DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201805136

潜伏机制下网络病毒传播 SEIQRS 模型及稳定性分析

王 刚[1],陆世伟[1],胡 鑫[1,2],马润年[1]

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安 710077;2.中国人民解放军95507部队,贵阳 550025)

摘 要: 针对新型潜伏病毒传播特性,研究潜伏机制下的网络病毒传播模型及其稳定性,为潜伏型病毒扩散机理及防御策略研究提供理论参考. 首先,从新型网络病毒的潜伏特点入手,分析处于潜伏状态的网络节点存在的三种转化模式,提出了潜伏机制下的网络病毒传播模型;其次,运用劳斯稳定判据,论证了网络病毒传播平衡点的局部稳定性,求解系统的基本再生数 R_0;最后,给出了潜伏状态下三种转移参数对系统稳定性影响的仿真验证. 理论分析和仿真结果表明,当 $R_0 \leqslant 1$ 时,网络在无病毒平衡点局部渐近稳定;当 $R_0 > 1$ 时,网络在感染源平衡点局部渐近稳定. 通过调整优化潜伏状态下三种转移概率,可以减小系统基本再生数 R_0,使网络维持在无病毒健康状态. 增大潜伏状态到易感状态转移概率 θ,减小潜伏状态到感染状态转移概率 γ 和增大潜伏状态到免疫状态转移概率 b,可以将潜伏病毒入侵的网络控制稳定在无病毒平衡点,从而维护网络安全.

关键词: 网络安全;潜伏机制;病毒传播;模型;稳定性

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)05-0131-07

Network virus spreading SEIQRS model and its stability under escape mechanism

WANG Gang[1], LU Shiwei[1], HU Xin[1,2], MA Runnian[1]

(1. Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. The Chinese People's Liberation The 95507 troop, Guiyang 550025, China)

Abstract: According to the spreading characteristic of new escape virus, a novel network virus spreading model and its stability were researched under the escape mechanism to provide a theoretical reference for defenders. Firstly, three transformation modes were derived based on the exposed characteristic of new network virus from the exposed nodes, and then a novel network virus spreading model was constructed under the exposed mechanism. Secondly, by using Routh stability criterion, the stability of system equilibrium point was demonstrated and the basic reproductive number R_0 was calculated. Finally, simulations were demonstrated for the influence of three transfer parameters on system stability. Theoretical research and simulations showed that if the basic reproductive number $R_0 \leqslant 1$, the disease-free equilibrium was locally asymptotically stable; if $R_0 > 1$, the endemic equilibrium was locally asymptotically stable. By adjusting the probability of three kinds of metastasis in the escape state, the basic reproductive number of the system could be reduced, and the network was maintained in a disease-free healthy state. The network could be controlled in the disease-free equilibrium by increasing transition probability θ from escape state to susceptible state, b from escape state to removed state, or decreasing γ from escape state to infected state, so as to maintain network security.

Keywords: cyber security; escape mechanism; virus spreading; model; stability

网络病毒是实施网络入侵和达成网络行动目标的重要手段. 在网络攻防博弈中,病毒的攻击感染表现出潜伏性,即感染目标前能利用免杀机制(如加壳、伪造数字签名等)潜伏在网络节点中,并于特定时机激活,迅速施效目标网络[1]. 近年来,陆续出现了"Regin","蓝色火焰"以及"狼人杀"木马等新型网络病毒,与传统蠕虫病毒相比,它们的技术手段和行动更为隐蔽高效[2-3]. 具体而言,潜伏型病毒在感染目标网络节点时,为实现特定战术目标,将其攻击感染的表征暂时隐藏起来;根据行动需求和前期设定的触发机制,攻击方会选择特定时机或采用特定手段激活启动该病毒[3-5]. 对这类新型网络病毒而言,"潜伏"特性更多表现为策略和操作层面的"潜伏"机制.

国内外目前对网络病毒传播的研究,主要基于传统网络病毒的扩散机理和特殊场景的需求. 如 Wang 等[6-7]对无线传感和 P2P 的病毒传播进行研究,Li 等[8]研究了小世界社团网络上的 SI(Susceptible-Infected)病毒扩散模型,Qiu 等[9]基于交通流量构建了 SIS(Susceptible-Infected-

收稿日期: 2018-05-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(61573017,61703420)
作者简介: 王 刚(1976—),男,教授,硕士生导师
通信作者: 王 刚,wglxl@nudt.edu.cn

Susceptible) 修正扩散模型, Liu 等[10] 应用 SIRS (Susceptible-Infected-Removed-Susceptible) 病毒扩散模型研究了蠕虫病毒的传播机理, Guan 等[11] 研究了复杂网络上的 SIQRS (Susceptible-Infected-Quarantined-Removed-Susceptible) 病毒扩散模型及稳定性分析, Lu 等[12] 研究了自适应网络的病毒传播模型及其病毒传播阈值及稳态性分析. 这些成果为开展病毒扩散建模和实际网络病毒传播研究提供了借鉴. 但是, 对于具有潜伏特性的新型网络病毒而言, 病毒的快速演变和危害性的增强, 客观上要求在病毒传播研究中综合考虑病毒的潜伏性及其影响. 现有研究主要是通过考虑增加时延因素来实现, 如 Jackson 等[13-14] 构建了 SIR (Susceptible-Infected-Removed) 时滞扩散模型, 并对其平衡点稳定性进行分析. Wang 等[15] 应用 SIQR (Susceptible-Infected-Quarantined-Removed) 病毒时滞扩散模型研究非线性接触率下的双时延病毒传播. 这些研究将病毒的潜伏过程理解为感染前的一段时延, 体现了网络和病毒的动态性. 然而, 从现实网络病毒传播过程看, 由于病毒应用背景和目标的不同, 时延的长短很难确定, 具有典型的不确定性和不可预测性; 其次, 从潜伏阶段的病毒传播机理分析, 还具有很多特有的属性, 如潜伏周期、病毒激活时间以及潜伏状态向其它状态的转移过程等. 显然, 这些情况不是传统模型所能够解决的, 同时仅靠时延因素也难以适应潜伏的多重属性及现实应用.

