

网络串级控制系统的事件触发控制器设计

杜昭平[†], 袁文荣

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 为了减少有限网络带宽不必要的浪费, 针对一类网络串级控制系统, 首次引入事件触发机制, 并在此基础上考虑系统的串级控制器设计问题, 通过对系统稳定性进行分析, 设计可靠的主控制器和副控制器. 考虑信号传输造成的时延影响, 首先建立带有事件触发机制的网络串级控制系统数学模型; 然后利用李雅普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式技术, 给出基于事件触发机制的系统稳定的充分条件, 并且设计相应的主控制器和副控制器; 最后通过仿真实例验证所提出的方法在网络串级控制系统中的有效性, 即引入事件触发机制后, 设计的主、副控制器使得在系统稳定的前提下, 信号传输的间隔变大, 从而减小网络的拥塞, 提高网络带宽的有效利用率.

关键词: 网络串级控制系统; 事件触发机制; 建模; 稳定性; 主控制器; 副控制器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Event-triggered controller design of networked cascade control systems

DU Zhao-ping[†], YUAN Wen-rong

(College of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Concerning the problem of controller design for a class of networked cascade control systems, based on the stability analysis, the reliable primary and secondary controllers are designed, an event-triggered scheme is introduced to reduce the unnecessary waste of the limited network bandwidth resources for the first time. Firstly, considering the effect of the transmission delay, a model with the event-triggering scheme is constructed. Then, by using the Lyapunov stability theory and linear matrix inequality technique, some sufficient conditions of stability are proposed and the corresponding primary and secondary controllers are also obtained for the systems. Finally, a simulation example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method. That is to say, with the introduction of the event-triggered scheme, the designed primary and secondary controllers make the interval of signal transmission larger under the premise of system stability, thus the congestion of network is reduced and the effective utilization of network bandwidth is improved.

Keywords: networked cascade control systems; event-triggered scheme; modeling; stability; primary controller; secondary controller

0 引言

随着工业化的不断发展, 生产过程中对自动控制的要求日益提高, 单回路控制虽然结构简单、容易实现, 但往往不能满足生产工艺的要求, 尤其是在复杂控制系统中更加显得无能为力. 因此, 在单回路控制系统的基础上增加一个副回路, 从而构成串级控制系统^[1], 该结构能够明显改善系统的控制性能, 并且在工业系统中已经得到了广泛的应用^[2-3].

近年来, 信息技术和网络化得到飞速发展, 网络技术逐渐被应用到各类控制系统中, 并起到了很好的控制效果. 将以实时网络作为被控对象、控制器与执行器之间传输信号的媒介所构成的闭环反馈

控制系统称为网络化控制系统 (Networked control systems, NCSs). 如果在 NCSs 中加入一个副回路, 则形成特殊的网络控制系统——网络串级控制系统 (Networked cascade control systems, NCCS)^[4], 它不仅具有网络控制系统的突出特点, 而且还具有串级控制系统的许多优点, 能够快速克服回路中的干扰, 提高系统的控制性能.

网络的引入也不可避免地带来诸多问题, 如网络的负荷问题、时延问题、丢包问题等. 对此, 国内外学者展开了深入的研究. 文献[4]建立了具有时变时延的网络串级控制系统的数学模型, 并且设计了系统的 H_∞ 控制器; 文献[5-7]则是对广义网络串级控制系统

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2018-01-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61304249, 61374063); 江苏省自然科学基金项目(BK20161361).

作者简介: 杜昭平(1978—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂网络控制、广义系统等研究; 袁文荣(1990—), 男, 硕士生, 从事网络串级控制的研究.

[†]通讯作者. E-mail: duzhaoping98@163.com

的建模与控制器设计问题展开深入的研究,设计了使系统稳定的主、副控制器.

