DoS攻击下随机系统的攻击参数依赖型观测器与控制器协同设计

李建瑞[1], 胡松林[2†], 岳 东[2], 陈小莉[3], 马 勇[4]

(1. 南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京邮电大学 碳中和先进技术研究院, 江苏 南京 210023;
3. 南京财经大学 信息工程学院, 江苏 南京 210023; 4. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 本文研究了拒绝服务攻击下网络随机控制系统的攻击参数依赖型观测器与控制器协同设计问题. 首先, 将拒绝服务(DoS)攻击建模为周期脉宽调制干扰信号, 并构造了Luenberger观测器来估计不可测的系统状态. 其次, 设计了基于观测器的控制器, 提出一种新的切换随机系统模型. 然后, 引入DoS攻击参数依赖型随机时变李雅普诺夫函数分析切换随机系统. 给出了切换随机系统均方指数稳定的判据, 并使闭环系统具有L_2增益性能水平. 同时通过应用矩阵不等式技术, 给出了攻击参数依赖型观测器与控制器的协同设计方案. 最后, 以一种飞行器系统为例, 验证了该方案的有效性.

关键词: DoS攻击; 随机系统; 均方指数稳定; 随机时变李雅普诺夫函数; L_2增益

引用格式: 李建瑞, 胡松林, 岳东, 等. DoS攻击下随机系统的攻击参数依赖型观测器与控制器协同设计. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 986 – 994

DOI: 10.7641/CTA.2022.20004

Attack parameter dependent observer and controller co-design for stochastic systems under DoS attacks

LI Jian-rui[1], HU Song-lin[2†], YUE Dong[2], CHEN Xiao-li[3], MA Yong[4]

(1. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210023, China;
2. Institute of Advanced Technology for Carbon Neutrality, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210023, China;
3. College of Information Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing Jiangsu 210023, China;
4. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: The co-design problem of attack parameter-dependent observer and controller is investigated for a class of networked stochastic control systems under periodic denial-of-service (DoS) attacks. First, the DoS attack is modeled as a periodic pulse width modulation (PWM) interference signal, and a Luenberger observer is constructed to estimate the unmeasured system state. Second, an observer-based controller is designed, and a new switched stochastic system model is introduced. Third, the DoS attack parameter-dependent stochastic time-varying Lyapunov function is introduced to analyze the switching stochastic system. The criterion of the mean square exponential stability of the switched stochastic system is given, and the closed-loop system has L_2-gain performance. At the same time, by applying the matrix inequality technology, the co-design scheme of attack parameter-dependent observer and controller is presented. Finally, an air vehicle system is taken as an example to show the effectiveness of the obtained theoretical results.

Key words: denial-of-service attacks; stochastic system; mean square exponential stability; time-varying stochastic lyapunov function; L_2-gain

Citation: LI Jianrui, HU Songlin, YUE Dong, et al. Attack parameter dependent observer and controller co-design for stochastic systems under DoS attacks. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(6): 986 – 994

收稿日期: 2022−01−04; 录用日期: 2022−06−30.

†通信作者. E-mail: songlin621@126.com; Tel.: +86 25-85866931.

本文责任编委: 潘泉.

国家重点研发计划项目(2018YFA0702200), 国家自然科学基金项目(62173187, 52022073), 江苏省自然科学基金项目(BK20201377), 江苏省六大人才高峰项目(RLD201810), 河北省自然科学基金重点项目(E2020203139)资助.

Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFA0702200), the National Natural Science Foundation of China (62173187, 52022073), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20201377), the Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province of China (RLD201810) and the Key Projects of Natural Science Foundation of Hebei Province (E2020203139).

1 引言

近年来, 随着互联网通信技术、控制技术和计算机技术的迅速发展, 网络化控制系统(networked control systems, NCSs)受到了人们越来越多的关注. 到目前为止, NCSs已经广泛应用于智能建筑、工业自动化、交通网络、制造工厂监控、互联网触觉协作和远程操作等多个领域中[1–2]. NCSs有很多优点, 比如它可以利用多用途共享网络来连接空间分布的元素, 可以形成灵活的体系结构, 并且与传统控制系统相比, NCSs的安装和维护成本更低. 但NCSs在网络上的开放性使得自身存在很多安全漏洞. 因此, NCSs的安全控制问题一直是人们关注的重点. 在解决这个问题之前, 需要了解网络攻击通常可以分为拒绝服务(denial-of-service, DoS)攻击[3]、欺骗攻击[4] 、延迟攻击[5]和重放攻击[6]. 在文献[7]中, 可以获得关于这些攻击更多的信息.

在NCSs中, 更容易发生的网络攻击应该是DoS攻击[8]. 而DoS攻击的目的是中断数据的传输. 因此现在研究人员致力于解决NCSs遭受DoS攻击时的安全控制问题. 在文献[9]中, 作者研究了 DoS 攻击下 NCSs 的弹性控制, 其中 DoS 攻击服从伯努利分布. 在文献[10–12]中, DoS攻击被建模为功率受限的脉宽调制(pulse-width modulated, PWM)信号, 它被认为是一种周期性DoS干扰攻击. 在这种类型的模型中, 攻击以周期性的方式在休眠与活动之间交替. 在文献[13–16]中, 研究了攻击频率和攻击持续时间都有限的非周期性 DoS 攻击. 另外, 根据 DoS 攻击的特点, 可以将网络控制系统建模为马尔可夫跳跃系统. 文献[16–18]研究了马尔可夫跳跃系统. 受以上发现的启发, 本文将对周期性DoS攻击进行研究.

在实际的网络系统中, 一般都需要输出反馈控制器或状态反馈控制器来对系统进行控制[19–21]. 然而, 系统的状态通常不能被完全测量. 因此, 基于观测器设计出的控制器经常被应用于 NCSs 的控制方案中[22–25]. 为了解决系统状态不完全可测的问题, 有必要构造一个观测器对其进行观测估计. 这是当前研究的主要动机之一. 另一方面, 由于实际系统内部和外部环境的复杂性以及参数的不确定性, 系统内部会出现随机乘性噪声[26]. 并且具有随机乘性噪声的系统在许多应用领域都遇到过, 例如群体动力学、过程控制和飞机工程[27]. 因此将NCSs视为随机系统或具有随机不确定性的系统更为合理. 在文献[28–31]中已经得到了许多关于随机系统控制的重要结果. 文献[30]中, 作者对离散线性随机系统进行了事件触发控制研究, 文中考虑并分析了服从伯努利分布的DoS攻击的影响. 文献[31]中, 作者研究了一类攻击频率和攻击持续时间都受到限制的非周期性DoS攻击, 建立了随机切换系统模型, 并通过引入时不变随机李雅普诺夫函数, 提出了使随机切换系统均方指数稳定的判据. 事实上, 现有的DoS攻击模型和系统稳定性分析都有很大的改进空间. 比如, 可以对DoS攻击的攻击参数加以利用, 把它引入到系统稳定性分析中. 此外, 人们总是使用时不变李雅普诺夫函数进行稳定性分析, 而对时变李雅普诺夫函数应用的较少. 因此, 将攻击持续时间引入到随机系统的李雅普诺夫分析中可能会得到保守性更小的结果. 这是当前研究的另一个主要动机.

