

# 计算机高速网络的拥塞控制：一种基于速率的 PI 方法

谭连生, 尹 敏

(华中师范大学计算机科学系, 湖北武汉 430079)

**摘 要:** 本文运用现代控制理论和方法, 针对计算机高速互联网中最大服务交通流即能控交通流的调节问题, 提出了一种基于速率的具有比例加积分 (PI) 控制器结构的拥塞控制理论和方法. 在单个节点的交通流的模型基础上, 运用控制理论中系统稳定性分析方法, 讨论如何利用信终端节点缓冲占有量的比例加积分的反馈形式来调节信源节点的能控交通流的输入速率, 从而使被控网络节点的缓冲占有量趋于稳定; 同时使被控网络节点的稳定队列长度逼近指定的门限值. 仿真结果显示, 在所设计的 PI 控制方案下, 网络的有关性能较好.

**关键词:** 计算机通讯网络; 拥塞控制; PI 控制器; 缓冲占有量

**中图分类号:** TP3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08-1138-04

## A Rate-Based PI Congestion Controller for High-Speed Computer Communication Networks

TAN Lian-sheng, YIN Min

(Department of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract:** With regard to the flow regulation of the best-effort traffic, i. e., the controllable traffic in high-speed computer communication networks, the present paper proposes a novel control theoretic approach that designs a proportional-plus-integrative (PI) controller for congestion controlling. Based on the traffic model of a single node and on system stability criterion, it is shown that the PI controller can regulate the source rate on the basis of the knowledge of buffer occupancy of the destination node in such a manner that (1) the congestion-controlled network is asymptotically stable without oscillation in terms of the buffer occupancy of the destination node; and (2) the steady value of queue length is consistent with the specified threshold value. Simulations show good performance of such controlled networks.

**Key words:** computer communication networks; congestion control; PI controller; buffer occupancy

### 1 引言

随着网络的日益普及, 网上的业务尤其是多媒体业务日益增多, 不断增长的需求会对网络的拓扑结构和负荷能力提出挑战. 拥塞控制 (congestion control) 也因对网络带宽要求的增长及网络应用的集中而显得十分重要. 在高速网中, 人们愈来愈期望数据传输能尽可能迅速安全地进行, 为此必须采取一定的策略来避免和控制网络拥塞, 以确保网络的通畅和保证所需的服务质量. 这些策略便是通常所说的避免拥塞控制策略.

简单地讲, 在某一时刻当网络中某一资源 (信号) 的到达量超过了该资源在相关网络节点的承载量 (可运输量) 时, 则称该资源在该节点在该时间内产生了拥塞. 由于拥塞产生的原因众多, 因而解决方案也因之而异, 但目前较常用的方案为基于速率的拥塞控制方案. 典型的拥塞控制技术包括前向显式拥塞通知 (the forward explicit congestion notification, FECN) 和后向显式拥塞通知 (the backward explicit congestion notification,

BECN). 这两种方案在低速网络中使用效果良好, 但在高速网络中不能彻底解决系统不稳定即抖动 (oscillation) 的问题. 网络节点处动态缓冲占有量如果抖动过大, 则容易丢失数据包, 因而系统的稳定性对拥塞控制方案十分重要<sup>[1]</sup>.

为了解决 TCP/IP 网络中的抖动问题, 文[1]提出了使用控制理论的思想, 并且文[2-3]对此做了进一步地阐述. 但 these 方法通常都要求依据不同的网络环境变换反馈控制参数以确保系统的稳定性, 这对于网络的硬件实现势必带来一定的不便. 文[4]又提出了逐跳的基于速率的流控方案 (the hop-by-hop rate-based flow control scheme) 来控制虚拟链路 (virtual link) 交换节点到虚拟链路带宽 (bandwidth) 的分配. 在文[5]中 Smith 预测控制定理被运用到 ATM 网络中用来设计可资使用的位速率 (available-bit-rate, ABR) 的输入速率. 文[6-7]针对恒定的位速率 (constant-bit-rate, CBR) 单个节点的情况提出了两种线性反馈拥塞控制算法. 文献[8]提出了单控制交通源与其他信源共享瓶颈节点的情况下, 运用 H 控制的理论来设计

收稿日期: 2001-10-19; 修回日期: 2002-04-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60174043); 国家留学基金回国科研资助费的资助.

拥塞控制器的思路和方法.

