

一种时滞网络自适应主动队列管理算法研究

孙雁飞^① 张顺颐^① 王攀^① 周雷^② 石进^③

^①(南京邮电大学江苏省通信与网络技术工程研究中心 南京 210003)

^②(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

^③(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

摘要 主动队列管理(AQM)算法的自适应能力和克服滞后性不良影响的能力是本文研究的重点。在分析 AQM 采用传统 PID 存在的问题的基础上,提出了一种时滞网络的自适应主动队列管理(FAGPID)算法。由模糊控制器实现 PID 参数对动态网络环境的在线自适应调整;成功引入灰预测算法实现反馈数据的超前预测,补偿滞后。仿真对比 AQM 环境中 FAGPID,传统 PID 以及基于模糊免疫 PID(FIGPID)的算法,可知 FAGPID 相对于 FIGPID 复杂度低,但 FAGPID 与 FIGPID 性能相当,均能克服滞后的影响,能快速稳定地适应动态网络环境,收敛于期望队列长度,具有较小的丢包率,优于传统 PID 算法。

关键词 主动队列管理,时滞网络,模糊自适应, PID 控制,灰预测

中图分类号: TP393.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1940-06

Research on Active Queue Management of Delay Network Based on Adaptive Control

Sun Yan-fei^① Zhang Shun-yi^① Wang Pan^① Zhou Lei^② Shi Jin^③

^①(Jiangsu Province Eng. Research Center of Telecomm. & Network Tech.,
Nanjing Univ. of Posts and Telecomm., Nanjing 210003, China)

^②(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(State Key Lab. of Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Enhancing Active Queue Management (AQM) algorithm's self-adapting and overcoming network delay's poor effect are research emphases. After analyzing traditional PID control algorithm's limitation, a novel active queue management algorithm for delay network based on Fuzzy Adaptive PID control and Gray-prediction (FAGPID) is proposed, which can achieve PID parameters' on-line self-adapting by fuzzy control under the dynamic delay network circumstances. And, a gray-prediction algorithm is successfully introduced into feedback data's advanced prediction to compensate delay. Contrasted with traditional PID and FIGPID (Fuzzy Immue Gray-prediction PID) by simulations, FAGPID has equivalent performance to FIGPID and has better performance than traditional PID control. Both FAGPID and FIGPID can converge to queue size-setting value rapidly and stably, and get lesser packets loss rate, but FAGPID's algorithm complexity is lower.

Key words Active Queue Management(AQM), Delay network, Fuzzy self-adapting, PID control, Gray-prediction

1 引言

拥塞控制领域对主动队列管理算法(Active Queue Management, AQM)研究的关注始于随机早期检测算法(RED)的提出^[1]。AQM的主要技术目标是在减少排队时延的同时保证较高的吞吐量^[2]。PI控制器是Hollot等人对AQM的非线性模型^[3]进行局部线性化处理后成功引入的基于自动控制理论的AQM算法。文献[4,5]在PI基础上提出了PID控制算法,取得了比RED以及PI控制器相对理想的控制性能。但无论是RED算法还是PI, PID算法,因缺乏自适应机制,在某种网络参数下的最优参数,在另一种网络参数下可能变差。API算法^[6]就是在PI基础上考虑提高控制器的自适应性能,其它

关于PID控制自适应性^[7,8]的研究也在大量进行中。绝大多数现有AQM算法在设计时忽略了网络响应的滞后性,而控制理论的研究表明,系统稳定性或鲁棒性对滞后环节非常敏感,这势必给主动队列管理算法的性能带来不良影响^[9]。近来,文献[10-13]考虑网络时滞状况进行研究,取得了一些可以借鉴的成果。如何克服或补偿滞后对AQM算法的影响并自适应网络动态变化来获得AQM算法良好的网络控制性能是一个需要关注的热点问题,本文以此为出发点开展了如下研究工作。

本文结构安排如下:第2节介绍TCP/AQM的控制理论模型;第3节分析基于固定参数的传统PID用于AQM存在的问题;第4节提出基于模糊PID的时滞网络自适应AQM算法,主要引入模糊控制思想实现PID控制器参数的在线自整定和引入灰度预测理论克服时间滞后性;第5节分析相关