本文设计了一种状态观测器来估计随机控制系统中不完全可测的系统状态, 并提出了一种新的控制策略来消除DoS攻击对系统的影响. 本文的主要贡献总结如下:

1) 在考虑系统遭受DoS攻击的情况下, 建立了一种新的基于观测器的切换随机系统模型.

2) 引入了一种DoS攻击参数依赖型随机时变李雅普诺夫函数, 提供了使切换随机系统均方指数稳定的判据, 且该判据使系统同时具有L_2增益性能.

3) 利用线性矩阵不等式的技术, 给出了DoS攻击参数依赖型观测器和控制器的协同设计准则.

本文的其余部分如下: 第2节为DoS攻击下的网络化随机系统的问题描述和系统建模; 第3节分析了系统的H_∞性能, 并设计了观测器和控制器; 在第4节中, 通过仿真实例说明了该方案的有效性; 在第5节中, 得出最终的结论.

说明: $\mathbb{R}^n$和$\mathbb{R}^{n\times N}$分别表示n维和$n\times N$维实欧几里得空间. 对于矩阵$R\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $R>0(R\geqslant 0)$表示R是正定的(或半正定的). 符号A^{T}和A^{-1}分别表示矩阵A的转置和逆. 符号$*$表示对称矩阵中的对称项. diag$\{\cdots\}$表示分块对角矩阵. E$\{\cdot\}$表示期望运算符. He(X)表示$X+X^{\mathrm{T}}$. 对于向量$x\in\mathbb{R}^n$, 表示它的2范数为$\|x\|=\sqrt{x^{\mathrm{T}}x}$.

2 问题描述与系统建模

随机网络控制系统在DoS攻击下的框架结构如图1所示, 在这里假设通信网络受到周期性DoS攻击. 接下来, 将分别介绍随机系统、周期性DoS攻击、观测器和控制器的数学模型.

2.1 系统描述

考虑物理系统用以下连续随机系统描述:

$$\begin{cases}\mathrm{d}x(t)=[Ax(t)+B_u u(t)+B_1 v(t)]\mathrm{d}t+\\ \qquad\quad [Dx(t)+B_2 v(t)]\mathrm{d}\omega(t),\\ y(t)=Cx(t),\\ x(0)=x_0,\end{cases}\tag{1}$$

其中: $x(t)\in\mathbb{R}^{n_x}$为系统状态; $u(t)\in\mathbb{R}^{n_u}$为控制输入; $y(t)\in\mathbb{R}^{n_y}$为测量输出; $v(t)\in\mathbb{R}^{n_v}$为有界的外部

扰动输入; $\omega(t)\in\mathbb{R}$是满足$\mathrm{E}\{\mathrm{d}\omega(t)\}=0$和$\mathrm{E}\{\mathrm{d}\omega(t)^2\}=\mathrm{d}t$的一维布朗运动; A, B_u, B_1, B_2, C和D是已知的且具有适当维数的常数矩阵.

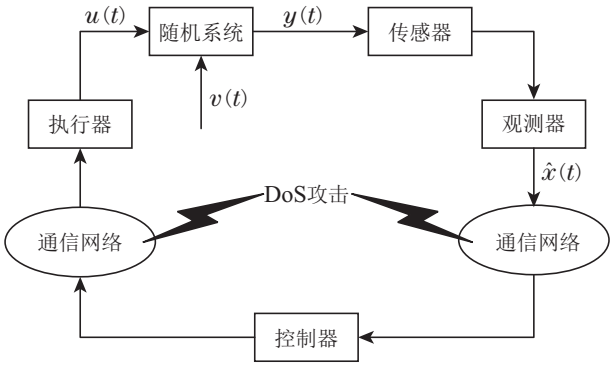

图 1 DoS攻击下网络化随机控制系统框架图

Fig. 1 The framework of a stochastic NCS under DoS attacks

为了达到预期的控制效果, 需要对系统(1)设一些常见的假设.

假设 1 系统状态$x(t)$不可测.

假设 2 矩阵C为行满秩矩阵.

假设 3 矩阵(A, B_u)和矩阵(C, A)分别是可控的和可观测的.

2.2 周期性DoS攻击模型

在实际应用中, 攻击者会试图对无线通信通道进行干扰, 其目的是间歇性地阻塞通信通道, 破坏系统的稳定性. 受文献[11]的启发, 本文考虑双通道周期性DoS攻击(见图2), 其数学模型如下:

$$\mathcal{Z}_{\mathrm{DoS}}(t)=\begin{cases}0,\ t\in[nT,nT+\delta),\\ 1,\ t\in[nT+\delta,nT+T),\end{cases}\tag{2}$$

其中: $n\in\mathbb{N}$为周期数; δ和$\varrho\triangleq T-\delta$分别表示为DoS攻击的休眠时长和活跃时长, 在长度为δ的时间段里通信信道是可以正常通信的. $\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}[nT,nT+\delta)$和$\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}[nT+\delta,nT+T)$分别表示DoS攻击的休眠区间和活跃区间的集合. 为使下文表述方便, 令$\mathcal{Z}_{1,n}\triangleq[nT,nT+\delta)$, $\mathcal{Z}_{2,n}\triangleq[nT+\delta,nT+T)$.

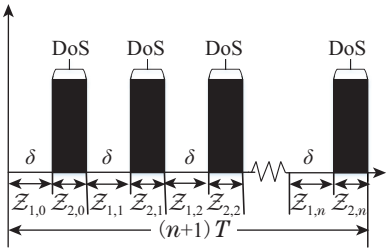

图 2 周期性DoS攻击示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the periodic DoS attack

注 1 不同于文献[31]研究的攻击持续时间和攻击频率都受到限制的非周期性DoS攻击. 本文考虑了周期性DoS攻击并只限制了DoS攻击的持续时间, 而没有引入DoS攻击频率的限制.

2.3 基于观测器的切换控制系统模型

在本节中, 由于随机系统(1)的状态是不完全可测量的. 为保证系统的一般性, 将设计一个Luenberger观测器来估计系统的状态. 对于$t\in[nT,nT+\delta)$, 观测器构造为

$$\begin{cases}\dot{\hat{x}}(t)=A\hat{x}(t)+B_u u(t)+L(y(t)-\hat{y}(t)),\\ \hat{y}(t)=C\hat{x}(t),\end{cases}\tag{3}$$

其中: $\hat{x}(t)\in\mathbb{R}^{n_x}$为观测器状态, $\hat{y}(t)\in\mathbb{R}^{n_y}$为观测器输出, L为需要被设计的观测器增益.

本文考虑了文献[11]中DoS攻击同时影响正向和反馈信道的情况. 也就是说, 在DoS攻击下, 观测器释放的系统状态估计信号不能成功到达控制器; 控制器产生的控制信号被拦截, 无法成功到达执行器. 因此, 受文献[24]的启发, 在DoS攻击(2)下, 图1中执行器的输出即控制输入$u(t)$可以表示为

$$u(t)=\begin{cases}K\hat{x}(t),\ t\in\mathcal{Z}_{1,n},\\ 0,\qquad t\in\mathcal{Z}_{2,n},\end{cases}\tag{4}$$

其中K为需要被设计的控制增益.