以上研究针对的对象是周期触发的,从系统的分析与设计角度看,显然更易于接受,但从网络的利用角度就不再适用了.因此,近年来学者们又提出了事件触发控制.在事件触发控制中,当传输信号超过更新值时,事件触发机制将得到应用.也就是说,只有满足事件触发条件时,控制任务才会执行.基于事件触发机制的理论研究和应用目前已经取得一定的成果,例如将其应用在线性系统中^[8-12]:文献[8-10]研究了基于事件触发机制的具有不确定性传输时延的网络控制系统的控制器设计方法;文献[11]将事件触发机制应用在通信信道的线性控制系统中;文献[12]是事件触发机制在广义网络控制系统的应用研究.同时,事件触发机制在非线性系统中的研究也取得了一定的成果^[13-17]:文献[14]将事件触发机制应用在模糊控制系统中,而模糊控制系统是非线性的,采用离散事件触发的通信方案,将网络时延和非线性系统都统一到一个网络T-S模糊时滞系统中,然后进行控制器设计;文献[15]针对的是具有部分状态和输出反馈的非线性系统,基于事件触发机制研究其观测器.以上研究成果表明,引入事件触发机制后,非线性系统在保持稳定的情况下还可以提高系统的执行效率,并取得良好的动态性能.虽然事件触发机制已经在各类控制系统中得到一定的应用,但是还没有相关文章将事件触发机制应用在网络串级控制系统中.考虑到事件触发机制和网络串级控制系统的优点,有必要对基于事件触发机制的网络串级控制系统的控制问题进行研究.

本文主要考虑的是基于事件触发机制的网络串级控制系统的主、副控制器设计问题,事件触发机制的引入可以有效减少有限网络带宽的不必要浪费,在此基础上考虑如何设计网络串级控制系统的串级控制器,其目的是通过分析系统的稳定性设计可靠的主、副控制器.考虑到时延对信号传输的影响,首先建立带有事件触发机制的网络串级控制系统数学模型;然后利用李雅普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式技术,给出在事件触发机制下系统稳定的充分条件,并设计相应的主、副控制器;最后通过仿真实例,说明所提出方法的有效性.

1 系统模型建立

构建如图1所示的控制系统结构,将事件触发机制引入网络串级控制系统中.在主传感器和主控制器之间加入事件触发器,以此来决定是否将新的采样

信号传送到主控制器.其中: P_1 、 P_2 为主、副被控对象, C_1 、 C_2 为主、副控制器, A 为执行机构, S_1 、 S_2 为主、副传感器.从图1可以看出, P_2 的输出量作为 P_1 的输入量, C_1 的输出量作为 C_2 的设定值, P_1 、 P_2 的状态通过 S_1 、 S_2 分别传送给 C_1 、 C_2 .

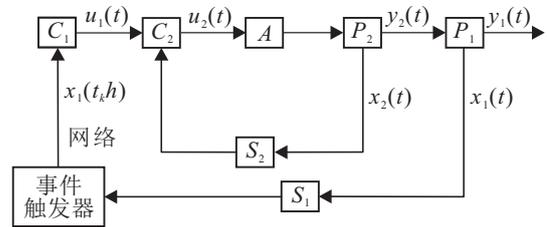


图1 基于事件触发机制的网络串级控制系统结构

同时,考虑如下副被控对象:

$$P_2 : \begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u_2(t), \\ y_2(t) = C_2 x_2(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_2(t)$ 是副被控对象的状态向量; $y_2(t)$ 是其输出量; $u_2(t)$ 是执行器 A 接收的实际输入量,同时也是副控制器的输出量; A_2 、 B_2 、 C_2 是已知矩阵.

主被控对象如下:

$$P_1 : \begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 y_2(t), \\ y_1(t) = C_1 x_1(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_1(t)$ 是主被控对象的状态向量, $y_1(t)$ 是其输出量, A_1 、 B_1 、 C_1 是已知矩阵.

在实际的控制系统中,周期采样往往会导致许多不必要的信号通过网络传输到控制器,从而降低有限带宽利用的效率,因此有必要寻找一种能够使信号可以进行选择性传输的新方法.如图1所示,本文选用了一种事件触发器的装置,将其引入到主传感器和主控制器之间,它的作用是利用以下触发条件来决定是否将当前的信号发送给控制器^[7]:

$$\begin{aligned} & [x((k+j)h) - x(kh)]^T \Omega [x((k+j)h) - x(kh)] \leq \\ & \sigma x^T((k+j)h) \Omega x((k+j)h). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\Omega > 0$; $j = 1, 2, \dots$; $\sigma \in [0, 1)$.

注1 在式(3)中,满足不等式(3)的信号 $x((k+j)h)$ 将不被发送,只有当采样信号超过这个限制时才会更新输出,新的采样状态才会被传送到控制器中.显然,这样会减少网络的传输次数,减少传输过程中的堵塞现象,从而提高传输速度.需要指出的是,当 $\sigma = 0$ 时,可以看作是一类特殊情况下的自触发.

