

支持流媒体传输的模糊 PID 速率控制器

朱瑞军*, 王伟, 甄翠平

(大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 网络负载变化的随机性和往返延迟(RTT)的时变性,使得网络传输中存在严重的不确定性,极大地影响了流媒体的服务质量.为此利用模糊逻辑控制原理提出了一种支持流媒体传输的模糊 PID 速率控制器,有效地补偿了时变不确定性的影响,增强了闭环系统的稳定性和鲁棒性,最大化了网络利用率.模糊 PID 速率控制器,根据路由器队列长度计算出期望的端系统的发送速率,使得缓存区队列长度保持在目标长度附近,从而避免了网络路由器的拥塞发生.仿真结果表明模糊 PID 速率控制器可以有效地处理网络的时变性,避免了发送速率的剧烈波动,从而很好地保证了流媒体的服务质量.

关键词: 模糊 PID 速率控制器;流媒体;拥塞控制

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A

0 引言

目前,流媒体业务(如视频、音频)在 Internet 上的应用日益广泛.与传统的数据传输(如文件传输)相比,这种业务具有以下几方面的特点^[1~3]:

(1) 流媒体的平均码率较大,传输时间较长,因而要求有足够且稳定的网络带宽作保障.如 MPEG-1 码流需 1.5 Mbps 的带宽,即使 H.263 编码的视频也需要 28 kbps 以上的带宽.(2)流媒体是实时业务,对传输延迟有严格的要求.这是因为如果流媒体数据到达时间比播放时间晚,这些数据就变得无用甚至对播放效果有害.另外,流媒体对延迟抖动很敏感,由于流媒体的时间相关性很强,帧间的时间限制必须严格遵循,否则用户将明显感觉到视频的不连贯.(3)流媒体可以容忍一定的数据丢失,但分组丢失必须低于一定阈值,否则会引起流媒体的服务质量下降,甚至在严重情况下导致终端无法解码播放流媒体.然而,Internet 的资源(如可用带宽)是有限的,这些附加的要求可能导致网络产生严重的拥塞,从而造成缓存器溢出,传输延迟增大,分组丢失,服务质量(QoS)降低.因此要保证流媒体的服务质量,有效的拥塞控制

机制是非常必要的.

传输控制协议(TCP)是目前在 Internet 上应用最广泛的协议,但它是一种基于窗口的协议,会引起发送速率严重的波动,不适合流媒体的传输^[4].基于速率的控制方法允许端系统调节它们的发送速率来支持尽力服务,并且可以最大程度地利用网络资源,因此,它为流媒体在 Internet 上传输取得高的服务质量提供了有效的解决办法^[5].目前人们已经提出很多有效的速率控制方法来支持流媒体的传输.在文献[6、7]中,作者使用与 TCP 类似的加性增乘性减(AIMD)机制来调节源端的发送速率,即当网络中未发生拥塞时,发送速率以每个往返延迟(RTT)增加一个分组的速度增加;当发生拥塞时,发送速率减半.然而,这种简单的 AIMD 方式会引起发送速率的波动,影响流媒体的服务质量.在文献[8~10]中,作者提出了一种基于模型的控制方法,使用 TCP 吞吐量模型来计算传输流媒体的可用带宽,从而调节源端的发送速率.这种方法可以取得较高的网络利用率,但会导致发送速率严重的波动,造成网络吞吐量下降.总之,上述方法主要针对拥塞控制,

并没有考虑有效地利用网络资源,如带宽和用户缓存区.最近,人们提出利用网络流理论和控制理论方法设计支持流媒体传输的速率控制器.这种方法可以直接利用缓冲区队列长度来控制源端发送速率,同时考虑了网络延迟对排队长度的影响.在文献[11]中,作者针对存在不确定时变延迟的通信网络提出了一种流控制方法;在文献[12]中,作者利用经典控制理论提出了一种支持尽力服务流媒体传输的自适应 PI 速率控制算法.但这些方法并不能灵活地处理传输延迟时变,且网络负载随机变化,网络中存在不受控源的情况.文献[10]对上述同样的问题,利用离散 LQ 控制设计了流控制器.

本文利用模糊逻辑控制原理提出一种支持流媒体传输的模糊增益 PID 速率控制器,以补偿时变不确定性的影响,增强闭环系统的稳定性和鲁棒性.