设$e(t)=x(t)-\hat{x}(t)$为状态估计误差. 结合随机系统(1)和观测器(3), 可以得到以下误差系统:

$$\begin{cases}\mathrm{d}e(t)=[(A-LC)e(t)+B_1v(t)]\mathrm{d}t+\\ \qquad\quad[Dx(t)+B_2v(t)]\mathrm{d}\omega(t),\\ e(0)=e_0\triangleq x(0)-\hat{x}(0).\end{cases}\tag{5}$$

接下来, 构造一个切换信号

$$\varphi(t)=\begin{cases}1,t\in\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}\mathcal{Z}_{1,n},\\ 2,t\in\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}\mathcal{Z}_{2,n}.\end{cases}\tag{6}$$

令$\varphi(t)=i\in\{1,2\}$. 定义$t_{i,n}=\begin{cases}nT, & i=1\\ nT+\delta, & i=2\end{cases}$, 可以得到$\mathcal{Z}_{i,n}=[t_{i,n},t_{3-i,n+i-1})$.

结合式(1)(4)–(6), 建立一个增广后的切换系统

$$\begin{cases}\mathrm{d}z(t)=[\mathcal{A}_iz(t)+\mathcal{B}_1v(t)]\mathrm{d}t+\\ \qquad\quad[\mathcal{D}z(t)+\mathcal{B}_2v(t)]\mathrm{d}\omega(t),\\ y(t)=\mathcal{C}z(t),\\ t\in\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}[t_{i,n},t_{3-i,n+i-1}),i=1,2,\\ z(0)=z_0,\end{cases}\tag{7}$$

其中:

$$z(t)=\begin{bmatrix}x(t)\\ e(t)\end{bmatrix},\ \mathcal{A}_1=\begin{bmatrix}A+B_uK & -B_uK\\ 0 & A-LC\end{bmatrix},$$

$$\mathcal{A}_2=\begin{bmatrix}A & 0\\ 0 & A-LC\end{bmatrix},\ \mathcal{B}_1=\begin{bmatrix}B_1\\ B_1\end{bmatrix},\ \mathcal{D}=\begin{bmatrix}D_1 & 0\\ D_1 & 0\end{bmatrix},$$

$\mathcal{B}_2=\begin{bmatrix}B_2\\B_2\end{bmatrix}$, $\mathcal{C}=[C\ \ 0]$, $z_0=\begin{bmatrix}x_0\\e_0\end{bmatrix}$.

那么, 本文要解决的问题可以表述为: 设计观测器(3)和控制器(4), 使系统(7)满足以下要求:

1) 使$v(t)=0$的系统(7)均方指数稳定, 即存在两个正标量S和ϵ, 有

$$\mathrm{E}\{\|z(t,0,z_0)\|^2\}\leqslant\|z_0\|^2\times S\mathrm{e}^{-\epsilon t},$$

上述不等式中, $t\geqslant 0$并且$z_0\in\mathbb{R}^{2n}$.

2) 使系统(7)的L_2增益小于γ, 即令测量输出$y(t)$满足

$$\int_0^t\mathrm{E}\{\|y(s)\|^2\}\mathrm{d}s\leqslant\int_0^t\gamma^2\|v(s)\|^2\mathrm{d}s,\tag{8}$$

上述不等式中, $t\geqslant 0$, $z_0=0$并且$v\in L_2[0,\infty)$.

为了证明本文的主要结论, 给出了以下引理.

引理 1[32]　对于行满秩矩阵$C\in\mathbb{R}^{n_c\times n}$, C的奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 可以描述为$C=U_{\mathrm{c}}[S_{\mathrm{c}}\ \ 0]V_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}$, 其中: $U_{\mathrm{c}}U_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}=I$, $V_{\mathrm{c}}V_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}=I$. 设矩阵$X>0$, $X_1\in\mathbb{R}^{n_c\times n_c}$, $X_2\in\mathbb{R}^{(n-n_c)\times(n-n_c)}$. 然后, 存在一个矩阵$\bar{X}$, 当且仅当以下条件满足时$CX=\bar{X}C$:

$$X=V_{\mathrm{c}}\begin{bmatrix}X_1&0\\0&X_2\end{bmatrix}V_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}.$$

引理 2[33]　对于$\mathcal{E}\in\mathbb{R}^{n\times N}$, $\mathcal{F}\in\mathbb{R}^{N\times n}$, X_0, X_i, $G_i\in\mathbb{R}^{n\times n}$, 以及对称矩阵$\Xi_i\in\mathbb{R}^{N\times N}$, $i=1,2,\cdots,q$, 有下列不等式成立:

$$\begin{bmatrix}\Xi_i+\mathrm{He}(\mathcal{F}X_0\mathcal{E})&((X_i-X_0)\mathcal{E})^{\mathrm{T}}+\mathcal{F}G_i\\*&-G_i-G_i^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}<0,$$

其中$i=1,2,\cdots,q$, 然后有

$$\Xi_i+\mathcal{F}X_i\mathcal{E}+(\mathcal{F}X_i\mathcal{E})^{\mathrm{T}}<0.\tag{9}$$

3　主要结果

为了引入攻击参数δ和ϱ, 需要构造以下辅助函数: 当$t\geqslant 0$时, 定义

$$\eta_{1,n}(t)=\begin{cases}\dfrac{t-nT}{\delta}, & t\in\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}\mathcal{Z}_{1,n},\\ \dfrac{t-nT-\delta}{\varrho}, & t\in\bigcup\limits_{n\in\mathbb{N}}\mathcal{Z}_{2,n},\end{cases}$$

$$\eta_{2,n}(t)=1-\eta_{1,n}(t),$$

$$\varepsilon_1=\delta,\ \varepsilon_2=\varrho.$$

注 2　根据上述定义, 可以得到对于所有$i\in\{1,2\}$, $n\in\mathbb{N}$, 有

$$\eta_{1,n}(t_{i,n})=0,\ \eta_{1,n}(t_{i,n}^-)=1.\tag{10}$$

3.1　DoS攻击参数依赖的H_∞性能分析

在本节中, 首先对系统(7)进行DoS攻击参数依赖的H_∞性能分析.

定理 1　考虑随机切换系统(7). 假设DoS攻击(2)中的参数T和δ已知. 对于给定的正标量λ_1, λ_2和γ, 控制器增益矩阵K和观测器增益矩阵L, 存在$2n\times 2n$矩阵$P_{ij}>0$, $i,j=1,2$, 使下列线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix}\Sigma_{ij}&P_{ij}\mathcal{B}_1&\mathcal{D}^{\mathrm{T}}\\*&-\lambda_0\gamma^2I&\mathcal{B}_2^{\mathrm{T}}\\*&*&-P_{ij}^{-1}\end{bmatrix}<0,\tag{11}$$

$$P_{i2}-\lambda_{3-i}P_{3-i,1}\leqslant 0,\tag{12}$$

其中:

$$\lambda_0=\frac{\min\{\lambda_1,\lambda_2,1\}}{\max\{\lambda_1,\lambda_2,1\}},$$

$$\Sigma_{ij}=\frac{\ln\lambda_i}{\varepsilon_i}P_{ij}+\frac{1}{\varepsilon_i}(P_{i1}-P_{i2})+\mathcal{A}_i^{\mathrm{T}}P_{ij}+P_{ij}\mathcal{A}_i+\mathcal{C}^{\mathrm{T}}\mathcal{C}$$

成立, 则系统(7)将会是均方指数稳定的, 且系统(7)的L_2增益小于γ.

