

TCP/AWM网络系统的事件触发预设性能拥塞控制

谢海修, 井元伟[†]

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 研究了具有非响应用户数据报协议流干扰的TCP/AWM网络系统的跟踪控制问题. 针对网络拥塞控制系统, 给出了一种改进的网络模型. 将预设性能控制和事件触发机制相结合, 提出了一种新的AWM拥塞控制算法. 利用改进的边界性能函数限制TCP/AWM网络系统的队列跟踪误差, 提高了闭环系统的暂态和稳态性能, 保证了所有闭环信号都是有界的. 此外, 采用基于一位信号传输的事件触发控制协议, 当控制信号更新时, 仅通过一个二进制信号(0或1)传输信息. 与传统的事件触发控制协议相比, 不仅考虑了有限的带宽, 而且考虑了网络传输的成本以及安全性问题. 最后, 通过仿真验证和分析, 证明了所提方法的可行性和优越性.

关键词: TCP/AWM网络; 拥塞控制; 预设性能控制; 事件触发控制; 一位信号传输

引用格式: 谢海修, 井元伟. TCP/AWM网络系统的事件触发预设性能拥塞控制. 控制理论与应用, 2023, 40(3): 450 – 458

DOI: 10.7641/CTA.2022.10957

Event-triggered prescribed performance congestion control for TCP/AWM network system

XIE Hai-xiu, JING Yuan-wei[†]

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: The tracking control problem for the TCP/AWM network system with nonresponsive user datagram protocol flows is studied. A modified network model is given for network congestion control system. With the aid of prescribed performance control and event-triggered mechanism, a novel AWM congestion control algorithm is proposed. The queue tracking error of the TCP/AWM network system is limited by an improved boundary performance function, which improves both the transient and steady state performance of the closed-loop system, and guarantees that all closed-loop signals are bounded. Besides, the event-triggered control protocol based on 1-bit signal transmission only requires a binary signal (0 or 1) to transmit information when control signal is updated. Compared with the traditional event-triggered control protocol, this protocol considers not only the limited bandwidth, but also the cost and security of network transmission. Finally, a simulation result is shown to clarify the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

Key words: TCP/AWM network; congestion control; prescribed performance control; event-triggered control; 1-bit signal transmission

Citation: XIE Haixiu, JING Yuanwei. Event-triggered prescribed performance congestion control for TCP/AWM network system. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(3): 450 – 458

1 引言

随着网络规模日趋庞大, 网络拥塞也日益严重. 如何避免网络拥塞, 提升网络性能成为传输控制协议 (transfer control protocol, TCP) 网络领域研究的热点问题. 目前, 将TCP协议和路由器主动队列管理 (active queue management, AQM) 算法结合, 是解决网络拥塞问题的一种有效的方法. 在网络中应用AQM算法具有降低丢包率、提高链路利用率、减少网络传输时

延、抑制速率振荡等优点, 极大地提高了网络的服务质量^[1].

在过去的三十年间, 针对网络拥塞问题提出了大量的解决方案^[2–13], 其中, 基于路由器的AQM算法已成为TCP网络拥塞控制中应用最广泛的解决方案之一^[2]. 当网络中发生拥塞时, 一方面, AQM算法可以快速探测到拥塞的发生并且提供有效的反馈机制; 另一方面, 其在数据包溢出之前就进行了随机丢弃的选择,

收稿日期: 2021–10–09; 录用日期: 2022–04–15.

[†]通信作者. E-mail: ywjjing@mail.neu.edu.cn; Tel.: +86 24-83684583.

本文责任编辑: 俞立.

国家自然科学基金项目(61773108)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61773108).

克服了弃尾(drop tail)策略所引起的全局同步现象,提高了数据传输的公平性^[3]。随机早期检测(random early detection, RED)是首个在TCP网络中应用的AQ M算法,但是其性能对参数变化比较敏感^[4]。因此,针对RED算法的局限性,许多研究者对其进行了改进,随之产生了诸多基于RED的改进算法,如基于损失率的RED(loss ratio based RED, LRED)^[5], BLACK^[6], BLUE^[7]等。虽然改进的RED算法在不同程度上提高了网络性能,但均缺少理论模型的支撑。在2000年, Misra等人^[8]基于流体流理论建立了TCP网络的非线性动态模型。到目前为止,在该模型的基础上,已经取得了许多解决网络拥塞问题的方法。这些算法主要从线性控制理论^[9-10]和非线性控制理论^[11-13]两方面进行设计。

然而, AQ M机制无法直接控制源端的发送速率,只能通过丢包间接地控制数据端的发送速率。但是,这将使得发送窗口急剧地减小,增加了稳定队列的难度。为解决上述不足, Barbera等人^[14]提出了一种叫做主动窗口管理(active window management, AWM)的新机制。这种方法不需要修改源端的拥塞算法,同时可以直接控制发送窗口的大小,避免了发送速率的突变。随后,文献[15-17]对AWM性能进行了广泛的分析,但并没有从控制理论的角度对其进行进一步研究。直到2016年,文献[18]首次将AWM机制与控制理论相结合,设计了一种基于PID的窗口控制规律,在不对TCP协议做任何修改的情况下,通过改变窗口的大小直接控制源端的发送速率。但是, PID控制方法是在较为固定的网络环境中设计的,一旦网络环境发生变化,算法的性能将会下降。近年来,关于TCP/AWM系统的网络拥塞控制成果不断出现。例如,文献[19]结合固定时间漏斗边界和任意时间稳定理论,提出了一种改进的控制策略,所设计的控制器使跟踪误差不仅在任意设定时间内收敛到原点,而且满足预设的暂态性能。文献[20]基于Minimax理论设计了一个鲁棒控制器,保证了TCP/AWM网络系统在最严重干扰的情况下是渐近稳定的。此外,文献[21]设计了一个基于事件触发机制的自适应网络拥塞控制器,保证了闭环系统的所有信号都是有界的,同时减少了控制器的更新次数,节约了网络资源。然而,由于文献[21]在设计控制器时采用了自适应神经网络控制,需要在线实时更新大量的学习参数,增加了算法的计算负担与复杂性。其次,闭环系统的暂态和稳态性能均无法被预先指定。

