具有时变通信受限非线性信息物理系统的网络化预测控制

刘国平†

(南方科技大学 电子与电气工程系 广东 深圳 518055; 武汉大学 人工智能与自动化系, 湖北 武汉 430076)

摘要: 针对具有时变通信受限的一类非线性信息物理系统, 本文采用网络化预测控制策略, 对于时变通信时延和数据丢失, 不是使用常规的被动方式抑制, 而是进行主动补偿. 为了使补偿时变通信受限的方式简单、主动和通用, 提出了一种新颖的网络化非线性预测控制方法. 所设计的网络化非线性预测控制器能达到具有与无网络的本地闭环控制系统完全相同的期望控制性能. 同时, 经系统稳定性分析, 给出了闭环网络化非线性预测控制系统稳定的充要条件. 数值算例说明了所提网络化非线性预测控制器设计方法对信息物理系统中时变通信延时实现了完全补偿.

关键词: 网络化预测控制; 时变通信受限; 非线性系统; 信息物理系统

引用格式: 刘国平. 具有时变通信受限非线性信息物理系统的网络化预测控制. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 145 – 153

DOI: 10.7641/CTA.2021.10548

Networked predictive control of nonlinear cyber physical systems with time-varying communication constraints

LIU Guo-ping†

(Department of Electrical and Electronic Engineering,
Southern University of Science and Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China;
Department of Artificial Intelligence and Automation, Wuhan University, Wuhan Hubei 430076, China)

Abstract: For a class of nonlinear cyber physical systems with time-varying communication constraints, the networked predictive control strategy is adopted in this paper. It does not use the conventional passive suppression method but employs the active compensation method to overcome the time-varying communication delay and data loss. To make the method of compensating for time-varying communication constraints simple, active and universal, a novel networked nonlinear predictive control method is proposed. The designed networked nonlinear predictive controller can achieve the same expected control performance as a local closed-loop control system without networks. At the same time, the necessary and sufficient conditions for the stability of the closed-loop networked nonlinear predictive control systems are derived. Numerical examples show that the proposed networked nonlinear predictive control method can fully compensate for the time-varying communication delays in cyber physical systems.

Key words: networked predictive control; time-varying communication constraints; nonlinear systems; cyber physical systems

Citation: LIU Guoping. Networked predictive control of nonlinear cyber physical systems with time-varying communication constraints. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(1): 145 – 153

1 引言

随着网络技术的迅速发展, 信息物理系统发展得越来越快, 而且也越来越多, 如: 物联网、工业互联网系统. 信息物理系统是集通信、网络和物理环境于一体的多维复杂系统. 通过计算、通信和控制技术的集成, 它可以实现大规模工程系统的实时感知、动态控制和信息服务, 使系统更加高效协同, 具有重要而广泛的应用前景[1]. 信息物理系统已经在能源、生产制造、工业过程、交通运输、航空航天、经济管理、远程医疗以及危险和特殊环境等领域得到广泛应用. 由于引入网络, 而网络中通信带宽有限且信息源众多, 使得系统信息的传输不可避免地存在许多通信受限, 如: 数据延时、丢失、乱序、攻击等, 这给信息物理控制系统的分析和设计带来了极大的挑战[2].

收稿日期: 2021−06−25; 录用日期: 2021−07−08.
†通信作者. E-mail: guoping.liu@whu.edu.cn; Tel.: +86 27-68772100.
本文责任编委: 方浩.
国家自然科学基金项目(61773144)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (61773144).

通信受限对信息物理系统的闭环系统控制性能影响已开展了大量研究[3–4], 出现了多种方法来处理信息物理系统的控制问题. 主要的方法有时滞系统方法、切换系统方法、马尔可夫跳变系统方法、随机系统方法、事件触发控制方法等. 时滞系统方法将信息物理控制系统转换为具有可变时滞的系统, 使得系统能够容忍一个最大时滞上界并保持一定期望的系统性能[5]. 切换系统方法把有界不确定数据时延和丢包效应下的信息物理系统描述为具有任意切换的离散时间切换系统, 从而能够将现有的切换系统理论应用于信息物理控制系统[6–7]. 马尔可夫跳变系统方法重点考虑网络诱导时延的马尔可夫链特性, 将信息物理控制系统构建为马尔可夫跳变系统进行分析和设计[8]. 随机系统方法针对信息物理控制系统的随机网络时延和随机丢包, 提供有力的分析系统稳定性工具[9]. 事件触发控制方法可以使信息物理控制系统的资源利用率大幅提高, 而控制性能变化不大[10–11]. 通常, 上面这些信息物理系统的控制方法采用被动的方式抑制通信受限, 这样使得其系统的稳定性条件相对比较保守.

对信息物理控制系统中存在的通信受限, 预测控制策略有着其它控制方法难以比拟的优势. 考虑到如何主动补偿信息物理系统中通信受限, 利用网络能传输矢量数据流的特点, 文献[12]原创性地提出了网络化预测控制方法. 该方法突破了传统的单数据点对点传送的控制方式, 并采用预测控制思想, 主动补偿信息物理控制系统中通信受限(如: 网络延时、数据丢包、数据攻击等), 使得其控制性能与系统无网络时的效果几乎完全相同. 文献[13–14]给出了网络化预测控制的设计和实际实施方法. 针对带有随机延时和非线性输入的信息物理系统, 文献[15]提出了一种两步广义预测控制方法. 它由两部分组成: 一部分处理系统的非线性输入, 另一部分补偿系统的网络延时. 文献[16]研究了一类在前向和反向通道都有延时的信息物理系统的鲁棒控制问题, 设计出的控制器能够确保闭环系统稳定, 而且非线性矩阵不等式形式的H无穷范数有界. 文献[17]针对带有通信延时和数据丢失的信息物理系统, 设计出了预测控制器, 并保证了系统的稳定性, 还达到了期望的控制性能. 在实际应用中, 由于信息物理系统具有复杂动力学、可变环境等因素的影响, 难以用模型描述系统动态特性, 文献[18]提出了数据驱动的网络化预测控制方法, 文献[19]提出了一种学习的网络化预测控制方法. 由于通信网络的开放性、共享性和分散性等特点, 信息物理系统同时还面临着来自网络外部恶意攻击的威胁以及各种部件故障的影响, 研究了典型攻击下网络化预测控制系统[20]和典型故障下网络化预测控制系统的设计与分析[21]. 当网络通信的丢包率一定时, 文献[22]在控制器节点采用多步预测方法, 使系统依然保持稳定. 文献[23]采用变步长自适应广义预测控制方法, 讨论了该方法在基于以太网络的控制系统中的适用性, 补偿了网络延时和数据丢失. 尽管已在网络化预测控制方面做了大量研究和取得了许多成果, 但其方法较复杂、受限条件苛刻、保守性大. 如何使处理信息物理系统时变通信受限的方式更简单、更通用、更主动, 还需进一步的研究.

