DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0014-06

拒绝服务攻击下存在量化的CPS鲁棒预测控制

孙兴全，薛斌强

(青岛大学 自动化学院,山东 青岛 266071)

摘　要: 针对存在控制输入量化和系统不确定性的信息物理系统(cyber-physical systems,CPS)安全控制问题,给出拒绝服务(denial-of-service,DoS)攻击下CPS的鲁棒预测控制器设计方法。首先,考虑拒绝服务攻击的随机特性,将拒绝服务攻击描述为满足伯努利分布的丢包过程;其次,基于对数量化器和扇形有界方法,把CPS的量化控制问题转化为CPS的鲁棒控制问题;同时,利用李雅普诺夫稳定性理论和LMI方法,得到保证系统稳定的鲁棒预测控制器。仿真实例验证了所设计控制方法的有效性。

关键词: 信息物理系统;对数量化;拒绝服务攻击;鲁棒预测控制

中图分类号: TP309;TP393　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1003-7241(2025)08-0014-06

Robust Predictive Control of CPS with Quantization under Denial-of-Service Attacks

SUN Xingquan, XUE Binqiang

(School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Aiming at the security control problems of cyber-physical systems (CPS) with control input quantization and system uncertainty, this paper presents a robust predictive controller design method for CPS under denial-of-service (DoS) attacks. Firstly, considering the random nature of DoS attacks, DoS attacks are described as packet loss processes that satisfy the Bernoulli distribution. Secondly, the logarithmic quantizer and sector bounded methods are adopted to Transform the system quantitative control problem into a CPS robust control problem. At the same time, using Lyapunov stability theory and LMI method, a robust predictive controller that can ensure system stability is obtained. Finally, simulation examples verify the effectiveness of the designed control strategy.

Keywords: cyber-physical systems; logarithmic quantization; denial-of-service attacks; robust predictive control

0　引言

随着网络技术迅速发展,物理信息系统CPS得到了广泛的应用,例如远端诊断、故障排除和自动驾驶系统等多个领域。但系统本身的局限性,包括网络带宽受限、数模转换的误差,以及传感器、控制器和执行器在网络中进行数据传输可能会带来的网络安全问题,这些势必会给系统的控制性能造成挑战。当前全球网络安全事件仍然频发,网络攻击威胁持续上升,2022年1月,红十字国际委员会遭到网络攻击,导致超51万名高度脆弱人群的个人数据被黑;同年3月,丰田汽车由于一家供应商遭受网络攻击,导致其关闭在日本所有工厂,造成严重经济损失;同年6月,学习通数据库遭到网络攻击,导致1亿7 273万条数据泄露。针对CPS的攻击方式主要为主动攻击,包括欺骗攻击、拒绝服务攻击、重放攻击。其中拒绝服务攻击通过耗尽通信网络中的资源来阻塞信道,由于攻击方式高效且最常见,因此拒绝服务攻击下CPS安全控制问题备受关注。

目前,已有众多学者针对CPS的安全控制问题进行了研究[1-3]。文献[4]针对能量受限且攻击策略未知的拒绝服务攻击下的CPS,同时考虑信道中固有的丢包,提出基于观测器的控制方法使得系统稳定并满足性能指标;文献[5]考虑具有随机特性且有界的丢包过程,以成功传输的上一时刻系统状态补偿拒绝服务攻击引起的丢包;文献[6]考虑了存在延迟、丢包和扰动的不确定系统,提出来一种基于圆锥互补线性化等方法的控制策略;文献[7]同文献[4]一样,在考虑通信信道存在拒绝服务攻击的同时,信道中也存在固有丢包,基于LMI方法和锥补线性化给出了系统稳定性分析和控制策略;文献[8]针对周期性拒绝服务攻击下的网络控制系统,提出一种弹性控制策略,利用u-step正不变集和改进的初始可行集实现了系统在拒绝服务攻击下的指数稳定,并给出了系统允许拒绝服务攻击的最大时间;文献[9]针对随机拒绝服务攻击下

*基金项目:国家自然科学基金资助项目(61603205);中国博士后科学基金资助项目(2017M612205)

收稿日期:2023-10-25

的CPS，将攻击模型建立为满足Bernoulli分布丢包过程，基于事件触发给出了系统保性能控制方法；文献[10]针对CPS中一类随机发生网络丢包的线性离散时间系统，基于Lyapunov稳定性理论并求解一组LMI，给出了控制器设计方法，保证了闭环系统稳定性；文献[11]考虑执行器到传感器(A-C)遭受攻击且存在信号量化的CPS，利用观测器对系统状态和攻击信号估计值给出了控制器设计方法，并基于Lyapunov稳定性理论对系统稳定性进行分析；文献[12]针对CPS同时考虑执行器攻击和量化误差，所设计控制器包括量化补偿器和攻击补偿器两部分，分别针对量化误差的影响和假数据攻击上界的影响进行补偿；文献[13]针对控制器至执行器(C-A)存在信号量化的线性不确定系统，并基于一种扇形有界方法，以LMI的形式给出了系统的稳定性分析和控制策略。