的模糊免疫 PID(FIGPID)算法；第 6 节进行算法的仿真和性能评价；第 7 节则对论文进行了总结。

2 TCP/AQM 控制理论模型

TCP 采用 AQM 算法的动态流量控制可以用如图 1 所示的反馈控制系统模型来表示。

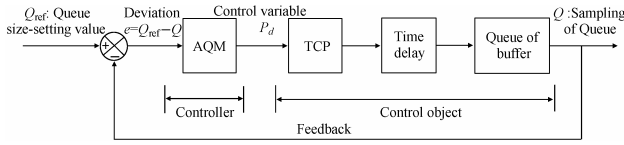


图 1 采用 AQM 算法的 TCP 反馈控制模型
Fig.1 TCP feedback control model based on AQM

模型中， Q_{ref} 表示队列长度期望值(控制系统设定值)， Q 表示路由器中队列长度(控制系统中被控对象采样变量，即系统反馈变量)，控制对象为 TCP 发送端、路由器和 TCP 接收端，表示对数据包的发送、转发处理和接收的综合过程。 P_d 表示数据包的丢弃率，为控制器 AQM 控制算法产生的控制量，用来控制路由器队列的包到达率。控制器的输入变量为偏差 e ， $e=Q_{ref}-Q$ 。

文献[3]给出了图 1 所示系统的时滞二阶模型：

$$G_o(s) = \frac{[(RC)^3 / (4N^2)] e^{-Rs}}{(Rs+1)[(R^2C)s / (2N) + 1]} \quad (1)$$

式中 C 表示链路容量(packet/s)， R 表示往返时间(RTT)， N 表示激活的 TCP 会话数。

该模型将 AQM 算法的设计近似地转化为典型的时变滞后后系统的控制器设计问题。控制的目标^[14]是通过控制相应的数据包丢弃率，使路由器缓存中的队列长度稳定在设定值 Q_{ref} 附近。 Q_{ref} 取值不能太小，以免引起链路空闲，降低资源利用率；也不能太大，否则数据包在缓存中排队时间长，将增加端到端延迟。此外，系统的瞬态响应要快，振荡小，受控参数超调量低，以及算法的参数要具有鲁棒性，能适应网络动态变化和扰动的影响。

3 基于固定参数的传统 PID 用于主动队列管理存在的问题

文献[4]等提出了基于传统 PID 控制的主动队列管理方案，可以用图 2 的框图来表示。

路由器队列为一个典型的离散系统，该方案对 PID 控制算法进行必要的离散化处理，得到离散的 PID 控制表达式为

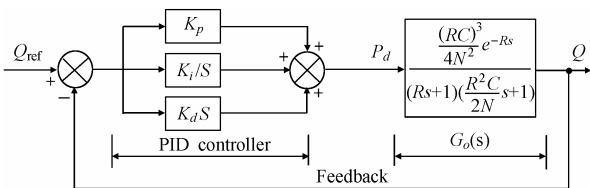


图 2 TCP 拥塞控制框图
Fig.2 Block diagram of TCP congestion control

$$P_d(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \left\{ \frac{[e(k) - e(k-1)]}{T} \right\} \quad (2)$$

表示为增量形式：

$$\Delta P_d(k) = K_p \left\{ \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right\} \quad (3)$$

其中 $e(k) = Q(k) - Q_{ref}$ ， $T_i = K_p / K_i$ ， $T_d = K_d / K_p$ ， T 为采样时间。

该 PID 采用的是固定参数的算法设计方法，其控制器参数 K_p 、 K_i 、 K_d 一经初始整定完毕将固定不变。而 Internet 流量是经常频繁变化的，而且难以预测，如网络参数 TCP 流的数目、往返时间等等都难以准确估计和预测。复杂网络环境下，这种设计方法不能及时有效地适应网络的动态变化和保证稳定的控制。本文提出的算法就是在 PID 进行常规参数整定的基础上引入在线模糊参数整定技术，使 PID 控制器能够自适应跟踪网络环境动态变化。

4 时滞网络自适应主动队列管理算法 FAGPID

针对传统 PID 控制存在的问题，提出了一种基于模糊 PID 自适应的主动队列管理新算法。该算法控制框图如图 3 所示，主要包括两部分：一是控制系统反馈数据的灰预测，克服网络数据反馈的时间滞后性；二是 PID 控制器参数的模糊在线自整定。

