

# 大型船舶流行病传播控制过程多智能体模型\*

任凯<sup>1</sup>, 李莹<sup>1</sup>, 罗雯军<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 中国舰船研究设计中心, 上海 201108)

**摘要:**基于复杂网络和传播动力学相关原理,构建了符合大型船舶人员交互特征的社交网络,定义了传播网络层级结构,分析了交互网络拓扑生成的5项规则,给出了大型船舶流行病传播社交网络构成方法。基于多智能体技术,研究了交互网络节点成员属性和流行病传播特点,给出了智能体成员状态空间的基本构成形式,融合防护治疗、管控隔离、信息交互等因素的物理特征,构建了智能体状态迁移和行为交互过程算法,并分析论证了衰减函数的结构及区间特性。对比距离恒定模型和随机游走模型,分别对典型大型船舶流行病传播过程分4种工况12种状态进行了仿真计算,结果表明:随机游走模型更适合信息量丰富条件下的大型船舶流行病早期传播过程模拟仿真和疫情防控策略分析。

**关键词:**复杂网络;多智能体;社交网络;流行病传播

中图分类号:C931 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2021)06-153-10



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Multi-agent model of epidemic control process for large cruise ships

REN Kai<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, LUO Wenjun<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. China Ship Research & Design Center, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** Based on the theory of complex network and propagation dynamics, a social network was constructed, which conforms to the interaction characteristics of large cruise ships. The hierarchical structure of the communication network was defined, five rules of topology generation of the interaction network were analyzed, and the social networks construction method of the large cruise ships epidemic communication were given. Based on the multi-agent technology, the properties of the members of the interaction network nodes and the epidemic propagation characteristics were studied, the basic form of agent member state-space was given, the physical characteristics of protection and treatment, management and control isolation, information interaction and other factors were integrated, the algorithm of agent state transfer and behavior interaction process were constructed, and the structure and interval characteristics of attenuation function were analyzed and demonstrated. Compared with the constant-distance model and the random-walk model, the simulation calculations of the epidemic transmission process of typical large cruise ships were carried out under 4 working conditions and 12 states, respectively. Results show that the random-walk model is more suitable for the simulation of the early epidemic transmission process of large cruise ships and the analysis of epidemic prevention and control strategies with abundant information.

**Keywords:** complex network; multi-agent; social network; epidemic propagation

大型船舶具有结构层次复杂,人员聚集性特征显著,对威胁人员健康的传染病毒防控能力有限的特点。2020年1月至4月,新冠肺炎病毒肆虐全球,停靠日本的“钻石公主号”、停靠美国的“至尊公主号”邮轮相继暴发疫情,英国、智利等国均有邮轮遭遇病毒传播险情,而且美军航母“罗斯福号”,大型船坞登陆舰“拳师号”也有报道船员感染病毒。高致病性病毒在大型船舶空间内传播能力强、速度快、影响剧烈,是当前和今后值得关注的重要问题。

国际国内研究的流行病传播规律较为广泛,传播动力学与复杂网络相结合,形成了当前研究问题的基本思路<sup>[1-6]</sup>。基于网络节点连接构成固定拓扑结构的流行病传播网络模型和考虑个体运动特性,展现流行病在群体内通过个体运动携带传播的种群模型是目前研究中较为完善的理论模型<sup>[6]</sup>。网络拓扑结构固定的传播模型易于开展流行病随时间演化的动力学特性分析,运用解析法可以在时域范围内对关键节点、网络连边等要素分步求解<sup>[1]</sup>,但是固定的连接网络拓扑结构对

\* 收稿日期:2020-04-24

基金项目:国家部委基金资助项目(1020201021001)

作者简介:任凯(1979—),男,辽宁丹东人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:ms1201@163.com

外部因素作用下的流行病传播过程动态响应存在缺陷。基于个体运动传播的种群模型比较接近真实世界传播规律,该模型能够体现个体行为独立属性,个体在种群网络节点上的迁移引起流行病传播与感染者群体和易感者群体的规模、分布、活跃特性都有关系<sup>[5]</sup>,该模型对于种群成员活跃程度高、传播行为响应灵敏等特性适应性较强,但求解过程较为复杂。

大型船舶环境具有一般社交网络基本特征,网络节点成员属性相对简单,节点性质特征鲜明,网络成员容易聚类描述,且流行病传播过程中网络成员活跃性有限。本文从特征适配性出发,提升动态网络模型适应性,基于多智能体技术,采取“固定网络拓扑结构联结,动态移位活跃节点位置”的建模思路,构建符合大型船舶人员交互特征的社交网络,兼顾成员之间的彼此联系和活跃成员之间的交互关系,开展流行病传播特性分析和模拟流行病传播早期控制过程研究,可为制定控制策略提供有益帮助。

## 1 大型船舶流行病传播社交网络构成方法

### 1.1 传播网络基本特征

经典的 SIRS 类传播动力学模型能够在宏观层面表现群体流行病传播规律,对于多步、长时域、迭代较多的情形,不易获得满意解。流行病传播与易感人群知识和防御能力提升、外界防控手段改进优化、医疗条件升级提效等众多影响因素有关,丰富传播模型的融合信息,对网络层次、传播能力、结构演化等问题研究是当前国内外学者的关注重点<sup>[7-10]</sup>。传播网络生成和演化须融合节点属性、成员性质和运行机理等因素<sup>[11]</sup>,进一步分析大型船舶流行病传播社交网络发现,船舶环境下的流行病传播有显著特征:因群体成员间的熟悉程度和工作关系,网络成员间存在广泛的固定联系,这种联系可能导致流行病传播;网络中部分成员可能存在活跃度高、交往密集的情况,这种交往密集的个体行为现象,可能导致流行病传播。大型船舶环境中的流行病传播网络属于动态复杂网络,网络构建包含两个步骤:

**步骤 1:**结合群体成员间的人际交往和工作关系建立基本联结稳定的社交网络结构;

**步骤 2:**对节点度值较高的成员依据时间序列,在网络演化过程中结合随机游走模型产生节点位置移动,此过程不改变原节点之间的联结关系。

值得注意的是,对于网络结构简单,节点成员行为确定,网络拓扑结构稳定的情形,步骤 1 的结

果亦可独立开展传播特性分析。

### 1.2 传播网络层级结构

大型船舶环境是特殊社交网络,网络成员群体性明显,物理节点和节点之间联结特性对传播过程影响较大,考虑网络成员属性和网络自身运行机理,网络结构呈现分级分层特征。考虑问题的一般性,不妨设成员属性包括旅客 (passenger) 和服务员 (waiter) 两类,设所有人员构成网络节点集合  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, W_1, W_2, \dots, W_j, \dots, W_n\}$ ,由多个属性不同的子集  $P_i, W_j$  组成,  $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$ ,  $W_j = \{w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jl}\}$ ,  $p_{ik}$  和  $w_{jl}$  表示网络上节点。节点受物理空间位置和自身属性约束,分别表示为各个甲板层的旅客和服务管理人员,相同类型的同层节点属于同一子集,节点之间由联结构成物理接触条件,表现成员之间的联系,联结包括同子集内节点联结  $e_{ik-1 \leftrightarrow ik}^{PP}$ 、同型异子集之间节点联结  $e_{i-1k \leftrightarrow ik}^{PP}$  和异型异子集之间节点联结  $e_{jl-1 \leftrightarrow ik}^{WP}$ ,各子集根据其类型属性节点度的平均值为  $\langle k_i^P \rangle$  和  $\langle k_j^W \rangle$  的不同子网络,子集之间通过分属不同子集节点之间的联结构成子集之间网络。网络形态属于规则网络,兼具 ER 均匀随机网络和 BA 无标度网络部分特征<sup>[6]</sup>,如图 1 所示。实际网络中,子网络之间在物理空间内存在交叠或者重合的情况。

### 1.3 联结固定的基本网络拓扑生成规则

大型船舶人员社交行为受环境、活动空间、工作性质、信息传播等因素影响,不同类型人员属性差别很大,传播动力因传播者个体差异非一致性特征显著。传播网络构建规则包括了同层旅客属性节点网络、同层服务员属性节点网络、同层旅客服务员服务网络、异层旅客社交网络、异层服务员工作网络等规则。考虑 1.1 节流行病传播网络基本特征,设定各传播网络节点基本联结固定。特别说明:由于异层旅客服务员网络涉及情形较为复杂,本模型暂未实现。

**规则 1:**同层旅客属性节点网络。设第  $i$  个旅客属性网络  $NP_i$  节点总数为  $m_i^P$ ,任意节点位置记为  $p_{ik} (x_{ik}^P, y_{ik}^P, z_{ik}^P)$ ,节点之间距离为  $D_{is \leftrightarrow ik}^P = \sqrt{(x_{is}^P - x_{ik}^P)^2 + (y_{is}^P - y_{ik}^P)^2 + (z_{is}^P - z_{ik}^P)^2}$ ,对同层节点而言,  $z_{is}^P = z_{ik}^P$ ,网络节点度的平均值为  $\langle k_i^P \rangle$ ,网络联结总数为  $C_i^P = m_i^P \cdot \langle k_i^P \rangle / 2$ ;随机取出节点  $p_{ik}$ ,从其他  $m_i^P - 1$  个节点中选取节点  $p_{is}, p_{is}$  须满足未曾与  $p_{ik}$  连接,且满足条件  $D_{is \leftrightarrow ik}^P = \min_{t=1, t \neq k}^{m_i^P} \{D_{it \leftrightarrow ik}^P\}$ ,则建立联结  $e_{is \leftrightarrow ik}^{PP}$ ,循环  $C_i^P$  次构建网络  $NP_i$ 。

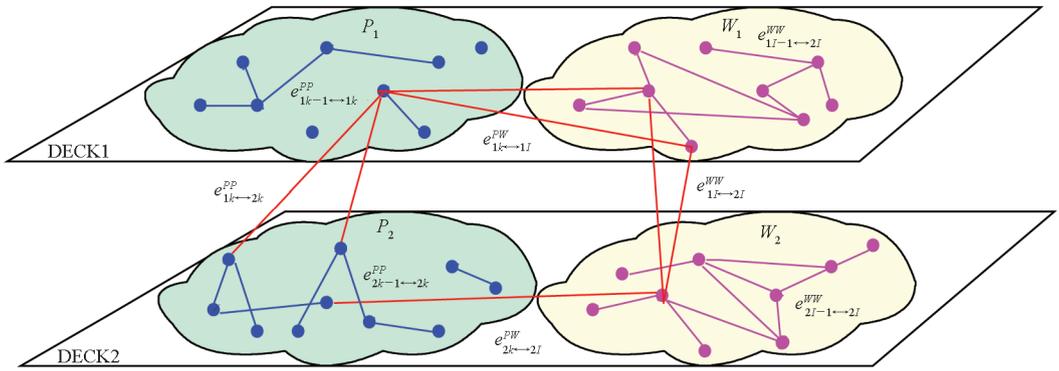


图 1 传播网络层级结构

Fig. 1 Hierarchy of communication network

**规则 2:** 同层服务员属性节点网络。同理于规则 1, 网络  $NW_j$  节点总数为  $n_j^W$ , 网络节点度的平均值为  $\langle k_j^W \rangle$ , 网络联结总数为  $C_j^W = n_j^W \cdot \langle k_j^W \rangle / 2$ ; 随机取出节点  $w_{jl}$ , 此处不同于规则 1, 从其他  $n_j^W - 1$  个节点中选取节点  $w_{js}$ ,  $w_{js}$  只需满足未曾与  $w_{jl}$  连接, 则建立联结  $e_{js \leftrightarrow jl}^{WW}$ , 循环  $C_j^W$  次构建网络  $NW_j$ 。