注2 假设系统的状态是完全可以测量的,数据采用单包传输,不考虑丢包和错序现象.如果网络时延只在主回路中,则不失一般性地假设主回路的时延 τ_k 是有界的.根据文献[9],令 $\tau_k \in (0, \delta)$,其中 δ 是正常数.

本文中,主控制器 $u_1(t)$ 和副控制器 $u_2(t)$ 均采用状态反馈控制器,考虑主回路的网络传输时延,则可以表示为

$$\begin{cases} u_1(t) = K_1 x_1(t_k h), \\ u_2(t) = K_2 x_2(t) + u_1(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中 $t \in [t_k h + \tau_k, t_{k+1} h + \tau_{k+1}]$.

定义1 类似于文献[9]中 $e_k(t)$ 和 $\tau(t)$ 的定义方法,得到本文所需的事件触发机制

$$e_k^T(t) \Omega e_k(t) \leq \sigma x_1^T(t - \tau(t)) \Omega x_1(t - \tau(t)). \quad (5)$$

其中: $\Omega > 0, \sigma \in [0, 1)$.

注3 基于文献[9],定义 $0 \leq \tau(t) \leq h + \delta = \bar{\tau}$, 其中 h 为采样周期.

将事件触发机制应用在通过网络进行连接的串级控制系统的主回路中,则系统(1)和(2)对应的闭环系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 C_2 x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 K_2 x_2(t) + \\ \quad B_2 K_1 x_1(t - \tau(t)) + B_2 K_1 e_k(t), \\ y_1(t) = C_1 x_1(t), \\ y_2(t) = C_2 x_2(t), \end{cases} \quad (6)$$

$t \in [t_k h + \tau_k, t_{k+1} h + \tau_{k+1}]$.

为了设计相应的控制器,需要用到以下引理.

引理1^[8] 如果存在适当维数的矩阵 $X, R > 0$, 以及常数 ρ , 则有

$$-X R^{-1} X \leq \rho^2 R - 2\rho X.$$

2 系统控制器设计

基于事件触发机制,本文对网络串级控制系统的稳定性进行分析,并且设计相应的主、副控制器. 利用上述引理、定义及Schur补性质,给出如下定理.

定理1 对于给定的参数 σ, ρ 和 $\bar{\tau} > 0$ 以及控制器的参数 K_1, K_2 , 如果存在具有适当维数的矩阵 M, N 以及对称正定矩阵 P, Z, Q, Ω, R , 使得如下不等式成立,则系统(6)是渐近稳定的:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} + \Gamma + \Gamma^T & * & * \\ \Phi_{21}(l) & -R & * \\ \Phi_{31} & 0 & -R \end{bmatrix} < 0, \quad l = 1, 2. \quad (7)$$

其中

$$\Phi_{11} = \begin{bmatrix} P A_1 + A_1^T P + Q & * & * & * & * \\ 0 & \sigma \Omega & * & * & * \\ 0 & 0 & -Q & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\Omega & * \\ (B_1 C_2)^T P & Z B_2 K_1 & 0 & Z B_2 K_1 & \alpha_{55} \end{bmatrix},$$

$$\Gamma = [-N \quad -M + N \quad M \quad 0 \quad 0],$$

$$\Phi_{21}(1) = \sqrt{\bar{\tau}} N^T,$$

$$\Phi_{21}(2) = \sqrt{\bar{\tau}} M^T,$$

$$\Phi_{31} = [\sqrt{\bar{\tau}} R A_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \sqrt{\bar{\tau}} R B_1 C_2],$$

$$\alpha_{55} = Z(A_2 + B_2 K_2) + (A_2 + B_2 K_2)^T Z,$$

$$M^T = [M_{11} \quad M_{12} \quad M_{13} \quad M_{14} \quad M_{15}],$$

$$N^T = [N_{11} \quad N_{12} \quad N_{13} \quad N_{14} \quad N_{15}].$$

根据定理1,给出系统(6)的主控制器和副控制器设计方法.