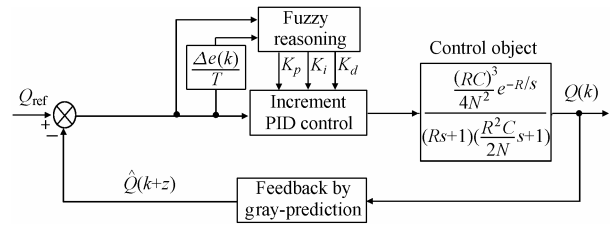


图 3 基于灰预测和模糊 PID 的自适应主动队列管理框图
Fig.3 Block diagram of adaptive AQM based on gray-prediction and fuzzy PID

4.1 控制器反馈数据的灰预测

主动队列管理过程中存在的大滞后现象，即式(2)中的偏差由以前时刻的网络状况获得，而要用它去控制当前的网络状态。如果能够提前预见当前时刻网络可能出现的偏差，对其采取适当的控制措施，则控制效果势必会更好。

本文借鉴文献[15]的方法，采用基于灰预测理论的预测器来实现图 3 控制方案中反馈数据(路由器中队列长度)的在线提前 z 步预测，来解决控制方案中控制反馈不及时的问题。

灰色预测模型能够根据网络少量信息进行计算和推测，不需要掌握所控制对象的先验信息，具有很强的自适应性。通常采用的 GM(1,1)模型仅根据控制系统实际反馈输出(路由器中主动队列队长)的离散值进行预测，且仅需辨识两个参数。灰色预测的超前步数可根据被控对象进行调整，参数在

控制过程中不断进行辨识和修正，特别适合于在线实时控制。

灰色预测就是建立在 GM(1,1)模型基础上，对系统 $k+z$ 时刻的输出进行预测。为了不断把进入系统的扰动和变动(如网络负载变化、突发业务的进入等等)考虑进 GM(1,1)，重建 GM(1,1)，重新预测，建立新息过程(新息序列带来了过去序列所没有的新的信息)模型。同时防止数据的膨胀，在每补充一个新信息的同时去掉一个老信息，以便在滚动建模时维持数据个数 m 不变。

对于队列长度的灰预测系统而言，是单输入单输出系统，对应图 3，设其输入输出序列如下：

$$Q = [Q^{(0)}(1), Q^{(0)}(2), \dots, Q^{(0)}(m)] \quad (4)$$

$$\bar{Q} = [\bar{Q}^{(0)}(1), \bar{Q}^{(0)}(2), \dots, \bar{Q}^{(0)}(m)] \quad (5)$$

对以上数据序列进行生成累加，可以大大弱化随机干扰的影响，从而得到一次生成数据列：

$$Q^{(1)}(i) = \sum_{n=1}^i Q^{(0)}(n), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\bar{Q}^{(1)}(i) = \sum_{n=1}^i \bar{Q}^{(0)}(n), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

系数 a_g, b_g 可用下式进行估计：

$$\begin{bmatrix} a_g \\ b_g \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.5(\bar{Q}^{(1)}(1) + \bar{Q}^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(\bar{Q}^{(1)}(2) + \bar{Q}^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5(\bar{Q}^{(1)}(m-1) + \bar{Q}^{(1)}(m)) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y} = [\bar{Q}^{(0)}(2), \bar{Q}^{(0)}(3), \dots, \bar{Q}^{(0)}(m)] \quad (10)$$

得到 $k+z$ 时刻的预测为

$$\bar{Q}^{(0)}(k+z) = \left[Q^{(0)}(k) - \frac{a_g}{b_g} \right] e^{-a_g z} (1 - e^{-a_g}) \quad (11)$$

式中 k 为采样时刻， m 为建模维数(每一时刻参与预测数据数)， a_g, b_g 为 k 时刻辨识所得参数， z 为预报步数。一般来说网络滞后时间越大，采样时间越短，则预测步数越大，建模维数越大。

4.2 PID 控制器参数的模糊在线自整定策略

在实现反馈数据提前预测的基础上，采用模糊PID控制器来进行主动队列控制。本文所采用的模糊PID控制器基本思想^[16]是：运用模糊数学的基本理论和方法，在模糊控制器中把规则的条件和操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始PID参数等)作为知识存入网元设备知识库中，然后网元设备根据控制系统实际响应状况运用模糊推理，自动实现对PID参数的在线最佳自调整。

