

◎网络、通信与安全◎

一种基于内模 PID 控制的主动队列管理算法

罗 鸣,牛玉刚

LUO Ming, NIU Yu-gang

华东理工大学 信息科学与工程学院,上海 200237

School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

E-mail: luom365@sina.com

LUO Ming, NIU Yu-gang. Active queue management algorithm based on internal model PID control. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(31): 111-114.

Abstract: In order to overcome the disadvantages of the traditional PID controller of the active queue management, e.g., the difficulty of parameters tuning, this paper proposed an internal model control-based PID controller. The key feature of the present PID controller lies in that only one parameter needs to be tuned. Furthermore, by applying the present method into the network congestion control, this paper constructed a new Active Queue Management (AQM) algorithm, IMC-PID algorithm. Simulation results show that IMC-PID has stronger robust performance and quicker queue adjusting velocity.

Key words: network congestion control; Active Queue Management (AQM); inner model control; PID

摘 要: 针对传统主动队列管理中 PID 控制存在的参数不易整定等缺点, 通过引入内模控制思想, 提出了一种基于内模控制的 PID 控制器(IMC-PID), 其突出特点是控制器仅有一个参数需要整定。将 IMC-PID 应用于网络拥塞控制中, 得到了一种新的主动队列管理(AQM)算法——IMC-PID 算法。仿真实验表明, IMC-PID 算法有较强的鲁棒适应性及较快的队长调节速率。

关键词: 网络拥塞控制; 主动队列管理; 内模控制; PID

文章编号: 1002-8331(2007)31-0111-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

随着 Internet 的网络规模和应用的爆炸性增长, 关于网络拥塞问题的研究近年来日益受到关注。目前, 拥塞控制算法主要分为源算法和链路算法两大类。其中, 源算法中使用最广泛的是基于 TCP 协议的拥塞控制算法, 主要有 Tahoe^[1]、Reno^[2]、NewReno^[3]、SACK^[4]等; 关于链路算法的研究主要集中在基于 IP 层的“主动队列管理”(Active Queue Management, AQM)算法方面, 包括 RED^[5]算法、REM 算法^[6]、PI 算法^[7]和 AVQ 算法^[8]等。

Hollot 等人在文[7]中提出了一种用于 AQM 管理的 PI 控制算法, 仿真结果显示, 该 AQM 算法存在调节时间长和鲁棒性差的缺点。众所周知, 通过在 PI 控制器上增加微分环节(即构成 PID 控制器)可以加快其调节速率, 但常规的 PID 控制存在着参数难以整定的缺点, 特别是对于强耦合、强非线性和大时滞系统, 常规 PID 控制难以得到满意的控制效果。

基于上述讨论, 本文提出了一种基于内模控制^[9]思想的 PID 控制器, 其突出特点是该 PID 控制器仅有一个参数需要整定, 并且参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系比较明确, 从而可以有效提高 PID 控制器的控制性能。本文进一步将该算法应

用于网络拥塞控制中, 得到了一种新的主动队列管理算法——IMC-PID 算法, 仿真实验显示, IMC-PID 算法较 RED 算法和 PI 算法有较强的鲁棒性和较快的队长调节速率。

2 TCP/AQM 网络流体模型

Misra 等^[10]基于网络流理论给出了 TCP/AQM 的微分方程模型:

$$\begin{aligned} \dot{W}(t) &= \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))} P(t-R(t)) \\ \dot{q}(t) &= \frac{W(t)}{R(t)} N(t) - C \end{aligned} \quad (1)$$

其中: W 为期望的 TCP 窗口大小(单位: 分组);

q 为期望的队列长度(单位: 分组);

R 为回程时间(RTT), $R = q/C + T_p$ (单位: s);

C 为链路容量(单位: 分组/s);

T_p 为传播延时(单位: s);

N 为负载因子(TCP 会话数);

p 为分组标记/丢弃概率。

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60674015); 上海市自然科学基金(the Natural Science Foundation of Shanghai of China under Grant No.04ZR14034); 高等院校博士学科点基金(the China Fund for the Doctoral Program of Higher Education under Grant No.20040251010)。

作者简介: 罗鸣(1982-), 男, 硕士生, 研究方向为网络拥塞控制; 牛玉刚, 男, 教授, 研究方向为鲁棒控制等。

系统(1)的平衡点满足条件:

$$W_0^2 P_0 = 2, W_0 = \frac{R_0 C}{N}, R_0 = \frac{q_0}{C} + T_p$$

系统(1)在平衡点的近似线性化方程为:

$$\begin{cases} \delta \dot{W}(t) = -\frac{2N}{R_0^2 C} \delta W(t) - \frac{R_0 C^2}{2N^2} \delta p(t - R_0) \\ \delta \dot{q}(t) = \frac{N}{R_0} \delta W(t) - \frac{1}{R_0} \delta q(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\delta W = W - W_0, \delta q = q - q_0, \delta p = p - p_0$ 。

