

集体防御机制下的网络行动同步建模和稳定性

王刚^{*①} 胡鑫^① 马润年^① 刘文斌^②

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(温州大学计算机科学与工程学院 温州 325035)

摘要: 该文从网络安全集体防御机制及其同步分析入手, 引入不确定性因子, 建立了网络行动同步的改进模型。在此基础上, 运用 Lyapunov 函数分析了网络行动同步的稳定性, 提出同步判据, 重点分析了系统的边连接概率、网络规模、备用节点数和网络不确定性概率等对同步能力及稳定性的影响, 最后给出了仿真验证。理论分析和仿真实验表明, 系统的边连接概率、网络规模、备用节点数概率与第 2 大特征值、最小特征值与第 2 大特征值之比均呈负相关关系, 与网络安全集体防御行动的全局同步稳定和局部同步稳定呈负相关关系。

关键词: 网络行动; 集体防御; 机制; 同步; 稳定性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)06-1515-05

DOI: 10.11999/JEIT170619

Synchronization Modeling and Stability of Cyberspace Operation Based on Collective Defensive Mechanism

WANG Gang^① HU Xin^① MA Runnian^① LIU Wenbin^②

^①(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(College of Computer Science and Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Based on cyberspace security collective defensive mechanism and its synchronization, uncertainty factors are introduced in the synchronization of cyberspace operation, and the improved synchronization model is established. The stability of cyberspace operation synchronization is analyzed by utilizing Lyapunov function, and synchronization criteria are put forward. What is more, factors that influenced synchronization ability and stability are explored, such as edge connection probability, cyberspace scale, standby elements, and uncertainty probability. Finally, simulations are given. Theoretical research and simulations show that the factors of cyberspace operation synchronization are negatively related with the second eigenvalue and the ratio of minimum eigenvalue to the second eigenvalue, and corresponding negatively related with the cyberspace ecosystem's global synchronization stability and local synchronization stability.

Key words: Cyberspace operation; Collective defensive; Mechanism; Synchronization; Stability

1 引言

构建健康弹性的网络生态系统是寻求网络安全的普遍做法。和传统网络安全策略相比, 网络生态系统借鉴了生物体的病毒扩散-免疫理念, 强调集体行动和防御, 通过网络中诸要素间的协同和作用, 进行网络态势感知、侦察、监视、攻击和防御等行动, 从而减少网络遭受攻击的可能性或免受攻击, 维持网络的健康稳定运行^[1-3]。网络行动同步和稳定, 是网络内部诸要素围绕同一任务目标开展集体

协作行动的一致性问题, 是组织协同网络诸要素在集体防御下进行自动化、互操作和身份认证等网络行为的基础^[1-4]。随着网络行动的复杂化和不确定性增强, 网络行动同步及其稳定性的要求和难度进一步加大, 应重点解决好集体防御机制下的网络行动同步及其稳定性^[2], 从而提升网络安全防御能力。

现有网络同步研究主要集中在网络同步策略设计、模型构建和算法及稳定性分析等方面。如针对网络结构同步的自适应控制设计^[5], 多重边融合自适应同步^[6], 复杂动态网络的双重变时滞同步^[7], 网络结构的变量耦合同步稳定性^[8]; 网络结构和同步能力关系^[9], 结构与参量不确定的网络同步^[10]。随着网络攻防博弈策略和技术的快速发展, 网络安全呈现出自动化、立体深度和集体防御趋势, 网络安全和同

收稿日期: 2017-06-28; 改回日期: 2018-01-08; 网络出版: 2018-02-05

*通信作者: 王刚 wglxl@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61573017, 61572367, 61401499)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61573017, 61572367, 61401499)

步面临新的需求。(1)网络发生随机故障和遭受网络攻击等随机性和不确定性增强,在传统同步模型基础上应增加随机性或不确定性因子;(2)集体防御机制下的网络行动同步具有区域化动态集体防御特性,需要考虑网络行动同步的深度优化问题;(3)需要明确集体防御机制下诸因素对网络行动同步能力的影响,以便于网络行动同步控制策略设计。

