FDI 攻击下网络化控制系统的事件触发安全控制

刘珊中, 蒋振华, 张亚平

(河南科技大学 信息工程学院,河南 洛阳 471023)

摘　要: 针对一类存在网络诱导时延、不确定性、外界干扰、非线性的网络化控制系统,对其在遭受虚假数据注入(FDI)攻击时的安全控制问题进行了研究。首先,针对现有触发机制未充分考虑突发数据导致网络资源浪费的问题,设计了基于均值滤波的动态自适应事件触发机制(MF-DAETM)。该机制通过引入均值滤波思想,有效减少了因突发数据引发的意外触发,节省了网络资源。其次,利用伯努利变量对 FDI 攻击进行建模,并综合考虑网络诱导时延、不确定性、外界干扰及非线性等因素,构建了统一的闭环时滞系统模型。在此基础上,结合 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法与线性矩阵不等式(LMI)技术,推导出保证闭环系统 H_∞ 渐近稳定的充分条件,并提出了 MF-DAETM 与鲁棒控制器的协同设计方法。最后,采用数值仿真与实例仿真验证了所提方法的有效性。实验结果表明:在系统控制数据分别被篡改 21.2%与 26.7%的情形下,系统仍能趋于稳定,具有较强的鲁棒性能。在实例仿真情形下,相较改进前的触发机制,MF-DAETM 对资源的利用率提升 23.4%。

关键词: 网络化控制系统; 虚假数据注入; 均值滤波; 事件触发; 不确定性; 非线性

中图分类号: TP273　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.02.018

控制单元通过网络相互连接的系统被称为网络化控制系统(networked control systems,NCSs),其在智能制造、航空航天和电力系统等领域得到了广泛应用[1-2]。尽管网络的引入使得各控制单元之间的信息交互更加灵活和经济,但同时也带来了诸多由网络引起的缺陷,例如通信延迟和网络带宽限制等。此外,信息在传输过程中容易受到网络攻击的威胁,这对系统的稳定运行构成了严峻挑战[3]。随着科技的不断进步,NCSs 的模型日趋复杂化。因此,设计一种既能节约系统资源又能有效抵御网络攻击的安全控制策略是当前研究的重要课题[4]。

近年来,网络安全问题已成为当前研究热点之一[5]。然而,学者更多地关注拒绝服务攻击(denial of service,DoS)对系统的影响,而对虚假数据注入(false data injection,FDI)攻击下的 NCSs 安全控制策略研究相对较少[6-7]。FDI 攻击是欺骗攻击中的典型代表,其通过篡改网络层的传输数据,达到破坏系统控制性能的目的。相较其他攻击方式,FDI 攻击具有更强的隐蔽性、难以检测性和破坏性[8-9]。Cao 等[10]对系统存在 FDI 攻击、外界干扰、随机丢包的 NCSs 进行了系统建模,并提出了一种异步反馈控制方法;Li 等[11]则考虑了 FDI 攻击与网络时延,将 NCSs 建模为一个马尔可夫跳变系统,并设计了一个反攻击控制器;Xu 等[12]建立了一个在 FDI 攻击和外部干扰下的 NCSs 模型,采用滑膜控制方法实现了对系统的闭环控制;李福强等[13]针对 FDI 下的 NCSs,提出了一种安全控制策略。综上,现有研究在对系统进行建模时主要集中于 FDI 攻击、网络时延、外部干扰等因素,而对系统不确定性的影响考虑尚有不足。因此,本文在现有研究的基础上,进一步考虑系统不确定性对 NCSs 的影响,构建了一个包含网络诱导时延、不确定性、外界干扰、非线性和 FDI 攻击的统一时滞模型。同时,为更精确地描述 FDI 攻击,本文在文献[13]对 FDI 描述的基础上,额外引入一个参数项,以更全面地刻画攻击行为对系统的影响。

在节省网络资源方面,事件触发机制(Event-triggered mechanism,ETM)因能实现对资源的“按需

收稿日期: 2026-02-20;**修订日期:** 2026-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61976081)

作者简介: 刘珊中(1968—),女,河南郑州人,河南科技大学教授,博士,博士生导师,主要从事网络化控制系统、鲁棒控制理论研究,E-mail:szliu@haust.edu.cn。

发送",达到服务质量(quality of service,QoS)与控制质量(quality of control,QoC)的平衡而备受关注[14-15]。QIU 等[16]提出了一个 1-范数形式的触发机制,研究了在网络攻击下的随机稳定性问题;ZHANG 等[17]针对在 FDI 攻击下的微电网频率恢复问题,采用了动态事件触发机制(dynamic event-triggered mechanism,DETM);NING 等[18]采用动态自适应事件触发机制(Dynamic Adaptive Event Triggered Mechanism,DAETM)研究了具有随机非线性和测量缺失的故障检测问题。尽管上述研究均提出了 ETM,但其在设计 ETM 时并未考虑突发数据导致的异常触发问题。基于此,本文引入均值滤波的思想,设计了一种基于均值滤波的动态自适应事件触发机制(mean-filtering-based dynamic adaptive event triggered mechanism,MF-DAETM),其触发条件与动态阈值都能够跟随系统当前状态变化进行自适应调整,有效避免了异常触发事件的发生。

基于以上讨论,本文研究了 FDI 攻击下 NCSs 的资源节约与安全控制问题。本文主要的工作如下:1)考虑到突发数据对系统的影响,引入均值滤波思想,设计了 MF-DAETM,有效节省了系统资源;2)区别于文献[13]的研究,本文在考虑原有控制信号对系统影响的基础上,引入了一种新的 FDI 攻击描述方法;3)建立了包含 FDI 攻击、事件触发以及多种网络约束下的 NCSs 时滞模型,给出了使系统稳定的充分条件,并提出了事件触发机制与鲁棒控制器的协同设计方法。

1 问题描述与建模

1.1 系统建模

参考文献[13]系统模型,并考虑不确定性、及非线性,则系统模型可描述为:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(t)+(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{u}(t)+\\ \qquad\boldsymbol{E}\boldsymbol{\omega}(t)+f(\boldsymbol{x}(t),t)\\ \boldsymbol{Z}(t)=Cx(t)\\ \boldsymbol{x}_0=\phi(t),t\in[-\tau_{\mathrm{M}},0]\end{cases}。\quad(1)$$

式中:$\boldsymbol{x}(t)\in\mathbf{R}^{\mathrm{n}}$,$\boldsymbol{u}(t)\in\mathbf{R}^{\mathrm{m}}$,$\boldsymbol{Z}(t)\in\mathbf{R}^{\mathrm{p}}$ 分别表示系统的状态变量、控制输入和受控输出;$\boldsymbol{\omega}(t)\in\boldsymbol{L}_2[0,\infty]$ 为外部干扰,$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 和 $\boldsymbol{E}$ 表示已知的具有适当维度的常数矩阵;$\phi(t)$ 表示系统的初始状态;$\Delta\boldsymbol{A}$ 和 $\Delta\boldsymbol{B}$ 表示具有适当维数的参数不确定性矩阵,满足[19]:

$$[\Delta\boldsymbol{A}(t)\Delta\boldsymbol{B}(t)]=\boldsymbol{H}\boldsymbol{D}(t)[\boldsymbol{E}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{b}}]。\quad(2)$$

式中:$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{E}_{\mathrm{a}}$ 和 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{b}}$ 为具有适当维数的常数矩阵;$\boldsymbol{D}(t)$ 为一个满足 $\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{D}(t)\leqslant\boldsymbol{I}$ 的未知时变函数。函数 $f(\boldsymbol{x}(t),t)$ 为一个额外的非线性扰动,满足 $f(0,t)=0$ 且假设[18]:

$$f^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(t),t)f(\boldsymbol{x}(t),t)\leqslant\beta^2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(t)。\quad(3)$$

