

DOI: 10.7652/xjtuxb201605022

状态反馈事件触发控制系统的分析与设计

李国梁¹, 张合新¹, 周鑫¹, 扈晓翔¹, 惠俊军²

(1. 第二炮兵工程大学控制工程系, 710025, 西安; 2. 宝鸡市 150 信箱 11 分箱, 721013, 陕西宝鸡)

摘要: 针对线性系统状态反馈事件触发控制在工程应用中仅使用单一动态门限或静态门限存在 Zeno 现象的缺点,提出了动静门限相结合的事件触发机制。将闭环控制系统建模为脉冲系统模型,应用脉冲系统理论,导出了确保控制系统稳定的触发机制参数确定定理,得到了便于实现触发机制门限参数设计的线性矩阵不等式条件。针对确保系统稳定的触发机制门限参数可在一个区间内选择的特点和静态门限分量大小影响系统稳态区域大小的特点,进一步提出了变门限触发机制,可使系统在稳态情况下自动将静态门限分量减小,显著减小稳定区域,提升事件触发控制的稳态性能,从而可实现精确控制。定量仿真表明,变门限触发机制可以在通信资源消耗量几乎相同的情况下将稳态范围缩小到固定门限方法的 12.3%。

关键词: 数字控制系统;状态反馈;事件触发控制;触发机制;变门限

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0146-05

Stability Analysis and Design of a State-Feedback
Event-Triggered Control System

LI Guoliang¹, ZHANG Hexin¹, ZHOU Xin¹, HU Xiaoxiang¹, HUI Junjun²

(1. Department of Control Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Mail Box 150 Extension 11, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: In practical engineering systems, event-triggered control only using dynamic or static threshold may cause Zeno behavior. In order to avoid the Zeno behavior, an event-triggering mechanism composed of static and dynamic threshold is proposed. The event-triggered control system is modelled in the form of impulsive system. Impulsive system theory is employed to deduce the stability theorem, which can be used to determine the parameters of event-triggering mechanism, and also a useful linear matrix inequality (LMI) form is given. Based on the characteristics of the event-triggering mechanism and relationship between the static threshold and steady state performance, a variable threshold event-triggering mechanism is proposed. When the system works in a steady state, this mechanism can decrease the static threshold automatically to reduce the steady state region and improve the steady state performance, which means the mechanism can be used in high-accuracy control. Quantitative simulation results show that, compared with the fixed threshold event-triggering mechanism, this variable threshold event-triggering mechanism can reduce the steady state region to 12.3 percent with the same consumption of communication resources.

Keywords: digital control system; state-feedback; event-triggered control; event-triggering mechanism; variable threshold

收稿日期: 2015-10-12。 作者简介: 李国梁(1981—),男,博士生;张合新(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61304001,61304239)。

随着网络通信技术的飞速发展,基于共享通信网络构成的数字控制系统在工程中的应用越来越普及,如飞行器、舰船和列车^[1]等的控制系统。在通常情况下,这类系统中的控制任务是周期性执行的,这便于在系统的分析和设计过程中采用相对成熟的采样数据系统理论^[2]。从通信和计算资源的利用角度来看,周期抽样存在着浪费资源的弊端,而在网络控制系统中,网络通信资源又十分珍贵,尤其在无线网络控制或系统较为庞大时,这一弊端显得更为突出。为了克服这一弊端,研究人员提出了事件触发控制(event-triggered control, ETC)方法^[3]。在事件触发控制中,控制任务的执行由精心设计的事件触发机制决定,当触发机制发出事件后才执行控制任务。作为一类新的控制方法,应用中面临的困难主要集中在触发机制设计和系统分析2个方面。基于状态反馈的事件触发控制由于其易于分析的特点,首先受到了研究人员的青睐^[4-9]。文献[4]采用的实质上是一种基于状态本身的固定门限触发机制,这类方法的缺点是当系统状态处于不稳定区间外时,易产生 Zeno 现象;文献[5-6]采用的是基于被控对象状态当前采样值和先前采样值之间绝对偏差的静态门限触发机制,对于这一类触发机制,当门限设计较大时,控制中的事件数目可以明显减少,但系统只能稳定在一个比较大的范围内,而当门限设计较小时,事件数目增多,特别是系统动态变化比较剧烈时,也易产生 Zeno 现象;文献[7-8]采用的是一种动态门限触发机制,控制中动态跟随能力比较强,但是当系统状态接近原点时,门限可能变得非常小,易产生 Zeno 现象。对于事件触发控制系统的分析,常用的方法有受扰系统方法、脉冲系统方法和 PWL 方法3种。从所得结论的保守性角度来讲,受扰系统方法相对保守,另外2种方法的保守性较低。但是,以往这些研究成果均是针对单一静态门限或动态门限触发机制得出的,并没有考虑如何克服状态反馈事件触发的 Zeno 现象问题。脉冲系统方法用于建模和分析事件触发控制问题时,能够直观刻画事件触发瞬间信号突变的脉冲特性,此外,脉冲系统方法还具有研究成果相对完善^[9-10]的优势。

