

基于事件触发机制的网络控制研究综述

杨飞生^{1,2†}, 汪璟¹, 潘泉¹

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 全面综述基于事件的控制系统的研究现状与最新成果. 主要介绍事件驱动通信机制的各种类型和事件触发控制的主要研究内容, 包括不同的建模方法以及控制器与事件产生器的联合设计方案, 重点对时延系统建模方法进行分析, 将事件触发闭环控制系统建模成连续时滞模型. 此外, 关于网络诱导因素对事件触发机制的影响以及网络化事件触发控制的一些应用也进行说明. 最后, 提出目前研究工作所存在的不足, 以及下一步需要解决的开放难题.

关键词: 事件触发控制; 网络控制系统; 时滞模型; 事件与控制联合设计

中图分类号: TP273

文献标志码: A

A survey of networked event-triggered control

YANG Fei-sheng^{1,2†}, WANG Jing¹, PAN Quan¹

(1. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: This paper summarizes the research status and the latest achievements of the event-based control system. It mainly introduces the various types of the event driven communication mechanism and research directions of event-triggered control, including the different methods of modeling, co-design schemes for controller and event generator. It focuses on the modeling method of time delay system, and the closed-loop event-triggered control system is modeled as a time-delay model. In addition, the influence of the network-induced factors on the event triggering mechanism and some applications are also explained. Finally, relevant questions in current research are presented, and some open problems that need to be solved in the future are pointed out.

Keywords: event-triggered control; networked control systems; time-delay model; event trigger and controller joint design

0 引言

随着通信工程、控制科学和计算机技术的发展和融合, 网络控制系统 (Networked control systems, NCSs) 通过共享的通信网络进行信息交换, 但是信道带宽是有限的. 传统的控制以周期的方式执行, 即所谓的时间触发控制, 基于采样数据系统理论^[1], 具有可预测性, 易于实现. 但是, 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计算和电池设备能源资源. 此外, 如果采样周期比较小, 则大量冗余采样信号将被释放到带宽有限的共享通信网络中, 这必然会造成网络拥塞. 因此, 事件触发控制引起了越来越多学者的关注^[2-3]. 所谓事件触发控制, 是指控

制任务是否执行由事先给定的事件触发条件决定, 而不是根据时间情况^[2]. 如果触发条件在某一时刻违背, 则意味着事件触发, 立即执行控制任务. 与时间触发控制机制相比, 事件触发控制方案可以减少计算资源、电池装置能源和通信资源使用. 事实上, 已经通过实验表明^[4-5], 事件触发控制方法可以有效地减少控制任务执行数量, 从而在保证闭环系统性能的基础上, 显著地节约通信资源.

20世纪90年代, 基于事件的思想被率先应用到发动机控制中^[6]. 文献[4-5]的出现显示出基于事件控制的优点, 而后自触发控制出现^[7]. 需要指出, 早期的事件触发控制是所谓的连续事件触发, 需要特殊的

收稿日期: 2017-05-01; 修回日期: 2017-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403311); 西北工业大学青年教师国际名校访学支持计划项目; 西北工业大学研究生创意创新种子基金项目(ZZ2018151).

责任编委: 张文安.

作者简介: 杨飞生(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事时滞系统与网络化控制及其应用等研究; 汪璟(1994—), 女, 硕士生, 从事控制工程的研究.

†通讯作者. E-mail: yangfeisheng@nwpu.edu.cn

硬件对当前状态进行连续监测. 为克服这一问题^[8], 文献[9]提出了周期事件触发. 但无论是事件触发还是自触发, 都需要注意一个重要的问题, 那就是需要保证任意两个事件执行时刻的最小时间间隔, 即最小事件间隔时间严格大于零. 为了解决这一问题, 文献[10]提出了基于采样数据的事件触发. 周期事件触发和基于采样数据的事件触发都属于离散事件触发, 关于离散事件触发的稳定性分析和控制器设计方法已有一些文献进行了研究^[11-12]. 随着网络化的日益加深, 控制系统日趋大规模集成化, 为了减轻系统间的通信压力, 对于大规模系统的分散式事件触发控制^[13-14]和分布式事件触发控制^[15-16]引起了越来越多学者的关注. 文献[17-18]提出了动态事件触发机制, 与静态事件触发相比, 它可以增大最小事件间隔时间, 甚至可以接近可允许最大传输间隔.

事件触发控制(ETC)已成为当前流行的研究主题^[19], 这点也可从2010年到2015年顶级会议IEEE CDC每年都设置有关ETC的专题分会窥见一斑, 并且自2015年独立发起了基于事件的控制、通信与信号处理国际会议(EBCCSP), 今年将在葡萄牙举办第3届EBCCSP'2017. 值得一提的是, 现代工业过程的日益复杂化所引起的有线和无线网络系统的流行, 不可避免地出现能源、通信和计算资源的限制. 将事件触发思想应用于嵌入式系统, 可以有效地解决这些问题. 从潜在的设计方法角度讲, 基于事件控制的嵌入式系统中导出的许多结果可以看作是网络控制系统的一种特殊情况^[2].

本文全面综述基于事件的控制系统的研究现状与最新成果. 主要介绍事件驱动通信机制的各种类型和事件触发控制的主要研究内容, 包括不同的建模方法以及控制器与事件产生器的联合设计方案, 重点对时延系统建模方法进行分析, 将事件触发闭环控制系统建模成连续时滞模型. 此外, 关于网络诱导因素对事件触发机制的影响以及网络化事件触发控制的一些应用也进行说明. 最后, 提出目前研究工作所存在的不足, 以及下一步需要解决的开放难题.