2 集体防御机制下的同步建模

2.1 集体防御机制下的同步

从要素关联和作用关系看,网络诸要素间的关联和协作共享构成了一个连续线性的动态系统,并通过集体防御提升网络的安全可靠、自愈修复和态势感知能力,实施网络的实时动态安全防护^[1-4],可划分为4个阶段,如图1所示。(1)监视阶段,网络诸要素协调有序、信息共享,对健康网络进行安全动态监视,通过同步实现网络安全实时动态监控;(2)检测阶段,网络诸要素交互共享网络攻击源信息,对网络进行安全分析检测,通过同步实现网络安全威胁的精确侦察检测;(3)防御阶段,网络诸要素优势互补、态势共享,对网络进行安全防护,通过同步实现网络安全的态势感知、动态防御;(4)修复阶段,网络诸要素相互协调、共同作用,对受攻击后的网络进行安全修复,通过同步实现网络安全的实时动态自愈修复。

影响同步的主要因素:(1)网络诸要素间的通信连接关系,作用网络的信息收发、处理和共享等。(2)网络规模,影响网络信息的获取、共享效率和网络受攻击的程度。(3)网络要素的状态变更机制,如网络备用要素在网络遭受攻击损坏情况下替换受损要素,新建通信连接关系。(4)网络行为的复杂性和不确定性,如网络自身故障发生的随机性和遭受对手网络攻击的不确定性^[1,2]。

2.2 同步模型

考虑 N 个网络诸要素共同构成连续时间耗散耦合动态网络^[11]。针对集体防御机制下网络环境和遭

受网络攻击的复杂不确定性,在传统模型^[12]基础上增加不确定性因子,可得新的网络行动同步模型。

$$\dot{X}_i(t) = F(X_i(t)) + c \sum_{j=1}^N l_{ij} H(X_j(t)) + Z(X_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

若集体防御达到同步稳定状态,即当 $t \rightarrow \infty$ 时,状态 $x_1(t) = x_2(t) = \dots = x_N(t) = s(t)$, $\lim_{t \rightarrow \infty} X_i(t) = S(t)$,

式(1)中耦合控制项消失,即 $\lim_{t \rightarrow \infty} c \sum_{j=1}^N l_{ij} H(X_j(t)) = 0$ 。其中, $X_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iN}(t))^T \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为节点 i 的状态向量,对应网络要素 i 所处的行动轨迹状态; $F: \mathbf{R}^N \rightarrow \mathbf{R}^N$ 为连续可微的函数, $F(X_i(t))$ 为节点 i 所满足的网络动力学函数,对应网络要素 i 的运行轨迹; $S(t) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为单个孤立节点的解(或达到同步状态的解)^[9],对应达到同步稳定状态时网络诸要素所处状态变量,表明在同步状态下开展集体防御的网络诸要素的结构、参数性能和运行轨迹趋于一致;常数 $c > 0$ 为耦合强度,对应网络诸要素间的信息连通程度; $H: \mathbf{R}^N \rightarrow \mathbf{R}^N$ 是连续可微的函数,为网络各节点状态变量之间的内耦合函数^[6], $H(X_j(t))$ 表示网络诸要素间的信息输出关系矩阵; $Z(X_i(t))$ 为网络要素 i 所对应的不确定性函数,对应网络发生随机故障和遭受网络攻击等不确定性; $L = (l_{ij})_{N \times N} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为网络的拓扑结构(外耦合矩阵)^[12],当所有节点状态均达到同步时,该耦合项自动消失,对应网络诸要素间的信息连接状态矩阵,若要素 i 与要素 j 之间具有信息连接关系,则 $l_{ij} = l_{ji} = 1$,反之, $l_{ij} = l_{ji} = 0, (i \neq j)$ 。为满足耦合约束条件^[12],定义对角元为

$$l_{ii} = - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N l_{ij} = - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N l_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

3 同步能力及稳定性分析

3.1 稳定性分析

运用主稳定性函数方法^[13],求解式(1)的变分方程。令 ξ_i 为第 i 个节点状态的变分,则

$$\dot{\xi}_i = DF(S)\xi_i + c \sum_{j=1}^N l_{ij} DH(S)\xi_j + DZ(S)\xi_i \quad (3)$$