本文将运用现代控制理论和方法,针对计算机高速互联网中最大服务交通流即能控交通流的调节问题,提出了一种基于速率的具有比例加积分(PI)控制器结构的拥塞控制理论和方法.在单个节点的交通流的模型基础上,运用控制理论中系统稳定性分析方法,讨论如何利用信终端节点的缓冲占有量的比例加积分的反馈形式来调节信源节点的能控交通流的输入速率,从而使(1)被控网络节点的缓冲占有量趋于稳定;(2)被控网络节点的稳定队列长度逼近指定的门限值.

### 2 网络模型

数字通讯网络通常由一系列局域分布的信源、信(终)端节点组成.由信源端激发的数据包通过一系列中间节点被输送到信终端节点.为了方便起见,我们考虑仅包括一对信源信终端节点的网络模型(如图 1 示).假设交换(瓶颈)节点的缓冲容量(buffer size)为  $K$ ,即可用于存储到达的最大数据包的数量,向外发送数据包的速率为  $w$ .

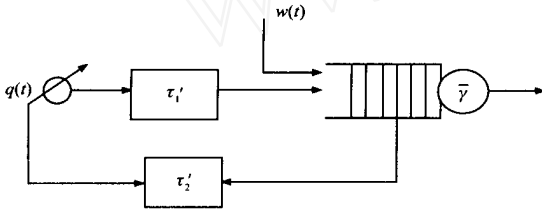


图 1 信源、信终端节点系统模型

网络存在两条虚拟链路(VC),其一为不能控交通流的 VC,即保证交通流的 VC,另一为可控交通流的 VC,即最大努力服务交通流的 VC,前者不会在信源节点处产生拥塞,而后者仅当网络中无拥塞时方可传送.对于可控交通流的 VC,存在两种时延:  $\tau_1$  表示信源节点到交换节点的输入延迟,  $\tau_2$  表示交换节点到信源节点的反馈延迟.

假定不能控交通流的传输速率为  $w(t)$ ,信源节点的可控交通传输速率为  $q(t)$ .  $q(t)$  将依据每  $T$  秒钟反馈到被控信源节点的缓冲占有量  $x(t)$  来进行调节.那么对于如图 1 所示的网络模型,其动态行为可描述为如下非线性、时滞微分方程<sup>[1]</sup>:

$$\dot{x}(t) = Sat_K\{q(t - \tau_1) + w(t) - \bar{y}\}, \quad (1)$$

其中

$$Sat_K\{x\} = \begin{cases} K, & x > K \\ x, & 0 \leq x \leq K \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

若对上述系统施加反馈控制那么系统的输入函数将会产生一个  $\tau = \tau_1 + \tau_2$  的游程延迟(roundtrip delay).

假设信源节点每隔  $T$  秒发送数据包,且  $\tau_1 = \tau_1 T + \dots$ ,其中  $n$  为整数,  $0 < \tau_1 < T$ ,那么可将方程(1)离散化为

$$x(n+1) = Sat_K\{x(n) + (\tau_1 - \tau_1/T) + d(n) - \mu\} \quad (2)$$

其中,  $K = (T+1)K$ ,  $d(n) = Tq(nT)$  表示在第  $n$  个周期内从信源节点流向交换节点的数据包数,  $d(n) = Tw(nT)$  表示第  $n$  个周期内从不能控交通流向交换节点的数据包数,  $\mu = T\bar{y}$  表

示在周期  $T$  内从交换节点向外发射的数据包数.

若考虑输入函数的前向路径延迟为  $T$  的整数,即  $\tau_1 = T$  (当  $\tau_1 = 0$  时,我们可以适当增加一些延迟,使得  $\tau_1$  为  $T$  的整数倍),此时式(2)可变为:

$$x(n+1) = Sat_K\{x(n) + (\tau_1 - T) + d(n) - \mu\} \quad (3)$$

### 3 PI 反馈拥塞控制的思路及计算

人们希望在交换节点产生拥塞之前,设计控制器控制信源节点发射数据包的速率,以避免产生拥塞.为此我们可以去掉<sup>[2]</sup>(3)的非线性约束,代之以考虑如下线性方程

$$x(n+1) = x(n) + (\tau_1 - T) + d(n) - \mu \quad (4)$$

对(4)施行  $z$  变换,有

$$(z-1)X(z) = z^{-1}(z) + D(z) - \frac{\mu z}{z-1} \quad (5)$$

上式中,记  $X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n}$ ,  $(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (n)z^{-n}$ ,  $D(z) = \sum_{n=0}^{\infty} d(n)z^{-n}$ .在信源节点的交通控制器设计为如下的 PI 反馈控制器的形式:

$$\begin{aligned} (n) = & \mu_1 - [k_p(x(n-2) - x_0) + k_I T(x(n-2) - x_0) \\ & + \sum_{j=n-1}^{\infty} (j)] = \mu_1 - [ (x(n-2) - x_0) + \\ & \cdot \sum_{j=1}^{\infty} (n-j) ], \end{aligned} \quad (6)$$