证　此定理的证明可以通过以下步骤形成:

步骤 1　首先, 考虑系统(7)在没有外界扰动输入的情况, 即$v=0$. 由条件(11)可知, 存在1个足够小的正标量ϵ使以下线性矩阵不等式成立:

$$\tilde{\Sigma}_{ij}<0,\ i,j=1,2,\tag{13}$$

其中

$$\tilde{\Sigma}_{ij}=(\epsilon+\frac{\ln\lambda_i}{\varepsilon_i})P_{ij}+\frac{1}{\varepsilon_i}(P_{i1}-P_{i2})+P_{ij}\mathcal{A}_i+\mathcal{A}_i^{\mathrm{T}}P_{ij}+\mathcal{D}^{\mathrm{T}}P_{ij}\mathcal{D}.$$

选择一种DoS攻击参数依赖型随机时变李雅普诺夫函数

$$V(t,z(t))=\psi(t)z^{\mathrm{T}}(t)\sum_{j=1}^{2}\eta_{j,n}(t)P_{\varphi(t),j}z(t),$$

其中$\psi(t)=\lambda_{\varphi(t)}^{\eta_{1,n}(t)}$.

当$t\in(t_{i,n},t_{3-i,n+i-1})$, $(i,n)=\{1,2\}\times\mathbb{N}$时, 利用文献[34]中的微分公式, 沿无外界扰动的系统(7)的轨迹对$V(t,z(t))$进行随机微分, 有

$$\mathrm{d}V(t,z(t))=\mathcal{L}V(t,z(t))\mathrm{d}t+2\psi(t)z^{\mathrm{T}}(t)P_{ij}\mathcal{D}z(t)\mathrm{d}\omega(t),$$

其中

$$\mathcal{L}V(t)=\psi(t)\sum_{j=1}^{2}\eta_{j,n}(t)z^{\mathrm{T}}(t)[\frac{\ln\lambda_i}{\varepsilon_i}P_{ij}+P_{ij}\mathcal{A}_i+\frac{1}{\varepsilon_i}(P_{i1}-P_{i2})+\mathcal{A}_i^{\mathrm{T}}P_{ij}+\mathcal{D}^{\mathrm{T}}P_{ij}\mathcal{D}]z(t).$$

对于任意给定的初始值$z_0\in\mathbb{R}^{2n}$, $z(t)=z(t,0,z_0)$, $W(t)=\mathrm{e}^{\epsilon t}V(t)$. 当$t\in(t_{i,n},t_{3-i,n+i-1})$, $(i,n)=\{1,2\}\times\mathbb{N}$时, 利用文献[34]中的微分公式, 沿无外界

扰动的系统(7)的轨迹对$W(t)$进行随机微分, 有

$$\mathrm{d}W(t)=\mathrm{e}^{\epsilon t}[\epsilon V(t)+\mathcal{L}V(t)]\mathrm{d}t+2\mathrm{e}^{\epsilon t}\psi(t)z^{\mathrm{T}}(t)P_{ij}\mathcal{D}z(t)\mathrm{d}\omega(t). \quad (14)$$

对式(14)两边求期望值, 可以得到

$$\mathrm{E}\{\mathrm{d}W(t)\}=\mathrm{e}^{\epsilon t}\mathrm{E}\{\psi(t)\sum_{j=1}^{2}\eta_{j,n}(t)z^{\mathrm{T}}(t)\tilde{\Sigma}_{ij}z(t)\}\mathrm{d}t.$$

把上式与式(13)结合后可以得到

$$\mathrm{E}\{\mathcal{L}V(t)\}\leqslant-\epsilon\mathrm{E}\{V(t)\}. \quad (15)$$

对于$\forall t>t_*>0$, 对式(14)求积分, 得到

$$\mathrm{E}\{W(t)\}=\mathrm{E}\{W(t_*)\}+\int_{t_*}^{t}\mathrm{e}^{\epsilon t}\mathrm{E}\{\epsilon V(t)+\mathcal{L}V(t)\}\mathrm{d}t. \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)得

$$\mathrm{E}\{V(t)\}\leqslant\mathrm{e}^{-\epsilon(t-t_*)}\mathrm{E}\{V(t_*)\}. \quad (17)$$

因此对于$\forall t\in\mathcal{Z}_{i,n}$, 令$t_*=t_{i,n}$, 代入式(17)得

$$\mathrm{E}\{V(t)\}\leqslant\mathrm{e}^{-\epsilon(t-t_{i,n})}\mathrm{E}\{V(t_{i,n})\}. \quad (18)$$

结合式(10)(12), 得

$$\mathrm{E}\{V(t_{i,n})\}\leqslant\mathrm{E}\{V(t_{i,n}^{-})\}. \quad (19)$$

结合式(18)–(19), 得

$$\mathrm{E}\{V(t)\}\leqslant\mathrm{E}\{V(0)\}\mathrm{e}^{-\epsilon t}. \quad (20)$$

下面定义$\sigma_1=\min\{\lambda_{\min}(P_{ij})\}, i,j=1,2, \sigma_2=\max\{\lambda_{\max}(P_{12})\}$. 根据式(20), 有

$$\mathrm{E}\{\|z(t)\|^2\}\leqslant\frac{\sigma_2}{\sigma_1\cdot\min\{\lambda_1,\lambda_2,1\}}\|z_0\|^2\mathrm{e}^{-\epsilon t}.$$

因此, 在没有外界扰动v的情况下, 系统(7)是均方指数稳定的.

步骤 2 接下来, 将证明在零初始条件下, 测量输出$y(t)$满足关系(8). 为此, 本文引入一个辅助函数, 当$t\geqslant 0$, 定义

$$\phi(t)=\int_0^t\psi(s)(\|y(s)\|^2-\lambda_0\gamma^2\|v(s)\|^2)\mathrm{d}s. \quad (21)$$

对于任意给定的$t\geqslant 0$, 存在$n\in\mathbb{N}$, 使得$t\in\mathcal{Z}_{1,n}$或者$t\in\mathcal{Z}_{2,n}$. 在不失一般性的条件下, 假设$t\in\mathcal{Z}_{1,n}$. 那么结合$V(t_{1,0})=0$和式(19), 可以得出

$$\int_0^t\mathrm{E}\{\mathrm{d}V(s)\}\geqslant 0.$$

利用上述事实, 得出

$$\phi(t)\leqslant\phi(t)+\int_0^t\mathrm{E}\{\mathrm{d}V(s)\}. \quad (22)$$

对于任意$s\in(t_{i,n},t_{3-i,n+i-1})$, 沿着系统(7)的轨迹, 有

$$\psi(s)\mathrm{E}\{\|y(s)\|^2-\lambda_0\gamma^2\|v(s)\|^2\}\mathrm{d}s+\mathrm{E}\{\mathrm{d}V(s)\}=\psi(s)\sum_{j=1}^{2}\eta_{j,n}(s)\rho^{\mathrm{T}}(s)(\Pi_{ij}+\Lambda^{\mathrm{T}}P_{ij}\Lambda)\rho(s)\mathrm{d}s,$$

其中: $\rho(s)=\mathrm{col}(z(s),v(s))$, $\Lambda=[\mathcal{D}\ \ \mathcal{B}_2]$,

$$\Pi_{ij}=\begin{bmatrix}\Sigma_{ij} & P_{ij}\mathcal{B}_1\\ * & -\lambda_0\gamma^2 I\end{bmatrix}.$$

将Schur补定理应用于线性矩阵不等式(11)得到

$$\Pi_{ij}+\Lambda^{\mathrm{T}}P_{ij}\Lambda<0. \quad (23)$$

结合式(21)–(23), 对于任意的$t\geqslant 0$, 可以得到

$$\int_0^t\psi(s)\mathrm{E}\{\|y(s)\|^2\}\mathrm{d}s\leqslant\lambda_0\gamma^2\int_0^t\psi(s)\|v(s)\|^2\mathrm{d}s.$$

考虑到$\begin{cases}\psi(s)\leqslant\max\{\lambda_1,\lambda_2,1\}\\ \psi(s)\geqslant\min\{\lambda_1,\lambda_2,1\}\end{cases}$, 最终可以推导出测量输出$y(t)$满足不等式(8). 证毕.

