

基于 ATM 单瓶颈节点模型的 PID 拥塞控制器设计^{*}

关新平 刘志新 龙承念

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛066004)

摘要 针对 ATM 单瓶颈节点网络模型,提出 ABR 业务拥塞控制方案,给出使系统闭环稳定 PID 参数应满足的约束条件。设置前馈环节以抑制带宽波动对缓冲区队列长度的影响。仿真结果表明,业务服务质量得到了保证,系统具有较好的动态性能。

关键词 单瓶颈节点, PID 控制, 前馈控制, 服务质量

The Congestion Control Algorithm of PID Based on the ATM Network Model of Single Bottleneck

GUAN Xin-Ping LIU Zhi-Xin LONG Cheng-Nian

(Institute of electrical engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract In this paper, the scheme of congestion control for ABR services is presented based on the single bottleneck node of ATM networks. The constraint condition of PID parameters is given which can guarantee the stability of closed system. In order to restrain the effect which the wave of available bandwidth brings to the queue length, the device of feed-forward is adopted. The simulation shows that the system has better dynamic performance and guarantees the quality of service.

Keywords Single bottleneck node, PID control, Feed-forward control, Quality of service

1 引言

ATM 是为适应现代通信网络多业务类型,高性能要求而发展起来的一种宽带传输技术,ATM 论坛定义的几种网络业务类型中,为充分利用网络中其它高级别业务(CBR、VBR)的剩余带宽资源,增大资源利用率而设置了 ABR (Available Bit Rate)业务^[1]。进而规定 ABR 业务为多种业务类型中唯一一种根据网络运行状况,利用反馈机制来调整源端发送速率,这种反馈机制通过 RM 信元(Resource Management Cell)来实现。在 RM 信元中设置若干个域,用以承载网络运行状态信息,作为控制的依据和决策的传达者。控制的目的是在避免拥塞发生的同时充分利用网络剩余带宽。在 ATM 网络中,信元到达交换机处,首先进入缓冲区排队等候服务,若到达数据速率大于服务速率,必然会造成排队长度的加大,甚至超出缓冲区容量而产生信元的溢出,即网络发生拥塞,最终降低服务质量 QoS(Quality of Service)。由于信息传输的突发性,传输时延变化和业务产生的一定程度的不可预测性,造成网络环境的多变性和复杂性,加大了拥塞控制的难度。

为提高网络服务质量,避免拥塞,ATM 论坛中提出两种流控方法:一种是相对于滑动窗(sliding window)机制提出的基于信誉的方法,另一种是基于速率的控制方法。而后者已被 ATM 论坛采用为一种标准机制^[1]。基于速率的算法主要是利用 RM 信元反馈信息中的显式速率来建议源端应以何种速率发送信元,才能保证网络具有较好的动态性能。最著名的算法为 ERICA(explicit rate indication congestion avoidance)算法^[2],该算法实现简单,使用参数少,但也引起了速率的大幅

波动。尽管在此基础上,又有很多工作不断开展^[3~5],但系统动态性能仍然没有太大的改善。控制理论的介入为网络的性能分析和控制问题提供了理论基础,对于诸如稳定性、动态性能等方面的研究提供了一个新途径。它也对控制界提出了新的挑战,引起了众多控制学者的关注,传统 PD 控制,Smith 原则,模糊神经网络控制及等思想均被引入到网络拥塞控制问题中来^[6~9],但对于算法的简单性、实用性和有效性之间很难取得一个较为理想的折中。

在本文中,我们以缓冲区内队列长度为控制目标,针对单瓶颈节点网络模型设计 PID 控制器,给出保持系统稳定的系数匹配关系,同时提取出可用带宽信息,基于曲线外推法预测可用带宽变化,利用前馈网络解决带宽变化对队列输出的干扰抑制问题。该算法简单易行,抗干扰性强。仿真中,在可用带宽大幅波动的情况下,队列长度仍能稳定在给定范围之内,表明在瓶颈节点处既无信元丢失,又未发生拥塞,且可用带宽完全利用(始终有等待服务的信元)。进而验证了方案的有效性。

