

# 无线网络化控制系统的功率感知事件触发策略及其闭环稳定性

赵云波<sup>†</sup>, 袁 征, 朱 创

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 本文研究了能量受限无线网络化控制系统的设计和分析问题. 首先建立了无线网络化控制系统中通信传输时的数据误码率和丢包率间的定量关系, 从而在通信功率与系统性能之间建立了联系. 进而设计了基于事件触发策略和功率优化机制的智能控制器, 该方法充分考虑了网络节能与控制系统性能表现两方面的要求, 通过添加事件触发机制减少了系统的通信次数, 并在此基础上以优化算法优化单次发送功率. 随后, 在随机稳定框架下给出了相应闭环系统稳定的充分性条件, 在理论上证明了在该充分条件下, 本文的设计能够在降低通信能耗的同时令系统维持预期的性能表现. 最后数值例子证明了所提出方法的有效性.

**关键词:** 网络化控制系统; 误码率; 事件触发; 功率优化

**引用格式:** 赵云波, 袁征, 朱创. 无线网络化控制系统的功率感知事件触发策略及其闭环稳定性. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 881 – 887

DOI: 10.7641/CTA.2019.90023

## Power-aware event triggering for wireless networked control systems and its closed-loop stability

ZHAO Yun-bo<sup>†</sup>, YUAN Zheng, ZHU Chuang

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

**Abstract:** The design and analysis of energy-constrained wireless networked control systems are investigated in this paper. A quantitative relationship between symbol error rate and packet loss rate in communication transmission is firstly established for wireless networked control systems, and then the relationship between the communication power and the control system performance is established, following which an intelligent controller based on an event triggering strategy and a power optimization mechanism is designed. Considering both the requirements of communication energy saving and control system performance, this design reduces communication burden by the event triggering mechanism and the transmission power optimization. Then, the sufficient conditions ensuring the closed-loop stability are derived within the stochastic stability framework, and the system analysis guarantees that the design of this paper can reduce the communication energy consumption while maintaining the expected performance of the control system. Finally, a numerical simulation examples illustrates the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** networked control systems; symbol error rate; event trigger; power optimization

**Citation:** ZHAO Yunbo, YUAN Zheng, ZHU Chuang. Power-aware event triggering for wireless networked control systems and its closed-loop stability. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 881 – 887

## 1 引言

无线网络化控制系统是信息传输链路通过无线网络闭合的控制系统<sup>[1–3]</sup>. 该类系统具有布置灵活、易维护、成本低等优点, 但无线通信的信息传输易受干扰、节点能量有限等特点也给控制系统的设计与分析引入了特殊的困难, 需针对性的解决方法才能够保证控制系统的性能. 已经有大量文献对无线网络化控制系统的设计和分析各方面进行了研究. 这些研究一

方面从控制系统性能的角度考虑如何减少通信网络对控制系统的影响<sup>[4–6]</sup>, 一方面从通信和控制处于同等重要地位的角度考虑网络和控制系统的联合设计<sup>[7–9]</sup>, 一方面从通信角度下考虑在满足控制系统性能前提下减少通信资源消耗的问题<sup>[10–12]</sup>, 等等.

与传统的有线网络化控制系统不同, 在无线网络化控制系统中各种组件往往通过电池供电. 为延长系统运行寿命, 减少因能源耗尽而发生的系统失稳等问

收稿日期: 2019–01–10; 录用日期: 2019–09–23.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: ybzhao@ieee.org; Tel.: +86 18969136912.

本文责任编辑: 岳东.

国家自然科学基金项目(61673350)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61673350).

题,在能量高效使用前提下的控制设计就成为一个关键问题.举例来说,文献[13]设计了新颖的资源调度算法用以分配传输功率,并基于最大—最小模型预测控制方法确保了系统的鲁棒性;另有研究除考虑能耗之外,同时顾及一个或多个其他通信限制问题,如文献[14]针对无线网络化控制系统中存在的能源和时延限制问题,为兼顾能耗和系统性能,提出了一种启发式算法设计框架,为功率控制和传输速率问题提供了一种最优多项式时间算法,使得系统性能接近最优解;文献[15]考虑共享无线介质的多系统场景下存在信道干扰和功率分配的问题,制定了信道感知调度方法和功率分配机制,通过一个集中式调度器决定控制任务的访问时间,可在满足信道条件的同时获得优良的系统性能并最小化总功率开销;另有近期文献[16]考虑了一类功率资源受限的网络化系统,通过有效分配通信信道和传输功率来稳定系统,如此等等.这些研究对网络化控制系统在节能前提下保证性能提出了各种解决方案,但较少有结合事件触发和降低传输功率这两种方法,所得到的结果因此带有相当的保守性.