鉴于以上分析,本文针对线性时不变(LTI)被控对象,受文献[11]的启发,采用了一种结合动态门限和静态门限的事件触发机制来克服控制可能产生 Zeno 现象的问题,然后利用脉冲系统理论研究控制系统的稳定性和触发机制门限参数的选取问题,在此基础上提出了能够自适应调整静态门限参数的变

门限触发机制来提高系统的稳态控制性能。

1 问题描述

1.1 事件触发控制系统描述

考虑如下线性时不变(LTI)被控对象

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别是系统矩阵和输入矩阵; $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为被控对象的状态向量; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 为控制输入向量。如果采用如下连续状态反馈控制器

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{x} \quad (2)$$

则闭环系统会渐近稳定,也就是 $\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}$ 为 Hurwitz 矩阵,其中 $\mathbf{K}$ 为状态反馈矩阵。

采用事件触发控制方法,输入控制器的状态只有事件发生时刻的采样值,这样系统的实际控制输入为

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}_k, \quad (t_k, t_{k+1}] \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_k \in \mathbf{R}^n$ 为 $\mathbf{x}(t)$ 在事件触发时刻 t_k 的采样值;除了 $t_0 = 0$ 外,在其他触发时刻 t_k 由相应的触发机制决定,一般与系统的上一采样时刻状态和当前状态的偏差

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}(t) = \hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}(t) \quad (4)$$

有紧密关系。

静态门限触发机制^[5]是

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid \|\mathbf{e}(t)\| \geq \varepsilon\} \quad (5)$$

动态门限触发机制^[7]是

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid \|\mathbf{e}(t)\| \geq \sigma \|\mathbf{x}(t)\|\} \quad (6)$$

通过前面的分析可知,式(5)、式(6)2种触发机制在实际应用中均存在缺点。本文采用的动静相结合的触发机制形式为

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid \|\mathbf{e}(t)\| \geq \sigma \|\mathbf{x}(t)\| + \varepsilon\} \quad (7)$$

式中: σ 和 ε 是触发机制的动态门限参数和静态门限参数,均为正实数。本文把 $\sigma \|\mathbf{x}(t)\|$ 称为动态门限分量, ε 也可称为静态门限分量。可以看出,式(7)的触发机制实际上是式(5)、式(6)2种形式的结合,当 σ 取0时式(7)就退化为式(5)的形式,而当 ε 取0时式(7)就退化为式(6)的形式。直观地看,式(7)的触发机制在系统状态变化比较剧烈时有动态分量可以避免 Zeno 现象,而在系统状态接近平衡点时有静态分量可以克服 Zeno 现象。

1.2 相关知识

脉冲系统数学模型^[9]如下

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x}, & \text{if } \mathbf{x} \in \mathbf{R}_F \\ \mathbf{x}^+ = \mathbf{G}\mathbf{x}, & \text{if } \mathbf{x} \in \mathbf{R}_D \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}_X \subseteq \mathbf{R}^n$ 为脉冲系统状态向量; $\mathbf{R}_F \in \mathbf{R}^n$ 为流集; $\mathbf{R}_D \subseteq \mathbf{R}^n$ 为脉冲跳跃集; 系统的整个状态集 $\mathbf{R}_X = \mathbf{R}_F \cup \mathbf{R}_D$ 。

本文的目的是解决如下2个问题。

问题1: 针对式(1)、式(3)和式(7)所描述的事件触发控制系统, 如何建模为式(6)的脉冲系统形式, 如何选取保证系统稳定的参数 σ 和 ϵ ?

问题2: ϵ 的取值对系统的最终稳定区域有明显影响, 如何改进?