2 网络模型描述

ATM 网络是基于呼叫连接的交换方式,但是区别于电路交换的是每一个连接并不是单独占有物理链路,而是依靠基于虚通路标识(VPI)虚通道标识(VCI)建立的虚连接(VC)进行数据的交换与传输。一旦连接建立,数据包将按照规定的路径传输。在传输过程中,信元必须经过若干交换机进行路由处理。在一条 VC 所途经的所有交换机中,我们称将 ABR 业务传输速率限制在最小值的节点为瓶颈节点。

假设:1)任一虚连接在整个传输路径上只存在一个瓶颈节点;2)在某一交换节点处有 n 条虚连接瓶颈于该节点;3) n

^{*} 国家自然科学基金(No. 60174010)、燕山大学科技发展基金(YDJJ0123)。关新平 博士,教授,博士生导师,从事 ATM 网络拥塞控制,时滞系统分析与综合,混沌控制等研究。

条虚连接所在的信源在连接建立过程中始终具有足够的数 待发送。建立 ATM 单瓶颈节点模型如图1所示。

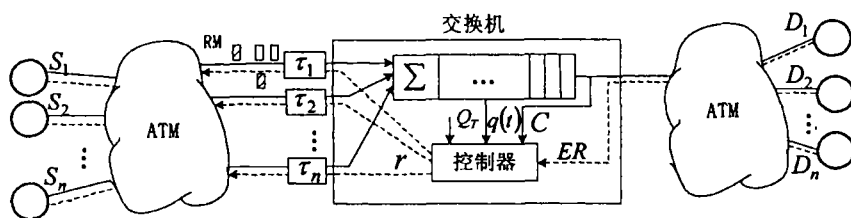


图1 单瓶颈节点网络模型

图中, n 为瓶颈于该节点的虚连接个数, τ_i 为第 i 条瓶颈于该节点的虚连接的回路时延(RTT), 即包括传输时延和交换处理时延, B 为缓冲区容量, Q_r 为队列长度期望值, C 为服务速率(即留给 ABR 的可用带宽), ER 为显式速率值, r 为控制器输出公平速率。则在交换节点处的对列模型可以描述为

$$q(n+1) = Sat_B\{q(n) + \sum_{i=1}^n T[r(n-\tau_i) - C(t)]\} \quad (1)$$

$$\text{其中 } Sat_B\{x\} = \begin{cases} B & x > B \\ x & 0 < x \leq B \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

文[6]已经证明在网络平衡点附近研究系统的渐进稳定性时, 忽略 $Sat_B\{x\}$ 非线性对网络的作用时, 对稳定性分析和控制参数的确定影响很小, 所以本文在设计速率调节器时未考虑 $Sat_B\{x\}$ 的影响, 因此网络动态队列模型可以简化成

一个积分环节。设 n 条虚连接中, 最大传输延迟 $\tau_{max} = \tau$ 。由于传输时延和带宽波动是影响网络性能的主要因素, 考虑在 n 条虚连接都处于最劣环境下, 即 $\tau_i = \tau_{max} (i=1, 2, \dots, n)$, 设计控制器, 若系统仍能稳定, 则可保证系统具有较强的鲁棒性。

3 控制器设计

本文为实现将队列长度控制到给定的范围之内, 尽量抑制带宽波动带来的干扰, 控制器的设计主要包括三部分, 首先根据队列静态模型设计稳定 PID (Proportional, Integral, Derivative) 控制器; 其次, 由于动态带宽不能提前直接得到, 我们通过构造虚拟缓冲区的方法提取出可用带宽的信息; 最后, 通过加入前馈环节来减小带宽波动对队列长度的影响。其总体结构图如图2所示。