为了保证误差系统具有期望的暂态和稳态性能或满足特定的约束条件,文献[22]提出了一种预设性能控制(prescribed performance control, PPC)策略,通过引入性能函数和误差变换,可预先设定跟踪误差的收敛速度/时间、超调量以及稳态值。随后,这一方法被推广到严格反馈系统^[23]、纯反馈系统^[24]、非仿射非

线性系统^[25]等。同时,该项技术也被应用到一些实际系统中,如水下自主航行器^[26]、TCP网络拥塞控制^[27]等。然而,上述文献^[22-27]采用的预设性能函数只能使跟踪误差在无穷时刻收敛至给定的残差集合中,无法实现快速跟踪的目的。为确保跟踪误差在有限时间内完成收敛,一些研究者对传统的预设性能函数进行了改进。文献[28]提出了一种有限时间性能函数(finite-time performance function, FTPF),相较于传统的预设性能函数,其不仅具有有限时间收敛以及可提前配置信号的暂态和稳态性能的优势,而且可以灵活地选择预设的有限时间。在实际的TCP网络系统中,系统的输出受到路由器缓冲区最大队列长度的限制,考虑到输出受限的问题,本文选择文献[28]中的FTPF作为性能边界,保证跟踪误差在给定的时间内收敛至指定的区域。

传统的控制以周期的方式执行,即所谓的时间触发控制。从资源利用的角度看,时间触发控制周期地执行控制任务会浪费网络资源。因此,事件触发控制引起了越来越多学者的关注。所谓事件触发控制,是指控制任务是否执行由事先给定的触发条件决定,而不是根据时间情况^[29]。文献[30]首次提出了基于事件触发机制的PID控制,通过实验表明,该方法可以有效地减少控制任务的执行数量,从而在保证闭环系统性能的基础上,显著地节约通信资源。近些年,针对非线性系统,获得了大量的研究成果^[31-37]。由于控制信号幅值越大,数字信号传输的位数越多,进而增加了网络带宽。为解决上述问题,文献[32,35]提出了一位信号传输规则,每当违反事件触发条件时,只有一位信号(0或1)通过控制器和执行器之间的通信信道传输,有助于减少传输延迟,提高传输效率。文献[36-37]针对文献[32,35]所提出的一位信号传输规则进行了改进,并将其应用到了严格反馈非线性系统中。然而,文献[36]所设计的控制器无法确保误差信号在有限时间或规定时间内完成收敛。因此,文献[37]针对上述不足,设计了一个新型的指定性能控制器,保证了跟踪误差在给定时间内收敛至指定区域,同时减少了信号传输的位数。

受文献[28]和[36]的启发,本文设计了一种基于预设性能控制和事件触发输入的TCP/AWM网络拥塞控制算法。与现有研究成果相比,主要贡献如下: 1) 通过与文献[19-20]比较,给出了一种基于队列和速率的网络模型,同时该模型考虑了外部干扰对TCP/AWM网络系统动态的影响; 2) 设计了有限时间预设性能控制器,不仅保证了跟踪误差在预设时间内收敛至给定的区域,而且简化了控制器的结构和降低了计算复杂度; 3) 为了节约网络资源和减少控制器的更新次数,在TCP/AWM网络系统中引入事件触发机制,采用一位

信号即0或1代替真实的控制信号进行传输。

本文的其余部分组织如下: 第2节给出了一个改进的TCP/AWM网络模型以及有限时间性能函数定义; 第3节介绍了AWM控制器的设计过程, 并给出了系统的稳定性证明; 第4节通过仿真验证了本文所提方法的有效性; 第5节对本文的研究成果进行了总结。

2 系统模型与预备知识

2.1 TCP/AWM系统模型

考虑一类TCP/AWM网络系统^[14], 其动态模型描述如下:

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = u(t), \\ \dot{q}(t) = -C(t) + \frac{N(t)}{R(t)}W(t), \\ R(t) = \frac{q(t)}{C(t)} + T_p, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $W(t) \in [0, W_{\max}]$ 为TCP窗口大小, $u(t)$ 为可设计的控制律, $q(t) \in [0, q_{\max}]$ 为路由器瞬时队列长度, $R(t)$ 为往返时延, T_p 为传播时延, $C(t)$ 为链路容量, $N(t)$ 为TCP会话数。

根据文献[13], 采用源端的发送速率 $r(t)$ 描述窗口的变化, 定义如下:

$$r(t) = \frac{W(t)}{R(t)}. \quad (2)$$

速率 $r(t)$ 的导数为

$$\dot{r}(t) = \frac{\dot{W}(t)R(t) - W(t)\dot{R}(t)}{R^2(t)}. \quad (3)$$

根据式(1)–(3), 可得

$$\begin{cases} \dot{q}(t) = N(t)r(t) - C(t), \\ \dot{r}(t) = \frac{1}{q(t) + T_p C(t)}(C(t)u(t) + C(t)r(t) - N(t)r^2(t)). \end{cases} \quad (4)$$

令 $x_1(t) = q(t)$, $x_2(t) = \dot{q}(t)$, 同时考虑外部扰动对系统的影响, 系统(4)可以写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) + \omega(t), \\ \dot{x}_2(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t), \\ y(t) = x_1(t), \end{cases} \quad (5)$$

其中: $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$, $\omega(t)$ 为由UDP等非响应流引起的外部干扰, $y(t)$ 为系统的输出。网络参数 $N(t)$ 和 $C(t)$ 在相当长一段时间内变化缓慢, 因此被认为固定值处理, 记为 N 和 C 。此外, 系统函数 $f(x(t))$ 和 $g(x(t))$ 分别为

$$f(x(t)) = \frac{1}{x_1(t) + T_p C}(-x_2^2(t) - Cx_2(t)),$$

$$g(x(t)) = \frac{NC}{x_1(t) + T_p C}.$$

注1 模型(5)不同于现有文献[18–21]的TCP/AWM网络模型。其中文献[18–21]通过设计窗口变化率, 直接改变发送端窗口的大小, 进而控制系统发送数据的速率。然而, 网络窗口是一个相对抽象的概念, 难以直观表述系统的发送速率。因此, 根据 $r(t) = W(t)/R(t)$, 本文将窗口大小 $W(t)$ 转化为速率 $r(t)$, 结合式(1)–(3), 得到基于队列长度 $q(t)$ 和速率 $r(t)$ 的新模型(4)。同时, 相较于文献[18–19], 模型(5)考虑了非响应UDP流对TCP网络的影响, 更加准确地描述了网络的实际情况。

