

# 基于两阶段免疫接种的 SIRS 计算机病毒传播模型

叶晓梦\*, 杨小帆

(重庆大学 计算机学院, 重庆 400030)

(\* 通信作者电子邮箱 yexiaomeng0714@163.com)

**摘要:**针对现有的带有免疫接种策略的病毒传播模型的不足,根据生物学中的传染病模型提出了带有阶段免疫接种特点的 SIRS 计算机病毒传播模型。该模型充分考虑了在达到感染阈值时免疫接种概率的变化对于病毒传播的影响。此外,利用动力学稳定性理论分析并证明了病毒平衡点的存在和稳定条件。数值仿真结果表明,提高免疫接种率和设定适当的感染阈值可以有效控制计算机病毒在网络中的传播。

**关键词:**计算机病毒动力学;SIRS 模型;稳定性;两阶段免疫接种

**中图分类号:** TP309.5 **文献标志码:** A

## SIRS model of computer virus propagation based on two-stage immunization

YE Xiaomeng\*, YANG Xiaofan

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** For the deficiency of the existing network virus models with immunization, considering the infectious disease model in biology, a Susceptible-Infected-Recovered-Susceptible (SIRS) computer virus propagation model with stage immunization was formulated. The varying probability of being vaccinated when the threshold was reached and its impact on the spread of the virus in the network were considered. Furthermore, with the help of the theory of dynamic stability analysis, the existence and stability conditions of equilibriums were studied. The numerical simulation results illustrate that improving the rate of vaccination and setting a reasonable threshold can effectively constrain virus prevalence in the network.

**Key words:** computer virus dynamics; Susceptible-Infected-Recovered-Susceptible (SIRS) model; stability; two-stage immunization

## 0 引言

近年来,计算机病毒的传播已经成为计算机网络安全领域中的一个敏感性话题,随着信息技术的迅猛发展,计算机病毒日益猖獗,不但造成了资源和财富的巨大浪费,而且还有可能造成社会性灾难。另外,由于目前的反病毒技术总是滞后于新病毒的出现,因此,从宏观上研究病毒的传播规律,为计算机病毒的传播提供理论指导具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。

自 1991 年 Kephart 等<sup>[2]</sup>第一次用传染病学数学模型研究计算机病毒的传播以来,已经有许多学者考虑不同的因素提出了新的计算机病毒传播模型<sup>[3-12]</sup>,其中一部分研究人员在建模时考虑部分用户因主动采取安装杀毒软件或者修复系统漏洞等免疫接种策略,使节点从易感染状态直接变为免疫状态,在不同网络环境下的仿真结果都表明免疫接种是控制病毒传播的有效策略<sup>[3-9]</sup>。但是,这些模型采用的免疫接种概率函数没有很好地反馈网络环境和用户意识的阶段变化。在现实世界中,企业和个人对计算机病毒的警觉程度通常依赖于其本身的破坏力。当已感染计算机所占比例在感染阈值以下时,用户对病毒的警觉程度不会发生明显变化,但超过感染阈值时,用户会因为各种媒体报道或系统提示而明显提升防范力度。鉴于此,本文充分考虑了现实中免疫接种的阶段特点,结合文献[9-10]中用分段函数描述模型的思想,提出了一种改进的病毒传播模型,并研究了它的稳定性和动力学行为。

## 1 模型描述

本文是对传统的 SIRS (Susceptible-Infected-Recovered-Susceptible) 模型<sup>[3-4]</sup> (任意时刻节点可能处于三个仓室之一,即由全体易感染节点组成的 S 仓室,由全体已感染节点组成的 I 仓室,由全体暂时免疫节点组成的 R 仓室)的改进。新模型引入免疫接种概率函数:

$$f(I) = \begin{cases} \varepsilon_0, & 0 \leq I \leq I_0 \\ aI, & I > I_0 \end{cases}$$