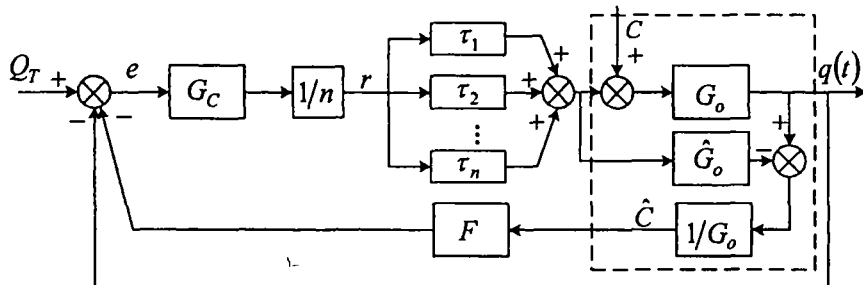


图2 控制结构图

令 $e(t) = q_T - q(t)$, 控制器取为 PID 形式

$$r(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

结合式(1)、图2及假设条件可得系统频域开环传递函数:

$$G(s) = (k_p + K_I \frac{1}{s} + k_{Ds}) \frac{1}{s} e^{-n\tau}$$

易得系统的微分方程形式

$$\ddot{e}(t) + k_p \dot{e}(t - \tau) + k_i e(t - \tau) + k_d \ddot{e}(t - \tau) = 0 \quad (3)$$

令 $t = \tau\xi$, 归一化后得到以 ξ 为变量的闭环方程

$$\ddot{e}(\xi) + k_p \dot{e}(\xi - 1) + k_i e(\xi - 1) + k_d \ddot{e}(\xi - 1) = 0 \quad (4)$$

其特征方程为

$$s^2 e' + as + b + cs^2 = 0 \quad (5)$$

其中 $a = \tau k_p, b = \tau^2 k_i, c = k_d$

引理 (Pontryagin 判据)^[11] 考虑指数多项式 $H(s) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M b_{lm} s^l (e^s)^m = 0$, 首项为 $b_{LM} s^L (e^s)^M$, 令 $F(\omega) = \text{Re } H(j\omega), G(\omega) = \text{Im } H(j\omega)$ 。方程 $H(s) = 0$ 所有根落在 s 左半平面(所有根均具有负实部)的充要条件为:

1) 在区间 $[-2k\pi + \varepsilon, 2k\pi + \varepsilon]$ 内, $G(\omega)$ (或 $F(\omega)$) 具有 $4kM + L$ 个实数根, k 为正整数, ε 为一个合适的常数。
2) 对于 $G(\omega) = 0$ (或 $F(\omega) = 0$) 的每一个根 ω_i , 满足 $F(\omega_i) > 0$ (或 $-F(\omega_i)G(\omega_i) > 0$)

$$G(\omega_i) > 0 \text{ (或 } -F(\omega_i)G(\omega_i) > 0)$$

为讨论方便, 我们做如下处理:

$$\text{令 } e(t) = q_T - q(t) \quad (4)$$

将控制器取为 PID 形式

$$r(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

由式(3)、(4)可得

$$\ddot{e}(t) + k_p \dot{e}(t - \tau) + k_i e(t - \tau) + k_d \ddot{e}(t - \tau) = 0 \quad (6)$$

进而, 若令 $t = \tau\xi$, 归一化后得到以 ξ 为变量的闭环方程

$$\ddot{e}(\xi) + k_p \dot{e}(\xi - 1) + k_i e(\xi - 1) + k_d \ddot{e}(\xi - 1) = 0 \quad (7)$$

其特征方程为

$$s^2 e' + as + b + cs^2 = 0 \quad (8)$$

其中 $a = \tau k_p, b = \tau^2 k_i, c = k_d$

设方程 $a = \omega \sin \omega$ 在区间 $(0, \frac{\pi}{2}), (\frac{\pi}{2}, \pi)$ 的根为 ω_{01}, ω_{02} 。

我们可得定理:

定理 如式(5)所示系统, 在控制器(2)作用下, 闭环系统稳定的充分条件为 PID 参数满足如下约束条件

$$0 < a < \frac{\pi}{2}, 0 < c < -\cos \omega_{02}, 0 < b < \omega_{01}^2 (\cos \omega_{01} + c)$$