由于通信网络的分散性和共享性, 信息物理系统控制面临严重的挑战主要还是网络本身引入的通信受限. 它们严重影响控制系统的性能, 甚至导致系统失稳和失控, 从而造成经济损失和甚至危及生命安全. 本文针对非线性信息物理系统的时变通信受限, 提出一种更加简练、通用、主动的网络化非线性预测控制方法, 更便利于网络化预测控制策略的实际应用.

2 网络化非线性预测控制策略

网络化预测控制方法与已有的其它网络化控制方法不同. 它采用预测思想和矢量数据传输方式, 基于当前时刻及历史的系统信息, 预测系统未来的控制作用序列, 实现对通信受限的主动补偿, 并达到与本地控制系统几乎完全相同的期望控制性能. 该方法解决了系统通信受限中的主要问题, 促进了信息物理控制系统的应用. 根据网络在系统中的位置, 信息物理控制系统有许多不同的结构. 例如, 在信息物理控制系统中, 网络可以位于传感器和控制器之间、执行器和控制器之间、参考输入和控制器之间. 本文研究的非线性网络化预测控制系统的结构如图1所示, 为了阐述简单起见, 图中系统参考输入设为$r_t=0$.

根据高阶系统方法[24], 大部分系统都可以描述为高阶全驱控制系统. 高阶全驱控制系统并不是一类特殊的物理系统, 与物理系统的状态空间模型和传递函数模型一样, 而是控制系统的一种描述形式. 在图1中, 非线性被控物理对象由下面一类n阶离散非线性全驱控制系统描述:

$$\begin{cases} y(t+1)=f(y^{[n-1]}(t),u^{[p-1]}(t-1))+ \\ \qquad\qquad g(y^{[n-1]}(t),u^{[p-1]}(t-1))u(t),\ t\geqslant 0, \\ y(t)=\varphi(t),\ u(t)=\psi(t),\ t\leqslant 0, \end{cases} \tag{1}$$

其中:

$$y^{[n-1]}(t)=(y(t),y(t-1),\cdots,y(t-n+1)),$$
$$u^{[p-1]}(t-1)=(u(t-1),u(t-2),\cdots,u(t-p)),$$

$y(t)\in\mathbb{R}^m$是系统输出向量, $u(t)\in\mathbb{R}^m$, $f(\cdot,\cdot)\in\mathbb{R}^m$为非线性函数向量, $g(\cdot,\cdot)\in\mathbb{R}^{m\times m}$为非线性函数矩阵, $\varphi(t)\in\mathbb{R}^m$和$\psi(t)\in\mathbb{R}^m$是已知函数向量(输出和输入的初始值), n,m,p是正整数.

从图1中可知, 网络化非线性预测控制器主要由两

部分组成: 非线性控制预测器和通信补偿器. 非线性控制预测器根据当前获得的被控物理对象输出信息和系统要求, 计算出未来被控物理对象的控制输入量序列. 通信补偿器根据网络通信的受限信息, 从接收的未来控制输入量序列中选择出最实时的控制输入量. 为了简单起见, 本文考虑的通信受限主要是通信网络延时和数据丢失, 并且对非线性信息物理控制系统作如下假设.

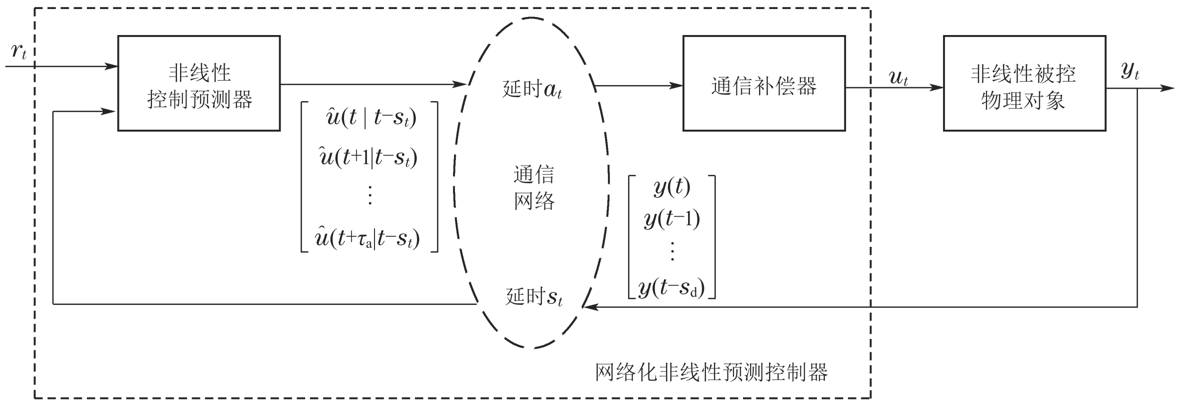

图 1　网络化非线性预测控制系统

Fig. 1　Networked nonlinear predictive control system

假设 1　a) 从系统的输出传感器到非线性控制预测器的反馈通道通信延时为s_t(上界为s_0), 连续数据丢失次数的上界为$s_{\rm d}$; b) 从非线性控制预测器到系统的执行器的前向通道通信延时为a_t(上界为a_0), 连续数据丢失次数的上界为$a_{\rm d}$; c) 通过网络传输的数据带有时间戳; d) 非线性函数矩阵$g(\cdot,\cdot)$可逆($|g(\cdot,\cdot)|\neq 0$).