以上,  $\tau_1 = \tau_1 + \tau_2$ ,  $\tau_2$  为标准化的反馈延迟,即  $\tau_2 = \tau_2 T$ ,  $x_0$  为缓冲占有量的门限值(threshold)表明拥塞的程度,  $\mu_1$  为信源节点允许向交换节点发射数据包的最大包数,记  $\mu_1 = k_p + k_I T$ ,  $k_p, k_I$  分别为比例和积分反馈系数,根据系统的稳定性待定.

对(6)作  $z$  变换得到

$$(z) = \frac{\mu_1 z}{z-1} - [ (z^{-2}X(z) - \frac{x_0 z}{z-1}) + (z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-n}) ] (z) ]$$

注意到  $z^{-1} + \dots + z^{-n} = \frac{1-z^{-n}}{z(1-z)}$ ,整理以后有

$$[1 + \frac{(1-z^{-n})}{z(1-z)}] (z) = \frac{\mu_1 z}{z-1} - z^{-2}X(z) + \frac{\alpha x_0 z}{z-1} \quad (7)$$

由式(5)得

$$(z) = z^{-1}(z-1)X(z) - z^{-1}[D(z) - \frac{\mu z}{z-1}] \quad (8)$$

将(8)代入(7)得

$$\begin{aligned} [1 + \frac{(1-z^{-n})}{(1-z)z}] [z^{-1}(z-1)X(z) - z^{-1}(D(z) - \frac{\mu z}{z-1})] \\ = \frac{\mu z}{z-1} - \alpha z^{-2}X(z) + \frac{\alpha x_0 z}{z-1} \end{aligned}$$

整理以后可得

$$\begin{aligned} (z)X(z) = \frac{\mu_1 z^{-2+1}}{z-1} + \frac{\alpha x_0 z^{-2+1}}{z-1} + [1 + \frac{(1-z^{-n})}{(1-z)z}] \\ \cdot (D(z) - \frac{\mu z}{z-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

上式中,已记

$$(z) = z(z-1)[1 + (z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-n})] + \dots = z(z$$

$$-1) [1 + \frac{(1-z)}{z(1-z)}] + \dots$$

(z)即为闭环控制系统(4),(6)的特征方程,决定系统的稳定性.

考虑特殊情况  $\alpha = 0$  时,有

$$(z) = z [z - (1 - \alpha)].$$

若令  $(z) = 0$ , 则

$$z = 0, (\text{重根}) \text{ 或者 } z = 1 - \alpha$$

当  $|1 - \alpha| < 1$  即  $0 < \alpha < 2$  成立时,  $(z) = 0$  的根均在单位圆以内,则系统处于稳定状态.

### 4 仿真及性能评估

由于设计的拥塞控制器是随时间来调整信源节点的传输速率,因此主要考虑分析网络的动态行为.一般动态缓冲占有量的响应时间和稳定性等作为性能分析中主要考虑的动态行为指标.