定理2 对于给定的参数 σ, ρ 和 $\bar{\tau} > 0$, 如果存在具有适当维数的矩阵 $\tilde{M}, \tilde{N}, Y_1, Y_2$, 以及对称正定矩阵 $\tilde{R}, \tilde{Q}, \tilde{\Omega}, X, H$, 使得如下不等式成立,则系统(6)是渐近稳定的:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{11} + \tilde{\Gamma} + \tilde{\Gamma}^T & * & * \\ \tilde{\Phi}_{21}(l) & -\tilde{R} & * \\ \tilde{\Phi}_{31} & 0 & \rho^2 \tilde{R} - 2\rho X \end{bmatrix} < 0, \quad l = 1, 2. \quad (8)$$

其中

$$\tilde{\Phi}_{11} = \begin{bmatrix} A_1 X + X A_1^T + \tilde{Q} & * & * & * & * \\ 0 & \sigma \tilde{\Omega} & * & * & * \\ 0 & 0 & -\tilde{Q} & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\tilde{\Omega} & * \\ H(B_1 C_2)^T & B_2 Y_1 & 0 & B_2 Y_1 & \tilde{\alpha}_{55} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Gamma} = [-\tilde{N} \quad -\tilde{M} + \tilde{N} \quad \tilde{M} \quad 0 \quad 0],$$

$$\tilde{\Phi}_{21}(1) = \sqrt{\bar{\tau}} \tilde{N}^T,$$

$$\tilde{\Phi}_{21}(2) = \sqrt{\bar{\tau}} \tilde{M}^T,$$

$$\tilde{\Phi}_{31} = [\sqrt{\bar{\tau}} A_1 X \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \sqrt{\bar{\tau}} B_1 C_2 H],$$

$$\tilde{\alpha}_{55} = (A_2 H + B_2 Y_2) + (A_2 H + B_2 Y_2)^T,$$

$$\tilde{M}^T = [\tilde{M}_{11} \quad \tilde{M}_{12} \quad \tilde{M}_{13} \quad \tilde{M}_{14} \quad \tilde{M}_{15}],$$

$$\tilde{N}^T = [\tilde{N}_{11} \quad \tilde{N}_{12} \quad \tilde{N}_{13} \quad \tilde{N}_{14} \quad \tilde{N}_{15}].$$

同时,可得到期望的主控制器增益矩阵为 $K_1 = Y_1 \times X^{-1}$, 以及副控制器增益矩阵为 $K_2 = Y_2 \times H^{-1}$.

利用定理1和定理2,可以得到如下推论.

推论1 对于给定的参数 σ 和 $\bar{\tau} > 0$, 如果存在具有适当维数的矩阵 $\tilde{M}, \tilde{N}, Y_1, Y_2$, 以及对称正定矩阵 $\tilde{Q}, \tilde{\Omega}, X, H$ 使得如下不等式成立,则系统(6)是渐近稳定的:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{11} + \tilde{\Gamma} + \tilde{\Gamma}^T & * & * \\ \tilde{\Phi}_{21}(l) & -X & * \\ \tilde{\Phi}_{31} & 0 & -X \end{bmatrix} < 0, \quad l = 1, 2. \quad (9)$$

其中

$$\tilde{\Phi}_{11} = \begin{bmatrix} A_1 X + X A_1^T + \tilde{Q} & * & * & * & * \\ 0 & \sigma \tilde{\Omega} & * & * & * \\ 0 & 0 & -\tilde{Q} & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\tilde{\Omega} & * \\ H(B_1 C_2)^T & B_2 Y_1 & 0 & B_2 Y_1 & \tilde{\alpha}_{55} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Gamma} = [-\tilde{N} \quad -\tilde{M} + \tilde{N} \quad \tilde{M} \quad 0 \quad 0],$$

$$\tilde{\Phi}_{21}(1) = \sqrt{\tau} \tilde{N}^T,$$

$$\tilde{\Phi}_{21}(2) = \sqrt{\tau} \tilde{M}^T,$$

$$\tilde{\Phi}_{31} = [\sqrt{\tau} A_1 X \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \sqrt{\tau} B_1 C_2 H],$$

$$\tilde{\alpha}_{55} = (A_2 H + B_2 Y_2) + (A_2 H + B_2 Y_2)^T,$$

$$\tilde{M}^T = [\tilde{M}_{11} \quad \tilde{M}_{12} \quad \tilde{M}_{13} \quad \tilde{M}_{14} \quad \tilde{M}_{15}],$$

$$\tilde{N}^T = [\tilde{N}_{11} \quad \tilde{N}_{12} \quad \tilde{N}_{13} \quad \tilde{N}_{14} \quad \tilde{N}_{15}].$$

同时,可得到期望的主控制器增益矩阵为 $K_1 = Y_1 \times X^{-1}$,以及副控制器增益矩阵为 $K_2 = Y_2 \times H^{-1}$.

