delta \tilde{B}) u(k). \end{aligned} \tag{8}$$

其中

$$z(k) = \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix}, \overline{A} = T A T^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

$$\Delta \overline{A} = T \Delta A T^{-1} = \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} \\ \Delta A_{21} & \Delta A_{22} \end{bmatrix},$$

$$\overline{B} = T B = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}, \Delta \overline{B} = T \Delta B.$$

在式(8) 中： $z_1 \in R^{n-m}, z_2 \in R^m$ 为状态向量； $u \in R^m$ 为控制向量； A_{11}, A_{12}, A_{21} 和 A_{22} 为适当维数的常数项； $\Delta A_{11}, \Delta A_{12}, \Delta A_{21}$ 和 ΔA_{22} 为适当维数的不匹配不确定项； $\Delta \overline{B}$ 为适当维数的匹配不确定项。可以看出，系统(8) 中矩阵 $\overline{B}$ 的第 1 个元素为 0，从而在以下的分析中容易求得滑模运动方程。

3 离散滑模控制算法设计

3.1 切换函数设计

定义切换函数为

$$s(k) = C z(k) = [-K \quad I_m] \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} = 0. \tag{9}$$

其中： $C \in R^{m \times n}, K \in R^{m \times (n-m)}, I_m$ 为 m 维单位矩阵。由式(9) 可得

$$z_2(k) = K z_1(k). \tag{10}$$

将式(10) 代入(8)，可得滑模运动方程

$$\begin{aligned} z_1(k+1) &= (A_{11} + \Delta A_{11} + A_{12} K + \Delta A_{12} K) z_1(k). \end{aligned} \tag{11}$$

假设 2 ΔA_{11} 和 ΔA_{12} 是范数有界的，且满足

$$\Delta A_{11} = D F(k) E_1, \Delta A_{12} = D F(k) E_2. \tag{12}$$

其中： $D \in R^{(n-m) \times p}, E_1 \in R^{q \times (n-m)}, E_2 \in R^{q \times m}, F(k) \in R^{p \times q}$ 为不确定的时变矩阵且满足

$$F^T(k) F(k) \leq I.$$

引理 1^[12] 给定适当维数的矩阵 Y, D, E ，其中 Y 是对称的，则 $Y + D F E + E^T F^T D^T < 0$ 对所有满足 $F^T(k) F(k) \leq I$ 的矩阵 F 成立，当且仅当存在一个常数 $\varepsilon > 0$ ，使 $Y + \varepsilon D D^T + \varepsilon^{-1} E^T E \leq 0$ 成立。

定理 1 如果存在一个常数 $\varepsilon > 0$ ，矩阵 W 和对称正定矩阵 P ，使得如下线性矩阵不等式成立：

$$\begin{bmatrix} -X & * & * \\ A_{11} X + A_{12} W & -X + \varepsilon D D^T & * \\ E_1 X + E_2 W & 0 & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \tag{13}$$

则所设计的滑模面(9) 上的系统(11) 渐近稳定。其中： $X = P^{-1}, W = K X$ ，* 代表对称项。

证明 取李亚普诺夫函数为 $v(k) = z_1^T(k) P z_1(k)$ ，其中 P 为对称正定矩阵，则 $v(k)$ 沿系统(11) 的差分为

$$\begin{aligned} \Delta v(k) &= v(k+1) - v(k) = \\ &z_1^T(k+1) P z_1(k+1) - z_1^T(k) P z_1(k) = \\ &z_1^T(k) [(A_{11} + A_{12} K + D F E_1 + \\ &D F E_2 K)^T P (A_{11} + A_{12} K + D F E_1 + \\ &D F E_2 K) - P] z_1(k). \end{aligned}$$

因此，如果下式成立：

$$\Omega^T P \Omega - P < 0, \tag{14}$$

则系统(11) 渐近稳定，其中

$$\Omega = A_{11} + A_{12} K + D F E_1 + D F E_2 K.$$

根据矩阵的 Schur 补性质知，式(14) 成立等价于下式成立：

$$\begin{bmatrix} -P & * \\ \Omega & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0, \tag{15}$$