网络病毒传播研究需要解决潜伏性带来的新问题: 一是新型网络病毒的“潜伏”特性引起了网络病毒传播机理和流程的改变, 需要借鉴既有模型和研究方法, 在 SIQRS 等传统模型基础上增加“潜伏”状态和相应的节点状态转移关系, 建立与“潜伏”特性相一致的网络病毒传播模型; 二是在“潜伏”机制下, 节点状态间转移模式的改变会直接影响病毒传播效果和网络节点状态稳定性, 如潜伏病毒的网络节点存在向易感节点、感染节点和免疫节点三种状态节点转化的可能, 且不同的转移概率值将直接影响病毒扩散效果和系统的稳定性; 三是新型网络病毒的潜伏特性, 直接影响网络攻击防御策略和具体实践技术手段, 尤其是对于防御方而言, 现有的病毒查杀-隔离-免疫防御是否有效, 如何结合集体防御、深度防御和动态目标防御方法, 都建立在对新型网络病毒传播的深入研究基础上. 为此, 本文基于以上对病毒潜伏特性的认知, 建立与潜伏机制相适应的 SEIQRS (Susceptible-Escape-Infected-Quarantined-Removed-Susceptible) 网络病毒传播模型, 该模型在传统 SIQRS (Susceptible-Infected-Quarantined-Removed-Susceptible) 病毒扩散模型基础上增加了潜伏状态, 并以模型为基础研究潜伏型病毒的传播机理和稳定性.

1 网络病毒传播模型

Guan 等[11] 应用 SIQRS 经典病毒传播模型, 研究了隔离状态对病毒传播的影响以及免疫节点功能退化问题, 见图 1. 其中, 定义了 4 种节点状态: 易感节点 S, 感染节点 I, 隔离节点 Q, 免疫节点 R. 总节点数为 N, 假设网络中节点平均度为 k

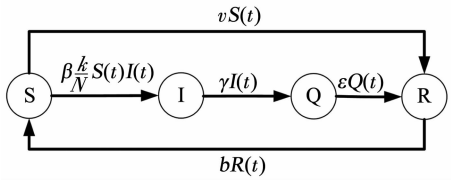


图 1 网络病毒传播 SIQRS 模型

Fig. 1 SIQRS model of network virus spreading

其中, $S(t)$、$I(t)$、$Q(t)$ 和 $R(t)$ 分别表示 t 时刻易感节点、感染节点、隔离节点和免疫节点的数量. 此处不考虑节点的增减情况[11], 即总节点数恒定, $N = S(t) + I(t) + Q(t) + R(t)$, 对应的数学模型为

$$\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}S(t)}{\mathrm{d}t} &= -k\beta S(t)I(t)/N - vS(t) + bR(t),\\
\frac{\mathrm{d}I(t)}{\mathrm{d}t} &= k\beta S(t)I(t)/N - \gamma I(t),\\
\frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t} &= \gamma I(t) - \varepsilon Q(t),\\
\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t} &= vS(t) + \varepsilon Q(t) - bR(t),\\
N &= S(t) + I(t) + Q(t) + R(t). \qquad (1)
\end{aligned}$$

基于以上模型, 本文根据病毒传播时的潜伏特性, 提出新的网络节点状态——潜伏状态, 对其状态本身及转移规则进行研究. 潜伏状态是指病毒传播过程中的网络节点隐蔽待激活状态, 潜伏机制具体表现为网络节点在病毒扩散过程中存在潜伏状态和围绕潜伏状态的转移规则. 考虑网络病毒攻防中的动态实时、自主免疫和自愈修复等情况, 潜伏待激活状态的病毒的网络节点, 可能会转化为以下三种状态: 1) 易感状态. 基于自愈修复能力, 潜伏病毒的网络节点在激活感染其他网络节点之前, 通过自愈修复成为健康节点, 但不具有抗病毒能力, 易受病毒感染; 2) 感染状态. 网络病毒/受病毒感染的节点在受激活启动后, 直接感染其他网络节点; 3) 免疫状态. 基于自主免疫特性, 受病毒感染的网络节点在激活感染其他网络节点之前, 进行免疫修复, 具备抗病毒能力.

