

控制与决策

Control and Decision

一类具有饱和发生率的时滞恶意病毒传播模型的分岔控制策略

陈实, 肖敏, 陈功, 王正新

引用本文:

陈实, 肖敏, 陈功, 王正新. 一类具有饱和发生率的时滞恶意病毒传播模型的分岔控制策略[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1903–1908.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1712>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于移动传感器/执行器网络的时滞分布参数系统镇定控制](#)

Stabilization control for a class of distributed parameter systems with time–delay based on mobile sensor and actuator networks
控制与决策. 2021, 36(8): 1955–1962 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1309>

[基于Razumikhin方法的时变时滞非线性系统的输出反馈镇定](#)

Output–feedback stabilization for nonlinear systems with time–varying delay based on Razumikhin–type approach
控制与决策. 2021, 36(11): 2812–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0304>

[事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 \$H_\infty\$ 故障检测](#)

Event–triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays
控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

[带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制](#)

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation
控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

[时变参数不确定离散时间系统的预见控制](#)

Preview control for discrete–time polytopic time–varying systems
控制与决策. 2021, 36(12): 3074–3082 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0373>

一类具有饱和发生率的时滞恶意病毒传播模型的分岔控制策略

陈实¹, 肖敏^{1†}, 陈功¹, 王正新²

(1. 南京邮电大学自动化学院、人工智能学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学理学院, 南京 210023)

摘要: 考虑非线性的饱和发生率, 建立一种刻画信息物理融合系统 (cyber-physical systems, CPS) 中恶意病毒传播的 SIRS (susceptible-infected-recovered-susceptible) 模型. 为了避免因 Hopf 分岔的产生致使恶意病毒传播扩散, 采用参数调节法和状态反馈法相结合的混合分岔控制策略, 研究信息物理融合系统的 Hopf 分岔控制问题, 建立受控系统的稳定性条件和分岔判据, 探明控制增益参数对 Hopf 分岔点和分岔极限环幅值的影响规律, 并给出分岔阈值与增益参数间的关系图. 数值仿真结果表明, 所提出的混合分岔控制策略不仅能够改变 Hopf 分岔点的位置, 而且可以有效调节极限环幅值的大小, 使得信息物理融合系统产生预期的动力学行为, 有效降低恶意病毒传播的危害.

关键词: 信息物理融合系统; 非线性动力学; Hopf 分岔; 混合分岔控制策略; 饱和发生率; 时滞

中图分类号: O175.13; N941; O231.2

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1712

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 陈实, 肖敏, 陈功, 等. 一类具有饱和发生率的时滞恶意病毒传播模型的分岔控制策略[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1903-1908.

Bifurcation control strategy of malicious virus spreading model with time delays and saturated incidence rate

CHEN Shi¹, XIAO Min^{1†}, CHEN Gong¹, WANG Zheng-xin²

(1. College of Automation and College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, the nonlinear saturated incidence rate is considered to establish one type of the susceptible-infected-recovered-susceptible (SIRS) model characterizing the spread of malicious virus in cyber-physical systems (CPS). To avoid the spread of malicious virus due to the occurrence of the Hopf bifurcation, a hybrid bifurcation controller combining the parameter adjustment method and state feedback method is designed to research the Hopf bifurcation control of the cyber-physical systems, and establish the stability conditions and bifurcation criteria of the controlled system. The influence of the control gain parameter on the Hopf bifurcation point and the amplitude of bifurcation limit cycle is explored, and the relationship between the bifurcation threshold and the gain parameter is given. The numerical simulation results show that the hybrid bifurcation control strategy proposed can not only chance the position of the Hopf bifurcation point, but also greatly adjust the amplitude of the limit cycle, which makes CPS generate the the expected dynamic behaviors to effectively reduce the impact of the malicious virus spreading.

Keywords: cyber-physical systems; nonlinear dynamics; Hopf bifurcation; hybrid bifurcation control strategy; saturated incidence rate; time delays

0 引言

信息物理融合系统强调信息网络与物理世界的交互, 涉及未来网络环境下海量异构数据的融合, 是能够实现虚拟世界和实际物理世界互联与协同的下一代智能系统^[1]. 目前, CPS 的研究主要集中在数据收集和管理^[2-3]. 文献[2]研究了专有且高效的 CPS 中的数据上传机制, 文献[3]研究了用于工业 CPS 中事件检测的数据收集, 而对 CPS 内部运行机制的研究则

一代智能系统^[1]. 目前, CPS 的研究主要集中在数据收集和管理^[2-3]. 文献[2]研究了专有且高效的 CPS 中的数据上传机制, 文献[3]研究了用于工业 CPS 中事件检测的数据收集, 而对 CPS 内部运行机制的研究则

收稿日期: 2020-12-08; 录用日期: 2021-03-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073172, 61573194); 江苏省自然科学基金项目(BK20181389, BK20181387).