**规则 3:** 同层旅客服务员服务网络。大型船舶环境同层服务员与旅客构成辐射型均匀随机网络特征显著, 设第  $j$  个服务员属性网络  $NW_j$  与第  $i$  个旅客属性网络  $NP_i$  同层, 即满足  $j = i$ , 设网络  $NW_j$  节点总数为  $n_j^W$  (一般情况下  $(n_j^W / m_i^P) < 1$ ), 节点度的平均值为  $\langle k_j^W \rangle$ , 受服务员服务保障能力限制, 服务网络  $NPW_{j=i}$  的联结总数为  $C_{j=i}^{PW} = n_{j=i}^W \cdot \langle k_{j=i}^{PW} \rangle$ 。从  $NP_i$  中随机取出节点  $p_{ik}$ , 值得注意的是  $p_{ik}$  被随机选中的机会不止一次, 从  $NW_j$  的  $n_j^W$  个节点中选取节点  $w_{js}$ ,  $w_{js}$  须满足未曾与  $p_{ik}$  连接, 且满足条件  $D_{js \leftrightarrow ik}^{PW} = \min_{t=1}^{n_j^W} \{ D_{jt \leftrightarrow ik}^{PW} \}$  ( $D_{js \leftrightarrow ik}^{PW}$  算法同规则 1), 则建立联结  $e_{js \leftrightarrow ik}^{PW}$ , 即网络  $NW_j$  的任意  $w_{jl}$  都可与网络  $NP_i$  中满足条件的任意  $p_{ik}$  建立一次连接, 循环  $C_{j=i}^{PW}$  次构建网络  $NPW_{j=i}$ 。

**规则 4:** 异层旅客社交网络。大型船舶环境中旅客跨层社交存在 BA 网络特征, 网络中的节点存在活跃度自增强机制<sup>[4]</sup>。设数量  $u \geq 2$  个典型异层旅客属性网络  $NP_a$ 、 $NP_b$  和  $NP_c$  网络节点度的平均值分别为  $\langle k_a^P \rangle$ 、 $\langle k_b^P \rangle$  和  $\langle k_c^P \rangle$ , 其中  $a \neq b \neq c \leq u$  ( $u$  不局限于 3 个)。对任意  $p_{ak} \in NP_a$ , 若节点度  $\langle k_{p_{ak}} \rangle$  满足  $\langle k_{p_{ak}} \rangle \geq \langle k_a^P \rangle$ , 则定义  $p_{ak}$  为活跃节点。设网络  $NP_a$ 、 $NP_b$  和  $NP_c$  的活跃节点数分别为  $m_a^P$ 、 $m_b^P$  和  $m_c^P$ , 异层旅客社交网络  $NPP_{var}$  的联结总数  $C_{var}^{PP} = \sum_{i=a,b,c} m_i^P \cdot \langle k_i^P \rangle / 2$ , 亦可记为  $C_{var}^{PP} = \sum_{i=a,b,c} C_i^{PP}$ 。对任意网络  $NP_a$ , 随机取出活跃节点

$p_{ak}$ , 从其他异层网络  $m_b^P + m_c^P$  个节点中选取节点  $p_{is}$ , 这里  $p_{is}$  可以是  $p_{bs}$  或者  $p_{cs}$ ,  $p_{is}$  须满足未曾与  $p_{ak}$  连接, 且满足条件节点度  $\langle k_{p_{is}} \rangle \geq \frac{1}{u} \sum_{i=1, i \neq a}^u \langle k_i^P \rangle$ , 则建立联结  $e_{is \leftrightarrow ak}^{PP}$ , 也就是活跃节点始终表现活跃特性, 循环  $C_a^{PP}$  次完成来自网络  $NP_a$  活跃节点的组网, 同理对网络  $NP_b$ 、 $NP_c$  活跃节点组网, 形成联结总数为  $C_{var}^{PP}$  的旅客社交网络  $NPP_{var}$ 。

**规则 5:** 异层服务员工作网络。异层服务员工作网络相似于异层旅客社交网络, 区别在于活跃节点的连接对象不一定具有较强活跃性, 它与工作需求有关, 是随机行为。同理于规则 4, 设数量  $u \geq 2$  个服务员属性网络  $NW_a$ 、 $NW_b$  和  $NW_c$  网络节点度的平均值分别为  $\langle k_a^W \rangle$ 、 $\langle k_b^W \rangle$  和  $\langle k_c^W \rangle$ , 活跃节点数分别为  $n_a^{WA}$ 、 $n_b^{WA}$  和  $n_c^{WA}$ , 异层服务员工作网络  $NWW_{var}$  的联结总数  $C_{var}^{WW} = \sum_{j=a,b,c} n_j^{WA} \cdot \langle k_j^W \rangle / 2$ , 亦可记为  $C_{var}^{WW} = \sum_{j=a,b,c} C_j^{WW}$ 。对任意网络  $NW_a$ , 随机取出活跃节点  $w_{al}$ , 从其他异层网络  $n_b^W + m_c^W$  个节点中选取节点  $w_{js}$ ,  $w_{js}$  须满足未曾与  $w_{al}$  连接, 则建立联结  $e_{js \leftrightarrow al}^{WW}$ , 循环  $C_a^{WW}$  次完成来自网络  $NW_a$  活跃节点的组网, 进一步形成联结总数为  $C_{var}^{WW}$  的服务员工作网络  $NWW_{var}$ 。

### 1.4 考虑活跃节点随机游走的节点位变规则

从理论上分析, 所有网络成员均可“随机游走”, 考虑成员属性、行为特性和工作特点, 为提升系统计算效率, 设定旅客类和服务员类网络中的活跃节点具备随机游走特性。参数定义见 1.3 节, 随机取出旅客类节点  $p_{ik}$  和服务员类节点  $w_{jl}$ , 若满足:

$$\begin{aligned} \langle k_{ik}^P \rangle &\geq \max \{ \langle k_{j=i}^{PW} \rangle + \langle k_i^P \rangle, \\ &\langle k_{j=i}^{PW} \rangle + \sum_{i=a,b,c} m_i^{PA} \cdot \langle k_i^P \rangle / \sum_{i=a,b,c} m_i^{PA} \} \\ \langle k_{jl}^W \rangle &\geq \max \{ \langle k_{j=i}^{PW} \rangle + \langle k_j^W \rangle, \\ &\langle k_{j=i}^{PW} \rangle + \sum_{j=a,b,c} n_j^{WA} \cdot \langle k_j^W \rangle / \sum_{j=a,b,c} n_j^{WA} \} \end{aligned}$$

即旅客类节点  $p_{ik}$  节点度  $\langle k_{ik}^P \rangle$  和服务员类节点  $w_{jl}$  节点度  $\langle k_{jl}^W \rangle$  满足上述要求时,该旅客类节点  $p_{ik}$  和服务员类节点  $w_{jl}$  可在网络内随机游走。