基于上述分析，本文同时考虑量化与拒绝服务攻击，研究了拒绝服务攻击下存在量化和系统不确定性的CPS的鲁棒预测控制问题。针对控制器至执行器(C-A)信道存在随机拒绝服务攻击的CPS，构建一个同时存在随机拒绝服务攻击和信号量化的不确定系统模型，并采用对数量化器和一种扇形有界方法，将量化控制问题转换为基于LMI方法的Min-Max优化问题，最终设计出能保证系统稳定的鲁棒预测控制器。

1 问题描述

本文考虑的CPS结构框图如图1所示，控制器与执行器(C-A)间的网络层存在拒绝服务攻击，并且为了降低通信压力，控制器输出在量化后再进行传输。零阶保持器存储最新的控制输入，用于补偿系统遭受拒绝服务攻击时丢失的数据包。

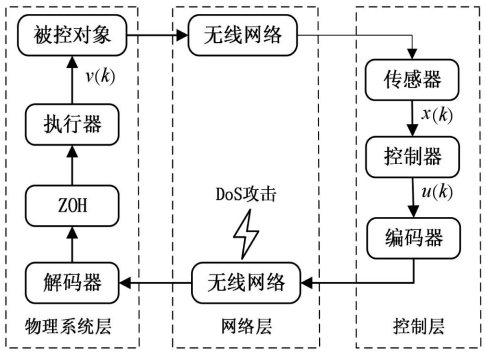


图1 信息物理系统结构

根据以上描述，考虑下列具有控制输入量化和不确定性的离散化信息物理系统模型：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(k)+(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{v}(k) \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{x}(k)\in\boldsymbol{R}^n$为系统状态，$\boldsymbol{v}(k)\in\boldsymbol{R}^m$为控制输入。$\boldsymbol{A}$和$\boldsymbol{B}$是具有适当维数的常数矩阵；$\Delta\boldsymbol{A}$和$\Delta\boldsymbol{B}$是具有适当维数的描述不确定性的矩阵。且式(1)满足下列等式约束条件：

$$\boldsymbol{v}(k)=\boldsymbol{g}(\boldsymbol{u}(k))=(\boldsymbol{I}+\Delta(k))\boldsymbol{u}(k) \tag{2}$$

$$[\Delta\boldsymbol{A}\quad\Delta\boldsymbol{B}]=\boldsymbol{MF}[\boldsymbol{N}_1\quad\boldsymbol{N}_2] \tag{3}$$

文章采用对数量化器，式(2)是利用扇区有界方法得出控制输入和控制器输出之间的关系，$\boldsymbol{u}(k)$是控制器输出，$\boldsymbol{M}$和$\boldsymbol{N}$是适当维数的常数矩阵，不确定矩阵$\boldsymbol{F}$满足：$\boldsymbol{FF}^{\mathrm{T}}\leqslant\boldsymbol{I}$。

另外考虑C-A通信信道中可能发生的随机DoS攻击，其中攻击模型为

$$\alpha_k=\begin{cases}\boldsymbol{0},\text{有DOS攻击}\\ \boldsymbol{1},\text{无DOS攻击}\end{cases} \tag{4}$$

式中，α_k是独立同分布的伯努利随机过程，$\Pr\{\alpha_k=1\}=\boldsymbol{p}$是数据成功传输的概率，$\Pr\{\alpha_k=0\}=1-\boldsymbol{p}$是数据传输失败的概率。

若C-A通信信道遭受DoS攻击，则执行器输入由零阶保持器ZOH保存的上一时刻的执行器输入给出。这样DoS攻击下具有输入量化和不确定性的离散化信息物理系统模型为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}(k+1)&=(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(k)+(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})(\boldsymbol{I}+\Delta(k))\boldsymbol{u}_t(k)\\ \boldsymbol{u}_t(k)&=\alpha_k\boldsymbol{u}(k)+(\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{u}(k-\boldsymbol{1})\end{aligned} \tag{5}$$

基于上面给出的系统模型(5)，可以得出系统的预测模型：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}(k+l+\boldsymbol{1}|k)=&(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(k+l|k)+\\ &\alpha_k(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})(\boldsymbol{I}+\Delta(\boldsymbol{K}))\boldsymbol{u}(k+l|k)+\\ &(\boldsymbol{1}-\alpha_k)(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})(\boldsymbol{I}+\Delta(\boldsymbol{K}))\boldsymbol{u}(k+l-\boldsymbol{1}|k)\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{x}(k+l|k)$表示k时刻对的$k+l$时刻的状态预测值，则预测输出序列$\boldsymbol{U}_0^{\infty}$表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{U}_0^{\infty}(k)&=\left[\boldsymbol{u}(k|k),\boldsymbol{U}_1^{\infty}(k)\right]\\ \boldsymbol{U}_1^{\infty}(k)&=\left\{\begin{array}{l}\boldsymbol{u}(k+l|k)\in\boldsymbol{R}^m:\\ \boldsymbol{u}(k+l|k)=\boldsymbol{K}(k)\boldsymbol{x}(k+l|k),l\geqslant\boldsymbol{1}\end{array}\right\}\end{aligned} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{u}(k|k)$，预测序列中的其他元素可由辅助反馈增益$\boldsymbol{K}(k)$求出。因此$k$时刻满足性能指标$\boldsymbol{J}(k)$的预测控制问题描述为