1 基于事件的事件触发通信机制分类

基于事件的控制系统的控制主要由触发通信机制和反馈控制器两个关键元素组成, 本节首先介绍几种ETC方案.

1.1 事件触发控制

1.1.1 连续事件触发

偏差 $e(t)$ 定义为

$$e(t) = x(t) - x(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}). \quad (1)$$

其中: t_k 为传感器从被控对象获得数据并将数据传输给控制器的时刻, $t_0 = 0$; $x(t_k)$ 和 $x(t)$ 分别为系统在上一个传输采样时刻的状态和当前状态.

在很多文献中, 根据实时测量状态 $x(t)$ 可以在线计算 $e(t)$, 当满足事件触发条件时, 直接进行触发采样^[20]. 其中事件触发条件分为固定阈值事件触发条件和相对阈值事件触发条件两种类型, 分别为

$$t_{k+1} = t_k + \min\{t \mid |e(t)| \geq \delta\}, \quad (2)$$

$$t_{k+1} = t_k + \min\{t \mid |e(t)| \geq \delta \|x\|\}, \quad (3)$$

其中 $\delta > 0$ 为给定的常数. 由式(2)和(3)可见, 当前数据是否可以传输, 由事件触发方案决定, 但是需要注意的是, 连续事件触发机制需要特殊的硬件对系统状态进行连续测量^[13].

1.1.2 离散事件触发

与文献[20]所提到的连续事件触发方案相比, 离散事件触发只在一个固定的采样周期测量状态、计算偏差, 所以不需要额外的硬件进行连续的测量和计算. 早期的离散事件触发由Heemels提出, 也称为周期事件触发控制^[8-9, 21-22]. 周期事件触发的控制策略将传统的周期数据采样控制与事件触发控制相结合, 对传感器和控制器的数据周期地进行采样交流^[21-22]. 此外, 文献[21]提出了基于模型的周期事件触发控制, 相对于开环形式的事件触发控制方案而言, 采用了闭环建模方法, 与采用基线策略的传统事件触发控制相比, 可以显著减少信号传输数量, 若计算消耗的能量小于通信所消耗的, 则可以增加无线设备的电池使用寿命. 之后, 文献[22]对文献[21]进行了发展, 尽管周期事件触发控制具有很多优点, 但需要注意的是, 文献[8-9]提出的周期事件触发控制是在假设不存在网络诱导时滞、数据丢包的情况下, 而实际上这种假设非常具有局限性. 在基于采样数据的事件触发中, 并不需要这种假设, 其控制机制如下: 在固定间隔 h 对系统状态进行采样, 采样状态 $x(jh)(j \in N)$ 是否进行传输由传输误差和状态误差决定, 传输误差是指当前系统状态与上一个传输状态之间的误差, 而状态误差是当前系统状态到平衡点的误差. 当采样数据 $x(t_k h)$ 进行传输时, 为了下一次 $e(i_k h)$ 的计算, 还需要将采样数据 $x(t_k h)$ 储存在存储器中. 下一个传输时刻由事件触发器确定, 可以表示为

$$t_{k+1} h = t_k h + \min_{l \geq 1} \{lh \mid |e^T(i_k h) \Phi e(i_k h)| \geq \delta\}$$

$$\delta x^T(i_k h)\Phi x(i_k h)\}. \quad (4)$$

其中: $\delta > 0$ 为给定的标量参数, Φ 为待求解的正定加权触发矩阵, $i_k h = t_k h + lh$, $e(i_k h) = x(i_k h) - x(t_k h)$. 由式(4)可见, 事件的传输由 $e_k(i_k h)$ 和当前状态 $x(i_k h)$ 决定, 当式(4)中的条件满足时, 事件触发.

1.2 自触发控制

自触发控制的概念是2004年Velasco基于实时控制系统提出的, 在自触发中, 控制器前后两次更新的时间是关于状态的函数, 即

$$t_{k+1} = t_k + \Gamma(x(t_k)), \quad (5)$$

其中 $\Gamma: R^{n_x} \rightarrow R^+$ 为自触发执行的控制律, 决定了下一次的执行时间, 需要提前给出.

事件触发与自触发的不同在于, 前者是被动的, 后者是主动的: 事件触发控制的触发条件是基于对系统状态连续监测的当前测量值, 触发条件违背时, 事件触发; 在自触发中, 不需要对触发条件进行连续监控, 根据之前接收的数据和系统的动态信息, 提前计算出下一个控制更新时刻. 有关事件触发与自触发的更多区别, 可参见文献[23].

1.3 自适应ETC

相比于传统事件触发机制, 使用自适应事件触发可以根据资源的估计情况调整阈值^[24], 触发条件为

$$\begin{aligned} & t_{k+1} h = \\ & t_k h + \min_{l \geq 1} \{lh | e^T(i_k h)\Phi e(i_k h) > \\ & \delta(t_k h)x^T(t_k h)\Phi x(t_k h)\}, \\ & \delta(t_{k+1} h) = \\ & \max \left\{ \delta_m, \delta(t_k h) \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \arctan[\beta(\|x(t_{k+1} h)\| - \|x(t_k h)\|)] \right) \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

其中: $\alpha, \beta > 0$ 为可调参数, $\delta_m > 0$ 为 $\delta(t_k h)$ 的给定下界, $\delta(0) = \delta_m$. 如果 $\alpha \equiv 0$, 则文献[24]所提出的自适应事件触发机制(6)将变为文献[10, 25-26]的时不变通信机制.