在实际的信息物理控制系统中, 存在数据丢失的问题. 例如, 如果数据包在某个传输时间(即, 通信延迟的上限)内没有到达目的地, 基于常用的网络协议, 则表示该数据包丢失. 从物理的角度来看, 为了避免信息物理系统成为开环, 很自然地假设只有有限数量的连续数据丢失是可以容忍的. 在信息物理控制系统中, 网络传输数据的时间戳是非常重要的, 这是因为控制系统的控制序列是基于时间的. 此外, 时钟同步也是信息物理控制系统中的一个问题. 在数字元器件(或计算机)中, 有多种方法可以实现时钟同步. 同步误差及其对通信网络上闭环反馈回路的影响问题已经被深入研究过. 本文重点是讨论信息物理系统的网络化非线性预测控制问题, 假设系统中的各组成部分的时钟已经同步.

对于数据传输中的乱序, 在非线性控制预测器侧和通信补偿器侧分别设有数据缓存器, 根据时间戳进行数据传输中乱序后的再排序. 同时, 在每一个当前时刻, 数据缓存器只保留最新的数据和信息, 这样将会保证t时刻比$t-1$时刻的通信延时不会大于一步, 即

$$s_t - s_{t-1}\leqslant 1,\ a_t - a_{t-1}\leqslant 1. \tag{2}$$

本文采用以下数据传输机制来处理可变通信延时和数据丢失问题:

1) 被控物理对象的输出数据从传感器侧传输到非线性控制预测器侧, 每次采用下面数据包的形式传输:

$$[y^{\rm T}(t)\ \ y^{\rm T}(t-1)\ \ \cdots\ \ y^{\rm T}(t-s_{\rm d})]^{\rm T}. \tag{3}$$

2) 在非线性控制预测器侧, 基于经s_t步延时后接收的被控物理对象输出数据, 采用非线性预测控制算法, 计算未来控制序列$\hat{u}(t|t-s_t)$, $\hat{u}(t+1|t-s_t),\cdots,\hat{u}(t+\tau_{\rm a}|t-s_t)$, 并将该控制预测数据序列从非线性控制预测器侧传输到通信补偿器侧, 每次采用下面数据包的形式传输:

$$\begin{aligned}&[\hat{u}^{\rm T}(t|t-s_t)\ \ \hat{u}^{\rm T}(t+1|t-s_t)\ \ \cdots\\&\hat{u}^{\rm T}(t+\tau_{\rm a}|t-s_t)]^{\rm T},\end{aligned} \tag{4}$$

其中$\tau_{\rm a}=a_0+a_{\rm d}$, $\hat{u}(t+i|t-s_t)$表示控制输入$u(t)$基于$t-s_t$时刻信息对$t+i$时刻的预测值.

根据发送数据的时间戳(假设1c)), 需要两个数据缓冲区对接收到的数据进行重新排序. 一个是用于执行器侧的数据缓冲区接收控制输入数据, 另一个是用于非线性控制预测器侧的数据缓冲区接收输出数据. 因此, 在假设1a)和1b)下, 非线性控制预测器侧需要的输出数据和执行器侧需要的控制输入数据始终存在且及时可用.

从式(3)–(4)可以看出, 通过网络传输的数据有些可能不会被使用. 这将降低传输效率, 这也是所提数据传输机制的一个不足之处. 其实, 可以采用事件驱动的方式, 减少数据传输量, 克服其方法的

不足. 从积极的方面来说, 上述数据传输机制可以解决信息物理控制系统中的主要问题, 即可变通信延迟和数据丢失.

在通信补偿器侧, 在t时刻有两个预测控制输入数值可供选择, 其中一个来自t时刻收到的$\hat{u}(t|t-a_t-s_{t-a_t})$, 另外一个来自执行器侧数据缓冲器的$\hat{u}(t|t-1-a_{t-1}-s_{t-1-a_{t-1}})$. 为了有效地补偿通信受限, 通信补偿器将选择用于t时刻的最新预测控制输入值, 即

$$u(t)=\hat{u}(t|t-\tau_t), \tag{5}$$

其中$\tau_t=\min\{a_t+s_{t-a_t},\ a_{t-1}+s_{t-1-a_{t-1}}+1\}$. 上面通信补偿器输出的控制输入信号将施加到被控物理对象的执行器, 这样就形成了闭环网络化非线性预测控制系统.

3 网络化非线性预测控制器设计

本节将根据网络化非线性预测控制策略, 讨论网络化非线性预测控制器的设计. 首先, 对非线性信息物理系统(1)进行输入变量变换. 根据高阶全驱控制方法[25], 由于假设1(d), 采用下面输入变量变换式:

$$\begin{aligned}u(t)=&g^{-1}(y^{[n-1]}(t),u^{[p-1]}(t-1))\times\\&(v(t)-f(y^{[n-1]}(t),u^{[p-1]}(t-1))),\end{aligned} \tag{6}$$

$v(t)\in\mathbb{R}^m$是新的输入变量向量. 将式(6)代入系统(1), 可得

$$y(t+1)=v(t). \tag{7}$$

在考虑没有网络的情况下, 系统采用下面输出反馈控制器:

$$v(t)=K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t), \tag{8}$$

式中:

$$K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t)=\sum_{j=0}^{q}K_jy(t-j), \tag{9}$$

$K_j\in\mathbb{R}^{m\times m}(j=0,1,\cdots,q)$是输出反馈矩阵. 在没有网络的情况下, 其闭环控制(本地闭环控制)系统可以表达为

$$y(t+1)=K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t). \tag{10}$$

显然, 输出反馈矩阵K_j可根据系统性能要求, 进行任意配置设计. 例如: 如果取$q=0$, 将增益矩阵K_0设计为一个对角阵, 则其矩阵对角元素的值就是系统的闭环极点.