1 网络模型和假设

本文考虑的数据交换网是由一定数目位置分布不同的源/目的节点组成.流媒体由源节点产生,并分组成为 IP 包,经过一系列的中间节点最后传输到目的节点.模糊增益 PID 速率控制器工作在路由器上,它根据路由器瞬时缓存队列长度计算出期望的源节点传输速率 $q'_i(t)$,并通过 IP 数据包和 ACK 数据包以窗口大小的形式通知源节点.源节点通过调节它当前窗口的大小(例如传输速率 $q_i(t)$)来提供尽力服务.与此同时网络中还存在不受控的保证服务流以速率 $v(t)$ 通过路由器传输数据.

根据上面的描述,图 1 中给出了有 N 个尽力流和一个保证传输质量流的 AQM 路由器队列模型. AQM 路由器利用有限的缓存空间存储到来的数据包,并以恒定的速率 $\bar{\mu}$ 输出数据包.路由器的缓存区分别被尽力服务流和保证传输质量流划分为两个逻辑队列,假定每个队列的服务都是按照先进先出(FIFO)的原则进行,且两个队列分享同一个链路带宽,保证传输质量流的队列比尽力服务流的队列优先权高.网络存在两种延迟:(1)从受控源节点 i 到路由器的时变前向延迟 $\tau_{fi}(t)$,包括传输延迟、排队延迟和传播延迟;(2)从路由

器到目的端与目的端到受控源节点 i 的时变反馈延迟 $\tau_{bi}(t)$,同样也包括传输延迟、排队延迟和传播延迟.因此,第 i 源节点的时变往返延迟为 $\tau_i(t) = \tau_{bi}(t) + \tau_{fi}(t)$.

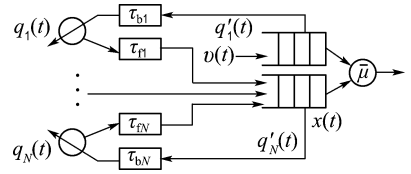


图 1 AQM 路由器队列模型

Fig. 1 Queue model of AQM router

由图 1 给出的 AQM 路由器队列模型可以得出,路由器缓存器队列长度的变化率等于所有的尽力服务流的输入速率与保证传输质量流的输入速率之和减去路由器服务速率,即

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^N q_i(t - \tau_i(t)) + v(t) - \bar{\mu} \quad (1)$$

2 模糊增益 PID 控制器设计

模糊增益 PID 算法是在 PID 算法的基础上,通过计算当前系统偏差和偏差的一阶微分,利用模糊规则进行模糊推理,查询模糊规则表进行参数的调整.它的结构简单,鲁棒性强.与文献[8]使用的经典控制理论方法相比,模糊逻辑控制方法不受被控对象模型的限制,而根据人工控制规则组织控制决策表,然后由该表决定控制量的大小,因此更适合复杂时变的网络系统.本文提出的模糊增益 PID 速率控制器可以取得路由器零队列偏移,并且可以避免缓存器溢出.每个受控源节点以最大的允许传输速率来发送数据流,因此能充分利用网络的剩余带宽.

设 x_0 为 AQM 路由器目标缓存队列长度,为路由器瞬时队列长度.根据瞬时缓存队列长度 $x(t)$,第 i 受控源节点的期望发送速率 $q'_i(t)$ 可由下面的 PID 控制算法得到:

$$q'_i(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

其中 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分增益, $e(t) = x_0 - x(t)$.

PID 速率控制器的增益通过模糊逻辑推理在线调整,图 2 给出了模糊增益 PID 控制系统的结

构图. 设计中包括 3 个模糊逻辑推理系统, 它们的输入都为 e 、 Δe , 输出分别是 K_p 、 K_i 、 K_d . PID 增益 K_p 、 K_i 和 K_d 的大小由当前的偏差 $e(k)$ 和其一阶微分 $\Delta e(k)$ 决定, 通过下面的模糊推理计算得到:

如果 $e(k)$ 为 A_i 且 $\Delta e(k)$ 为 B_i , 则 K_p 为 C_i 、 K_i 为 D_i 、 K_d 为 E_i ; $i = 1, 2, \cdots, m$

其中: A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 和 E_i 是模糊集. $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数取为三角形, 论域为 $[a^-, a^+]$, 如图 3 所示. K_p 、 K_i 、 K_d 的隶属度函数也同样取为三角形, 论域为 $[b^-, b^+]$, 如图 4 所示. 在图 3、4 中 N 代表负, P 代表正, ZE 代表零, S 代表小, M 代表中, B 代表大. 因此 NB 代表负大, PB 代表正大等.