传统的事件触发机制中触发参数 δ 是一个预先确定的常值, 而在自适应事件触发机制中, 触发参数 $\delta(t_k h)$ 由当前的传输信号 $x(t_k h)$ 、上一次的传输信号 $x(t_{k-1} h)$ 、参数 α 、 β 和 δ_m 共同决定.

1.4 动态ETC

上述所提到的几种事件触发机制都是由基于系统状态的静态规则组成, 所谓静态是指触发条件中只有当前状态 x 和偏差 e . 文献[17]提出了一种基于事件的动态触发机制, 这种方法引入了内部动态变量 η ,

有

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= -\beta(\eta) + \delta\alpha(\|x\|) - \gamma(\|e\|), \\ \eta(0) &= \eta_0, \end{aligned}$$

其中局部Lipschitz连续 K_∞ 函数 β 、实数 $\delta \in (0, 1)$ 和 $\eta_0 \in R_0^+$ 都是设定的参数. η 可以看作是 $\delta\alpha(\|x\|) - \gamma(\|e\|)$ 的一个滤波值, 当函数 β 为非线性时, η 也是非线性的. 动态事件触发的触发条件为

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= \inf\{t \in R | t > t_k \wedge \eta(t) + \\ & \theta(\delta\alpha(\|x(t)\|) - \gamma(\|e(t^-)\|)) \leq 0\}, \quad (7) \end{aligned}$$

其中 $\theta \in R_0^+$ 为额外设计的参数. 值得注意的是, 当 $\theta \rightarrow \infty$ 时, 动态事件触发机制(7)变为如下静态事件触发机制(8), 即静态事件触发机制(8)是动态事件触发机制(7)的一种极限情况, 即

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= \inf\{t \in R | t > t_k \wedge \\ & \delta\alpha(\|x(t)\|) - \gamma(\|e(t^-)\|) \leq 0\}. \quad (8) \end{aligned}$$

这种方法可以保证两个执行时刻之间的间隔大于使用静态触发机制的时间间隔, 并且可以与分布式、自触发、或是周期事件触发机制相结合.

1.5 分布式ETC

分布式事件触发控制可体现出多智能体系统信息交互的特征^[15-16]. 假设一个具有 N 个智能体的分布式多智能体系统可以描述为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t), \quad x_i(0) = x_i^0, \\ & i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

通信拓扑由一个有向加权图 $\zeta = \{\Delta, \xi, W\}$ 主导. 其中: Δ 和 ξ 分别表示智能体节点和边的集合, $W = (\omega_{ij})_{N \times N}$ 是一个加权邻接矩阵.

当数据在各智能体之间以数字信号形式传递时, 文献[16]根据基于采样数据的事件触发控制思想, 提出了一种分布式事件触发传输策略, 它假设所有智能体的采样周期为 $h > 0$. 智能体 i 的采样信号是否传播取决于采样时刻 $kh (k \in Z^+)$ 事件触发条件是否违背, 事件触发条件为

$$\begin{aligned} & e_i^T(t_{m_i}^i h + l_i h)\Phi_i e_i(t_{m_i}^i h + l_i h) \leq \\ & \delta_i \psi_i^T(t_{m_i}^i h)\Phi_i \psi_i(t_{m_i}^i h). \quad (9) \end{aligned}$$

其中: δ_i 为阈值参数, $t_{m_i}^i h$ 为智能体 i 的采样信号进行传播的时刻, 且有

$$\begin{aligned} e_i(t_{m_i}^i h + l_i h) &= x_i(t_{m_i}^i h + l_i h) - x_i(t_{m_i}^i h), \\ \psi_i(t_{m_i}^i h) &= \sum_{j=1}^N \omega_{ij} [x_i(t_{m_i}^i h) - x_j(t_{m_j}^j h)]. \end{aligned}$$

与分布式ETC不同,在分散式事件触发策略中^[13-14],本地控制器使用相应子系统的反馈信息对系统进行控制,各子系统控制器之间没有信息交互。

2 事件触发的反馈控制方法

2.1 状态反馈

文献[27]回顾了基于状态反馈的事件触发控制的最新工作进展.文献[28]重点对连续系统事件触发控制的鲁棒性进行介绍,但并未考虑模型不确定性和通信时延的影响.文献[29]在文献[28]的基础上,提高了控制回路的参考值跟踪能力,表明对于受有界常值或时变干扰影响的被控对象,状态反馈事件触发机制可以确保设定跟踪,保证输出在一个指定参考信号的有界区域内,但总体的方法仍未完全补偿模型不确定性.文献[30]针对基于模型的ETC系统,提出了一种触发门限可变的触发机制。

2.2 输出反馈

在实际系统中,控制系统的状态测量值并不总是全部可用的.由于该原因,文献[31]提出了基于输出反馈的事件触发控制。

静态输出反馈控制表示为

$$u(t) = Ky(t), t_k h \leq t < t_{k+1} h,$$

其中 K 为常数实矩阵.针对基于模型的分散事件触发控制系统,文献[32]提出了一种新的充分稳定条件,其中事件触发控制采用的是静态输出反馈。

动态输出反馈控制^[11]为

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_K x_c(t) + B_K x_c(t-d(t)) + C_K \tilde{y}(t), \\ \tilde{y}(t) = y(i_k h) = e(t) + y(t-d(t)), \\ u(t) = D_K x_c(t), t_k h \leq t < t_{k+1} h, \end{cases}$$

