

文章编号: 1001-0920(2004)01-0061-04

ATM 网络预测拥塞控制器设计

朱瑞军, 索东海, 马吉荣

(大连理工大学 自动化系, 辽宁 大连 116023)

摘要: 网络传输中存在严重的不确定性, 由此限制了常规反馈拥塞控制算法的应用。利用预测控制方法, 设计出一种改进的拥塞控制算法, 增强了闭环系统的鲁棒性和稳定性, 实现了带宽分配的公平性。仿真结果证实了所提出方法是有效性的。

关键词: ABR 服务; ATM 网络; 拥塞控制; 流量控制; 预测控制

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A

Predictive congestion controller in ATM networks

ZHU Rui-jun, SUO Dong-hai, MA Ji-rong

(Department of Automation, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China Correspondent: ZHU Rui-jun, E-mail: zhurj@dlut.edu.cn)

Abstract: Due to time-varying characteristics of transmission delay and dynamical variety of users, there exist severe uncertainties in ATM networks which limits the application of traditional feedback control methods. An improved algorithm is presented based on generalized predictive control, which enhances the stability and robustness of closed-loop systems, and realizes the fairness of bandwidth allocation. The effectiveness of the proposed methods is demonstrated by simulation results.

Key words: ABR service; ATM networks; congestion control; flow control; generalized predictive control

1 引言

异步传递模式(ATM)是一种以固定长度的信元为基础的分组交换和多路统计复用技术,是为多种业务设计的面向连接的传递模式^[1]。由于ATM网络传输速率高及业务种类多,网络流量具有突发性和波动性,即使对于设计良好的网络,也时常发生拥塞而导致网络整体性能下降。因此必须进行拥塞控制以保护网络,降低拥塞的严重程度和持续时间,使网络性能不至于严重下降,确保网络免于崩溃。

ATM论坛定义了5种服务类型,其中ABR服务主要用于传输非实时业务,并要求保证数据的完整性。ABR源可根据RM信元的反馈信息调整它的速率,以改善网络状态,因此可用于拥塞控制。ATM

论坛采用基于速率的拥塞控制算法作为标准。基于速率反馈的拥塞控制方法有两种^[2]:二值(BI)算法和显示速率(ER)算法。典型的BI算法有PRCA算法^[3]等,典型的ER算法有ERICA算法^[4]等。BI算法和ER算法的优点是算法简单,易于实现;缺点是两种算法都使源端发送速率产生较大的跳跃,没有考虑带宽延时积对控制算法的影响,使网络速率、利用率和交换机缓冲区排队发生强烈的振荡。

在上述算法中,信元速率、缓冲区大小和链路带宽具有饱和和非线性,使得控制系统含有非线性反馈环节。即使是单节点的系统,也很难对算法进行理论分析,只能从仿真实验中加以验证。而采用线性控制理论进行拥塞控制器设计,则可方便地进行理论分

收稿日期: 2002-11-12; 修回日期: 2003-03-24

作者简介: 朱瑞军(1968—),男,内蒙古卓资人,副教授,博士,从事通信网络的优化管理、控制和仿真的研究;索东海(1968—),男,辽宁锦州人,硕士生,从事通讯网络的研究。

析,并可直接利用缓冲区排队长度控制信源传输速率

Benmohamed 等人提出基于速率反馈的极点配置 PD 拥塞控制器^[5],算法考虑了往返延时对网络状态的影响,能保证系统的稳定性,但不能保证暂态性能 为此,Kolarov 等人在文献[5]的基础上设计出一种双 PD 控制器(即 DPDC 算法)^[6],但该算法是按最大定常延时设计的,而且忽略了量化测量误差

上述算法大多没有考虑往返传输延时的时变特性,以及由于用户数的动态变化等引起的高频扰动和测量误差 这些因素不仅限制了许多控制方法的应用,而且会使系统的稳定性急剧下降或产生振荡 为此,本文提出一种预测控制方法,克服了测量误差对系统性能的影响,并使网络传输中由时变延迟和量化引起的不可测扰动极小化