TCP网络拥塞控制的主要目标是使瞬时队列长度快速稳定在期望队列长度附近, 从而提高链路的利用率。因此, 为获得预期的控制目标, 在控制器设计过程中需要引入以下假设。

假设1 由非响应流引起的外部干扰 $\omega(t)$ 是连续且有界的。

假设2 期望队列长度 $q_{\text{ref}}(t)$ 及其一阶导数连续可导。

2.2 有限时间性能函数

定义1^[28] 如果一个光滑函数 $\rho(t)$ 满足下面的两个条件:

- 1) $\rho(t)$ 是非增且大于0的函数;
- 2) $\lim_{t \rightarrow T_f} \rho(t) = \rho_{T_f}$, 当 $\forall t \geq T_f$ 时, $\rho(t) = \rho_{T_f}$ 。

其中: ρ_{T_f} 和 T_f 分别是任意小的正常数和预先设定的有限时间, 则称 $\rho(t)$ 为有限时间性能函数, 即FTPF。

为了限制跟踪误差, 获得更好的暂态性能, FTPF定义如下:

$$\rho(t) = \begin{cases} (\rho_0 - \frac{t}{T_f})e^{(1 - \frac{T_f}{T_f - t})} + \rho_{T_f}, & t \in [0, T_f], \\ \rho_{T_f}, & t \in [T_f, +\infty), \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\rho_0 > 5/4$, ρ_{T_f} 和 T_f 是正的设计参数, 且满足 $\rho_0 > \rho_{T_f}$ 。

在这里, 通过将误差边界函数设计成有限时间性能函数, 相较于文献[36]采用的传统的预设性能函数, FTPF不仅具有有限时间收敛以及可提前配置信号的暂态和稳态性能的优势, 而且可以灵活地选择预设的有限时间。与文献[37]提出的新的边界性能函数相比, FTPF的收敛速度更快。

注2 为简化控制器设计和稳定性分析过程, 省略了时间变量 t 。因此, 记 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $f(x(t))$, $g(x(t))$, $u(t)$, $y(t)$, $\omega(t)$, $\rho(t)$ 为 x_1 , x_2 , f , g , u , y , ω , ρ 。

3 主要结果

在本节中, 给出了基于事件触发的TCP/AWM网络系统预有限时间拥塞控制器的设计过程, 并进行

了稳定性分析.

3.1 预设性能控制器设计

整个设计过程分为两个步骤. 第1步是设计虚拟控制律, 第2步是设计实际控制律, 具体的设计过程如下所述.

步骤1 定义队列误差

$$e_1 = x_1 - q_{\text{ref}}. \quad (7)$$

构造如下误差转换函数:

$$\eta_1 = \tan\left(\frac{\pi e_1}{2\rho_1}\right). \quad (8)$$

虚拟控制律设计如下:

$$\alpha_1 = -c_1 \eta_1, \quad (9)$$

其中: q_{ref} 为期望队列长度, $\rho_1 = \rho$ 为 FTPF 且满足 $|e_1(0)| < \rho_1(0)$, $c_1 > 0$ 为设计参数.

步骤2 定义跟踪误差

$$e_2 = x_2 - \alpha_1. \quad (10)$$

构造如下误差转换函数:

$$\eta_2 = \tan\left(\frac{\pi e_2}{2\rho_2}\right). \quad (11)$$

实际控制律设计如下:

$$\alpha_2 = -c_2 \eta_2, \quad (12)$$

$$v = \alpha_2, \quad (13)$$

其中: ρ_2 为正常数且满足 $|e_2(0)| < \rho_2$, $c_2 > 0$ 为设计参数.

注3 在上述设计过程中可以看出, 所设计的控制器并不依赖系统的非线性函数, 干扰信号和期望队列导数的信息. 相较于文献[21], 并未使用神经网络对于干扰等未知项进行逼近, 避免了在线实时更新大量的学习参数. 因此, 极大地降低了算法的计算量以及复杂度.

针对后续的稳定性的分析, 先给出一个关于虚拟控制信号导数有界的充分条件.

引理1^[36] 在某一区间上, 如果 $|e_i| < \rho_i$ 且 η_i 与 $\dot{e}_i$ 有界, 那么 $\dot{\alpha}_i$ 在该区间上有界, $i = 1, 2$.

证 设在某一区间上有 $|e_i| < \rho_i$, $i = 1, 2$, 由式(8)和式(11)可知函数 η_i , $i = 1, 2$ 在该区间上可导, 即

$$\dot{\eta}_i = \frac{\pi}{2\rho_i\beta_i^2}(\dot{e}_i - \frac{e_i\dot{\rho}_i}{\rho_i}), \quad i = 1, 2, \quad (14)$$

其中

$$\beta_i = \cos\left(\frac{\pi e_i}{2\rho_i}\right), \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

由定义知若 η_i , $i = 1, 2$ 有界, 则 $1/\beta_i$, $i = 1, 2$ 有界. 根据式(6)和常数 ρ_2 , 进一步可得

$$\frac{1}{\rho_0 + \rho_{T_f}} < \frac{1}{\rho_1} < \frac{1}{\rho_{T_f}}, \quad (16)$$

$$|\dot{\rho}_2| = 0. \quad (17)$$

根据文献[28]可知, $\dot{\rho}_1$ 在闭区间 $[0, T_f]$ 上连续, 则存在常数 $M > 0$, 下列不等式成立:

$$|\dot{\rho}_1| \leq M. \quad (18)$$

将式(16)–(18)代入式(14)中可知, 若 η_i 与 $\dot{e}_i$ 在某一区间上有界, 则 $\dot{\eta}_i$ 在该区间上有界, $i = 1, 2$. 由式(9)和式(12)有

$$\dot{\alpha}_i = -c_i \dot{\eta}_i, \quad i = 1, 2, \quad (19)$$

则 $\dot{\alpha}_i$ 在该区间上有界, 故引理1成立. 证毕.

3.2 事件触发机制

为了降低控制器的触发次数, 节约网络资源, 因此采用文献[36]所提出的事件触发控制方案, 具体内容设计如下:

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid |e(t)| = \delta\}, \quad (20)$$

$$e(t) = v(t) - v(t_k), \quad t_k \leq t < t_{k+1}, \quad (21)$$

$$q(t_k) = \begin{cases} 1, & e(t_k) = \delta, \\ 0, & e(t_k) = -\delta, \end{cases} \quad (22)$$

其中: $t_0 = 0$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $\delta > 0$ 为固定阈值, $e(t)$ 为测量误差, 二进制信号 $q(t_k)$ 为控制器用于更新的中间信号.