如图 3 所示，队列偏差 $e, e(k) = Q_{ref} - \hat{Q}(k+z), \hat{Q}(k+z)$ 为多步预测得到的队列长度(系统反馈变量)； $ec(k) = e(k) - e(k-1)$ ，即两个时刻之间误差的变化，将 $e(k), ec(k)$ 简记为 e, ec 。以误差 e 和误差变化 ec 作为二维模糊控制器(如

图 3 模糊推理模块所示)的输入，输出为根据实时网络状况需对 3 个参数进行实时调整的变化量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 。如图 4 所示，在实际运行中通过不断地监测 e 和 ec ，根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线自动调整。

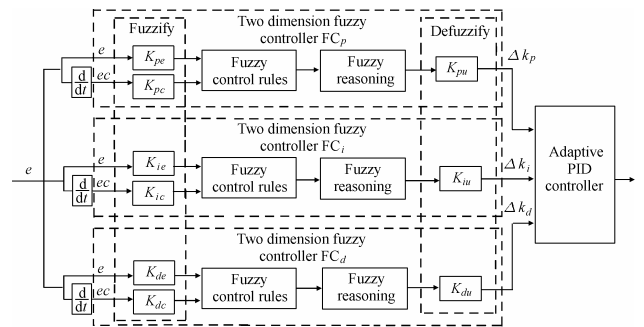


图 4 二维模糊控制器实现 PID 参数调整框图
Fig.4 Block diagram of PID parameters' adjusting by two dimension fuzzy controller

网络系统是一个复杂的敏感的系统，在进行模糊论域和模糊子集选择时，适当地增加了元素的个数，主要考虑使它分布合理，较好地覆盖整个论域。将系统的误差 e 和误差变化 ec 的变化范围定义为模糊集上的论域：

$$e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$$

其模糊子集为 $E, EC = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。 e 和 ec 的基本论域设为 $[e_a, e_b], [ec_a, ec_b]$ 。3 个二维模糊控制器的输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ ，取其论域和模糊子集也均为 $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 和 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，基本论域分别为 $[\Delta k_{pa}, \Delta k_{pb}], [\Delta k_{ia}, \Delta k_{ib}], [\Delta k_{da}, \Delta k_{db}]$ 。各个模糊语言变量隶属度函数均为正态型

$\mu(x) = e^{-((x-a)/b)^2}$ ，可以得到各模糊子集的隶属度赋值和各参数模糊控制模型。基本论域的选择是很关键的，要根据网络状况进行相应的设定。

另一个重要设计是建立合适的模糊控制规则表。考虑到主动队列控制系统的瞬态响应要快，振荡要小，受控参数超调量要低，具有较好的鲁棒性，采用了经典的模糊控制规则^[16]并根据主动队列的实际情况和 3 个变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 对控制系统的影响情况做了一些修改，实际采用的模糊规则如表 1，表 2，表 3 所示。

应用模糊合成推理，得到PID参数 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊矩阵表，按照最大隶属度原则进行解模糊化，查出修正参数，并代入下式计算得到：

表 1 Δk_p 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rules of Δk_p

ec	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB	NB

表 2 ΔK_i 模糊规则表
Tab.2 Fuzzy rules of ΔK_i

	<i>ec</i>	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
<i>e</i>	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 Δk_d 模糊规则表
Tab.3 Fuzzy rules of Δk_d

	<i>ec</i>	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
<i>e</i>	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

$$k_p(k) = k_p(k-1) + \Delta k_{p|e_i, ec_i}(k-1) \quad (12)$$

$$k_i(k) = k_i(k-1) + \Delta k_{i|e_i, ec_i}(k-1) \quad (13)$$

$$k_d(k) = k_d(k-1) + \Delta k_{d|e_i, ec_i}(k-1) \quad (14)$$

在算法实际的执行过程中，只要查询 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的输出响应表并通过式(12)–(14)可以获得在线实时更新的PID控制器参数，不用实时地重复整个模糊推理过程。模糊推理在模糊控制器投入在线实时运行之前就已经执行完毕，形成供查询的3个输出响应表存储在网元设备或存储设备中。这样可以减小算法的复杂度，缩短运行时间，适合实时控制的需要。

若把 $k_p(k)$ 、 $k_i(k)$ 、 $k_d(k)$ 分别简写为 k_p 、 k_i 、 k_d ，根据模糊PID控制理论，得到自适应主动队列管理数据包丢弃率的调节公式

$$\Delta P_d(k) = K_p \left\{ \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right\} \quad (15)$$

