

预测 PI 时滞网络拥塞控制算法设计及性能分析

钱艳平, 李 奇, 刁 翔

(东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对网络中存在的大时滞给主动队列管理算法性能带来的不利影响, 将 Smith 预估器与 Dahlin 算法相结合, 提出了一种预测 PI 拥塞控制算法, 首先利用 Smith 预估器补偿时延滞后, 克服了大时滞给系统性能带来的影响; 然后按 Dahlin 算法设计控制器, 把控制器参数和预估对象模型参数相结合, 既减少了整定参数, 也避免了参数整定时的相互影响。同时, 利用经典控制理论方法分析了系统稳定性和存在链路容量干扰时瓶颈队列的暂态、稳态特性。仿真结果显示预测 PI 算法控制性能优于 RED, PI 算法及具有较强的鲁棒性。

关键词: 拥塞控制; 流量控制; 主动队列管理; 预测 PI; 时滞网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Design and analysis of predictive PI algorithm for congestion control in time-delay network

QIAN Yan-ping, LI Qi, DIAO Xiang

(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: A predictive proportional integral (PPI) congestion control algorithm is proposed which combined Smith predictor and Dahlin algorithm to alleviate the time-delay influence on the performance of active queue management (AQM) in network. The Smith predictor is utilized to compensate the time-delay, while Dahlin principle is employed to design controller to reduce the number and interaction of tuning parameters. A classical control method is also introduced to analyze the stability of the system and the transients as well as steady-state behaviors of bottleneck queue with link capacity disturbances. Finally, simulation results are given to show the PPI algorithm's advantages through experiments with disturbances, and comparison between random early detection (RED) and proportional integral (PI) algorithms are also made.

Key words: congestion control; flow control; active queue management; predictive PI; delay network

1 引言 (Introduction)

网络拥塞来源于网络资源和网络流量分布的不均衡, 它不会随着网络处理能力的提高而消除。Internet 主要采用端对端 TCP 拥塞控制策略, 网络端拥塞避免策略来消除网络拥塞。前者广泛使用 TCP Reno^[1], 后者使用最广泛的是简单的先进先出 (FIFO) 包调度算法结合“去尾” (DropTail) 队列管理策略。为克服“去尾”策略存在的易产生闭塞和满队列缺点, 在网络路由器端采用 AQM 策略^[2]使端点在队列满之前能对拥塞做出反应。利用控制理论方法分析、设计拥塞控制器来避免拥塞和提高网络性能是当前的研究热点。文献[3]利用网络拥塞控制模型分析了早期随机检测 (RED)^[4]策略参数

调节困难的主要原因; 文献[5]分析了比例积分 (PI) 控制器能极大提高系统性能。

考虑到网络中存在的较大时延^[6], 如果采用常规控制器, 则闭环系统特征方程存在纯滞后环节, 这将引起系统相位滞后, 使临界增益降低, 可能导致系统不稳定。因此, 对大时滞网络下的 AQM 算法设计和性能研究显得十分重要。但是, 现有的大多数 AQM 算法并没有充分考虑往返时延 (RTT) 对算法性能的影响。文献[7]表明几种典型算法控制的队列在大时滞网络中出现剧烈振荡, 导致瓶颈链路利用率下降和延时抖动加剧, 并利用内模补偿原理设计了鲁棒的延时补偿 AQM 算法。文献[8]利用 Smith 预估器^[9]来控制网络流量, 取得了较好的效

果,但该方法要求精确对象模型,在有模型偏差时鲁棒性较差.

Smith 预估器设计时先根据经验确定控制器,然后由控制品质整定控制参数.而 Dahlin 算法^[9]提供了按照闭环性能指标设计控制器的方法.本文结合上述两种算法,利用 Smith 预估器补偿时间滞后,按 Dahlin 算法原理设计控制器^[10],提出了一种预测 PI(predictive PI, PPI) 拥塞控制算法.该算法既减少了需要整定的控制参数数量,也避免了参数整定时相互影响;且可以方便地调节系统响应速度与鲁棒性.同时,利用经典控制理论分析了系统稳定性和存在链路容量干扰时,瓶颈队列暂态、稳态特性.仿真结果显示预测 PI 算法控制性能优于 RED、PI 算法及具有较强的鲁棒性.

2 流量控制模型(Fluid flow control model)

在文献[11]中, Misra 等人基于流体流(fluid flow)理论建立了 AQM 作用下 TCP 连接上拥塞窗口的动态模型,在忽略定时机制的情形下,可以用一组非线性微分方程来描述:

$$\begin{cases} \frac{dW(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t)}p(t-R(t)), \\ \frac{dq(t)}{dt} = [M(t)/R(t) \cdot W(t) - C(t)]^+, \\ R(t) = q(t)/C(t) + T_p. \end{cases} \quad (1)$$

其中: W 为 TCP 窗口大小, q 为拥塞队列长度, R 为往返传播时延(RTT), C 为链路容量, T_p 为传输时延, M 为负载因子(TCP 会话数), p 为分组丢弃概率.