另有许多工作研究网络资源有限情况下如何通过事件触发减少数据传输.举例来说,文献[17]中设计存在于传感器与控制器之间的事件触发器,并确立了相应的触发器参数、传输时延和反馈增益间的关系,该方法除能够减少传输次数外,更大的优点是无需改造原有系统,容易实现;另有许多研究针对不同的网络类型设计了相应的事件触发机制,如文献[18]在无线传感器网络场景中通过自触发方式节省了大量通信资源,增加了节点睡眠时间,并确保所需的控制性能;而文献[19]则将事件触发拓展至分布式网络化系统中,由每个子系统根据自身情况判断是否触发,这使得每个子系统无需与其他系统产生更多的信息交换,有效减少了网络传输.以上研究针对各种不同网络化控制系统设计了事件触发机制以减少网络资源消耗,但少有研究考虑事件触发和功率优化相结合产生的问题.

本文研究一类存在通信误码的无线网络化控制系统中的通信节能与控制系统性能间的平衡问题.该类系统中的传感器到控制器和控制器到执行器的通信均受随机通信误码的影响,从而影响系统性能.根据误码与丢包的数学模型,文中建立了传输功率和系统性能之间的联系.从节能角度出发,设计了事件触发规则以减少通信节点的工作次数,同时出于不增加传感器端额外设备以降低成本的考虑,将事件触发器设置在计算资源丰富的控制器处;此外,通过构建多目标优化函数,将触发阈值、节点传输功率和系统衰减率作为优化目标,令系统能够在保持预期性能的前提下进一步降低通信能耗;随后,在理论上分析了闭环系统的稳定性,并在随机稳定框架下给出了闭环系统稳定的充分性条件.

## 2 问题描述

考虑如图1所示的无线网络化控制系统,其中从传感器到控制器和从控制器到执行器的通信链路均由无线通信网络来闭合.设受控对象由如下线性定常离散系统模型描述:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (1)$$

其中:  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$ .

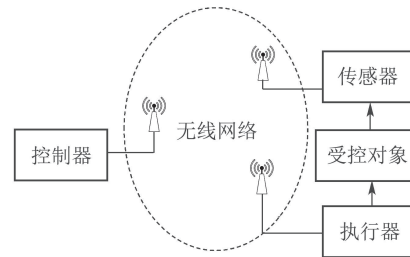


图1 无线网络化控制系统示意图

Fig. 1 Diagram for wireless networked control systems

一方面,从控制系统的角度看,使用无线通信网络进行采样数据和控制数据的传输意味着准确实时的信号传输不再得到保证.与传统有线网络化控制系统不同,无线通信下的网络化控制系统一般规模较小,因而时延在其中的往往并不起决定性作用,而且由于控制系统实时性要求,延误的数据包一般也会主动丢弃,因而在本文中主要考虑无线通信网络造成的数据包的丢失的影响.

记  $\rho(k) = \rho_{sc}(k)\rho_{ca}(k)$  为  $k$  时刻信息传输结果,  $\rho(k) = 1$  表示传输成功,反之  $\rho(k) = 0$  表示传输失败.其中  $\rho_{sc}(k)$ ,  $\rho_{ca}(k)$  分别是传感器端到控制器端和控制器端到执行器端的传输结果,其含义如  $\rho(k)$  类似定义并假设两者是相互独立的.记  $p(k)$  为  $\rho(k)$  的发生概率,该概率假设与时间无显式依赖关系,即成功率  $p(k) = p$ , 则

$$P\{\rho(k)\} = \begin{cases} p, & \rho(k) = 1, \\ 1 - p, & \rho(k) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

其中  $p = p_{sc}p_{ca}$ , 而  $p_{sc}, p_{ca}$  分别代表  $\rho_{sc}, \rho_{ca}$  传输成功的概率.

由式(2),存在无线通信网络导致的丢包情况下实际的控制量为

$$u(k) = \rho(k)u_o(k), \quad (3)$$

其中  $u_o(k)$  是控制器本身生成的控制量.