考虑到信息物理控制系统中存在的可变通信受限. 在非线性控制预测器侧, 由于假设1a), 在t时刻只有$t-s_t$时刻和以前的系统输出数据和信息. 为了预测未来不同时刻的系统输出, 基于式(7), 提出下面的多步输出预测器:

$$\begin{cases}\hat{y}(t-s_t+1|t-s_t)=\hat{v}(t-s_t|t-s_t),\\\hat{y}(t-s_t+2|t-s_t)=\hat{v}(t-s_t+1|t-s_t),\\\qquad\vdots\\\hat{y}(t+\tau_{\mathrm{a}}|t-s_t)=\hat{v}(t+\tau_{\mathrm{a}}-1|t-s_t),\end{cases} \tag{11}$$

这里$\hat{y}(t-s_t+i|t-s_t)$和$\hat{v}(t-s_t+i|t-s_t)$分别表示输出$y(t)$和输入$v(t)$基于$t-s_t$时刻信息对$t-s_t+i$时刻的预测值. 根据无网络的输出反馈控制律(8), 未来控制输入采用下面形式:

$$\begin{cases}\hat{v}(t-s_t|t-s_t)=K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-s_t),\\\hat{v}(t-s_t+i|t-s_t)=K_{\hat{\mathrm{y}}}^{[q]}(t-s_t+i|t-s_t),\\i=1,2,\cdots,s_t+\tau_{\mathrm{a}},\end{cases} \tag{12}$$

其中

$$K_{\hat{\mathrm{y}}}^{[q]}(t+i|t-s_t)=\sum_{j=0}^{q}K_j\hat{y}(t+i-j|t-s_t). \tag{13}$$

如果$i\leqslant q-s_t$, 则式(13)中:

$$\hat{y}(t+i-q|t-s_t)=y(t+i-q),\\ i=0,1,\cdots,s_t+\tau_{\mathrm{a}}.$$

根据输入变量变换式(6), 基于$t-s_t$时刻的系统输出信息$y(t-s_t)$, 未来预测控制量可由下式计算:

$$\begin{aligned}&\hat{u}(t-s_t+i|t-s_t)=\\&g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t-s_t+i|t-s_t),\\&\hat{u}^{[p-1]}(t-s_t+i-1|t-s_t))\times\\&(\hat{v}(t-s_t+i|t-s_t)-f(\hat{y}^{[n-1]}(t-s_t+i|t-s_t),\\&\hat{u}^{[p-1]}(t-s_t+i-1|t-s_t))),\end{aligned} \tag{14}$$

其中$i=0,1,\cdots,s_t+\tau_{\mathrm{a}}$. 这里

$$\begin{aligned}&\hat{y}^{[n-1]}(t+i|t-s_t)=\\&(\hat{y}(t+i|t-s_t),\hat{y}(t+i-1|t-s_t),\cdots,\\&\hat{y}(t+i-n+1|t-s_t)),\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}&\hat{u}^{[p-1]}(t+i|t-s_t)=\\&(\hat{u}(t+i|t-s_t),\hat{u}(t+i-1|t-s_t),\cdots,\\&\hat{u}(t+i-p+1|t-s_t)).\end{aligned} \tag{16}$$

如果$i\leqslant n-1-s_t$, 则式(15)中

$$\hat{y}(t+i-n+1|t-s_t)=y(t+i-n+1),\\ i=0,1,\cdots,s_t+\tau_{\mathrm{a}}.$$

同样, 如果$i\leqslant p-1-s_t$, 则式(16)中

$$\hat{u}(t+i-p+1|t-s_t)=u(t+i-p+1),$$

$i = 0, 1, \cdots, s_t + \tau_{\rm a}$.

因此, 控制预测器的输出可以由式(17)给出:

$$\begin{bmatrix} \hat{u}(t|t-s_t) \\ \hat{u}(t+1|t-s_t) \\ \vdots \\ \hat{u}(t+\tau_{\rm a}|t-s_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_{\tau_{\rm a}+1} \end{bmatrix}, \tag{17}$$

其中:

$$\begin{aligned} H_1 = {} & g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t|t-s_t), \hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-s_t)) \times \\ & (\hat{v}(t|t-s_t) - f(\hat{y}^{[n-1]}(t|t-s_t), \\ & \hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-s_t))), \\ H_2 = {} & g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t+1|t-s_t), \hat{u}^{[p-1]}(t|t-s_t)) \times \\ & (\hat{v}(t+1|t-s_t) - f(\hat{y}^{[n-1]}(t+1|t-s_t), \\ & \hat{u}^{[p-1]}(t|t-s_t))), \\ H_{\tau_{\rm a}+1} = {} & g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t+\tau_{\rm a}|t-s_t), \\ & \hat{u}^{[p-1]}(t+\tau_{\rm a}-1|t-s_t)) \times \\ & (\hat{v}(t+\tau_{\rm a}|t-s_t) - f(\hat{y}^{[n-1]}(t+\tau_{\rm a}|t-s_t), \\ & \hat{u}^{[p-1]}(t+\tau_{\rm a}-1|t-s_t))). \end{aligned}$$

上面系统控制预测矢量数据从非线性控制预测器经前向网络通道传输到执行器侧的通信补偿器. 由于假设1(b), 前向网络通道存在通信延时a_t. 该通信补偿器根据式(5)选择最实时的控制预测值, 其通信补偿器的输出为

$$\begin{aligned} & u(t) = \hat{u}(t|t-\tau_t) = \\ & g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t|t-\tau_t), \hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-\tau_t)) \times \\ & (K_{\hat{\rm y}}^{[q]}(t|t-\tau_t) - f(\hat{y}^{[n-1]}(t|t-\tau_t), \\ & \hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-\tau_t))), \end{aligned} \tag{18}$$

式中$\tau_t = \min\{a_t + s_{t-a_t}, a_{t-1} + s_{t-1-a_{t-1}} + 1\}$. 上面这个控制输入式(18)就直接施加到被控物理对象的执行器.

因此, 非线性预测控制器可采用下面的两级设计方案: 1) 采用式(6)进行输入变量变换; 2) 设计控制器的增益矩阵$K_j (j = 0, 1, \cdots, q)$, 这可以使用与本地控制系统(即闭环系统中没有网络)完全相同的设计方法来实现. 由于网络化非线性预测控制方法可以提供与本地控制系统完全相同的闭环控制性能(第4节证明, 第5节证实), 上述设计方案大大简化了非线性预测控制器的设计过程.

4　网络化非线性预测控制系统的稳定性分析

采用网络化非线性预测控制的信息物理系统的闭环控制稳定性分析是至关重要的. 本节针对时变通信受限, 给出如下网络化非线性预测控制系统的稳定性定理.