其中, $DF(S)$, $DH(S)$ 和 $DZ(S)$ 分别为 $F(S)$, $H(S)$ 和 $Z(S)$ 关于 S 的雅可比矩阵^[12]。令 $\Gamma = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N]$, 矩阵 L 分解为 $L = PLP^{-1}$, 其中 $L = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$, λ_i 为 L 的第 i 大特征值。根据文献[13]中引理 1-1, 矩阵 L 存在一个为 0 的特征值, 其余

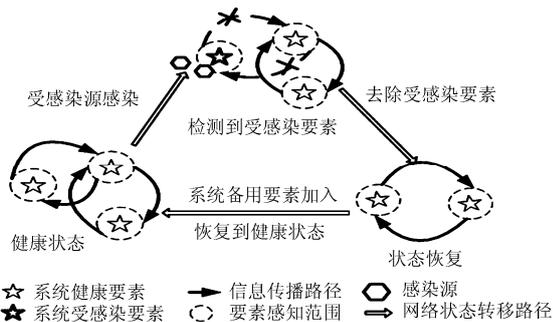


图1 网络安全集体防御机理

特征值均为负值。则式(3)可表示为

$$\dot{\Gamma} = \mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S})\Gamma + c\mathbf{D}\mathbf{H}(\mathbf{S})\Gamma\mathbf{P}\mathbf{L}\mathbf{P}^{-1} + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})\Gamma \quad (4)$$

等式两边同时乘 \mathbf{P} , 令 $\mathbf{X} = \Gamma\mathbf{P}$, 式(4)可表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = [\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + c\mathbf{A}\mathbf{D}\mathbf{H}(\mathbf{S}) + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]\mathbf{X} \quad (5)$$

应用 Lyapunov 指数法^[14]分析网络行动同步稳定性, 其同步化区域 Ω 与最大 Lyapunov 指数 μ_{\max} 的有关。如果信息连通度 c 与连接矩阵 \mathbf{L} 特征值的乘积在同步化区域 Ω 内(即 $c\lambda_k \in \Omega$), 则该区域为网络行动同步区域^[9,12]。对于集体防御机制下的网络行动, 随着 μ_{\max} 与 $c\lambda_k$ 大小取值的不同, 讨论全局同步和局部同步两类情况: (1)全局同步。令其所对应的同步区域 $\Omega = (-\infty, \varepsilon)$, 其中 $\varepsilon \in (-\infty, 0)$, 如果满足方程 $c\lambda_k \leq c\lambda_2 < \varepsilon$, 即 $0 < \varepsilon/\lambda_2 < c$, 则网络全局同步稳定。显然, λ_2 值越小, 全局同步能力越强, 稳定性越强; (2)局部同步。令对应的同步区域 $\Omega = (\vartheta, \varepsilon)$, 其中 $-\infty < \vartheta < \varepsilon < 0$, 如果满足方程 $c\lambda_2 < \varepsilon, c\lambda_N > \vartheta$, 即 $\lambda_N/\lambda_2 < \vartheta/\varepsilon$, 则局部同步稳定, 其中 λ_N/λ_2 为最小特征值与第 2 大特征值的比值。显然, λ_N/λ_2 值越小, 局部同步能力越强, 稳定性越强。

3.2 同步判据

判据 1 对动力网络(式(1)), $\lambda_1 = 0, \lambda_1 > \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_N$ 为矩阵 \mathbf{L} 的特征值。设 \mathbf{P} 为 $n \times n$ 阶对称阵, \mathbf{E}_n 为 $n \times n$ 阶单位阵, 常数 $\beta > 0$, 若对 $\forall \lambda_k, (k = 2, 3, \dots, N)$ 存在 $c\lambda_k \leq d$ 满足方程

$$\begin{aligned} & [\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + d\mathbf{H} + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]^T \mathbf{P} \\ & + \mathbf{P}[\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + d\mathbf{H} + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})] \leq -\beta\mathbf{E}_n \end{aligned} \quad (6)$$