其中 A_K, B_K, C_K, D_K 为常数实矩阵.文献[11]解决了连续LTI系统的动态输出反馈事件触发控制问题,为了实现基于输出的离散事件触发控制,对输出信号进行周期采样,而不是连续监测.文献[33]对MIMO系统提出了内部稳定条件,这是第1次研究输出反馈事件触发控制系统的内部稳定性,此外还提出了有效的方法提高跟踪性能、降低传输数量。

在实际应用中,静态输出反馈更容易实现,但是其设计要比动态输出反馈困难得多。

2.3 基于状态观测器的输出反馈控制

基于状态观测器的输出反馈控制是将Lunberger观测器加到闭环系统中,触发条件由状态观测值和事件产生状态的误差决定.文献[31]对连续系统首次提出基于观测器的事件触发控制.文献[34]从最优

控制的角度考虑离散时间系统中基于状态观测器的事件触发控制问题,采用基于仿真的方法,使用接收信息的最小偏差协方差条件,确定传感器的观测器和控制器的本地观测器.文献[35]将基于状态观测器的输出反馈控制结构应用于线性离散系统中.此外,还有事件触发PID控制^[36]和模型预测控制^[37]等策略。

3 ETC的主要研究内容

在基于事件的控制机制设计中,第1个重要的问题是必须确保任意两个事件执行时刻之间的最小时间间隔严格大于零.如果最小事件间隔时间为零,则会出现无限事件发生在有限时间内的Zeno现象.第2个重要的问题是反馈控制器与事件触发机制参数的联合设计.目前存在的大多数方法是先不考虑控制系统事件触发性设计反馈控制器,然后设计事件触发机制.很明显,这种方法不可能获得结合反馈控制器与事件触发机制阈值参数的最优控制设计,从而导致在保证闭环系统性能的基础上,控制执行次数大于最优控制的情况。

3.1 事件驱动的控制系统的建模

目前,对于网络控制系统事件触发机制的稳定性分析提出了一些主要的建模方法,例如脉冲系统方法^[9,38]、离散分段线性系统方法^[9]、离散时间摄动线性系统方法^[9]、时延系统建模方法^[10]。

首先,考虑被控对象的形式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A^p x(t) + B^p u(t) + B^\omega \omega(t), \\ y(t) = C^p x(t). \end{cases} \quad (10)$$

其中: $x(t) \in R^{n_x}$ 为系统状态向量, $u(t) \in R^m$ 为控制输入向量, $\omega(t) \in R^{n_\omega}$ 为外部扰动, $y(t) \in R^{n_y}$ 为输出向量, A^p, B^p, B^ω 和 C^p 为相应维数的参数矩阵。

3.1.1 脉冲系统模型

设计控制器为 $u(t) = K^p \hat{x}(t)$,其中

$$\hat{x}(t) = \begin{cases} x(t_k), C(\xi(t_k)) > 0; \\ \hat{x}(t_k), C(\xi(t_k)) \leq 0. \end{cases}$$

$$C(\xi(t_k)) = \xi^T(t_k) Q \xi(t_k) > 0.$$

$$\xi := [x^T \hat{x}^T]^T \in R^{n_\xi}, Q \in R^{n_\xi \times n_\xi}.$$

$\hat{x}(t)$ 的值可以解释为状态 $x(t)$ 最新传输到控制器的测量值, $n_\xi = 2n_x$ 。

综上,根据文献[9,38]得到脉冲系统模型

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}\xi + \bar{B}\omega \\ 1 \end{bmatrix}, \tau \in [0, h].$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \xi^+ \\ \tau^+ \end{bmatrix} &= \begin{cases} \begin{bmatrix} J_1 \xi \\ 0 \end{bmatrix}, & \xi^T Q \xi > 0, \tau = h; \\ \begin{bmatrix} J_2 \xi \\ 0 \end{bmatrix}, & \xi^T Q \xi \leq 0, \tau = h. \end{cases} \\ z &= \bar{C}\xi + \bar{D}\omega. \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A} &:= \begin{bmatrix} A^p & B^p K^p \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} := \begin{bmatrix} B^\omega \\ 0 \end{bmatrix}, \\ J_1 &:= \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix}, J_2 := \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$z \in R^{n_z}$ 为 \bar{C} 和 \bar{D} 选择适当值时的性能输出, τ 为跟踪上一个采样时刻之后所经过的时间.

3.1.2 分段线性系统模型

与脉冲系统方法相比,离散分段线性系统可以获得保守性较低的全局指数稳定条件^[9]. 离散分段线性模型是通过脉冲系统在采样时间 $t_k = kh, k \in N$ 进行离散化得到的,通过定义状态变量 $\xi_k := \xi(t_k)$, 得到离散分段线性模型

$$\xi_{k+1} = \begin{cases} A_1 \xi_k, & \xi_k^T Q \xi_k > 0; \\ A_2 \xi_k, & \xi_k^T Q \xi_k \leq 0. \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &:= e^{\bar{A}h} J_1 = \begin{bmatrix} A + BK^p & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix}, \\ A_2 &:= e^{\bar{A}h} J_2 = \begin{bmatrix} A & BK^p \\ 0 & I \end{bmatrix}, \\ A &:= e^{A^p h}, \\ B &:= \int_0^h e^{A^p s} B^p ds. \end{aligned}$$

3.1.3 摄动线性系统模型

与离散分段线性系统方法相比,离散时间摄动线性系统方法所得到的稳定性条件更容易计算,但保守性较强^[9]. 离散时间摄动线性系统模型为

$$x_{k+1} = (A + BK^p)x_k + BK^p e_k. \quad (13)$$

其中: $x_k = x(t_k)$, $\hat{x}_k = \lim_{t \rightarrow t_k} \hat{x}(t)$, $e_k := \hat{x}_k - x_k$.