因此, 控制器更新规则可表示为

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + \delta(2q(t_k) - 1), \quad (23)$$

式中 $k = 1, 2, \dots$, 进而

$$u(t_k) = u(t_0) + \delta \sum_{i=1}^k (2q(t_i) - 1). \quad (24)$$

在每一个触发间隔中, 控制信号将被保持为常数, 即

$$u(t) = u(t_k), \quad t_k \leq t < t_{k+1}. \quad (25)$$

根据式(20)–(21), 可得

$$v(t_k) = \begin{cases} v(t_{k-1}) + \delta, & e(t_k) = \delta, \\ v(t_{k-1}) - \delta, & e(t_k) = -\delta. \end{cases} \quad (26)$$

由式(22)(26)进一步有

$$\begin{aligned} v(t_k) &= v(t_{k-1}) + \delta(2q(t_k) - 1) = \\ &v(t_0) + \delta \sum_{i=1}^k (2q(t_i) - 1), \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $k = 1, 2, \dots$.

根据式(21)(24)(27), 控制信号进一步可表示为

$$u(t) = v(t) + \Delta(t), \quad (28)$$

其中 $\Delta(t) = u(t_0) - v(t_0) - e(t)$.

由上述论述可知, 当式(20)被触发时, 式(22)中的二进制信号 $q(t_k)$ 通过信道被传输到TCP端系统中, 同时 $v(t_{k-1})$ 被更新为 $v(t_k)$. 其中, 当 $q(t_k) = 1$ 时, 控制信号为 $u(t_k) = u(t_{k-1}) + \delta$, 当 $q(t_k) = 0$ 时, 控制信号

为 $u(t_k) = u(t_{k-1}) - \delta$, 并且其在间隔 $[t_{k-1}, t_k]$ 内保持不变.

注4 与现有的事件触发策略^[31-34]不同, 本文所采用的方案只在触发时刻将一个二进制信号 $q(t_k)$ 即0或1通过AWM控制器和TCP端系统(被控对象)之间的信道传输信息, 而不是在该信道中直接传输控制信号 $u(t_k)$, 然后根据编码解码协议, 恢复真实的控制信号, 进而控制TCP端系统的窗口大小. 此外, 如果控制系统受到网络攻击, 如控制信号被窃取和篡改, 将会使被控对象产生错误的输出, 进而导致系统性能恶化、不稳定, 甚至是灾难性的事故^[38]. 而本文中的控制信号 $u(t)$ 通过一个二进制信号 $q(t_k)$ 即0或1进行更新, 并不直接在网络中传输, 增强了TCP网络系统的安全性. 因此, 该方案不仅减少了控制器的更新次数和对网络带宽的占用, 而且考虑了网络传输的成本以及安全性问题.

3.3 稳定性分析

为了验证所设计的控制器能够保证TCP/AWM网络系统状态的有界性, 通过对闭环系统进行稳定性分析, 给出了以下定理.

定理1 针对具有外部扰动的TCP/AWM非线性网络系统(5), 在满足 $|e_i(0)| < \rho_i(0)$, $i = 1, 2$ 的情况下, 通过所设计的虚拟控制器(9), 实际控制器(28)和事件触发条件(20)–(22) 保证TCP/AWM网络系统具有如下性质:

- 1) 路由器的瞬时队列在预先设定的时间内跟踪上期望队列, 并且跟踪误差处于预先指定的范围内.
- 2) 闭环系统中的所有信号均是有界的.
- 3) 在整个系统运行中能够有效地避免Zeno现象的发生.

证 对式(7)(10)求导, 并结合式(5)得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = x_2 + \omega - \dot{q}_{\text{ref}}, \\ \dot{e}_2 = f + gu - \dot{\alpha}_1. \end{cases} \quad (29)$$

将式(9)代入式(10)中得

$$x_2 = e_2 - c_1\eta_1. \quad (30)$$

由式(12)–(13)和(28), 可得

$$u = -c_2\eta_2 + \Delta. \quad (31)$$

进而, 式(29)可表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 + \omega - \dot{q}_{\text{ref}} - c_1\eta_1, \\ \dot{e}_2 = f + g\Delta - \dot{\alpha}_1 - c_2g\eta_2. \end{cases} \quad (32)$$

下列结果将通过反证法进行证明.

$$|e_i| < \rho_i, \quad i = 1, 2, t \geq 0. \quad (33)$$

由假设1–2分别可知: 外部干扰 ω , 期望队列长度 q_{ref} 连续; 状态变量 x_i , $i = 1, 2$, 输出变量 y , 性能函数 ρ_i , $i = 1, 2$ 连续. 因此, 式(8)中的 e_1 连续. 若 $|e_1| < \rho_1$, 由式(8)–(10)依次可得 η_1, α_1, e_2 连续.

根据误差连续性, 如果式(33)被违反, 那么一定有

$$\lim_{t \rightarrow t^*} |e_j(t)| = \rho_j(t^*), \quad \exists j \in \{1, 2\}, \exists t^* > 0, \quad (34)$$

并且

$$|e_i(t)| < \rho_i(t), \quad i = 1, 2, t < t^*. \quad (35)$$

假设上述情形存在, 分为两步骤分别证明 $e_1(t)$, $e_2(t)$ 的有界性.

步骤1 选择如下的Lyapunov函数:

$$V_1 = \frac{1}{\pi} \eta_1^2. \quad (36)$$

求 V_1 关于时间 t 的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{2}{\pi} \eta_1 \dot{\eta}_1 = \\ &= \frac{\eta_1}{\rho_1 \beta_1^2} (\Delta_1 - c_1 \eta_1) \leq \\ &= \frac{|\eta_1|}{\rho_1 \beta_1^2} (|\Delta_1| - c_1 |\eta_1|), \end{aligned} \quad (37)$$

其中

$$\Delta_1 = e_2 + \omega - \dot{q}_{\text{ref}} - \frac{e_1 \dot{\rho}_1}{\rho_1}. \quad (38)$$

下面分析 Δ_1 在区间 $[0, t^*)$ 上的有界性.