其中 * 代表对称项，即

$$\Psi + \overline{D} F(k) \overline{E} + \overline{E}^T F^T(k) \overline{D}^T < 0. \tag{16}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} -P & * \\ A_{11} + A_{12} K & -P^{-1} \end{bmatrix}, \overline{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ D \end{bmatrix},$$

$$\overline{E} = [E_1 + E_2 K \quad 0].$$

由引理 1 知，式(16) 对所有满足 $F^T(k) F(k) \leq I$ 的矩阵 F 成立，当且仅当存在一个常数 $\varepsilon > 0$ ，使得下式成立：

$$\Psi + \varepsilon \overline{D} \overline{D}^T + \varepsilon^{-1} \overline{E}^T \overline{E} < 0, \tag{17}$$

即

$$\begin{bmatrix} -P & * \\ A_{11} + A_{12} K & \Theta \end{bmatrix} - \overline{E}^T (-\varepsilon I)^{-1} \overline{E} < 0. \tag{18}$$

其中： $\Theta = -P^{-1} + \varepsilon D D^T$ ，* 代表对称项。

根据矩阵的 Schur 补性质，式(18) 成立等价于下式成立：

$$\begin{bmatrix} -P & * & * \\ A_{11} + A_{12} K & \Theta & * \\ E_1 + E_2 K & 0 & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0. \tag{19}$$

对式(19) 左乘再右乘 $\text{diag}[P^{-1} \quad I \quad I]$ ，并令 $X = P^{-1}, W = K X$ ，即得式(13)。由上述分析可知，当式(13) 成立时，式(14) 成立，即系统(11) 渐近稳定。□

注 1 式(13) 是一个线性矩阵不等式(LMI)，因此可用 Matlab 软件中的 LMI 工具箱求出矩阵 X 和 W ，从而可将矩阵 K 求出，即求得了渐近稳定的切换函数 $s(k)$ 。

3.2 离散趋近律设计

文献[7] 提出的离散趋近律为

$$s(k+1) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \operatorname{sgn}s(k). \quad (20)$$

其中: $\varepsilon > 0, q > 0, 0 < qT < 1, T$ 为采样周期.

该控制律能够保证系统运动快速到达准滑动模态区,但却无法保证系统运动最终到达原点.针对这一缺陷,文献[8]提出了在远离原点处采用式(20)所示的趋近律,而在原点附近则采用如下变速趋近律:

$$s(k+1) = s(k) - \varepsilon T x(k) \operatorname{sgn}s(k). \quad (21)$$

其中: $\varepsilon > 0, q > 0, 0 < qT < 1, T$ 为采样周期.

然而,这种组合形式的趋近律在离原点远近的尺度上不好界定.针对上述缺点,本文采用如下离散趋近律:

$$s(k+1) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T(1 - e^{-z(k)}) \operatorname{sgn}s(k). \quad (22)$$

其中: $\varepsilon > 0, q > 0, 0 < qT < 1, T$ 为采样周期.这样,既保持了式(20)的所有优点,又保证了系统运动最终到达原点.

因为在远离原点处,即当 $z(k)$ 较大时, $(1 - e^{-z(k)})$ 趋近于 1,此时式(22)相当于式(20),能够保证系统运动快速到达准滑动模态区.由于切换函数的选择保证了准滑动模态是渐近稳定的,准滑动模态区域内的系统运动将保持在其中并向原点趋近.在原点附近,即当 $z(k)$ 趋近于零时, $(1 - e^{-z(k)})$ 趋近于 $z(k)$,这相当于变速趋近律(21).由文献[8]可知,这将保证系统运动最终到达原点.

3.3 控制律设计

系统(8)可改写为

$$z(k+1) = \bar{A}z(k) + \bar{B}u(k) + \Delta \bar{A}z(k) + \Delta \bar{B}u(k). \quad (23)$$

式(23)中后两项可用 $\varphi(k)$ 代替,即

$$\begin{aligned} \varphi(k) &= \Delta \bar{A}z(k) + \Delta \bar{B}u(k) = \\ z(k+1) - \bar{A}z(k) - \bar{B}u(k). \end{aligned} \quad (24)$$

根据式(9)和(22)~(24)可得控制律

$$\begin{aligned} u(k) &= \\ &- (\bar{C}\bar{B})^{-1} [\bar{C}\bar{A}z(k) - (1 - qT)s(k) + \\ &\varepsilon T(1 - e^{-z(k)}) \operatorname{sgn}s(k) + C\varphi(k)]. \end{aligned} \quad (25)$$