病毒传播过程中的潜伏状态 E 存在向易感状

态 S、感染状态 I 或免疫状态 R 等三种状态转移的可能，参照 SIQRS 模型[11,16]给出网络病毒传播的 SEIQRS 模型，见图 2. 其中：

1）易感状态 S→潜伏状态 E，部分易 感节点被病毒潜伏进入潜伏状态，处于待激活状态，且暂时不具备攻击感染能力. 假设网络中感染病毒的节点对易感节点的感染形式都是将其先感染为潜伏节点. 感染节点与易感节点每次接触感染的概率为 β_1，单位时间内一个感染节点与其他易感节点接触的次数为 U，则平均有效接触率为 $\beta_1 US(t)/N$，即每个被潜伏型病毒感染的节点的感染率表达式为 $\beta_1 US(t)/N$，其中 N 为网络节点总数. 根据 Guan 等[11]研究得知，接触次数 U 与节点度 k 成正比，即 $U = \beta_2 k$，从而得到单个感染节点的感染率为 $\beta_1\beta_2 kS(t)/N$，单位时间内所有被感染为潜伏节点的节点数量为 $\beta_1\beta_2 kS(t)I(t)/N$，记 $\beta = \beta_1\beta_2$ 为潜伏型病毒的感染系数，则感染数可简化为 $\beta kS(t)I(t)/N$.

2）易感状态 S→免疫状态 R，部分易感节点自身具备抗病毒能力，不受网络病毒攻击感染，直接转移到免疫状态，转移参数 ψ 为网络节点具有抗病毒攻击感染能力的概率.

3）潜伏状态 E→感染状态 I，潜伏节点中的病毒被激活，成为感染节点，可感染其它网络节点，转移参数 γ 为潜伏节点被激活的概率.

4）潜伏状态 E→感染状态 S，潜伏的病毒具有一定的生命周期，在网络行动结束后依然未被激活的病毒，将失去潜伏的意义；攻击方预测到对方已经察觉或检测到潜伏病毒的特征，为了隐蔽核心目标，主动摧毁部分潜伏病毒. 此时，可以认为潜伏节点再次转化为易感节点，转移参数 θ 表示潜伏的病毒未被激活的概率.

5）潜伏状态 E→感染状态 R，在病毒潜伏期间，部分潜伏节点会具备对此种病毒的免疫能力，直接转化为免疫节点，转移参数 b 表示节点在病毒潜伏期具备免疫能力的概率.

6）感染状态 I→隔离状态 Q，病毒防御中受感染节点断开通信连接进入隔离状态，转移参数 ω 为网络病毒/受病毒攻击感染的节点断开网络连接的概率.

7）隔离状态 Q→免疫状态 R，受攻击感染后进入隔离状态的节点，通过自主免疫后具备抗病毒攻击感染的能力，进入免疫状态，转移参数 ε 为断开通信连接的网络节点进行免疫后具备抵御网络病毒攻击能力的概率；8）免疫状态 R→易感状态 S，由于病毒变异等原因，免疫状态节点抗病毒能力在安全防御过程逐渐减弱，最终不具备抗病毒能力，再次进入易感状态，转移参数 δ 为免疫节点抗病毒能力逐渐减弱的概率. 其中：N 为网络总节点数，k 为网络节点平均度. $S(t)$、$E(t)$、$I(t)$、$Q(t)$ 和 $R(t)$ 分别表示 t 时刻易感节点、潜伏节点、感染节点、隔离节点和免疫节点的数量.

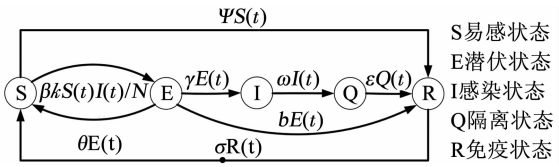


图 2　SEIQRS 网络病毒传播模型

Fig. 2　SEIQRS model of network virus spreading

根据系统动力学原理，参考文献[11,16]给出的 SIQRS 模型，可得如下的 SEIQRS 模型数学表达式为

$$\begin{aligned}
\frac{dS(t)}{dt} &= -\beta kS(t)I(t)/N - \psi S(t) + \theta E(t) + \sigma R(t),\\
\frac{dE(t)}{dt} &= \beta kS(t)I(t)/N - \gamma E(t) - \theta E(t) - bE(t),\\
\frac{dI(t)}{dt} &= \gamma E(t) - \omega I(t),\\
\frac{dQ(t)}{dt} &= \omega I(t) - \varepsilon Q(t),\\
\frac{dR(t)}{dt} &= \varepsilon Q(t) + \psi S(t) + bE(t) - \sigma R(t).
\end{aligned} \tag{2}$$

2　稳定性分析

令 $R(t) = N - S(t) - E(t) - I(t) - Q(t)$，式(2)可进一步表示为

$$\begin{aligned}
\frac{dS(t)}{dt} &= -k\beta S(t)I(t)/N - \psi S(t) + \theta E(t) + \\
&\quad \delta(N - S(t) - E(t) - I(t) - Q(t)),\\
\frac{dE(t)}{dt} &= k\beta S(t)I(t)/N - (\gamma + \theta + b)E(t),\\
\frac{dI(t)}{dt} &= \gamma E(t) - \omega I(t),\\
\frac{dQ(t)}{dt} &= \omega I(t) - \varepsilon Q(t).
\end{aligned} \tag{3}$$