上述所提到的3种建模方法难以用于考虑网络时延的事件触发控制系统. 为了克服这一缺点,文献[10]提出了考虑时变时延的事件触发系统的时延系统建模方法,下面详细介绍这种方法.

3.1.4 时延系统模型

考虑网络控制系统事件触发控制的结构如图1所示,以状态反馈为例,输出反馈类同.

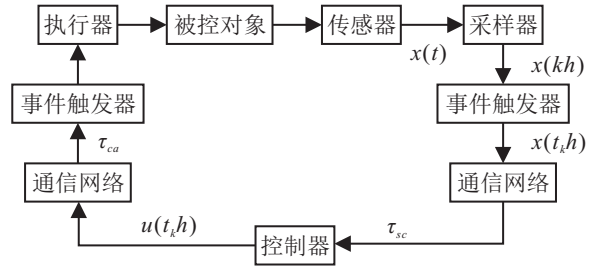


图1 事件触发机制的网络控制系统模型

由于控制器的计算时延一般较小,可忽略不计,定义 τ_{sc} 与 τ_{ca} 的总和 τ_k 为整个网络的时延. 控制律采用状态反馈 $u(t) = K_c x(t)$, 在采样器的后面设计一个与状态相关的事件触发条件如下:

$$[x((t_k + l)h) - x(t_k h)]^T \Phi [x((t_k + l)h) - x(t_k h)] \leq \delta x^T((t_k + l)h) \Phi x((t_k + l)h).$$

其中: Φ 为一个正定矩阵, $\delta \in [0, 1)$. 事件触发器会将符合要求的采样数据传输出去,假设传输时刻为 $t_0 h, t_1 h, t_2 h, \dots$, 触发器传输数据的传输周期定义为 $\gamma_k h = t_{k+1} h - t_k h$. 需要注意的是,当 $\delta = 0$ 时,事件触发控制变为时间触发控制.

定义时滞函数

$$d(t) = \begin{cases} t - t_k h, & t \in L_0; \\ t - t_k h - ih, & t \in L_i, i = 1, 2, \dots, \gamma_k - 2; \\ t - t_k h - (\gamma_k - 1)h, & t \in L_{\gamma_k - 1}. \end{cases}$$

其中

$$\begin{aligned} L_0 &= [t_k h + \tau_k, t_{k+1} h + \tau_{k+1}), \\ L_i &= [t_k h + ih + \bar{\tau}, t_k h + (i+1)h + \bar{\tau}), \\ L_{\gamma_k - 1} &= [(t_{k+1} - 1)h + \bar{\tau}, t_{k+1} h + \tau_{k+1}), \\ \bar{\tau} &= \max\{\tau_k\}. \end{aligned}$$

定义误差函数

$$e_k(t) = x(t_k h) - x(t - d(t)).$$

综上所述可得

$$\begin{aligned} e_k^T(t) \Phi e_k(t) &\leq \delta x^T(t - d(t)) \Phi x(t - d(t)), \\ t &\in [t_k h + \tau_k, t_{k+1} h + \tau_{k+1}). \end{aligned}$$

结合式(11)闭环系统可写成如下时滞模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A^p x(t) + B^p K_c x(t - d(t)) + B^p K_c e_k(t) + B^\omega \omega(t), \\ y(t) = C^p x(t), \\ x(t) = x_0(t), t \in [-\bar{\tau} + h, 0). \end{cases}$$

时延 $d(t)$ 只由采样周期和网络时延的范围决定,使用该模型有利于分析事件触发控制中网络时延和采样

周期对系统的影响.

3.2 稳定性分析

文献[3]研究了带有额外干扰的连续线性系统的稳定性,表明即使是简单的系统,其稳定性分析也是非常复杂具有挑战的.目前事件触发控制系统稳定性分析的方法主要有Lyapunov法、输入-状态稳定(Input-to-state stable ISS)和基于无源性的输入输出方法(Passivity-based I/O).

3.2.1 Lyapunov函数或泛函方法

基于文献[10]所给出的时延方法,文献[25]对考虑网络诱导时滞和参数不确定性系统的指数稳定和增益分析的问题进行研究.利用不连续李雅普诺夫函数方法和线性矩阵不等式给出了指数稳定的充分条件,基于李雅普诺夫泛函方法,文献[39]给出了分析事件触发控制系统稳定性的理论框架,根据线性矩阵不等式得到了稳定的充分条件.

3.2.2 输入-状态稳定ISS方法

文献[40]对自触发控制系统的ISS进行了研究,表明在考虑干扰的情况下闭环系统为指数一致ISS.文献[41]研究了非线性离散系统考虑外部干扰情况下的事件触发控制问题,应用ISS方法估计外部干扰的影响.

当线性系统(11)不考虑干扰($\omega = 0$)时,假设线性反馈控制律 $u = K_c x$ 使闭环系统渐近稳定.在考虑干扰的情况下,闭环系统

$$\dot{x}(t) = A^p x(t) + B^p K_c x(t) + B^\omega \omega(t) \quad (14)$$

被称为指数输入-状态稳定^[23].