式中 β 为一个已知常数,$\boldsymbol{F}$ 为一个权重矩阵。

1.2 MF-DAETM 设计

针对现有触发机制未充分考虑突发数据导致网络资源浪费的问题,本文引入均值滤波思想,提 MF-DAETM。该机制通过使用系统最新释放数据与采样数据的均值代替文献[18]中触发机制中的状态项,能够有效避免意外触发。此外,MF-DAETM 的触发条件能够跟随系统状态变化自行调整,具有更强的适应性,具体设计如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\varepsilon}(t)\leqslant\delta(t)\bar{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t_k,l)\boldsymbol{\Phi}\bar{\boldsymbol{x}}(t_k,l)。\quad(4)$$

式中:$\boldsymbol{\varepsilon}(t)=\boldsymbol{x}(t_k,l)-\bar{\boldsymbol{x}}(t_k,l)$,$\bar{\boldsymbol{x}}(t_k,l)=1/2[(\boldsymbol{x}_kh)+\boldsymbol{x}(\boldsymbol{x}_kh+l\mathrm{h})]$,$h$ 表示传感器的采样周期,$l;k\in\mathbf{N}$;$\boldsymbol{x}(t_kh)$ 和 $\boldsymbol{x}(t_kh+l\mathrm{h})$ 分别表示系统的最新释放数据和当前采样数据;$\boldsymbol{\Phi}>0$ 表示一个权重矩阵;$\delta(t)$ 为一个动态阈值。$\delta(t)$ 满足:

$$\dot{\delta}(t)=\frac{\kappa}{\delta(t)}\left[\frac{1}{\delta(0)}-\delta_0\right]\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}(t)\varepsilon(t)。\quad(5)$$

式中:$\delta(t)>0$,$\delta_0>1$ 为一个给定常数,$\kappa>0$ 为一个灵敏度参数。

当触发条件(4)被违反时,采样数据才会被传输至通信网络,下一触发瞬间可表示为

$$t_{k+1}h=t_k+\min_{l\in N}\{\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\varepsilon}(t)\}>\delta(t)\bar{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t_k,l)\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{x}(t_k,l)。\quad(6)$$

1.3 总体模型的建立

考虑网络诱导时延的影响,假设由事件触发器第 k 次释放的信号到达执行器的总时延为 τ_k,$\tau_k\in[\underline{\tau},\bar{\tau}]$,其中,$\underline{\tau}$和 $\bar{\tau}$分别表示 τ_k 的上界和下界,则信号更新时刻记为 $\{t_1h+\tau,\cdots,t_kh+\tau_k,t_{k+1}h+\tau_{k+1}\cdots\}$,零阶保持器对第 k 次控制信号的保持区间可以表示为 $\Pi_k=[t_kh+\tau_k,t_{k+1}h+\tau_{k+1}]$。

采用状态反馈,在不考虑网络攻击时,系统的控制输入可表示为

$$\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t_kh),t\in\Pi。\quad(7)$$

式中:$\boldsymbol{K}$ 为控制增益矩阵,采用时滞分割法[20],对零阶保持器保持区间 Π_k 进行划分如下:

$$\Pi_k=\bigcup_{i=0}^{t_{k+1}-t_k-1}\Pi_k^i。\quad(8)$$

式中:

$$\Pi_k^i=\begin{cases}[t_{\mathrm{k}}h+\tau_{\mathrm{k}},t_kh+ih+h+\tau_k;\\ i=0,1,2\cdots,t_{k+1}-t_k-2;\\ [t_kh+ih+\tau_k,t_kh+ih+h+\tau_{k+1});\\ i=t_{k+1}-t_k-1。\end{cases}$$

为方便表示,定义 $\tau(t)=t-(t_kh+lh),t\in\boldsymbol{\Pi}_k^i$,其中 $\tau(t)$ 满足 $0<\tau_m=\underline{\tau}\leqslant\tau(t)\leqslant h+\bar{\tau}=\tau_M$,定义 $\boldsymbol{e}(t)=\boldsymbol{x}(t_kh)-\boldsymbol{x}(t_kh+lh)$。

假设数据在传输过程中易受到随机发生的网络攻击,考虑触发机制和 FDI 攻击,则系统的控制输入可以表示为

$$\boldsymbol{u}_a(t)=\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t_kh)-\boldsymbol{K}g(t),t\in\boldsymbol{\Pi}。\tag{9}$$

式中:$g(t)=\alpha(t)[a(\boldsymbol{x}(t_kh))-\boldsymbol{x}(t_kh)]$ 表示随机 FDI 攻击模型,$a(\boldsymbol{x}(t_kh))$ 表示针对第 k 次成功传输的数据包的主要攻击函数,$\alpha(t)\in\{0,1\}$ 为一个伯努利变量,且 $\alpha(t)$ 的数学期望 $\bar{\alpha}=E\{\alpha(t)\}$,则 $E\{\alpha(t)-\bar{\alpha}\}=0$,$E\{(\alpha(t)-\bar{\alpha})^2\}=\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})$。

注释 1:为避免攻击被检测,将 FDI 攻击建模为一个有限幅度的信号,即假设 $\boldsymbol{a}^T(\boldsymbol{x}(t_kh))\cdot a(\boldsymbol{x}(t_kh))\leqslant\boldsymbol{x}^T(t_kh)\boldsymbol{G}^T\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}(t_kh)$,其中 $\boldsymbol{G}$ 为一个适当维数的能量限定矩阵[13]。

注释 2:与文献[13]的攻击模型不同的是,本文从攻击者的角度将攻击函数建模为 $a(t_kh)-\boldsymbol{x}(t_kh)$,额外引入 $-\boldsymbol{x}(t_kh)$ 项消除原有控制输入对系统影响,使被攻击系统的控制输入完全由攻击函数 $a(\boldsymbol{x}(t_kh))$ 所替代。考虑到随机攻击比连续攻击更难被检测,采用伯努利变量 $\alpha(t)$ 来描述攻击的随机性。更具体地说,如果 $\alpha(t)=1$,则控制输入变为 $\boldsymbol{u}_a(t)=\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_kh))$,这表示数据在传输过程中被攻击;如果 $\alpha(t)=0$,则控制输入仍为 $\boldsymbol{u}_a(t)=\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t_kh)$,这表示数据被成功传输。

当 FDI 攻击发生时,系统的控制输入可以重写为

$$\boldsymbol{u}_a(t)=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{e}(t)+\boldsymbol{x}(t-\tau(t))]+\boldsymbol{K}g(t)。\tag{10}$$

将式(10)代入式(1)得系统闭环时滞模型如下:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{\Lambda}(t)+(\alpha(t)-\bar{\alpha})\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_kh));\\ \boldsymbol{Z}(t)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t);\\ \boldsymbol{x}_0=\phi(t),t\in[-\tau_M,0]。\end{cases}\tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{\Lambda}(t)=\bar{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{x}(t)+(1-\alpha(t))\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t-\tau(t))+(1-\alpha(t))\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{e}(t)+\bar{\alpha}\bar{B}\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_kh))+\boldsymbol{E}\boldsymbol{G}\omega(t)+f(\boldsymbol{x}(t),t)$,$\bar{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A}$,$\bar{\boldsymbol{B}}=B+\Delta\boldsymbol{B}$。