其中: $aI_0 = \varepsilon_0$ ,此函数充分刻画了在感染阈值前后免疫接种概率的阶段变化特点:1) 对于一种特定计算机病毒,当已感染节点所占比例低于感染阈值  $I_0$  时的免疫接种概率为常数  $\varepsilon_0$ ;2) 当高于  $I_0$  之后,系统将明显受已感染节点比例的影响,以概率  $aI$  接受免疫接种;3) 免疫接种概率最高只能达到常数  $a$ 。

同时模型给出下列假设:

- 1) 新接入的节点都是无毒的。
- 2) 新的外部节点以恒定概率  $b$  接入,每个内部节点以概率  $b$  移出。
- 3) 每个易感染节点因与已感染节点接触而染毒的概率为  $\beta I$ 。
- 4) 每个已感染节点以恒定概率  $\gamma$  被治愈。
- 5) 每个暂时免疫节点以恒定概率  $\delta$  失去免疫。

**收稿日期:** 2012-09-04; **修回日期:** 2012-11-02。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10771227); 国家教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-05-0759); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS10181130)。

**作者简介:** 叶晓梦(1989-),男,湖北大冶人,硕士研究生,主要研究方向:计算机病毒动力学; 杨小帆(1964-),男,重庆人,教授,博士生导师,主要研究方向:容错计算、并行计算、计算机病毒动力学。

6) 每个易感染节点以概率 $f(I)$ 接受免疫接种。  
对应的模型如图1表示。

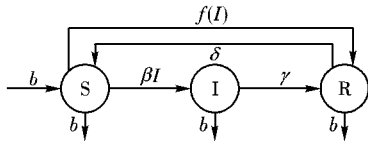


图1 模型示意图

模型的数学表示如下:

$$\begin{cases} \dot{S} = b - \beta SI - f(I)S + \delta R - bS \\ \dot{I} = \beta SI - \gamma I - bI \\ \dot{R} = \gamma I + f(I)S - \delta R - bR \end{cases} \quad (1)$$

由于 $S(t) + I(t) + R(t) \equiv 1$ , 可以将模型(式(1))归结为如下平面子系统:

$$\begin{cases} \dot{S} = b - \beta SI - f(I)S - bS + \delta(1 - I - S) \\ \dot{I} = \beta SI - \gamma I - bI \end{cases} \quad (2)$$

其初始条件为 $S(0) \geq 0, I(0) \geq 0$ , 其正向不变集为:

$$\Omega = \{(S, I) \mid S \geq 0, I \geq 0, S + I \leq 1\}$$

## 2 模型分析

### 2.1 平衡点分析

为了获得平衡点, 系统(式(2))可以被写成:

当 $0 \leq I < I_0$ ,

$$\begin{cases} \dot{S} = b - \beta SI - \varepsilon_0 S - bS + \delta(1 - I - S) \\ \dot{I} = \beta SI - \gamma I - bI \end{cases} \quad (3)$$

当 $I \geq I_0$ ,

$$\begin{cases} \dot{S} = b - \beta SI - aSI - bS + \delta(1 - I - S) \\ \dot{I} = \beta SI - \gamma I - bI \end{cases} \quad (4)$$

令 $R_0 = \frac{\beta}{b + \gamma}$ , 则系统(式(3))可能存在两组解:

$$P_0 = (S^0, I^0) = \left( \frac{b + \delta}{b + \delta + \varepsilon_0}, 0 \right)$$

$$P_0^* = (S_0^*, I_0^*) =$$

$$\left( \frac{b + \gamma}{\beta}, \frac{(b + \delta)(b + \gamma)(R_0 - \frac{b + \delta + \varepsilon_0}{b + \delta})}{\beta(b + \gamma + \delta)} \right)$$

系统(式(4))可能存在两组解:

$$P_1 = (S^1, I^1) = (1, 0)$$

$$P_1^* = (S_1^*, I_1^*) = \left( \frac{b + \gamma}{\beta}, \frac{(b + \delta)(R_0 - 1)}{a + \beta + \delta R_0} \right)$$

为了讨论平衡点的存在性则必须满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq \{S^0, S_0^*, S^1, S_1^*\} \leq 1 \\ 0 \leq \{I^0, I_0^*, I^1, I_1^*\} \leq 1 \\ \{I^0, I_0^*\} \leq I_0 \\ \{I^1, I_1^*\} \geq I_0 \end{cases}$$