令 $\frac{dS(t)}{dt} = 0, \frac{dE(t)}{dt} = 0, \frac{dI(t)}{dt} = 0, \frac{dQ(t)}{dt} = 0$，可得系统的平衡点：

$$P_0(S_0, E_0, I_0, Q_0) = \left(\frac{\delta}{\psi + \delta}N, 0, 0, 0\right), P_1(S_1, E_1, I_1, Q_1) = \left(\frac{(\gamma + \theta + b)\omega N}{k\beta\gamma}, E_1, \frac{\gamma}{\omega}E_1, \frac{\gamma}{\varepsilon}E_1\right).$$

式中 $E_1 = \frac{N\omega\varepsilon[\beta k\delta\gamma - (\psi + \delta)(\gamma + \theta + b)\omega]}{\beta k\gamma[\delta(\omega\varepsilon + \gamma\varepsilon + \gamma\omega) + (\gamma + b)\omega\varepsilon]}$.

借鉴文献[10,17]中基本再生数概念，得式(2)的基

本再生数 $R_0 = \dfrac{\beta k \delta \gamma}{\omega(\delta+\psi)(\gamma+\theta+b)}$. 分析可知,当且仅当 $R_0 \leqslant 1$ 时,式(3)仅存在无病毒平衡点 P_0;当且仅当 $R_0 > 1$ 时,式(3)仅存在感染源平衡点 P_1.

根据式(3)可得任意平衡点 P^* 的 Jacobi 矩阵

$$\boldsymbol{J}(P^*) = \begin{pmatrix} \dfrac{-kI\beta}{N} - \psi - \delta & \theta - \delta & -\dfrac{kS\beta}{N} - \delta & -\delta \\ \dfrac{kI\beta}{N} & -(\gamma+\theta+b) & \dfrac{kS\beta}{N} & 0 \\ 0 & \gamma & -\omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega & -\varepsilon \end{pmatrix}. \tag{4}$$

定理 1 当 $R_0 \leqslant 1$ 时,无病毒平衡点 P_0 局部渐近稳定;当 $R_0 > 1$ 时,平衡点 P_0 不稳定.

证明 由式(4)可得平衡点 P_0 处 Jacobi 矩阵为

$$\boldsymbol{J}(P_0) = \begin{pmatrix} -\psi - \delta & \theta - \delta & k\beta\dfrac{\delta}{\delta+\psi} - \delta & -\delta \\ 0 & -(\gamma+\theta+b) & k\beta\dfrac{\delta}{\delta+\psi} & 0 \\ 0 & \gamma & -\omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega & -\varepsilon \end{pmatrix}. \tag{5}$$

矩阵 $\boldsymbol{J}(P_0)$ 的特征多项式为

$$(\lambda+\varepsilon)(\lambda+\psi+\delta)\left[(\lambda+\gamma+\theta+b)(\lambda+\omega) - \beta\gamma\frac{\delta}{\delta+\psi}k\right] = 0. \tag{6}$$

其对应特征根 $\lambda_1 = -\varepsilon, \lambda_2 = -(\psi+\delta)$,均为负值;$(\lambda+\gamma+\theta+b)(\lambda+\omega) - \beta\gamma\dfrac{\delta}{\delta+\psi}k = 0$ 的解为式(6)的另外两个特征根. 显然,当 $R_0 \leqslant 1$ 时,λ_1, λ_2 和另外两个特征根的实部均为负,无病毒平衡点 P_0 局部渐近稳定;当 $R_0 > 1$ 时,矩阵 $\boldsymbol{J}(P_0)$ 存在一个特征根为正,平衡点 P_0 局部不稳定.

定理 1 表明,当网络病毒的攻击感染能力未达到网络病毒防御的给定门限时,防御方占据优势,网络中最终只存在易感节点和免疫节点,受病毒感染的网络节点均被隔离后修复.

定理 2 当 $R_0 > 1$ 时,平衡点 $P_1(S_1, E_1, I_1, Q_1)$ 局部渐近稳定.

证明 由式(4)可得平衡点 P_1 处的 Jacobi 矩阵为

$$\boldsymbol{J}(P_1) = \begin{pmatrix} \dfrac{-k\beta I_1}{N} - \psi - \delta & \theta - \delta & -\dfrac{\gamma+\theta+b}{\gamma}\omega - \delta & -\delta \\ \dfrac{k\beta I_1}{N} & -(\gamma+\theta+b) & \dfrac{\gamma+\theta+b}{\gamma}\omega & 0 \\ 0 & \gamma & -\omega & 0 \\ 0 & 0 & \omega & -\varepsilon \end{pmatrix}. \tag{7}$$

对应的特征多项式 $\lambda^4 + \mu_1\lambda^3 + \mu_2\lambda^2 + \mu_3\lambda + \mu_4 = 0$.