另一方面,从通信网络的角度看,无线通信网络中的丢包主要由无线信道干扰带来的数据误码所致.误码的出现破坏了数据包的完整性,该数据包将会被主动丢弃,在控制系统的实时性要求下该数据包一般会放弃重传,从而导致丢包.误码的发生受信道带宽、噪声大小、数据包大小、传输功率等因素影响,若给定无线网络相关参数,误码的发生概率,即误码率(symbol error rate),记为SER,可近似写为发送功率  $\sigma$  的函

数<sup>[16]</sup>:

$$\text{SER} \approx e^{-\nu\sigma}, \quad (4)$$

其中 $\nu$ 是与数据包大小、信道带宽、噪声功率等网络参数相关的系数。

注意到无线通信网络的误码率SER和无线网络化控制系统的丢包率 $q$ 所代表的近乎同一概念, 由式(2)和式(4)则可得到如下的丢包率和传输功率之间的关系:

$$q = 1 - p \approx e^{-\nu\sigma}. \quad (5)$$

在闭环系统中, 为提升控制系统性能, 应尽量减少丢包的可能性 $q$ ; 然而式(5)却表明, 减小丢包率意味着需要以增加能耗, 即以提高传输功率 $\sigma$ 为代价. 如何在两者间进行折中是一个值得研究的问题. 对这个问题的解决引出了本文所提出的基于事件触发的智能控制器设计和相应的优化分析.

### 3 智能控制器设计和闭环系统

为最大化网络生存周期, 针对所考虑的系统设计如图2所示的基于事件触发的智能控制器. 该智能控制器可实现控制计算、事件触发和功率优化3个功能. 其中控制计算由如下的状态反馈控制器实现:

$$u_0(k) = Kx(k). \quad (6)$$

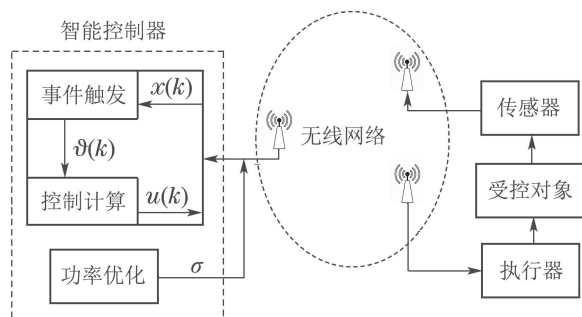


图 2 智能控制器的设计

Fig. 2 Design of the intelligent controller

下面分别讨论事件触发机制的设计, 功率优化的设计和相应的闭环系统.

#### 3.1 事件触发机制设计

考虑到系统Lyapunov函数随时间的变化可以作为该系统运行状态的一种表征, 将其作为事件触发规则中的比较量. 只需合理设置触发条件, 便可以使系统运行在预期之内<sup>[20]</sup>. 构造函数

$$V(x(k)) \triangleq x^T(k)Px(k), \quad (7)$$

其中 $P$ 为正定对称矩阵.

对于事件触发有以下考虑: 需要用事件触发放宽原系统中周期触发的要求, 牺牲部分性能为节能创造条件. 为了减少通信节点工作次数, 增加了系统相邻两次的闭环间隔. 因此, 事件触发器将最近一次系统闭环时刻状态的 $\delta V(x(k_s))$ 作为触发阈值. 同时, 若原

系统是一个开环不稳定的系统, 丢包会导致被控对象失去控制量之后出现发散, 额外增加的事件触发更可能加剧该情况, 因此, 为了使被控对象的状态较为平稳变化, 设置执行器进行一段时间 $h_0$ 的零阶保持, 且允许 $h_0 = 0$ . 考虑到零阶保持可以维持一段时间的系統性能, 在此期间, 事件触发器不工作. 同出于系統性能的考虑, 为了不使得系统两次闭环间隔过大, 在计算时, 引入对未来时刻状态的开环预测, 设置若未来 $m_0$ 步之内有预测达到阈值同样可以激活触发, 这将大大减少两次触发之间的开环间隔.

基于上述考虑, 设计触发规则如下:

$$\exists V(\bar{x}(k + m_0|k)) \geq \delta V(x(k_s)), k > k_s + h_0, \quad (8)$$

其中:  $k_s$ 是离当前时刻 $k$ 最近的上一系统闭环时刻, 不妨设为第 $s$ 次;  $\bar{x}(k + m_0|k) \triangleq A^{m_0}x(k)$ 是 $k$ 时刻的控制器对接下来系统 $m_0 \in \mathbb{N}$ 次开环运行周期后状态值的预测;  $\delta \in \mathbb{R}^+$ 为正实数系数;  $h_0$ 则是执行器零阶保持的步数;  $m_0, h_0$ 事先确定并设置于控制器和执行器处.