令

$$M_1 = \frac{b + \delta}{b + \gamma + \delta}$$

$$M_2 = 1 + \frac{\varepsilon_0}{b + \delta}$$

$$M_3 = \frac{\varepsilon_0 + b + \delta}{b + \delta - I_0(b + \delta + \gamma)}$$

由此可以得到:

定理1

1) 系统始终存在无毒平衡点 $P_0$ 。

2) 当 $I_0 \leq M_1$ 且 $M_2 \leq R_0 \leq M_3$ 时, 则存在有毒平衡点 $P_0^*$ , 不存在 $P_1^*$ 。

3) 当 $I_0 \leq M_1$ 且 $R_0 \geq M_3$ 时, 则存在有毒平衡点 $P_1^*$ , 不存在 $P_0^*$ 。

4) 当 $I_0 \geq M_1$ 且 $M_2 \leq R_0$ 时, 则存在有毒平衡点 $P_0^*$ , 不存在 $P_1^*$ 。

### 2.2 平衡点的稳定性分析

定理2

1) 当 $R_0 \leq M_2$ 时, 则 $P_0$ 在 $\Omega$ 内局部渐近稳定。

2) 当满足定理1中 $P_0^*$ 存在条件时, 则 $P_0^*$ 在 $\Omega$ 内局部渐近稳定。

3) 当满足定理1中 $P_1^*$ 存在条件时, 则 $P_1^*$ 在 $\Omega$ 内局部渐近稳定。

证明 系统(式(3))和(式(4))的Jacobian矩阵分别为:

$$J_0 = \begin{bmatrix} -\beta I - b - \delta - \varepsilon_0 & -\beta S - \delta \\ \beta I & \beta S - b - \gamma \end{bmatrix}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} -\beta I - aI - b - \delta & -(\beta + a)S - \delta \\ \beta I & \beta S - b - \gamma \end{bmatrix}$$

1) 系统(式(3))在 $P_0$ 处的线性化系统对应特征值为:

$$\lambda_1 = -(b + \varepsilon_0 + \delta)$$

$$\lambda_2 = \frac{(b + \delta)(b + \gamma)}{b + \delta + \varepsilon_0} \left( R_0 - \left( 1 + \frac{\varepsilon_0}{b + \delta} \right) \right)$$

根据Lyapunov定理<sup>[13]</sup>, 只有当 $R_0 \leq 1 + \frac{\varepsilon_0}{b + \delta}$ 时所有特征值为负, 此时 $P_0$ 是局部渐近稳定的。

2) 系统(式(3))在 $P_0^*$ 处的线性化系统对应的特征方程为 $\lambda^2 + a_1\lambda + a_2 = 0$ , 其中:

$$a_1 = \frac{(b + \delta)(b + \gamma) \left( R_0 - \frac{b + \delta + \varepsilon_0}{b + \delta} \right)}{b + \gamma + \delta} + b + \delta + \varepsilon_0$$

$$a_2 = (b + \delta)(b + \gamma) \left( R_0 - \frac{b + \delta + \varepsilon_0}{b + \delta} \right)$$

根据Hurwitz判据, 当满足 $R_0 \geq 1 + \frac{\varepsilon_0}{b + \delta}$ 时有 $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$ , 此时 $P_0^*$ 是局部渐近稳定的。

3) 系统(式(4))在 $P_1^*$ 处的线性化系统对应的特征方程为 $\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 = 0$ , 其中:

$$a_3 = \frac{(a + \beta)(b + \delta)(R_0 - 1)}{a + \beta + \delta R_0} + b + \delta$$

$$a_4 = \frac{(b + \delta)(R_0 - 1)(a + \beta)(b + \gamma)}{a + \beta + \delta R_0}$$