式中:$\mu_1 = \gamma+\theta+b+\omega+\varepsilon+\psi+\delta+\dfrac{k\beta I_1}{N}$;$\mu_2 = \left(\dfrac{k\beta I_1}{N} + \psi + \delta\right)(\gamma+\theta+b+\omega) + \dfrac{k\beta I_1}{N}(\delta-\theta) + \varepsilon(\gamma+\theta+b+\omega)$;$\mu_3 = \left(\dfrac{k\beta I_1}{N} + \psi + \delta\right)(\gamma+\theta+b+\omega)\varepsilon + \dfrac{k\beta I_1}{N}[(\delta-\theta)(\varepsilon+\omega) - (\gamma+\theta+b)\omega + \gamma\delta]$. $\mu_4 = k\beta I_1[(\delta-\gamma-2\theta-b)\varepsilon\omega + \gamma\omega\delta + \varepsilon\gamma\delta]/N$. (8)

式中 $\mu_1, \mu_2 > 0$. 根据劳斯稳定性判据[13,16],计算得 $\mu_1\mu_2 - \mu_3 > 0$,$\mu_1\mu_2\mu_3 - \mu_3^2 - \mu_4 > 0$. 因此,其对应的特征根全部位于坐标轴的左半平面,对应 $\boldsymbol{J}(P_1)$ 的特征值实部为负. 可得结论:当基本再生数 $R_0 > 1$ 时,感染源平衡点 P_1 局部渐近稳定. 证毕#.

定理 2 表明,当网络病毒的攻击感染能力超过网络安全防御门限时,网络中携带病毒信息的网络节点、受病毒信息感染的网络节点和断开通信连接的网络节点将以一定的比值持续稳定存在.

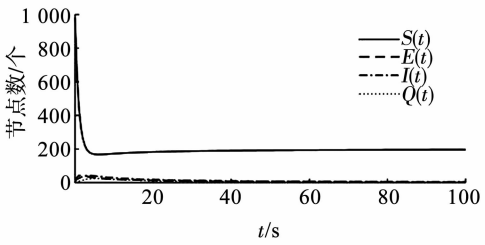
3 仿真分析

为验证定理 1 和定理 2 的合理性,围绕基本再生数 $R_0 = k\gamma\beta\delta/[\omega(\delta+\psi)(\gamma+\theta+b)]$,重点分析 E-S 转移概率 θ、E-I 转移概率 γ 和 E-R 转移概率 b 等 3 个参数对信息扩散的影响. 运用 Matlab 组件 Simulink 求解网络病毒传播动力学模型的非线性微分方程组,分析 3 个参数对信息扩散的影响,进而验证模型的有效性及系统随时间的演进关系. 仿真中的单位时间设置为 1 秒. 参照文献[11,12]设置变量的初值和相关参数,设置网络节点总数 $N = 1\,000$,网络节点平均度为 $k = 30$,网络节点在初始时刻只存在易感状态和感染状态,对应节点数初值分别为 $S(0) = 980$ 和 $I(0) = 20$. 同步给出其它参数的基本设置,$\delta = 0.2, \psi = 0.8, \theta = 0.78, \beta = 0.2, \gamma = 0.6, \omega = 0.5, \varepsilon = 0.8, b = 0.06$.

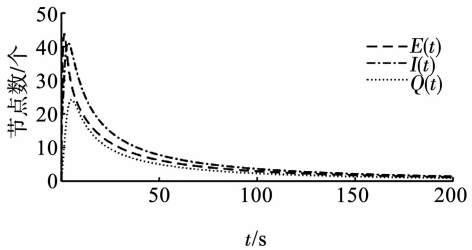
3.1 E-S 状态转移概率 θ 对病毒传播的影响

运用控制变量的思想,保持其他参数值不变,调整 E-S 转移概率 θ 值并分析其对病毒传播的影响. 根据基本再生数 R_0,可知 E-S 转移概率的阈值 $\theta_{\lim} = 0.78$. 当 $\theta \geqslant \theta_{\lim}$ 时,系统局部渐近稳定在无病毒平衡点 P_0 处;当 $\theta < \theta_{\lim}$ 时,系统局部渐近稳定在感染源平衡点 P_1 处,图 3(a) ~ (d)表示 θ 值为 0.8 和0.2的仿真结果. 当 $\theta = 0.8 > \theta_{\lim}$ 时,系统在平衡点 $P_0(200,0,0,0)$ 处局部渐近稳定,如图 3(a)

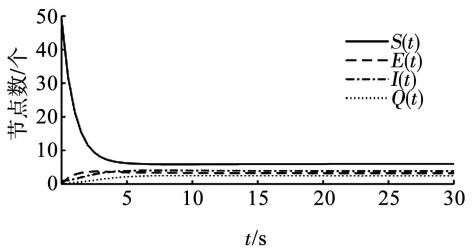
所式，图 3(b)为状态 E、I 和 Q 的节点数变化放大曲线图；当 $\theta = 0.2 < \theta_{\lim}$ 时，系统在平衡点 $P_1(120, 65, 78, 48)$ 处局部渐近稳定，如图 3(c)所示，图 3(d)为状态 E、I 和 Q 的节点数变化放大曲线图.