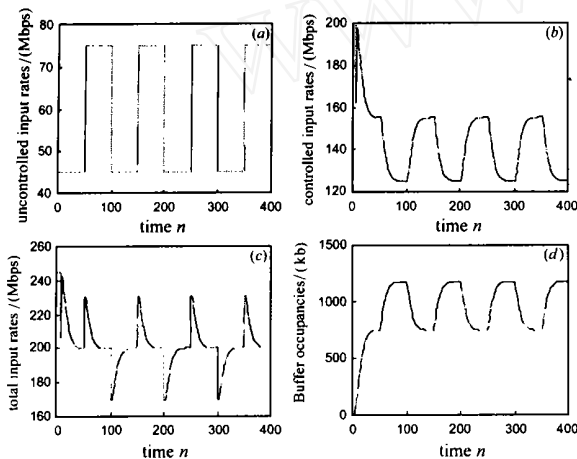


图2  $\alpha = 0.07$  时单个可控信源节点的动态响应

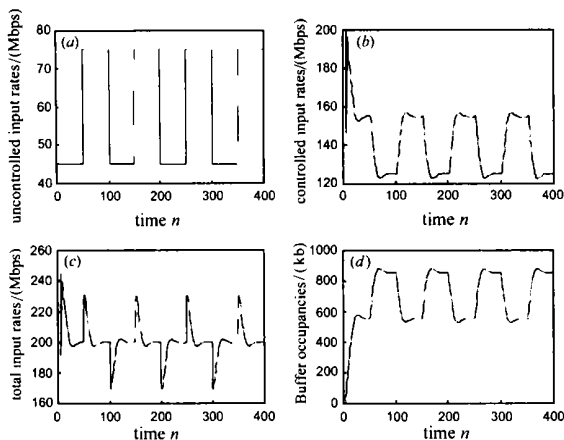


图3  $\alpha = 0.099$  时单个可控信源节点的动态响应

图2-5显示了按照系统模型(4),运用 Matlab 编制程序,对所建立的拥塞控制方案(6),当  $\alpha$  取不同的值即不同拥塞控制方案下网络的动态行为进行的仿真.假设交换节点发射数据包速率为  $\mu = 200$  Mbps,且从信源节点到交换节点的最大传输速率与交换节点的传输速率相同.采样时间  $T = 1$  msec,

拥塞程度参数  $x_0 = 100$  cells, 路径时延  $\tau_1 = 3$  msec, 反馈时延  $\tau_2 = 2$  msec, 那么游程延迟为  $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 5$  msec. 图2与图3中的取值均在稳定范围内,图4与图5中  $\alpha$  取值为非稳定范围,在图2-5中,分图 a 为不能控交通流的输入速率,仿真中假定为已知的矩形波,分图 b 为能控交通流的输入速率,分图 c 为总的输入速率,分图 d 即为缓冲占有量,其中能控交通流的输入速率和缓冲占有量依据公式(4)和(6)仿真,总的输入速率即为不能控交通流和能控交通流的输入速率之和.

从图2-3中可知,在时间区间  $[0, \tau_1]$  内,由信源节点按最大发射速率发射到交换节点的数据包并未到达交换节点,交换节点主要是将由不能控交通流中的数据包包发射到网络中,在时间区间  $[\tau_1, \tau_1 + \tau_2]$  内,由于交换节点到信源节点的反馈信息并未到达信源节点,因此信源节点仍然按照最大发射速率向交换节点发射数据包,而此时交换节点中除从不能控交通流得到的数据包外,还有能控交通流得到的数据包,交换节点中开始有数据包积压,即开始占有缓冲.一个游程延迟周期后,反馈信息逐渐开始对信源节点的发射速率进行调节,并使得交换节点的缓冲占有量逐渐增加趋于稳定.