2 交换机模型

对于基于速率反馈的拥塞控制问题,主要的测量数据是交换机缓冲区队列长度 为简单起见,本文仅考虑一个输出端口的情况,如图 1 所示 该输出端口有一个先入先出(FIFO)的容量有限的排队系统和一个 ER 控制器 缓冲区对列系统的连续流模型可表示为^[7]

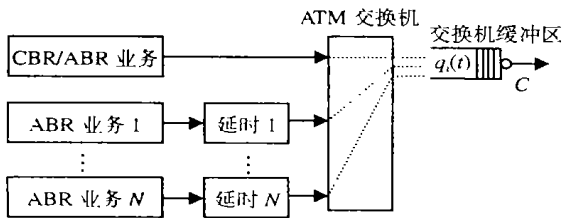


图 1 一个输出端口的缓冲区队列模型

$$\dot{x}(t) = \text{sat}_x^0 \left\{ \sum_{i=1}^N q_i^b(t - \tau_i(t)) + q_u(t) - C \right\} \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 表示 t 时刻交换机缓冲区的排队长度, $q_i^b(t)$ 表示 t 时刻从第 i 个 ABR 信源到达瓶颈节点缓冲区的信元速率, $q_u(t)$ 表示 t 时刻高优先级业务的信元速率, $\tau_i(t)$ 表示网络的往返传输延时, C 表示输出链路容量, X^0 表示缓冲区容量 缓冲区动态具有饱和非线性特性,其中

$$\text{sat}_z = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ a, & z > a, \\ z, & \text{其他} \end{cases}$$

往返传输延时由两部分组成:由瓶颈节点的拥

塞控制器发出的 RM 信元传输到信源,信源采用其 ER 值调整速率产生的后向延时,以及采用其 ER 值发送的数据传输到拥塞控制器产生的前向延时

定义 $\tau_i(t) = \bar{\tau}_i^b(t) + \bar{\tau}_i^f(t)$, 其中: $\bar{\tau}_i^b(t) = h_i^b + \delta_i^b(t)$ 为由瓶颈节点到第 i 个源节点间的后向延时, h_i^b 为已知的名义固定后向延时,假设信源的发送延时和交换机处理信元的延时可以忽略,则 h_i^b 即为链路延时; $\delta_i^b(t)$ 为不确定的后向时变延时 再定义 $\bar{\tau}_i^f(t) = h_i^f + \delta_i^f(t)$ 为由第 i 个源节点到瓶颈节点间的前向延时,其中: h_i^f 为已知的名义固定前向延时, $\delta_i^f(t)$ 为不确定的前向时变延时 并定义 $h_i = h_i^b + h_i^f$ 为总名义固定延时,即链路往返延时;而定义 $\delta_i(t) = \delta_i^b(t) + \delta_i^f(t)$ 为总的不确定时变延时 因而有 $\tau_i(t) = h_i + \delta_i(t)$.

在上述假设下确定 $q_i^b(t)$. 设 $q_i(t)$ 是拥塞控制器在 t 时刻计算的速率 交换机经延迟 $\tau_i(t)$ 才能收到信源 i 以速率 $q_i(t)$ 发送的信元,则有 $q_i^b(t) = q_i(t - \tau_i(t))$. 延时由确定性延时和不确定性延时两部分组成 将 $q_i^b(t)$ 看作由两种延时引起的速率之和,即 $q_i^b(t) = q_i(t - h_i) + q_i(\delta_i(t))$. 在此认为 $q_i(\delta_i(t))$ 是交换机检测第 i 个信源速率的测量误差,将其看作一种扰动 则式(1)可写成

$$\dot{x}(t) = \text{sat}_x^0 \left\{ \sum_{i=1}^N (q_i(t - h_i) + q\delta(t) + q_u(t) - C) \right\} \quad (2)$$