其中 $e(k) = Q_{ref} - Q(k)$ ， $T_i = K_p / K_i$ ， $T_d = K_d / K_p$ ， T 为采样时间。

4.3 时滞网络自适应主动队列管理算法 FAGPID

开始：

步骤 1 根据网络状况，进行PID控制参数 k_p 、 k_i 、 k_d 初始化整定，设定队列的期望值 Q_{ref} ，采样时间 T 以及设定二阶滞后模型(式(1)所示)的相关参数。

步骤 2 确定 e, ec 和 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的论域，基本论域和模糊子集；以阶跃输入调整的方法获得图 4 所示模糊控制器的调整因子；对正态型隶属函数参数 a, b 确定取值。

步骤 3 按照 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊规则表，经过模糊推理(决策)得到相应模糊矩阵表，并解模糊化得到输出响应表，

存储入网元设备或存储设备。

步骤 4 设定在线等维更新灰预测器的建模维数 m 和预测步数 z ，启动预测器处于等待状态。

步骤 5 启动队列监测模块，令 $k=1$ ，实时采样当前队列长度 $Q(k)$ ，计算控制器的反馈数据值。

当采样时刻 $k < m$ 时，以实际采样队列长度 $Q(k)$ 作为预测的反馈数据，令 $\hat{Q}(k+z) = Q(k)$ ；当采样时刻 $k \geq m$ 时，启动灰预测器根据式(4)–式(11)进行等维更新预测，得到 $\hat{Q}(k+z)$ 值。

步骤 6 计算 $e(k) = Q_{ref} - \hat{Q}(k+z)$ ， $ec(k) = e(k) - e(k-1)$ ，令 $e(k-1) = e(k)$ 。

步骤 7 $e(k)$ 、 $ec(k)$ 模糊化，查输出响应表，得到修正量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 并根据式(12)–式(14)计算PI控制器当前在线参数 k_p, k_i, k_d 。

步骤 8 根据式(15)计算数据包丢弃率的增量 $\Delta P_d(k)$ ， $P_d(k) = P_d(k-1) + \Delta P_d(k)$ ，根据 $P_d(k)$ 进行队列管理，令 $k=k+1$ ，转步骤 5。

结束。

5 相关算法对比分析

我们在相关论文提出了基于灰预测和模糊免疫自适应PID控制的时滞网络主动队列管理算法(FIGPID)，对算法进行了仿真分析。FIGPID能很好地克服时滞和实现在线自适应PID参数调整，但该算法的PID自适应调整部分算法较为复杂。FAGPID算法是对FIGPID的改进，旨在使两个算法在获得相当的控制性能的基础上，FAGPID算法复杂度降低，以便更加适合复杂网络环境实时控制的需要并且易于实现。

FIGPID算法中，模糊免疫PID控制器的输出的数据包丢弃率为

$$P_d(k) = K_{p_1} e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \left\{ \frac{[e(k) - e(k-1)]}{T} \right\} \quad (16)$$

写为增量形式，即

$$\Delta P_d(k) = K_{p_1} \left\{ \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right\} \quad (17)$$

$$= Ae(k) + Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (18)$$

其中 $A = K_{p_1} \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$ ， $B = -K_{p_1} \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right)$ ， $C = K_{p_1} \frac{T_d}{T}$ ；

比例系数 $k_{p_1} = K(1 - \eta f(P_d(k), \Delta P_d(k)))$ 随控制器输出的变化而变化，参数 K 控制反应速度，参数 η 控制稳定效果。

该算法对传统PID进行自适应调整借鉴了免疫思想，采用的是二维全论域范围内带有自调整因子的模糊规则自调整方法进行免疫PID控制中免疫抑制量 $f(P_d(k), \Delta P_d(k))$ 的模糊非线性逼近。在这种方式下，以动态变化的数据包丢弃率 $P_d(k)$ 和丢弃率的增量 $\Delta P_d(k)$ 作为逼近器的输入，模糊逼近器