2 稳定性分析

定理 1 对于给定的正标量参数 τ_m、τ_M、δ_0、β、ε_1、ε_2、γ、$\bar{\alpha}$ 以及增益矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和能量限定矩阵 $\boldsymbol{G}$,如果存在对称矩阵 $\boldsymbol{P}>0$,$\boldsymbol{Q}_i>0(i=1,2)$,$\boldsymbol{R}_i>0(i=1,2)$,$\Phi>0$ 以及适当维数的自由矩阵 $\boldsymbol{U}$,使得式(12)和式(13)成立,则 FDI 攻击下的事件触发系统(11)是渐进稳定的,且满足 H_∞ 性能指标 γ。

$$\boldsymbol{\Theta}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Theta}_{1,1} & *\\ \boldsymbol{\Theta}_{2,1} & \boldsymbol{\Theta}_{2,2}\end{bmatrix}<0。\tag{12}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_2 & *\\ \boldsymbol{U} & \boldsymbol{R}_2\end{bmatrix}>0。\tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{\Theta}_{1,1}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Pi}_{8\times8} & *\\ \boldsymbol{\Sigma}_{7\times8} & \boldsymbol{\Delta}_{7\times7}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{\Theta}_{2,1}=\boldsymbol{\Psi}_{4\times15}$;

$$\boldsymbol{\Pi}_{8\times8}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Pi}_{1,1} & & & & & & & \\ \boldsymbol{R}_1 & \boldsymbol{\Pi}_{2,2} & & & & & & \\ \boldsymbol{\Pi}_{1,3} & \boldsymbol{\Pi}_{3,2} & \boldsymbol{\Pi}_{3,3} & & & * & & \\ 0 & \boldsymbol{U} & \boldsymbol{\Pi}_{4,3} & \boldsymbol{\Pi}_{4,4} & & & & \\ \boldsymbol{\Pi}_{5,1} & 0 & \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi} & 0 & \boldsymbol{\Pi}_{5,5} & & & \\ \boldsymbol{E}^T\boldsymbol{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2\boldsymbol{I} & & \\ \boldsymbol{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\boldsymbol{I} & \\ \bar{\alpha}(\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{\alpha}\boldsymbol{P}\boldsymbol{P}\end{bmatrix};$$

$\boldsymbol{\Pi}_{1,1}=\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{Q}_1+\boldsymbol{Q}_2-\boldsymbol{R}_1$;

$\boldsymbol{\Pi}_{2,2}=-\boldsymbol{R}_1-\boldsymbol{R}_2-\boldsymbol{Q}_1$;$\boldsymbol{\Pi}_{1,3}=(1-\bar{\alpha})(\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})^T\boldsymbol{P}$;

$\boldsymbol{\Pi}_{3,2}=\boldsymbol{R}_2-\boldsymbol{U}$;$\boldsymbol{\Pi}_{3,3}=-2\boldsymbol{R}_2+\boldsymbol{U}^T+\boldsymbol{U}+\boldsymbol{\Phi}$;

$\boldsymbol{\Pi}_{4,3}=-\boldsymbol{U}+\boldsymbol{R}_2$;$\boldsymbol{\Pi}_{4,4}=-\boldsymbol{Q}_2-\boldsymbol{R}_2$;

$\boldsymbol{\Pi}_{5,1}=(1-\bar{\alpha})(\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})^T\boldsymbol{P}$;$\boldsymbol{\Pi}_{5,5}=\frac{1}{4}(1-\delta_0)\boldsymbol{\Phi}$;

$$\boldsymbol{\Sigma}_{7\times8}=\begin{bmatrix}\tau_1\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{1,3} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{1,5} & \tau_1\boldsymbol{P}\boldsymbol{E} & \tau_1\boldsymbol{P} & \tau_1\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\\ \tau_{21}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{2,3} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{2,5} & \tau_{21}\boldsymbol{P}\boldsymbol{E} & \tau_{21}\boldsymbol{P} & \tau_{21}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\tau_1\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\tau_{21}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\\ \boldsymbol{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{P}\boldsymbol{G} & 0 & \boldsymbol{P}\boldsymbol{G} & 0 & 0 & 0\\ \beta\boldsymbol{F} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix};$$

$\boldsymbol{\Sigma}_{1,3}=\tau_1(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$;$\Sigma_{1,5}=\tau_1(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Sigma}_{2,3}=\tau_{21}(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$;$\Sigma_{2,5}=\tau_{21}(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{1,1}=(\boldsymbol{P}\boldsymbol{H})^T$;$\boldsymbol{\Psi}_{2,1}=\boldsymbol{E}_a$;$\boldsymbol{\Psi}_{2,3}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{2,5}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K}$;$\boldsymbol{\Psi}_{2,7}=\bar{\alpha}\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{3,9}=\tau_1(\boldsymbol{P}\boldsymbol{H})^T$;$\boldsymbol{\Psi}_{3,10}=\tau_{2,1}(\boldsymbol{P}\boldsymbol{H})^T$;

$\boldsymbol{\Psi}_{3,11}=\tau_1(\boldsymbol{P}\boldsymbol{H})^T$;$\boldsymbol{\Psi}_{3,12}=\tau_{2,1}(\boldsymbol{P}\boldsymbol{H})^T$;$\boldsymbol{\Psi}_{4,1}=\boldsymbol{E}_a$;

$\boldsymbol{\Psi}_{4,3}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K}$;$\boldsymbol{\Psi}_{4,5}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{4,8}=\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K}$;$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{P}^{-1}$;

$$\boldsymbol{\Theta}_{2,2}=\mathrm{diag}\left\{-\varepsilon_1\boldsymbol{I},-\frac{1}{\varepsilon_1}\boldsymbol{I},-\varepsilon_2\boldsymbol{I},-\frac{1}{\varepsilon_2}\boldsymbol{I}\right\};$$

$$\boldsymbol{\Delta}_{7\times7}=\mathrm{diag}\{-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_1^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_2^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_1^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_2^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{I},-\bar{\alpha}\boldsymbol{X}\boldsymbol{X},-\boldsymbol{I}\};$$

$\mu = \sqrt{\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})}$;$\tau_1 = \tau_m$;$\tau_2 = \tau_M$;$\tau_{21} = \tau_2 - \tau_1$。

证明:构建如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函。

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) + V_4(t)。 \quad (14)$$

式中:$V_1(t) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t)$;$V_2(t) = \int_{t-\tau_1}^{t}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}_1\cdot\boldsymbol{x}(t)\mathrm{d}s + \int_{t-\tau_2}^{t}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}_2\boldsymbol{x}(t)\mathrm{d}s$;$V_3(t) = \tau_1\int_{t-\tau_1}^{t}\int_{s}^{t}\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(v)\cdot\boldsymbol{R}_1\dot{\boldsymbol{x}}(v)\mathrm{d}v\mathrm{d}s + \tau_{21}\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\int_{s}^{t}\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(v)\boldsymbol{R}_2\cdot\dot{\boldsymbol{x}}(v)\mathrm{d}v\mathrm{d}s$;$V_4(t) = \frac{1}{2\kappa}\delta^2(t)$。

为方便表示,定义:

$$\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}} = \{\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau_1)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau_2)\cdot \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(t)f^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(t),t),\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(t_k h))\}。$$

沿式(11)轨迹对式(14)求导和取数学期望得

$$\mathrm{E}\{\mathrm{L}V_1(t)\} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{\Lambda}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}\boldsymbol{\Lambda}(t)\}; \quad (15)$$

$$\mathrm{E}\{\mathrm{L}V_2(t)\} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{Q}_1+\boldsymbol{Q}_2)\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau_1)\boldsymbol{Q}_1\boldsymbol{x}(t-\tau_1) - \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau_2)\boldsymbol{Q}_2\boldsymbol{x}(t-\tau_2)\}; \quad (16)$$

$$\mathrm{E}\{\mathrm{L}V_3(t)\} = \mathrm{E}\{\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)(\tau_1^2\boldsymbol{R}_1+\tau_2^2\boldsymbol{R}_2)\dot{\boldsymbol{x}}(t) - \tau_1\int_{t-\tau_1}^{t}\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_1\dot{\boldsymbol{x}}(t)\mathrm{d}s - \tau_{21}\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_2\dot{\boldsymbol{x}}(s)\mathrm{d}s。 \quad (17)$$