则网络同步稳定。

证明 构造 Lyapunov 函数 $V_k = \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X}, (k = 2, 3, \dots, N)$, 并对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_k &= \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{P} \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^T \{[\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + c\lambda_k \mathbf{H} \\ & + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]^T \mathbf{P} + \mathbf{P}[\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + c\lambda_k \mathbf{H} + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]\} \mathbf{X} \end{aligned} \quad (7)$$

将 $c\lambda_k \leq d$ 代入式(7), 由式(6)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_k &\leq \mathbf{X}^T \{[\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + d\mathbf{H} + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]^T \mathbf{P} \\ & + \mathbf{P}[\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + d\mathbf{H} + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]\} \mathbf{X} \leq -\beta\mathbf{X}^T \mathbf{X} < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

根据 Lyapunov 稳定判据, 可以得出网络同步稳定。

证毕

判据 2 对动力网络(式(1)), 令最大 Lyapunov 指数为 μ_{\max} , 若信息输出函数 $\mathbf{H} = \mathbf{E}_n$, 且满足 $|c\lambda_2| > \mu_{\max}$, 则网络同步稳定。

证明 将 $\mathbf{H} = \mathbf{E}_n$ 代入式(5)得

$$\dot{\mathbf{X}} = [\mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{S}) + c\mathbf{A}\mathbf{E}_n + \mathbf{D}\mathbf{Z}(\mathbf{S})]\mathbf{X}, k = 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

对于 $\forall \lambda_i$, 式(9)横截 Lyapunov 指数满足 $\eta_b(\lambda_i) = \mu_b + c\lambda_i, b = 1, 2, \dots, n$ 。为使系统同步稳定, 则满足

$\eta_b(\lambda_i) < 0$, 即 $\mu_b + c\lambda_i \leq \mu_{\max} + c\lambda_i < 0$, 由矩阵 \mathbf{L} 特征值 $\lambda_1 = 0, \lambda_1 > \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_N$, 得 $\mu_{\max} + c\lambda_2 < 0$, 因此 $|c\lambda_2| > \mu_{\max}$, 网络同步稳定。证毕

3.3 同步影响因素

(1)边连接概率: 边连接概率指网络中边的数量与网络构成要素总和的比值, 即

$$p = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N l_{ij}}{N}, i \neq j \quad (10)$$

其中, 网络边是指网络诸要素间建立的通信连接关系, p 影响式(10)中 l_{ij} 的取值和矩阵特征值 λ_k , 即影响 λ_2 和 λ_N/λ_2 的值, 影响网络同步能力。

(2)网络规模: 令 δ_{ij} 为 N 扩大后网络新增边连接, 由式(10)可得

$$p^* = \frac{\sum_{i=1}^{N^*} \sum_{j=1}^{N^*} l_{ij}^*}{N^*}, i \neq j \quad (11)$$

其中, N^* 为扩大后的网络规模, p^* 为网络规模扩大后的边连接概率, 通信连接 $l_{ij}^* = l_{ij} + \delta_{ij}$ 。 N 通过改变 p^* 来改变 λ_2 和 λ_N/λ_2 的值, 影响网络同步能力。

(3)备用节点数: 替换遭受攻击受损要素的网络备用要素的数量。令 δ'_{ij} 为网络备用要素加入后网络新增边连接, 由式(10)和式(11)可得

$$p' = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N l'_{ij}}{N}, i \neq j \quad (12)$$

其中, p' 为网络备用要素加入后的边连接概率, 通信连接 $l'_{ij} = l_{ij} + \delta'_{ij}$ 。网络备用要素通过改变 p' 来改变 λ_2 和 λ_N/λ_2 的值, 影响网络同步能力。

(4)不确定性概率: 因网络故障或网络遭受攻击后受损要素的数量与网络要素总和的比值

$$f = n'/N \quad (13)$$

代入(10)式, 可得

$$p'' = \frac{\sum_{i=1}^{N-fN} \sum_{j=1}^{N-fN} l_{ij}}{(N-fN)}, i \neq j \quad (14)$$