记 $P_{tcp} e^{-sR_0}$ 和 P_{queue} 分别为从 δp 到 δW 和从 δW 到 δq 的传递函数, 则有:

$$P_{tcp}(s) = \frac{\frac{R_0 C^2}{2N^2}}{s + \frac{2N}{R_0^2 C}}, \quad P_{queue}(s) = \frac{\frac{N}{R_0}}{s + \frac{1}{R_0}}$$

上述线性时延反馈控制系统结构如图 1 所示:

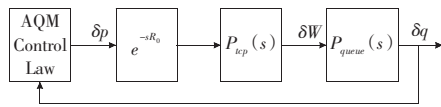


图1 AQM 控制系统

从图 1 可以得出被控对象的开环传递函数为:

$$P(s) = \frac{(\frac{C^2}{2N})e^{-sR_0}}{(s + \frac{2N}{R_0^2 C})(s + \frac{1}{R_0})} \quad (3)$$

显然, AQM 的作用相当于一个控制器, 其输入是队列长 q , 输出是丢包概率 p 。所以, 可以将 AQM 算法等同于一般的控制器, 不同的 AQM 策略对应于不同的控制器。RED、PI 等算法包括本文提出的 IMC-PID 算法即为图 1 中的 AQM Controller。

3 基于内模控制 PID(IMC-PID)的 AQM 算法

在文[7]提出的 PI 型 AQM 算法的基础上, 本文将设计一种基于内模控制 PID 的 AQM 算法, 通过在 PI 控制器上增加一个微分环节可以加快其调节速率, 并利用内模控制思想进一步简化 PID 控制器参数的整定过程。与经典 PID 控制相比, 内模控制 PID 仅有一个参数需整定, 参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系比较明确。

3.1 基于内模控制的 PID 控制器设计

内模控制与简单反馈控制结构的关系, 可以用图 2 来表示。它的等价反馈控制结构如图 3 所示。

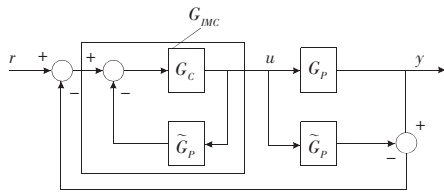


图2 IMC 结构与反馈控制结构之间的关系

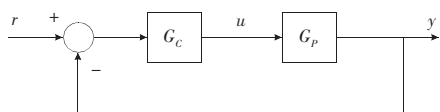


图3 等价反馈控制结构

此处, $G_c(s)$ 定义为 PID 控制器, 即 $G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)$,

其中 K_p, T_I, T_D 分别是比例、积分、微分环节的时间常数。本文将利用内模控制原理对 PID 控制器的参数进行整定。

内模控制器设计分为两步:

(1) 将过程模型 $\tilde{G}_p(s)$ 分解成两项 $\tilde{G}_{p_+}(s)$ 和 $\tilde{G}_{p_-}(s)$, 满足 $\tilde{G}_p(s) = \tilde{G}_{p_+}(s) \cdot \tilde{G}_{p_-}(s)$, 其中, $\tilde{G}_{p_+}(s)$ 是过程模型中非最小相位部分, 不可求逆。无余差控制需要 $\tilde{G}_{p_+}(s)$ 满足 $\tilde{G}_{p_+}(0) = 1$ 。 $\tilde{G}_{p_+}(s)$ 包含了所有时滞和右半平面零点。 $\tilde{G}_{p_-}(s)$ 是具有最小相位特征的传递函数, 即 $\tilde{G}_{p_-}(s)$ 稳定且不包含预测项。

(2) 在设计 IMC 控制器时, 需要在 $\tilde{G}_{p_-}(s)$ 上增加滤波器, 以确保系统的稳定性和鲁棒性。定义 IMC 控制器为:

$$G_{IMC}(s) = \tilde{G}_{p_-}^{-1}(s) f(s) \quad f(s) = \frac{1}{(1 + \lambda s)^n}$$

上式中 $f(s)$ 是低通滤波器, 选择 $f(s)$ 的目的之一是使 $G_{IMC}(s)$ 变为有理, 使 $G_{IMC}(s)$ 可实现。 λ 为滤波器参数, 它是内模控制器仅有的设计参数。