根据Hurwitz判据, 当 $R_0 \geq 1$ 时有 $a_3 > 0, a_4 > 0$ , 此时 $P_1^*$ 是局部渐近稳定的。

证毕。

定理3

1) 当 $R_0 \leq M_2$ 时, 则 $P_0$ 在 $\Omega$ 内全局渐近稳定。

2) 当满足定理1中 $P_0^*$ 存在条件时, 则 $P_0^*$ 在 $\Omega$ 内全局渐近稳定。

3) 当满足定理1中 $P_1^*$ 存在条件时, 则 $P_1^*$ 在 $\Omega$ 内全局渐近稳定。

证明

1) 针对系统(式(3))的无毒平衡点 $P_0$ 考虑Dulac函数

$$D(S, I) = \frac{1}{I}$$

且有

$$\begin{cases} P(S, I) = \dot{S} \\ Q(S, I) = \dot{I} \end{cases}$$

$$\text{则 } \text{div}\{DP, DQ\} = \frac{\partial(DP)}{\partial S} + \frac{\partial(DQ)}{\partial I} = -\beta - \frac{\varepsilon_0 + b + \delta}{I} < 0$$

根据 Bendixson-Dulac 判据则系统不存在位于区域内的闭轨道。

考虑 Lyapunov 函数  $V_1(t) = I$ , 当  $R_0 \leq 1 + \frac{\varepsilon_0}{b + \delta}$  时, 有

$$\left. \frac{dV_1}{dt} \right|_{(3)} = \dot{I} = \beta SI - bI - \gamma I \leq (\beta S^0 - b - \gamma)I =$$

$$S^0(b + \gamma) \left( R_0 - \left( 1 + \frac{\varepsilon_0}{b + \delta} \right) \right)$$

从而  $\left. \frac{dV_1}{dt} \right|_{(3)} \leq 0$  成立, 并且当且仅当  $(S, I) = (S^0, I^0)$  时

$$\left. \frac{dV_1}{dt} \right|_{(3)} = 0. \text{ 根据 LaSalle 不变集原理, } P_0^* \text{ 是全局渐近稳定的。}$$

2) 针对系统(式(3))的  $P_0^*$  考虑 Lyapunov 函数:

$$V_2(t) = S - S_0^* - S_0^* \ln \frac{S}{S_0^*} + (1 + d_1) \left( I - I_0^* - I_0^* \ln \frac{I}{I_0^*} \right)$$

其中:  $d_1 = \frac{\delta}{\beta S_0^*}$ ,  $V_2$  关于  $(S_0^*, I_0^*)$  是正定的, 则

$$\left. \frac{dV_2}{dt} \right|_{(3)} = \frac{S - S_0^*}{S} \dot{S} + (1 + d_1) \frac{I - I_0^*}{I} \dot{I} =$$

$$\frac{S - S_0^*}{S} (b + \delta + \varepsilon_0 + \beta I_0^*) (S_0^* - S) +$$

$$d_1 \beta \left( S - \frac{\delta}{d_1 \beta} \right) (I - I_0^*) \frac{S - S_0^*}{S} =$$

$$- \frac{(S - S_0^*)^2}{S} \left( \frac{\delta + b - \delta I}{S_0^*} \right)$$

从而  $\left. \frac{dV_2}{dt} \right|_{(3)} \leq 0$  成立, 并且当且仅当  $(S, I) = (S_0^*, I_0^*)$

时  $\left. \frac{dV_2}{dt} \right|_{(3)} = 0$ 。根据 LaSalle 不变集原理,  $P_0^*$  是全局渐近稳定的。

3) 针对系统(式(4))的  $P_1^*$  考虑 Lyapunov 函数:

$$V_3(t) = S - S_1^* - S_1^* \ln \frac{S}{S_1^*} + (1 + d_2) \left( I - I_1^* - I_1^* \ln \frac{I}{I_1^*} \right)$$