根据 $\alpha(t)$ 的描述,有

$$\mathrm{E}\{\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\,\tau_1^2\boldsymbol{R}_1\dot{\boldsymbol{x}}(t)\} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{\Lambda}^{\mathrm{T}}(t)\,\tau_1^2\boldsymbol{R}_1\boldsymbol{\Lambda}\} + \mathrm{E}\{\mu(\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_k h)))^{\mathrm{T}}\,\tau_1^2\boldsymbol{R}_1\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_k h))\}。 \quad (18)$$

$$\mathrm{E}\{\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\,\tau_{21}^2\boldsymbol{R}_2\dot{\boldsymbol{x}}(t)\} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{\Lambda}^{\mathrm{T}}(t)\,\tau_{21}^2\boldsymbol{R}_2\boldsymbol{\Lambda}\} + \mathrm{E}\{\mu(\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_k h)))^{\mathrm{T}}\,\tau_{21}^2\boldsymbol{R}_2\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}a(\boldsymbol{x}(t_k h))\}。 \quad (19)$$

为方便描述,定义 $\boldsymbol{e}_i = [\underbrace{0,\cdots,0}_{i-1},\boldsymbol{I},\underbrace{0,\cdots,0}_{8-i}]$,如果 $\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_2 & * \\ \boldsymbol{U} & \boldsymbol{R}_2\end{bmatrix} > 0$ 成立,对式(17)中不等式使用 Jensen 不等式和倒数凸组合引理[21],有

$$-\tau_1\int_{t-\tau_1}^{t}\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_1\dot{\boldsymbol{x}}(t)\mathrm{d}s \leqslant -(\boldsymbol{e}_1-\boldsymbol{e}_2)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_1(\boldsymbol{e}_1-\boldsymbol{e}_2)。 \quad (20)$$

$$-\tau_{21}\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_2\dot{\boldsymbol{x}}(s)\mathrm{d}s \leqslant \begin{bmatrix}\boldsymbol{e}_2-\boldsymbol{e}_3\\ \boldsymbol{e}_3-\boldsymbol{e}_4\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_2 & * \\ \boldsymbol{U} & \boldsymbol{R}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{e}_2-\boldsymbol{e}_3\\ \boldsymbol{e}_3-\boldsymbol{e}_4\end{bmatrix}。 \quad (21)$$

$$\mathrm{E}\{\mathrm{L}V_4(t)\} \leqslant \mathrm{E}\left\{\left(\boldsymbol{x}(t-\tau(\mathrm{t})) + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}(t)\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{x}(t-\tau(t)) + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}(t)) - \frac{1}{4}\delta_0\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{e}(t)\right\}。 \quad (22)$$

由注释 3 中的攻击能量限定条件可知:

$$\bar{\boldsymbol{\alpha}}\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}(t_k h))\boldsymbol{P}\boldsymbol{P}a(\boldsymbol{x}(t_k h)) \leqslant \bar{\alpha}(\boldsymbol{e}(t) + \boldsymbol{x}(t-\tau(t)))\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{P}\boldsymbol{G}(\boldsymbol{e}(t) + \boldsymbol{x}(t-\tau(t)))。 \quad (23)$$

结合式(3)及式(15)~(23)整理可得

$$\mathrm{E}\{\mathrm{L}V(t)\} \leqslant \boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(t)\hat{\boldsymbol{\Theta}}_{1,1}\boldsymbol{\zeta}(t) - \boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Z}(t) + \gamma^2\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\omega}(t)。 \quad (24)$$

式中:$\hat{\boldsymbol{\Theta}}_{1,1} = \boldsymbol{\Theta} = \hat{\boldsymbol{\Pi}} - \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\Delta}}\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$,$\hat{\boldsymbol{\Pi}} =$

$$\begin{bmatrix}
\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{1,1} & & & & & & & \\
\boldsymbol{R}_1 & \hat{\boldsymbol{\Pi}}_{2,2} & & & & & & \\
\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{1,3} & \hat{\boldsymbol{\Pi}}_{3,2} & \hat{\boldsymbol{\Pi}}_{3,3} & & & * & & \\
0 & \boldsymbol{U} & \hat{\boldsymbol{\Pi}}_{4,3} & \hat{\boldsymbol{\Pi}}_{4,4} & & & & \\
\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{5,1} & 0 & \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi} & 0 & \hat{\boldsymbol{\Pi}}_{5,5} & & & \\
\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2\boldsymbol{I} & & \\
\boldsymbol{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\boldsymbol{I} & \\
\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{8,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{\alpha}\boldsymbol{P}\boldsymbol{P}
\end{bmatrix};$$

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{1,1} = (\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}(\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A}) + \boldsymbol{Q}_1 + \boldsymbol{Q}_2 - \boldsymbol{R}_1$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{2,2} = -\boldsymbol{R}_1 - \boldsymbol{R}_2 - \boldsymbol{Q}_1$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{1,3} = (1-\bar{\alpha})((\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{3,2} = \boldsymbol{R}_2 - U$;$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{3,3} = -2\boldsymbol{R}_2 + \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{U} + \boldsymbol{\Phi}$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{4,3} = -\boldsymbol{U} + \boldsymbol{R}_2$;$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{4,4} = -\boldsymbol{Q}_2 - \boldsymbol{R}_2$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{5,1} = (1-\bar{\alpha})((\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{5,5} = \frac{1}{4}(1-\delta_0)\boldsymbol{\Phi}$;

$\hat{\boldsymbol{\Pi}}_{8,1} = \bar{\alpha}((\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$;

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{7\times 8} = \begin{bmatrix}
\tau_1\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{1,3} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{1,5} & \tau_1\boldsymbol{P}\boldsymbol{E} & \tau_1\boldsymbol{P} & \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,8} \\
\tau_{21}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{2,3} & 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{2,5} & \tau_{21}\boldsymbol{P}\boldsymbol{E} & \tau_{21}\boldsymbol{P} & \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{2,8} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{3,8} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{4,8} \\
\boldsymbol{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \boldsymbol{P}\boldsymbol{G} & 0 & \boldsymbol{P}\boldsymbol{G} & 0 & 0 & 0 \\
\beta\boldsymbol{F} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix};$$

$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,3}=\tau_1(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;

$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,5}=\tau_1(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,8}=\tau_1\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Sigma}_{2,3}=\tau_{21}(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Sigma}_{2,5}=\tau_{21}(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Sigma}_{2,8}=\tau_{21}\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;$\boldsymbol{\Sigma}_{3,8}=\mu\tau_1\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;

$\boldsymbol{\Sigma}_{4,8}=\mu\tau_{21}\boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}+\Delta\boldsymbol{B})\boldsymbol{K}$;

$$\hat{\boldsymbol{\Delta}}=\operatorname{diag}\{-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_1^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_2^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_1^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{P}\boldsymbol{R}_2^{-1}\boldsymbol{P},-\boldsymbol{I},-\bar{\alpha}\boldsymbol{X}\boldsymbol{X},-\boldsymbol{I}\}。$$

对式(24)使用不确定性引理[22],则:

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}}_{1,1}=\boldsymbol{\Theta}_{1,1}+\varepsilon_1\theta_1\theta_1^{\mathrm{T}}+\frac{1}{\varepsilon_1}\eta_1^{\mathrm{T}}\eta_1+\varepsilon_2\theta_2\theta_2^{\mathrm{T}}+\frac{1}{\varepsilon_2}\eta_2^{\mathrm{T}}\eta_2<0。\tag{25}$$