在此规则之下, 由于存在数据丢失的可能性, 控制器仅在收到传感器反馈时才开始工作. 工作时, 控制器首先判断当前时刻执行器是否执行零阶保持, 仅在当前时刻系统不处于零阶保持状态时, 控制器可根据传感器的反馈量与系统模型向前预测未来状态, 并使用预测值与上一次闭环结果做对比, 若满足条件(8), 将触发本次通信传输.

#### 3.2 功率优化设计

在通过设计触发规则(8)来减少传输次数的基础上, 适当降低传输功率 $\sigma$ 可以进一步实现节能效果. 然而, 传输功率影响到丢包率 $q$ , 一味地降低传输功率可能导致系统性能下降甚至无法稳定. 前文中的控制律设计也对丢包率提出了一定的限制要求. 分析闭环系统稳定性发现, 系统性能与事件触发规则中的参数以及丢包率有关, 这些参数在系统矩阵 $A, B, K$ 等确定的情况下, 有相应的限制范围, 在范围内改变它们的取值能够改变系统的期望衰减率 $\xi$ , 却不会改变稳定性的表示形式. 这意味着可以在一定范围内对各参数的数值进行优化, 进而可将通信节能与系统性能之间的平衡问题转化为一个多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min_{\delta, q} J = \begin{bmatrix} \xi \\ q \\ -\delta \end{bmatrix}, \\ \text{s.t. } 0 < q < \frac{1}{\gamma}, \\ 0 < \delta < \xi, \\ 0 < \xi \leq \xi_0, \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\xi = \frac{p}{1 - q\gamma}$  代表了闭环系统衰减率;  $p = 1 - q$ ,  $q$  表示通信丢包率;  $\delta$  是事件触发系数; 约束条件中  $\gamma$  是与开环系统发散率有关的正实数, 该约束条件与  $\xi$  的定义可见下文中式(17),  $\xi_0 < 1$  代表可预设的衰减率上界.

以上多目标优化问题综合反映了节能和系统性能的需求, 向量  $\mathbf{J}$  中的元素分别代表了希望优化的3个目标函数. 一方面, 出于节能考虑希望与传输功率  $\sigma$  呈负相关的丢包率  $q$  和影响触发间隔的触发系数  $\delta$  尽可能大. 另一方面, 系统性能则要求衰减率  $\xi$  在可接受的上界  $\xi_0$  的限制下尽可能小. 这需要通过求解该多目标优化来寻找令人满意的决策变量  $\delta, q$  取值. 本文通过加权法, 设置非负系数向量  $\mathbf{c} = [c_1 \ c_2 \ c_3]^T$ , 将多个目标函数转化为如下单目标函数:

$$\min_{\delta, q} J = \mathbf{c}^T \mathbf{J},$$

其中权重系数代表了各目标函数的重要性. 考虑到该优化中的多个目标函数并无物理意义上的优劣排序, 设计者可以根据经验与实际需求进行调整.

**注1** 本文采用对目标加权的方法求解上述多目标优化问题, 权重代表了某一实际情况下的选择或是设计者的偏好. 权重方法的好处是能够体现设计者的偏好并针对不同情况做出相应的改变, 坏处是权值的选择可能难以确定, 此时可考虑其他可能求解方法.

### 3.3 采用智能控制器的闭环系统

根据上述设计,  $k \in [k_s, k_{s+1})$  时的控制律可改写为

$$u(k) = \begin{cases} u_o(k_s), & k \in [k_s, k_s + h_0], \\ \rho(k)\vartheta(k)u_o(k), & k \in (k_s + h_0, k_{s+1}), \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $k_s$  表示第  $s$  次系统闭环时刻;  $\vartheta(k)$  是触发情况的指示性函数: 若满足触发条件  $\vartheta(k) = 1$ , 否则  $\vartheta(k) = 0$ .

事件触发对原闭环系统进行了进一步的改造, 使原来双通道中相互独立的数据传输行为建立了条件关系, 即事件触发和控制量计算依赖于传感器至控制器的数据成功传输, 而事件触发影响之后控制器的信号发送情况. 相应的系统闭环条件也发生了改变.

为了精确描述系统的运作情况, 定义事件  $\varepsilon(k)$ : 若  $\varepsilon(k)$  发生则代表  $k$  时刻系统处于闭环运行, 即在此刻同时满足传感器将状态成功反馈至控制器、事件触发被激活、执行器成功收到控制量并执行, 即  $\varepsilon(k) = \{\rho_{sc}(k) = 1\} \cap \{\vartheta(k) = 1\} \cap \{\rho_{ca}(k) = 1\}$ . 其余情况下系统均不满足闭环条件.