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{U}_0^{\infty}}\max_{\Delta(k)}\boldsymbol{J}(k)\\ &\quad=\min_{\boldsymbol{U}_0^{\infty}}\max_{\Delta(k)}\sum_{l=0}^{\infty}\left[\left\|\boldsymbol{x}(k+l|k)\right\|_{\boldsymbol{Q}}^2+\left\|\boldsymbol{v}(k+l|k)\right\|_{\boldsymbol{R}}^2\right]\\ &\quad=\min_{\boldsymbol{U}_0^{\infty}}\max_{\Delta(k)}\left[\boldsymbol{J}_0(k)+\boldsymbol{J}_1(k)\right]\end{aligned} \tag{8}$$

其中：

$$\boldsymbol{v}(k+l|k)=(\boldsymbol{I}+\Delta(k))\boldsymbol{u}(k+l|k)$$

$$\boldsymbol{J}_0(k)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k|k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(k|k)+\boldsymbol{v}(k|k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{v}(k|k)$$

$$\boldsymbol{J}_1(k)=\sum_{l=1}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+l|k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(k+l|k)\\ +\boldsymbol{v}(k+l|k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{v}(k+l|k)\end{array}\right\}$$

式中，对称正定矩阵$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}>\boldsymbol{0}$是状态和输入加权矩阵。

在鲁棒预测控制器设计之前，引用以下几个引理：

引理1.1（Schur补引理）：考虑对称矩阵$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{11} & \boldsymbol{S}_{12}\\ \boldsymbol{S}_{22} & \boldsymbol{S}_{21}\end{bmatrix}$，其中$\boldsymbol{S}_{12}=\boldsymbol{S}_{21}^{\mathrm{T}}$且$\boldsymbol{S}_{11}$，$\boldsymbol{S}_{22}$可逆，则$\boldsymbol{S}>\boldsymbol{0}$等价于：

（1）$\boldsymbol{S}_{11}>\boldsymbol{0},\boldsymbol{S}_{22}-\boldsymbol{S}_{21}\boldsymbol{S}_{11}^{-1}\boldsymbol{S}_{12}>\boldsymbol{0}$

（2）$\boldsymbol{S}_{22}>\boldsymbol{0},\boldsymbol{S}_{11}-\boldsymbol{S}_{12}\boldsymbol{S}_{22}^{-1}\boldsymbol{S}_{21}>\boldsymbol{0}$

引理1.2：假设存在具有适当维数的实矩阵$\boldsymbol{D}$，$\boldsymbol{F}$和$\boldsymbol{E}$，并且矩阵满足不等式条件$\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}\leqslant\boldsymbol{I}$，那么存在一个标量$\varepsilon>0$，不等式$\boldsymbol{DFE}+\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\leqslant\varepsilon\boldsymbol{DHD}^{\mathrm{T}}+\varepsilon^{-1}\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}$成立。

2 主要结果

定理2.1 假设量化密度已知的情况下。如果存在矩阵$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{G}_1(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{W}(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k})$，以及对称正定矩阵$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{k})>\boldsymbol{0}$，标量$\varepsilon>0$，$\gamma(\boldsymbol{k})>0$使得无穷时域性能指标$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{k})$具有最小上界，即：

$$\min_{\boldsymbol{G}(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{G}_1(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{W}(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k}),\varepsilon}\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{k})$$

并满足如下两个不等式条件：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_1 & *\\ \boldsymbol{\theta}_2 & \boldsymbol{\theta}_3\end{bmatrix}<\boldsymbol{0} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_4 & *\\ \boldsymbol{\theta}_5 & \boldsymbol{\theta}_6\end{bmatrix}<\boldsymbol{0} \tag{10}$$

其中：

$$\boldsymbol{o}_1=-\boldsymbol{\delta}^{-1}\boldsymbol{G}^{-1}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\delta}^{-1},\ \boldsymbol{o}_2=-\boldsymbol{\delta}^{-1}\boldsymbol{G}_1^{-1}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\delta}^{-1}$$

$$\boldsymbol{o}_3=\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k})+\alpha_k\boldsymbol{N}_2\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}),\ \boldsymbol{o}_4=(\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{N}_2\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k})$$

$$\boldsymbol{o}_5=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})+\alpha_k\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})+(\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k})$$

$$\boldsymbol{o}_6=-\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k})+\varepsilon\boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{o}_7=\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})+\alpha_k\boldsymbol{N}_2\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})+(\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{N}_2\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k}),$$

$$\boldsymbol{o}_8=\alpha_k\boldsymbol{W}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{o}_9=(\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{o}_{10}=\alpha_k\boldsymbol{N}_2\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{k}),\ \boldsymbol{o}_{11}=(\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{N}_2\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{k})$$