其中 $q\delta(t) = \sum_{i=1}^N q_i(\delta_i(t))$, 它是由不确定延时引起的所有信源速率测量误差之和 取采样时间为 T_s ,对式(2)进行离散化,得到

$$x(n) = \text{sat}_x^0 \left\{ x(n-1) + T_s \left(\sum_{i=1}^N q_i(n - \tilde{\tau}_i) + q\delta(n) + q_u(n) - C \right) \right\} \quad (3)$$

式中 $\tilde{\tau}_i = h_i/T_s$. 由于 h_i 不一定是采样时间 T_s 的整数倍,取 $d_i = [h_i/T_s]$,即 d_i 为大于等于 $\tilde{\tau}_i$ 的最小整数 设 $q_i(n - \tilde{\tau}_i) = q_i(n - d_i) + q_i^e(n)$,其中 $q_i^e(n)$ 为量化固定延时所产生的测量噪声,视其为一种扰动 则式(3)可写成

$$x(n) = \text{sat}_x^0 \left\{ x(n-1) + T_s \left(\sum_{i=1}^N q_i(n - d_i) + q_e(n) + q\delta(n) + q_u(n) - C \right) \right\} \quad (4)$$

式中 $q_e(n) = \sum_{i=1}^N q_i^e(n)$ 为量化固定延时引起的测量误差之和 令 $\omega(n) = \Delta T_s (q_e(n) + q\delta(n) + q_u(n))$,

并假定 $\omega(n)$ 为均值为零的白噪声干扰 于是缓冲区队列动态模型变为

$$x(n) = \text{sat}x^0 \left[x(n-1) + T_s \sum_{i=1}^N q_i(n-d_i) - T_s C + \omega(n)/\Delta \right] \quad (5)$$

在实际网络中, 通过每个节点的 ABR 连接数量很大, 进行拥塞控制算法设计时, 需要建立一个很大的控制增益矩阵, 控制算法的计算量很大, 难以满足实时性的要求 因而将链路往返延时相等的 ABR 连接分为一组 设网络的最大往返延时 $D_2 = \max_i d_i$, 最小延时 $D_1 = \min_i d_i$ 以 i 表示延时, 则有 $D_1 \leq i \leq D_2$ 以 l_i 表示延时为 i 的 ABR 连接数 为公平分配带宽, 设稳态时每个连接分配的带宽相等 以 $q(n)$ 表示速率稳态值, 且在足够小的采样时间内, 认为 l_i 为常数 则缓冲区队列动态模型可进一步写成

$$x(n) = \text{sat}x^0 \left[x(n-1) + T_s \sum_{i=1}^N l_i q(n-i-d_i) - T_s C + \omega(n)/\Delta \right] \quad (6)$$

3 广义预测拥塞控制器设计

由于式(6)含有饱和非线性函数, 必须进行线性化处理, 才能用广义预测控制(GPC)算法进行拥塞控制器设计^[8-10] 文献[5, 6]已证明, 在网络平衡点附近可消除式(1)的饱和函数 于是式(6)可写成

$$x(n) = x(n-1) + \sum_{i=1}^D l_i q(n-i) + \omega(n)/\Delta \quad (7)$$

将式(7)表示成输入输出模型, 即

$$A(z^{-1})x(n) = B(z^{-1})q(n-1) + \omega(n)/\Delta \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} A(z^{-1}) = 1 - z^{-1}, \\ B(z^{-1}) = l_1 + l_2 z^{-1} + \dots + l_D z^{-D+1}; \end{cases} \quad (9)$$

$\Delta = 1 - Z^{-1}$ 是差分算子, $\omega(n)$ 是零均值的白噪声取预测性能函数

$$J(n) = E \left\{ \sum_{j=1}^N [x(n+j) - x^0]^2 + \sum_{j=1}^N \lambda(j) [\Delta q(n+j-1)]^2 \right\} \quad (10)$$