其中:  $d_2 = \frac{a + \delta}{\beta S_1^*}$ ,  $V_3$  关于  $(S_1^*, I_1^*)$  是正定的, 则

$$\left. \frac{dV_3}{dt} \right|_{(4)} = \frac{S - S_1^*}{S} \dot{S} + (1 + d_2) \frac{I - I_1^*}{I} \dot{I} =$$

$$- \frac{(S - S_1^*)^2 (b + \delta - \delta I)}{SS_1^*}$$

从而  $\left. \frac{dV_3}{dt} \right|_{(4)} \leq 0$  成立, 并且当且仅当  $(S, I) = (S_1^*, I_1^*)$

时  $\left. \frac{dV_3}{dt} \right|_{(4)} = 0$ 。根据 LaSalle 不变集原理,  $P_1^*$  是全局渐近稳定的。

### 3 数值分析

为验证理论推导的正确性并进一步提取有趣信息, 下面对本文建立的模型进行数值仿真。首先, 通过四组不同的初始

参数来观察系统的演变状况并与理论结果作对比。分别取:

1)  $S(0) = 0.01, I(0) = 0.7, b = 0.2, \beta = 0.2, \delta = 0.1, \gamma = 0.05, a = 0.5, I_0 = 0.3$ 。

如图2所示, 此时  $R_0 = 0.8 < M_2 = 1.5$ , 系统稳定在了无毒平衡点  $P_0(0.6667, 0)$ 。

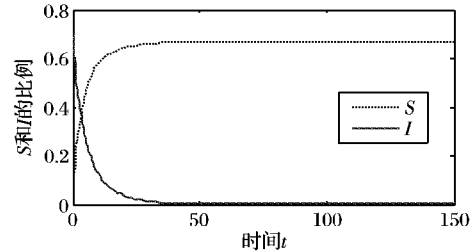


图2 采用1)组参数时系统中S和I各自比例的演化

2)  $S(0) = 0.7, I(0) = 0.29, b = 0.2, \beta = 0.3, \delta = 0.2, \gamma = 0.01, a = 0.25, I_0 = 0.3$ 。

如图3所示, 此时  $M_2 = 1.2 < R_0 = 1.4 < M_3 = 1.7$  且  $I_0 = 0.3 < M_1 = 1.0$  系统稳定在了有毒平衡点  $P_0^*(0.7, 0.16)$ 。

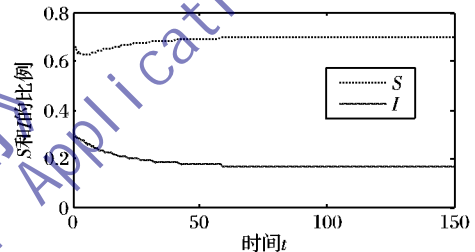


图3 采用2)组参数时系统中S和I各自比例的演化

3)  $S(0) = 0.29, I(0) = 0.01, b = 0.01, \beta = 0.3, \delta = 0.2, \gamma = 0.1, a = 0.3, I_0 = 0.2$ 。

如图4所示, 此时  $R_0 = 2.72 > M_3 = 1.82$  且  $I_0 = 0.2 < M_1 = 0.67$  系统稳定在了有毒平衡点  $P_1^*(0.3667, 0.3167)$ 。

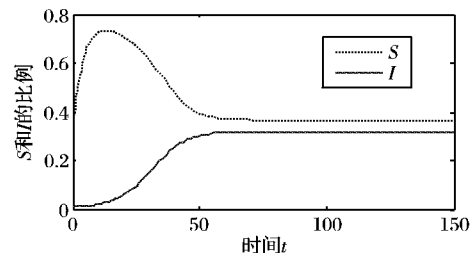


图4 采用3)组参数时系统中S和I各自比例的演化

4)  $S(0) = 0.01, I(0) = 0.7, b = 0.1, \beta = 0.4, \delta = 0.1, \gamma = 0.1, a = 0.1, I_0 = 0.7$ 。

如图5所示, 此时  $I_0 = 0.7 > M_1 = 0.67$  且  $M_2 = 1.35 < R_0 = 2$ , 系统稳定在了有毒平衡点  $P_0^*(0.5, 0.2167)$ 。