由假设1–2, 式(16)(18)可知, $\omega, q_{\text{ref}}, \dot{q}_{\text{ref}}, \dot{\rho}_1, 1/\rho_1 \in L^\infty$ 并且根据式(35)知 e_1 在 $[0, t^*)$ 上有界. 由于 $e_1 = x_1 - q_{\text{ref}}$, 则状态 x_1 在 $[0, t^*)$ 上有界. 因此可得式(38), 即 Δ_1 在 $[0, t^*)$ 上有界, 故存在常数 $\gamma_1 > 0$ 满足

$$|\Delta_1| \leq \gamma_1, \quad t < t^*. \quad (39)$$

将式(39)代入式(37)中, 可得

$$\dot{V}_1 \leq \frac{|\eta_1|}{\rho_1 \beta_1^2} (\gamma_1 - c_1 |\eta_1|), \quad t < t^*. \quad (40)$$

如果 $|\eta_1| > \gamma_1/c_1$, 那么由式(40)可知 $\dot{V}_1 < 0$. 根据式(36), 若 $\dot{V}_1 < 0$, 则 $|\eta_1|$ 递减, 进一步可得

$$|\eta_1| \leq \max\{|\eta_1(0)|, \frac{\gamma_1}{c_1}\}, \quad t < t^*. \quad (41)$$

函数 η_1 的有界性表明 e_1 不会趋近于 ρ_1 , 即存在常数 $\sigma_1 > 0$ 满足

$$|e_1| \leq \rho_1 - \sigma_1 < \rho_1, \quad t < t^*, \quad (42)$$

即当 $i = 1$ 时, 式(42)与假设(34)矛盾, 故式(33)成立. 同时保证式(9)中的 α_1 和式(32)中的 $\dot{e}_1$ 在 $[0, t^*)$ 上有界. 因此, 根据引理1知 $\dot{\alpha}_1$ 在 $[0, t^*)$ 上有界.

步骤2 选择如下的Lyapunov函数:

$$V_2 = \frac{1}{\pi} \eta_2^2. \quad (43)$$

求 V_2 关于时间 t 的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{2}{\pi} \eta_2 \dot{\eta}_2 = \\ &= \frac{\eta_2}{\rho_2 \beta_2^2} (\Delta_2 - c_2 g \eta_2) \leq \\ &= \frac{|\eta_2|}{\rho_2 \beta_2^2} (|\Delta_2| - c_2 g |\eta_2|), \end{aligned} \quad (44)$$

其中

$$\Delta_2 = f + g\Delta - \dot{\alpha}_1 - \frac{e_2 \dot{\rho}_2}{\rho_2}. \quad (45)$$

注5 通过给定的系统参数 T_p , C 和 $x_1 \in [0, q_{\max}]$ 可知, 存在常数 $\bar{g} > 0$ 使得 $g > \bar{g} > 0$.

下面分析 Δ_2 在区间 $[0, t^*)$ 上的有界性.

由于 ρ_2 为常数, 则 $\dot{\rho}_2/\rho_2 = 0$. 根据步骤1的证明过程, 可以得出 $\alpha_1, \dot{\alpha}_1$ 在 $[0, t^*)$ 上有界. 由事件触发条件(20)–(21)和式(28)可知, Δ 在 $[0, t^*)$ 上有界. 根据式(35)知 e_1, e_2 在 $[0, t^*)$ 上有界, 故状态 x_1, x_2 在 $[0, t^*)$ 上有界. 由于非线性函数对其自变量连续, 因此 f, g 在 $[0, t^*)$ 上有界. 进一步可以得到式(45), 即 Δ_2 在 $[0, t^*)$ 上有界, 故存在常数 $\gamma_2 > 0$ 满足

$$|\Delta_2| \leq \gamma_2, \quad t < t^*. \quad (46)$$

将式(46)代入式(44)中, 可得

$$\dot{V}_2 \leq \frac{|\eta_2|}{\rho_2 \beta_2^2} (\gamma_2 - c_2 \bar{g} |\eta_2|), \quad t < t^*. \quad (47)$$

此时, 如果 $|\eta_2| > \gamma_2/\bar{g}c_2$, 那么 $\dot{V}_2 < 0$. 根据式(43), 若 $\dot{V}_2 < 0$, 则 $|\eta_2|$ 递减, 进一步可得

$$|\eta_2| \leq \max\{|\eta_2(0)|, \frac{\gamma_2}{\bar{g}c_2}\}, \quad t < t^*. \quad (48)$$

函数 η_2 的有界性表明 e_2 不会趋近于 ρ_2 , 即存在常数 $\sigma_2 > 0$ 满足

$$|e_2| \leq \rho_2 - \sigma_2 < \rho_2, \quad t < t^*, \quad (49)$$

即当 $i = 2$ 时, 式(49)与假设(34)矛盾, 故式(33)成立. 同时保证式(12)中的 α_2 和式(13)中的 v 在 $[0, t^*)$ 上有界. 综合上述分析, 可知 $t^* = \infty$, 故容易证明闭环系统的所有信号均是有界的.

因此, 由式(6)和式(33)可知, 当 $t \geq T_f$ 时, $\rho_1 = \rho_{T_f}$ 即 $|e_1| < \rho_{T_f}$, 表明系统输出可以在设定的时间和指定的精度下实现跟踪期望队列的目的.

下面将要说明存在一个常数 $\bar{t} > 0$, 使得对于 $\forall k \in \mathbb{N}$ 都有 $t_{k+1} - t_k \geq \bar{t}$. 基于设计的事件触发机制, 由式(21)可得

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}|e(t)| &= \frac{d}{dt}|v(t) - v(t_k)| \leq \\ &\frac{d}{dt}|v(t)| + \frac{d}{dt}|v(t_k)| \leq \\ &\frac{d}{dt}|v(t)|. \end{aligned} \quad (50)$$

由于闭环系统的所有信号都是有界的, 则一定存在一个常数 $\zeta > 0$, 使得不等式 $|\dot{v}(t)| \leq \zeta$ 成立, 即 $|\dot{e}(t)| \leq \zeta$, $t_k \leq t < t_{k+1}$. 同时, 根据式(20)–(21)可得 $\lim_{t \rightarrow t_k^+} |e(t)| = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow t_{k+1}^-} |e(t)| = \delta$. 因此, 可以得出事件触发时间间隔总是存在一个正下界 $\bar{t}$ 满足 $\bar{t} \geq \delta/\zeta$,

有效地避免了Zeno现象的发生. 证毕.