为了便于分析系统的稳定性, Hollot 等人用小信号理论在稳态工作点对其进行了局部线性化^[4], 在系统(1)的平衡点(W_0, q_0, p_0) 满足如下条件:

$$W_0^2 p_0 = 2, W_0 = R_0 C / M, R_0 = q_0 / C + T_p, \quad (2)$$

则在该平衡点的线性化方程为

$$\begin{cases} \delta \dot{W}(t) = -\frac{2M}{R_0^2 C} \delta W(t) - \frac{R_0 C^2}{2M^2} \delta p(t - R_0), \\ \delta \dot{q}(t) = \frac{M}{R_0} \delta W(t) - \frac{1}{R_0} \delta q(t) - C(t). \end{cases} \quad (3)$$

采用 AQM 控制策略的线性时延反馈控制系统结构如图 1 所示.

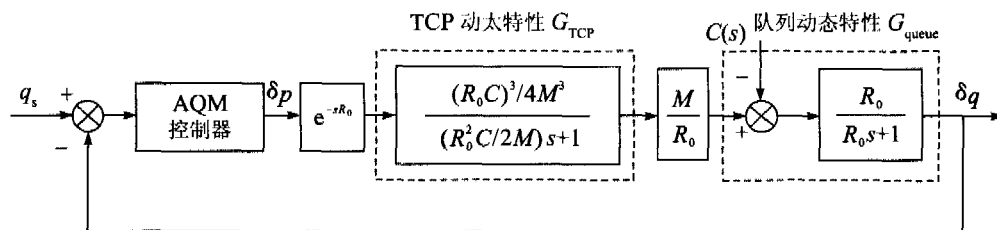


图 1 TCP/AQM 控制系统结构图

Fig. 1 TCP/AQM control system structure

由 TCP 和队列动态特性,可得到系统(1)在平衡点的时滞二阶模型

$$G(s) = \frac{K_p e^{-R_0 s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (4)$$

其中: $K_p = (R_0 C)^3 / (4M^2)$, $T_1 = R_0$, $T_2 = R_0^2 C / (2M)$.

为了使控制器的设计简单方便,式(4)可进一步简化为一阶模型

$$G(s) \approx G_0 e^{-Ls}. \quad (5)$$

其中: $G_0 = K_p / (T_1 s + 1)$, $T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$, $L = R_0 + T_1 + T_2 - \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$, 且 $L \geq 0$.

3 预测 PI 控制器(Predictive PI controller)

工业控制中针对时滞过程的各种先进控制算法有的对过程模型有一定要求,有的极为复杂和参数整定困难,因此应用最多的仍是基于 PID 的改进算法,如针对一阶惯性加时滞对象的 Smith 预估器.但是, Smith 预估器需整定的参数较多,对对象模型精度要

求较高,这给应用带来困难.本文设计了一种预测 PI 控制器,利用 Dahlin 算法来设计 Smith 预估器,将控制器参数和预估对象模型参数相结合,减少了需整定参数数目.同时,使闭环系统期望传递函数等价于一个惯性加时延环节,使得调节过程较为平稳不发生振荡,且有一个参数可调节系统鲁棒性.

3.1 预测 PI 控制器原理(Principle of PPI controller)

Smith 预估器^[9]基本原理是通过预估对象的动态特性,用一个预估模型来进行时间滞后的补偿,使时滞移出控制反馈回路.图 2 所示为 Smith 预估控制系统结构图.

由图 2 可得 Smith 预估控制器 $G_{cs}(s)$ 为

$$G_{cs}(s) = \frac{G_e(s)}{1 + G_e(s)G_m(s)(1 - e^{-(L+\xi)s})}. \quad (6)$$

其中: $G_m(s)e^{-(L+\xi)s}$ 为预估对象模型, ξ 为预估时延误差, $L + \xi \geq 0$.

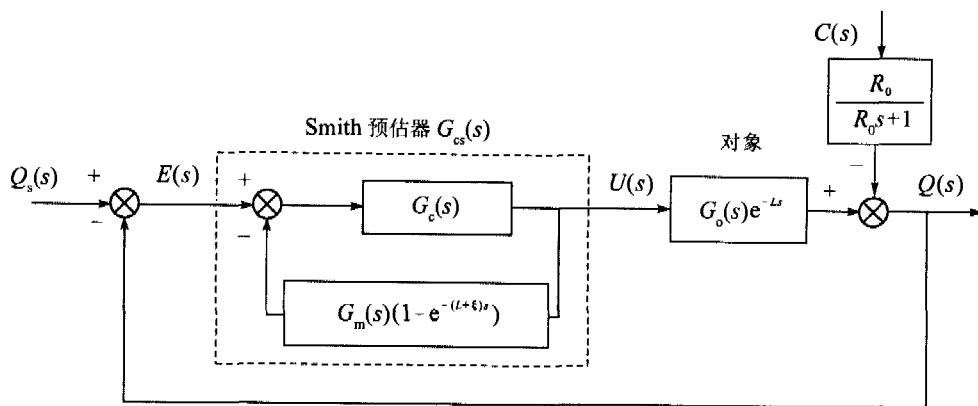


图2 Smith 预估控制系统结构图

Fig. 2 Control system structure with Smith predictor

Smith 预估控制系统的闭环传递函数为

$$\hat{W}(s) = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-Ls}}{1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-(L+\xi)s}) + G_c(s)G_o(s)e^{-Ls}} \quad (7)$$

在预估对象模型与实际对象模型完全匹配,即 $G_m(s) = G_o(s)$, $\xi = 0$ 时,系统闭环传递函数可简化为

$$\hat{W}(s) = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-Ls}}{1 + G_c(s)G_o(s)} \quad (8)$$

图2 等效结构如图3所示. Smith 预估器从理论上提供了将含有纯滞后的对象简化为不含纯滞后的对象再进行控制的方法,其过渡过程曲线及性能指标与对象特性为 $G_o(s)$ 时完全相同,仅仅是在时间上有一个 L 的延迟,时延所带来的不利影响被完全消除.