注 3 仔细研究定理1的证明, 可以发现系统(7)的稳定性在没有用到DoS频率上界[14–16]这一条件下仍然可以被证明. 由于本文只考虑攻击持续时间, 因此最终的分析结果可能不是那么保守.

注 4 可以看出切换系统(7)有两种模式: 在无DoS攻击区间$t\in\mathcal{Z}_{1,n}(n\in\mathbb{N})$上为闭环模式, 在有DoS攻击区间$t\in\mathcal{Z}_{2,n}(n\in\mathbb{N})$上为开环模式. 为了定量地表示间歇性DoS攻击对系统(7)的影响, 本文在选取的分段随机李雅普诺夫函数$V(t)$中引入了依赖攻击参数的时变调节项$\psi(t)$. 尽管存在间歇性DoS攻击, 但由于$\psi(t)$和$V(t)$的调节作用, 沿系统(7)对$V(t)$进行随机微分的结果是一个非递增函数. 此外, 在$V(t)$中还引入矩阵P_{ij}增加了自由度, 降低了所提方法的保守性.

注 5 注意定理1证明中的$V(t)$是一个分段的攻击参数依赖型时变随机李雅普诺夫函数, 与文献[15–16]等一些现有研究中使用的与攻击无关的时不变李雅普诺夫函数相比, $V(t)$具有两个显着的特点: 第一, 当$\lambda_i\equiv 1$且$P_{ij}\equiv P(i,j=1,2)$时, $V(t)$简化为文献[16]中提出的李雅普诺夫函数$\bar{V}(t)=x^{\mathrm{T}}(t)Px(t)$. 这意味着本文提出的基于分段时变随机李雅普诺夫函数的方法在控制上有更大的灵活性; 第二, 沿着系统(7)的轨迹对$V(t)$进行随机微分后, 所得的结果中包含了$\frac{1}{\varepsilon_i}(P_{i1}-P_{i2})$项. 由于该项中包含了DoS攻击的休眠长度和攻击长度, 即本文利用了更多关于DoS攻击的信息, 从而降低了H_∞性能分析的保守性.

3.2 攻击参数依赖型观测器和控制器一体化设计

定理1给出了系统(7)均方指数稳定的判据, 同时使闭环系统具有L_2增益性能水平. 基于定理1, 可以进一步解决攻击参数依赖型观测器和控制器的一体化设计问题.

定理 2 考虑随机切换系统(7). 假设DoS攻击(2)中的参数T和δ已知. 对于给定的正标量γ, λ_i, ζ_i和ξ_l, $i=1,2$, $l=1,2,3,4$, 存在$2n\times 2n$的矩阵X_0,

$X_{ij}>0, i,j=1,2$, $n\times n_c$的矩阵$\bar{K}$和$n_c\times n$的矩阵$\bar{L}$, 使下列线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix}\Delta_{11} & \varsigma^{\mathrm{T}}(X_{11}-X_0^{\mathrm{T}}+\xi_1\tilde{\mathcal{A}}_{12})\\ * & -\xi_1(X_0+X_0^{\mathrm{T}})\end{bmatrix}<0, \tag{24}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta_{12} & \varsigma^{\mathrm{T}}X_{12} & \varsigma^{\mathrm{T}}(X_{12}-X_0^{\mathrm{T}}+\xi_2\tilde{\mathcal{A}}_{12})\\ * & -\delta X_{11} & 0\\ * & * & -\xi_2(X_0+X_0^{\mathrm{T}})\end{bmatrix}<0, \tag{25}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta_{21} & \varsigma^{\mathrm{T}}(X_{21}-X_0^{\mathrm{T}}+\xi_3\tilde{\mathcal{A}}_{22})\\ * & -\xi_3(X_0+X_0^{\mathrm{T}})\end{bmatrix}<0, \tag{26}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta_{22} & \varsigma^{\mathrm{T}}X_{22} & \varsigma^{\mathrm{T}}(X_{22}-X_0^{\mathrm{T}}+\xi_4\tilde{\mathcal{A}}_{22})\\ * & -\varrho X_{21} & 0\\ * & * & -\xi_4(X_0+X_0^{\mathrm{T}})\end{bmatrix}<0, \tag{27}$$

$$X_{11}\leqslant\lambda_1X_{22},\ X_{21}\leqslant\lambda_2X_{12}, \tag{28}$$

其中:

$$\varsigma=[I\ \ 0\ \ 0\ \ 0],$$

$$\tilde{\mathcal{A}}_{12}=\begin{bmatrix}B_u\bar{K} & -B_u\bar{K}\\ 0 & -\bar{L}C\end{bmatrix},\ \tilde{\mathcal{A}}_{22}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\bar{L}C\end{bmatrix},$$

$$\Delta_{ij}=\begin{bmatrix}\Theta_{ij} & \mathcal{B}_1 & X_{ij}\mathcal{D}^{\mathrm{T}} & X_{ij}\mathcal{C}^{\mathrm{T}}\\ * & -\lambda_0\gamma^2I & \mathcal{B}_2^{\mathrm{T}} & 0\\ * & * & -X_{ij} & 0\\ * & * & * & -I\end{bmatrix},$$

其中:

$$\begin{aligned}\Theta_{11}&=\frac{\ln\lambda_1+1-2\zeta_1}{\delta}X_{11}+\frac{\zeta_1^2}{\delta}X_{12}+\\&\quad\mathrm{He}(\mathcal{A}X_{11}+\tilde{\mathcal{A}}_{12}),\\ \Theta_{12}&=\frac{\ln\lambda_1-1}{\delta}X_{12}+\mathrm{He}(X_{12}\mathcal{A}+\tilde{\mathcal{A}}_{12}),\\ \Theta_{21}&=\frac{\ln\lambda_2+1-2\zeta_2}{\varrho}X_{21}+\frac{\zeta_2^2}{\varrho}X_{22}+\\&\quad\mathrm{He}(\mathcal{A}X_{21}+\tilde{\mathcal{A}}_{22}),\\ \Theta_{22}&=\frac{\ln\lambda_2-1}{\varrho}X_{22}+\mathrm{He}(X_{22}\mathcal{A}+\tilde{\mathcal{A}}_{22}),\\ \mathcal{A}&=\mathrm{diag}\{A,A\}\end{aligned}$$

成立, 则系统(7)将保持稳定并保证L_2增益小于γ. 基于以上线性矩阵不等式可获得控制器增益矩阵$K=\bar{K}X_{01}^{-1}$和状态观测器增益矩阵$L=\bar{L}\bar{X}_{01}^{-1}$.