综合考虑算法适用性和过程简洁性,假设活跃节点在位变过程中不接受感染,也不感染其他节点,位变仅与始末位置有关,与中间过程无关,随机游走过程中可依据下列规则设计位变算法,如算法 1 所示。

**算法 1 活跃节点随机游走位变规则**

Alg. 1 Rules of active nodes position changing for random walk

已知:以  $p_{ik}$  节点为例,若  $p_{ik}$  属于活跃节点,初始状态下顺序取出满足条件的活跃节点,并执行下列操作

1. 获得当前  $p_{ik}$  的位置
2. **if** 节点生命力能量值  $E \geq E_{\min}$  **then**  
Agent 随机转向
3. 节点  $p_{ik}$  智能体左旋 random  $360^\circ$
4. 节点  $p_{ik}$  智能体右旋 random  $360^\circ$   
Agent 水平方向随机位变
5. 节点  $p_{ik}$  智能体前进 forward random  $0.5L$ (空间长度)  
Agent 垂直方向随机位变
6. 节点  $p_{ik}$  智能体垂向位置坐标: set 垂向坐标最小值 + 层高度  $\times$  random  $n$ (层数)
7. **else**
8. 原位置不变
9. **end if**

**2 大型船舶社交网络上多智能体传播模型**

多智能体技术可以模拟个体行为并产生群体交互,基于前文规则构建大型船舶环境交互网络,通过设置各种类型边界条件可得流行病传播结果。随着近年来计算设备性能提升,从微观个体出发,发掘群体特征和规律,基于智能体技术构建目标群体社交网络,研究群体行为时间序列下的运动特征和规律,应用于流行病传播研究可以获得较为满意的结果<sup>[12-14]</sup>。

**2.1 智能体属性及特征模型**

大型船舶上任意节点人员  $p_{ik}$  和  $w_{jl}$  表示智能体成员,从这个意义上说,他们无差别,记为  $g_{ik}$  或者  $g_{jl}$ ,从流行病传播角度定义所有成员共同属性

和状态,如图 2 所示。

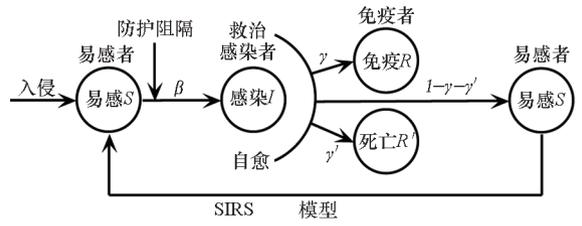


图 2 流行病传播 SIRS 模型

Fig. 2 SIRS model of epidemic transmission

由图 2 可知,成员状态空间可进一步表示为:  
 $g_{ik} = \{x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}, \mathbf{State}(g_{ik}), \mathbf{Check}(g_{ik}), \mathbf{Energy}(g_{ik}), \beta(g_{ik}), \gamma(g_{ik}), \gamma'(g_{ik}), d_{ifd}(g_{ik}), d_{i-collision}(g_{ik})\}$   
 $\mathbf{State}(g_{ik}) = (\mathbf{Susceptible}(g_{ik}), \mathbf{Infected}(g_{ik}), \mathbf{Patient}(g_{ik}), \mathbf{Resistant}(g_{ik}), \mathbf{Death}(g_{ik}))$

状态向量  $\mathbf{State}(g_{ik})$  各分量均为布尔变量,  $\mathbf{Susceptible}(g_{ik}) = [0, 1]$ ,  $\mathbf{Infected}(g_{ik}) = [0, 1]$ ,  $\mathbf{Patient}(g_{ik}) = [0, 1]$ ,  $\mathbf{Resistant}(g_{ik}) = [0, 1]$ ,  $\mathbf{Death}(g_{ik}) = [0, 1]$ , 对健康易感状态而言,  $\mathbf{State}(g_{ik}) = (1, 0, 0, 0, 0)$ 。

$\mathbf{Check}(g_{ik}) = \mathbf{Rand}(0, 1) \cdot \tau_{\text{Treat}}$  生成获得检查救治的时间间隔,其中  $\mathbf{Rand}(0, 1)$  生成  $0 \sim 1$  之间的随机数,  $\tau_{\text{Treat}}$  是最长的等待接受救治时间间隔。

$\mathbf{Energy}(g_{ik})$  表示成员生命值指标,单位是百分比。

$\beta(g_{ik})$  在智能体运行环境中可表示成员之间传播的机会,  $\gamma(g_{ik})$  表示获得救治并治愈产生抗体的机会,  $\gamma'(g_{ik})$  表示死亡的机会。

$d_{ifd}(g_{ik})$  是距离值变量,表示成员在小于距离  $d_{ifd}(g_{ik})$  的范围内可能被与其相连接的感染状态成员所传染,或者自身被感染的情况下,可能传播病毒给其他成员。

$d_{i-collision}(g_{ik})$  是距离值变量,表示成员在小于距离  $d_{i-collision}(g_{ik})$  的范围内,不论成员之间是否存在联结,是否同属于一个类型网络,都可能被与其相邻的感染状态成员所传染,或者自身被感染的情况下,可能传播病毒给其他成员。

**2.2 传播行为的多智能体交互过程**

经典的 SIRS 模型给出了流行病传播系统动力学基本方程:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\beta$  表示感染率,  $\gamma$  表示免疫率,  $S(t)$ 、 $I(t)$  和

$R(t)$  分别表示  $t$  时刻易感、感染、免疫群体的数量。应当注意,经典模型中基于解析方法求解该微分方程组是非常困难的,且感染率、免疫率均为设定常数,易感人群的类型未进一步区分,防护治疗、空间环境、信息交互等因素未包含其中。基于智能体技术从微观个体展现传播过程,充分运用高性能计算机运算能力,结合对智能体状态的数据统计,可对全体状态获得宏观把控,表现形如式(1)所示的系统动力学过程。传播网络上智能体的交互行为包括:状态迁移过程和行为交互过程等。