注4 针对本文系统设计的事件触发控制器,使得系统不仅具有网络控制系统与串级控制系统的优点,同时能够减少网络中数据的传输量,降低网络拥塞现象的出现,提高网络带宽的有效利用率. 给出的设计方法易于在相应的工业控制系统的控制器设计中推广应用.

3 数值仿真实例

本节利用文献[4]给出的火电厂主蒸汽温度串级控制系统来说明该系统中主、副控制器设计方法的可行性. 如图2所示,入口蒸汽量和初级过热器输出处的输出作为系统的设定值,为计算方便,在设计状态反馈控制器时,假定设定值为0. 减温器作为副被控对象 P_2 ,末级过热器为主被控对象 P_1 ,调节阀作为副被控对象的执行器 A ,减温水的流入量作为系统的控制输入 $u_2(t)$.

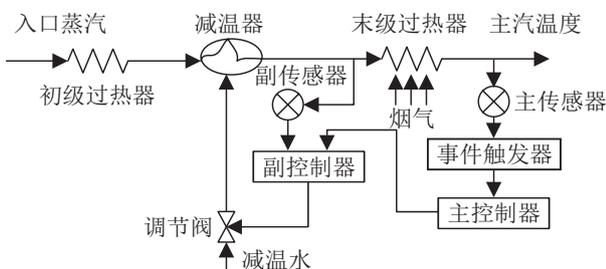


图2 火电厂主蒸汽温度串级控制系统

根据文献[4],主、副被控对象的传递函数为

$$\begin{cases} G_{p1}(s) = \frac{1}{(30s + 1)(3s + 1)}, \\ G_{p2}(s) = \frac{1}{(s + 1)^2(10s + 1)}. \end{cases}$$

将上述传递函数转换为如下相应的状态方程表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} -0.3667 & -0.0111 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} y_2(t), \\ y_1(t) = [0 \quad 0.0111] x_1(t); \\ \dot{x}_2(t) = \begin{bmatrix} -2.1 & -1.2 & -0.1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_2(t), \\ y_2(t) = [0 \quad 0 \quad 0.1] x_2(t). \end{cases}$$

其中:主汽温度 $y_1(t)$ 为主回路的输出量,减温器出口蒸汽温度 $y_2(t)$ 为副回路的输出量;状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 表示的物理量分别为输出 $90y_1(t)$ 和 $10y_2(t)$ 的各阶导数,由于系统的状态是完全能观测的,同时对于系统而言,输出量 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 是可以直接量测的,因此通过输出量 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 可以间接量测状态变量.

利用定理2进行主、副控制器的设计. 假设 $\tau = 0.25$ s, $\sigma = 0.3$, $\rho = 0.3$,系统的初始条件为 $x_1(0) = [0.1 \quad 0]^T$, $x_2(0) = [1 \quad 1 \quad 0]^T$. 利用Matlab/IMI工具箱得到主、副控制器增益分别为

$$K_1 = Y_1 \times X^{-1} = [0.0864 \quad 0.0120],$$

$$K_2 = Y_2 \times H^{-1} =$$

$$[-0.2906 \quad -5.4861 \quad -4.3568].$$

选取 $\tau = 0.25$ s 以及采样周期 $h = 0.2$ s,当 $t \in [0, 30]$ 时,利用定理2得到的触发矩阵 Ω ,在150个采样信号中,只有26个采样信号被发送到主控制器,此外可以计算出引入事件触发器后的平均释放间隔为1.1308 s. 系统的释放间隔和状态响应如图3和图4所示,可以看出所设计的控制器在系统稳定的前提下,平均释放间隔要远大于定周期的释放间隔,从而说明本文所提出的设计方法是可行的.