$$\boldsymbol{\theta}_1=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}) & * & * & * & * & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & * & * & * & *\\ \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}) & (\boldsymbol{1}-\alpha_k) & -\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}) & * & * & *\\ +\alpha_k\boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}) & +\varepsilon\boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} & & & \\ \boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{R}^{-1} & * & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \alpha_k\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{I} & \boldsymbol{o}_1 & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{o}_2\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}_2=\begin{bmatrix}\boldsymbol{o}_3 & \boldsymbol{o}_4 & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \alpha_k\boldsymbol{N}_2 & (\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{N}_2\\ \boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{Q}^{1/2}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}_3=\begin{bmatrix}-\varepsilon\boldsymbol{I} & * & * & * & * & *\\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}^{-1}(\boldsymbol{k}) & * & * & * & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{S}^{-1}(\boldsymbol{k}) & * & * & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} & * & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{G}(\boldsymbol{k}) & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{G}_1(\boldsymbol{k})\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}_4=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{k}) & * & * & * & *\\ \boldsymbol{o}_5 & \boldsymbol{o}_6 & * & * & *\\ \boldsymbol{S}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}(\boldsymbol{k}) & * & *\\ \boldsymbol{Q}^{1/2}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} & *\\ \boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}_5=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{o}_8 & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{W}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{R}^{1/2}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{o}_9 & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{o}_7 & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k}) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}_6=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{W}(\boldsymbol{k}) & * & * & * & *\\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{k}) & * & * & *\\ \boldsymbol{o}_{10} & \boldsymbol{o}_{11} & -\varepsilon\boldsymbol{I} & * & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{W}(\boldsymbol{k}) & *\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{k})\end{bmatrix}$$

那么系统渐近稳定，且获得良好的控制性能，其中反馈控制增益为：

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{k})=\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{X}^{-1}(\boldsymbol{k}),\boldsymbol{X}^{-1}(\boldsymbol{k})=\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k}) \tag{11}$$

证明：首先证明式(9)。针对系统(5)选取如下形式的李雅普诺夫函数：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{V}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})=&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})\\&+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k})\boldsymbol{S}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k})\end{aligned} \tag{12}$$

对$\boldsymbol{V}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})$做前向差分结合式(6)可得：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{V}(\boldsymbol{k}+\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k})-\boldsymbol{V}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})\\&=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})\\ \boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k})\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Psi}_2 & *\\ \boldsymbol{\Psi}_3 & \boldsymbol{\Psi}_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})\\ \boldsymbol{x}(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{1}|\boldsymbol{k})\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{13}$$

其中：

$$\boldsymbol{\Psi}=(\boldsymbol{1}-\alpha_k)(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{\Delta B})(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{K}))\boldsymbol{K}(\boldsymbol{k})$$

$$\boldsymbol{\Psi}_1=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{\Delta A})+\alpha_k(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{\Delta B})(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{K}))\boldsymbol{K}(\boldsymbol{k})$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Psi}_2=&\boldsymbol{\Psi}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\Psi}_1+\boldsymbol{S}(\boldsymbol{k})-\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})+\boldsymbol{Q}\\&+\left[(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{K}))\boldsymbol{K}(\boldsymbol{k})\right]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\left[(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Delta}(\boldsymbol{K}))\boldsymbol{K}(\boldsymbol{k})\right]\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_3=\boldsymbol{\Psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\Psi}_1,\ \ \boldsymbol{\Psi}_4=\boldsymbol{\Psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k})\boldsymbol{\Psi}-\boldsymbol{S}(\boldsymbol{k})$$

显然，如果系统渐近稳定，那么$\boldsymbol{V}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})$的向前差分必定为负，再将式(13)展开，可转换为下式：

$$[\boldsymbol{\Psi}_1 \quad \boldsymbol{\Psi}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(k)[\boldsymbol{\Psi}_1 \quad \boldsymbol{\Psi}]+$$
$$\left[\left(\boldsymbol{I}+\Delta(\boldsymbol{K})\right)\boldsymbol{K}(k) \quad \boldsymbol{0}\right]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\left[\left(\boldsymbol{I}+\Delta(\boldsymbol{K})\right)\boldsymbol{K}(k) \quad \boldsymbol{0}\right] \tag{14}$$
$$+\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}(k)-\boldsymbol{P}(k)+\boldsymbol{Q} & * \\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}(k)\end{bmatrix}<\boldsymbol{0}$$

令$\boldsymbol{P}(k)=\boldsymbol{X}^{-1}(k)$，对式(14)应用引理1.1，并在两侧同乘diag$\{\boldsymbol{P}^{-1}(k),\boldsymbol{P}^{-1}(k),\boldsymbol{I},\boldsymbol{I}\}$，整理可得：

$$\boldsymbol{\omega}_3+\boldsymbol{D}_3\Delta(k)\boldsymbol{E}_3+\boldsymbol{E}_3^{\mathrm{T}}\Delta(k)\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}<\boldsymbol{0} \tag{15}$$