定理 1　对于满足假设1的非线性系统(1), 采用网络化非线性预测控制器(18), 其闭环网络化非线性预测控制系统稳定的充分必要条件是下面系统是稳定的.

$$y(t+1) - K_0 y(t) - K_1 y(t-1) - \cdots - K_q y(t-q) = 0. \tag{19}$$

证　对于系统(1)和控制律(18), 其闭环系统可描述为

$$\begin{cases} y(t+1) = f(y^{[n-1]}(t), u^{[p-1]}(t-1)) + \\ \qquad g(y^{[n-1]}(t), u^{[p-1]}(t-1))u(t), \\ u(t) = g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t|t-\tau_t), \hat{u}^{[p-1]}(t|t-\tau_t)) \times \\ \qquad (K_{\hat{\rm y}}^{[q]}(t|t-\tau_t) - f(\hat{y}^{[n-1]}(t|t-\tau_t), \\ \qquad \hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-\tau_t))), \end{cases} \tag{20}$$

式中$\tau_t \leqslant s_0 + \tau_{\rm a}$. 为了推导方便, 把控制器(18)在非线性预测控制器侧的计算等价到执行器侧进行. 基于$t - \tau_t$时刻及历史的被控对象输入输出信息, 由式(12)可知, 使用了下面预估计算:

$$\begin{cases} \hat{v}(t-\tau_t|t-\tau_t) = K_{\rm y}^{[q]}(t-\tau_t), \\ \hat{v}(t-\tau_t+i|t-\tau_t) = K_{\hat{\rm y}}^{[q]}(t-\tau_t+i|t-\tau_t), \end{cases} \tag{21}$$

其中$i = 1, 2, \cdots, \tau_t$. 其实, 将式(12)中的s_t用τ_t代替, 可得上式. 当$i = 0$时, 由式(15)–(16)和(21)中的第1式以及在$t - \tau_t$时刻已知的系统输入输出信息, 可导出下面的因果关系:

$$\begin{cases} \hat{y}^{[n-1]}(t-\tau_t|t-\tau_t) = y^{[n-1]}(t-\tau_t), \\ \hat{u}^{[p-1]}(t-\tau_t-1|t-\tau_t) = u^{[p-1]}(t-\tau_t-1), \\ \hat{v}(t-\tau_t|t-\tau_t) = K_{\rm y}^{[q]}(t-\tau_t), \\ \qquad \Downarrow \quad \text{由式(14)和式(6), 可得} \\ \hat{u}(t-\tau_t|t-\tau_t) = \\ g^{-1}(y^{[n-1]}(t-\tau_t), u^{[p-1]}(t-\tau_t-1)) \times \\ (K_{\rm y}^{[q]}(t-\tau_t) - f(y^{[n-1]}(t-\tau_t), \\ u^{[p-1]}(t-\tau_t-1))) = \\ u(t-\tau_t), \\ \qquad \Downarrow \quad \text{由式(1)和式(11), 可得} \\ y(t-\tau_t+1) = K_{\rm y}^{[q]}(t-\tau_t) = \\ \hat{y}(t-\tau_t+1|t-\tau_t). \end{cases} \tag{22}$$

当$i = 1$时, 利用上面获得的

$$\hat{y}(t-\tau_t+1|t-\tau_t) = y(t-\tau_t+1),$$

$$\hat{u}(t-\tau_t|t-\tau_t)=u(t-\tau_t).$$

由式(15)–(16)和式(21)中的第2式可推导出下面关系:

$$\begin{cases}\hat{y}^{[n-1]}(t-\tau_t+1|t-\tau_t)=y^{[n-1]}(t-\tau_t+1),\\ \hat{u}^{[p-1]}(t-\tau_t|t-\tau_t)=u^{[p-1]}(t-\tau_t),\\ \hat{v}(t-\tau_t+1|t-\tau_t)=K_{\hat{\mathrm{y}}}^{[q]}(t-\tau_t+1|t-\tau_t)=\\ K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-\tau_t+1),\\ \qquad\Downarrow\quad \text{由式(14)和式(6), 可得}\\ \hat{u}(t-\tau_t+1|t-\tau_t)=\\ g^{-1}(y^{[n-1]}(t-\tau_t+1),u^{[p-1]}(t-\tau_t))\times\\ (K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-\tau_t+1)-\\ f(y^{[n-1]}(t-\tau_t+1),u^{[p-1]}(t-\tau_t)))=\\ u(t-\tau_t+1),\\ \qquad\Downarrow\quad \text{由式(1)和式(11), 可得}\\ y(t-\tau_t+2)=K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-\tau_t+1)=\\ \hat{y}(t-\tau_t+2|t-\tau_t).\end{cases} \tag{23}$$

类似地递推, 当$i=\tau_t-1$时, 同样可有

$$\begin{cases}\hat{y}^{[n-1]}(t-1|t-\tau_t)=y^{[n-1]}(t-1),\\ \hat{u}^{[p-1]}(t-2|t-\tau_t)=u^{[p-1]}(t-2),\\ \hat{v}(t-1|t-\tau_t)=K_{\hat{\mathrm{y}}}^{[q]}(t-1|t-\tau_t)=\\ K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-1),\\ \qquad\Downarrow\quad \text{由式(14)和式(6), 可得}\\ \hat{u}(t-1|t-\tau_t)=\\ g^{-1}(y^{[n-1]}(t-1),u^{[p-1]}(t-2))\times\\ (K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-1)-f(y^{[n-1]}(t-1),\\ u^{[p-1]}(t-2)))=\\ u(t-1),\\ \qquad\Downarrow\quad \text{由式(1)和式(11), 可得}\\ y(t)=K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t-1)=\hat{y}(t|t-\tau_t).\end{cases} \tag{24}$$

从上面, 已获得

$$\begin{cases}\hat{y}(t-\tau_t+i|t-\tau_t)=y(t-\tau_t+i),\\ \hat{u}(t-\tau_t+i-1|t-\tau_t)=u(t-\tau_t+i-1),\end{cases} \tag{25}$$

其中$i=0,1,2,\cdots,\tau_t$. 于是由式(13)(15)–(16), 可知

$$\hat{y}^{[n-1]}(t|t-\tau_t)=y^{[n-1]}(t), \tag{26}$$

$$\hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-\tau_t)=u^{[p-1]}(t-1), \tag{27}$$

$$K_{\hat{\mathrm{y}}}^{[q]}(t|t-\tau_t)=K_{\mathrm{y}}^{[q]}(t). \tag{28}$$

则闭环系统(20)可表示为

$$y(t+1)=\sum_{i=0}^{q}K_iy(t-i). \tag{29}$$

显然, 式(29)就是式(19). 因此, 采用式(18)给出的网络化非线性预测控制器, 其闭环信息物理系统等价于系统(19). 这样就证明了定理1.