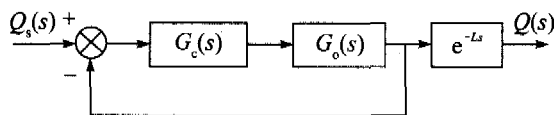


图3 Smith 预估控制系统等效结构图

Fig. 3 Equivalent structure of the system with Smith predictor

对于 Smith 预估器中的控制器 $G_c(s)$,如果采用 Dahlin 算法^[9]设计,有如下定理:

定理1 在满足模型匹配条件下,即 $G_m(s) = G_o(s)$, $\xi = 0$ 时,针对式(5)所示时滞对象,Smith 预估器中的控制器 $G_c(s)$ 采用 Dahlin 算法设计为 PI 控制器 $G_c(s) = K[1 + 1/(T_i s)]$,且 PI 控制器参数为 $K = T/(K_p \tau)$, $T_i = T$.

证 如果干扰信号为零,即 $N_1 = 0$, $N_2 = 0$,由图4可知常见反馈控制系统闭环传递函数为

$$W(s) = \frac{G_{cd}(s)G_p(s)}{1 + G_{cd}(s)G_p(s)} \quad (9)$$

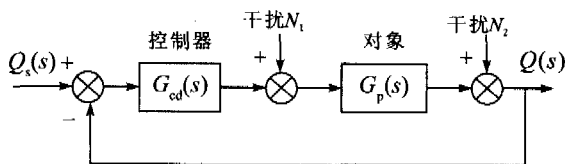


图4 常见反馈控制系统

Fig. 4 Normal feedback control system

由 Dahlin 算法,假定期望闭环传递函数为 $W(s) = e^{-Ls}/(\tau s + 1)$,令该系统闭环传递函数式(6)等于期望闭环传递函数,且如果 $G_p(s)$ 取式(5)所示时滞对象,则控制器 $G_{cd}(s)$ 为

$$G_{cd}(s) = \frac{1}{K_p} \frac{(Ts + 1)}{[(\tau s + 1) - e^{-Ls}]} \quad (10)$$

在预估对象模型与实际对象模型式(5)完全匹配,即 $G_m(s) = G_o(s)$, $\xi = 0$ 时,若 Smith 预估器采用 Dahlin 算法设计控制器,即满足

$$G_{cs}(s) = G_{cd}(s). \quad (11)$$

由式(6)(10)和式(11)可得

$$G_c(s) = \frac{(Ts + 1)/K_p}{\tau s} = \frac{T}{K_p \tau} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right). \quad (12)$$

令 $K = T/(K_p \tau)$, $T_i = T$,则有 $G_c(s) = K[1 + 1/(T_i s)]$ 为 PI 控制器. 证毕.

由定理1可知,采用 Dahlin 算法设计 Smith 预估器的 $G_c(s)$ 为 PI 控制器,且 K, T_i 与对象模型、期望闭环传递函数相联系,整定 PI 控制器的同时,也是对象模型的辨识过程,即

$$K_p = T_i/(K\tau), T = T_i. \quad (13)$$

Smith 预估器输出为

$$U(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)E(s) - \frac{1}{\tau s}(1 - e^{-Ls})U(s), \quad (14)$$

或

$$u(t) = Ke(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt - \frac{1}{\tau} \int_0^t [u(t) - u(t-L)] dt. \quad (15)$$

则网络链路队列分组丢弃概率 $p(t)$ 为

$$p(t) = \min\{1, \max\{0, u(t)\}\}. \quad (16)$$

预测 PI 控制器虽然结构与 Smith 预估器相同,但是具有较大的优点. 首先, Smith 预估器调节参数包括对象参数 K_p, T, L 和控制参数 K, T_i , 应用时需先辨识对象再调节控制参数, 如果对象参数具有较大偏差时, 则 Smith 控制器达不到较好的控制效果. 而预测 PI 控制器只需要知道时延 L , 调节参数为 K, T_i, τ , 且 τ 可以根据控制响应快慢和鲁棒性要求提前设定. 由式(13)可知, 调节参数 K, T_i 的过程实质上就是对象辨识过程, 因此当对象参数变化时, 预测 PI 控制器只需要重新调节控制参数 K, T_i , 而 Smith 预估器则需要先进行对象辨识, 再重新调节控制参数; 其次, 预测 PI 控制器实际应用极为容易, 只需要将 PID 控制器中的微分替换为式(15)的最后一项, 就能像 PID 控制器一样使用, 同时也能够利用 PI 控制器的整定方法, 易于操作者使用.