其中, f 为不确定性概率, n' 为网络故障或网络遭受攻击后受损要素的数量, p'' 为网络不确定性概率发生后的边连接概率, $N-fN$ 为移除受损要素后网络构成要素。移除网络受损要素, 矩阵 \mathbf{L} 也将相应移走 $(N-fN) \times (N-fN)$ 维的网络要素, 相应 λ_2 和 λ_N/λ_2 的值发生变化, 进而影响网络同步能力。

4 仿真分析

针对具有拓扑结构的连续时间耦合动态网络, 重点分析复杂性和不确定性对网络行动同步的影响, 考虑边连接概率、网络规模、备用节点数和不确定性概率等情况。边连接情况以随机概率设计, 网络规模和备用节点数可人为灵活设置, 网络节点设定小于 1000, 不确定性概率在(0,0.1)之间选择^[12]。

4.1 边连接概率 p 对同步能力的影响

令 p 在 $(0,1)$ 内取值, 步长为 0.05。图 2 和图 3 分别给出了在 $N = 100$ 和 $N = 400$ 条件下, p 对网络全局同步能力、局部同步能力及其稳定性的影响。由图 2 可知, 当 $p = 0$ 时, λ_2 趋近于 0, 全局同步能力最低, 网络不稳定; 随着 p 逐渐增大, λ_2 值逐渐降低, 最终趋近于 $-N$, 全局同步能力逐渐增强, 并逐渐趋于稳定。由图 3 可知, $p = 0$ 时, λ_N/λ_2 值达到最大, 局部同步能力最低, 系统不稳定, 随着 p 逐渐增大, λ_N/λ_2 值逐渐降低稳定于某一特定值, 局部同步能力逐渐增强趋于稳定。

4.2 网络规模 N 对同步能力的影响

令 N 在 $(10,1000)$ 内取值, 步长为 2。图 4 和图 5 分别给出了 $p = 0.05$ 和 $p = 0.1$ 条件下, 网络规模对全局同步能力、局部同步能力及其稳定性的影响。由图 4 可知, 当 $N \rightarrow 0$ 时, λ_2 趋近于 0, 无法实现同步; 随着 N 增大, λ_2 逐渐变小, 全局同步能力逐渐增强并趋于稳定; 由图 5 可知, 当 $N \rightarrow 0$ 时, λ_N/λ_2 最大, 局部同步能力最低, 网络不稳定, 随着 N 不断扩大, λ_N/λ_2 值逐渐变小, 并趋于某一特定值, 局部同步能力逐渐增强, 并逐渐趋于稳定。

4.3 备用节点数 m 对同步能力的影响

令 N 在 $(10,500)$ 内取值, 步长为 10, 备用节点数分别取 $m = 5, 10, 15$ 。考虑备用要素与网络规模关系, 综合网络规模和备用节点数对全局同步能力、同步能力及其稳定性的影响, 如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 当 m 一定时, λ_2 随 N 的增加不断下降, 全局同步能力逐渐增强, 当网络规模达到一定时(如 $N > 100$), λ_2 只与 m 有关, 全局同步稳定; 当 N 一定时, λ_2 随 m 的增大而降低, 全局同步能力逐渐增强并趋于稳定; 由图 7 可知, 当 m 一定时, λ_N/λ_2 随 N 的增加而降低, 局部同步能力逐渐增强, 当网络规模达到一定时(如 $N > 300$), λ_2 只与 m 有关, 全局同步稳定; 当 N 一定时, λ_N/λ_2 随 m 增大而减小, 局部同步能力逐渐增强, 并逐渐趋于稳定。