其中, $a, b, c, \cos \omega_{01}, \cos \omega_{02}$ 为前面定义的参数。

证明:由式(8)可知 $L=2, M=1$

$$\text{令 } H(s) = s^2 e' + as + b + cs^2, F(\omega) = \text{Re } H(j\omega) = -\omega^2 \cos\omega - c\omega^2 + b$$

$$G(\omega) = \text{Im}(j\omega) = -\omega^2 \sin\omega + a\omega$$

下面分两步证明按照定理确定参数可以满足引理的两个条件。首先分析引理中的条件1。

令 $G(\omega) = 0$, 即 $\omega(a - \omega \sin\omega) = 0$, 其根由 $\omega = 0$ 和 $a = \omega \sin\omega$ 的根组成。若选取 $0 < a < \frac{\pi}{2}, \epsilon = \frac{\pi}{2}$, 易知方程 $G(\omega) = 0$ 在区间 $[-2\pi + \epsilon, 2\pi + \epsilon]$ 内存在5个根, 分别位于区间 $[-\pi, -\frac{\pi}{2}], [-\frac{\pi}{2}, 0], [0, \frac{\pi}{2}], [\frac{\pi}{2}, \pi], [2\pi, \frac{5\pi}{2}]$ 之内, 再加上0根, 在 $k=1$ 时, $4kM+L=6$, 共有6个根。由于 ω 每增加 2π 个长度, 函数 $\omega \sin\omega - a$ 过一次零点, 则对于 $0 < a < \frac{\pi}{2}, k$ 每增加1, $\omega \sin\omega$ 与 a 的交点增加4, 即在区间 $[-2k\pi + \epsilon, 2k\pi + \epsilon]$ 内 $G(\omega)$ 存在 $4kM+L$ 个实数根。因此, 选取 $0 < a < \frac{\pi}{2}, \epsilon = \frac{\pi}{2}$ 可满足 Pontryagin 判据中的条件1。

其次讨论引理中的条件2。为方便分析, 将 $F(\omega), G(\omega)$ 作如下变形:

$$F(\omega) = \omega^2 \cos\omega + c\omega^2 - b$$

$$G(\omega) = \omega^2 \sin\omega - a\omega$$

而不会影响对不等式 $F(\omega_{k1})G(\omega_{k1}) > 0$ 的讨论。

所以

$$F(\omega)G(\omega) = (\omega^2 \cos\omega + c\omega^2 - b)(\omega^2 \sin\omega - a\omega)$$

将 $\omega = 0$ 代入上式, 可得 $F(\omega)G(\omega) = ab$ 。由于 $a > 0, b > 0$, 因此

$$F(\omega)G(\omega) > 0, (\omega = 0)$$

由条件1的验证过程可知 $G(\omega) = 0$ 的非零根分别位于 $[-2k\pi, -\pi, -2k\pi - \frac{\pi}{2}], [-2k\pi - \frac{\pi}{2}, -2k\pi], [2k\pi, 2k\pi + \frac{\pi}{2}], [2k\pi + \frac{\pi}{2}, 2k\pi + \pi]$ 内。且 $a = \omega \sin\omega$, 则 $G(\omega) = \omega^2 \cos\omega + \omega \sin\omega$

$$\text{定义函数 } g(\omega) = \omega \sin\omega - a$$

显然 $g(\omega)$ 为 ω 的偶函数, $G(\omega) = 0$ 的根具有对称性, 因此可以只讨论位于正半轴根的情况。 $G(\omega) = 0$ 的非零正根分别位于区间 $[2k\pi, 2k\pi + \frac{\pi}{2}], [2k\pi + \frac{\pi}{2}, 2k\pi + \pi]$ 内, 记为 $\omega_{k1}, \omega_{k2} (k=0, 1, 2, \dots)$ 。

考虑 $\omega_{k1} \in [2k\pi, 2k\pi + \frac{\pi}{2}]$ 时的情况, 易知

$$G(\omega_{k1}) = \omega_{k1}(\omega_{k1} \cos\omega_{k1} + \sin\omega_{k1}) > 0$$

$$\text{定义 } f(\omega_{k1}) = \omega_{k1}^2 \cos\omega_{k1} + c\omega_{k1}^2 = \omega_{k1}^2 (\cos\omega_{k1} + c)$$