†通讯作者. E-mail: candymanxm2003@aliyun.com.

少之又少. 所以当前的研究应着重于研究其内部状态, 比如系统内部计算机节点的动力学行为^[4]和可信度^[5]等. 一般情况下, 内部计算机节点根据所处的状态可以分为易感态节点、感染态节点和恢复态节点, 而上述节点可以是如调制解调器的数据电路终接设备, 也可以是如主机的数据终端设备.

作为虚拟世界与物理世界高度融合的CPS, 其内部的恶意病毒传播是十分致命的. 2010年出现的“震网”病毒^[6]给伊朗的核设施带来了沉重打击, 2011年出现的“Duqu”病毒^[7]和2012年出现的“火焰”病毒^[8]给众多国家信息安全带来了巨大影响. 恶意病毒的传播使得CPS出现了许多动力学行为, 其中Hopf分岔作为一种典型的动力学行为得到学者们广泛研究^[9-11]. Hopf分岔是指系统参数变化经过临界值时, 平衡点由稳定变为不稳定并出现周期解的动力学行为. 因此, 在研究恶意病毒的传播时, 不应只研究其动力学行为的性质, 而是需要着重研究如何控制这些动力学行为.

常见的分岔控制方法有时滞反馈控制、PID控制、状态反馈控制、混合控制等^[12-14]. 文献[12]通过时滞反馈控制器对捕食-被捕食系统的Hopf分岔进行了控制; 文献[13]通过PID控制器对具有时滞的小世界网络进行了分岔控制. 而在CPS中加入控制器, 并不需要十分精确地将受控对象控制到某一特定值, 其主要目的是影响受控系统的动力学行为. 混合控制是在反馈控制器的基础上, 同时对系统参数进行调节以实现精度或干扰能力较高的控制任务. 相对于一般的单状态反馈控制而言, 混合控制进一步考虑了参数扰动的控制作用. 在工程应用中加入控制器能够有效防止系统的平衡点过早出现周期解, 推迟Hopf分岔, 为杀毒软件的介入争取到宝贵的时间.

1 模型的建立

恶意病毒进入CPS后, 首先传播到一些易受感染的节点, 这些节点被称作易感态节点. 传播至易感态节点后恶意病毒将处于休眠状态, 一旦被激活将迅速感染节点, 被感染的节点称为感染态节点, 感染态节点会继续将恶意病毒传播给其他易感态节点. 杀毒软件介入后开始清理恶意病毒, 部分感染态节点恢复正常, 恢复后的节点被称为恢复态节点. 部分恢复态节点存在能够避免受到此类恶意病毒再次攻击的免疫期, 之后恢复态节点将再次成为易感态节点. 于是得到以下模型:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = \mu - \frac{\beta S(t)I(t - \tau_1)}{1 + \alpha I(t - \tau_1)} + \varepsilon R(t - \tau_3) - \mu S(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} = \frac{\beta S(t)I(t - \tau_1)}{1 + \alpha I(t - \tau_1)} - \sigma I(t - \tau_2) - \mu I(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} = \sigma I(t - \tau_2) - \varepsilon R(t - \tau_3) - \mu R(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $S(t)$ 、 $I(t)$ 和 $R(t)$ 分别表示 t 时刻易感态节点、感染态节点和恢复态节点的分布密度; 节点接入率与退出率相等均为 μ ; $\frac{\beta S(t)I(t)}{1 + \alpha I(t)}$ 为非线性饱和发生率, β 为感染率, α 为预防效果系数; σ 为恢复率, ε 为转化率; τ_1 表示潜伏期时滞, τ_2 表示感染期时滞, τ_3 表示免疫期时滞.