3.2 系统性能分析 (Performance analysis)

3.2.1 瓶颈队列分析 (Bottleneck queue analysis)

瓶颈队列的稳态、暂态行为对于研究队列长度、吞吐率和分组丢弃率等都十分重要. 由图2可知, 系统输入为瓶颈队列长度设定值 Q_s^* 和链路容量干扰 C , 设瓶颈队列长度设定值 Q_s^* 输入产生的系统输出为 $q_s(t)$, 链路容量干扰 C 产生的输出为 $q_d(t)$.

对于“尽最大努力”(best effort) 应用, 比如 TCP 应用, 其链路可用带宽会随着网络中 UDP 流等应用的存在而发生变化, 链路容量干扰 C 就是对“尽最大努力”应用可用带宽建立的模型. 假设 C 不能测得, 是一未知的确定函数. 由文献[8], C 可以建模为

$$c(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot 1(t - D_i). \quad (17)$$

其中: $\forall k \geq j > i \geq 1, D_j > D_i, D_1 > L; 0 \leq \sum_{i=1}^k a_i \leq C^*, C^*$ 为链路最大带宽.

为了研究方便, 由式(17), 链路容量干扰 C 取最简单也是最基本的模型, 即阶跃函数: $a_1 \cdot 1(t - D_1)$, 其中 $a_1 > 0$, 同时假设 Smith 预估对象模型等于实际对象模型. 对于瓶颈链路队列, 有如下定理:

定理 2 对于图2所示系统, 考虑参考信号 Q_s^* , 干扰 $a_1 \cdot 1(t - D_1)$ 和控制器式(15), 如果满足 $0 <$

$\tau \leq R_0(e^{L/R_0} - 1)$, 则瓶颈链路队列长度为 $q(t) \leq Q_s^*, t \in [0, \infty)$.

证 由图2, $C(s) = a_1 e^{-D_1 s} / s$ 和假设 $Q_s^* = 0$, 可得

$$-Q_d(s) G_{cs}(s) G_o(s) e^{-Ls} - \frac{R_0}{R_0 s + 1} C(s) = Q_d(s). \quad (18)$$

将 $G_{cs}(s), G_o(s)$ 表达式代入式(18), 整理后可得

$$Q_d(s) = -\frac{R_0}{(R_0 s + 1)} \cdot \frac{a_1}{s} e^{-D_1 s} + \frac{R_0}{(R_0 s + 1)(\tau s + 1)} e^{-(L+D_1)s} \cdot \frac{a_1}{s}. \quad (19)$$

应用 Laplace 反变换, 并假设 $q_d(t) = 0 (t \leq 0)$, 最后可得到

$$q_d(t) = -a_1 R_0 [1 - e^{-\frac{t-D_1}{R_0}}] * 1(t - D_1) + a_1 [R_0 - \frac{R_0^2}{R_0 + \tau} e^{-\frac{t-L-D_1}{R_0}} - \frac{\tau^2}{R_0 + \tau} e^{-\frac{t-L-D_1}{\tau}}] * 1(t - L - D_1). \quad (20)$$

当 $t \leq D_1$ 时, $q_d(t) = 0$; 当 $D_1 < t \leq L + D_1$ 时, $q_d(t) < 0$; 当 $t > L + D_1$ 时, 由式(20)可得

$$q_d(t) = -a_1 R_0 [1 - e^{-\frac{t-D_1}{R_0}}] + a_1 [R_0 - \frac{R_0^2}{R_0 + \tau} e^{-\frac{t-L-D_1}{R_0}} - \frac{\tau^2}{R_0 + \tau} e^{-\frac{t-L-D_1}{\tau}}] < a_1 R_0 e^{-\frac{t-D_1}{R_0}} (1 - \frac{R_0}{R_0 + \tau} e^{\frac{L}{R_0}}).$$

由条件 $0 < \tau \leq R_0(e^{L/R_0} - 1)$, 即可得 $q_d(t) < 0$.

同理, 假设 $Q_d(s) = 0$ 和 $Q_s^*(s) = Q_s^* / s$, 可得

$$Q_s(s) = \frac{1}{\tau s + 1} e^{-Ls} \cdot \frac{Q_s^*}{s}. \quad (21)$$

应用 Laplace 反变换, 并假设 $q_s(t) = 0 (t \leq 0)$, 最后可得到

$$q_s(t) = Q_s^* [1 - e^{-\frac{t-L}{\tau}}] * 1(t - L). \quad (22)$$

由线性系统可加性, 当系统输入为 Q_s^* 和 C 时, 系统总输出为

$$q(t) = q_s(t) + q_d(t). \quad (23)$$

当 $t \in [0, \infty)$, 若 τ 满足 $0 < \tau \leq R_0(e^{L/R_0} - 1)$, 则 $q_d(t) \leq 0$; 又由式(22)可得 $q_s(t) \leq Q_s^*$, 因此由式(23)可得 $q(t) \leq Q_s^*$. 证毕.

由定理2, 在使用预测 PI 控制器和上述对象模型下, 只要合理设置 τ 使之满足 $0 < \tau \leq R_0(e^{L/R_0} -$

1), 则只要目标队列长度 Q_s^* 小于队列缓冲器容量, 就能保证链路没有分组丢失. 此时, 即使链路队列具有任意小的缓冲器容量, 只要合理设置目标队列长度就能保证没有分组丢失. 因此, 对于某些对时延和分组丢弃极为敏感的应用, 可以在设置较小的目标队列长度的同时保证分组可靠传送.