通过以上的讨论, 基于事件触发条件(20)–(22)所设计的控制器(28)和虚拟控制器(9)不仅能够保证TCP/AWM网络系统中的所有信号均是有界的, 同时减少了网络资源的浪费, 更加有效地避免了Zeno现象的发生.

4 仿真结果

针对 N 个TCP会话数共享一个瓶颈路由器的网络, 考虑如图1所示的单瓶颈哑铃型网络拓扑结构, 利用MATLAB/SIMULINK针对文中所提出的基于事件触发的AWM算法进行仿真研究, 以验证所提算法的有效性和优越性.

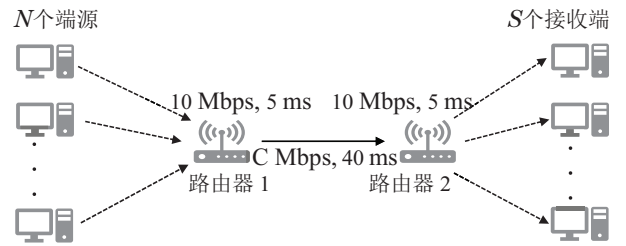


图1 单瓶颈哑铃型网络拓扑结构

Fig. 1 Single bottleneck dumbbell network topology

选取的系统参数为 $N = 50$, $C = 1250$ packets/s, $q_{\text{ref}} = 100$ packets, $T_p = 0.15$ s, 有限时间性能函数参数为 $T_f = 1.5$, $\rho_0 = 24$, $\rho_{T_f} = 1.5$. 其他设计参数为 $c_1 = 35$, $c_2 = 2$, 事件触发设计参数为 $\delta = 0.1$. 系统的初始条件选择为 $x(0) = [115 \ 0]^T$. 仿真结果在图2–9中给出.

路由器瞬时队列长度 $q(t)$ 随时间的变化情况如图2所示. 图中实线代表队列长度 $q(t)$, 虚线代表期望队列长度 $q_{\text{ref}}(t)$, 在所设计的控制器作用下, 队列长度 $q(t)$ 在有限时间内稳定在期望值附近. 图3为该窗口大小的响应曲线图, 在控制器的作用下, 窗口响应曲线最终稳定到一个较小值附近, 使系统以较低的速率发送数据, 以达到增加传输有效数据, 减少往返时延, 稳定队列长度的目的.

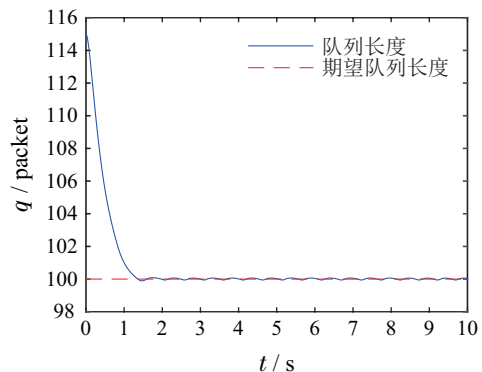


图2 期望队列和队列长度

Fig. 2 Desired queue length and queue length

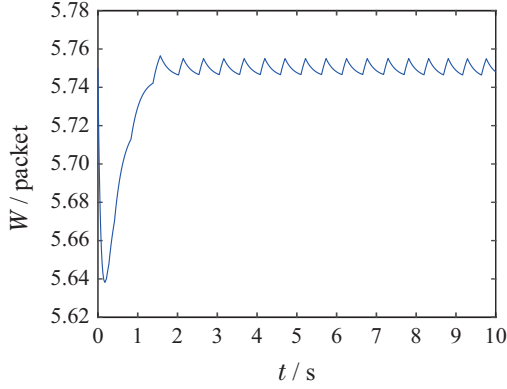


图3 窗口大小

Fig. 3 Window size

图4为控制律的响应曲线图. 由图可以看出在事件触发机制的作用下, 系统控制输入的值是分段保持的. 由于TCP/AWM系统是基于窗口的管理机制, 控制律表示系统窗口随时间的变化率, 而不是系统的丢包率, 因此没有 $0 \leq u(t) \leq 1$ 的限制. 图5为该系系统触发时刻和触发时间间隔图. 图中, 横坐标表示触发时刻, 纵坐标表示两次触发的时间间隔 $t_{k+1} - t_k$. 仿真过程所设计的基本采样时间为 0.001 s , 若采用时间触发机制, 则控制器在 10 s 内需要更新 10000 次, 而本文所设计的事件触发控制器仅仅更新了 56 次, 在保证系统性能的同时, 相较于传统控制器的更新次数节约了近 99.5% , 并且控制信号在短时间内不会无限制的触发. 因此, 所提控制方案在节约网络资源的同时, 有效地避免了Zeno现象的发生.

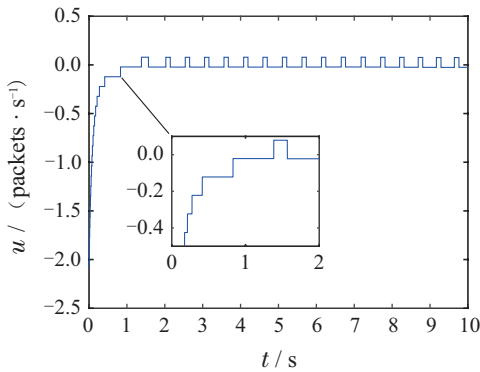


图4 控制输入

Fig. 4 Control input

为了说明本文所提方法的有效性, 将本文的仿真结果与文献[36]和文献[37]的方法进行比较. 其中, 文献[36]的设计参数为 $\rho_0 = 24$, $\rho_\infty = 1.5$, $l = 0.8$, 文献[37]的设计参数为 $\lambda = 24$, $\varepsilon = 1.5$, $T = 1.5$. 图6为队列跟踪误差的轨迹. 所设计的控制器使跟踪误差在有限时间内稳定在规定的上下界内, 并且跟踪误差的收敛速度要快于其他两种方法, 这不仅提高了系统的暂态性能, 而且对系统的稳态性能进行了改善. 同

时, 图7对比了3种方法的触发次数, 本文所提方法的更新次数相较于其他两种方法分别降低了约 22% 和 14% , 有效地减少了触发次数.