根据引理1.2，如果存在对称正定矩阵$\boldsymbol{G}(k)$，使得：

$$\boldsymbol{\omega}_3+\boldsymbol{D}_3\delta\boldsymbol{G}(k)\delta\boldsymbol{D}_3^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{E}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}^{-1}(k)\boldsymbol{E}_3<\boldsymbol{0} \tag{16}$$

那么式(15)成立。对式(16)应用引理1.1并重复上述方法，最终可得：如果存在对称正定矩阵$\boldsymbol{G}_1(k)$，使得：

$$\boldsymbol{\omega}_3^{'}+\boldsymbol{D}_3^{'}\delta\boldsymbol{G}_1(k)\delta\boldsymbol{D}_3^{'\mathrm{T}}+\boldsymbol{E}_3^{'\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_1^{-1}(k)\boldsymbol{E}_3^{'}<\boldsymbol{0} \tag{17}$$

则式(15)成立。其中：

$$\boldsymbol{D}_3^{'\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{1}-\alpha_k)(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{E}_3^{'}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{Y}(k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\omega}_3^{'}=\begin{bmatrix}o_{12} & * & * & * & * \\ \boldsymbol{0} & o_{14} & * & * & * \\ o_{13} & o_{15} & -\boldsymbol{X}(k) & * & * \\ \boldsymbol{Y}(k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{R}^{-1} & * \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \alpha_k(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{I} & o_1\end{bmatrix}$$
$$o_{12}=\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{X}(k)-\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{X}(k)$$
$$+\boldsymbol{Y}^{T}(k)\boldsymbol{G}^{-1}(k)\boldsymbol{Y}(k)$$
$$o_{13}=(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{X}(k)+\alpha_k(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{Y}(k)$$
$$o_{14}=-\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{X}(k),o_{15}=(\boldsymbol{1}-\alpha_k)(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{Y}(k)$$

对式(17)应用引理1.1并代入式(2)，分解可得：

$$\boldsymbol{\Omega}_3+\boldsymbol{\Gamma}_3\boldsymbol{F}\boldsymbol{\Xi}_3+\boldsymbol{\Xi}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_3^{\mathrm{T}}<\boldsymbol{0} \tag{18}$$

根据引理1.2可知，如果存在一个标量$\boldsymbol{\varepsilon}>\boldsymbol{0}$使得：

$$\boldsymbol{\Omega}_3+\varepsilon\boldsymbol{\Gamma}_3\boldsymbol{\Gamma}_3^{\mathrm{T}}+\varepsilon^{-1}\boldsymbol{\Xi}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}_3<\boldsymbol{0} \tag{19}$$

那么式(18)成立。

其中，

$$\boldsymbol{\Omega}_3=\begin{bmatrix}\rho_{11} & * & * & * & * & * \\ \boldsymbol{0} & \rho_{12} & * & * & * & * \\ \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(k)+\alpha_k & (\boldsymbol{1}-\alpha_k) & -\boldsymbol{X}(k) & * & * & * \\ \boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}(k) & \boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}(k) & & & & \\ \boldsymbol{Y}(k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{R}^{-1} & * & * \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \alpha_k\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{I} & -\boldsymbol{G}(k) & * \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{G}_1(k)\end{bmatrix}$$
$$\rho_{11}=\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{X}(k)-\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{X}(k)$$
$$+\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{G}^{-1}(k)\boldsymbol{Y}(k)$$
$$\rho_{12}=-\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{G}_1^{-1}(k)\boldsymbol{Y}(k)$$
$$\boldsymbol{\Gamma}_3^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\Xi}_3^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{X}(k)+\alpha_k & (\boldsymbol{1}-\alpha_k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \alpha_k\boldsymbol{N}_2 & (\boldsymbol{1}-\alpha_k)\boldsymbol{N}_2 \\ \boldsymbol{N}_2\boldsymbol{Y}(k) & \boldsymbol{N}_2\boldsymbol{Y}(k) & & & & \end{bmatrix}$$

应用引理1.1，式(19)等价于式(9)。下面证明式(10)，首先定义：$\boldsymbol{\Delta}^{*}(k)=\arg\max\limits_{\Delta(k)\in[-\delta,\delta]}[\boldsymbol{J}_0(k)+\boldsymbol{J}_1(k)]$，不确定系统(5)的标称系统的稳定性条件：

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k|k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(k|k)+\left[\left(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Delta}^{*}(k)\right)\boldsymbol{u}(k|k)\right]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{R}\left[\left(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Delta}^{*}(k)\right)\boldsymbol{u}(k|k)\right]+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1|k)\boldsymbol{P}(k) \tag{20}$$
$$\boldsymbol{x}(k+1|k)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k|k)\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{x}(k|k)<\gamma(k)$$

应用引理1.1，式(20)等价于：

$$\boldsymbol{\omega}_4+\boldsymbol{D}_4\boldsymbol{\Delta}^{*}(k)\boldsymbol{E}_4+\boldsymbol{E}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta}^{*}(k)\boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}<\boldsymbol{0} \tag{21}$$