2 系统建模

依据式(3)可知: 当 $\|\mathbf{e}(t)\|^2 \leq \sigma \|\mathbf{x}(t)\|^2 + \epsilon$ 成立时, 系统工作在连续时间状态, 对应的状态属于流集; 当 $\|\mathbf{e}(t)\|^2 = \sigma \|\mathbf{x}(t)\|^2 + \epsilon$ 时事件发生, 即此时状态要发生跳变, 对应的状态属于跳变集。因此, 可以定义如下的流集和跳变集

$$\mathbf{R}_F := \left\{ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^{2n} \left| \mathbf{x}^T \begin{bmatrix} -\sigma \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{x} - \epsilon \mathbf{I} \leq \mathbf{0} \right. \right\} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_D := \left\{ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^{2n} \left| \mathbf{x}^T \underbrace{\begin{bmatrix} -\sigma \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}}_{=: \Gamma} \mathbf{x} - \epsilon \mathbf{I} = \mathbf{0} \right. \right\}$$

式中: $\mathbf{x} := [\mathbf{x}^T \quad \mathbf{e}^T]^T$ 为脉冲系统的状态。

当系统触发条件不满足, 即系统状态属于流集 $\mathbf{R}_F$ 时, 系统状态的演化规律如下

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) + \mathbf{BK}\mathbf{e}(t), \quad (t_k, t_{k+1}] \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\dot{\mathbf{x}}(t) = -(\mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) - \mathbf{BK}\mathbf{e}(t), \quad (t_k, t_{k+1}] \quad (11)$$

而在事件触发时刻要发生状态更新, 系统状态发生跳变, 此时状态演化规则为

$$\mathbf{x}^+(t) = \mathbf{x}(t) \quad (12)$$

$$\mathbf{e}^+(t) = \mathbf{0} \quad (13)$$

合并以上4式, 形成如下事件触发脉冲系统模型

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{BK} & \mathbf{BK} \\ -\mathbf{A} - \mathbf{BK} & -\mathbf{BK} \end{bmatrix}}_{=: F} \mathbf{x}, & \text{if } \mathbf{x} \in \mathbf{R}_F \\ \mathbf{x}^+ = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{=: G} \mathbf{x}, & \text{if } \mathbf{x} \in \mathbf{R}_D \end{cases} \quad (14)$$

3 系统稳定结论

定理1 事件触发脉冲系统式(14)对所有的初始条件 $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}_F \cup \mathbf{R}_D$ 全局渐近稳定的条件是: 存在连续可微函数 $V(\mathbf{x}): \mathbf{R}^{2n} \rightarrow \mathbf{R}$, 且满足 $V(\mathbf{0}) = 0$, 存在正值函数 $s_1(\mathbf{x})$ 和 $s_2(\mathbf{x})$, 存在函数 $s_3(\mathbf{x})$, 对所有的 $\mathbf{x} \in$

$\mathbf{R}^{2n} \setminus \{\mathbf{0}\}$ 满足

$$V(\mathbf{x}) + s_1(\mathbf{x})(\mathbf{x}^T \Gamma \mathbf{x} - \epsilon) > 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} V(\mathbf{x}) \mathbf{F} \mathbf{x} - s_2(\mathbf{x})(\mathbf{x}^T \Gamma \mathbf{x} - \epsilon) < 0 \quad (16)$$

$$V(\mathbf{G} \mathbf{x}) - V(\mathbf{x}) + s_3(\mathbf{x})(\mathbf{x}^T \Gamma \mathbf{x} - \epsilon) \leq 0 \quad (17)$$

证明 依据文献[9]的定理20, 假如 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}_F$, 则有 $\mathbf{x}^T \Gamma \mathbf{x} - \epsilon < 0$, 依据式(15)则有 $V(\mathbf{x}) > 0$, 对于所有的 $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$, 依据式(16)有 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} V(\mathbf{x}) \mathbf{F} \mathbf{x} < 0$, 也就是说, 存在

Lyapunov 函数在脉冲系统的流集上是严格递减的。假如 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}_D$, 则有 $\mathbf{x}^T \Gamma \mathbf{x} - \epsilon = 0$, 根据式(17)则有 $V(\mathbf{G} \mathbf{x}) - V(\mathbf{x}) \leq 0$, 也就是说, 存在 Lyapunov 函数在脉冲系统的跳变集上是非增的。证毕。