瓶颈链路队列稳态值, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 由式(23)可得

$$q(\infty) = Q_s^*. \quad (24)$$

对于图2所示系统, 由式(24)可知输入信号为参考信号 Q_s^* 、干扰 $a_1 * 1(t - D_1)$ 时, 在控制器式(15)作用下系统稳态误差为零.

3.2.2 稳定性分析(Stability analysis)

3.2.2.1 理想情况(Ideal case)

在预估对象模型与实际对象模型式(5)完全匹配时, 由设计的系统闭环传递函数为 $W(s) = e^{-Ls}/(\tau s + 1)$ 可知, 其特征方程为 $\tau s + 1 = 0$, 所以对任意 $\tau > 0$, 控制系统均是渐进稳定的. 参数 τ 决定了闭环动态系统的快慢, 因此可根据系统所需鲁棒性和响应快慢来调节其大小. 当 τ 较小时, 闭环响应较快, 但对噪声和时延的预估误差也较敏感, 即鲁棒性较差; 当 τ 较大时, 闭环响应较慢, 但鲁棒性较好. 此外, 由于特征方程中无纯滞后环节, 故完全消除了网络传播时延给流量控制的快速性和稳定性所带来的不利影响.

3.2.2.2 存在预估时延误差 ξ (Having predictive delay error case)

在实际应用中, 实际对象模型不可能完全知道. 由式(13)可知, 控制器 $G_c(s)$ 的整定过程, 也是对对象模型参数 K_p, T 的辨识过程, 同时, 控制器设计中影响系统性能的主要因素是系统存在的较大时延, 因此, 假定预估对象模型满足 $G_m(s) = G_o(s) = K_p/(Ts + 1)$, 而 $\xi \neq 0$, 即 ξ 为时延的估计误差, 满足 $L + \xi > 0$, 则由式(7)和式(13)及以上假设, 可得存在时延估计误差时系统的特征方程为

$$F(s, \xi) = \tau s + 1 - e^{-Ls}(e^{-\xi s} - 1) = 0. \quad (25)$$

令 $L + \xi = \delta_0, L = \delta + \delta_0$ (其中 $\delta_0 \geq 0, \delta + \delta_0 \geq 0$), 代入上式可得

$$F(s, \delta) = \tau s + 1 + e^{-\delta_0 s}(e^{-\delta s} - 1) = 0. \quad (26)$$

通过上式特征方程, 可以画出 Smith 预估器时延有预估误差时系统根轨迹上的少数几个重要点, 如图5所示, 具体分析可按文献[12, 13]对于时延系统稳定性分析的类似方法进行讨论.

图5中用既易计算又足以说明系统稳定区域的

少数点 $s = v + i\omega$ 加上偏差 δ 绘制了时延有预估误差时系统根轨迹草图, 所示根轨迹草图只是与本文稳定性分析有关的相关区域. 从图5可知, 对于 $\delta = 0$ 即 $\xi = 0$, 时延没有预估误差, 这是理想情况, 存在一个负实根 $v = -1/\tau$. 对于 $\delta < -\delta_0$ 即 $\xi < -L$, 代表了往返时延为负数没有意义. 当 $-\delta_0 < \delta \leq 0$ 即 $\xi \geq 0$ 时, 根轨迹永远不会与虚轴相交, 此时预估时延大于实际时延, 按照本文所设计的预测PI控制器及所述对象, 系统始终保持稳定. 当 $\delta > 0$ 即 $-L \leq \xi < 0$ 时, 此时预估时延小于实际时延, 由图可知, 此时存在一个上限 δ' (对于 ξ 存在一个下限 ξ'), 即 $0 < \delta < \delta' (\xi' < \xi < 0)$, 系统保持稳定.

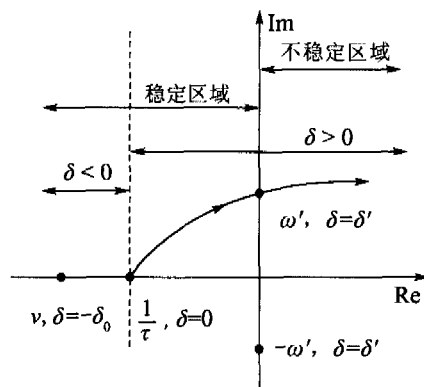


图5 时延有预估误差时系统根轨迹草图

Fig. 5 Sketch of the system root locus plot with predictive delay error

3.2.3 控制器输出分析 (Controller output analysis)

当存在负载干扰时, 利用文献[14]类似的方法, 通过IAE(Integrated Absolute Error)指标分析可知, 当存在较大时滞时本文提出的预测PI控制器要优于普通的PI控制器.