式中:$\theta_1=\operatorname{col}\{\boldsymbol{PH},\underbrace{0,\cdots,0}_{14}\}$;$\eta_1=[\boldsymbol{E}_a,(1-\bar{\alpha})\cdot\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K},0,0,\bar{\alpha}\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{K},\underbrace{0,\cdots,0}_{7}]$;$\eta_2=\operatorname{col}\{\underbrace{0,\cdots,0}_{8},\tau_1\boldsymbol{PH},\tau_{21}\boldsymbol{PH},\tau_1\boldsymbol{PH},\tau_{21}\boldsymbol{PH},0,0,0\}$;$\theta_2=\eta_1$,$\operatorname{col}\{\cdot\}$表示为列矩阵。

对式(25)进一步使用 Schur 补引理[23]后可得到式(12)。此时,若式(12)成立,则由式(24)可知,当 $\omega(t)=0$ 时,式(11)渐近稳定;当 $\omega(t)\neq0$ 时,在零初始条件下,有 $\|\boldsymbol{Z}(t)\|<\gamma^2\|\omega(t)\|$ 成立,故此时式(11)渐近稳定,且满足 H_∞ 性能指标 γ。

2 MF-DAETM 与控制器协同设计

定理 2 对于给定的正标量参数 τ_m、τ_M、δ_0、β、ε_1、ε_2、γ、$\bar{\alpha}$ 以及能量限定矩阵 $\boldsymbol{G}$ 和 H_∞ 性能指标 γ,如果存在对称矩阵 $\boldsymbol{X}>0$,$\hat{\boldsymbol{Q}}_i>0(i=1,2)$,$\hat{\boldsymbol{R}}_i>0(i=1,2)$ 和矩阵 $\boldsymbol{Y}$,以及适当维数的自由矩阵 $\bar{\boldsymbol{U}}$,使得式(26)~(27)成立,则在 FDI 攻击下的事件触发式(11)是渐近稳定的,且满足 H_∞ 性能指标 γ。并且控制器增益矩阵 $\boldsymbol{K}=\boldsymbol{Y}\boldsymbol{X}^{-1}$,事件触发权重矩阵 $\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{X}^{-1}\bar{\boldsymbol{\Phi}}\boldsymbol{X}^{-1}$。

$$\bar{\boldsymbol{\Theta}}=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{\Theta}}_{1,1} & * \\ \bar{\boldsymbol{\Theta}}_{2,1} & \bar{\boldsymbol{\Theta}}_{2,2}\end{bmatrix}<0;\tag{26}$$

$$\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{R}}_2 & * \\ \bar{\boldsymbol{U}} & \bar{\boldsymbol{R}}_2\end{bmatrix}>0。\tag{27}$$

式中:$\bar{\boldsymbol{\Theta}}_{1,1}=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{8\times8} & * \\ \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{7\times8} & \bar{\boldsymbol{\Delta}}_{7\times7}\end{bmatrix}$;$\bar{\boldsymbol{\Theta}}_{2,1}=\bar{\boldsymbol{\Psi}}_{4\times15}$;

$$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{8\times8}=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{1,1} & & & & & & & \\ \bar{\boldsymbol{R}}_1 & \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{2,2} & & & & & & \\ \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{1,3} & \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{3,2} & \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{3,3} & & & * & & \\ 0 & \bar{\boldsymbol{U}} & \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{4,3} & \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{4,4} & & & & \\ \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{5,1} & 0 & \frac{1}{2}\bar{\boldsymbol{\Phi}} & 0 & \bar{\boldsymbol{\Pi}}_{5,5} & & & \\ \boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2\boldsymbol{I} & & \\ \boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\boldsymbol{I} & \\ \bar{\alpha}(\boldsymbol{BY})^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{\alpha}\boldsymbol{I}\end{bmatrix};$$

$$\bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{7\times8}=\begin{bmatrix}\tau_1\boldsymbol{AX} & 0 & \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,3} & 0 & \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,5} & \tau_1\boldsymbol{E} & \tau_1\boldsymbol{I} & \tau_1\boldsymbol{BY} \\ \tau_{21}\boldsymbol{AX} & 0 & \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{2,3} & 0 & \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{2,5} & \tau_{21}\boldsymbol{E} & \tau_{21}\boldsymbol{I} & \tau_{21}\boldsymbol{BY} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\tau_1\boldsymbol{BY} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\tau_{21}\boldsymbol{BY} \\ \boldsymbol{CX} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{GX} & 0 & \boldsymbol{GX} & 0 & 0 & 0 \\ \beta\boldsymbol{FX} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix};$$

$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{1,1}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{XA}+\hat{\boldsymbol{Q}}_1+\hat{\boldsymbol{Q}}_2-\bar{\boldsymbol{R}}_1$;

$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{2,2}=-\bar{\boldsymbol{R}}_1-\bar{\boldsymbol{R}}_2-\hat{\boldsymbol{Q}}_1$;$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{3,1}=(1-\bar{\alpha})(\boldsymbol{BY})^{\mathrm{T}}$;

$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{3,2}=\bar{\boldsymbol{R}}_2-\bar{\boldsymbol{U}}$;$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{3,3}=-2\bar{\boldsymbol{R}}_2+\bar{\boldsymbol{U}}^{\mathrm{T}}+\bar{\boldsymbol{U}}+\bar{\boldsymbol{\Phi}}$;

$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{4,3}=-\bar{\boldsymbol{U}}+\bar{\boldsymbol{R}}_2$;$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{4,4}=-\hat{\boldsymbol{Q}}_2-\bar{\boldsymbol{R}}_2$;

$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{5,1}=(1-\bar{\alpha})(\boldsymbol{BY})^{\mathrm{T}}$;$\bar{\boldsymbol{\Pi}}_{5,5}=\frac{1}{4}(1-\delta_0)\bar{\boldsymbol{\Phi}}$;

$\bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{1,3}=\tau_1(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{BY}$;$\bar{\Sigma}_{1,5}=\tau_1(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{BY}$;

$\bar{\boldsymbol{\Sigma}}_{2,3}=\tau_{21}(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{BY}$;$\bar{\Sigma}_{2,5}=\tau_{21}(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{BY}$;

$\bar{\boldsymbol{\Psi}}_{1,1}=\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$;$\bar{\boldsymbol{\Psi}}_{2,1}=\boldsymbol{E}_a\boldsymbol{X}$;$\bar{\boldsymbol{\Psi}}_{2,3}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{Y}$;

$\bar{\boldsymbol{\Psi}}_{2,5}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{Y}$;$\bar{\boldsymbol{\Psi}}_{2,7}=\bar{\alpha}\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{Y}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{3,9}=\tau_1\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{\Psi}_{3,10}=\tau_{2,1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{3,11}=\tau_1\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{\Psi}_{3,12}=\tau_{2,1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{\Psi}_{4,1}=\boldsymbol{E}_a\boldsymbol{X}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{4,3}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{Y}$;$\boldsymbol{\Psi}_{4,5}=(1-\bar{\alpha})\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{Y}$;

$\boldsymbol{\Psi}_{4,8}=\boldsymbol{E}_b\boldsymbol{Y}$;$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{P}^{-1}$;

$\bar{\boldsymbol{\Theta}}_{2,2}=\operatorname{diag}\left\{-\varepsilon_1\boldsymbol{I},-\frac{1}{\varepsilon_1}\boldsymbol{I},-\varepsilon_2\boldsymbol{I},-\frac{1}{\varepsilon_2}\boldsymbol{I}\right\}$;

$\bar{\boldsymbol{\Delta}}_{7\times7}=\operatorname{diag}\{-2\sigma\boldsymbol{X}+\sigma^2\boldsymbol{R}_1,-2\sigma\boldsymbol{X}+\sigma^2\boldsymbol{R}_2,-2\sigma\boldsymbol{X}+\sigma^2\boldsymbol{R}_1,-2\sigma\boldsymbol{X}+\sigma^2\boldsymbol{R}_2,-\boldsymbol{I},-\sigma\bar{\alpha}^{-\frac{1}{2}}\boldsymbol{X}+\sigma^2\boldsymbol{I},-\boldsymbol{I}\}$;