其中 x^0 为期望的队列长度 为得到 j 步后输出 $x(n+j)$ 的最优预测值, 使用如下 Diophantine 方程:

$$\begin{cases} 1 = \Delta A(z^{-1})E_j(z^{-1}) + z^{-j}F_j(z^{-1}), \\ E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1}). \end{cases} \quad (11)$$

可得到控制律

$$\Delta q(n) = \sum_{j=1}^N p_j x^0 - \sum_{j=1}^N p_j F_j(z^{-1})x(n) - \sum_{j=1}^N p_j S_j(z^{-1})\Delta q(n-1). \quad (12)$$

综上可得如下结论: 对于链路延时和用户数固定的网络, GPC 算法(12)可实现链路带宽分配的公平性; 如果合理选择参数 N 和 λ 也可实现算法的稳定性

4 算法实现

上述算法所要控制的动态过程具有饱和非线性, 算法是在网络平衡点附近对网络模型进行线性化后得到的, 并且系统的输入也具有饱和非线性 因此在两种极端情况下(即拥塞和轻载), 系统进入非线性区时算法并不适用

本文借助于文献[7, 8]的设计方法, 设置一个高增益控制器 HGC 和一个初始恢复速率选择器 IRRS, 使网络状态尽可能运行在网络平衡点附近 HGC 的作用是在轻载时迅速增加信源的数据发送速率; IRRS 的作用是迅速降低排队长度, 并限制排队长度的变化率, 以保证排队长度不发生较大的振荡

5 仿真实验

ABR 流控制的目的是在保证最小信元丢弃率的前提下, 为所有连接公平分配带宽, 实现最大化网络链路利用率 本节通过仿真实验来验证基于预测控制理论的拥塞控制算法能否实现上述目标

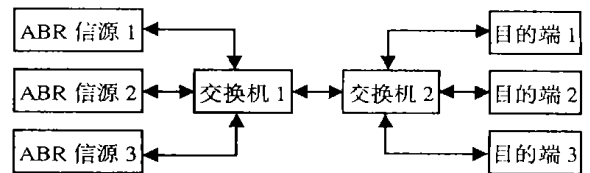


图 2 单瓶颈节点网络模型

图 2 为由 3 个 ABR 信源和 2 台交换机组成的具有单一瓶颈链路的网络拓扑结构 交换机的每个输出端口有容量为 10 000 个信元的缓冲区, 所有链路的传输速率都是 155.52 Mb/s ABR 信源的参数为: PCR = 318 信元/m s(135 Mb/s), ICR = MCR = 1 信元/m s(1 Mb/s), RIF = 1/16, RDF = 1/16 取采样时间 $T_s = 1$ ms, 各链路的往返延时分别为: $d_{\text{信源}1} = 1, d_{\text{信源}2} = 2, d_{\text{信源}3} = 3$, 网络拓扑结构如图 2 所示 预测时域 $j = 20$, 取 $\lambda = (30, 20, 16, 10, 6, 4, 2, 1, 0.5, 0, 2, 15, 10, 8, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1), x^0$

= 50 cells, $X_{i2} = 1050$ 按文献[7, 8]设计RRS控制器和HGC控制器. 实验中设置3个信源分别在 $t_1 = 0.3\text{ s} \sim 1.2\text{ s}$, $t_2 = 0.3\text{ s} \sim 0.8\text{ s}$ 和 $t_3 = 0.6\text{ s} \sim 1.2\text{ s}$ 间发送数据

图3为3个信源的发送速率, 图4为排队长度曲线, 图5为链路利用率曲线. 从实验结果可以看出, GPC算法的稳态性能和暂态性能都明显优于DPDC算法, 基于预测的拥塞控制算法具有良好的稳定性和动态性能, 并能对用户数和延迟的变化做出快速反应