**过程 1: 状态迁移。** 状态迁移指状态向量  $State(g_{ik})$  各分量状态赋值运算。这包括易感  $Susceptible(g_{ik})$ 、被感染  $Infected(g_{ik})$ 、被救治(隔离)  $Patient(g_{ik})$ 、被免疫  $Resistant(g_{ik})$  和死亡  $Death(g_{ik})$  等各个分量。例如,智能体首次由健康易感状态变为被感染状态时,其状态向量  $State(g_{ik}) = (1, 0, 0, 0, 0)$  迁移至  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$ ,又如智能体由感染状态迁移至救治状态,其状态向量  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$  迁移至  $State(g_{ik}) = (0, 1, 1, 0, 0)$ ,以此类推。

**过程 2: 行为交互。** 行为交互包括了病毒传播、感染及个体生命消耗、病情诊断和救治过程等。

### 2.2.1 病毒传播

社交网络上的病毒传播行为可以通过节点之间的联结实现传播,或者通过活跃节点随机游走过程中的位置足够接近实现传播。病毒在任意两个  $g_{ik}$  之间,当节点成员状态分属  $State(g_{sk}) = (1, 0, 0, 0, 0)$  和  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$  时均可传播,与前文所述子网络属性有关。

对于同层旅客属性节点网络,异层旅客属性节点网络和同层旅客服务员服务网络,即涉及旅客成员的网络,考虑传播过程中的固有限制行为,当网络中某一成员处于被感染状态,即  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$  时,对所在网络中任意与其存在  $e_{is \leftrightarrow ik}^{PP}$ 、 $e_{is \leftrightarrow uk}^{PP}$ 、 $e_{js \leftrightarrow ik}^{PW}$  连接的  $State(g_{is}) = (1, 0, 0, 0, 0)$  成员,当满足  $D_{is \leftrightarrow ik}^P \leq d_{ifd}(g_{ik})$ , 或者  $D_{js \leftrightarrow ik}^{PW} \leq d_{ifd}(g_{ik})$  时,该与感染者成员连接的个体将根据概率  $\beta(g_{ik})$  被感染。

对于同层服务员属性节点网络和异层服务员工作网络,即单纯涉及服务员的网络,考虑传播过程中的服务员高频度接触等固有服务行为,当网络中某一成员处于被感染状态,即  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$  时,对所在网络中任意与其存在  $e_{js \leftrightarrow jl}^{WW}$ 、 $e_{js \leftrightarrow ul}^{WW}$  连接的  $State(g_{is}) = (1, 0, 0, 0, 0)$  成员,当满足  $D_{js \leftrightarrow jl}^W \leq d_{i-collision}(g_{ik})$  时,该与感染者成员连接的个体将根据概率  $\beta(g_{ik})$  被感染。

对于随机游走活跃成员,当该成员处于被感染状态或者网络中与其接近的某一成员处于被感染

状态,即  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$  时,任意距离被感染成员满足  $d \leq d_{i-collision}(g_{ik})$  的易感者成员将根据概率  $\beta(g_{ik})$  被感染。当随机游走活跃节点处于被感染状态,且个体生命消耗超过允许随机游走的能量阈值时,该活跃节点成员停留于当前位置。

值得关注的是,传播过程机会函数  $\beta(g_{ik})$  并非常数,研究资料表明<sup>[15-17]</sup>,防护治疗、空间环境、信息交互等因素会影响传播。

$$\beta(g_{ik})_{t+\Delta t} = \beta(g_{ik})_t \cdot \left[ \frac{Total_{all} - Total_{Infected(g_{ik})=1,t}}{Total_{all} \cdot \exp\left(\frac{Total_{Infected(g_{ik})=1,t}}{Total_{all}}\right)} \right] \quad (2)$$

### 2.2.2 感染及个体生命消耗

当任意节点  $g_{ik}$  的  $State(g_{ik})$  状态分量  $Infected(g_{ik}) = 1$  时,触发个体生命消耗过程执行。

当  $State(g_{ik}) = (0, 1, 1, 0, 0)$  时,  $g_{ik}$  处于感染并被救治阶段,  $Energy(g_{ik})$  可表示为:

$$Energy(g_{ik})_{t+\Delta t} = Energy(g_{ik})_t \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\tau_{Treat}} \cdot \left( \frac{Check(g_{ik})_t}{\tau_{Treat} \cdot \exp\left(\frac{Check(g_{ik})_t}{\tau_{Treat}}\right)} \right) \right] \quad (3)$$

当  $State(g_{ik}) = (0, 1, 0, 0, 0)$  时,  $g_{ik}$  处于感染并未被救治阶段,  $Energy(g_{ik})$  可表示为:

$$Energy(g_{ik})_{t+\Delta t} = Energy(g_{ik})_t \cdot \left[ 1 - \frac{Check(g_{ik})_t}{\tau_{Treat} \cdot \exp\left(\frac{Check(g_{ik})_t}{\tau_{Treat}}\right)} \right] \quad (4)$$

### 2.2.3 病情诊断

病情诊断是感染后获得医疗救助的阶段,在大型船舶环境中,医疗资源匮乏,人员获得救助实际上是一个获得救治的机会数值,且这一数值会因为医疗资源的进一步紧张而不断消耗。设  $Total_{all}$  表示所有成员总数,  $Total_{State(g_{ik})}$  表示不同状态成员数量。

$$\gamma(g_{ik})_{t+\Delta t} = \gamma(g_{ik})_t \cdot \left[ 1 - \frac{Total_{Infected(g_{ik})=1,t}}{Total_{all} \cdot \exp\left(\frac{Total_{Infected(g_{ik})=1,t}}{Total_{all}}\right)} \right] \quad (5)$$

### 2.2.4 救治

当节点  $g_{ik}$  的  $State(g_{ik})$  状态分量  $Patient(g_{ik}) = 1$  时,在触发个体生命消耗过程执行的同时,同步触发救治过程执行。

$$Energy(g_{ik})_{t+\Delta t} = Energy(g_{ik})_t + Energy(g_{ik})_t \cdot \left[ 1 - \frac{Check(g_{ik})_t}{\tau_{Treat} \cdot \exp\left(\frac{Check(g_{ik})_t}{\tau_{Treat}}\right)} \right]^{-1} \quad (6)$$

算法说明:前文过程 2 的 4 个模块中均使用了衰减函数  $f(x) = 1 - x/e^x$  和  $g(x) = (1-x)/e^x$ , 根据函数性质当  $x \in [0, 1]$  时,  $f(x) \in [0.632, 1]$ ,