常规PI控制器如下式所示:

$$u = Ke + (K/T_i) \int e(t) dt. \quad (27)$$

在负载发生一个阶跃变化后, 控制量的变化为

$$\Delta u = (K/T_i) \int e(t) dt. \quad (28)$$

式(28)中的积分时间从负载变化时开始. 如果系统处于临界阻尼状态, 当 $\Delta u > 0$ 时, 误差的积分就等于绝对误差的积分, 因此假设 $\Delta u > 0$, 可得到

$$IAE_{PI} = \int |e(t)| dt = (T_i/K) \Delta u. \quad (29)$$

本文提出的预测PI控制器由式(15)可知

$$u = Ke + \frac{K}{T_i} \int e(t) dt - \frac{1}{\tau} \int [u(t) - u(t - L)] dt. \quad (30)$$

当系统发生负载阶跃变化时,如果时延足够大,则控制信号 u 将在时延时间内重新达到一个新的稳态,则可以假设下式成立:

$$\int [u(t) - u(t-L)] dt = L\Delta u. \quad (31)$$

在负载发生一个阶跃变化后,控制量的变化为

$$\Delta u = \frac{K}{T_i} \int e(t) dt - \frac{1}{\tau} L\Delta u. \quad (32)$$

假设系统处于临界阻尼状态,可得预测 PI 控制的 IAE 为

$$IAE_{PPI} = \int |e(t)| dt = \frac{T_i(\tau + L)}{K\tau} \Delta u. \quad (33)$$

对于临界阻尼系统,假设 PI 控制器的控制参数取典型值^[5]为 $K = 1/(4K_p)$, $T_i = L/2$, 而预测 PI 控制器的控制参数取值如式(13)所示,则可以得到

$$\begin{aligned} IAE_{PI} &= 2K_p L\Delta u, \\ IAE_{PPI} &= K_p(\tau + L)\Delta u, \end{aligned} \quad (34)$$

因此由式(34),可得

$$IAE_{PPI} = \frac{\tau + L}{2L} IAE_{PI}. \quad (35)$$

由式(35)可知,当 $L > \tau$ 时,预测 PI 控制器优于 PI 控制器,并且当 L 远远大于 τ 时,预测 PI 控制器的优势更加明显,预测 PI 控制器的 IAE 指标仅为 PI 控制器的 50%.

4 算法仿真(Simulation)

仿真实验采用网络仿真软件 ns-2^[16]. 网络拓扑结构见图 6 所示.

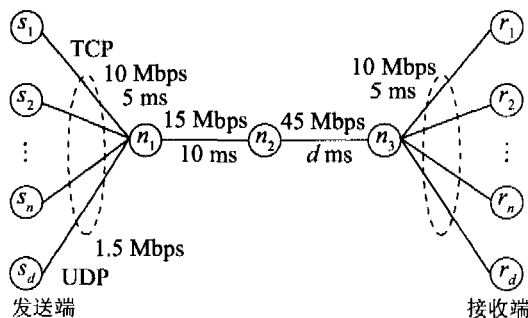


图 6 网络拓扑结构

Fig. 6 Network topology structure

$s_i (i = 1 \sim N)$ 为 TCP 应用发送端, s_d 为 UDP 应用发送端, 节点 n_1 和 n_2 之间为瓶颈链路, n_2 和 n_3 节点之间传播时延为 $d = 180$ ms, 其他节点间传播时延均为 5 ms, 则 RTT 至少为 400 ms. TCP 分组长度为 500 bytes, 各个队列容量均为 500 packets; 除瓶颈链路外, 其他链路队列管理算法均采用 DropTail 算法.

实验 1 在瓶颈链路队列上分别采用 RED, PI 和预测 PI 算法来控制队列长度, 网络参数配置为: $C = 15$ Mbps (3750 packets/s), $M = 60$, RTT = 0.4 s,

采样频率为 160 Hz. RED 高低门限值分别设为 100 packets 和 200 packets, 其他参数为默认值; PI 控制参数采用默认值, 设期望队列长度为 150 packets, 预测 PI 控制参数 $\tau = 0.42$. 图 7~9 分别描述了瓶颈链路使用 RED, PI 和 PPI 算法时队列长度曲线, 图 10 描述了瓶颈链路使用预测 PI 算法时分组丢弃概率曲线. 在网络存在较大时滞时, 使用 RED 算法队列长度剧烈变化, 使用 PI 算法队列长度变化较大, 而采用 PPI 算法队列长度变化较小, 基本围绕期望队列长度 150 packets 在 100 packets 到 200 packets 间变化, 说明 PPI 算法对时滞进行了有效补偿, 而且 PPI 控制参数可根据给定的网络参数配置和系统闭环传递函数参数 τ 易于整定. 由式(2)可得到流量控制模型平衡点为 $(W_0, q_0, p_0) = (25, 150, 0.0032)$, 通过图 10, 可以发现预测 PI 算法的队列丢弃概率约为 0.0032, 这从一个侧面验证了流量控制模型的有效性.