从定理1可见, 闭环信息物理预测控制系统等价一个无时滞全自由参数的$q+1$阶线性系统, 而且与无网络的本地闭环控制系统(10)完全等价. 因此, 为了使其闭环系统稳定, 只需用全自由反馈矩阵K_j $(j=0,1,\cdots,q)$的部分自由度使线性系统(19)稳定, 它们剩余的自由度可用来实现优化期望的控制性能指标. 此外, 如果把所有全自由反馈矩阵$K_j(j=0,1,\cdots,q)$选为对角矩阵, 则闭环信息物理预测控制系统(19)的输出向量将完全解耦, 这样多输入多输出系统就可以按照单输入单输出系统来进行自由设计和分析了.

如果非线性被控物理对象本身存在d步输入延时, 则n阶离散非线性全驱控制系统(1)可描述成下面形式:

$$\begin{cases}y(t+1)=f(y^{[n-1]}(t),u^{[p-1]}(t-d-1))+\\ \qquad\qquad g(y^{[n-1]}(t),u^{[p-1]}(t-d-1))\times\\ \qquad\qquad u(t-d),\ t\geqslant 0,\\ y(t)=\varphi(t),\ u(t)=\psi(t),\ t\leqslant 0.\end{cases} \tag{30}$$

相应的控制器(18)修改为

$$\begin{aligned}&u(t)=\hat{u}(t|t-\tau_t)=\\ &g^{-1}(\hat{y}^{[n-1]}(t+d|t-\tau_t),\hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-\tau_t))\times\\ &(K_{\hat{\mathrm{y}}}^{[q]}(t+d|t-\tau_t)-\\ &f(\hat{y}^{[n-1]}(t+d|t-\tau_t),\hat{u}^{[p-1]}(t-1|t-\tau_t))),\end{aligned} \tag{31}$$

其系统的闭环稳定性结论仍然是定理1.

由于离散高阶全驱控制系统(1)并不是一类特殊的系统, 只是控制系统的另一种描述形式, 因此, 该文所提出的非线性网络化预测控制方法具有普遍性, 为非线性信息物理系统提供了一个主动补偿时变通信受限的通用解决方案. 所提方法可广泛地应用于各种信息物理系统的控制, 例如: 物联网系统控制、电力互联网系统控制、车联网系统控制等.

5 例子

为了展示本文提出的网络化非线性预测控制方法的有效性, 考虑被控物理对象由下面一个二阶离散非线性全驱控制系统描述:

$$y(t+1)=$$

$$0.99y(t)y(t-1)-1.17y^2(t-1)+$$
$$1.92y(t)-0.96y(t-1)+0.16\sin y(t-1)+$$
$$(0.2616+0.1584\cos y(t-1))u(t). \qquad (32)$$

该系统开环不稳定, 而且对控制输入信号的延时相当敏感. 将式(32)与系统(1)相比较, 可知系统的非线性函数$f(y^{[1]}(t))$和$g(y^{[1]}(t))$为

$$\begin{cases} f(y^{[1]}(t))=0.99y(t)y(t-1)-1.17y^2(t-1)+ \\ \qquad 1.92y(t)-0.96y(t-1)+ \\ \qquad 0.16\sin y(t-1), \\ g(y^{[1]}(t))=0.2616+0.1584\cos y(t-1). \end{cases} \qquad (33)$$

在不考虑通信受限的情况下(即: 无网络的本地控制), 根据式(6), 取$q=1$, 系统的控制器设计为

$$u(t)=g^{-1}(y^{[1]}(t))(K_0y(t)+K_1y(t-1)-f(y^{[1]}(t))). \qquad (34)$$

在该例子中, 作如下假设: 1) 系统的初始条件为$y(t)=-1, u(t)=0, t\leqslant 0$; 2) 经输出反馈控制后的闭环控制系统具有2个极点位于$0.9\pm 0.1\mathrm{i}$.

根据上面假设2), 采用极点配置方法, 可计算出控制参数K_0和K_1分别为

$$K_0=1.8,\ K_1=-0.82. \qquad (35)$$

下面分3种情况来讨论本文所提出的控制方法:

情况 1　无网络延时情况.

在无网络延时情况下, 反馈通信通道和前向通信通道都没有网络延时和数据丢包. 这时的信息物理系统就相当于传统的本地闭环反馈控制系统. 采用的控制器为

$$u(t)=g^{-1}(y^{[1]}(t))(1.8y(t)-0.82y(t-1)-$$
$$f(y^{[1]}(t))). \qquad (36)$$

其系统的输出响应和控制输入信号如图2–3所示.

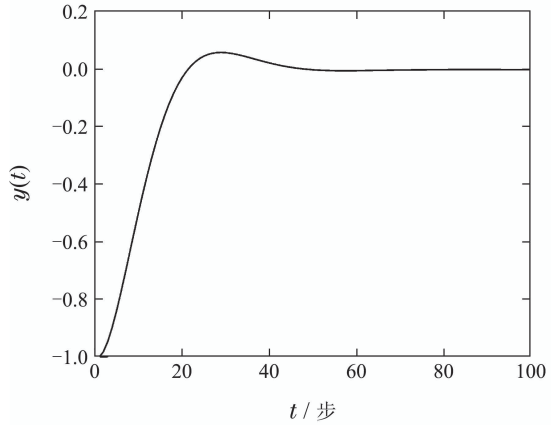

图 2　系统输出响应$y(t)$(情况1)

Fig. 2　Output response $y(t)$ of the system (Case 1)

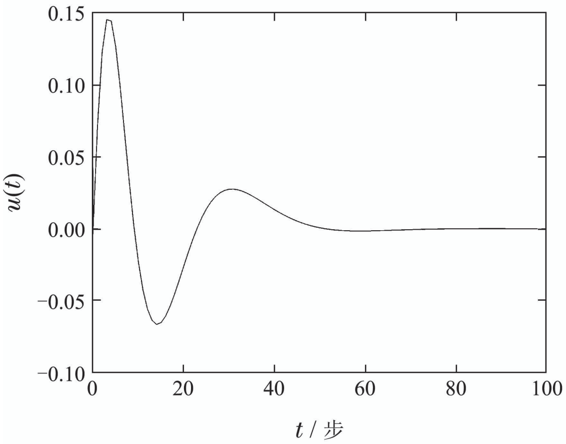

图 3　系统控制输入$u(t)$(情况1)

Fig. 3　System control input $u(t)$ (Case 1)

情况 2　无网络延时补偿情况.