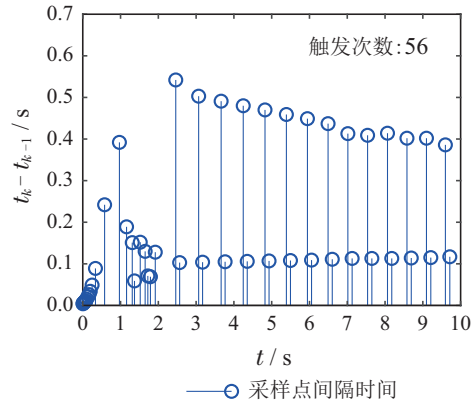


图5 触发时刻和触发时间间隔

Fig. 5 Triggering instants and inter-event times

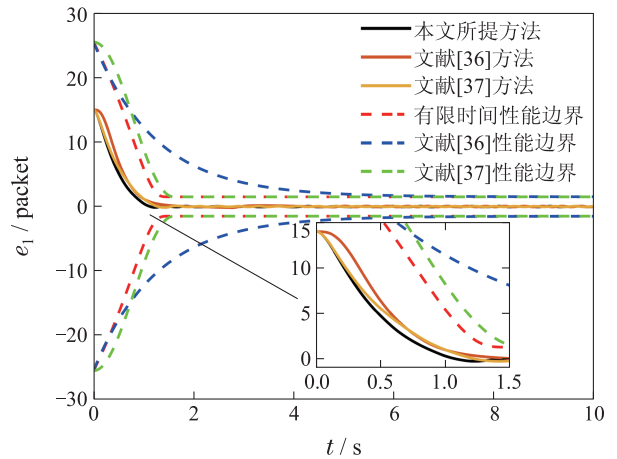


图6 跟踪误差的对比响应曲线

Fig. 6 The comparison results with tracking errors

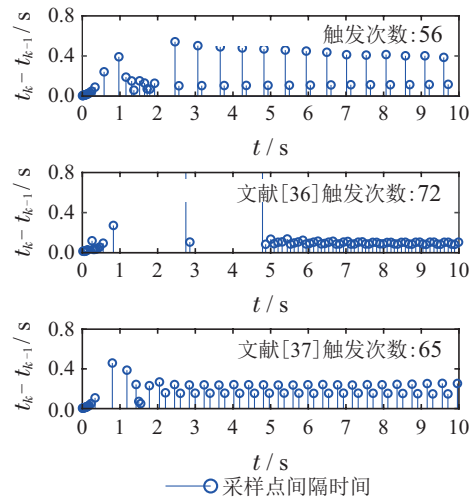


图7 触发时间间隔对比

Fig. 7 The comparison results with inter-event times

为表明本文所提控制算法的优越性, 将其与PID控制方法^[18]进行仿真对比. 其中PID方法的系统参数为

$N = 50$, $C = 1250$ packets/s, $q_{\text{ref}} = 100$ packets, $T_p = 0.15$ s, 初始条件 $x(0) = [115 \ 0]^T$, 相关设计参数为 $K_p = 0.1$, $K_i = 1.5$, $K_d = 0.03$, 仿真结果见图8–9。从图8可以看出, 本文所提方法在1.5 s内跟踪到期望队列, 而PID控制方法具有较大超调。图9为窗口大小对比结果, 可以看出虽然窗口大小最终均稳定在5.75附近, 但是PID方法的收敛速度更慢。因此, 本文所设计的控制器使系统的响应速度更快, 超调量更小, TCP/AWM网络系统具有更好的性能。

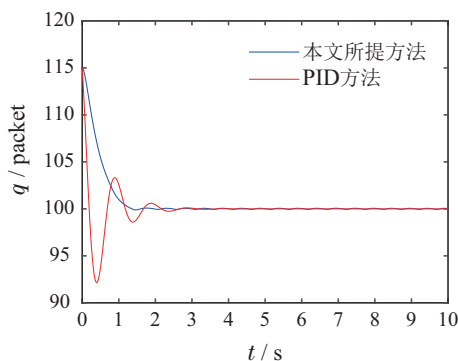


图8 瞬时队列长度对比结果

Fig. 8 The comparison results with instantaneous queue length

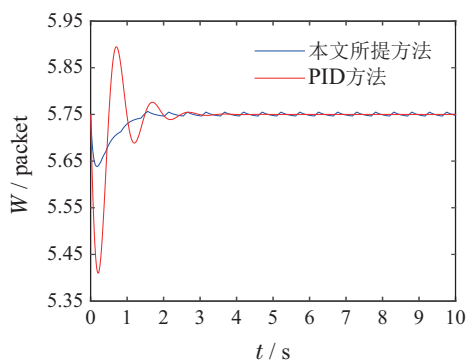


图9 窗口大小对比结果

Fig. 9 The comparison results with the window size

5 结论

本文针对一类具有非响应UDP流干扰的TCP/AWM网络系统, 采用预设性能控制和事件触发机制, 提出了一种基于改进模型的拥塞控制策略。为了提高系统的暂态和稳态性能, 采用改进的边界性能函数限制队列跟踪误差, 使其在有限时间内收敛到指定范围。同时, 采用基于一位信号传输的事件触发控制协议, 当满足事件触发条件时, 仅仅通过1个二进制信号(0或1)更新控制器, 减少了控制器的更新次数。所设计的控制器不仅降低了计算复杂度, 而且节约了网络资源。从仿真结果不难发现, 本文的设计方法具有较强的鲁棒性, 使系统的响应更快, 超调更小。在后续研究中, 将针对多节点网络系统的拥塞控制问题进行研究。

参考文献:

- [1] RYU S, RUMP C, QIAO C. Advances in internet congestion control. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2003, 5(1): 28 – 39.
- [2] ADAMS R. Active queue management: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1425 – 1476.
- [3] KUNNIYUR S S, SRIKANT R. Stable, scalable, fair congestion control and AQM schemes that achieve high utilization in the internet. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(11): 2024 – 2029.
- [4] FLOYD S, JACOBSON V. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1993, 1(4): 397 – 413.
- [5] WANG C, LI B, HOU Y T, et al. LRED: A robust active queue management scheme based on packet loss ratio. *Proceedings of IEEE INFOCOM*. Hong Kong: IEEE, 2004: 1 – 12.
- [6] CHATRANON G, LABRADOR M A, BANERJEE S. BLACK: Detection and preferential dropping of high bandwidth unresponsive flows. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. Anchorage: IEEE, 2003: 664 – 668.
- [7] FENG W C, SHIN K G, KANDLUR D D, et al. The blue active queue management algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(4): 513 – 528.
- [8] MISRA V, GONG W B, TOWSLEY D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2000, 30(4): 151 – 160.
- [9] MELCHOR-AGUILAR D, NICULESCU S I. Computing non-fragile PI controllers for delay models of TCP/AQM networks. *International Journal of Control*, 2009, 82(12): 2249 – 2259.
- [10] ZHOU Chuan, HE Junwei, CHEN Qingwei. Discrete-time H-infinity robust active queue management scheme for uncertain TCP flow model. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(2): 222 – 228. (周川, 何俊伟, 陈庆伟. 不确定TCP流模型的离散H_∞鲁棒主动队列管理算法. *控制理论与应用*, 2013, 30(2): 222 – 228.)
- [11] YAN P, GAO Y, ÖZBAY H. A variable structure control approach to active queue management for TCP with ECN. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(2): 203 – 215.
- [12] LI Z, LIU Y, JING Y. Design of adaptive backstepping congestion controller for TCP networks with UDP flows based on minimax. *ISA Transactions*, 2019, 95: 27 – 34.
- [13] WANG K, LIU Y, LIU X, et al. Study on TCP/AQM network congestion with adaptive neural network and barrier Lyapunov function. *Neurocomputing*, 2019, 363: 27 – 34.
- [14] BARBERA M, LOMBARDO A, PANARELLO C, et al. Active window management: An efficient gateway mechanism for TCP traffic control. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. Glasgow: IEEE, 2007: 6141 – 6148.
- [15] BARBERA M, LOMBARDO A, PANARELLO C, et al. Queue stability analysis and performance evaluation of a TCP-compliant window management mechanism. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(4): 1275 – 1288.
- [16] LOMBARDO A, PANARELLO C, SCHEMBRA G. Applying active window management for jitter control and loss avoidance in video streaming over TCP connections. *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM*. Miami: IEEE, 2010: DOI: 10.1109/GLOCOM.2010.5683936.
- [17] BRUSCHI R, LOMBARDO A, PANARELLO C, et al. Active window management: Reducing energy consumption of TCP congestion control. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. Budapest: IEEE, 2013: 4154 – 4158.
- [18] YUAN X, JING Y, JIANG N. Research of control scheme of AWM based on PID. *The 28th IEEE Chinese Control and Decision Conference*. Yinchuan: IEEE, 2016: 1512 – 1516.

- [19] LI Z, CHEN X, DING S, et al. TCP/AWM network congestion algorithm with funnel control and arbitrary setting time. *Applied Mathematics and Computation*, 2020, 385: 125410.
- [20] BAI Y, SHEN J, JING Y. TCP/AWM network congestion control based on minimax theory. *The 33rd IEEE Chinese Control and Decision Conference*. Kunming: IEEE, 2021: 6645 – 6650.
- [21] BAI Y, JING Y. Event-triggered network congestion control of TCP/AWM systems. *Neural Computing & Applications*, 2021, 33(22): 15877 – 15886.
- [22] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2090 – 2099.
- [23] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Adaptive control with guaranteed transient and steady state tracking error bounds for strict feedback systems. *Automatica*, 2009, 45(2): 532 – 538.
- [24] YANG Y, TAN J, YUE D. Prescribed performance tracking control of a class of uncertain pure-feedback nonlinear systems with input saturation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(5): 1733 – 1745.
- [25] WANG Y, HU J, ZHENG Y. Improved decentralized prescribed performance control for non-affine large-scale systems with uncertain actuator nonlinearity. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(13): 7091 – 7111.
- [26] BECHLIOULIS C P, KARRAS G C, HESHMATI-ALAMDARI S, et al. Trajectory tracking with prescribed performance for underactuated underwater vehicles under model uncertainties and external disturbances. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(2): 429 – 440.
- [27] LIU Y, LIU X, JING Y, et al. Adaptive backstepping H_∞ tracking control with prescribed performance for internet congestion. *ISA Transactions*, 2018, 72: 92 – 99.
- [28] LIU Y, LIU X, JING Y. Adaptive fuzzy finite-time stability of uncertain nonlinear systems based on prescribed performance. *Fuzzy Sets and Systems*, 2019, 374: 23 – 39.
- [29] TABUADA P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1680 – 1685.
- [30] ÅRZÉN K E. A simple event-based PID controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 1999, 32(2): 8687 – 8692.
- [31] XING L, WEN C, LIU Z, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4): 2071 – 2076.
- [32] XING L, WEN C, LIU Z, et al. Event-triggered output feedback control for a class of uncertain nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(1): 290 – 297.
- [33] LIU C, LIU X, WANG H, et al. Event-triggered adaptive tracking control for uncertain nonlinear systems based on a new funnel function. *ISA Transactions*, 2020, 99: 130 – 138.
- [34] ZHAO N N, OUYANG X Y, WU L B, et al. Event-triggered adaptive prescribed performance control of uncertain nonlinear systems with unknown control directions. *ISA Transactions*, 2021, 108: 121 – 130.
- [35] MAZO M, CAO M. Asynchronous decentralized event-triggered control. *Automatica*, 2014, 50(12): 3197 – 3203.
- [36] ZHANG J X, YANG G H. Event-triggered prescribed performance control for a class of unknown nonlinear systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(10): 6576 – 6586.
- [37] DING W, ZHANG J X. Finite-time tracking control with prescribed accuracy for unknown nonlinear systems by event-triggered input. *IEEE Access*, 2020, 8: 210400 – 210409.
- [38] ZHANG R, VENKITASUBRAMANIAM P. Stealthy control signal attacks in linear quadratic Gaussian control systems: Detectability reward tradeoff. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017, 12(7): 1555 – 1570.

作者简介:

谢海修 硕士研究生, 目前研究方向为TCP网络拥塞控制, E-mail: xiehaixiu7016@163.com;

井元伟 教授, 博士, 博士生导师, 目前研究方向为复杂非线性系统的稳定性与鲁棒性、网络流量管理、分析与控制、非合作对策及其在通信网络中的应用等, E-mail: ywjing@mail.neu.edu.cn.