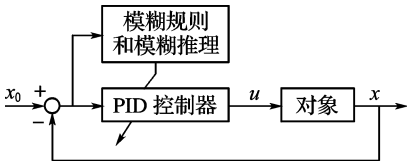


图 2 模糊增益 PID 控制系统

Fig. 2 Fuzzy-gain PID control system

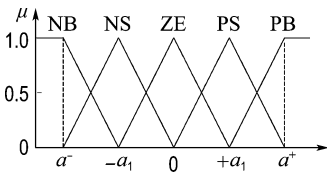


图 3 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of $e(k)$ and $\Delta e(k)$

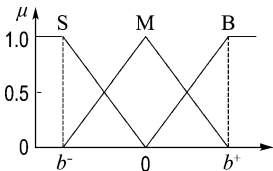


图 4 K_p 、 K_i 、 K_d 的隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of K_p , K_i , K_d

模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验, 建立合适的模糊规则, 得到针对 K_p 、 K_i 、 K_d 3 个参数分别整定的模糊规则, 如表 1 ~ 3 所示. 在这里, 本文根据过程的单位阶跃响应来制定规则, 图 5 给出了单位阶跃响应曲线. 例如, 在响应的起始点 a_1 处, 偏差 e 很大且为正, 偏差的一阶微分几乎等于零. 为了得到快速的系统响应, 必须加大被控对象的输入量, 即操

作量. 因此 PID 速率控制器应该有大的比例增益 K_p , 大的积分增益 K_i , 小的微分增益 K_d , 此时的模糊控制规则可写成

“如果 e 为 PB 且 Δe 为 ZE, 则 K_p 为 B, K_i 为 B, K_d 为 S”

表 1 K_p 的模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table of K_p

K_p	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
Δe	NB	B	M	S	M
	NS	B	M	M	B
	ZE	B	B	M	B
	PS	B	M	M	B
	PB	B	M	S	B

表 2 K_i 的模糊规则表

Tab. 2 Fuzzy rule table of K_i

K_i	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
Δe	NB	B	M	S	M
	NS	B	M	M	B
	ZE	B	M	M	B
	PS	B	M	M	B
	PB	B	M	S	B

表 3 K_d 的模糊规则表

Tab. 3 Fuzzy rule table of K_d

K_d	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
Δe	NB	S	S	S	S
	NS	S	M	M	S
	ZE	S	S	B	S
	PS	S	M	M	S
	PB	S	S	S	S

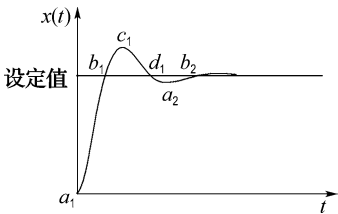


图 5 阶跃响应曲线

Fig. 5 Curve of step response

在 b_1 处, 为了减小系统的超调量, 必须最大程度地减少操作量, 因此 PID 速率控制器应有小

的比例增益 K_p 、小的积分增益 K_i 、大的微分增益 K_d ,控制规则可写为

“如果 e 为 ZE 且 Δe 为 NB,则 K_p 为 S, K_i 为 S, K_d 为 B”

同样,可以写出 c_1 、 d_1 等点处的控制规则.表 1~3 分别给出了 K_p 、 K_i 、 K_d 的控制规则.

e 和 Δe 的量化因子分别为 k_e 、 $k_{\Delta e}$; K_p 、 K_i 、 K_d 的比例因子分别为 k_p 、 k_i 、 k_d .这 5 个参数根据专家知识和经验选取.本文使用重心法进行解模糊化.

3 仿真和性能分析

本文使用 Matlab/Simulink 进行仿真,仿真的网络拓扑图如图 6 所示.网络中包含 N 个受控的源节点和 1 个不受控的源节点,链路的带宽(即 AQM 路由器的服务速率) $\bar{\mu}$ 为 44 736 000 b/s,所有的 IP 包有相同的大小,为 1 024 bytes,路由器 1 的缓存大小为 1 000 packets,路由器 2 的缓存容量足够大不会发生丢包.路由器 1 的目标缓存容量设为 400 packets.采样时间取为 0.018 3 ms.往返延迟 $\tau_i = x(t)/c_0 + \tau_i^0$, c_0 为 AQM 路由器的处理速度,为 5 461 packets/s, $\tau_i^0 \in (0, 1, 0.3)$ s.

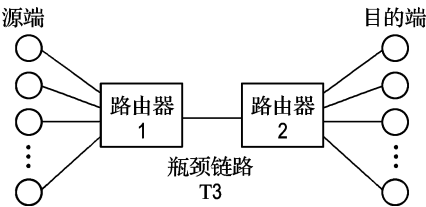


图 6 网络拓扑图
Fig. 6 Network topology

在仿真中,设有 20 个受控的 ftp 源节点和 1 个不受控的保证传输质量流媒体节点通过路由器向目的端发送数据.为了说明本文控制器的有效性,将模糊增益 PID 速率控制器和传统 PI 速率控制器^[8]的性能作了比较.图 7 给出了不受控源的瞬时发送速率,图 8 给出了路由器瞬时缓存队列长度,图 9 中给出了各个受控源的瞬时发送速率.