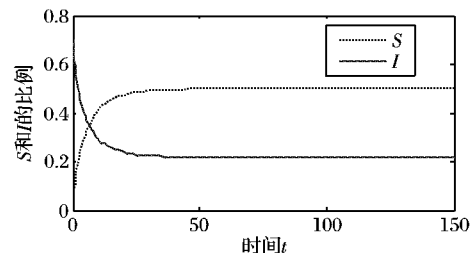


图5 采用4)组参数时系统中S和I各自比例的演化

图2~5反映了当  $R_0 \leq M_2$  时, 系统中的病毒最终将得到有效控制, 被感染节点的比例将趋近于0; 当  $M_2 \leq R_0 \leq M_3$  或者当  $I_0 \geq M_1$  且  $M_3 \leq R_0$  时, 被感染节点将不会全部消亡, 只

会稳定在平衡态  $P_0^*$ ; 当  $I_0 \leq M_1$  且  $R_0 \geq M_3$  时, 被感染节点不会全部消亡, 只会稳定在另一个平衡态  $P_1^*$ 。仿真结果与理论分析结果一致。

同时, 为了验证模型的有效性, 本文通过传统的 SIRS 计算机病毒模型<sup>[3-4]</sup> 进行比较。分别取参数  $b = 0.2$ ,  $\beta = 0.2$ ,  $\delta = 0.1$ ,  $\gamma = 0.05$ ,  $a = 0.5$ ,  $\gamma = 0.05$ ,  $a = 0.5$ ,  $I_0 = 0.3$ 。

从图6可发现, 改进模型较之相应传统模型, 已感染节点比例下降速度明显加快, 从而能使病毒传播更早得到有效控制。因此将阶段免疫接种加入到 SIRS 模型中, 对计算机病毒研究具有现实意义。

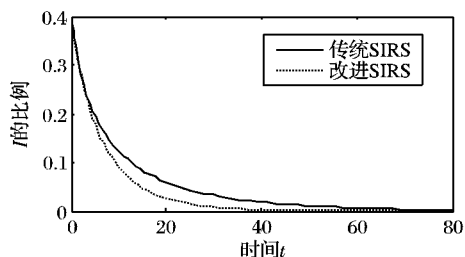


图6 改进前后系统中已感染节点  $I$  所占比例的演化

另外为了研究设定感染阈值对病毒传播的影响, 取参数值分别为  $S(0) = 0.7$ ,  $I(0) = 0.21$ ,  $b = 0.01$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $\delta = 0.1$ ,  $\gamma = 0.1$ ,  $\varepsilon_0 = 0.05$ ,  $I_0 = 0.2, 0.53, 1$ 。如图7所示, 此时  $M_1 = 0.5238$ 。

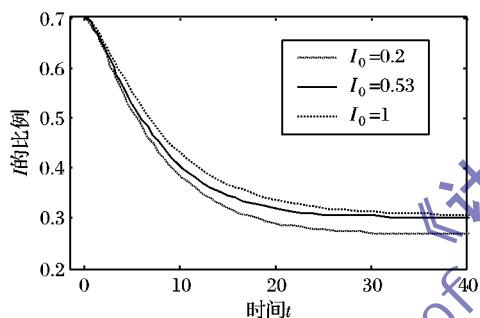


图7  $I_0$  取不同值时系统中  $I$  的比例的变化对比

从图7可发现, 当  $I_0 \leq M_1$  且  $R_0 \geq M_3$  时, 提高免疫接种概率会使网络出现新的有毒平衡态, 此平衡态下的感染节点比例相对采取措施前有所下降。同时控制感染阈值  $I_0$  可以使系统在两个平衡态之间转化, 即当  $I_0 \geq M_1$  时可能使系统由平衡态  $P_1^*$  转化为平衡态  $P_0^*$ , 此后随着感染阈值  $I_0$  的增大, 系统趋于平衡的速度将减缓。

#### 4 结语

本文考虑免疫接种的实际特点提出了一个改进的 SIRS 计算机病毒传播模型。该模型的理论分析和计算机仿真结果表明, 系统随时间演化将可能出现3种平衡态, 其动力学行为取决于感染阈值  $I_0$  的设定以及  $R_0$  的取值: (1) 该模型通过与