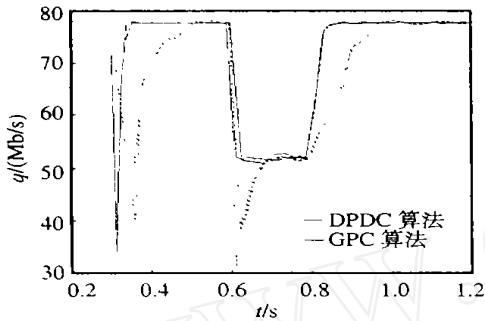


图3 ABR信源速率

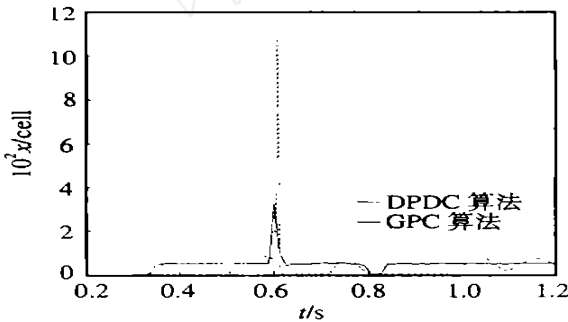


图4 缓冲区队列长度

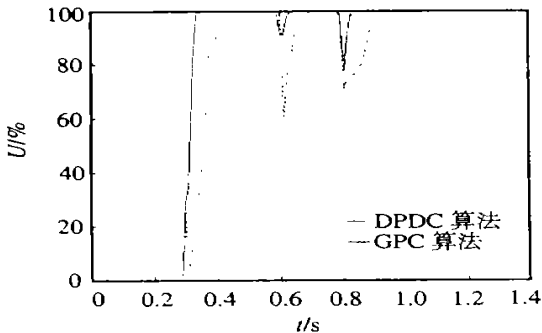


图5 链路利用率

6 结论

本文应用预测控制理论, 提出一种基于速率的

闭环拥塞控制器设计方法, 可以方便地选择控制器参数. 控制器对各种时变延时引起的干扰和测量误差具有较强的鲁棒性, 且满足公平性要求. 但这种设计方法只是证明预测控制理论可应用于ATM网络拥塞控制的设计, 还不具有可实现性

参考文献(References):

- [1] The ATM Forum Technical Committee. Traffic management specification version 4.1[S]. AF-TM-0121.000. 1996
- [2] Kamolphiwong S, Karbowiak A E, Mehrou H. Flow control in ATM networks[J]. *Computer Communications*, 1998, 21(11): 951-968
- [3] Roberts L, Makrucki B, Toftigh T, et al. Closed-loop Rate-based traffic management[S]. ATM Forum/94-0438R1. 1994
- [4] Jain R, Kalyanaraman S, Viswanathan R, et al. A sample switch algorithm[R]. AF-TM-95-0178R1. 1995
- [5] Benmohamed L, Meekov S M. Feedback control of congestion in packet switching networks: The case of a single congested node[J]. *IEEE ACM Transactions on Networks*, 1993, 1(6): 693-707
- [6] Kolarov A, Ramanurthy G A. 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
- [7] Quet P F, Aatar B, Iftar A, et al. Rate-based flow controllers for communication networks in the presence of uncertain time-varying multiple time-delays[J]. *Automatica*, 2002, 38(6): 917-928
- [8] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control: Part I and Part II[J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137-160
- [9] 郭建, 陈庆伟, 朱瑞军, 等. 一类非线性系统的自适应预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(1): 68-72
(Guo Jian, Chen Qingwei, Zhu Ruijun, et al. Adaptive predictive control of a class of nonlinear systems[J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(1): 68-72)
- [10] 郭建, 朱瑞军, 胡维礼. 一类非线性系统的自适应广义预测控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(3): 358-361
(Guo Jian, Zhu Ruijun, Hu Weili. Adaptive GPC for a class of nonlinear system[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 358-361)