在无网络延时补偿情况下, 反馈通道和前向通道的通信网络延时没有补偿. 通常, 其控制器为

$$u(t)=g^{-1}(y^{[1]}(t-\tau_t))(1.8y(t-\tau_t)-$$
$$0.82y(t-\tau_t-1)-f(y^{[1]}(t-\tau_t))), \qquad (37)$$

式中$\tau=s_t+a_t$, 这是大部分非网络化预测控制方法使用的控制策略. 对于该系统, 当$\tau_t\geqslant 4$时, 闭环系统就不稳定. 当$\tau_t=3$时, 闭环系统发生振荡, 其系统的响应结果如图4–5所示.

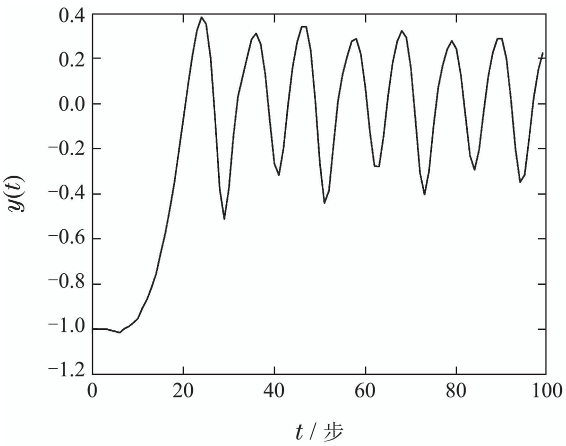

图 4　系统输出响应$y(t)$(情况2)

Fig. 4　Output response $y(t)$ of the system (Case 2)

情况 3　网络化预测控制.

在网络化预测控制情况下, 采用非线性预测控制策略(18), 对反馈通信通道和前向通信通道的网络延时进行主动补偿, 其控制器为

$$u(t)=g^{-1}(\hat{y}^{[1]}(t|t-\tau_t))(1.8\hat{y}(t|t-\tau_t)-$$
$$0.82\hat{y}(t-1|t-\tau_t)-f(\hat{y}^{[1]}(t|t-\tau_t))), \qquad (38)$$

式中$\tau_t=s_t+a_t$. 假设反馈通信通道和前向通信通道的时变网络延时s_t和a_t分别为不大于6的随机数, 并满足式(2).

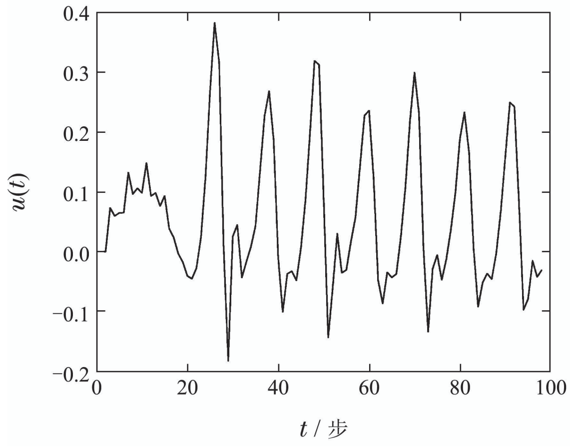

图 5 系统控制输入$u(t)$(情况2)

Fig. 5 System control input $u(t)$ (Case 2)

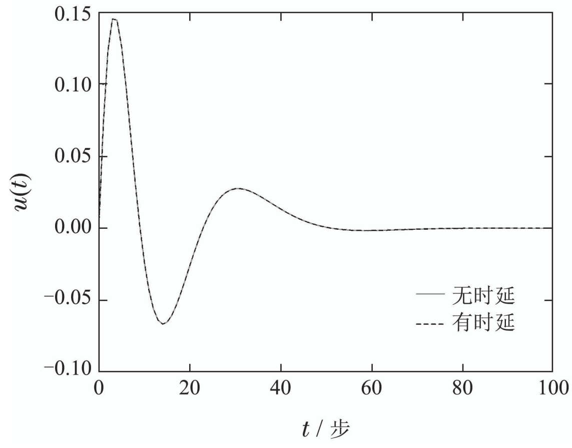

图 8 系统控制输入$u(t)$(情况3)

Fig. 8 System control input $u(t)$ (Case 3)

对于网络通信延时的分布如图6所示的情况, 其系统的闭环控制效果见图7–8. 与无网络延时的情况1 相比较, 其结果完全相同. 可见网络化预测控制完全补偿了网络延时的影响.

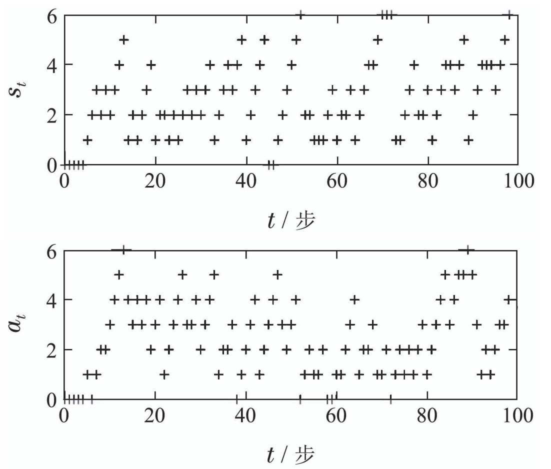

图 6 反馈通道通信延时s_t和前向通道通信延时a_t(情况3)

Fig. 6 Communication delay s_t of the feedback channel and communication delay a_t of the forward channel (Case 3)