再由 $G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)$ 求出 PID

控制器各参数, 其求解过程是根据 s 多项式各项幂次系数对应相等的原则。

3.2 IMC-PID 主动队列管理算法的实现

由 TCP/AQM 流量控制模型(1)可知, 被控对象模型是一个典型的带延迟的二阶系统:

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{\frac{(RC)^3}{4N^2} e^{-Rs}}{(Rs+1)(\frac{R^2 C}{2N} s + 1)}$$

其中 R, C, N 分别表示回程时间、链路容量、负载因子(TCP 会话数)。将之简写为 $\tilde{G}_p(s) = \frac{K_C e^{-Rs}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$, 并令:

$$K_C = \frac{(RC)^3}{4N^2}, T_1 = R, T_2 = \frac{R^2 C}{2N}$$

对滞后时间采用一阶泰勒近似得: $e^{-Rs} = 1 - Rs$, 所以,

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{K_C(1-Rs)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

进一步分解出可逆和不可逆部分, 即:

$$\tilde{G}_{p_-}(s) = \frac{K_C}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad \tilde{G}_{p_+}(s) = 1 - Rs$$

采用一阶滤波器 $f(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}$, 得 IMC 控制器传递函数:

$$G_{IMC}(s) = \tilde{G}_{p_-}^{-1}(s) f(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{K_C} \cdot \frac{1}{\lambda s + 1}$$

等效的标准反馈控制器:

$$G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - \tilde{G}_{p_+}(s)G_{IMC}(s)} = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - \tilde{G}_{p_+}(s)\tilde{G}_{p_+}(s)\tilde{G}_{p_-}^{-1}(s)f(s)} = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - \tilde{G}_{p_+}(s)f(s)} = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{K_C s(\lambda + R)}$$

$$\frac{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}{K_c s(\lambda + R)} \quad (4)$$

而一个PID控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = K_p \frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{T_i s} \quad (5)$$

将式(4)改写为式(5),两边同乘以 $(T_1 + T_2)/(T_1 + T_2)$ 得:

$$G_c(s) = \left[\frac{T_1 + T_2}{K_c(\lambda + R)} \right] \cdot \left[\frac{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}{(T_1 + T_2)s} \right] \quad (6)$$

比较式(5)和(6)可得PID整定参数为:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{K_c(\lambda + R)} = \frac{R + \frac{R^2 C}{2N}}{\frac{(RC)^3}{4N^2}(\lambda + R)}$$

$$T_i = T_1 + T_2 = R + \frac{R^2 C}{2N}$$

$$T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} = \frac{\frac{R^3 C}{2N}}{R + \frac{R^2 C}{2N}} = \frac{R^2 C}{2N + RC}$$

假定链路容量 C 、往返时间 R 和连接数 N 分别为3750 packets/s, 0.2 s和60。由于采用了一阶Taylor近似,取 $\lambda > 1.7R$,这里取 $\lambda = 1$ 。那么可以得到 $K_p = 4.1244 \times 10^{-5}$ 、 $T_i = 1.45$ 、 $T_d = 0.17241$ 。

设采样频率为160 Hz,得到用于队列管理的IMC-PID控制器的离散增量表达式为:

$$P(K+1) = P(K) + K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(K) -$$

$$K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} \right) e(K-1) + K_p \frac{T_d}{T} e(K-2) =$$

$$+ 0.0011792e(K) - 0.0023167e(K-1) +$$

$$0.0011377e(K-2)$$

其中 $e(K) = q(K) - q_0$, $P(K)$ 为控制器的输出, $q(K)$ 为第 K 时刻的采样值, q_0 为期望队列长度。

4 仿真实验与分析

本文用图4所示的网络拓扑结构对新扩充的IMC-PID算法进行仿真实验,并采用网络模拟软件NS2^[11]作为实验平台。

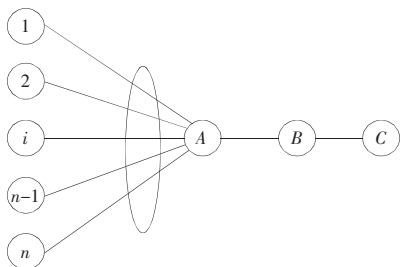


图4 实验拓扑结构图

图4中节点A和B之间为瓶颈链路,链路容量为15 Mbps (3750 packets/s,分组缺省大小为500 Bytes),延时5 ms。链路BC间容量为45 Mbps,延时30 ms。取60个FTP业务源,它们与节点A之间的链路容量均为10 Mbps,延时5 ms。节点A的队列分别由RED、PI、IMC-PID控制,其余队列均为DropTail。