经过上述设计的闭环系统无需在传感器端增加额外的计算和存储设备, 仅需要在控制器处增加部分计

算, 即可达到节能目的. 虽然无法控制反馈通道的工作情况, 但可以大大减少前向通道的通信次数. 此外, 前文中的功率优化还可以达到进一步节能的效果.

## 4 闭环系统稳定性

本文有如下闭环系统稳定性结论:

**定理1** 考虑采用智能控制器(10)的闭环系统. 给定常数  $\beta \in (0, 1)$ ,  $\gamma > 1$ ,  $h_0 \in \mathbb{N}$ , 若系统的丢包率  $q \in (0, \frac{1}{\gamma})$  与事件触发参数  $\delta \in (0, 1)$  满足  $\frac{(1-q)\delta}{1-q\gamma} < 1$ , 并且存在正定对称矩阵  $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$  和矩阵  $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$  使下列不等式成立:

$$(A + BK)^T P (A + BK) \leq \beta P, \quad (11)$$

$$A^T P A \leq \gamma P, \quad (12)$$

$$(A^{h_0} + \sum_{i=0}^{h_0} A^i BK)^T P (A^{h_0} + \sum_{i=0}^{h_0} A^i BK) \leq \delta P, \quad (13)$$

则对于任意  $k \in (k_s, k_{s+1}]$ , 有

$$\mathbb{E}\{\|x(k)\|^2\} < \xi^{s+1} \lambda_{\max}(P) / \lambda_{\min}(P) \|x(0)\|^2 \quad (14)$$

成立, 其中:  $k_s$  表示第  $s$  次闭环时刻,  $s = 0, 1, 2, \dots$ ;

系数  $\xi = \frac{1-q}{1-q\gamma} \delta$ ;  $\lambda_{\max}(P)$ ,  $\lambda_{\min}(P)$  分别代表  $P$  的最大与最小特征值.

**证** 为证明闭环系统在本文的触发条件(8)下稳定, 只需证明任意的连续两次系统闭环期间的李雅普诺夫函数递减, 并在时间趋于无穷时, 闭环系统的 Lyapunov 函数能够趋于零.

根据前文的设计, 可以将两次闭环间的系统行为划分成闭环阶段、零阶保持阶段与开环阶段. 不妨假设在  $k_s$  系统处于第  $s$  次闭环时刻, 即事件  $\varepsilon(k_s)$  发生, 系统状态  $x(k_s + 1) = (A + BK)x(k_s)$ . 由式(11)可得, 若  $k = k_s + 1$ ,

$$V(x(k)) \leq \beta V(x(k_s)).$$

之后系统进入零阶保持阶段, 执行器继续维持前一时刻的输入量. 由式(13)可得, 若  $k \in (k_s + 1, k_s + h_0]$ ,

$$V(x(k)) \leq \delta V(x(k_s)),$$

其中  $x(k) = (A^{k-k_s} + \sum_{i=0}^{k-k_s} A^i BK)x(k_s)$ .

此后, 执行器不再执行零阶保持将输入置零, 系统进入开环阶段. 由于上述推论仅给出了  $k_s + h_0$  时刻系统的保守上界, 实际中  $V(x(k_s + h_0))$  离触发  $\delta V(x(k_s))$  仍可能存在一定的距离. 不妨假设有  $n_s \in \mathbb{N}$ , 令  $V(x(k_s + h_0 + n_s)) \leq \delta V(x(k_s)) < V(x(k_s + h_0 + n_s + 1))$ . 这意味着可将开环阶段根据是否达到

阈值分为前后两阶段.

前一阶段未达到阈值 $\delta V(x(k_s))$ , 无论信号的传输会否成功, 系统均处于开环状态. 为尽可能缩短这一段时间, 在事件触发中引入了对未来时刻的预测. 用 $m_0$ 步之后的系统状态的预测代替当前状态与阈值进行比较, 能够提前激活触发机制且不影响整体稳定性. 相比未加入预测的情况, 新机制减少了开环步数, 记新的次数为 $[n_s - m_0]^+ \triangleq \max\{n_s - m_0, 0\}$ , 当 $k \in (k_s + h_0, k_s + h_s]$ , 存在

$$V(x(k)) \leq V(x(k_s + h_0 + n_s)) \leq \delta V(x(k_s)), \quad (15)$$

其中 $h_s = h_0 + [n_s - m_0]^+$ .