3.2.3 基于无源性的输入输出方法

对于大型NCSs事件触发控制的稳定性分析,文献[42]提出了基于无源性的输入输出法.假设每一个子系统是输出反馈无源系统,这里信息的传输依赖于本地输出相对于阈值的偏差,在考虑有界干扰的情况下,对系统进行有限增益稳定分析.文献[43]研究了网络无源系统事件触发通信的分布式控制,基于获得的事件触发通信策略,实现对区域之间数据的传输进行分布式事件触发控制.

3.3 事件触发机制与控制器联合设计

目前主要有两种方法对事件触发机制与控制器进行联合设计:李雅普诺夫函数法^[10]和价值函数最小化^[44].文献[10]对考虑不确定性因素和传输时延的网络系统进行了事件触发 H_∞ 控制,首先将闭环系统建模为时滞模型(14),然后基于该模型和李雅普诺夫函数,使用矩阵不等式对事件触发机制和控制器

进行联合设计.文献[45]使用价值函数最小化来处理线性随机系统的联合设计问题.将底层优化问题看作是LQG调节器和最优停时问题两个子问题来处理,因此可以使用最优随机控制的标准技术解决事件触发方面的最优问题.对于线性连续系统,文献[25]建立了基于动态输出反馈和时变时延的事件触发控制时滞模型,提出了动态输出反馈和事件触发控制机制联合设计的方法.文献[26]针对非线性系统的事件触发控制,提出了事件触发控制和模糊控制器联合设计的方法.文献[46]对离散线性变参数系统提出了事件触发 H_∞ 控制和混合事件触发机制的联合设计,事件触发是在当前值与上一个传输值的误差范数大于比例阈值与额外阈值之和时发生.

3.4 事件触发故障诊断与容错控制

文献[47]提出了一种新的离散网络控制系统模型,该模型包括触发参数,动态量化和故障.文献[48]关注于空间分布系统的容错控制问题,将系统建模为抛物型偏微分方程.基于能够反映无限维系统动态特性的有限维系统模型,事件触发网络控制可以使用最少的传感器到控制器通信,保证系统闭环稳定.

4 网络诱导因素下的ETC

4.1 考虑通信时延

在网络控制系统中,数据包在控制器和被控制对象之间传输将会产生延时.通常时延可分为常时延、时变时延、混合时延、随机时延等.文献[49]考虑了通信常时延,研究一阶系统事件触发控制.由于网络结构的不确定性和参数不确定性,对时变时延的研究更具有实用价值.文献[50]将基于模型网络控制系统与事件触发控制相结合,对不确定动态系统的稳定性进行研究分析,并将其推广到考虑了时变网络时延和量化的情况下.文献[51]在考虑混合时延的情况下,对一类非线性随机系统中的状态估计问题进行了研究.此外,文献[52]研究了带有随机通信时延情况下的离散异构多智能体系统中的事件触发设计问题.

4.2 考虑数据丢包

在数据传输过程中,不仅会产生传输时延,由于存在信息冲突或节点失效,还会出现一些数据包的丢失.文献[53]将事件触发采样与时间触发采样结合起来判断丢包是否发生.文献[54]假设丢包只发生在采样数据向控制器传输的过程中,对于分布式事件触发控制,给出了在保证每个区域都稳定的情况下最大连续丢包量.文献[55]考虑了时延和丢包两个因素对分布式事件触发控制的影响.

4.3 考虑信号量化

在网络控制系统中,不可避免地会产生量化误差,这将影响网络控制系统的性能. 文献[19]将分布式事件触发动态量化器用于多智能体系统中. 此外,文献[56]研究了考虑量化的网络系统的事件触发控制设计问题,将网络诱导时滞、状态和控制输入量化以及事件触发机制加入到统一的框架中.

5 网络化ETC的应用研究

5.1 无线网络系统

共享的通信信道,无线节点处计算能力较低等都给无线网络系统中传感器和控制机制设计带来了挑战. 文献[13]对无线网络提出了一种事件触发控制的分散式机制,由于减少了通信传输数量,这种控制方法可以降低系统对计算能力的要求. 文献[34]研究了无线网络控制系统的输出反馈事件触发控制,在该控制方法中,传感器到控制器、控制器到执行机构的通信连接是分离的.

5.2 电网控制系统

在电网广域预防性控制中,一般都按照最坏的情况进行周期性控制,这必然会产生大量的冗余信息,因此已有一些文献将事件触发机制应用到电力系统中^[57-59]. 文献[57]将事件触发机制引入到电力系统广域控制. 文献[58-59]提出了基于事件触发的负载频率控制. 文献[58]对考虑了通信时延的多区域电力系统进行事件触发负载频率控制,使用时延系统建模法将负载频率控制系统建模成时滞模型,采用李雅普诺夫函数法对系统进行稳定性分析与综合.

5.3 其他方面应用

文献[60]将自触发引入到机器人网络协调优化部署;文献[61]针对传感器网络融合估计中由能量受限引发的通信资源受限问题,提出了一种基于多通道解耦的事件触发量测传输机制,并将其应用于火力控制系统中的光电传感网络.

6 结论

尽管已经提出了一些关于事件触发机制的重要结论,但目前关于事件触发网络化控制研究还存在以下问题需要进一步探讨:

1) 如何将内部动态变量引入到基于离散事件触发机制的网络控制系统中,并将其统一建模为时滞系统,进而对其进行分析与综合是一个有待解决的重要课题.