根据引理1.2，如果存在正定矩阵$\boldsymbol{W}_1(k)$，使得：

$$\boldsymbol{\omega}_4+\boldsymbol{D}_4\delta\boldsymbol{W}(k)\delta\boldsymbol{D}_4^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{E}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{-1}(k)\boldsymbol{E}_4<\boldsymbol{0} \tag{22}$$

那么式(21)成立。对式(22)应用引理1.1并重复上述方法，最终可得：如果存在对称正定矩阵，使得：

$$\boldsymbol{\omega}_4^{'}+\boldsymbol{D}_4^{'}\delta\boldsymbol{W}_1(k)\delta\boldsymbol{D}_4^{'\mathrm{T}}+\boldsymbol{E}_4^{'\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_1^{-1}(k)\boldsymbol{E}_4^{'}<\boldsymbol{0} \tag{23}$$

则式(21)成立。其中：

$$\boldsymbol{\omega}_4^{'}=\begin{bmatrix}o_{15} & * & * & * & * & * \\ o_{16} & -\boldsymbol{X}(k) & * & * & * & * \\ o_{17} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}(k) & * & * & * \\ \boldsymbol{Q}^{1/2}\boldsymbol{x}(k|k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} & * & * \\ \boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{u}(k|k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} & * \\ \boldsymbol{0} & o_{18} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & o_{19} & -\boldsymbol{W}(k)\end{bmatrix}$$
$$o_{15}=-\gamma(k)+\boldsymbol{u}^{T}(k|k)\boldsymbol{W}^{-1}(k)\boldsymbol{u}(k|k)$$
$$o_{16}=(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(k|k)+\alpha_k(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{u}(k|k)$$
$$+(\boldsymbol{1}-\alpha_k)(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{u}(k-1|k)$$
$$o_{17}=\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{x}(k|k),o_{18}=\alpha_k\boldsymbol{W}(k)\delta(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})$$
$$o_{19}=\boldsymbol{W}(k)\delta\boldsymbol{R}^{1/2},\boldsymbol{E}_4^{'}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}(k-1|k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{D}_4^{'\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & (\boldsymbol{1}-\alpha_k)(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

对式(23)应用引理1.1，分解可得：

$$\boldsymbol{\Omega}_4+\boldsymbol{\Gamma}_4\boldsymbol{F}\boldsymbol{\Xi}_4+\boldsymbol{\Xi}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_4^{\mathrm{T}}<\boldsymbol{0} \tag{24}$$

由引理1.2可知，如果存在一个标量$\boldsymbol{\varepsilon}>\boldsymbol{0}$，使得：

$$\boldsymbol{\Omega}_4+\varepsilon\boldsymbol{\Gamma}_4\boldsymbol{\Gamma}_4^{\mathrm{T}}+\varepsilon^{-1}\boldsymbol{\Xi}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Xi}_4<\boldsymbol{0} \tag{25}$$

那么式(24)成立。其中：

$$\boldsymbol{\Omega}_4=\begin{bmatrix}o_{20} & * & * & * & * & * & * \\ o_{21} & -\boldsymbol{X}(k) & * & * & * & * & * \\ \boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{x}(k|k) & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S}(k) & * & * & * & * \\ \boldsymbol{Q}^{1/2}\boldsymbol{x}(k|k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} & * & * & * \\ \boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{u}(k|k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} & * & * \\ \boldsymbol{0} & o_{23} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{W}(k)\delta\boldsymbol{R}^{1/2} & -\boldsymbol{W}(k) & * \\ \boldsymbol{0} & o_{24} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{W}_1(k)\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\Gamma}_4^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\Xi}_4=\begin{bmatrix}o_{25} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \alpha_k\boldsymbol{N}_2 & (\boldsymbol{1}-\alpha_k) \\ & & & & & \delta\boldsymbol{W}(k) & \boldsymbol{N}_2\delta\boldsymbol{W}_1(k)\end{bmatrix}$$
$$o_{20}=-\gamma(k)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k|k)\boldsymbol{W}^{-1}(k)\boldsymbol{u}(k|k)$$
$$+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k-1|k)\boldsymbol{W}_1^{-1}(k)\boldsymbol{u}(k-1|k)$$

$$o_{21}=\boldsymbol{A}x(k|k)+\alpha_k\boldsymbol{B}u(k|k)+(1-\alpha_k)\boldsymbol{B}u(k-1|k)$$

$$o_{22}=\boldsymbol{S}(k)x(k|k),\ o_{23}=\alpha_k\boldsymbol{W}(k)\delta\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$$

$$o_{24}=(1-\alpha_k)\boldsymbol{W}_1(k)\delta\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$$

$$o_{25}=\boldsymbol{N}_1x(k|k)+\alpha_k\boldsymbol{N}_2u(k|k)+(1-\alpha_k)\boldsymbol{N}_2u(k-1|k)$$