由于式(25)中含有不确定项 $\varphi(k)$,实际上无法得出控制律,但 $\varphi(k-1)$ 可通过下式计算:

$$\begin{aligned} \varphi(k-1) &= \\ z(k) - \bar{A}z(k-1) - \bar{B}u(k-1). \end{aligned} \quad (26)$$

由文献[9]知,用前一采样时刻的不确定项 $\varphi(k-1)$ 近似替代当前采样时刻的不确定项 $\varphi(k)$ 具有一定的合理性.据此有如下定理:

定理 2 如果构造如下确定的控制律:

$$u(k) = -p_0, u(k) < -p_0;$$

$$\begin{aligned} u(k) &= \\ &- (\bar{C}\bar{B})^{-1} [\bar{C}\bar{A}z(k) - (1 - qT)s(k) + \\ &\varepsilon T(1 - e^{-z(k)}) \operatorname{sgn}s(k) + C\varphi(k-1)], \\ &-p_0 \leq u(k) \leq 1 - p_0; \end{aligned}$$

$$u(k) = 1 - p_0, u(k) > 1 - p_0. \quad (27)$$

则可使系统(8)满足到达条件,其中 $0 \leq p_0 \leq 1$.

证明 由式(9), (23), (24)和(27)可得

$$\begin{aligned} s(k+1) &= \\ (1 - qT)s(k) - \varepsilon T(1 - e^{-z(k)}) \operatorname{sgn}s(k) + \\ C[\varphi(k) - \varphi(k-1)]. \end{aligned} \quad (28)$$

由前述知,可用 $\varphi(k-1)$ 近似替代 $\varphi(k)$,于是有

$$s(k+1) \approx (1 - qT)s(k) - \varepsilon T(1 - e^{-z(k)}) \operatorname{sgn}s(k). \quad (29)$$

式(29)相当于式(22),由对式(22)的分析可知,该控制律可使系统(8)满足到达条件.另外,因为 $u(k)$ 受限,所以应与恒值控制相结合,即得式(27). $\square$

4 仿真算例

在 NIST 的 ATM 仿真平台上^[13],采用具有哑铃拓扑结构的仿真网络配置来研究本文算法的性能.为了与以往改进的二进制流控算法相比较,在相同网络条件下,同时对文献[10]中的比例切换滑模控制算法进行仿真.

给定参数为:激活的连接数 $N = 5$,主干信道容量 $C = 155$ Mbps,峰值信元速率 PCR = 149 Mbps,速率增加因子 RIF 和速率减少因子 RDF 均为 0.062 5,交换机的最大缓存为 1 000 cells,期望的队列长度为 400 cells,期望的允许信元速率为 31 Mbps,取采样周期 $T = 1$ ms.

根据以上参数得到如下系统方程:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0.0047 \\ 0 & 0.8885 \end{bmatrix} x(k) + \\ &\begin{bmatrix} 6.1801 \times 10^4 \\ 2.4243 \times 10^7 \end{bmatrix} u(k), \end{aligned}$$

其中 $-0.1722 \leq u(k) \leq 0.8278$. 不确定性参数取为

$$\begin{aligned} \Delta A &= \\ &\begin{bmatrix} 0.0150 \sin(k/10) & 0.0002 \sin(k/10) \\ 0 & 0.0150 \sin(k/10) \end{bmatrix}, \\ \Delta B &= \begin{bmatrix} 0.0004 \sin(k/10) \\ 0.1580 \sin(k/10) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

根据以上参数并利用定理 1 得 $C = [8.2416 \times 10^{-6}, 1]$. 令 $\varepsilon T = 0.02, qT = 0.15$,交换机中队列长度的初始值为 900 cells,允许信元速率 ACR 的初始值为 6 Mbps,仿真结果如图 1 和图 2 所示.