4.4 不确定性概率 f 对同步能力的影响

令不确定性概率 f 在区间 $(0,0.1)$ 内取值, 步长为 0.05。图 8 和图 9 分别给出了在 $N = 500, m = 5$ 条件下, 网络不确定性概率 f 对全局同步和局部同步的影响。由图 8 可知, 当 $f = 0$ 时, λ_2 最小, 全局同步能力最强, 网络稳定; 随着 f 增大, 网络随机故障下 λ_2 值逐渐增大, 涨幅较小, 全局同步能力减弱, 网络相对稳定; 网络蓄意攻击下的 λ_2 值逐渐增大, 当 $f = 0.02$ 时, λ_2 值为 0, 无法实现全局同步, 网络不稳定。由图 9 可知, 当 $f = 0$ 时, λ_N/λ_2 值(约为 0.0324)最小, 局部同步能力最强, 系统稳定; 随着 f 增大, 网络随机故障下的 λ_N/λ_2 值呈现增大后减小趋势, 减幅较小且稳定 $(1.5, 2.5)$ 范围内, 处于网络蓄意攻击下的 λ_N/λ_2 值同样先增后减, 但减幅较大, 当 $f = 0.07$ 时, λ_N/λ_2 值骤减为 0, 无法实现局部同步, 网络不稳定。

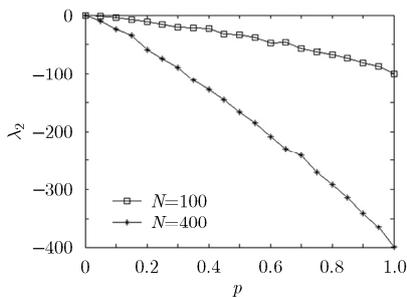


图 2 边连接概率 p 对全局同步能力的影响

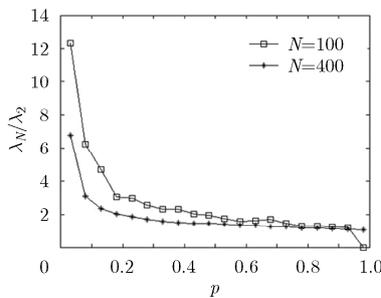


图 3 边连接概率 p 对局部同步能力的影响

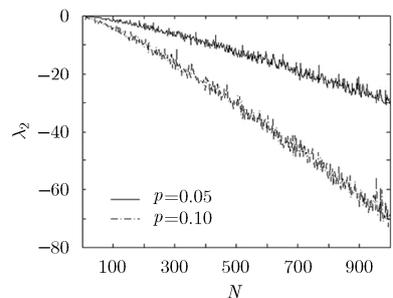


图 4 网络规模 N 对全局同步能力的影响

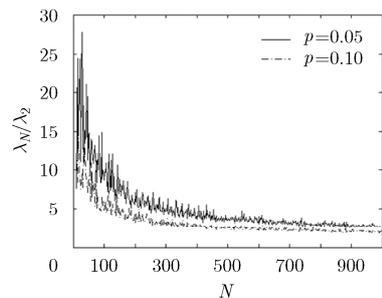


图 5 网络规模 N 对局部同步能力的影响

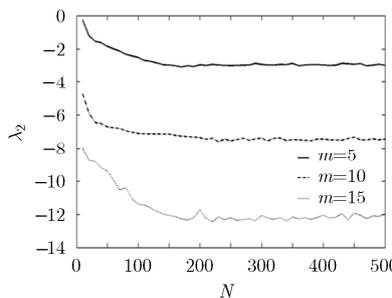


图 6 备用节点数 m 对全局同步能力的影响

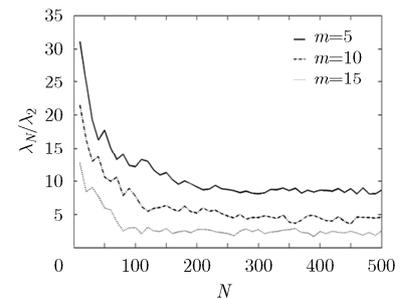
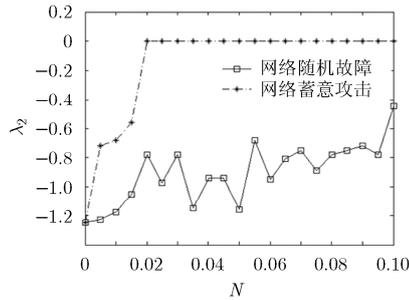
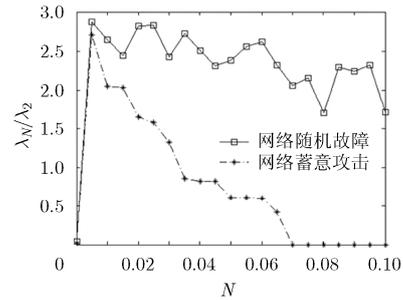