根据引理1.1,式(25)等价于式(10)。证毕。

3 仿真实例

文献[14-17]通过预测模型的方法解决了一系列能源行业领域和制造业领域的实际问题。为验证本文算法的实际应用价值,通过文献[18]中的电阻-电容-电感电路(resistor-inductor-capacitor circuit),同时考虑C-A通道存在的输入量化和系统的不确定性,则给出离散化后的系统模型为式(5)所示。其中:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0.8 & -0.25 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0.2\\ -0.8 & 0.5 & 0.2 & -1.03\\ 0 & 0 & 1.01 & 0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0\\0\\1.1\\0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}1.2 & -4.34 & -1 & -0.56\end{bmatrix},\ \boldsymbol{F}=\sin t$$

$$\boldsymbol{N}_2=1.1,\ \boldsymbol{N}_1=\begin{bmatrix}-1.23 & -0.19 & 1.2764 & -0.65\end{bmatrix}$$

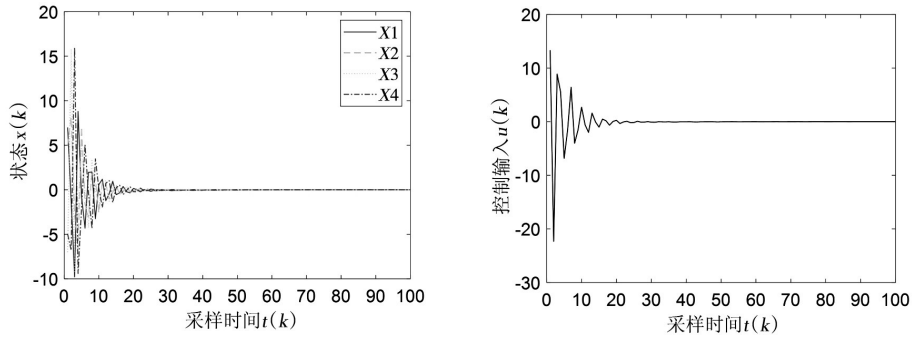
假定系统的初始参数为$\boldsymbol{x}(0)=[7\ 5\ -7\ -5]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{u}(-1)=3$,$\boldsymbol{R}=0.01$,$\boldsymbol{Q}=0.000\ 1\boldsymbol{I}_4$,$\delta=0.512$,则根据定理2.1可求出无DoS攻击时控制器增益:$\boldsymbol{K}=[1.052\ 9\ 0.095\ 0\ -1.133\ 1\ 0.536\ 6]$。

系统状态$\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k})$和系统控制输入$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k}|\boldsymbol{k})$的变化轨迹如图2(a)和图2(b)所示。可以看出,系统的状态与控制输入都可以较快收敛至零,因此本文所设计的控制器在没有DoS攻击的情况下能够使系统较快稳定。

假设系统遭受到随机DoS攻击,根据定理2.1可得系统此时的控制器增益$\boldsymbol{K}=[0.978\ 5\ 0.088\ 8\ -1.070\ 0\ 0.462\ 7]$。图3(a)和图3(b)给出了DoS攻击概率为0.20时系统状态和控制输入的变化轨迹,可以看出,在系统遭受到随机DoS攻击后,系统状态和控制输入都收敛至零,系统仍具有良好的控制性能。

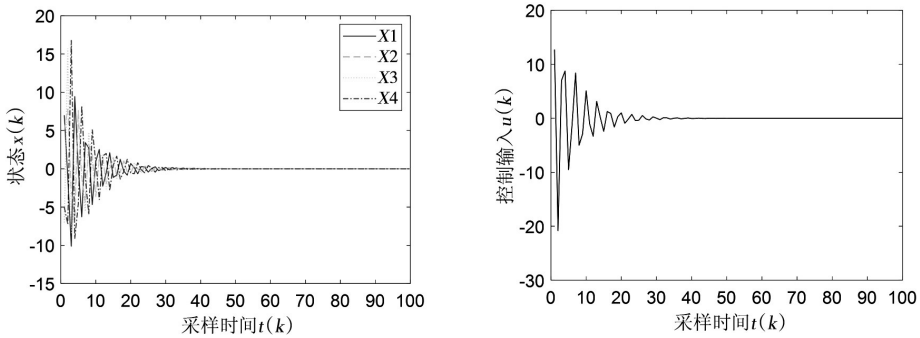
图4(a)和图4(b)给出了攻击概率为0.40时的系统状态和控制输入轨迹。图4表明,当系统遭受的攻击概率为0.40时,本文所设计的控制器仍能够保持系统的稳定。

基于上述仿真实例可以看出,遭受随机DoS攻击且系统存在量化和不确定性的CPS在本文所设计的控制器的控制下,具有良好的控制性能,可以使系统稳定,但当攻击概率为0.50时,系统不再稳定,这表明本文所设计的控制器在一定的攻击概率范围内,能够保持系统的稳定性。