对系统(1)进行稳定性分析后, 得到正平衡点 $E^* = (S^*, I^*, R^*)$, 其中

$$S^* = \frac{(\alpha + 1)(\varepsilon + \mu) + \sigma}{\left(\alpha + \frac{\beta}{\sigma + \mu}\right)(\varepsilon + \mu) + \frac{\beta}{\sigma + \mu}\sigma},$$

$$I^* = \frac{\beta S^* - (\sigma + \mu)}{\alpha(\sigma + \mu)}, \quad R^* = \frac{\sigma I^*}{\varepsilon + \mu}.$$

考虑到CPS的工程意义, 与恶意病毒的攻防应在极短的时间完成, 否则将丧失保护信息安全的最佳时机. 因此, 潜伏期时滞、感染期时滞与免疫期时滞仅存在极小的数值差, 不妨假设 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau$. 对原系统(1)进行坐标变换, 将平衡点 E^* 移至原点 O , 即令 $S_1 = S - S^*$, $I_1 = I - I^*$, $R_1 = R - R^*$, 得到

$$\begin{cases} \frac{dS_1(t)}{dt} = \mu - \frac{\beta(S_1(t) + S^*)(I_1(t - \tau) + I^*)}{1 + \alpha(I_1(t - \tau) + I^*)} + \varepsilon(R_1(t - \tau) + R^*) - \mu(S_1(t) + S^*), \\ \frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{\beta(S_1(t) + S^*)(I_1(t - \tau) + I^*)}{1 + \alpha(I_1(t - \tau) + I^*)} - \sigma(I_1(t - \tau) + I^*) - \mu(I_1(t) + I^*), \\ \frac{dR_1(t)}{dt} = \sigma(I_1(t - \tau) + I^*) - \varepsilon(R_1(t - \tau) + R^*) - \mu(R_1(t) + R^*). \end{cases} \quad (2)$$

通过上述坐标变化, 系统(1)在正平衡点 $E^* = (S^*, I^*, R^*)$ 与系统(2)在平衡点 $O = (0, 0, 0)$ 附近的动力学行为等价.

对系统(2)中 I_1 节点施加混合控制, 其控制策略为

$$k_1 F(t, \tau) + k_2 (I_1(t) + I_1(t)^3).$$

其中: $F(t, \tau)$ 为系统(2)中第2个等式的右端, k_1 为可调节参数, k_2 为状态反馈参数. 于是得到如下受控系

统:

$$\begin{cases} \frac{dS_1(t)}{dt} = \mu - \frac{\beta(S_1(t) + S^*)(I_1(t - \tau) + I^*)}{1 + \alpha(I_1(t - \tau) + I^*)} + \\ \quad \varepsilon(R_1(t - \tau) + R^*) - \mu(S_1(t) + S^*), \\ \frac{dI_1(t)}{dt} = k_1 \left[\frac{\beta(S_1(t) + S^*)(I_1(t - \tau) + I^*)}{1 + \alpha(I_1(t - \tau) + I^*)} - \right. \\ \quad \left. \sigma(I_1(t - \tau) + I^*) - \mu(I_1(t) + I^*) \right] + \\ \quad k_2(I_1(t) + I_1(t)^3), \\ \frac{dR_1(t)}{dt} = \sigma(I_1(t - \tau) + I^*) - \varepsilon(R_1(t - \tau) + \\ \quad R^*) - \mu(R_1(t) + R^*). \end{cases} \quad (3)$$

注1 关于Hopf的定义,以系统(1)为例,当 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 的值超过分岔阈值时,系统(1)的平衡点 E^* 会丧失稳定性,出现周期解,从相平面上则体现为出现极限环。

2 混合分岔控制策略

系统(3)在平衡点 $O = (0, 0, 0)$ 处线性化后的特征方程为

$$\lambda^3 + m_1\lambda^2 + m_2\lambda + m_3 + (n_1\lambda^2 + n_2\lambda + n_3)e^{-\lambda\tau} + (l_1\lambda + l_2)e^{-2\lambda\tau} = 0. \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} m_1 &= z_1 + 2\mu + \mu k_1 - k_2, \\ m_2 &= \mu(z_1 + \mu) + \mu(z_1 + 2\mu)k_1 - (z_1 + 2\mu)k_2, \\ m_3 &= \mu^2(z_1 + \mu)k_1 - \mu(z_1 + \mu)k_2, \\ n_1 &= \varepsilon - (z_2 - \sigma)k_1, \\ n_2 &= \varepsilon(z_1 + \mu) - [(z_2 - \sigma)(z_1 + 2\mu) + \varepsilon\mu + \\ &\quad z_1 z_2]k_1 - \varepsilon k_2, \\ n_3 &= \mu[(\varepsilon + \sigma)(\mu + z_1) - \mu z_2]k_1 - \varepsilon(z_1 + \mu)k_2, \\ l_1 &= \varepsilon(\sigma - z_2)k_1, \quad l_2 = \varepsilon\mu(\sigma - z_2)k_1, \\ z_1 &= \frac{\beta I^*}{1 + \alpha I^*}, \quad z_2 = \frac{\beta S^*}{(1 + \alpha I^*)^2}. \end{aligned}$$