由于 $\sin\omega_{k1} = \frac{a}{\omega_{k1}} > 0, \cos\omega_{k1} > 0$, 因此 $f(\omega_{k1}) = \omega_{k1}^2 (\cos\omega_{k1} + c)$ 是 ω_{k1} 的增函数, 进而是 k 的增函数, $F(\omega_{k1})$ 存在极小值 $F(\omega_{01})$ 。

$$\text{由 } c > 0, b < \omega_{01}^2 (\cos\omega_{01} + c) \text{ 可得 } F(\omega_{01})G(\omega_{01}) > 0。$$

下面考虑 $\omega_{k2} \in [2k\pi + \frac{\pi}{2}, 2k\pi + \pi]$ 时的情况:

$$\text{易得 } G(\omega) = 2\omega \cos\omega - \omega^2 \sin\omega + \sin\omega$$

又 $\omega_{k2} \sin\omega_{k2} = a$ 且 $\omega_{k2} \in [2k\pi + \frac{\pi}{2}, 2k\pi + \pi]$, 可知 $G(\omega) < 0$ 。即 $G(\omega_{k2})$ 是 ω_{k2} 的减函数, 进而是 k 的减函数, $G(\omega_{k2})$ 存在极大值 $G(\omega_{02})$ 。

$$\text{由 } \omega_{02} \in [\frac{\pi}{2}, \pi], \omega \sin\omega = a \in (0, \frac{\pi}{2}), \text{ 由图解法显而易见 } G(\omega_{02}) < 0$$

$F(\omega_{k2})$ 在讨论区间内是 ω_{k2} 的减函数, 进而是 k 的减函数, F

(ω_{k2}) 存在极大值 $F(\omega_{02})$ 。又 $c < -\cos\omega_{02}, b > 0$, 则

$$F(\omega_{02}) = \omega_{02}^2 \cos\omega_{02} + c\omega_{02}^2 - b < 0$$

$$F(\omega_{k2}) = \omega_{k2}^2 \cos\omega_{k2} + c\omega_{k2}^2 - b < 0$$

所以 $F(\omega_{k2})G(\omega_{k2}) > 0$ 证毕。

至此得出采用式(5)控制器结构, 取 $0 < a < \frac{\pi}{2}$, 使系统(3)稳定, 应满足的参数统一约束条件。则控制器时域差分方程形式为:

$$u(k) = k_p e(k) = k_I T \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{k_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (9)$$

依据定理和式(5)可以很容易地确定 PID 系数。

构造虚拟交换节点缓冲区。在交换节点处设置计数器, 分别记录所有到达和服务完成后离开该节点的信元数, 其差值 ΔQ 即表征了在过去的一个周期内队列长度的变化。同时在每条 VC 中的 RM 信元到达时读取 CCR (Current Cell Rate) 值, 其和 ΣCC 可以认为是该时刻的输入速率, 则 $\dot{C} = \Sigma CCR - \frac{\Delta Q}{T}$, 这个过程为图2虚线框内部分。

在队列控制中, 系统的闭环稳定固然重要, 但是系统在动态环境(可用带宽波动)下, 队列长度是否仍能保持在给定范围之内也不容忽视, 因为它直接反映了交换服务质量^[12]。为了尽量减小带宽波动带给输出队列的影响, 利用提取到的带宽信息通过一个前馈网络来抑制干扰。

此时 \dot{C} 到队列输出 Q 的关系可以写成频域的形式

$$q_c(s) = [C(s) - (q_c(s) + F(s)C(s))G_c(s)e^{-\tau}]G_0$$

$$q_c(s) = \frac{[1 - F(s)G_c(s)e^{-\tau}]G_0(s)}{1 + G_0(s)G_c(s)e^{-\tau}} \quad (10)$$