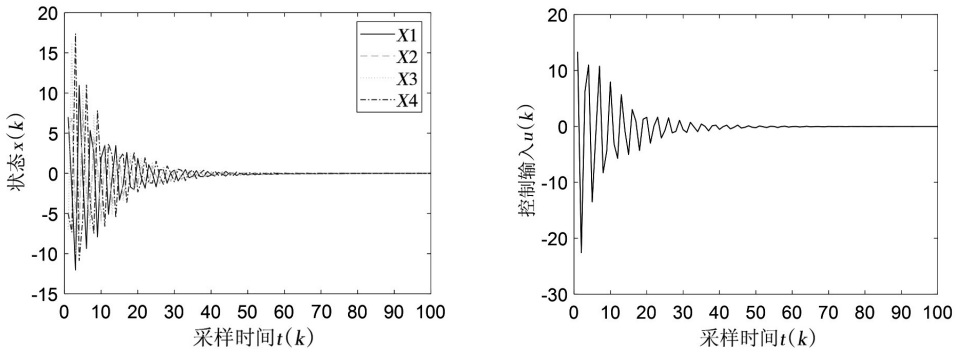
(a) 状态轨迹 (b) 控制输入轨迹

图2 无攻击时系统状态和控制输入轨迹



(a) 攻击概率为0.2的状态轨迹 (b) 攻击概率0.2时控制输入轨迹

图3 攻击概率0.2时系统状态和控制输入轨迹



(a) 攻击概率为0.4的状态轨迹 (b) 攻击概率0.4时控制输入轨迹

图4 攻击概率0.4时系统状态和控制输入轨迹

4 结束语

本文研究了随机拒绝服务攻击下存在输入量化和系统不确定性的CPS鲁棒预测控制问题。考虑拒绝服务攻击的随机特性以及CPS本身局限性使得数据传输时的量化问题,基于Lyapunov稳定性理论和线性矩阵不等式技术得到所设计控制方法。最后,仿真实例表明了本文所提出的控制方法是有效的。由于文中考虑的攻击策略较为简单,未来的研究可以集中在更复杂的攻击策略和系统模型,进行信息物理系统的安全控制问题研究。

参考文献:

[1] 郭戈, 张文安, 周彬. “信息物理系统理论、方法及应用”专栏序言[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2273-2276.

[2] 王寿光, 赵玉美, 尤丹, 等. 离散时间系统框架下信息物理系统攻击问题综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1934-1944.

[3] 薛田良, 刘希懋, 张赟宁, 等. 周期性拒绝服务攻击下的弹性负荷频率控制[J]. 控制工程, 2021, 28(4): 620-627.

[4] 汪慕峰, 胥布工, 陈立定. 周期拒绝服务干扰攻击下信息物理系统的$H\infty$控制[J]. 浙江大学学报, 2019, 53(11): 2146-2153.

[5] 孙洪涛, 彭晨, 王志文. DoS攻击下的信息物理系统事件触发预测控制设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2303-2309.

[6] LIU Y C, LIU B. Robust $H\infty$ output tracking control of uncertain network ed control systems[J]. High Technology Letters, 2019, 25(3): 316-325.

[7] 汪幕峰, 胥布工. DoS干扰攻击下的物理信息系统状态反馈稳定[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1681-1687.

[8] SUN Q, KUN W Z, YANG S. Resilient model predictive control of cyber-physical systems under dos attacks[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2020, 16(7): 4920-4927.

[9] 祝超群, 黄鹏. DoS攻击下物理信息系统事件触发保性能控制[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(6): 74-80.

[10] 蔡宏斌, 李平, 苏成利, 等. 带有随机网络丢包的工业物理信息系统的鲁棒模型预测控制器设计[J]. 中南大学学报(英文版), 2019, 26(7): 1921-1933

[11] 朱俊威, 吴珺, 冯宇. 带有量化的信息物理系统安全控制[J]. 高技术通讯, 2020, 30(11): 1113-1121.

[12] 贾欣婷, 郑柏超, 刘晓光, 等. 具有输入量化的信息物理系统的安全控制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(30): 12897-12903.

[13] OU Y, XUE B Q, GAO Z. Robust predic tive control of networked uncertain systems with control input quantization[J]. Chinese Control and Decision Conference, 2017(27): 621-626.

[14] 刘志勇. 基于改进极限学习机的增量配电网线损率预测模型[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(2): 155-157, 182.

[15] 戴璐平, 沈嘉怡, 张飞飞. 基于时间序列算法的能源电力需求自动预测模型[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 49-51, 65.

[16] 杨明权, 周晓龙, 高宇雷, 等. 基于出口水分预测模型的松散回潮加水量控制算法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7): 17-21, 88.

[17] NIEMOCZYNSKI B, BISWAS S, KAMER J. Stability of discrete time networked control systems under denial of service attacks[J]. Resilience Week, 2016(8): 119-124.

[18] 王建华. 具有伯努利分布丢包网络控制系统的保性能控制器设计[J]. 航天控制, 2015, 33(1): 10-14.

作者简介:孙兴全(1999—),男,硕士,研究方向:不确定系统鲁棒预测控制。