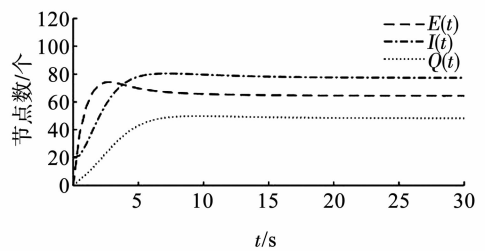
(a)θ=0.8时状态点节数



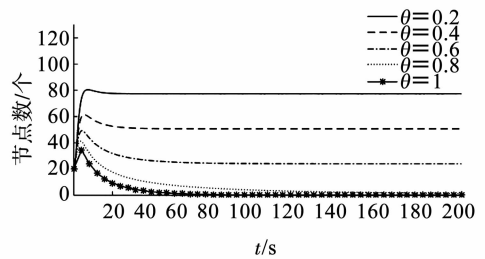
(b)θ=0.8时状态点节点数(局部放大图)



(c)θ=0.2时状态节点数



(d)θ=0.2时状态节点数(局部放大图)



(e)不同θ下感染节点数量随时间变化曲线

图 3　E-S 状态转移概率仿真

Fig. 3　Simulation diagrams of E-S state transfer probability

图 3(e)表示不同 θ 下感染状态 I 的节点数随时间的变化曲线. 其中，θ 在区间[0.2,1]内取值，步长为 0.2. 当 $\theta = 0.8, 1 > \theta_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在无病毒平衡点 P_0 处；当 $\theta = 0.2, 0.4, 0.6 < \theta_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在感染源平衡点 P_1 处. 仿真结果与理论分析一致，随着 θ 的增大，感染状态 I 的节点数逐渐减少，表明受网络病毒攻击感染的网络节点进行自愈修复的能力越强，病毒节点/受感染节点越少，网络病毒防御能力越强. 显然，通过合理调控 θ，可以实现对网络病毒传播的有效控制.

3.2　E-I 状态转移概率 γ 对病毒传播的影响

调整 E-I 转移概率 γ 值分析其对病毒传播的影响. 由基本再生数 R_0 计算可得 E-I 转移概率 γ 的阈值 $\gamma_{\lim} = 0.58$. 当 $\gamma \leqslant \gamma_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在无病毒平衡点 P_0 处；当 $\gamma > \gamma_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在感染源平衡点 P_1 处，图 4(a)～(d)分别表示 γ 值为 0.2 和 0.8 的仿真结果. 当 $\gamma = 0.2 < \gamma_{\lim}$ 时，系统在平衡点 $P_0(200, 0, 0, 0)$ 处局部渐近稳定，如图 4(a)所式，图 4(b)为状态的节点数变化放大曲线图；当 $\gamma = 0.8 > \gamma_{\lim}$ 时，系统在平衡点 $P_1(170, 18, 30, 18)$ 处局部渐近稳定，如图 4(c)所示，图 4(d)为状态 E、I 和 Q 的节点数变化放大曲线图.

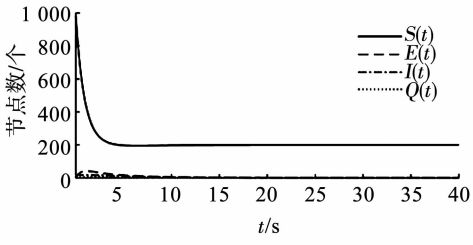
图 4(e)表示不同 γ 下感染状态 I 的节点数随时间的变化曲线. 其中，γ 在区间[0.2,1]内取值，步长为 0.2. 当 $\gamma = 0.2, 0.4 < \gamma_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在无病毒平衡点 P_0 处. 当 $\gamma = 0.6, 0.8, 1 > \gamma_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在感染源平衡点 P_1 处. 仿真结果与理论分析一致，随着 γ 的增大，感染状态 I 的节点数逐渐增多，表明病毒感染节点激活启动程度越强，病毒节点数量越多，网络病毒防御能力逐渐减弱，网络病毒传播速度逐渐下降. 显然，通过合理调控 γ，可以实现对网络病毒传播的有效控制.

3.3　E-R 状态转移概率 b 对病毒传播的影响

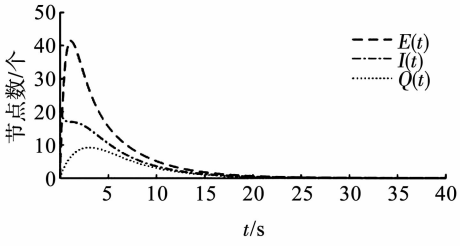
调整 E-R 状态转移概率 b 值分析其对病毒传播的影响. 根据基本再生数 R_0，可得潜伏状态 E—免疫状态 R 转移概率的阈值为 $b_{\lim} = 0.062$. 当 $b \geqslant b_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在无病毒平衡点 P_0 处；当 $b < b_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在感染源平衡点 P_1 处，图 5(a)～(d)分别表示 b 值为 0.18 和 0.02 的仿真结果. 当 $b = 0.18 > b_{\lim}$ 时，系统在平衡点 $P_0(200, 0, 0, 0)$ 处局部渐近稳定，如图 5(a)所式，图 5(b)为状态 E、I 和 Q 的节点数变化放大曲线图；当 $b = 0.02 < b_{\lim}$ 时，系统在平衡点 $P_1(195, 5, 6, 3)$ 处局部渐近稳定，如图 5(c)所示，图 5(d)为状态 E、I 和 Q 的节点数变化放大曲线图.