节点最大容量均为300 packets,PI和IMC-PID的队列长度的期望值为150 packets。

当取60个FTP源,在0.1 s启动,仿真时间为50 s,节点A的队列分别由RED、PI、IMC-PID控制时,其瞬时队列长与时间的关系如图5~图7所示:

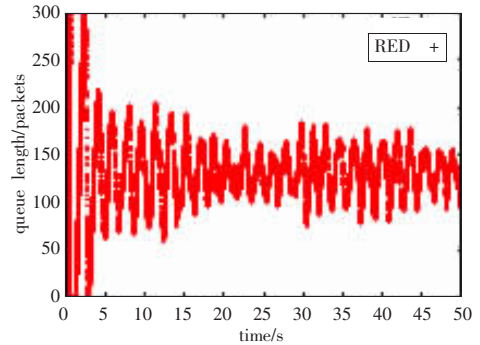


图5 RED算法分组长与时间关系

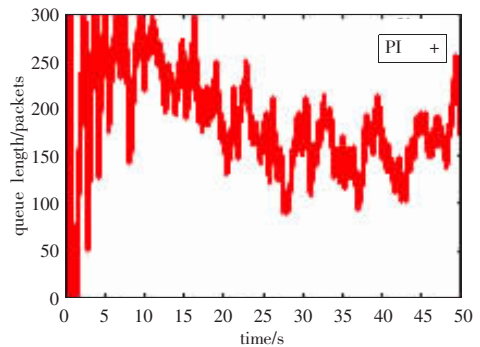


图6 PI算法分组队长与时间关系

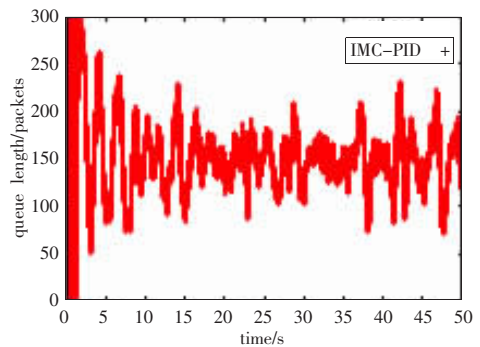


图7 IMC-PID算法分组队长与时间关系

从仿真结果可看到,RED和IMC-PID的队列长度以较快的速度稳定到期望长度,而PI则要较长时间才能使队列长度趋于期望值。

当在源端取160个FTP源,且各业务源随机启动,仿真时间仍为50 s,节点A的队列分别由RED、PI、IMC-PID控制时,其瞬时队列长与时间的关系如图8~图10所示。

当业务源增多且变为随机启动时RED的队列出现了较大幅度的振荡,PI的响应速度进一步减慢,新的IMC-PID算法仍体现了良好的性能,有较快的队长调节速率及较好的鲁棒性。

5 结论

主动队列管理(AQM)算法是链路算法中一种非常有效的拥塞控制策略。本文提出了一种基于内模控制原理的PID控制AQM算法(IMC-PID算法)。IMC-PID设计步骤的优点是所有

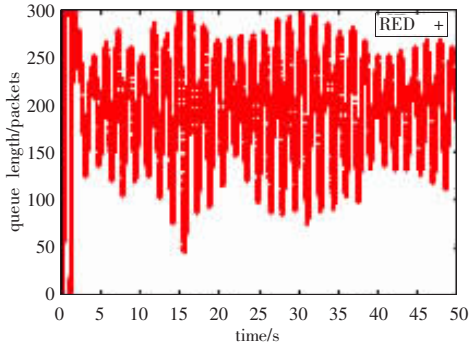


图8 RED算法分组队长与时间关系

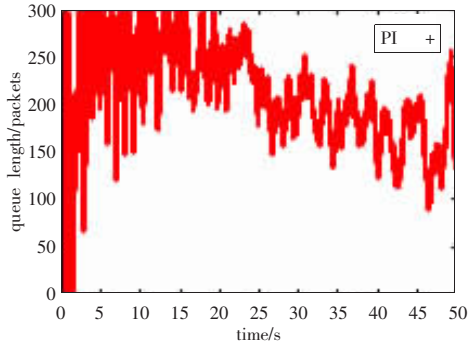


图9 PI算法分组队长与时间关系

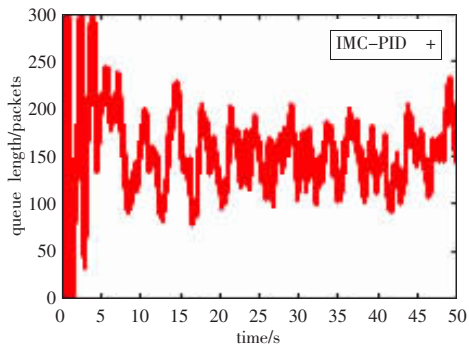


图10 IMC-PID算法分组队长与时间关系

(上接 101 页)