定理2 事件触发脉冲系统式(14)对所有的初始条件 $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}_F \cup \mathbf{R}_D$ 全局渐近稳定的条件是: 存在正定矩阵 $\mathbf{P}$ 、标量 $v_1 \geq 0$ 、 $v_2 \geq 0$ 和 v_3 , 满足

$$\mathbf{P} + v_1(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) > \mathbf{0} \quad (18)$$

$$\mathbf{F}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{F} - v_2(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) < \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\mathbf{G}^T \mathbf{P} \mathbf{G} - \mathbf{P} + v_3(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) \leq \mathbf{0} \quad (20)$$

证明 定义 $V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$, $s_1(\mathbf{x}) = v_1 \geq 0$, $s_2(\mathbf{x}) = v_2 \geq 0$, $s_3(\mathbf{x}) = v_3$, 则可由定理1中式(15)~式(17)的形式得到定理2中式(18)~式(20)的形式。证毕。

注: 通过不断调整 σ 和 ϵ 的取值, 考察定理2中线性矩阵不等式的可行解问题, 即可得到保证系统稳定的事件触发机制门限参数。

推论1 如果存在正定矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0$, 且标量 $v_1 \geq 0$ 、 $v_2 \geq 0$ 、 v_3 、 $\sigma = \sigma_0 > 0$ 和 $\epsilon = \epsilon_0 > 0$ 满足式(18)~式(20), 则在 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ 、 $0 < \sigma \leq \sigma_0$ 的情况下, 事件触发控制系统式(14)对所有的初始条件 $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}_F \cup \mathbf{R}_D$ 全局渐近稳定。

证明 因为 $0 < \sigma \leq \sigma_0$, 则有

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -\sigma \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} -\sigma_0 \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} = \Gamma_0$$

又因 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$, 则有

$$\mathbf{P}_0 + v_1(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) \geq \mathbf{P}_0 + v_1(\Gamma_0 - \epsilon_0 \mathbf{I}) > \mathbf{0}$$

$$\mathbf{F}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{F} - v_2(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) \leq \mathbf{F}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{F} - v_2(\Gamma_0 - \epsilon_0 \mathbf{I}) < \mathbf{0}$$

此外, 又因 $\epsilon > 0$, 则必然存在标量 v_4 满足 $v_4(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) \leq v_3(\Gamma_0 - \epsilon_0 \mathbf{I})$, 因此有

$$\mathbf{G}^T \mathbf{P} \mathbf{G} - \mathbf{P} + v_4(\Gamma - \epsilon \mathbf{I}) \leq \mathbf{G}^T \mathbf{P} \mathbf{G} - \mathbf{P} + v_3(\Gamma_0 - \epsilon_0 \mathbf{I}) \leq \mathbf{0}$$

依据定理2可得系统稳定的结论。证毕。

4 改进的触发机制

依据推论1, 当选定能够使系统稳定的触发机

制参数 $\sigma=\sigma_0>0$ 和 $\epsilon=\epsilon_0>0$ 后, ϵ 在 $(0,\epsilon_0]$ 范围内任意取值时均能够保证系统稳定。由前文分析可知, ϵ 的取值直接影响最终稳定区域的大小。在实际控制中期望系统的最终稳定区域越小越好, 因为这意味着控制越精准, 因此要求 ϵ 的取值越小越好, 但这可能会导致事件的频繁触发和 Zeno 现象的发生。为了科学合理地实现精准控制而又同时避免事件的频繁触发, 提出如下变门限触发机制。

除 $t_0=0$ 时刻外, 其他事件触发时刻的触发条件描述如下:

当触发条件式(7)满足并且触发时间间隔 T_{act} 满足 $T_{\min}\leq T_{\text{act}}<T_{\max}$ 或 $T_{\text{act}}=T_{\max}$ 时, 事件发生, 也就是满足如下公式

$$(\|e(t)\|\geq\sigma\|x(t)\|+\epsilon \text{ and } T_{\min}\leq T_{\text{act}}<T_{\max}) \text{ or } T_{\text{act}}=T_{\max} \quad (21)$$

门限变化的规则是: 如果有连续 N 次 $T_{\text{act}}=T_{\min}$ and $\|e(t)\|\geq\sigma\|x(t)\|+\epsilon$, 则静态门限 ϵ 增大, 但 ϵ 最大取值为 ϵ_0 , 具体方法可以采用增量递增方法($\epsilon=\epsilon+h_e$)或者倍增方法($\epsilon=2\epsilon$); 如果有连续 N 次 $T_{\text{act}}=T_{\max}$ and $\epsilon>0$, 则静态门限减小, 但 ϵ 的最小取值要大于 0, 具体可以采用增量递减方法($\epsilon=\epsilon-h_e$)或者倍减方法($\epsilon=\epsilon/2$)。其中: h_e 为门限变化增量; $T_{\min}$ 为系统所允许的最小触发时间间隔, 取值受到控制系统通信网络传输能力(如网络帧频率)的限制; $T_{\max}$ 是设置的最大触发时间间隔, 目的是一是辅助实现静态门限的自适应减小, 二是避免长时间无事件发生, 致使通信网络过分闲置, 从而产生通信疲劳、失去同步等现象。