1) 当 $\tau = 0$ 时,式(4)转化为

$$\lambda^3 + (m_1 + n_1)\lambda^2 + (m_2 + n_2 + l_1)\lambda + m_3 + n_3 + l_2 = 0. \quad (5)$$

若下列条件成立:

$$\begin{aligned} H_1 : m_1 + n_1 &> 0, \quad m_2 + n_2 + l_1 > 0, \\ m_3 + n_3 + l_2 &> 0, \\ (m_1 + n_1)(m_2 + n_2 + l_1) &> m_3 + n_3 + l_2, \end{aligned}$$

则根据劳斯-赫尔维兹稳定性判据可知,式(5)的根均具有负实部。

2) 当 $\tau > 0$ 时,式(4)等价于

$$\begin{aligned} (\lambda^3 + m_1\lambda^2 + m_2\lambda + m_3)e^{\lambda\tau} + n_1\lambda^2 + n_2\lambda + \\ n_3 + (l_1\lambda + l_2)e^{-\lambda\tau} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

设 $\lambda = i\omega (\omega > 0)$ 是式(6)的一个根,分离实部虚部后整理可得

$$\cos(\omega\tau) = \frac{A(\omega)}{C(\omega)}, \quad \sin(\omega\tau) = \frac{B(\omega)}{C(\omega)}.$$

其中

$$\begin{aligned} A(\omega) &= (n_1\omega^2 - n_3)(-m_1\omega^2 + m_3 - l_2) + \\ &\quad n_2\omega(\omega^3 - m_2\omega + l_1\omega), \\ B(\omega) &= (n_1\omega^2 - n_3)(\omega^3 - m_2\omega - l_1\omega) - \\ &\quad n_2\omega(-m_1\omega^2 + m_3 + l_2), \\ C(\omega) &= (\omega^3 - m_2\omega)^2 + (-m_1\omega^2 + m_3)^2 - \\ &\quad (l_1\omega)^2 - l_2^2. \end{aligned}$$

根据 $\cos^2(\omega\tau) + \sin^2(\omega\tau) = 1$ 可得

$$C^2(\omega) - A^2(\omega) - B^2(\omega) = 0,$$

整理后得到一个关于 ω 的12次多项式。

令 $y(\omega) = C^2(\omega) - A^2(\omega) - B^2(\omega)$,于是得到 $y(\omega) = \omega^{12} + D_n\omega^n + D, n = 1, 2, \dots, 11$. 其中: D_n 是 n 次 ω 项前的系数, $D = [(m_3 + l_2)^2 - n_3^2](m_3 - l_2)^2$.

若以下条件成立:

$$H_2 : (m_3 + l_2)^2 < n_3^2, \quad m_3 \neq l_2,$$

此时 $y(0) = D < 0$,并且 $\lim_{\omega \rightarrow +\infty} y(\omega) = +\infty$,则 $y(\omega) = 0$ 一定存在一个正根 ω_0 使得式(6)有一对纯虚根 $\pm i\omega_0$,此时,有

$$\tau_0 = \frac{1}{\omega_0} \left[\arccos \left(\frac{A(\omega_0)}{C(\omega_0)} \right) \right].$$

对式(6)两边关于 τ 求导并取倒数,得

$$\left[\frac{d\lambda}{d\tau} \right]^{-1} = \frac{E}{F} - \frac{\tau}{\lambda}.$$

其中

$$\begin{aligned} E &= (3\lambda^2 + 2m_1\lambda + m_2)e^{\lambda\tau} + (2n_1\lambda + n_2) + \\ &\quad l_1e^{-\lambda\tau}, \\ F &= -\lambda(\lambda^3 + m_1\lambda^2 + m_2\lambda + m_3)e^{\lambda\tau} + \\ &\quad \lambda(l_1\lambda + l_2)e^{-\lambda\tau}. \end{aligned}$$