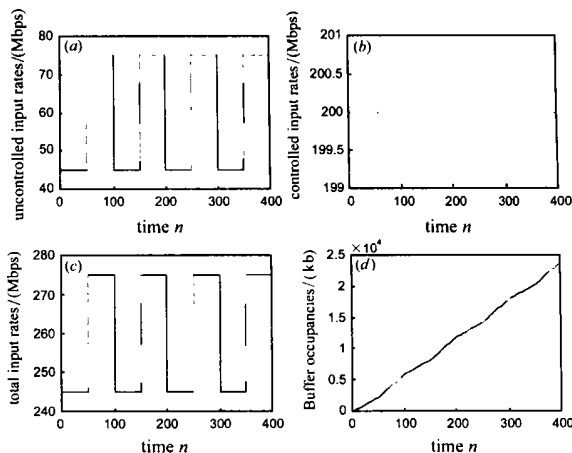


图4  $\alpha = -1.9$  时单个可控信源节点的动态响应

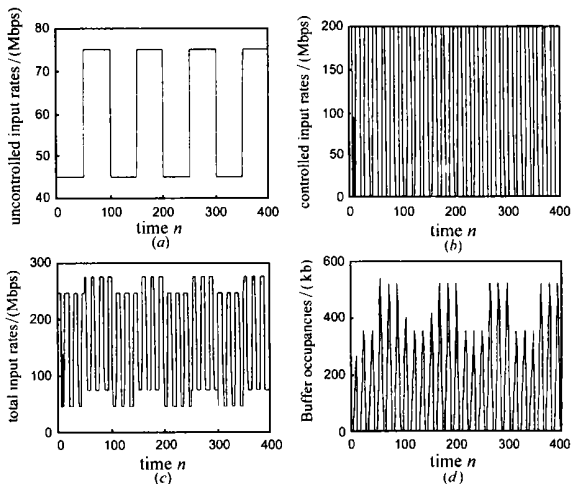


图5  $\alpha = 3$  时单个可控信源节点的动态响应  
一般说来<sup>[3]</sup>,当受控网络终端节点的缓冲占有量的响应

时间较短,则系统越容易趋于稳定,因而不易丢失数据包;动态缓冲占有量越小,说明网络的吞吐率(throughput)越大,因而网络的性能越好.将两图比较后,可发现图 3 和图 2 动态缓冲占有量趋于稳定的响应时间都很短,但图 3 的动态缓冲占有量更小,系统的性能更好,因而  $\alpha = 0.099$  的控制方案较好.而图 4 中,由于取值在稳定范围以外,能控交通流的输入速率始终保持在 200Mbps,没有得到调节,交换节点的缓冲占有量并不能趋于稳定,缓冲占有量将随时间的增加而无限止地增加,最终导致缓冲外溢(overflow),网络将会丢失数据包,此为不宜采用的拥塞控制方案.图 5 中,由于取值也在稳定范围以外,能控交通流的输入速率变化很大,使得缓冲占有量的抖动严重,最终也会导致数据包的丢失,也为不宜采用的拥塞控制方案.

#### 参考文献:

- [ 1 ] L Benmohamed, S M Meekov. Feedback control of congestion in packet switching networks: the case of a single congested node [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993:693 - 707.
- [ 2 ] L Benmohamed, S M Meekov. Feedback control of congestion in packet switching networks: the case of multiple congested nodes [A]. Proc Am Contr Conf [C]. Baltimore, MD: June 1994.
- [ 3 ] A Kalarov, G Ramamurthy. A control theoretic approach to the design of closed loop rate-based flow control for high speed ATM networks [A]. Proc. IEEE Infocom '97[C]. Kobe Japan: Apr. 1997.
- [ 4 ] H Zhang, et al. A hop-by-hop flow controller for a virtual path [J]. Computer Networks, 32:99 - 119.
- [ 5 ] S Mascolo. Smith's principle for congestion control in high-speed data networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(2): 358 - 364.
- [ 6 ] R Izmilov. Adaptive feedback control algorithms for large data transfer in high-speed networks [J]. IEEE Trans Automat. Contr, 1995, 40: 1469 - 1471.
- [ 7 ] R Izmilov. Analysis and optimization of feedback control algorithms for data transfer in high-speed networks [J]. SIAM J Contr Optim, 1996, 34(5): 1767 - 1780.
- [ 8 ] Z Pan, et al. Robust adaptive flow control in high speed telecommunication networks [A]. in Proc 35<sup>th</sup> Conf Decision Contr [C]. Kobe Japan: Dec. 1996.
- [ 9 ] Liansheng Tan, et al. Analysis of rate-based congestion control in ATM switching networks [A]. Fourth International ICSC symposium Soft Computing and Intelligent Systems for Industry [C]. Paisley, Scotland, UK: June, 2001, CD-ROM, ISBN 3-906454-27-4. 26-29.
- [ 10 ] Liansheng Tan, A C Pugh. A novel method to determine the finite and infinite frequency structure of a rational matrix [J]. IMA Journal of Mathematical Control and Information, 2001, 18: 129 - 151.
- [ 11 ] A C Pugh, Liansheng Tan. A generalized chain-scattering representation and its algebraic system properties [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(5): 1002 - 1007.
- [ 12 ] Liansheng Tan, A C Pugh. A note on the solution of regular PMDs [J]. International Journal of Control, 1999, 72(14): 1235 - 1248.
- [ 13 ] Liansheng Tan. Structural and Behavioral Analyses to linear multivariable control systems [D]. UK: Loughborough University, 1999.

#### 作者简介:



cn.

谭连生 男,博士,教授,1965年12月出生,于湖南省宁乡县.1996年至1999年留学英国拉夫堡大学,1999年获英国拉夫堡大学哲学(学)博士学位.2001年以博士后和访问教授的身份受聘于加拿大渥太华大学信息技术与工程学院从事网络理论与工程的研究.主要研究方向:计算机网络、智能控制等. Email: L. Tan @ccnu. edu.



尹敏 女,1978年3月出生于湖北汉川,2000年毕业于华中师范大学计算机科学系,获得学士学位.现为华中师范大学计算机科学2000级硕士研究生,主要研究方向:计算机网络信号与控制. Email: yinmin78 @sohu. com.