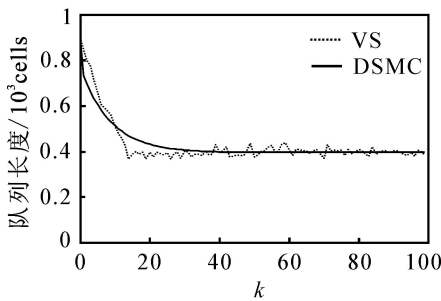


图 1 队列长度的变化

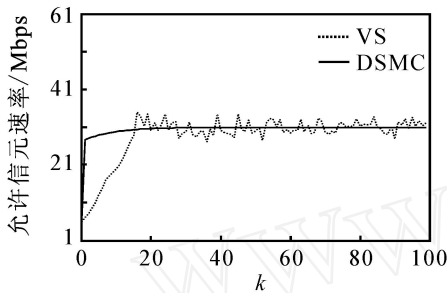


图 2 允许信元速率的变化

在图 1 和图 2 中,虚线代表文献[10]中的算法(VS),实线代表本文算法(DSMC).从仿真结果可以看出,与文献[10]中的算法相比,本文算法有效抑制了交换机中的队列长度和允许信元速率的振荡,使二者很快地趋向于期望值

5 结 语

本文为二进制 ABR 流量控制设计了一种离散滑模控制算法.首先利用线性矩阵不等式设计了一个渐近稳定的滑模面;然后给出了一个新的离散趋近律,基于该趋近律的控制律能有效地抑制交换机中队列长度和允许信元速率的振荡.从仿真结果可以看出,用本文方法设计的控制器具有更强的稳定性和鲁棒性.这对充分发挥二进制流控机制的简洁性、改善 ATM 网络的服务质量大有好处.

参考文献(References)

[1] Raj J. Myths about congestion management in high-speed networks [J]. Internetworking: Research and Experience, 1992, 3(2): 101-113.
[2] Ren F Y, Ren Y, Shan X M, et al. Analysis and improvement of the EFCI algorithm[C]. Proc of 6th IEEE Symposium on Computer and Communications. Hammamet, 2001: 255-259.
[3] Kang Z B, Agarwal A. Analysis of end-to-end delay based on enhanced EFCI congestion control algorithm for ABR service [C]. EUROCON '01, Int Conf on Trends in Communications. 2001: 479-482.

[4] 任丰原,任勇,山秀明,等.二进制 ABR 流量控制算法的建模与分析[J]. 计算机学报, 2002, 25(6): 651-656.
(Ren Feng-yuan, Ren Yong, Shan Xiurming, et al. Modeling and analysis of binary ABR flow control[J]. Chinese J of Computers, 2002, 25(6): 651-656.)
[5] 任丰原,林闯,任勇,等.二进制流量控制算法的性能分析[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 612-618.
(Ren Feng-yuan, Lin Chang, Ren Yong, et al. Performance analysis of the binary flow control algorithm[J]. J of Software, 2003, 14(3): 612-618.)
[6] 文旭东,刘宏立.携带队列长度信息的 ABR 业务扩展 EFCI 流量控制方案[J]. 桂林电子工业学院学报, 2005, 25(2): 11-15.
(Wen Xudong, Liu Hong-li. An ABR flow control extend EFCI scheme with information of queue length [J]. J of Guilin University of Electronic Technology, 2005, 25(2): 11-15.)
[7] 高为炳.离散时间系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(2): 154-161.
(Gao Wei-bing. Variable structure control of discrete-time systems [J]. Acta Automatica Sinica, 1995, 21(2): 154-161.)
[8] 姚琼荃,宋立忠,温洪.离散变结构控制系统的比例-等速-变速控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 329-332.
(Yao Qiong-hui, Song Lirzhong, Wen Hong. Proportional-constant-variable rate control for discrete-time variable structure systems [J]. Control and Decision, 2000, 15(3): 329-332.)
[9] 于双和,傅佩琛,强文义.不确定离散时间系统的变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 85-88.
(Yu Shuang-he, Fu Pei-chen, Qiang Wen-yi. Uncertain discrete-time variable structure control systems [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(1): 85-88.)
[10] 任丰原,林闯,王福豹. ABR 流量控制中的变结构控制器[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 562-568.
(Ren Feng-yuan, Lin Chuang, Wang Fur-bao. Variable structure controller for ABR flow control [J]. J of Software, 2003, 14(3): 562-568.)
[11] Fernando C, Leonid F. Analysis and design of integral sliding manifolds for systems with unmatched perturbations[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(5): 853-858.
[12] Xie L H. Output feedback H_{∞} control of system with parameter uncertainty[J]. Int J of Control, 1996, 63: 741-750.
[13] Golmie N, Mouveaux F, Hester L, et al. The NIST ATM / HFC network simulator operation and programming guide version4.0 [DB/OL]. (1998-12-15). <http://hsnt.nist.gov/>.