证 令P_{ij}=diag$\{P_{ij1},P_{ij2}\}$, X_0=diag$\{X_{01},X_{01}\}$. 定义P_{ijp}=X_{ijp}^{-1}, K=$\bar{K}X_{01}^{-1}$, L=$\bar{L}\bar{X}_{01}^{-1}$, i,j,p=1, 2. 令$X_{01}=V\begin{bmatrix}X_{011} & 0_{n_c\times n}\\ 0_{n\times n_c} & X_{012}\end{bmatrix}V^{\mathrm{T}}$. 基于引理1, 存在$\bar{X}_{01}$=$USX_{011}S^{-1}U^{-1}$使$CX_{01}=\bar{X}_{01}C$, 其中$\bar{X}_{01}^{-1}$=$USX_{011}^{-1}S^{-1}U^{-1}$. 很容易看出矩阵不等式(12)等价于式(28).

$\mathcal{A}_1$可以分解为$\mathcal{A}+\mathcal{A}_{12}$, 其中: $\mathcal{A}=\mathrm{diag}\{A,A\}$, $\mathcal{A}_{12}=\begin{bmatrix}B_uK & -B_uK\\ 0 & -LC\end{bmatrix}$. $\mathcal{A}_2$可以分解为$\mathcal{A}+\mathcal{A}_{22}$, 其中$\mathcal{A}_{22}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -LC\end{bmatrix}$.

利用Schur补定理和矩阵不等式$-X_{11}X_{12}^{-1}X_{11}\leqslant-2\varepsilon_1X_{11}+\varepsilon_1^2X_{12}$, 条件(24)–(27)可以改写为

$$\begin{bmatrix}\bar{\Delta}_{ij}+\mathrm{He}(\mathcal{N}_iX_0\mathcal{M}) & \varpi_{ijl}\\ * & -\xi_l(X_0+X_0^{\mathrm{T}})\end{bmatrix}<0, \tag{29}$$

其中:

$$\begin{aligned}&\mathcal{M}=[I\ \ 0\ \ 0],\\ &\mathcal{N}_i=\mathrm{col}(\mathcal{A}_{i2},0,0),\\ &\varpi_{ijl}=((X_{ij}-X_0)\mathcal{M})^{\mathrm{T}}+\mathcal{N}_i(\xi_lX_0),\\ &\bar{\Delta}_{ij}=\begin{bmatrix}\bar{\Theta}_{ij} & \mathcal{B}_1 & X_{ij}\mathcal{D}^{\mathrm{T}}\\ * & -\lambda_0\gamma^2I & \mathcal{B}_2^{\mathrm{T}}\\ * & * & -X_{ij}\end{bmatrix},\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}\bar{\Theta}_{ij}=&\frac{\ln\lambda_i}{\varepsilon_i}X_{ij}+\frac{1}{\varepsilon_i}X_{ij}(P_{11}-P_{12})X_{ij}+\\&X_{ij}\mathcal{A}^{\mathrm{T}}+\mathcal{A}X_{ij}+X_{ij}\mathcal{C}^{\mathrm{T}}\mathcal{C}X_{ij}.\end{aligned}$$

根据引理2, 矩阵不等式(29)成立, 表明

$$\bar{\Delta}_{ij}+\mathcal{N}_iX_{ij}\mathcal{M}+(\mathcal{N}_iX_{ij}\mathcal{M})^{\mathrm{T}}<0, \tag{30}$$

其中$i,j=1,2$.

式(30)左乘右乘(P_{ij},I,I)后, 可以得到矩阵不等式(30)等价于式(11). 证毕.

注 6 文献[35]与本文相比较, 有以下几点不同: 1) 考虑的系统不同. 前者考虑的是确定性系统, 且无外界扰动. 本文考虑的是在实际生活中更为常见的具有乘性噪声和外界扰动的随机系统; 2) 考虑的DoS攻击模型不同. 前者考虑的是攻击频率和攻击持续时间都受到限制的非周期性DoS攻击. 本文考虑的是周期性DoS攻击且仅限制了攻击持续时间; 3) 在文献[35]中, 作者加入了事件触发机制, 节省了通讯资源. 本文没有考虑事件触发机制; 4) 前者采用了分段时不变李雅普诺夫泛函对系统进行稳定性分析, 而本文采用的是分段的攻击参数依赖型随机时变李雅普诺夫函数, 降低了H_∞性能分析的保守性; 5) 在稳定性分析中, 前者对系统参数与攻击参数进行了一个限制, 即文献[35]中的公式(26). 本文中没有该限制, 并且把攻击参数融入到了稳定性分析中.

注 7 为了得到H_∞最优性能水平$\gamma_{\min}$, 可以对以下最小化问题进行求解:

$$\gamma_{\min}=\min\{\gamma|\gamma\text{满足LMIs}(24)-(28)\}.$$

4 仿真实例

本节中, 通过对一个简化的F16飞行器系统[36]进行仿真来验证所得方法的有效性. 该飞行器系统模型

具有以下形式:

$$\begin{cases} \mathrm{d}x_1(t) = x_2(t)\mathrm{d}t, \\ \mathrm{d}x_2(t) = (-\vartheta x_2(t) + u(t))\mathrm{d}t, \\ \mathrm{d}x_3(t) = \vartheta(x_1(t) - x_3(t))\mathrm{d}t + v(t)\mathrm{d}t + \\ \qquad 0.5x_1(t)\mathrm{d}\omega(t), \\ \mathrm{d}x_4(t) = 5(x_2(t) - x_4(t))\mathrm{d}t + v(t)\mathrm{d}t, \\ y(t) = x_3(t) + x_4(t). \end{cases} \tag{31}$$

在该飞行器系统中, 航程x_1和航程率x_2分别由它们的低通滤波版本x_3和x_4测量, 其中: x_3被$x_1\mathrm{d}\omega$破坏, x_3和x_4都受到外界扰动v的影响. 在存在外部扰动和随机乘性噪声的情况下, 本文使用x_3和x_4来实现对$y(t)$的调节. 假设速度控制回路的带宽ϑ为5. 然后, 系统(1)中相应的系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & -5 \end{bmatrix},\ B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ B_2 = 0,\ C = [0\ \ 0\ \ 1\ \ 1].$$

采用本文提出的控制策略对系统(31)进行控制. 模拟参数选择为$\lambda_1 = \lambda_2 = 1.01$, $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = 0.005$, $\zeta_1 = \zeta_2 = 2$, 采样周期$h = 0.001$ s. 对应的周期性DoS攻击如图3(或图5)所示, 其中$T = 1$ s和$\delta = 0.7$ s.

现在的目的是设计攻击参数依赖型控制器和观测器. 选择$\gamma = 1$, 对定理2中的线性矩阵不等式(24)–(28)进行求解, 可以得到以下状态反馈控制器增益矩阵K和状态观测器增益矩阵L:

$$K = [-3.4777\ \ -0.6957\ \ -1.9721 \times 10^{-5}\ \ 2.2869 \times 10^{-5}],$$

$$L = [-0.2677\ \ 1.3385\ \ -1.0294\ \ -0.3920]^{\mathrm{T}}.$$

在保证式(24)–(28)可行的条件下, 得到了H_∞最优性能$\gamma_{\min} = 0.5177$.