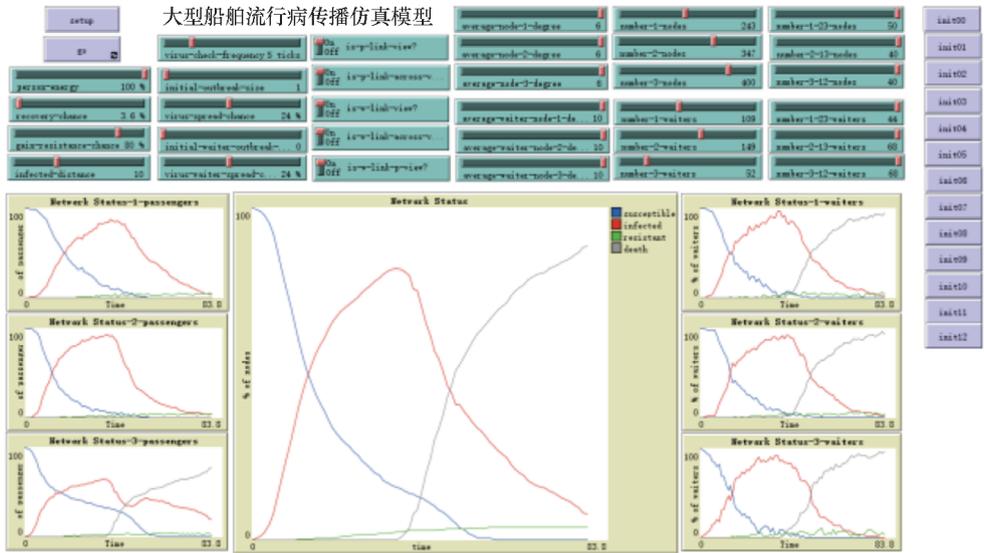
$g(x) \in [0, 1]$ , 函数  $f(x)$  和  $g(x)$  区间内均单调递减。考虑防护治疗、空间环境、信息交互等实际问题背景, 当全体成员感染时, 传播机会也随之消失, 故选用  $g(x)$  型, 其他情形的衰减函数选取策略趋于保守和温和, 故取用  $f(x)$  型, 关于衰减函数的选取涉及因素众多, 本文不再详述。值得注意的是, 衰减函数应用后, 仿真结果更有利于表现实际, 后文将结合参数变化进一步分析。

### 3 典型大型邮轮环境的流行病传播过程仿真研究

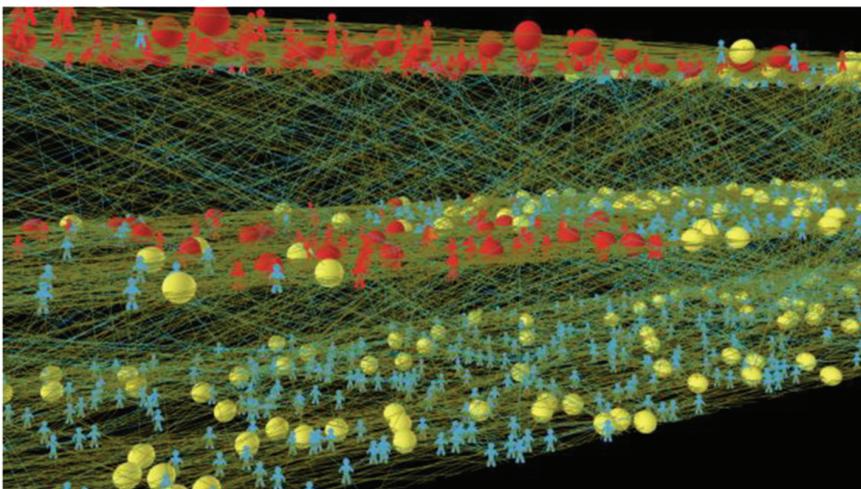
#### 3.1 基于 Netlogo3D 运行环境的模型构建

Netlogo3D 运行环境能够很好地表现微观世界个体行为和群体效果很好表现(软件用法此处不做

赘述)。考虑问题一般性, 本文拟构建三层甲板船舶环境模型, 每层旅客人数  $m_i^p$  和服务管理人数  $n_j^w$  不等, 各层节点联结度平均值  $\langle k_i^p \rangle$  和  $\langle k_j^w \rangle$  不等, 可动态调整每层节点与其他层节点产生连接的数量, 即设置活跃节点数  $m_i^{pA}$  和  $n_j^{wA}$ ; 也可动态调整人员初始健康程度(百分比数值), 即设定服务管理人员  $w_{jl}$  和旅客  $p_{ik}$  初始条件发病数量(种子个数)以及各自初始条件下可能被感染的机会, 初始化人员获得救治机会以及获得检查救治时间间隔, 同时设定人员救治后获得免疫能力以及空间内受感染的平均距离, 运用第 1.2 节所述网络构建规则和智能体运行逻辑和算法, 完成运行环境构建工作, 如图 3 所示, 模型仿真计算数据可导出进一步比对分析。仿真平台针对以下两种情形完成模拟仿真。



(a) 仿真系统交互界面  
(a) Simulation system interactive UI



(b) 3D 模拟仿真过程  
(b) 3D simulating process

图 3 大型船舶流行病传播仿真程序界面

Fig. 3 Large ship epidemic simulation program interface

**情形 1:** 依据节点之间的距离判别是否产生联边,形成联结固定的交互网络,且传播过程中假设网络拓扑结构维持不变,简称距离恒定模型。

**情形 2:** 以联结固定的交互网络为基础,保持网络节点联结关系不变,活跃节点产生随机游走行为,简称随机游走模型。

### 3.2 典型传播过程状态数据分析

考虑问题的一般性特征,按照 3.1 节参数设定规则,本文模拟了邮轮上 990 名旅客、310 名服

务管理人员在三层甲板空间内构成的社交网络,相关参数配置如表 1 所示。考虑 4 种典型工况(见表 2),对疫情发生早期(前 20 d)传播过程和防控策略效果进行分析,运用 3.1 节所述两种情形的建模方法,对上述 4 种工况 12 个典型状态分别进行模拟仿真,结果如图 4~7 所示。同时,对于每种状况,分别就融合参数衰减特性随动模型和未计及  $f(x)$  和  $g(x)$  函数的参数恒定模型进行对比,表 2 中“↑”和“↓”分别表示数值增大和减小。