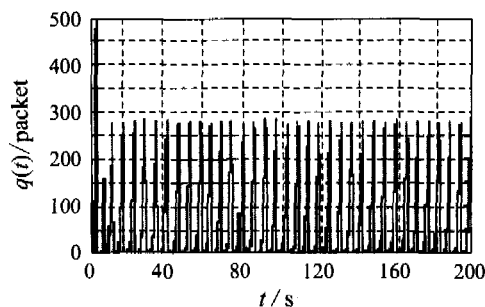


图 7 RED 算法队列长度曲线

Fig. 7 Queue length curve with RED

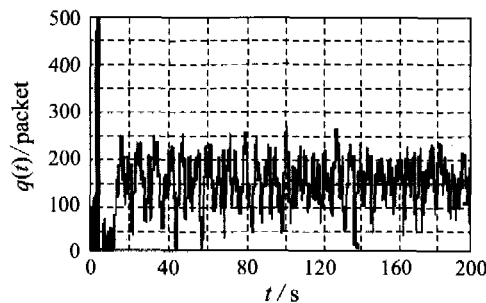


图 8 PI 算法队列长度曲线

Fig. 8 Queue length curve with PI

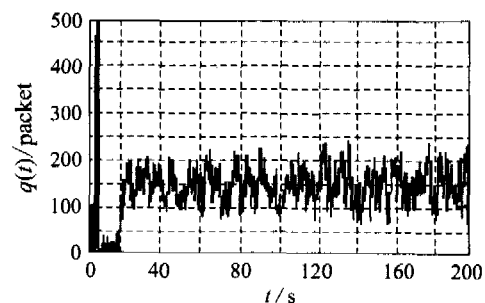


图 9 预测 PI 算法队列长度曲线

Fig. 9 Queue length curve with PPI

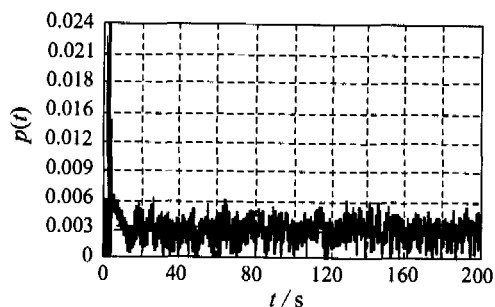


图10 预测PI算法队列丢弃概率曲线

Fig. 10 Packet drop probability curve with PPI

由表1可以发现,PPI和PI算法都达到了很高的吞吐量,但是前者稍微低于PI算法,这是因为在实验开始阶段PPI在18 s稳定,而PI算法则在16 s稳定,如何提高PPI算法的响应速度是将来研究方向之一.PPI算法的丢包率要低于PI算法,提高了数据发送效率.

表1 实验1中AQM算法性能比较

Table 1 Performance comparisons of AQM in test 1

算法	平均队列/ packets	标准差/ packets	吞吐量/ Mbps	丢弃率/ %
RED	80	110	12.060	0.53671
PI	147	44	14.564	0.34786
PPI	139	36	14.508	0.27974

实验2验证PPI算法在网络参数配置发生变化时的控制效果.PPI算法控制参数同实验1,网络参数配置每次变化一项,变化幅度为该项参数值的10%.图11为 C 和RTT不变,TCP连接数在实验开始 $T=0$ s时为 $M=60$,当 $T=60$ s时有6个TCP连接加入开始发送数据, $T=160$ s时6个TCP连接离去停止发送数据;图12为 C 和 M 不变,RTT由0.4 s变为0.44 s;图13为 M 和RTT不变, C 由15 Mbps变为13.5 Mbps;图14为 C,M 和RTT不变,存在一个UDP/CBR干扰,其发送带宽为 $D=1.5$ Mbps,在 $T=60$ s时CBR开始发送数据, $T=160$ s时CBR停止发送数据.从图11~图14可知,虽然控制参数是按照实验1的网络配置参数 C,M 和RTT设计的,但是当网络参数发生一定变化或存在干扰时,仍能够取得良好的控制效果,说明PPI算法具有较好的鲁棒性,能适应一定的网络环境变化.

由表2可知,PPI算法在保持PI算法具有较好鲁棒性特点的同时,提高了控制精度,同时具有高吞吐量和低丢包率.

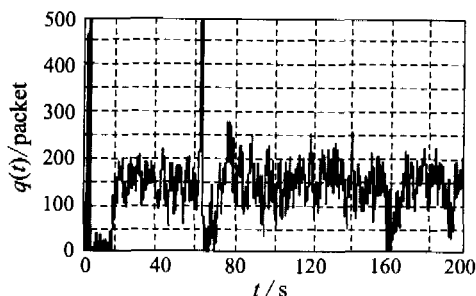


图11 TCP连接数变化时预测PI队列长度曲线

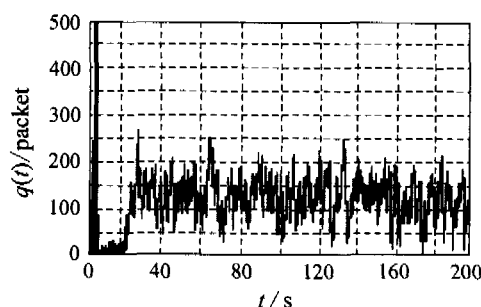
Fig. 11 Queue length curve with PPI when M changing