在接下来的仿真实验中, 系统的初始状态设置为$x_0 = [0.6\ \ -0.8\ \ -0.5\ \ 0.3]^{\mathrm{T}}$, 并假设模拟时间为20 s. DoS攻击下, 系统的状态响应如图3所示. 系统状态与观测状态之间的误差如图4所示. 系统的控制输入如图5所示. 从图5可以看出, 在DoS攻击期间, 控制输入变为0, 即在DoS攻击活跃区间没有控制信号传送到系统. 从图3中可以看到所有4个状态分量都收敛到0. 这意味着系统(7)在周期性DoS攻击(2)下是稳定的. 从图4中可以看出状态观测误差最终趋于0, 验证了本文设计的观测器的有效性.

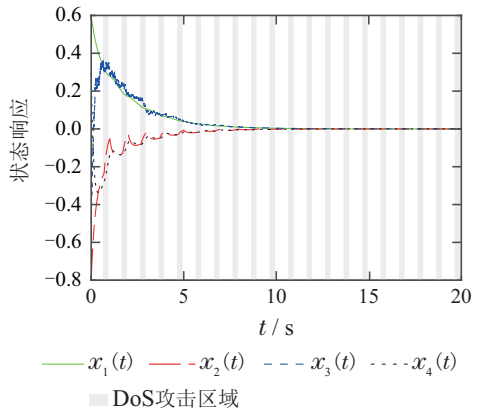

图 3 系统状态响应

Fig. 3 State responses of the system

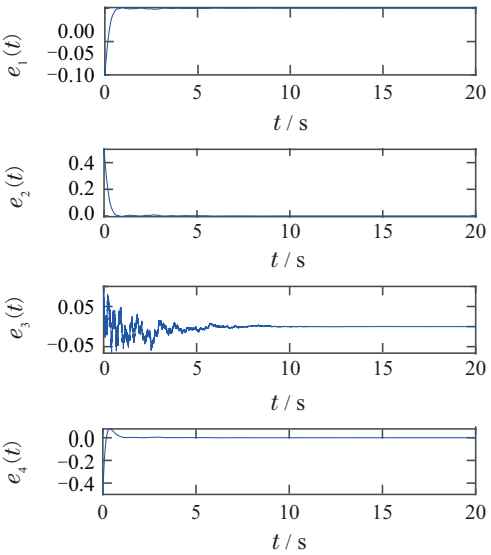

图 4 状态观测误差

Fig. 4 State observer errors

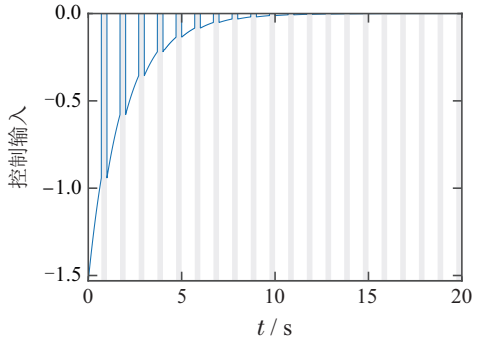

图 5 DoS攻击下的控制输入

Fig. 5 Control inputs under DoS attacks

接下来, 将分析系统的H_∞性能. 为此, 假设初始条件为零. 有界外部扰动设置为

$$v(t) = \begin{cases} \cos t, & t \in [0, 8], \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

通过计算得到H_∞性能水平为

$$\gamma^* = \frac{\|z\|}{\|v\|} = 0.3875 < \gamma = 1.$$

结果表明, 所提出的控制方案能够有效的保证指数H_∞性能, 进一步证明了所提出的方法是有效的.

图6展示了系统(7)在有攻击和无攻击情况下的状态响应, 图中DoS攻击周期为$T=1$ s, 攻击持续时间为$\varrho=0.5$ s. 系统在受到DoS攻击后, 状态响应振幅变大, 收敛速度变慢. 说明DoS攻击可能会降低H_∞性能. 图6表明, 所提出的控制方法在有DoS攻击和无DoS攻击的两种情况下都能对系统进行有效的控制. 图7为系统(7)在不同攻击持续时间下的状态响应对比图, 图中DoS攻击持续时间分别为0.3 s, 0.5 s, 0.7 s, 从图中可以看出随着攻击占比的增大(30%→50%→70%), 系统的收敛速度变慢, 但最终系统都趋于稳定. 即使是在攻击占比较大的情况下, 系统也可以克服DoS攻击带来的影响. 攻击持续时间ϱ与H_∞最优性能$\gamma_{\min}$的关系如表1所示. 从表1可以看出, ϱ越大, $\gamma_{\min}$越小. 而$\gamma_{\min}$越小, 抗干扰能力越强, 也就是系说随着攻击占比的增大, 系统的抗干扰能力越强, 即系统对攻击持续时间ϱ有较大的容忍度.

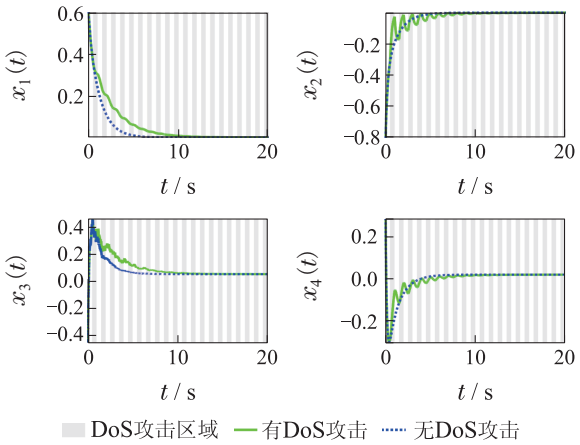

图 6　系统在有DoS攻击和无DoS攻击情况下的状态响应

Fig. 6　State responses of the system in the presence of attacks and in the absence of attacks

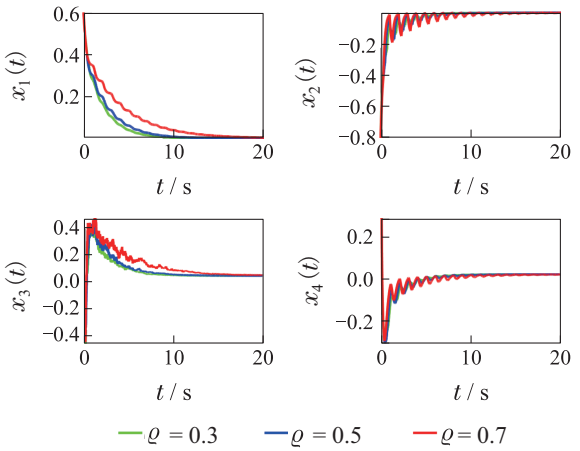

图 7　不同攻击持续时间ϱ下系统状态响应

Fig. 7　State responses of the system under different attack duration ϱ

表 1　攻击持续时间ϱ与$\gamma_{\min}$的关系

Table 1　The obtained $\gamma_{\min}$ with different values of ϱ

T	1	1	1	1	1
ϱ	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
$\gamma_{\min}$	0.5459	0.5295	0.5177	0.5094	0.5037

5　结论与展望

本文针对周期性DoS攻击下网络随机系统的安全控制问题, 提出了一种依赖攻击参数的控制方案. 首先, 提出了一种Luenberger观测器, 构建了一个新的切换随机系统模型. 基于攻击参数依赖型随机李雅普诺夫函数的方法, 推导出随机系统在DoS攻击下均方指数稳定的判据, 同时保证了该系统具有L_2增益性能水平. 通过应用矩阵不等式技术, 给出了依赖攻击参数型观测器与控制器的协同设计准则. 最后, 以一种飞行器系统为例, 验证了该方案的有效性.