至此, 系统经历了一段时间的零阶保持和一段时间的开环运行, 期间系统状态都不会达到触发条件, 即 $P\{\varepsilon(k)|x(k_s)\} = P\{\vartheta(k) = 1|x(k_s)\} = 0$ , 系统行为不存在随机性 $E\{V(x(k))|x(k_s)\} = V(x(k))$ . 而在 $k_s + h_s$ 之后的时刻,

$$P\{\varepsilon(k)|x(k_s)\} = \begin{cases} 1, & \rho(k) = 1, \\ 0, & \rho(k) = 0. \end{cases}$$

触发与否将只取决于传感器的反馈是否丢失, 而系统闭环与否取决反馈通道与前向通道是否同时传输成功, 需要用期望来描述这些随机行为下的系统状态.

不妨假设 $k_s$ 之后的下一闭环时刻为 $k_{s+1}$ , 考虑 $k \in (k_s + h_s, k_{s+1}]$ ,

$$\begin{aligned} E\{V(x(k_{s+1}))|x(k_s)\} &= \sum_{k=k_s+h_s+1}^{\infty} P\{\varepsilon(k)|x(k_s)\} E\{V(x(k))|x(k_s), \varepsilon(k)\} \leq \\ &= \sum_{k=k_s+h_s+1}^{\infty} pq^{k-k_s-h_s} \gamma^{k-k_s-h_s} \delta V(x(k_s)) = \\ &= \sum_{k=k_s+h_s+1}^{\infty} p(q\gamma)^{k-k_s-h_s} \delta V(x(k_s)) = \\ &= \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{(1 - (q\gamma)^r)}{1 - q\gamma} p \delta V(x(k_s)). \end{aligned} \quad (16)$$

由上式可以看出, 只需通过 $q$ 的取值来保证 $q\gamma < 1$ , 上式便可收敛. 令

$$\xi = \frac{p}{1 - q\gamma} \delta, \quad (17)$$

将式(16)改写成

$$E\{V(x(k_{s+1}))|x(k_s)\} < \xi V(x(k_s)), \quad (18)$$

其中 $\frac{p}{1 - q\gamma}$ 是 $q$ 的递增函数且大于1, 由此可以得到上文优化问题(9)中的两个约束条件 $q\gamma < 1$ 和 $\xi > \delta$ .

至此, 本文证明了相邻闭环时刻 $k_s, k_{s+1}$ 系统的Lyapunov函数呈递减关系, 之后还需讨论两个闭环时刻间的系统运行状况. 综合式(15), 当 $k \in (k_s, k_{s+1})$ 时有

$$\begin{aligned} E\{V(x(k))|x(k_s), \varepsilon(k_{s+1})\} &\leq \\ pq^{k_{s+1}-k_s-h_s} \gamma^{k-k_s-h_s} \delta V(x(k_s)) &< \\ E\{V(x(k_{s+1}))|x(k_s)\} &< \xi V(x(k_s)). \end{aligned} \quad (19)$$

综上所述, 闭环系统在任意相邻的两次闭环时刻 $k \in (k_s, k_{s+1}]$ 内, 均有

$$E\{V(x(k))|x(k_s)\} < \xi V(x(k_s)), \quad k \in (k_s, k_{s+1}]. \quad (20)$$

两侧同时取期望, 有

$$E\{V(x(k))\} < \xi E\{V(x(k_s))\}, \quad k \in (k_s, k_{s+1}],$$

进一步递推可得

$$E\{V(x(k))\} < \xi E\{V(x(k_s))\} < \dots < \xi^{s+1} V(x(0)).$$

对不等式右端进行适当放缩, 即可证明该闭环系统对于任意 $k > 0$ , 有

$$E\{\|x(k)\|^2\} < \xi^{s+1} \lambda_{\max}(P) / \lambda_{\min}(P) \|x(0)\|^2, \quad (21)$$

其中:  $P$ 是Lyapunov函数中的正定对称矩阵;  $\lambda_{\max}(P), \lambda_{\min}(P)$ 分别表示 $P$ 的最大与最小特征值.

由式(17)可以发现,  $\xi$ 是关于 $\delta, q$ 的函数, 且 $\delta$ 和 $q$ 同为文中多目标优化(9)中的决策变量, 这意味着只需将 $\xi < 1$ 作为优化中约束条件, 即可得到满足条件的参量令闭环系统状态随着时间趋于稳定. 证毕.