根据网络多次动态变化的数据进行智能自学习和模糊规则的自调整, 获得符合网络实际状况的输出结果, 即免疫反馈函数 $f(P_d(k), \Delta P_d(k))$ 。 $P_d(k)$, $\Delta P_d(k)$ 和 $f(P_d(k), \Delta P_d(k))$, 对应的模糊变量分别为 P , PC , F , 论域均取为 $[-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]$, 模糊规则表示为

$$F = - < \beta P + (1 - \beta) PC > \left. \begin{array}{l} \\ \beta = \frac{1}{4}(\beta_s - \beta_0)|P| + \beta_0 \end{array} \right\} \quad (19)$$

式中 $0 \leq \beta_0 \leq \beta_s \leq 1$, $\beta \in [\beta_0, \beta_s]$, 模糊规则按模糊变量 P 的大小在线自动调整其对控制作用的权重, 符合人在决策过程中的思维特点, 而且非常易于实现。

6 算法仿真及性能评价

6.1 仿真拓扑及环境设置

仿真中使用了如图 5 所示的简单瓶颈链路的哑铃网络拓扑。网络包括 2 个路由器 R1、R2 和 n 个 TCP 源端和逻辑上连接的 n 个目的端。每个源端或目的端到路由器链路速率为 50Mbps, 链路时延在 5ms 至 200ms 范围内, 均假设具有足够的缓冲器并使用 DropTail 队列。两个路由器之间为瓶颈链路, 链路缓冲器最大容量 800packets, 使用 AQM 队列管理算法, 链路速率 30Mbps, 时延 20ms。TCP 源端包含 $N1$ 个持久的 FTP 业务连接, $N2$ 个突发而短暂的 HTTP 业务连接(每个连接 10 个会话)和 $N3$ 个非弹性的 UDP 业务源(指数服务模型, 空闲和突发时间均为 1s,“ON”期间的业务速率为 40kps)。

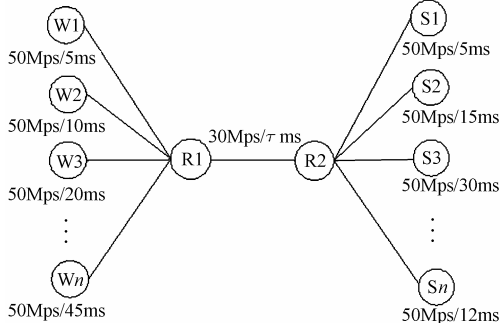


图 5 仿真网络拓扑

Fig.5 Network topology for simulation

传统 PID 算法与 RED, PI 算法的主动队列控制性能比较在文献[4,5]中有详细的论述, PID 在实现主动队列管理时有其相对明显的优势。在本文仿真中, 我们对 FAGPID 算法同 FIGPID 算法和传统 PID 的主动队列管理算法在时滞网络环境下进行了控制性能比较分析。

FAGPID 算法中, 队长期望值 $Q_{ref}=200$ packet, 经整定得到 PID 控制器的初始参数 $k_p=4.75 \times 10^{-5}$, $k_i=1.74 \times 10^{-5}$, $k_d=8.37 \times 10^{-6}$, 采样时间 $T=0.033s$, 偏差 e 的论域为 $[-200, 200]$ packet, 偏差变化 ec 的论域为 $[-100, 100]$, 3 个输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的论域分别为 $[-1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-5}]$, $[-5 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}]$, $[-2 \times 10^{-6}, 2 \times 10^{-6}]$ 。经过仿真调整, 模糊控制器 FC_p 的 3 个调整因子 k_{pe}, k_{pi}, k_{pid} 分别为 $2.65 \times 10^{-2}, 5.43 \times 10^{-2}, 4.47 \times 10^5$; 模糊控制器 FC_i 的 3 个调整因子 k_{ie}, k_{ic}, k_{iui} 分别为 $2.65 \times 10^{-2},$

$5.43 \times 10^{-2}, 1.08 \times 10^6$; 模糊控制器 FC_d 的 3 个调整因子 k_{de}, k_{dc}, k_{du} 分别为 $2.65 \times 10^{-2}, 5.43 \times 10^{-2}, 2.42 \times 10^5$; 正态型隶属函数参数 a, b 分别取为 0,1。灰预测时 $z=8, m=10$ 。