若取 $F(s) = \frac{1}{G_c(s)e^{-\tau}}$ 则可以完全抵消带宽对输出的影响, 由于分子将出现 $e^{-\tau}$, 即时超现象, 表现在时域上需要对 C 进行 d 部预测值 ($d = \tau/T$), 在这里, 为了实现方便, 采用曲线外推法可以得到 $C(n+d|n)$ (n 时刻对 $n+d$ 时刻的预测值)。为简便算法, 减少计算量, 采用两步外推的方法, 即将 n 时刻前的 d 个时间间隔均分为两段, 用每段的变化率代替下两个 $d/2$ 时间间隔的变化趋势, 以滑动时窗的方式实现外推预测。由于 G_c 为设计的控制器, 其形式可以精确得到。因此若 $C(n+d|n)$ 与实际带宽值越接近, 则控制效果越好。需要指出的是, 由于 C 一定程度的随机性, 造成预测上的不精确, 因此实际中不能达到理想状态, 从仿真结果看也不能实现对带宽波动的完全抑制, 但是在相同带宽波动的情况下, 队列波动幅度明显减小。

4 仿真

在仿真部分我们选取的参数如下: 期望队列长度 $Q_T = 1000$ cell, 最大传输时延 $\tau_{\max} = 40$ ms, 按定理选择控制器参数 $k_P = 16, k_I = 71, k_D = 0.3$, 静态时网络可用资源设为 125000 cell/s, 交换机内队列长度如图3所示。在可用带宽波动的情况下, 假设带宽受噪声干扰, 最大幅度取为可用带宽的 $1/5$, 则动态队列在时间段 $3 \sim 6$ s 内的变化如图4所示(虚线表示平均队列长度)。可见交换节点内等待服务的队列长度稳定在一定范围之内, 平均队列长度接近期望的队列长度。若采用前馈装置来抑制带宽波动对队列长度的影响, 仿真图如图5所示, 与图4相比, 队列波动幅度明显减小, 动态性能得到明显的改善, 取得较好的控制效果。

(下转第65页)

Agent 将接收到的用户名和口令与 MIB 中的变量进行比较判断并将结果回复给 Web Server,从而实现了用户的认证过程。

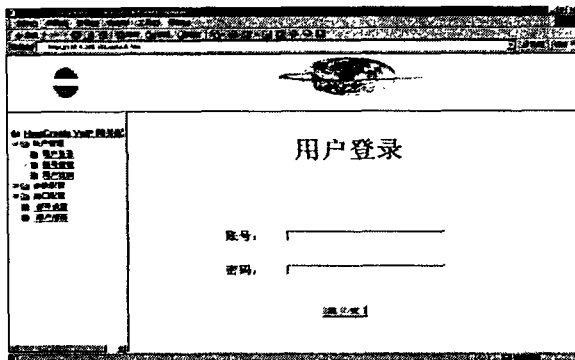


图5 基于 EWBMS 模型的 VoIP 网关的管理软件 GUI

结束语 随着嵌入式网络设备的大量出现,EWBMS 的

研究具有极重要的理论和实用意义。我们以 SNMP 作为 EWBMS 方案的网管协议,实现了与传统 SNMP 设备的平滑过渡和无缝集成。最后作者结合实际项目并利用业界主流软硬件平台,将 EWBMS 模型商品化,不仅给出了 EWBMS 的实例,还对其可行性进行了有力的验证。相关理论可推广至所有的嵌入式网络设备的网管系统的开发。

参考文献

- 1 岑贤道,安常青. 网络管理协议与应用开发[M]. 北京: 清华大学出版社,1998
- 2 杨家海,任宪坤,王沛瑜. 网络管理与实现技术[M]. 北京: 清华大学出版社,2000
- 3 DAVID Z(美). SNMPV3与网络管理[M]. 北京: 人民邮电出版社,2000
- 4 STALLINGS W(美) SNMP 网络管理[M]. 北京: 中国电力出版社,2001
- 5 周明天,汪文勇. TCP/IP 网络原理与技术[M]. 北京: 清华大学出版社,1993
- 6 郭军. 网络管理[M]. 北京: 北京邮电大学出版社,2001