$\mu=\sqrt{\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})}$;$\tau_1=\tau_m$;$\tau_2=\tau_M$;$\tau_{21}=\tau_2-\tau_1$。

证明:令 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{P}^{-1}$,$\bar{\boldsymbol{R}}_1=\boldsymbol{X}\boldsymbol{R}_1\boldsymbol{X}$,$\bar{\boldsymbol{R}}_2=\boldsymbol{X}\boldsymbol{R}_2\boldsymbol{X}$,$\hat{\boldsymbol{Q}}_1=\boldsymbol{X}\boldsymbol{Q}_1\boldsymbol{X}$,$\hat{\boldsymbol{Q}}_2=\boldsymbol{X}\boldsymbol{Q}_2\boldsymbol{X}$,$\bar{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{X}$,$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}$,$\boldsymbol{J}_1=\{\underbrace{\boldsymbol{X},\cdots,\boldsymbol{X}}_{5},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I},\underbrace{\boldsymbol{X},\cdots,\boldsymbol{X}}_{5},\underbrace{\boldsymbol{I},\cdots,\boldsymbol{I}}_{7}\}$,$\boldsymbol{J}_2=\{\boldsymbol{X},\boldsymbol{X}\}$。

对式(12)中的 Δ 项应用文献[24]中方法,在式(12)~(13)两旁分别左乘与右乘 $\boldsymbol{J}_1$、$\boldsymbol{J}_2$ 及其转置,可得式(26)~(27),证毕。

3 仿真验证

例 1 考虑具有如下数值仿真[25]:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0.2 & 0.1\\ 0.2 & -0.5\end{bmatrix};\boldsymbol{B}=[1\quad 1]。$$

选择采样周期 $h=0.1$ s,仿真时长为 50 s,系统其他参数选择如下:$\boldsymbol{C}=[1\quad 0]$,$\boldsymbol{E}=[1\quad 1]$,$\kappa=1$,$\sigma=0.1$,$\varepsilon_1=0.1$,$\varepsilon_2=0.1$,$\delta_0=0.05$,$\beta=0.1$,时延参数 $\tau_m=0.01s$,$\tau_M=0.5$ s,干扰参数 $\omega(t)=e^{-0.25}\sin 2\pi t$,$f(\boldsymbol{x}(t),t)=\mathrm{col}\{-0.1\boldsymbol{x}_1\ \sin\boldsymbol{x}_2\ 0.1\boldsymbol{x}_2,\sin\boldsymbol{x}_2\}$,$\boldsymbol{F}=\mathrm{diag}\{0.1\quad 0.1\}$ 不确定性参数:$\boldsymbol{H}=\mathrm{diag}\{0.1\quad 0.1\}$,$\boldsymbol{E}_a=\mathrm{diag}\{0.5\quad 0.5\}\boldsymbol{E}_b=[0.1\quad 0.2]\boldsymbol{D}(t)=\mathrm{diag}\{\sin t\quad \cos t\}$ 网络攻击能量限定矩阵 $\boldsymbol{G}=\mathrm{diag}\{0.1\quad 0.2\}$,网络攻击的数学期望 $\bar{\alpha}=0.2$,主体攻击函数为 $a(\boldsymbol{x}(t_k h))=\mathrm{col}\{\tan h(-0.1\boldsymbol{x}_2(t_k h))\tan h(0.2\boldsymbol{x}_1(t_k h))$,$H_\infty$ 性能指标 $\gamma=1$。

通过求解定理 2 的 LMI 可得

$$\boldsymbol{K}=[-0.296\ 3\quad -0.044\ 9];$$

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}0.914\ 6 & 0.195\ 4\\ 0.195\ 4 & 60.873\ 3\end{bmatrix}。$$

给定系统初值 $\boldsymbol{x}_0=[1\quad -1]$,系统的仿真实况图 1 所示。由图 1(a)的系统状态响应可以看出采用本文所设计的控制器能够有效镇定系统,验证了所提方法的有效性,并满足 H_∞ 性能指标 γ。

图 1(b)展示了系统在 MF-DAETM 下的触发时刻与触发间隔图,在 500 次采样数据中,成功传输数据 56 次,触发比率为 11.2%,平均触发时间为 0.892 9 s,大于采样周期,表明无 Zeno 行为发生。本文所设计的触发机制节省了 88.88% 的网络资源,证明了本文 MF-DAETM 的有效性。

图 1(c)为 FDI 攻击时刻图,当 $\alpha(t)=1$ 时表明系统遭受了 FDI 攻击;当 $\alpha(t)=0$ 表明采样数据被成功传输。在释放的 56 次数据中,共有 13 次数据被篡改,攻击率为 21.21%。主体攻击函数图如图 1(d)所示,其表现为系统保持状态的双曲正切函数。结合图 1 可知,尽管系统有 21.21% 的传输数据被篡改,但采用本文设计的控制器后,系统仍然能趋于稳定,这表明控制器具有良好的鲁棒性。

例 2 考虑如下的卫星姿态控制系统[13],θ_1 和 θ_2 表示偏航角,k 和 d 分别表示连接弹簧的扭矩系数和黏性阻尼系数,T_c 表示控制扭矩,J_1 和 J_2 表示转动惯量。

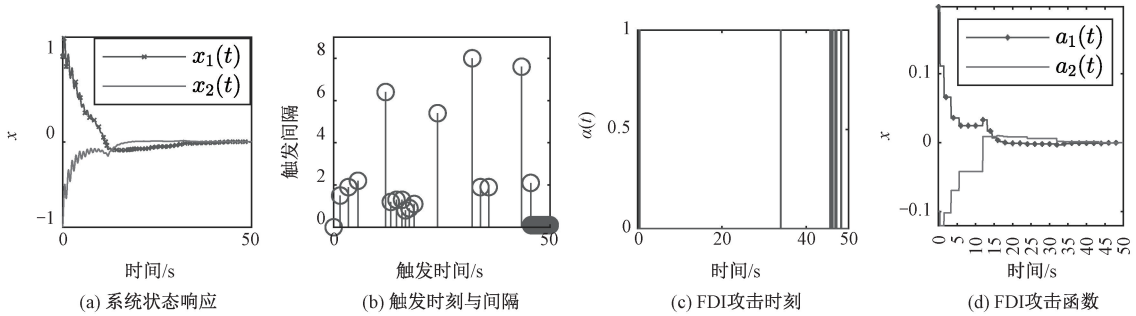
$$\begin{cases}J_1\ddot{\theta}_1+d(\dot{\theta}_1-\dot{\theta}_2)+k(\theta_1-\theta_2)=T_c;\\ J_2\ddot{\theta}_2+d(\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1)+k(\theta_2-\theta_1)=T_0。\end{cases}\tag{28}$$

令 $\boldsymbol{x}=\mathrm{col}\{x_1,x_2,x_3,x_4\}=\mathrm{col}\{\theta_2,\dot{\theta}_2,\theta_1,\dot{\theta}_1\}$,$u=T_c$。将其刻画为式(1),其状态方程部分参数如下:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ -\frac{k}{J_2} & -\frac{d}{J_2} & -\frac{k}{J_2} & \frac{d}{J_2}\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{k}{J_1} & \frac{d}{J_1} & \frac{k}{J_1} & -\frac{d}{J_1}\end{bmatrix};\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\\frac{1}{J_1}\end{bmatrix}。$$