2) 将动态触发机制的思想引入基于采样数据的事件触发控制,无论是对于理论研究还是实践上都有

重要意义. 此外,研究如何将分布式事件触发机制与动态触发机制结合的问题,有利于推进多智能体系统的事件触发控制研究.

3) 针对随机控制系统,应该考虑其修正事件产生机制,以防止由于外部扰动所引起的频繁事件触发,尤其是对于事件触发阈值随时间趋于小的、正值的系统.

4) 目前存在的事件触发控制都是针对建模成常微分方程(ODE)系统,对于建模为偏微分方程(PDE)的系统如何进行事件触发控制需要进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Astrom K J, Wittenmark B. Computer controlled systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 23-39.
- [2] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(9): 1680-1685.
- [3] Heemels W, Sandee J. Analysis of event-driven controllers for linear systems[J]. Int J of Control, 2008, 81(4): 571-590.
- [4] Arzén K E. A simple event-based PID controller[J]. Proc of IFAC World Congress. Oxford: Elsevier, 1999: 423-428.
- [5] Aström K J, Bo B. Comparison of periodic and event based sampling for first order stochastic systems[C]. Proc of IFAC World Congress. Oxford: Elsevier, 1999: 301-306.
- [6] Hendricks E, Jensen M, Chevalier A. Problems in event based engine control[C]. Proc of ACC. Baltimore: IEEE, 1994: 1585-1587.
- [7] Velasco M, Mart P, Fuertes J M. The self triggered task model for real-time control systems[C]. Proc of the 24th IEEE RTSS. Cancun: IEEE, 2004: 67-70.
- [8] Heemels W, Donkers M, Teel A R. Periodic event-triggered control based on state feedback[C]. Proc of the 50th IEEE CDC/ECC. Orlando: IEEE, 2011: 2571-2576.
- [9] Heemels W, Donkers M, Teel A R. Periodic event-triggered control for linear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2013, 58(4): 847-861.
- [10] Yue D, Tian E, 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.
- [11] Zhang X M, Han Q L. Event-triggered dynamic output feedback control for networked control systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(4): 226-234.
- [12] Zhang X M, Han Q L, Zhang B L. An overview and

- deep investigation on sampled-data-based event-triggered control and filtering for networked systems[J]. *IEEE Trans on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 4-16.
- [13] Mazo M, Tabuada P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2011, 56(10): 2456-2461.
- [14] Liu T, Jiang Z P. Event-based nonlinear control: From centralized to decentralized systems[C]. *Proc of the 2015 IEEE ICIA*. Lijiang: IEEE, 2015: 690-695.
- [15] Dimarogonas D V, Johansson K H. Event-triggered control for multi-agent systems[C]. *Proc of the 48th IEEE CDC/CCC*. Shanghai: IEEE, 2009: 7131-7136.
- [16] Guo G, Ding L, Han Q L. A distributed event-triggered transmission strategy for sampled-data consensus of multi-agent systems[J]. *Automatica*, 2014, 50(5): 1489-1496.
- [17] Girard A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 60(7): 1992-1997.
- [18] Fukuda K, Fujita K, Ushio T. Dynamic event-triggered minimal-order observer for linear systems[C]. *Proc of the 2nd Int Conf on EBCCSP*. Krakow: IEEE, 2016: 1-8.
- [19] Losada M G. Contributions to networked and event-triggered control of linear systems[M]. Berlin: Springer, 2016: 13-18.
- [20] Wang X, Lemmon M D. Event-triggered broadcasting across distributed networked control systems[C]. *Proc of ACC*. Seattle: IEEE, 2008: 3139-3144.
- [21] Heemels W, Donkers M. Model-based periodic event-triggered control for linear systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(3): 698-711.
- [22] Verhaegh J, Gommans T, Heemels W. Extension and evaluation of model-based periodic event-triggered control[C]. *Proc of ECC*. Zurich: IEEE, 2012: 1138-1144.
- [23] Heemels W, Johansson K H, Tabuada P. An introduction to event-triggered and self-triggered control[C]. *Proc of CDC*. Maui: IEEE, 2012: 3270-3285.
- [24] Peng C, Yang M, Zhang J. Network-based H_∞ control for T-S fuzzy systems with an adaptive event-triggered communication scheme[J]. *Fuzzy Sets & Systems*, 2017, 329: 61-67.
- [25] Hu S, Yue D. L_2 -gain analysis of event-triggered networked control systems: A discontinuous Lyapunov functional approach[J]. *Int J of Robust & Nonlinear Control*, 2013, 23(11): 1277-1300.
- [26] Peng C, Han Q L, Yue D. To transmit or not to transmit: A discrete event-triggered communication scheme for networked Takagi-Sugeno fuzzy systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2013, 21(1): 164-170.
- [27] Bemporad A, Heemels M, Johansson M. *Networked control systems*[C]. Berlin: Springer, 2010, 406: 293-358.
- [28] Lunze J, Lehmann D. A state-feedback approach to event-based control[J]. *Automatica*, 2010, 46(1): 211-215.
- [29] Lehmann D, Lunze J. Extension and experimental evaluation of an event-based state-feedback approach[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(2): 101-112.
- [30] 李国梁, 张合新, 周鑫. 基于模型的变门限状态反馈事件触发控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(4): 723-728. (Li G L, Zhang H X, Zhou X. Model-based event-triggered state feedback control with variable threshold[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(4): 723-728.)
- [31] Alessandro A, Lorenzo M. *Analysis and design of nonlinear control systems*[M]. Berlin: Springer, 2008: 127-148.
- [32] Shen M, Yan S, Zhang G. A new approach to event-triggered static output feedback control of networked control systems[J]. *ISA Trans*, 2016, 65: 468-474.
- [33] Jetto L, Orsini V. A new event-driven output-based discrete-time control for the sporadic MIMO tracking problem[J]. *Int J of Robust & Nonlinear Control*, 2014, 24(5): 859-875.
- [34] Li L, Lemmon M. Weakly coupled event triggered output feedback system in wireless networked control systems[J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2014, 24(2): 247-260.
- [35] Jetto L, Orsini V. Event-triggered internally stabilizing sporadic control for MIMO plants with non measurable state[J]. *IFAC Proc Volumes*, 2011, 44(1): 10225-10230.
- [36] Tiberi U, Araujo J, Johansson K H. On event-based PI control of first-order processes[J]. *IFAC Proc Volumes*, 2012, 45(3): 448-453.
- [37] Li H P, Shi Y. Event-triggered robust model predictive control of continuous-time nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2014, 50(5): 1507-1513.
- [38] Goebel R, Sanfelice R G, Teel A. *Hybrid dynamical systems*[J]. *IEEE Control Systems*, 2009, 29(2): 28-93.
- [39] Marchand N, Durand S, Castellanos J. A general formula for event-based stabilization of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(5): 1332-1337.
- [40] Manuel M J, Anta A, Tabuada P. An ISS self-triggered implementation of linear controllers[J]. *Automatica*, 2010, 46(8): 1310-1314.
- [41] Zhang P, Liu T, Jiang Z P. Input-to-state stabilization of nonlinear discrete-time systems with event-triggered