(上接第55页)

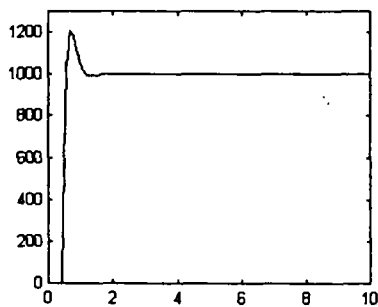


图3 静态队列长度

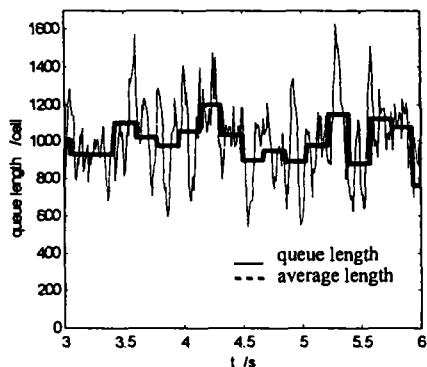


图4 无前馈动态队列长度

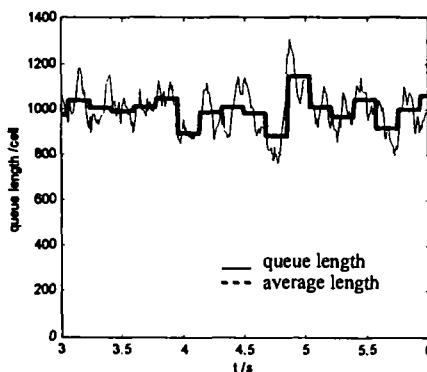


图5 有前馈动态队列长度

结论 本文针对 ATM 网络单瓶颈节点模型,提出用 PID 控制算法解决 ATM 网络中的拥塞问题,给出保证系统稳定对控制参数的约束条件,通过设置虚队列的方法提取出带宽波动信息,同时为了抑制带宽波动对交换机队列长度的影响,根据确定的 PID 控制器,设置前馈环节,该算法简单,易于实现。仿真结果表明控制效果得到明显改善,保证了网络服务质量。

参考文献

- 1 Traffic management specification version 4.1, ATM Forum, AF-TM-0121.000, 1999
- 2 Jain R, Kalyanaraman S, Viswanathan S, Goyal R. A sample switch algorithm, ATM Forum 95-0178R1, 1995
- 3 Tsang D, Wong W. A new rate-based switch algorithm for ABR traffic to achieve Max-Min fairness with analytical approximation and delay adjustment, IEEE Proc. Infocom, 1996. 1174~1181
- 4 Arulambalam A, Chen X, Ansiri N. Allocating fair rates for available bit rate service in ATM networks. IEEE Communication Mag., 1996,34(11):92~100
- 5 Kalyanaraman S, et al. The ERICA switch algorithm for ABR traffic management in ATM networks. IEEE/ACM Transactions on networking, 2000,8(1):87~98
- 6 Saverio Masxolo Congestion control in high-speed communication networks using the Smith principle[J]. Automatica 1999.35:1921~1935
- 7 Fei Xiang, He Xiaoyan, Luo junzhou. Fuzzy neural network based traffic prediction and congestion control in high speed networks [J]. Journal of Computer Science and Technology. 2000,15(2): 144~149
- 8 Keshav S. A Control-theoretic Approach to flow control [C]. In: proc. of ACM SIGCOMM'91 Zurich, 1991. 3~15
- 9 Kolarov A, Rammamurthy G. 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
- 10 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 networking, 1993,1(6):693~707
- 11 Bhatt S J, Hsu C S. Stability criteria for second-order dynamical systems with time lag. J. Appl. Mech. 1966. 113~118
- 12 Vandalore B, Jain R, Goyal R, Fahmy S. Dynamic queue control functions for ATM ABR switch schemes design and analysis. Computer Networks, 1999, 31:1935~1949