设 $\lambda(\tau) = \eta(\tau) + i\omega(\tau)$ 是式(6)的根,且满足 $\eta(\tau_0) = 0, \omega(\tau_0) = \omega_0$,于是

$$\operatorname{Re} \left[\frac{d\lambda}{d\tau} \right]_{\tau=\tau_0}^{-1} = \frac{M_1 N_1 + M_2 N_2}{N_1^2 + N_2^2}.$$

其中

$$\begin{aligned} M_1 &= (-3\omega_0^2 + m_2 + l_1) \cos(\omega_0\tau_0) + \\ &\quad (-2m_1\omega_0) \sin(\omega_0\tau_0) + n_2, \end{aligned}$$

$$M_2 = 2m_1\omega_0 \cos(\omega_0\tau_0) + (-3\omega_0^2 + m_2 - l_1) \sin(\omega_0\tau_0) + 2n_1\omega_0,$$

$$N_1 = (-\omega_0^4 + m_2\omega_0^2 - l_1\omega_0^2) \cos(\omega_0\tau_0) + (-m_1\omega_0^3 + m_3\omega_0 + l_2\omega_0) \sin(\omega_0\tau_0),$$

$$N_2 = (m_1\omega_0^3 - m_3\omega_0 + l_2\omega_0) \cos(\omega_0\tau_0) + (-\omega_0^4 + m_2\omega_0^2 + l_1\omega_0^2) \sin(\omega_0\tau_0).$$

显然

$$\text{sign}\left\{\text{Re}\left[\frac{d\lambda}{d\tau}\right]_{\tau=\tau_0}\right\} = \text{sign}\left\{\text{Re}\left[\frac{d\lambda}{d\tau}\right]_{\tau=\tau_0}^{-1}\right\}.$$

如果以下条件成立:

$$H_3: M_1N_1 + M_2N_2 > 0,$$

则

$$\text{Re}\left[\frac{d\lambda}{d\tau}\right]_{\tau=\tau_0} > 0,$$

故满足穿越条件.

综上所述,得到以下定理.

定理1 若条件 H_1 、 H_2 和 H_3 成立,则:

- 1) $\tau \in [0, \tau_0)$ 时,系统(3)在平衡点 O 附近局部渐近稳定;
- 2) $\tau = \tau_0$ 时,系统(3)在平衡点 O 处发生Hopf分岔.

注2 从 τ_0 的表达式可以看出, τ_0 的值与 k_1 和 k_2 有关.因此在固定其他参数时,可以通过调整 k_1 、 k_2 达到改变 τ_0 取值的目的.

3 数值仿真

本节分别对参数调节法、状态反馈法和混合分岔控制策略的控制效果进行分析和仿真,下述研究均在保证 H_1 、 H_2 和 H_3 均成立的情况下进行.各参数取值为 $\mu = 0.05, \beta = 0.38, \alpha = 0.1, \varepsilon = 0.15, \sigma = 0.1, \tau = 9.3$.

- 1) 无控状态($k_1 = 1, k_2 = 0$).

在此状态下,系统(3)的动力学行为等价于原系统(1),分岔阈值为9.2184,令其为 τ'_0 .当 $\tau = 9.3$ 时,系统(3)失去稳定性,发生Hopf分岔,如图1所示.

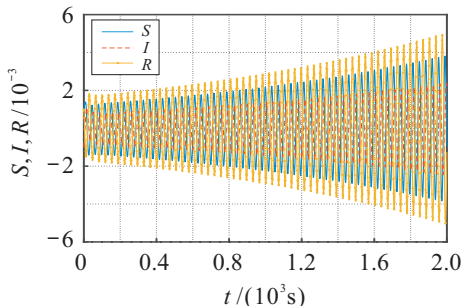


图1 $k_1 = 1, k_2 = 0, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形
2) 参数调节法($k_2 = 0$).

当 $0 < k_1 < 1$ 时,受控系统(3)的分岔阈值 τ_0 即可超过原系统(1)分岔阈值 τ'_0 ,实现推迟Hopf分岔的目的;当 $k_1 > 1$ 时,受控系统(3)的分岔阈值 τ_0 将小于原系统(1)分岔阈值 τ'_0 ,提前引发Hopf分岔.