$0.03, x_{20}=0.030\ 01, i=15$, 序列长度 $N=2\ 024$, 相关间隔从 $-1\ 024$ 到 $+1\ 024$ 。计算结果如图 4 和图 5 所示。

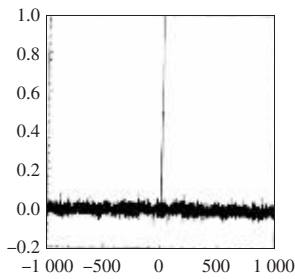


图4 自相关

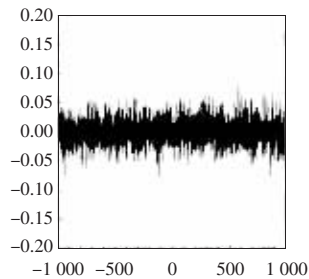


图5 互相关

5 结论

混沌动力系统的若干基本特性能够很好地满足保密通信和密码学的基本要求^[8];支持向量机不存在局部极小问题,同时具有自学习自调整模型的特点,能对各种混沌系统产生较好的分类效果,正确率可以达到 97.67%。本文将两者结合起来,提出一种基于混沌动力系统和 SVM 的 0-1 序列发生器的设计方

的控制参数以唯一和直接的方式与模型参数相关。在 IMC-PID 控制器中,只有一个可调整的且有直接意义的参数输入,并决定了系统的响应速度和鲁棒性,且可调参数 λ 近似地与闭环带宽成正比。可以获得滤波器参数 λ 的一个初始估计,并根据需要在线调整。通过仿真实验表明,IMC-PID 主动队列管理算法有较强的鲁棒性和较快的调节速率。

(收稿日期:2007 年 7 月)

参考文献:

- [1] Jacobson, V. Congestion avoidance and control[J]. ACM Computer Communication Review, 1988, 18(4): 314-329.
- [2] Stevens W. RFC 2001 TCP slow start, congestion avoidance, fast retransmit, and fast recovery algorithms[S], 1997.
- [3] Floyd S, Henderson T. RFC 2582 The NewReno modification to TCP's fast recovery algorithm[S], 1999.
- [4] Mathis M, Mahdavi J, Floyd S, et al. RFC 2018 TCP selective acknowledgment options[S], 1996.
- [5] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397-413.
- [6] Athuraliya S, Li V H, Low S H, et al. REM: active queue management[J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48-53.
- [7] Hollot C V, Misra V, Towsley D, et al. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[M]. USA: IEEE Communications Society, 2001: 1726-1734.
- [8] Kunniyur S, Srikant R. Analysis and design of an Adaptive Virtual Queue (AVQ) algorithm for active queue management[J]. ACM Computer Communication Review, 2001, 31(4): 123-134.
- [9] 高东杰, 谭杰, 林红权. 应用先进控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [10] Misra V, Gong W B, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[C]//Proceeding of the ACM/SIGCOMM 2000, Stockholm, 2001.
- [11] UCN/LBL/VINT. Network Simulator - NS2 [EB/OL]. <http://www.mash.cs.berkeley.edu/ns>.

法。该 0-1 序列发生器实现简单(Matlab+SVM Toolbox),且生成的 0-1 序列能较好地满足 Golomb 伪随机性假设的 3 个条件。(收稿日期:2007 年 8 月)

参考文献:

- [1] Schneier B. Applied cryptography protocols second edition; algorithms, and source code in C[M]. 2nd ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [2] 孙克辉. 一种混沌加密算法的实现[J]. 计算机应用, 2003, 23(1): 15-17.
- [3] 韦鹏程, 廖晓峰, 李传东, 等. 基于符号动力学的 0-1 发生器[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(22): 126-128.
- [4] 冯长根, 李后强, 祖元刚. 非线性科学的理论、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 21-30.
- [5] 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1993: 16-51.
- [6] Vapnik V. Statistical learning theory[M]. New York: Wiley, 1998: 1-169.
- [7] Brownz M P S, Grundy W N, Linz D. Support vector machine classification of microarray gene expression data, UCSC-CRL-99-09.
- [8] Kocarev L, Jakimoski G, Stojanovski T, et al. From chaotic maps to encryption schemes[C]//Proc IEEE Int Sym CAS, 1998, 4: 514-517.