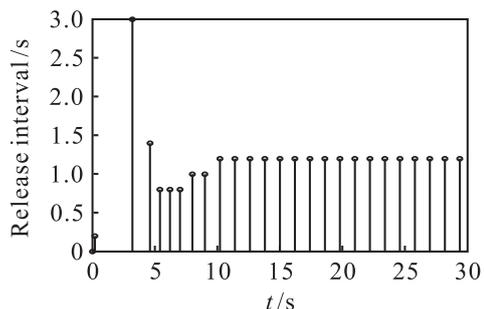


图3 释放间隔

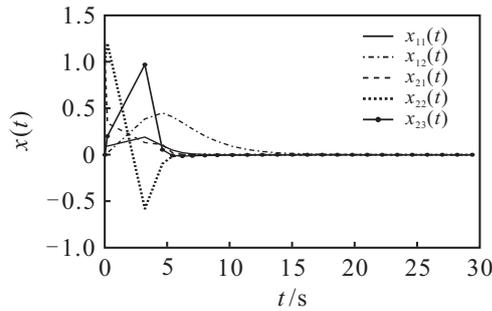


图4 系统状态响应

4 结论

本文主要考虑了基于事件触发机制的网络串级控制系统的主、副控制器设计问题,并将其应用到通过网络连接的火电厂主蒸汽温度串级控制系统中.首次将事件触发机制引入到该系统,其可以被用来确定来自传感器所采样的当前信号是否被发送到下一执行机构中去;在此基础上建立了系统的数学模型,利用李雅普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式技术,得到了系统渐近稳定的充分条件,并且设计了相应的主、副控制器;最后通过仿真实例说明了所提出方法的可行性.

参考文献(References)

- [1] Franks R G, Worley C W. Quantitative analysis of cascade control[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1956, 48(6): 1074-1079.
- [2] Puja D, Lalit C S, Nidul S. Flower pollination algorithm optimized PI-PD cascade controller in automatic generation control of a multi-area power system[J]. *Int J of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 82: 19-28.
- [3] Makoto H, Ryo M, Hirofumi A. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascade converter(MMCC-SDBC)[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 2012, 48(2): 720-729.
- [4] Huang C Z, Bai Y, Liu X J. H_∞ state feedback control for a class of networked cascade control systems with uncertain delay[J]. *IEEE Trans on Industrial Informatics*, 2010, 6(1): 62-72.
- [5] Du Z P, Yue D, Hu S L. H_∞ stabilization for singular networked cascade control systems with state delay and disturbance[J]. *IEEE Trans on Industrial Informatics*, 2014, 10(2): 882-894.
- [6] Srimanta S, Sakthivel R, Shi Y, et al. Dissipative sampled-data controller design for singular networked cascade control systems[J]. *J of the Franklin Institute*, 2016, 353: 3386-3406.
- [7] Du Z P, Yue D, Hu S L. H_∞ stabilization for a class of singular cascade control systems with time-delay in state[J]. *Control Theory and Applications*, 2013, 30(6): 753-759.
- [8] Hu S L, Zhang Y N, Du Z P. Networked-based H_∞ tracking control with event-triggering sampling scheme[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2012, 6(4): 533-544.
- [9] Yue D, Tian E G, Han Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(2): 475-481.
- [10] Hu S L, Yue D, Xie X P, et al. Event-triggered H_∞ stabilization for networked stochastic systems with multiplicative and network-induced delays[J]. *Information Sciences*, 2015, 299: 178-197.
- [11] Fulvio F, Sergio G, Dragan N, et al. Event-triggered transmission for linear control over communication channels[J]. *Automatica*, 2014, 50(9): 490-498.
- [12] Wang H J, Ying Y J, Lu R Q. Network-based H_∞ control for singular systems with event-triggered sampling scheme[J]. *Information Sciences*, 2016, 329: 540-551.
- [13] Wang H J, Shi P, Zhang J H. Event-triggered fuzzy filtering for a class of nonlinear networked control systems[J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 159-168.
- [14] Jia X C, Chi X B, Han Q L. Event-triggered fuzzy H_∞ control for a class of nonlinear networked control systems using the deviation bounds of asynchronous normalized membership functions[J]. *Information Sciences*, 2014, 259: 100-117.
- [15] Liu T F, Jiang Z P. Event-based control of nonlinear systems with partial state and output feedback[J]. *Automatica*, 2015, 53: 10-22.
- [16] Li Y X, Yang G H. Model-based adaptive event-triggered control of strict-feedback nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Neural Networked and Learning Systems*, 2018, 29(4): 1033-1045.
- [17] Mahmoud A, Romain P, Jamal D, et al. Stabilization of nonlinear systems using event-triggered output feedback controllers[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2016, 61(9): 2682-2687.

(责任编辑: 齐 霖)