表 1 模拟环境相关参数配置

Tab. 1 Configuration of parameters related to simulation environment

| 甲板层 | 旅客数量 $m_i^P$ | 服务员数量 $n_j^W$ | 活跃节点          |                | 连边度平均值                     |                             |
|-----|--------------|---------------|---------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|
|     |              |               | 旅客 $n_j^{WA}$ | 服务员 $m_i^{PA}$ | 旅客 $\langle h_i^P \rangle$ | 服务员 $\langle h_j^W \rangle$ |
| 1   | 263          | 88            | 50            | 44             | 6                          | 10                          |
| 2   | 318          | 112           | 40            | 68             | 6                          | 10                          |
| 3   | 409          | 110           | 40            | 68             | 6                          | 10                          |

表 2 仿真运行状况及参数配置

Tab. 2 Simulation operation status and parameter configuration

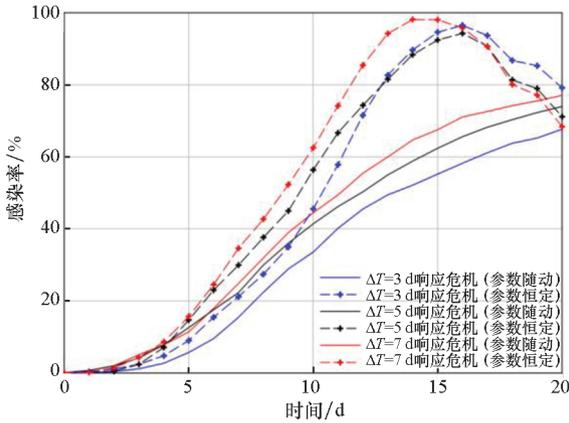
| 状况编号 | 疫情发生早期状况描述 | 管控措施约束参数   |         |          |        |         | 相关管控手段及连带影响   |
|------|------------|--|---------|----------|--------|---------|---|
|      |            | 应急反应   | 防控力度    |          | 隔离防护   |         |   |
|      |            | $\Delta T$ 采取措施                                    | 旅客活跃节点数 | 服务员活跃节点数 | 旅客度平均值 | 服务员度平均值 |   |
| 1    | 应急反应不同     | $\Delta T = 3 \text{ d}, 5 \text{ d}, 7 \text{ d}$ | 65      | 70       | 4      | 8       |   |
|      |            |  | 65      | 70       | 4      | 8       |   |
| 2    | 防控力度不同     | $\Delta T = 5 \text{ d}$                           | 33      | 35       | 4      | 8       | $\beta(g_{ik}) \downarrow$                                    |
|      |            |  | 15      | 30       | 4      | 8       |   |
|      |            |  | 15      | 30       | 2      | 8       |   |
| 3    | 隔离防护不同     | $\Delta T = 5 \text{ d}$                           | 15      | 30       | 2      | 4       | $\beta(g_{ik}) \downarrow$<br>$d_{jid}(g_{ik}) \downarrow$    |
|      |            |  | 15      | 30       | 2      | 2       |   |
|      |            |  | 65      | 70       | 4      | 8       |   |
| 4    | 救治条件不同     | $\Delta T = 5 \text{ d}$                           | 65      | 70       | 4      | 8       | $\gamma(g_{ik}) \uparrow$<br>$\tau_{\text{Treat}} \downarrow$ |
|      |            |  | 15      | 30       | 2      | 2       |   |

基于智能体技术和复杂网络原理构建仿真模型能够表现大型船舶流行病传播过程,数据表明:参数恒定模型(虚线)虽能表现流行病传播过程整体趋势,但对传播过程、措施效果预测存在较大偏差,考虑参数时变特点的随动模型(实线)能够较好地解决这一问题。

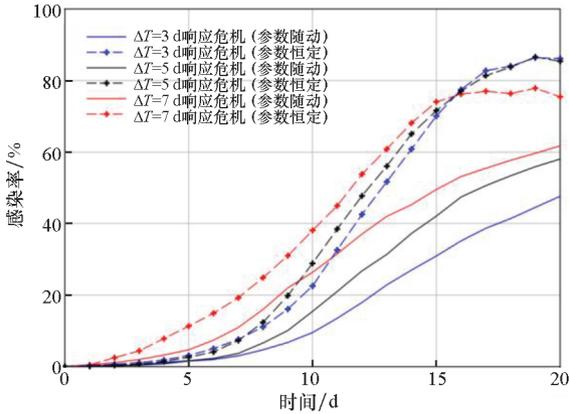
仿真模型对传播初期(前 20 d)感染人数仿真计算,设置情节均为发生传播险情后  $\Delta T$  时间内做出反应,并采取各种典型状态的防控措施,结果分析表明:图 4 仿真结果显示了发现疫情 3 d、

5 d、7 d 日采取措施的发展趋势,结果体现了早发现早处置的必要性;图 5 所示曲线反映了表中防控力度对防控能力的影响,仅单纯采取限制人员活跃度而不进一步减少不必要接触的措施对大型船舶流行病防控效果有限;图 6 所示曲线体现了随着防控措施升级,人员限制隔离措施加强,严格防控措施使得感染人数得到一定范围控制,但增长率依然较大,这与空间有限和救治条件受限有关;由图 7 所示曲线和表 2 参数可知,大型船舶医疗救治条件十分受限,大幅

度提高救治能力对于船舶环境来说非常困难,即便可以实现也是杯水车薪,对防控效果提升不理想。



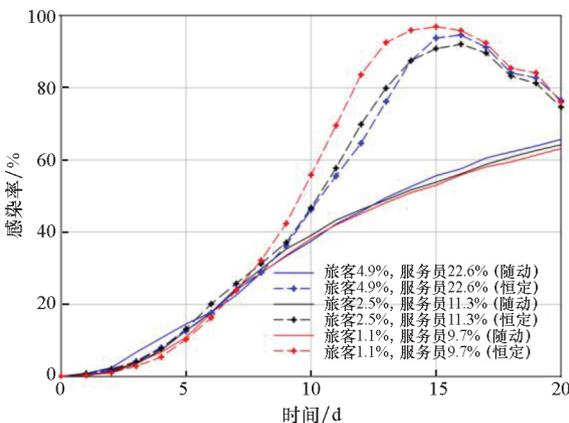
(a) 基于距离恒定模型的危机响应影响结果曲线  
(a) Impact curves of crisis response based on constant distance