依据推论 1, 显然触发机制式(21)能够确保系统的稳定性。

5 示例仿真

考虑形如式(1)和式(2)的线性系统, 其中的相关矩阵取值如下

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}1&2\\-2&1\end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$$
$$\mathbf{K}=[-0.45 \quad -3.25]$$

仿真 1 仿真目的是验证定理 2 的正确性以及触发条件式(7)的有效性。

仿真结果: 依据定理 2 可得表 1 所示的 5 组能够保证采用触发条件式(7)使得系统稳定的触发条件参数。从表中可以看出, 在保证系统稳定的参数选择结果中, 参数 σ 和 ϵ 之间存在某种权衡关系, 即在 σ 取值较大时 ϵ 取值相应较小, 这样才能确保系

统稳定, 反之亦然。

表 1 确保系统稳定的触发条件参数 σ 和 ϵ 的取值

σ	0.115 6	0.114 6	0.110 1	0.104 5	0.059 9
ϵ	0.000 1	0.001 0	0.005 0	0.010 0	0.050 0

将 $\sigma=0.110\ 1$ 和 $\epsilon=0.005$ 代入触发机制式(7), 令初始状态 $x_0=[3\ -3]$, 所得的状态演化曲线如图 1 所示。显然, 图中的状态曲线是收敛的, 也就是说系统是渐近稳定的, 这证实了定理 2 的正确性。

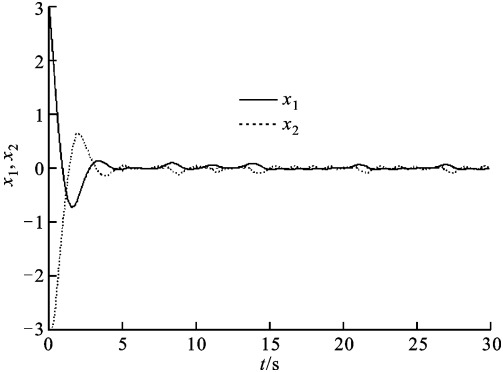


图 1 事件触发控制状态演化曲线

仿真 2 仿真目的是分析变门限触发机制的有效性。仿真中初始状态设为 $x_0=[3\ -3]$, 相关仿真参数为: $\sigma=0.110\ 1, \epsilon_0=0.005, T_{\min}=0.1, T_{\max}=1$ 。

仿真所得变门限事件触发控制状态演化曲线如图 2 所示, 触发机制的静态门限参数 ϵ 的变化如图 3 所示。可以看出, 随着系统趋于稳态, 静态门限参数在逐渐变小。对比图 2 和图 1 可以看出, 变门限触发控制的稳态波动明显小于固定门限方法的波动。

仿真 3 仿真目的是比较仿真 1 中取得的 5 组触发机制参数以及固定门限方法和变门限方法能够获取的控制性能, 具体比较指标项有平均采样间隔 h_{mean} 、最小采样间隔 $h_{\min}$ 和自定义的刻画稳态性能的指标 $J=\int_{20}^{30}\|x(t)\|dt$ 。仿真中的初始状态均为 $x_0=[3\ -3]$, 变门限方法中 $T_{\min}=0.1, T_{\max}=1$ 。仿真计算结果如表 2 所示, 其中 d_J 为变门限方法的 J 值与固定门限方法的 J 值之比。

从表 2 中可以看出, 固定门限方法对于各组触发机制门限参数所得的平均采样间隔 h_{mean} 和最小采样间隔 $h_{\min}$ 基本相差无几, 也就是说参数 σ 和 ϵ 之间的权衡关系能够反映在控制系统采样间隔方面, 但是每种触发机制所得的稳态性能指标 J 却明显不同, 显然 J 和触发机制的静态分量 ϵ 存在正向对应关系, 这也验证了前文的分析结论。