**注2** 对于定理中的不等式作如下说明: 不等式(11)规定了理想情况下闭环系统的衰减情况, 式(12)用来确定开环系统的发散情况, 其中的矩阵 $P$ 和反馈增益 $K$ 通常容易获取; 而式(13)的右端系数 $\delta$ 先由前文的优化问题解出, 之后可以通过该不等式反解出 $h_0$ 的取值范围, 在此范围内取值即可保证不等式成立.

### 5 数值仿真

考虑系统(1)并取如下系统矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.8 \\ -0.2 & 1.2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix}.$$

并将初始状态设为 $x_0 = [1.5 \ 1]^T$ . 注意到本文设计的智能控制器没有限制获取控制器增益的计算方式, 在本例中采用最优控制方法得到系统反馈增益 $K = [0.2166 \ -1.0008]$ . 根据给定的 $A, B, K$ 可以确定 $\beta = 0.3496, \gamma = 1.2331$ . 设置衰减率上界 $\xi_0 = 0.6$ 与预测窗口长度为 $m_0 = 1$ . 通过求解多目标优化问题, 得到一组解为发送成功率 $p = 0.6442$ , 触发系数 $\delta = 0.43$ , 期望衰减率为0.4851.

将本文设计的带有事件触发和功率优化的系统记为sys<sub>1</sub>, 采用同样反馈增益且不带本文设计的系统sys<sub>2</sub>作为对照组. 图3比较了两种系统的状态轨迹运行情况, 图4展示了各自的网络通信工作情况.

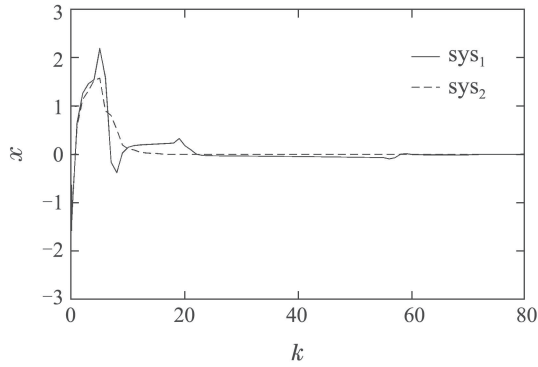


图3 两种控制器下的系统状态轨迹对比

Fig. 3 Comparison of system trajectories under two controllers

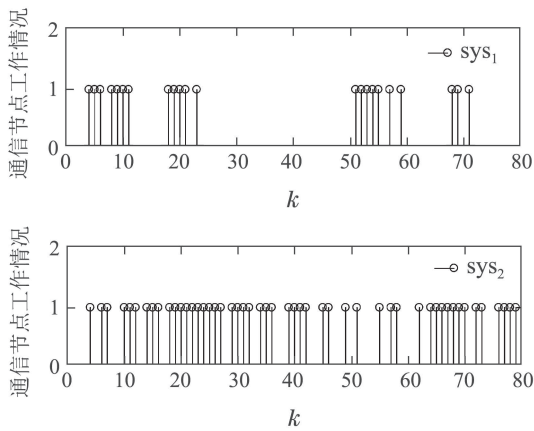


图4 两种策略下的通信工作次数对比

Fig. 4 Comparison of the number of communication operations under two strategies

从图3中可以发现, 没有扰动的情况下两个系统均能够较快趋于稳定. 虚线代表不带有事件触发的最优控制系统效果更好, 因为事件触发牺牲了部分性能来满足节能要求. 实线代表本文设计的系统, 在趋于平衡点之后会有小幅波动, 这是由于零阶保持和开环导致, 在下一次触发之后, 系统将重新趋于稳定.

在图4中展示了两个系统的网络通信工作情况, 可以看出在本文的设计能够大幅减少传输次数. 在仿真展示的80步中,  $sys_1$ 控制器端传输次数为22次, 无相应设计的 $sys_2$ 的传输次数则达到了51次. 在更长时间的运行中将得到更为明显有效的节能效果.

综上所述, 通过事件触发与功率优化设计之后的闭环系统能够达到节能的设计目标, 虽然为此牺牲了部分系统性能, 但通过在优化求解时将可接受的系统衰减率上界作为约束条件并将衰减率作为优化目标函数之一, 使得最终的系统性能仍可令人满意.