其中,$J_1=J_2=1$;$k=0.09$;$d=0.021\ 9$。

选取采样周期 $h=0.1$ s,仿真时长为 50 s,系统的其他参数给定如下:$\boldsymbol{C}=[0.05\quad 0\quad 0\quad 0]$,$\boldsymbol{E}=[0.02\quad 0\quad 0.02\quad 0.02]^{\mathrm{T}}$,$\kappa=1$,$\sigma=1$,$\varepsilon_1=1$,$\varepsilon_2=1$,$\delta_0=0.1$,$\beta=0.1$。时延参数 $\tau_m=0.1$ s,$\tau_M=0.5$ s。干扰参数 $\omega(t)=e^{-0.25}\sin 2\pi t$,$\boldsymbol{F}=\mathrm{diag}\{0.1\quad 0.1\quad 0.1\quad 0.1\}$,$f(\boldsymbol{x}(t),t)=\mathrm{col}\{0.3\boldsymbol{x}_1\sin\boldsymbol{x}_1-0.2\boldsymbol{x}_2\sin\boldsymbol{x}_2 0.3\boldsymbol{x}_3\sin\boldsymbol{x}_3-0.2\boldsymbol{x}_4\sin\boldsymbol{x}_4$。不确定性参数 $\boldsymbol{H}=\mathrm{diag}\{0.01\quad 0.01\quad 0.01\quad 0.01\}$;$\boldsymbol{E}_a=\mathrm{diag}\{0.01\quad 0.01\quad 0.01\quad 0.01\}$;$\boldsymbol{E}_b=[0.01\quad 0.05\quad 0.01\quad 0.01]$;$\boldsymbol{D}(t)=\mathrm{diag}\{\sin t\quad \cos t\quad \sin t\quad \cos t\}$。网络攻击能量限定矩阵 $\boldsymbol{G}=\mathrm{diag}\{-0.1\quad 0.5\quad 0.2\quad -0.6\}$,网



(a) 系统状态响应 (b) 触发时刻与间隔 (c) FDI攻击时刻 (d) FDI攻击函数

图 1 仿真实况图

Figure 1 Simulation situation diagram

络攻击的数学期望 $\bar{\alpha}=0.2$,主体攻击函数为 $a(\boldsymbol{x}(t_k h))=\mathrm{col}\{\tan h(-0.5\boldsymbol{x}_2(t_k h)),\tan h(0.2\boldsymbol{x}_3(t_k h)),\tan h(-0.6\boldsymbol{x}_4(t_k h)),\tan h(0.1\boldsymbol{x}_1(t_k h))$ 性能指标 $\gamma=12$。通过求解定理 2 的 LMI 可得

$$\boldsymbol{K}=[-0.040\ 1\quad -1.298\ 1\quad -0.351\ 7\quad -0.922\ 3];$$

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix} 2.162\ 4 & -0.982\ 7 & 4.522\ 5 & -0.387\ 9\\ -0.982\ 7 & 0.538\ 9 & -2.610\ 6 & 0.384\ 8\\ 4.522\ 5 & -2.610\ 6 & 15.888\ 1 & -2.585\ 0\\ -0.387\ 9 & 0.384\ 8 & -2.585\ 0 & 16.759\ 0 \end{bmatrix}。$$

给定系统初值 $\boldsymbol{x}_0=[0.2\quad -0.3\quad 0.3\quad -0.2]^{\mathrm{T}}$,系统的状态响应如图 2 所示。可知采用本文所提方法能有效实现系统的镇定,并满足 H_∞ 性能指标 γ。

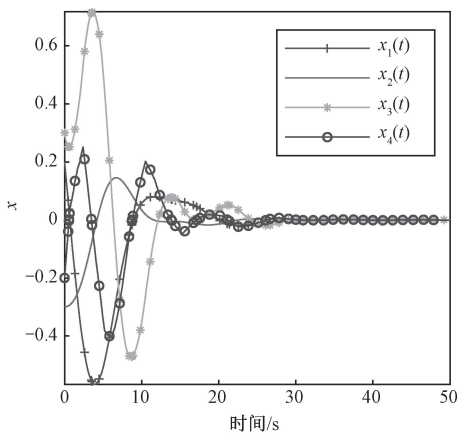


图 2　系统状态响应曲线

Figure 2　The state response curve of the system

由图 3 中的触发时刻与触发间隔图可以看出,在 500 次采样数据中,成功传输数据 101 次,触发比率为 20.2%,平均触发时间为 0.495 s,大于采样时间,表明无 Zeno 行为发生。此外,采用本文所设计的触发机制能节省 79.8%的网络资源,这表明本文所设计的触发机制是有效的。

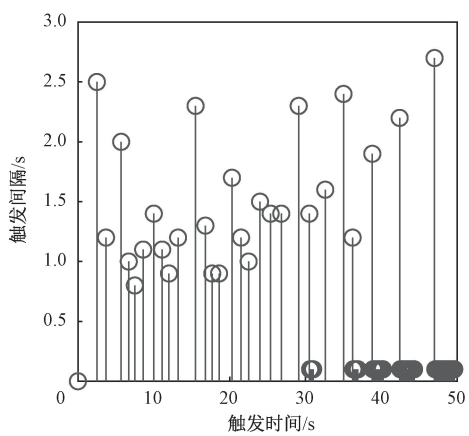


图 3　触发时间与触发间隔

Figure 3　Trigger time and trigger interval

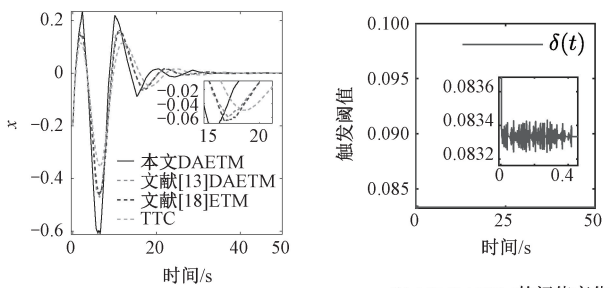
为进一步验证 MF-DAETM 的优越性,表 1 对比了在本例中应用 4 种不同触发机制的结果。图 4 展示了在四种触发机制下系统状态 $\boldsymbol{x}_4$ 的响应曲线以及 MF-DAETM 的阈值变化图。图 5 则表示 FDI 攻击时刻图与攻击函数图。

表 1　不同触发机制结果对比

Table 1　Comparison of results of different trigger methods

项目	TTC	文献[13] ETM	文献[18] DAETM	MF-DAETM
释放数据量	500	235	218	101
平均触发时间/s	0.100	0.213	0.229	0.495
数据释放率/%	100.0	47.0	43.6	20.2

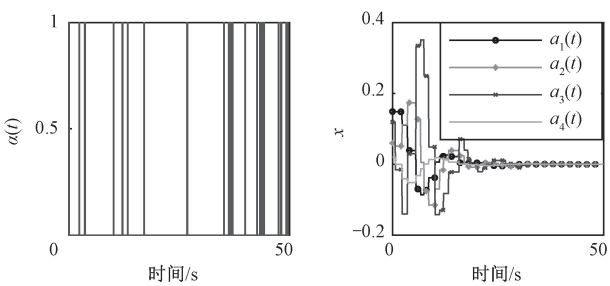
注:TTC 为时间触发机制。



(a) 不同触发机制下x的状态响应曲线　　(b) MF-DAETM的阈值变化

图 4　不同触发机制下系统状态对比及 MF-DAETM 阈值变化

Figure 4　Comparison of system states under different triggers and threshold changes of MF-DAETM



(a) FDI攻击时刻　　(b) FDI攻击函数

图 5　FDI 攻击情况图

Figure 5　Graph of FDI attack situation

结合表 1 与图 4 可知,本文所设计的 MF-DAETM 在资源节约方面要优于文献[13]和[18]中的触发机制以及时间触发机制。在本文所提方法下,系统虽牺牲了部分动态性能,但达到稳定的时间基本一致,且节省了更多网络资源,能较好实现 QoS 与 QoC 的平衡,这体现了本文 MF-DAETM 的优越性。此外,从图 4(b)可知,触发机制的阈值是动态变化的,这表明了 MF-DAETM 的动态自适应特性。