图12 RTT变化时预测PI队列长度曲线

Fig. 12 Queue length curve with PPI when RTT changing

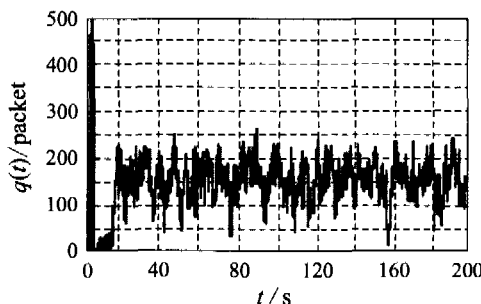


图13 链路带宽变化时预测PI队列长度曲线

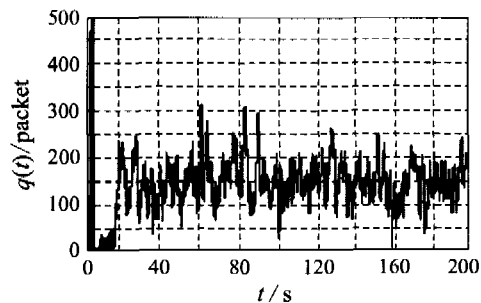
Fig. 13 Queue length curve with PPI when C changing

图14 存在干扰时预测PI队列长度曲线

Fig. 14 Queue length curve with PPI having disturbances

表2 实验2中 AQM 算法性能比较
Table 2 Performance comparisons of AQM in test 2

变化 条件	算法	平均队列/ packets	标准差/ packets	吞吐量/ Mbps	丢弃率/ %
M	PI	148	56	14.493	0.38181
	PPI	137	49	14.467	0.31373
RTT	PI	147	44	14.493	0.32703
	PPI	129	42	14.337	0.29773
C	PI	145	47	13.087	0.40227
	PPI	141	39	13.000	0.35789
CBR	PI	148	48	14.562	0.36484
	PPI	136	39	14.504	0.29139

5 结论(Conclusion)

通过在网络端引入各种 AQM 机制,大大提高了拥塞控制的性能。但是目前的许多 AQM 策略没有考虑到网络时延,导致闭环系统特征方程存在纯滞后环节,降低了系统稳定性和控制品质。本文将 Smith 预估器与 Dahlin 算法相结合,提出一种预测 PI 控制算法,既利用 Smith 预估器克服了大时滞给系统性能带来的不利影响,也减少了控制器参数整定数量。同时,利用经典控制理论方法分析了系统稳定性和存在链路容量干扰时瓶颈队列的暂态、稳态特性。仿真结果显示预测 PI 算法控制性能优于 RED, PI 算法及具有较强的鲁棒性。虽然预测 PI 控制算法能适应一定的网络参数变化,但是当网络参数变化极为剧烈时,预测 PI 控制算法的效果仍会受到较大影响,因此,预测 PI 控制参数在线整定是作者进一步的研究内容。

参考文献(References):

- [1] ALLMAN M, PAXSON V, STEVENS W. TCP congestion control [EB/OL]. IETF, 1999. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2581>.
- [2] BRADEN B, CLARK D, CROWCROFT, et al. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [EB/OL]. IETF, 1998. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2309>.
- [3] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. A control theoretic analysis of RED [C]// *Proc of the Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001)*. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Press, 2001:1510-1519.
- [4] FLOYD S, JACOBSON V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1993, 1(4): 397-413.

- [5] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(6): 945-959.
- [6] BARAKAT C. TCP/IP modeling and validation [J]. *IEEE Network*, 2001, 15(3): 38-47.
- [7] 任丰原, 林闯, 任勇, 等. 大时滞网络中的拥塞控制算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(3): 503-511.
(REN Fengyuan, LIN Chuang, REN Yong, et al. Congestion control algorithm in large-delay networks [J]. *J of Software*, 2003, 14(3): 503-511.)
- [8] MASCOLO S. Congestion control in high-speed communication networks using the Smith principle [J]. *Automatica*, 1999, 35(12): 1921-1935.
- [9] 邵惠鹤. 工业过程高级控制 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
(SHAO Huihe. *Advanced Control on Industrial Process* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1997.)
- [10] 朱晓东, 王军, 万红. 基于 Smith 预估的纯滞后系统的控制 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(1): 77-81.
(ZHU Xiaodong, WANG Jun, WAN Hong. Control of the system with pure time delay based on Smith predictive algorithm [J]. *J of Zhengzhou University(Engineering Science)*, 2004, 25(1): 77-81.)
- [11] MISRA V, TOWSLEY D, GONG W. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED [C]// *Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (ACM SIGCOMM 2000)*. Stockholm, Sweden: ACM Press, 2000.
- [12] WALTON K, MARSHALL J E. Direct method for TDS stability analysis [J]. *IEE Proc: Part D*, 1987, 143(2): 101-107.
- [13] CAVENDISH D, GERLA M, MASCOLO S. A control theoretical approach to congestion control in packet networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2004, 12(5): 893-906.
- [14] HAGGLUND T. A predictive PI controller for processed with long dead times [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1992, 12(1): 57-60.
- [15] HAGGLUND T, ASTROEM K J. Industrial adaptive controllers based on frequency response techniques [J]. *Automatica*, 1991, 27(4): 599-609.
- [16] UCN/LBL/VINT. Network simulator-ns2 [CP/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 1995.

作者简介:

钱艳平 (1975—), 男, 博士研究生, 研究领域为网络拥塞控制、智能控制等, E-mail: qyp_wxf@163.com;

李 奇 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为网络拥塞控制、智能控制、最优控制等, E-mail: liq_kj@js.gov.cn;

刁 翔 (1973—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络服务质量、网络流量控制等, E-mail: dxcnjs@163.com.