## 6 结论

本文针对无线网络化控制系统中网络能量资源有限问题, 设计了事件触发策略以减少通信次数, 并通过无线误码率公式建立了网络化控制系统中通信传

输功率与系统性能之间的联系, 在此基础上可将减少通信次数、降低传输功率和保证系统性能的三方面要求转化为一个多目标优化问题, 通过求解该问题最终能够在不增加额外成本和闭环系统性能较少受影响的情况下进一步提升节能效果. 稳定性分析给出了上述设计下的闭环系统稳定的充分条件. 最后由仿真算例验证了方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] PARK P, ERGEN S C, FISCHIONE C, et al. Wireless network design for control systems: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 20(2): 978 – 1013.
- [2] ZHANG X M, HAN Q L, YU X. Survey on recent advances in networked control systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 12(5): 1740 – 1752.
- [3] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Packet-based deadband control for Internet-based networked control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1057 – 1067.
- [4] PENG C, HAN Q L. On designing a novel self-triggered sampling scheme for networked control systems with data losses and communication delays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1239 – 1248.
- [5] QIU Zhanzhi, ZHANG Qingling, LIU Ming. Guaranteed performance control of uncertain delay output feedback networked system. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(2): 274 – 278. (邱占芝, 张庆灵, 刘明. 不确定时延输出反馈网络化系统保性能控制. *控制理论与应用*, 2007, 24(2): 274 – 278.)
- [6] NIE Xueyuan, WANG Heng. Network control system compensator design and stability analysis. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 217 – 222. (聂雪媛, 王恒. 网络控制系统补偿器设计及稳定性分析. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 217 – 222.)
- [7] ZHAO Y, LIU G P, REES D. Integrated predictive control and scheduling co-design for networked control systems. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(1): 7 – 15.
- [8] IRWIN G W, CHEN J, MCKERNAN A, et al. Co-design of predictive controllers for wireless network control. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(2): 186 – 196.
- [9] PETERS E G W, QUEVEDO D E, FU M. Controller and scheduler codesign for feedback control over IEEE 802.15.4 networks. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(6): 2016 – 2030.
- [10] XIA L, SHIHADA B. Power and delay optimisation in multi-hop wireless networks. *International Journal of Control*, 2014, 87(6): 1252 – 1265.
- [11] KONSTANTINOS G, ALEJANDRO R, GEORGE J P. Optimal power management in wireless control systems. *Proceedings of the American Control Conference*. Portland: IEEE, 2014: 1495 – 1510.
- [12] WANG Yan, JI Zhicheng. Adaptive energy scheduling and collaborative control for wireless networked systems. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1356 – 1362. (王艳, 纪志成. 无线网络化系统自适应能量调度与协同控制. *控制理论与应用*, 2011, 28(10): 1356 – 1362.)
- [13] WITHEEPHANICH K, ESCANO J M, PENA D M D L, et al. A min-max model predictive control approach to robust power management in ambulatory wireless sensor networks. *IEEE Systems Journal*, 2014, 8(4): 1060 – 1073.
- [14] SADI Y, COLERI ERGEN S. Energy and delay constrained maximum adaptive schedule for wireless networked control systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3738 – 3751.

- [15] GATSIS K, PAJIC M, RIBEIRO A, et al. Opportunistic scheduling of control tasks over shared wireless channels. *2014 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems*. Berlin: IEEE, 2014: 1495 – 1510.
- [16] WANG L, GUO G, ZHUANG Y. Networked control of battery-powered systems with communication scheduling and power allocation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, 27(17): 3488 – 3507.
- [17] YUE D, TIAN E, HAN Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(2): 475 – 481.
- [18] TIBERI U, FISCHIONE C, JOHANSSON K H, et al. Energy-efficient sampling of networked control systems over IEEE 802.15.4 wireless networks. *Automatica*, 2013, 49(3): 712 – 724.
- [19] WANG X, LEMMON M D. Event-triggering in distributed networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(3): 586 – 601.
- [20] PECKER MARCOSIG E, FELICIONI F, ZANINI A. Self-triggering based on Lyapunov with adaptive control law for WNCS. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, 12(7): 1242 – 1249.

#### 作者简介:

**赵云波** 教授, 博士生导师, 主要研究兴趣包括网络化控制系统、人工智能驱动的控制、人机融合智能和系统生物学等领域, E-mail: ybzhao@ieee.org;

**袁征** 硕士研究生, 目前研究方向为智能无线网络化控制系统、人工智能, E-mail: zheng\_yuan92@163.com;

**朱创** 硕士研究生, 目前研究方向为网络化控制系统, E-mail: zhuchuang.djc@163.com.