FIGPID 算法中, 经整定得到 PID 控制器的初始参数与 FAGPID 相同; 队长期望值 $Q_{ref}=200$ packet, 经过多次仿真调整, 免疫反馈中参数 $K=0.3, \eta=0.8$, 采样时间 $T=0.033s$, k_{p1} 初值为 0.3。设免疫 PID 控制器输出 P_d 的基本论域是 $[0, 0.4]$, 输出变化 ΔP_d 的基本论域是 $[-0.15, 0.15]$, $\beta_s=0.80, \beta_0=0.35$, 输出变量是抑制量 $f[P_d, \Delta P_d]$ 的基本论域, 设选为 $[0, 1]$ 。灰预测时 $z=8, m=10$ 。

6.2 大时滞动态环境下控制性能仿真及对比分析

文献[4]等的网络仿真环境下, 时延一般取为 30ms 左右, 相对于这些仿真, 本文仿真时延均取为 250ms, 理解为大时滞环境。仿真中考虑随着业务类型加入与退出而更加接近实际的动态的网络环境, 业务流为 FTP, HTTP 和 UDP 的混合。引入 HTTP, UDP 旨在说明控制器算法对弹性的突发扰动性业务和非弹性突发业务两类网络噪声干扰的自适应情况。

假定在 $N1=50, N2=80, N3=20$ 的网络配置下进行仿真, 考虑仿真的过程中一直有 50 个 FTP 连接业务的存在, 在 55s 时加入 80 次 HTTP 业务连接, 65s 时结束 HTTP 业务连接, 继而在 100s 时加入 UDP 业务, 在 110s 时结束 UDP 业务。AQM 控制器分别采用传统 PID, FAGPID 和 FIGPID 算法, 得到仿真结果分别如图 6, 图 7 和图 8 所示。仿真表明, 传统 PID 控制对网络变化适应能力不足, 网络噪声干扰对控制器稳定性影响较大, 瞬时队列长度在 200packet 上下出现了较大的波动, 甚至出现了振荡, 丢包率也较高。而 FAGPID 算法则在抵抗干扰方面表现出了良好的性能, 既保持了较快的动态响应时间, 也表现出了良好的稳定性, 在两类业务干扰到来时, 动态队列能快速低超调地趋近于期望值 200packet。丢包率受干扰影响也较小, 保持了较低的值。FAGPID 算法能很好地自适应地克服大时滞环境噪声干扰带来的问题。FIGPID 则无论在队列长度变化还是在丢包率方面, 都和 FAGPID 算法控制性能大体相当, 但在算法复杂度方面要高于 FAGPID。所以从算法的整体性能而言, FAGPID 是解决大时滞动态网络环境主动队列管理的一个相对易于实现的有效算法。