图 5 则表示 FDI 攻击时刻图与攻击函数图,其中 $\alpha(t)=1$ 表示系统遭受了 FDI 攻击,传输数据被攻击函数篡改;$\alpha(t)=1$ 表示采样数据被成功传输。可以看出,在触发机制释放的 101 次采样数据中,共有 27 次数据被篡改,攻击率为 26.7%。由图 5 可知

FDI 的主体攻击函数图表现为系统保持状态的双曲正切函数。结合图 1 可知,尽管有 26.7%的数据被篡改,但系统仍然能趋于稳定,进一步验证了本文所设计控制器具有良好的鲁棒性。

4 结论

(1)本文构建了一种新的 FDI 攻击模型,并综合考虑网络诱导时延、系统不确定性、外界干扰、非线性特性、事件触发机制,建立了统一的系统模型。

(2)本文引入均值滤波思想,提出了一种新型事件触发机制 MF-DAETM,该机制能有效避免意外触发,节约网络资源。在两个仿真实验中,使用本文所设计的 MF-DAETM,在保证系统控制性能的前提下,能分别节省 88.88%和 79.8%的网络资源,具有优越性。

(3)本文推导出保证系统具有 H_∞ 性能的稳定性判据,并提出了事件触发机制与鲁棒控制器的协同设计方法。在所提控制策略下,在数据被篡改 21.21%及 26.70%的情况下系统仍能趋于稳定,具有良好的鲁棒性能。

参考文献:

[1] Zhang Wei, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.

[2] Zhu Chaoqun, Yao Xingqi. H_∞ robust control for networked systems with access constraints and packet dropout [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2024, 50(5): 86-93. [祝超群, 姚兴启. 具有访问约束和数据丢包的网络化系统 H_∞ 鲁棒控制[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(5): 86-93.]

[3] Liu Xia, Zhou Xiaoyu, Xiang Biao. Adaptive event-triggered dynamic output feedback control for networked control systems under hybrid attacks[J]. IET Control Theory & Applications, 2024, 18(1): 1-13.

[4] Zhang Xiaodan, Xiao Feng, Wei Bo, et al. Resilient control for networked control systems with dynamic quantization and DoS attacks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2024, 34(1): 71-90.

[5] Jing Yongjun, Wu Hui, Chen Xu, et al. Botnet detection method based on graph reconstruction and subgraph mining[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 34-41. [景永俊, 吴悔, 陈旭, 等. 基于图重构和子图挖掘的僵尸网络检测方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(1): 34-41.]

[6] Lu Weifan, Yin Xiuxia. Observer memory-based event-triggered predictive control for networked control systems under DoS attacks[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(7): 1335-1344. [卢韦帆, 尹秀霞. DoS 攻击下网络化控制系统基于观测器的记忆型事件触发预测控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(7): 1335-1344.]

[7] Li Lulu, Zhang Huihui, Sun Yifan, et al. Dynamic quantization-driven stability of networked control systems under DoS attacks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2024, 34(2): 793-809.

[8] Peng Datian, Dong Jianmin, Cai Zhongmin, et al. On the stability of cyber-physical systems under false data injection attacks[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 196-205. [彭大天, 董建敏, 蔡忠闽, 等. 假数据注入攻击下信息物理融合系统的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 196-205.]

[9] Yu Xiaotian, Zhu Junwei, Feng Yu. Secure estimation for a class of nonlinear networked systems under false data injection[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(11): 2407-2412. [俞晓天, 朱俊威, 冯宇. 针对一类非线性系统的虚假数据注入攻击估计方法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(11): 2407-2412.]

[10] Cao Xueyu, Liu Shan, Cen Jian. Observer-based adaptive neural asynchronous H_∞ Control for fuzzy Markov jump systems under FDI attacks[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(16): 107147.

[11] Li Xiaohang, Ahn C K, Zhang Weidong, et al. Asynchronous event-triggered-based control for stochastic networked Markovian jump systems with FDI attacks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(9): 5955-5967.

[12] Xu Longyu, Chen Yong, Li Meng, et al. Extended observer-based hybrid tracking control strategy for networked system with FDI attacks[J]. Asian Journal of Control, 2023, 25(4): 3092-3104.

[13] Li Fuqiang, Gao Lisai, Zheng Baozhou, et al. Event-triggered secure control for networked systems under deception attacks[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(5): 264-270. [李富强, 郜丽赛, 郑宝周, 等. 欺骗攻击下网络化系统事件触发安全控制[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(5): 264-270.]

[14] Mittapally H, Ghosh S, Kamal S, et al. Sequential output information based predictive control for event-triggered networked control systems[J]. ISA Transactions, 2024, 147: 71-78.

[15] Yu Hao, Chen Tongwen. Periodic event-triggered networked control systems subject to large transmission delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(1): 63-79.

[16] Qiu Hongling, Shen Jun, Xing Wei, et al. Event-trig-

gered secure control of positive networked control systems under multi-channels attacks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2025, 35(2): 630-641.

[17] Zhang Chen, Ye Dan, Wei Minghan, et al. Dynamic event-triggered resilient network-level control for microgrids subject to FDI attacks[J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(11): 9195-9207.

[18] Ning Zhaoke, Wang Tong, Song Xiaona, et al. Fault detection of nonlinear stochastic systems *via* a dynamic event-triggered strategy[J]. Signal Processing, 2020, 167: 107283.

[19] Zhang J, Peng Chen, Du Da Jun, et al. Adaptive event-triggered communication scheme for networked control systems with randomly occurring nonlinearities and uncertainties[J]. Neurocomputing, 2016, 174: 475-482.

[20] Yue Dong, Tian Engang, Han Qinglong. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(2): 475-481.

[21] Park P, Ko J W, Jeong C. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2011, 47(1): 235-238.

[22] Xie Lihua. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty[J]. International Journal of Control, 1996, 63(4): 741-750.

[23] Zhang Fuzhen. The schur complement and its applications[M]. New York: Springer-Verlag, 2005.

[24] Shao Hanyong, Han Qinglong. On stabilization for systems with two additive time-varying input delays arising from networked control systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349(6): 2033-2046.

[25] Xie Xuhuan, Li Shanbin, Xu Bugong. Stabilisation of networked control systems under a novel stochastic-sampling-based adaptive event-triggered scheme[J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(9): 1158-1169.

Event-triggered Security Control for Networked Control Systems under FDI Attacks

LIU Shanzhong, JIANG Zhenhua, ZHANG Yaping

(School of Information Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: This paper addresses the security control problem of a class of networked control systems subject to network-induced delays, uncertainties, external disturbances, and nonlinearities under false data injection (FDI) attacks. Firstly, to tackle the issue of network resource wastage caused by burst data in existing triggering mechanisms, a dynamic adaptive event-triggering mechanism based on mean filtering (MF-DAETM) is proposed. By incorporating the mean filtering concept, this mechanism effectively reduces accidental triggers induced by burst data, thereby conserving network resources. Secondly, the false data injection attacks are modeled using Bernoulli variables, and a unified closed-loop time-delay system model is constructed by comprehensively considering network-induced delays, uncertainties, external disturbances, and nonlinearities. Based on this model, sufficient conditions for ensuring the H_∞ asymptotic stability of the closed-loop system are derived using the Lyapunov-Krasovskii functional method and linear matrix inequality techniques. Furthermore, a co-design method for MF-DAETM and a robust controller is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed approach is validated through numerical simulations and a practical case study. The results demonstrate that the system can still achieve stability even when 21.2% and 26.7% of the control data are compromised, exhibiting strong robustness. In the case study, compared to the pre-improved triggering mechanism, MF-DAETM improves resource utilization by 23.4%.

Keywords: networked control systems; false data injection; mean filtering; event-triggered; uncertainty; nonlinearity