对上述分析结果进行仿真分析,仿真结果如图2和图3所示.由图2可知,在可调节参数 $k_1 = 0.5$ 的作用下,系统(3)最终趋于稳定状态,系统稳定区间扩大,Hopf分岔被推迟,此时 $\tau_0 = 10.7466$;由图3可知,通过增大可调节参数 k_1 至1.1,系统稳定区间缩小,受控系统(3)提前发生了Hopf分岔,此时 $\tau_0 = 8.8563$.

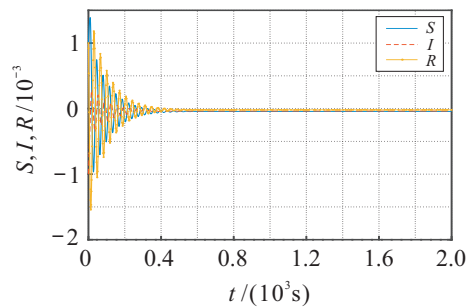


图2 $k_1 = 0.5, k_2 = 0, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

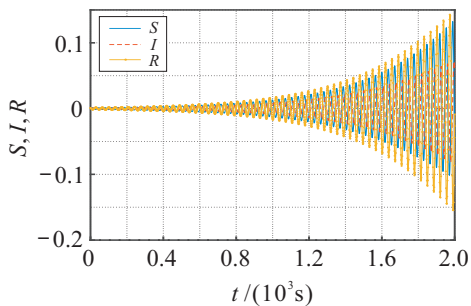


图3 $k_1 = 1.1, k_2 = 0, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

通过上述实验对比可以发现,可调节参数 k_1 能够有效地使系统的分岔点提前或滞后,可以改变系统的动力学行为.

通过进一步研究得到分岔阈值 τ_0 随 k_1 变化的关系,如图4所示.

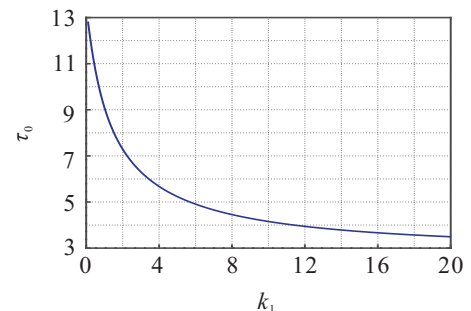


图4 τ_0 随 k_1 变化的关系曲线

- 3) 状态反馈法($k_1 = 1$).

当 $-0.1182 < k_2 < -0.0416$ 时,受控系统(3)的分岔阈值 τ_0 即可超过原系统(1)分岔阈值 τ'_0 ,实现推

迟Hopf分岔的目的;当 $-0.0416 < k_2 < 0$ 时,受控系统(3)的分岔阈值 τ_0 将小于原系统(1)分岔阈值 τ'_0 ,提前引发Hopf分岔.

对上述分析结果进行仿真分析,仿真结果如图5和图6所示.由图5可知,在状态反馈参数 $k_2 = -0.1$ 的作用下系统(3)最终趋于稳定状态,系统稳定区间扩大,Hopf分岔被推迟,此时 $\tau_0 = 9.5719$;由图6可知,通过调节状态反馈参数 k_2 至 -0.03 ,受控系统(3)提前发生了Hopf分岔,此时 $\tau_0 = 9.1718$,同时周期振荡的幅值也有明显变化.

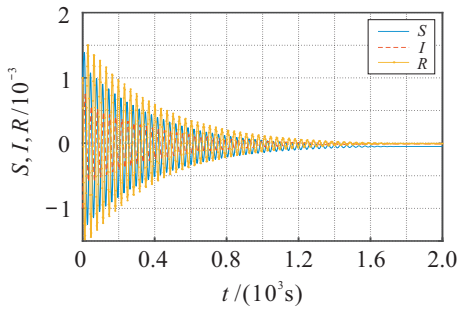


图5 $k_1 = 1, k_2 = -0.1, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

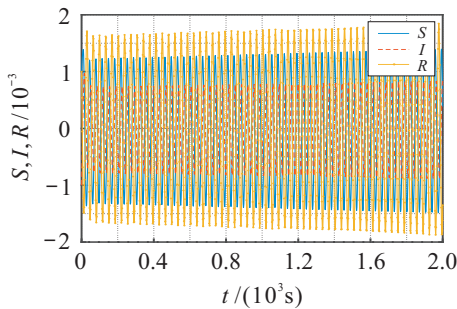


图6 $k_1 = 1, k_2 = -0.03, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

通过上述实验对比可以发现,状态反馈参数 k_2 不仅可以影响分岔点位置,还能对发生分岔时各状态节点周期振荡的幅值产生明显影响.通过进一步研究得到分岔阈值 τ_0 随 k_2 变化的关系,如图7所示.