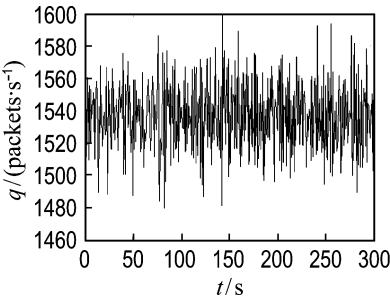
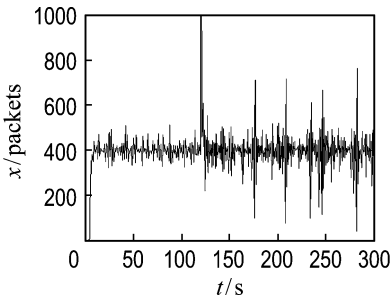
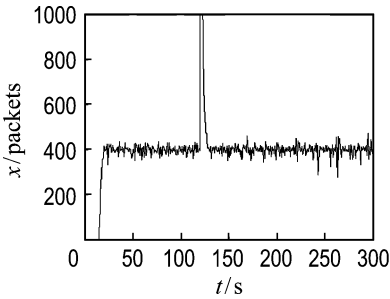


图 7 不受控源的瞬时发送速率
Fig. 7 Instantaneous sending rates of uncontrolled sources

在 $t=0$ 时,12 个受控源($i=1\sim12$)和 1 个不受控源向网络发送数据包.12 个受控源的发送速率不断增加,并在 $t=15$ s 时保持稳定,发送速率 327 packets/s(如图 9),同时瞬时缓存队列长度也不断增加,在 $t=20$ s 时趋于目标缓存值(400 packets),如图 8 所示.在 $t=120$ s 时,另 8 个受控源节点(13~20)开始通过路由器向目的端发送数据.由于网络中接入的受控源节点数目的增加,引起 12 个受控 ftp 源节点(1~12)发送速率大幅度减小,如图 9 所示.瞬时队列长度也减小,在 $t=130$ s 时达到稳定值 400 packets.



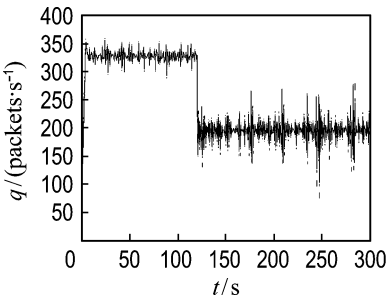
(a) PI 速率控制器



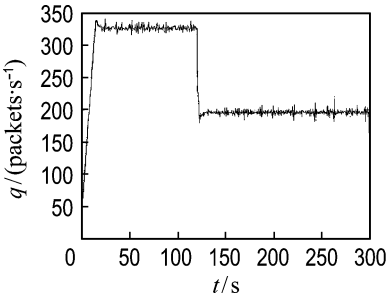
(b) 模糊 PID 速率控制器

图 8 路由器的队列长度

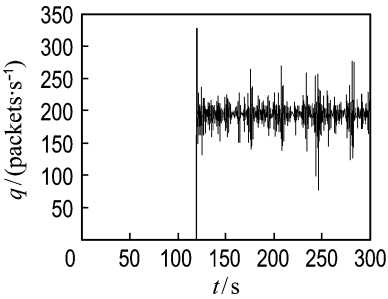
Fig. 8 Queue length in router



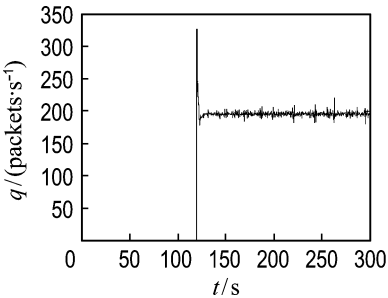
(a) PI 速率控制器, $i=1\sim12$



(b) 模糊 PID 速率控制器, $i=1\sim12$



(c) PI 速率控制器, $i=13\sim20$



(d) 模糊 PID 速率控制器, $i=13\sim20$

图 9 各受控源的瞬时发送速率

Fig. 9 Instantaneous sending rates of controlled sources

在本文的仿真中,仿真时间设为 300 s. 模糊增益 PID 速率控制器的参数设置如下: $e, \Delta e \in (-6, 6), K_p, K_i, K_d \in (0, 1), k_e = 0.000\ 11, k_{\Delta e} = 0.000\ 2, k_p = 0.221, k_i = 0.1, k_d = 0.03$. 传

统 PI 速率控制器的 $K_p = 0.201\ 4, K_i = 0.145\ 8$.