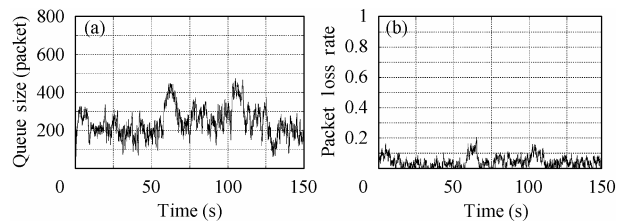


图 6 负载 $N1=50, N2=80, N3=20$ 时传统 PID 控制仿真结果
(a) 队列长度动态变化 (b) 丢包率

Fig.6 Simulation of traditional PID control

when $N1=50, N2=80, N3=20$

(a) Dynamic change of queue size (b) Packet loss rate

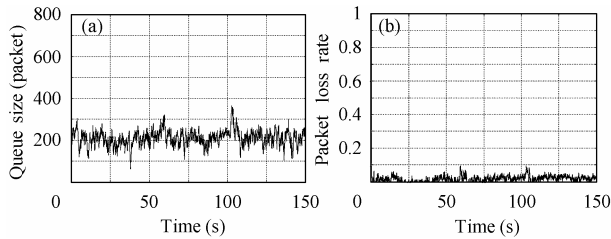


图 7 负载 $N1=50, N2=80, N3=20$ 时传统 FAGPID 控制仿真结果
(a) 队列长度动态变化 (b) 丢包率

Fig.7 Simulation of FAGPID control

when $N1=50, N2=80, N3=20$

(a) Dynamic change of queue size (b) Packet loss rate

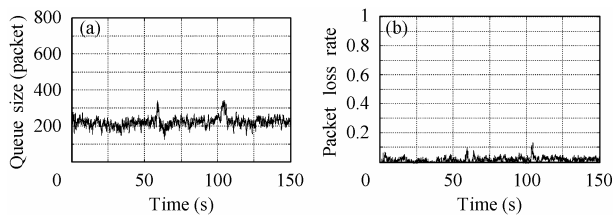


图 8 负载 $N1=50, N2=80, N3=20$ 时 FIGPID 控制仿真结果
(a) 队列长度动态变化 (b) 丢包率

Fig.8 Simulation of FIGPID control when $N1=50, N2=80, N3=20$

(a) Dynamic change of queue size (b) Packet loss rate

7 结束语

已有的多数 AQM 算法在设计的过程中没有考虑时滞的影响, 而且在动态时变的非线性网络环境下, 算法自适应能力不足。因此, 本文提出了一种时滞网络自适应主动队列管理算法 FAGPID, 根据网络实时变化状况, 既借助模糊理论实现了主动队列管理 PID 控制的在线自适应, 又借助灰预测理论一定程度上解决了网络滞后性问题。此外, 我们还通过仿真分析了 FAGPID 算法相对于传统 PID 算法和另外一种自适应算法 FIGPID 的改进和有效性。该算法性能优于传统 PID, 能稳定地适应网络环境变化, 超调量小, 振荡轻微, 快速收敛于队列长度期望值, 同时具有较小的丢包率, 获得了与算法 FIGPID 大体相当的控制性能, 但算法复杂度得到了降低。该算法适合复杂网络环境的在线实时控制, 是智能控制理论在计算机网络 QoS 控制环境应用的一个很好的探索和实践。

参考文献

- [1] Athuraliya S. A note on parameter values of REM with Reno-like algorithms. <http://netlab.caltech.edu>, March 2002.
- [2] Braden B, et al.. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet[S]. RFC 2309, 1998.
- [3] Misra V, et al.. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED [A]. In: ACM SIGCOMM 2000. Stockholm, Sweden, 2000:151-160.
- [4] 任丰原, 等. 主动队列管理中控制器的设计[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(1): 94-99.
- [5] Ryu S, Rump C. Design of load-adaptive queue management for Internet congestion control [A]. In: ICOIN 2003, Cheju Island, Korea: 24-34.
- [6] Wang Chonggang, et al.. API: Adaptive Proportional-Integral algorithm for active queue management under dynamic[A]. In: HPSR2004, Phoenix, Arizona: 51-55.
- [7] Deng Xidong, et al.. A control theoretic approach for designing adaptive AQM schemes [A]. GLOBECOM 2003, San Francisco, California. IEEE, Vol.5: 2947-2951.
- [8] Ryu S, et al.. A predictive and robust active queue management for Internet congestion control [A]. ISCC 2003, Kemer -Antalya, Turkey. vol.2: 991-998.
- [9] 林闯, 等. 计算机网络的服务质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 73-100.
- [10] Johari R, Tan D. End-to-end congestion control for the Internet: Delays and stability [J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2001, 9(6): 818-832.
- [11] Massoulié L. Stability of distributed congestion control with heterogeneous feedback delays [J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002, 47(6): 895-902.
- [12] Ying L, et al.. Global stability of Internet congestion control with heterogeneous delays [A]. American Control Conference 2004, Boston.2948-2952.
- [13] 任丰原, 等. 大时滞网络中的拥塞控制算法[J]. 软件学报, 2003, 4(3): 503-511.
- [14] 陈尚兵, 等. IP 网络中积极队列管理综述[J]. 信息与控制, 2003, 32(1): 51-55, 81.
- [15] 刘红军, 等. 灰色预测模糊 PID 控制在汽温控制系统中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1839-1841, 1848.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [17] 李士勇. 模糊控制-神经网络和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 254-341.

孙雁飞: 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 研究方向为网络性能监测与优化、IP 网络 QoS 监测、控制与管理。

张颀颐: 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会通信分会理事, 中国通信学会通信软件分会理事, 国家 863 通信主题高速宽带通信技术经济专家组成员, 华东高校计算机基础教学研究分会名誉理事, 曾被聘为江苏省信息化建设领导小组办公室专家组成员, 江苏省信息化规划建设领导小组专家组成员; 主要研究方向为计算机通信网及 IP 技术。

王攀: 男, 1979 年生, 讲师, 研究方向为计算机通信网络、网络性能监测与优化。

周雷: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为宽带通信关键技术。

石进: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为计算机系统结构、计算机网络体系结构。