图 5(e)表示不同 b 下感染状态 I 的节点数随时间的变化曲线. 其中，b 在区间[0.02, 0.18]内取值，步长为 0.04. 当 $b = 0.1, 0.14, 0.18 > b_{\lim}$ 时，系统局部渐近稳定在无病毒平衡点 P_0 处. 当 $b =$

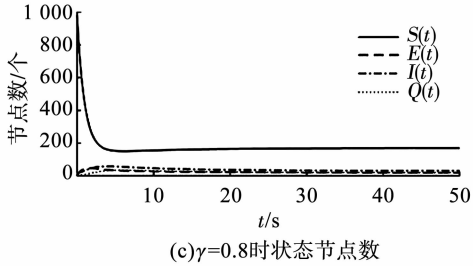
0.02,0.06 < $\gamma_{\lim}$ 时,系统局部渐近稳定在感染源平衡点 P_1 处. 仿真结果与理论分析一致,随着 γ 的增大,感染状态 I 的节点数逐渐增多,表明病毒感染节点激活启动程度越强,病毒节点数量越多,网络病毒防御能力逐渐减弱,网络病毒传播速度逐渐下降. 显然,通过合理调控 γ,可以实现对网络病毒传播的有效控制.



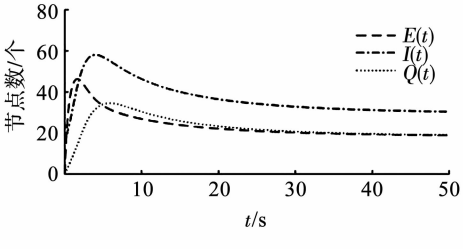
(a)γ=0.2时状态节点数



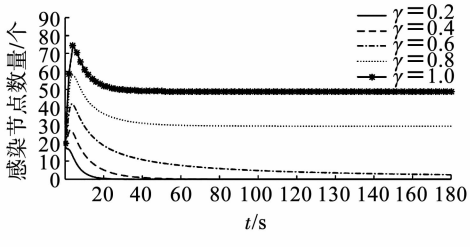
(b)γ=0.2时状态节点数(局部放大图)



(c)γ=0.8时状态节点数



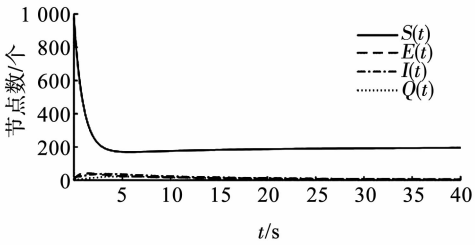
(d)γ=0.8时状态节点数(局部放大图)



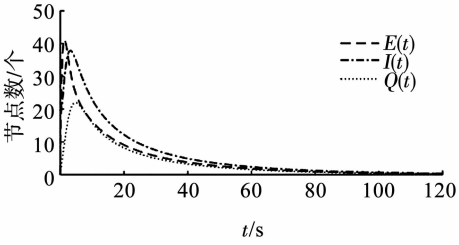
(e)不同γ下感染节点数量随时间变化曲线

图 4 E-I 状态转移概率仿真

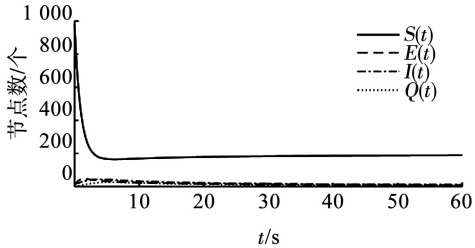
Fig. 4 Simulation diagrams of E-I state transfer probability



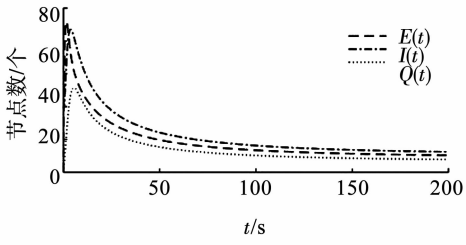
(a)b=0.18时状态节点数



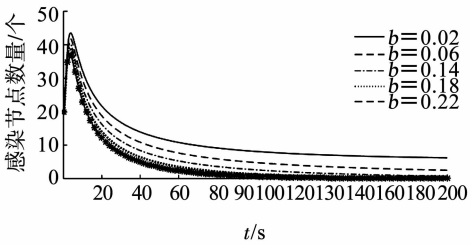
(b)b=0.18时状态节点数(局部放大图)



(c)b=0.02时状态节点数



(d)b=0.02时状态节点数(局部放大图)



(e)不同b下感染节点数量随时间变化曲线

图 5 E-R 状态转移概率仿真

Fig. 5 Simulation diagrams of E-R state transfer probability

仿真结果表明,在网络病毒防御过程中,通过优化潜伏状态 E-易感状态 S 的转移概率 θ、潜伏状态 E-感染状态 I 的转移概率 γ 和潜伏状态 E-免疫状态 R 的转移概率 b,可有效控制病毒传播和维护网络安全. 通过增大转移概率 θ、减小转移概率 γ 和增大转移概率 b,可减少网络病毒/受病毒攻击的节点,降低网络病毒攻击感染网络节点的概率.