传统 SIRS 模型比较, 验证了阶段免疫接种对于病毒控制的有效性; (2) 与以往模型不同是该模型能更为客观的反映免疫接种策略在病毒传播中实施特点; (3) 在一定条件下, 提高感染阈值  $I_0$  会减缓系统趋于平衡的速度。所得实验结论可以为病毒防控策略提供理论参考。

本文是旨在通过引入阶段免疫接种概率函数来研究阶段防控策略对病毒传播的影响。事实上已感染节点比例在达到感染阈值前后可能会有其他参数的变化<sup>[10]</sup>, 导致两个阶段存在更大的差异。同时本文模型是建立在全连接网络上, 然而真实的网络拓扑仍有待研究<sup>[8]</sup>, 为此下一步的工作是将病毒阶段防控策略针对复杂网络做调整, 比如对于大度节点有更高的概率免疫接种等, 从而可以使模型得到更多有价值的结论。

#### 参考文献:

- [1] 张仁斌, 李钢, 侯整风. 计算机病毒与反病毒技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] KEPHART J O, WHITE S R. Directed graph epidemiological model of computer viruses[C]// Proceedings of 1991 IEEE Symposium on Security and Privacy. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1991: 343-359.
- [3] 李玉辉. 具有双线性感染率和免疫接种 SIRS 模型的分析[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2011, 12(2): 149-153.
- [4] GAN C, YANG X, LIU W. Propagation of computer virus under human intervention: a dynamical model [EB/OL]. [2012-05-10]. <http://www.hindawi.com/journals/ddns/2012/106950/>.
- [5] LI J, YANG Y, ZHOU Y. Global stability of an epidemic model with latent stage and vaccination [J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2011, 12(4): 2163-2173.
- [6] 冯丽萍, 王鸿斌, 冯素琴. 改进的 SIR 计算机病毒传播模型[J]. 计算机应用, 2011, 31(7): 1891-1893.
- [7] 张海峰, 傅新楚. 含有免疫作用的 SIR 传染病模型在复杂网络上的动力学行为[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2007, 13(2): 189-192.
- [8] 夏承遗, 刘忠信, 陈增强, 等. 复杂网络上带有直接免疫的 SIRS 类传染模型研究[J]. 控制与决策, 2008, 23(4): 468-472.
- [9] MISHRA B K, PANDEY S K. Fuzzy epidemic model for the transmission of worms in computer network [J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2010, 11(5): 4335-4341.
- [10] REN J, YANG X, ZHU Q, et al. A novel computer virus model and its dynamics [J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2012, 13(1): 376-384.
- [11] LU Z, CHI X, CHEN L. The effect of constant and pulse vaccination on SIR epidemic model with horizontal and vertical transmission [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 36(9/10): 1039-1057.
- [12] LUO Y, GAO S, YAN S. Pulse vaccination strategy in an epidemic model with two susceptible subclasses and time delay [J]. Applied Mathematics, 2011, 2(1): 57-63.
- [13] ROBINSON R C. An introduction to dynamical systems: continuous and discrete [M]. London: Pearson Education, 2005.

(上接第719页)

- [10] ANDERSON J P. Computer security technology planning study, ES-DTR-73-51[R]. Bedford: Air Force Electronic Systems Division, 1972.
- [11] KANG M H, MOSKOWITZ I S, LEE D C. A network version of the pump[C]// Proceedings of 1995 IEEE Symposium on Security and Privacy. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 144-154.
- [12] KANG M H, MOSKOWITZ I S, CHINCHECK S. The pump: a decade of covert fun[C]// Proceedings of the 21st Annual Computer

Security Applications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 5-9.

- [13] 信息技术产品安全测评报告[EB/OL]. [2010-12-10]. <http://www.itsec.gov.cn/cpyzcgg/ggl26/>.
- [14] Developing a CC EAL7 multi-level security capability [EB/OL]. [2012-03-12]. <http://www.commoncriteriaportal.org/iccc/7iccc/t1/t1210900.pdf>.