图 7 备用节点数 m 对局部同步能力的影响

图8 不确定性概率 f 对全局同步能力的影响图9 不确定性概率 f 对局部同步能力的影响

5 结束语

结合网络安全集体防御机理，构建集体防御机制下的网络行动同步模型，分析了网络同步稳定性、同步判据及影响同步稳定的因素。仿真验证了边连接概率、网络规模、备用节点数及网络不确定性概率对集体防御机制下的网络行动同步的影响。

参考文献

- [1] Argonne National Laboratory. Enabling distributed security in cyberspace: Building a healthy and resilient cyber ecosystem with automated collective action[R]. Report of Department of Defense, America, 2011.
- [2] WU Guangyu, SUN Jian, and CHEN Jie. A survey on the security of cyber-physical systems[J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(1): 2–10.
- [3] WANG Yinan, LIN Zhiyun, LIANG Xiao, et al. On modeling of electrical cyber-physical systems considering cyber security [J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2016, 17(5): 465–478. doi: 10.1631/FITEE.1500446.
- [4] MICHAL C, RAFAL K, MARIA P, et al. Comprehensive approach to increase cyber security and resilience[C]. Proceedings of IEEE the 10th International Conference on Availability, Reliability and Security, Toulouse, 2016: 686–692.
- [5] LIU Lixia, LING Ren, BEI Xiaomeng, et al. Coexistence of synchronization and anti-synchronization of a novel hyperchaotic finance system[C]. Proceedings of IEEE Proceeding of the 34th Chinese Control conference, Hangzhou, 2015: 8585–8589.
- [6] 高洋, 李丽香, 彭明海, 等. 多重融合复杂动态网络的自适应同步[J]. *物理学报*, 2008, 57(4): 2081–2091.
GAO Yang, LI Lixiang, PENG Minghai, et al. Adaptive synchronization in untied complex dynamical network with multi-links[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(4): 2081–2091.
- [7] LUIS M, SARA F, and CLARA G. Complete synchronization and delayed synchronization in couplings[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 79(2): 1615–1624. doi: 10.1007/s11071-014-

1764-8.

- [8] ARIE R, MIRI P, and SHAHAF W. Distributed network synchronization[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems Tel-Aviv, 2015: 15–19.
- [9] 赵明, 周涛, 陈关荣, 等. 复杂网络上动力系统同步的研究进展——如何提高网络的同步能力[J]. *物理学进展*, 2008, 1(3): 22–34.
ZHAO Ming, ZHOU Tao, CHEN Guanrong, et al. A review on synchronization of dynamical systems on complex networks: how to enhance the network synchronizability[J]. *Progress in Physics*, 2008, 1(3): 22–34.
- [10] 张檬, 吕翎, 吕娜, 等. 结构与参量不确定的网络与网络之间的混沌同步[J]. *物理学报*, 2012, 61(22): 1–5.
ZHANG Meng, LÜ Ling, LÜ Na, et al. Chaos synchronization between complex networks with uncertain structures and unknown parameters[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 1–5.
- [11] GUO Peilin and WANG Yuzhen. Matrix expression and vaccination control for epidemic dynamics over dynamic networks[J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(1): 1–5.
- [12] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 132–187.
- [13] SIVAGANESH G. Master stability function for a class of coupled simple nonlinear electronic circuits[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 68(5): 628–632. doi: 10.3938/jkps.68.628.
- [14] SHU Liang, ZENG Xianlin, and HONG Yiguang. Lyapunov stability and generalized invariance principle for non convex differential inclusions[J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(2): 140–150. doi: 10.1007/s11768-016-6037-2.

王刚: 男, 1976年生, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向包括网络空间安全和复杂网络。

胡鑫: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为网络空间安全。

马润年: 男, 1963年生, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向包括网络空间安全和复杂网络。