4　结　语

本文构建了基于潜伏机制的网络病毒传播 SEIQRS 模型，系统分析了潜伏型病毒的传播特性. 研究表明，在网络行动初始阶段，潜伏型病毒逐步入侵并潜伏到对手网络节点中，防御方尚未检测到潜伏病毒，潜伏病毒节点数逐渐增多，并在受激后攻击感染其他网络易感节点，一旦网络防御系统检测到节点被病毒感染并实施有效防御措施，网络病毒节点将被迅速消除，网络系统将稳定在无病毒平衡点；相反，如果网络防御系统的病毒检测和防御能力较弱，病毒感染节点将持续增加，最终网络系统将稳定在有病毒平衡点. 可见，网络中最终是否存在病毒节点，取决于网络系统自身的防御能力与潜伏型病毒的扩散能力的相对大小. 在网络安全防御行动中，防御方可通过增大潜伏状态到易感状态转移概率 θ，减小潜伏状态到感染状态转移概率 γ 和增大潜伏状态到免疫状态转移概率 b，将网络控制稳定在健康状态，维护网络安全. 后期工作将考虑网络的动态性和时延因素，从理论层面的仿真验证向多条件/环境下的仿真拓展，开展集体防御和动态目标防御等新型网络安全防御技术和理论研究.

参考文献

[1] 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，2016：99
SUN Xijing, SI Shoukui. Complex network algorithms and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 2016: 99

[2] THOMAS G, KYPROS M, STEFANOS P, et al. The trojan horse reconstruction[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 90(1): 261. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.015

[3] YANG Xiuqing, WEI Kejin, MA Haiqiang, et al. Trojan horse attacks on counterfactual quantum key distribution[J]. Physics Letters A, 2016, 380(18): 1589. DOI:10.1016/j.physleta.2015.09.027

[4] 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. DOI:10.1631/FITEE.1500446

[5] WU Guangyu, SUN Jian, and CHEN Jie. A survery on the security of cyber-physical systems[J]. Control Theory and Technology. 2016, 14(1): 2. DOI:10.1007/s11768-016-5123-9

[6] WANG Yaqi, YANG Xiaoyuan. Virus spreading in wireless sensor networks with a medium access control mechanism[J]. Chinese Physical B, 2013, 22(4): 040206(1-5). DOI:10.1088/1674-1056/22/4/040206

[7] 冯朝胜，秦志光，袁丁. 移动 P2P 网络中的病毒传播建模[J]. 电子科技大学学报，2012，41(11)：98. DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.019
FENG Chaosheng, QIN Zhiguang, YUAN Ding. Modeling of virus propagation in the mobile peer-to-peer networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(11): 98. DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.019

[8] LI Chanchan, JIANG Guoping, SONG Yurong. Comparative effects of avoidance and immunization on epidemic spreading in a dynamic small-world network with community structure[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2016, 21(4): 291. DOI:10.1007/s11859-016-1173-6

[9] 仇慎伟，王开，刘茜，等. 基于交通流量的病毒扩散动力学研究[J]. 物理学报，2012，61(15)：1
QIU Shenwei, WANG Kai, LIU Qian, et al. Epidemic spreading on scale-free networks with traffic flow[J]. Acta Phys. Sin, 2012, 61(15): 1

[10] 刘启明. 一个蠕虫病毒传播 SIRS 模型的建立与分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2010，35(1)：168. DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2010.01.047
LIU Qiming. Construction and analysis of a SIRS model for worm virus propagation[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2010, 35(1): 168. DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2010.01.047

[11] 关治洪，亓玉娟，姜晓伟，等. 基于复杂网络的病毒传播模型及其稳定性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2011，39(1)：114. DOI:10.13245/j.hust.2011.01.026
GUAN Zhihong, QI Yujuan, JIANG Xiaowei, et al. Virus propagation dynamic model and stability on complex networks[J]. Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(1): 114. DOI:10.13245/j.hust.2011.01.026

[12] 鲁延玲，蒋国平，宋玉荣. 自适应网络中病毒传播的稳定性和分岔行为研究[J]. 物理学报，2013，62(13)：130202(1-9). DOI:10.7498/aps.62.130202
LU Yanling, JIANG Guoping, SONG Yurong. Stability and bifurcation of epidemic spreading on adaptive network[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(13): 130202(1-9). DOI:10.7498/aps.62.130202

[13] MARK J, BENITO M. Modeling plant virus propagation with delays [J]. Journal of Computer and Applied Mathematics, 2017, 30(9): 611. DOI:10.1016/j.cam.2016.04.024

[14] 张晓潘，袁凌云. 具有时滞-扩散作用的无线传感网络病毒传播模型的振荡动力学研究[J]. 计算机科学，2017，44(6)：390. DOI:doi:10.11896/j.issn.1002-137X.2017.6A.088
ZHANG Xiaopan, YUAN Lingyun. Oscillatorybehaviors of malware propagation model in wireless sensor networks with time delays and reaction-diffusion terms [J]. COMPUTER SCIENCE, 2017, 44(6): 390. DOI:10.11896/j.issn.1002-137X.2017.6A.088

[15] WANG Kai. Hopf bifurcation of a delayed SIQR epidemic model with constant input and nonlinear incidence rate[J]. Advances in Difference Equations, 2016, 2016(1): 168. DOI: 10.1186/s13662-016-0899-y

[16] LI Tao, WANG Yuanmei, GUAN Zhihong. Spreading dynamics of a SIQRS epidemic model on scale-free networks[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2014, 19(3): 686. DOI:10.1016/j.cnsns.2013.07.010

[17] HADI M, GHADER R, SABER A. Stability and bifurcation analysis of an asymmetrically electrostatically actuated microbeam[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(2): 021002(1-8). DOI:10.1115/1.4028537

（编辑　苗秀芝）