从仿真图中可以看出,在 $t=0\sim120\text{ s}$ 时,由于网络传输延迟是时变的,且网络中存在不受控源,文献[8]采用的经典控制理论方法所取得的控制效果明显不如模糊增益 PID 速率控制器. 在 PI 控制器作用下缓存队列长度和发送速率都有明显的波动,而模糊增益 PID 速率控制器作用下的缓存队列变化很平缓,发送速率也很平滑. $t=120\text{ s}$ 时,由于网络负载的增加,PI 速率控制器作用下的队列长度和发送速率波动更加剧烈,这将严重影响流媒体的服务质量. 而模糊增益 PID 速率控制器不受对象模型的限制,能快速地响应变化,使得缓存区队列长度和发送速率变化平缓,不受负载变化的影响. 因此,模糊增益 PID 速率控制器具有更好的鲁棒性能,能更有效地保证流媒体的服务质量.

4 结 论

本文提出了一种支持流媒体传输的模糊增益 PID 速率控制器,该控制器使用模糊逻辑控制原理在线调整 PID 增益,有效地补偿了不确定性的影响. 所设计的模糊增益 PID 速率控制器通过调节源端的发送速率支持流媒体的传输,因此避免了 Internet 中拥塞的发生.

仿真结果表明,模糊增益 PID 速率控制器使 AQM 路由器很好地适应不受控源的波动,因此提供了很好的暂态性能.

参考文献:

[1] WU D, HOU Y, ZHANG Y Q. Transporting real-time video over the Internet: Challenges and approaches [J]. **Proceedings of IEEE**, 2000, **88**:1-19

[2] SEFEROGLU H, MARKOPOULOU A. Distributed rate control for video streaming over wireless networks with intersession network coding [C] // **2009 17th International Packet Video Workshop, PV 2009**. Piscataway:IEEE Computer Society, 2009

[3] CHEN Zhen-zhong, NGAN K N. Recent advances in rate control for video coding [J]. **Signal Processing: Image Communication**, 2007, **22**(1):19-38

- [4] HUANG Cheng, XU Li-hao. SRC: Stable rate control for streaming media [C] // **IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM'03**. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. , 2003:4016-4021
- [5] BOLOT J C, TURLETTI T. Experience with control mechanisms for packet video in the Internet [J]. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, 1998, **28**(1):4-5
- [6] REJAIE R, HANDLEY M, ESTRIN D. RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for real-time streams in the internet [J]. **Proceedings - IEEE INFOCOM**, 1999, **3**:1337-1345
- [7] SISALM D, WOLISZ A. LDA + TCP-Friendly adaptation: A measurement and comparison study [C] // **Proceedings of 10th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video**. Chapel Hill:[s n], 2000
- [8] HANDLEY M, FLOYD S, PADHYE J, *et al.* RFC 5348. TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification [S]. Lenexa:IETF, 2008
- [9] WU Gang, CHONG E K P, GIVAN R. Predictive buffer control in delivering remotely stored video using proxy servers [J]. **Computer Networks**, 2006, **50**(18):3721-3742
- [10] ZHOU Xiao-fei, ONG K. Discrete LQ rate control for MPEG2 video streaming system [J]. **Journal of Multimedia**, 2008, **3**(2):12-19
- [11] QUET P F, ATASLAR 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
- [12] HONG Y, YANG O W W. Design of an adaptive PI rate controller for streaming media traffic based on gain and phase margins [J]. **IEE Proceedings: Communications**, 2006, **153**(1):5-14

Fuzzy PID rate controller for supporting streaming media traffic

ZHU Rui-jun*, WANG Wei, ZHEN Cui-ping

(School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: There exist severe uncertainties in network transmission due to randomness of the network load variants, time-varying characteristics of round trip time (RTT), which seriously affect the quality of service of streaming media. A fuzzy PID rate controller is proposed to support best-effort of streaming media based on fuzzy set theory, which efficiently compensates the time-varying uncertainties and enhances the stability and robustness of the closed loop systems, and realizes maximum bandwidth utilization. Fuzzy PID rate controller can calculate the desired sending rates of the controlled sources according to the router's queues, which makes the router's queue attain the set point, so the congestion of the router is avoided. Simulation results show that the fuzzy PID rate controller can efficiently deal with the time-varying characteristics and the fluctuation of the sending rates, which can guarantee the quality of service of streaming media.

Key words: fuzzy PID rate controller; streaming media; congestion control