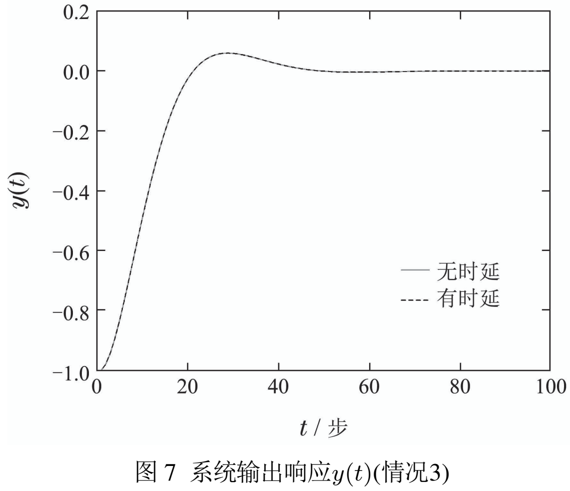

图 7 系统输出响应$y(t)$(情况3)

Fig. 7 Output response $y(t)$ of the system (Case 3)

6 结论

本文研究了一类具有时变通信时延和数据丢失的非线性信息物理系统的控制问题. 为了补偿通信时延和数据丢失, 引入了网络化预测控制方案. 提出了一种网络化非线性预测控制方法, 使闭环网络化非线性预测控制系统既能达到预期的控制性能, 又能保证系统的稳定性. 与其它网络化控制方法相比, 本文提出的网络化非线性预测控制方法不仅简单、主动和通用, 而且具有两个重要的优点: 一是闭环网络化控制系统的控制性能与无网络闭环本地控制系统的控制性能完全相同; 二是闭环网络化控制系统稳定的充分必要条件与时变通信时延和数据丢失无关. 文中给出的仿真例子结果证实了上述优点. 本文在网络化非线性预测控制器的设计中, 只考虑了基于理想系统模型的设计. 实际上, 大多数实际控制系统都是具有内部不确定性(如建模误差)和外部不确定性(如随机干扰), 本文提出的控制方案目前还正在针对上述实际系统进行研究. 尽管仍然存在各种具有挑战性的问题, 但据推测, 类似的结果可能在不久的将来可以取得.

参考文献:

[1] BAILLIEUL J, ANTSAKLIS P J. Control and communication challenges in networked real-time systems. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 9 – 28.

[2] ZHANG X M, HAN Q L, GE X, et al. Networked control systems: A survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(1): 1 – 17.

[3] NESIC D, LIBERZON D. A unified framework for design and analysis of networked and quantized control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 732 – 747.

[4] JIE Xinchun, FEI Minrui, DU Dajun. Replay attack measurement of networked control system based on digital watermark. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(9): 2047 – 2053.
(颉新春, 费敏锐, 杜大军. 基于数字水印的网络控制系统回放攻击检测. 控制理论与应用, 2020, 37(9): 2047 – 2053.)

[5] XIONG J, LAM J. Stabilization of networked control systems with a logic ZOH. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 358 – 363.

[6] DONKERS M, HEEMELS W, WOUW N V D, et al. Stability analysis of networked control systems using a switched linear systems approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(9): 2101 – 2115.

[7] KRUSZEWSKI A, JIANG W, FRIDMAN E, et al. A switched system approach to exponential stabilization through communication network. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(4): 887 – 900.

[8] NILSSON J, BERNHARDSSON B, WITTENMARK B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*, 1998, 34(1): 57 – 64.

[9] DONKERS M, HEEMELS W, BERNARDINI D, et al. Stability analysis of stochastic networked control systems. *Automatica*, 2012, 48(5): 917 – 925.

[10] DONKERS M, HEEMELS W. Output-based event-triggered control with guaranteed $\mathcal{L}_\infty$-gain and improved and decentralized event triggering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(6): 1362 – 1376.

[11] 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.
(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.)

[12] LIU G P, MU J X, REES D, et al. Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC. *International Journal of Control*, 2006, 79(4): 287 – 296.

[13] LIU G P, XIA Y Q, CHEN J, et al. Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(3): 1282 – 1297.

[14] CHAI S C, LIU G P, REES D, et al. Design and practical implementation of internet-based predictive control of a servo system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(1): 158 – 168.

[15] ZHAO Y B, LIU G P. A predictive control-based approach to networked Hammerstein systems: Design and stability analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, B: Cybernetics*, 2008, 38(3): 700 – 708.

[16] WANG R, LIU G P, WANG W, et al. H_∞ control for networked predictive control systems based on the switched Lyapunov function method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(10): 3565 – 3571.

[17] LIU G P. Predictive controller design of networked systems with communication delays and data loss. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, 2010, 57(6): 481 – 485.

[18] PANG Z H, LIU G P, SUN D H. Data-driven control with input design-based data dropout compensation for networked nonlinear systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(2): 628 – 636.

[19] LIU G P. Networked learning predictive control of nonlinear cyber-physical systems. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2020, 33(6): 1719 – 1732.

[20] PANG Z H, LIU G P. Design and practical implementation of secure networked predictive control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(5): 1334 – 1342.

[21] PANG Z H, LIU G P, ZHOU D H, et al. Two-channel false data injection attacks against output tracking control of networked systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3242 – 3251.

[22] KIM W J, JI K, AMBIKE A. Real-time operating environment for networked control systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2006, 3(3): 287 – 296.

[23] TANG P L, DE SILVA C W. Compensation for transmission delays in an Ethernet based control network using variable-horizon predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(4): 707 – 718.

[24] DUAN Guangren. High-order system approaches: I. Fully-actuated systems and parametric designs. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1333 – 1345.
(段广仁. 高阶系统方法—I. 全驱系统与参数化设计. 自动化学报, 2020, 46(7): 1333 – 1345.)

[25] DUAN G R. High-order fully actuated system approaches: Part I. Models and basic procedure. *International Journal of Systems Sciences*, 2021, 52(2): 422 – 435.

作者简介:

刘国平 教授, 博士生导师, 主要从事网络化控制、多智能体系统、非线性系统辨识与控制、多目标最优控制与决策等领域的理论研究以及工业先进控制和物联网系统控制等领域的应用技术研究, E-mail: guoping.liu@whu.edu.cn.