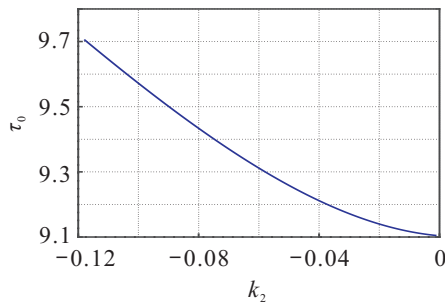


图7 τ_0 随 k_2 变化的关系曲线

4) 混合分岔控制策略.

图8中 $k_1 = 0.5, k_2 = -0.11$;图9中 $k_1 = 0.5, k_2 = -0.01$.在图8和图9中固定 k_1 的同时调整 k_2 的取值,可以看出,当受控系统(3)在 k_1 的作用下最终趋于稳定时, k_2 的取值并不会对系统的稳定性产生影

响.

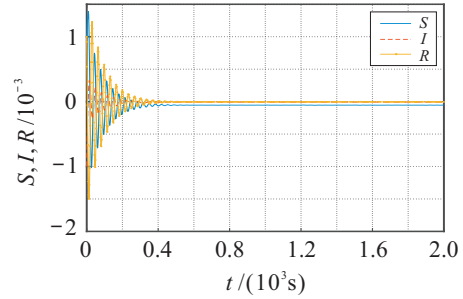


图8 $k_1 = 0.5, k_2 = -0.11, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

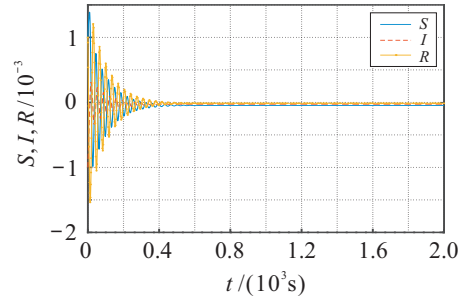


图9 $k_1 = 0.5, k_2 = -0.01, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

图10中 $k_1 = 1.1, k_2 = -0.11$.由图3和图10可以看出,当受控系统(3)在 k_1 的作用下发生分岔时,可以通过减小 k_2 来推迟分岔阈值,使系统重新稳定.

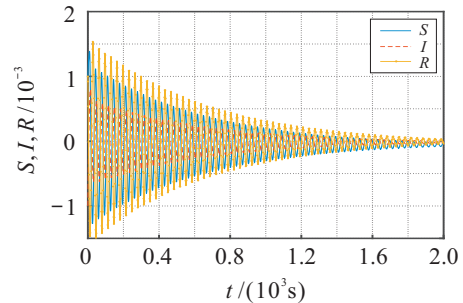


图10 $k_1 = 1.1, k_2 = -0.11, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

图11中 $k_1 = 1.1, k_2 = -0.01$;图12中 $k_1 = 1.1, k_2 = -0.04$.由图11和图12可以看出,虽然在 k_1 的作用下受控系统(3)在平衡点处发生Hopf分岔,但是在不同的 k_2 影响下,其周期振荡的幅值发生了较为明显的变化,因此,可以通过调整 k_2 的取值对Hopf分岔的极限环幅值进行调整,直至达到预期效果.

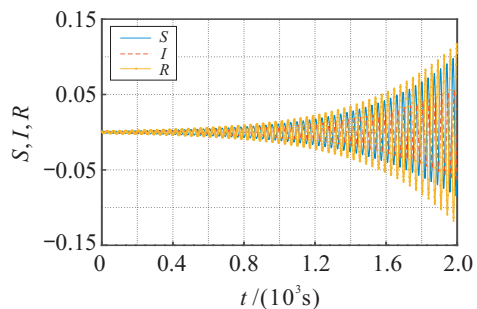


图11 $k_1 = 1.1, k_2 = -0.01, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