- control[C]. Proc of CCC. Chengdu: IEEE, 2016: 885-890.
- [42] Yu H, Zhu F, Antsaklis P J. Stabilization of large-scale distributed control systems using I/O event-driven control and passivity[C]. Proc of 50th IEEE CDC/ECC. Orlando: IEEE, 2011: 4245-4250.
- [43] Yu H, Antsaklis P J. Distributed formation control of networked passive systems with event-driven communication[C]. Proc of CDC. Maui: IEEE, 2012: 3292-3297.
- [44] Persis C D, Sailer R, Wirth F. Parsimonious event-triggered distributed control: A zeno free approach[J]. Automatica, 2013, 49(7): 2116-2124.
- [45] Molin A, Hirche S. Optimal event-triggered control under costly observations[C]. Proc of Int Symposium on MTNS. Budapest, 2010: 2203-2208.
- [46] Li S, Sauter D, Xu B. Co-design of event-triggered H_∞ control for discrete-time linear parameter-varying systems with network-induced delays[J]. J of the Franklin Institute, 2015, 352(5): 1867-1892.
- [47] Duan K, Zhang W. Event-triggered fault-tolerant control for networked systems with dynamic quantiser[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(9): 1088-1096.
- [48] Xue Da, El-Farra N H. Actuator fault-tolerant control of networked distributed processes with event-triggered sensor-controller communication[C]. Proc of ACC. Boston: IEEE, 2016: 1661-1666.
- [49] Cervin A, Henningson T. Scheduling of event-triggered controllers on a shared network[C]. Proc of CDC. Cancun: IEEE, 2009: 3601-3606.
- [50] Garcia E, Antsaklis P J. Model-based event-triggered control for systems with quantization and time-varying network delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2013, 58(2): 422-434.
- [51] Zou L, Wang Z, Ding D. Event-triggered state estimation for a class of nonlinear stochastic systems with mixed time delays[C]. Proc of CCC. Nanjing: IEEE, 2014: 5235-5240.
- [52] Yin X, Yue D. Event-triggered tracking control for hetero-geneous multi-agent systems with Markov communication delays[J]. J of the Franklin Institute, 2013, 350(5): 1312-1334.
- [53] Nguyen V H, Suh Y S. Networked estimation for event-based sampling systems with packet dropouts[J]. Sensors, 2009, 9(4): 3078-3089.
- [54] Wang X, Lemmon M D. Finite-gain L_2 stability in distributed event-triggered networked control systems with data dropouts[C]. Proc of ECC. Budapes: IEEE, 2009: 1746-1751.
- [55] Wang X, Lemmon M D. Event-triggering in distributed networked systems with data dropouts and delays[C]. Proc of Int Conf on Hybrid Systems: Computation and Control. Berlin: Springer, 2009: 366-380.
- [56] Hu S, Yue D. Event-triggered control design of linear networked systems with quantizations[J]. ISA Trans, 2012, 51(1): 153-162.
- [57] Bhadu M, Tripathy N S, Kar I N. Event-triggered communication in wide-area damping control: A limited output feedback-based approach[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(16): 4094-4104.
- [58] Wen S, Yu X, Zeng Z. Event-triggering load frequency control for multi-area power systems with communication delays[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 63(2): 1308-1317.
- [59] Dong L, Tang Y, He H. An event-triggered approach for load frequency control with supplementary ADP[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2017, 32(1): 581-589.
- [60] Nowzari C, Coréts J. Self-triggered coordination of robotic networks for optimal deployment[J]. Automatica, 2012, 48(6): 1077-1087.
- [61] 陈焯, 李银伢, 戚国庆. 多通道解耦事件触发机制及其在光电传感网络中的应用[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 227-237.
(Chen Y, Li Y Y, Qi G Q. A multi-channel decoupled event triggered transmission mechanism and its application to optic-eletric sensor network[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(2): 227-237.)

(责任编辑: 郑晓蕾)