变门限方法对于各组触发机制门限参数所得的

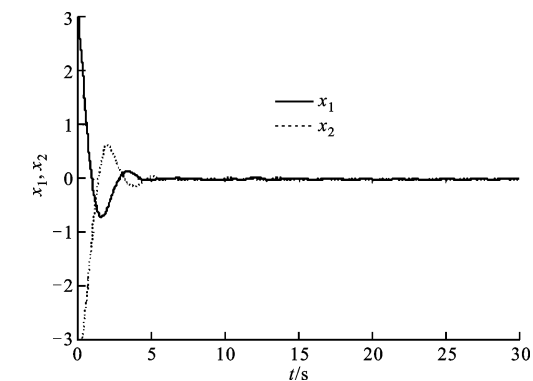


图 2 变门限事件触发控制状态演化曲线

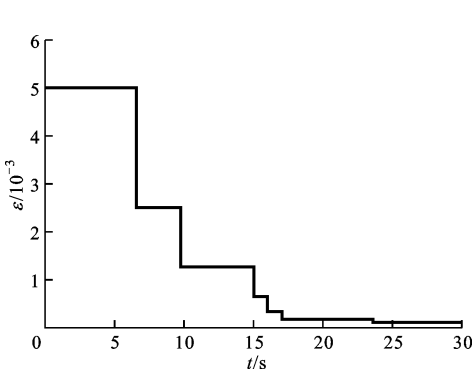


图 3 事件触发门限参数 ϵ 的变化曲线

表 2 不同触发条件下的仿真结果

σ	$\epsilon \cdot \epsilon_0^{-1}$	固定门限方法			变门限方法		$d_I / \%$
		h_{mean}	h_{min}	J	h_{mean}	J	
0.115 6	0.000 1	0.379 7	0.075 7	0.078 1	0.394 7	0.070 0	89.6
0.114 6	0.001 0	0.566 0	0.076 0	0.259 8	0.447 8	0.056 9	21.9
0.110 1	0.005 0	0.517 2	0.077 5	0.577 6	0.461 5	0.079 1	13.7
0.104 5	0.010 0	0.508 5	0.079 0	0.765 7	0.476 2	0.127 3	16.6
0.059 9	0.050 0	0.500 0	0.087 9	1.569 7	0.491 8	0.193 1	12.3

平均采样间隔 h_{mean} 与固定门限方法相比改善并不明显,但对稳态性能指标 J 的改善非常显著,特别是在静态门限参数取值比较大的时候。这说明,变门限方法可以在通信资源消耗量基本相同的情况下获得更好的稳态性能。本算例中变门限方法在最佳情况下可以将稳态范围缩小到固定门限方法的 12.3%。

6 总 结

线性系统状态反馈事件触发控制中仅采用单一静态门限或动态门限容易产生 Zeno 现象,而采用动静混合门限触发机制能够有效克服这一现象。将系统建模为一个脉冲系统模型,利用脉冲系统理论可以实现系统分析和触发机制的设计。进一步分析发现,确保系统稳定的参数可在一个区间内选择,静态门限分量对控制系统稳态区域的大小影响非常显著,采用本文提出的变门限的触发机制,可使系统在稳态情况下自动将静态门限分量减小,从而使系统稳定在更小的稳态区域,实现更为精确的控制。本文方法对设计通信资源紧缺情况下的精确数字控制系统具有一定的参考价值。下一步的研究工作将主要集中于具体应用,如在飞行器控制中的应用。

参考文献:

[1] 田寅,贾利民,董宏辉,等. 列车通信网络设计问题

中的双层规划模型[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 133-138.
TIAN Yin, JIA Limin, DONG Honghui, et al. Bilevel programming model of train communication network design [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 133-138.
[2] CHEN T, FRABCIS B A. Optimal sampled-data control systems [M]. London, UK: Springer, 1995.
[3] ARZEN K E. A simple event-based PID controller [C] // Proceedings of IFAC World Congress. Oxford, UK: Pergamon Press, 1999: 423-428.
[4] HEEMELS W P M H, SANDEE J H, VAN DEN BOSCH P P J. Analysis of event-driven controllers for linear systems [J]. International Journal of Control, 2008, 81(4): 571-590.
[5] KOFMAN E, BRASLAVSKY J H. Level crossing sampling in feedback stabilization under data-rate constraints [C] // Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2006: 4423-4428.
[6] OTANEZ P G, MOYNE J R, TILBURY D M. Using deadbands to reduce communication in networked control systems [C] // Proceedings of the 2002 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2002: 3015-3020.

(下转第 156 页)