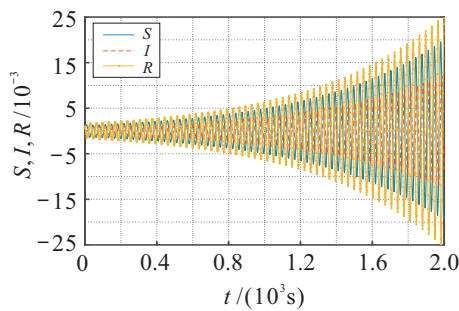


图12 $k_1 = 1.1, k_2 = -0.04, \tau = 9.3$ 时系统(3)的波形

4 结论

本文利用非线性动力学理论建立了恶意病毒传播的受控模型,结合参数调节法和状态反馈法设计了一种混合分岔控制策略,并研究其分岔控制效果.数值仿真表明,本文采用的混合分岔控制策略能够有效改变Hopf分岔点的位置及发生分岔时极限环的幅值,弥补了单一分岔控制方式的缺陷,有利于增强系统的稳定性和可控性,从而获得预期的动力学行为,降低潜在风险,具有较大的实际意义.

参考文献(References)

- [1] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166.
(Wang Z J, Xie L L. Cyber-physical systems: A survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1157-1166.)
- [2] Cai Z P, Zheng X. A private and efficient mechanism for data uploading in smart cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(2): 766-775.
- [3] Tao H, Bhuiyan M Z A, Rahman M A, et al. TrustData: Trustworthy and secured data collection for event detection in industrial cyber-physical system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3311-3321.
- [4] Yu Z H, Ouyang J, Li S S, et al. Formal modeling and control of cyber-physical manufacturing systems[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10): 168781401772547.
- [5] Yu Z H, Zhou L J, Ma Z Q, et al. Trustworthiness modeling and analysis of cyber-physical manufacturing systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 26076-26085.
- [6] Kim S, Heo G, Zio E, et al. Cyber attack taxonomy for digital environment in nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(5): 995-1001.
- [7] Khan I A, Pi D C, Khan Z U, et al. HML-IDS: A hybrid-multilevel anomaly prediction approach for intrusion detection in SCADA systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 89507-89521.
- [8] 锁延锋, 王少杰, 秦宇, 等. 工业控制系统的安全技术与应用研究综述[J]. 计算机科学, 2018, 45(4): 25-33.
(Suo Y F, Wang S J, Qin Y, et al. Summary of security technology and application in industrial control system[J]. Computer Science, 2018, 45(4): 25-33.)
- [9] Xiao M, Zheng W X, Jiang G P, et al. Qualitative analysis and bifurcation in a neuron system with memristor characteristics and time delay[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(5): 1974-1988.
- [10] Tao B B, Xiao M, Jiang G P, et al. Stability, bifurcation prediction and optimal control of a delayed integer-order small-world network based on the fractional-order PD control policy of variable order[J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(15): 10288-10311.
- [11] 周帅, 肖敏, 邢蕊桃, 等. 非对称双环神经网络系统的稳定性和Hopf分岔[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2019, 11(4): 446-452.
(Zhou S, Xiao M, Xing R T, et al. Stability and Hopf bifurcation of asymmetric double-ring structured neural network[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2019, 11(4): 446-452.)
- [12] Huang C D, Li H, de Cao J. A novel strategy of bifurcation control for a delayed fractional predator-prey model[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 347: 808-838.
- [13] Tao B B, Xiao M, Jiang G P, et al. Bifurcation control of small-world networks with delays VIA PID controller[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(2): 818-830.
- [14] 魏立新, 赵默林, 范锐, 等. 基于改进鲨鱼优化算法的自抗扰控制参数整定[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 816-820.
(Wei L X, Zhao M L, Fan R, et al. Parameter tuning of active disturbance rejection control based on ameliorated shark smell optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 816-820.)

作者简介

陈实(1997-), 男, 硕士生, 从事信息物理融合系统、恶意软件传播动力学的研究, E-mail: 646802311@qq.com;

肖敏(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制理论、神经网络、复杂网络、分数阶系统、反常扩散系统、信息物理融合系统等研究, E-mail: candymanxm2003@aliyun.com;

陈功(1997-), 男, 硕士生, 从事生物竞争网络、反应扩散的研究, E-mail: 1346731561@qq.com;

王正新(1984-), 男, 副教授, 博士, 从事复杂网络、多智能体系统、微分方程及应用等研究, E-mail: zwang@njupt.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)