在未来, 利用所提出的分析框架可进一步针对随机系统安全问题进行更深入的研究, 例如考虑系统受到混合攻击的情况, 考虑非线性的影响等等.

参考文献:

[1] ZHANG D, SHI P, WANG Q G, et al. Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges. *ISA Transactions*, 2017, 66: 376 – 392.

[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] DOLK V, TESI P, DE PERSIS C, et al. Event-triggered control systems under denial-of-service attacks. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(1): 93 – 105.

[4] HAN S, KOMMURI S K, LEE S. Affine transformed IT2 fuzzy event-triggered control under deception attacks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(2): 322 – 335.

[5] SARGOLZAEI A, YEN K K, ABDELGHANI M N. Preventing time-delay switch attack on load frequency control in distributed power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 1176 – 1185.

[6] ZHU M, MARTINEZ S. On the performance analysis of resilient networked control systems under replay attacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(3): 804 – 808.

[7] DING D, HAN Q L, XIANG Y, et al. A survey on security control and attack detection for industrial cyber-physical systems. *Neurocomputing*, 2018, 275: 1674 – 1683.

[8] FOROUSH H S, MARTINEZ S. On event-triggered control of linear systems under periodic denial-of-service jamming attacks. *The 51st IEEE Conference on Decision and Control*. Maui, HI, USA: IEEE, 2012: 2551 – 2556.

[9] YUAN Y, YUAN H, HO D W, et al. Resilient control of wireless networked control system under denial-of-service attacks: A cross-layer design approach. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(1): 48 – 60.

[10] HUANG Ling, GUO Jing, ZHANG Hengyan. Observer-based dynamic event triggering control for networked systems with periodic denial-of-service attack. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 851 – 861.
(黄玲, 郭婧, 张恒艳. 基于观测器的周期拒绝服务攻击网络化系统动态事件触发控制. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 851 – 861.)

[11] HU S, YUE D, XIE X, et al. Resilient event-triggered controller synthesis of networked control systems under periodic dos jamming attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(12): 4271 – 4281.

[12] ZHAN N, SHI P, XING W. Dynamic event-triggered approach for networked control systems under denial of service attacks. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(5): 1774 – 1795.

[13] LU A Y, YANG G H. Input-to-state stabilizing control for cyber-physical systems with multiple transmission channels under denial of service. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(6): 1813 – 1820.

[14] CHEN X, WANG Y, HU S. Event-triggered quantized H_∞ control for networked control systems in the presence of denial-of-service jamming attacks. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2019, 33: 265 – 281.

[15] CHENG Z, HU S, MA J. Resilient event-triggered control for lfc-vsg scheme of uncertain discrete-time power system under dos attacks. *Energies*, 2020, 13(7): 1820.

[16] ZENG P, DENG F, LIU X, et al. Event-triggered H_∞ control for network-based uncertain markov jump systems under dos attacks. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(6): 2895 – 2914.

[17] SUN H, PENG C, YANG T, et al. Resilient control of networked control systems with stochastic denial of service attacks. *Neurocomputing*, 2017, 270: 170 – 177.

[18] HU S, YUE D, LIU J. H_∞ filtering for networked systems with partly known distribution transmission delays. *Information Sciences*, 2012, 194: 270 – 282.

[19] PENG C, HAN Q L, YUE D. Communication-delay-distribution-dependent decentralized control for large-scale systems with ip-based communication networks. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(3): 820 – 830.

[20] TIAN E, YUE D. Decentralized control of network-based interconnected systems: A state-dependent triggering method. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 25(8): 1126 – 1144.

[21] HU S, YUE D, YIN X, et al. Adaptive event-triggered control for nonlinear discrete-time systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(18): 4104 – 4125.

[22] YANG Y, YUE D, XUE Y. Decentralized adaptive neural output feedback control of a class of large-scale time-delay systems with input saturation. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(5): 2129 – 2151.

[23] LAI Shaoyu, CHEN Bo, YU Li. Switching-Luenberger-observer-based redundant control under DoS attacks. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 758 – 766.
(赖绍禹, 陈博, 俞立. DoS攻击下基于切换Luenberger观测器的冗余控制. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 758 – 766.)

[24] HU S, YUE D, HAN Q L, et al. Observer-based event-triggered control for networked linear systems subject to denial-of-service attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(5): 1952 – 1964.

[25] CAO J, DING D, LIU J, et al. Hybrid-triggered-based security controller design for networked control system under multiple cyber attacks. *Information Sciences*, 2021, 548: 69 – 84.

[26] ZHANG J, FRIDMAN E. Dynamic event-triggered control of networked stochastic systems with scheduling protocols. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(12): 6139 – 6147.

[27] YAESH I, SHAKED U, YOSSEF T. Simplified adaptive control of f16 aircraft pitch and angle-of-attack loops. *Proceedings of the 44th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences*. Tel-Aviv, Israel: 2004: 25 – 26.

[28] YAO Fengqi, ZHU Xingxing. Finite-time boundedness analysis and H_∞ control for a class of impulsive stochastic systems. *Control Theroy & Applications*, 2018, 35(3): 291 – 298.
(姚凤麒, 朱行行. 一类脉冲随机系统的有限时间有界性分析与H_∞控制. 控制理论与应用, 2018, 35(3): 291 – 298.)

[29] TIAN E, WANG Z, ZOU L, et al. Chance-constrained H_∞ control for a class of time-varying systems with stochastic nonlinearities: The finite-horizon case. *Automatica*, 2019, 107: 296 – 305.

[30] GUO L, YU H, HAO F. Event-triggered control for stochastic networked control systems against denial-of-service attacks. *Information Sciences*, 2020, 527: 51 – 69.

[31] ZHAO N, SHI P, XING W, et al. Observer-based event-triggered approach for stochastic networked control systems under denial of service attacks .*IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2021, 8(1): 158 – 167.

[32] PENG C, MA S, XIE X. Observer-based non-pdc control for networked t-s fuzzy systems with an event-triggered communication. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(8): 2279 – 2287.

[33] CHEN W H, ZHONG J, ZHENG W X. Delay-independent stabilization of a class of time-delay systems via periodically intermittent control. *Automatica*, 2016, 71: 89 – 97.

[34] HUANG H, FENG G. Delay-dependent stability for uncertain stochastic neural networks with time-varying delay. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 381: 93 – 103.

[35] HU S, YUE D, CHENG Z, et al. Co-design of dynamic event-triggered communication scheme and resilient observer-based control under aperiodic dos attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(9): 4591 – 4601.

[36] MENG X, LAM J, GAO H. Network-based H_∞ control for stochastic systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2009, 19(3): 295 – 312.

作者简介:

李建瑞 硕士研究生, 目前研究方向为网络化控制系统的安全控制, E-mail: 571967597@qq.com;

胡松林 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为网络化控制与安全、智能电网优化协调控制, E-mail: songlin621@126.com;

岳 东 教授, 博士生导师, 目前研究方向为网络化控制与安全、智能电网优化协调控制, E-mail: medongy@vip.163.com;

陈小莉 博士, 讲师, 目前研究方向为网络控制系统、信息物理系统的弹性分析与控制, E-mail: chenxiaoli_206@126.com;

马 勇 教授, 博士生导师, 目前研究方向为船舶智能航行理论与技术, E-mail: myongdl@whut.edu.cn.