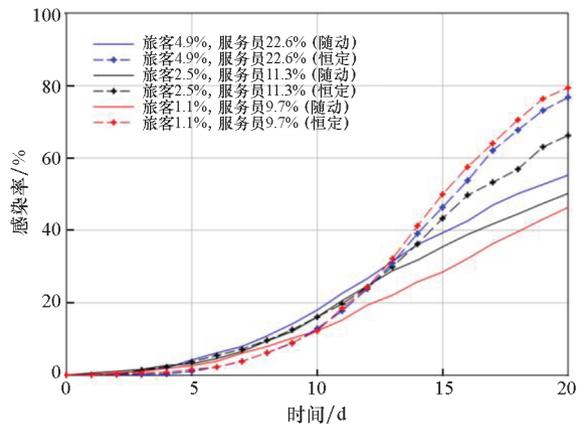
(b) 基于随机游走模型的危机响应影响结果曲线  
(b) Impact curves of crisis response based on random walking

图 4 危机响应影响结果曲线

Fig. 4 Impact curves of crisis response



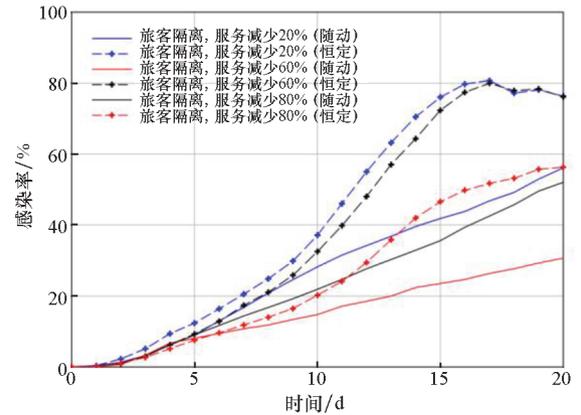
(a) 基于距离恒定模型的防控力度影响结果曲线  
(a) Effect curves of prevention and control efforts based on constant distance



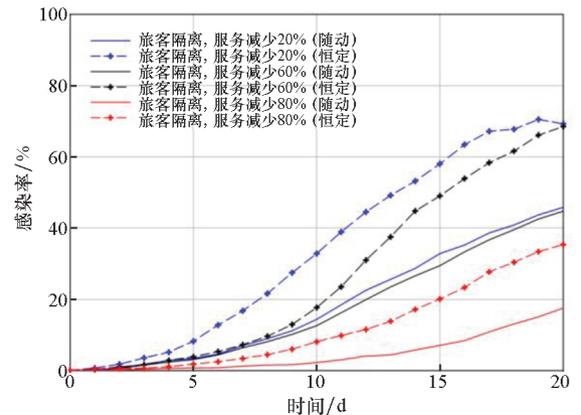
(b) 基于随机游走模型的防控力度影响结果曲线  
(b) Effect curves of prevention and control efforts based on random walking

图 5 防控力度影响结果曲线

Fig. 5 Effect curves of prevention and control efforts



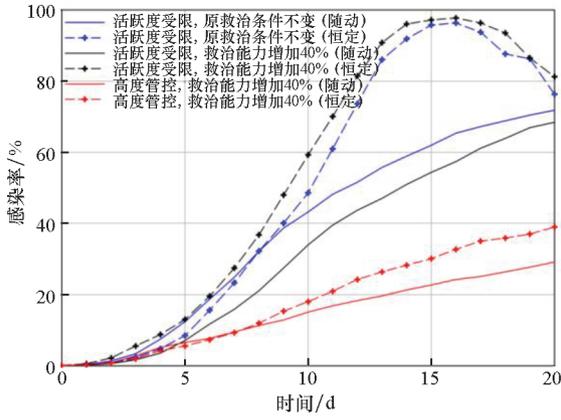
(a) 基于距离恒定模型的隔离措施影响结果曲线  
(a) Impact result curves of isolation measures based on constant distance



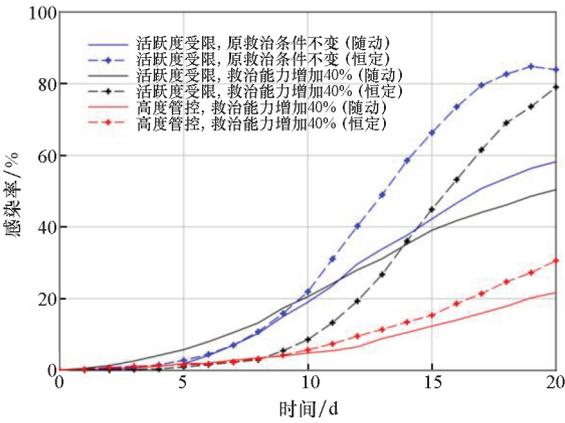
(b) 基于随机游走模型的隔离措施影响结果曲线  
(b) Impact result curves of isolation measures based on random walking

图 6 隔离措施影响结果曲线

Fig. 6 Impact result curves of isolation measures



(a) 基于距离恒定模型的救治条件影响结果曲线  
(a) Effect curves of treatment conditions based on constant distance



(b) 基于随机游走模型的救治条件影响结果曲线  
(b) Effect curves of treatment conditions based on random walking

图7 救治条件影响结果曲线

Fig. 7 Effect curve of treatment conditions

2020年2月,停靠日本的“钻石公主号”大型邮轮新冠肺炎疫情蔓延,据可靠数据显示:从2月1日发现第1例疑似患者至2月19日首批500名旅客下船,19 d内确诊人数增加至621例,按船上人员总数3 571人计算,19 d内感染率达到17.3%。其间,邮轮采取了严格的管控措施,发现疫情立即采取措施,人员基本处于隔离状态,发病人员及时隔离并给予医疗救治,运用前文所述模型,考虑采取强管控措施,以第12个典型状态为基础,取 $\Delta T = 1$  d,进一步降低旅客活跃度,保持服务员活跃度,减小传播机会,运用本模型所给出的参数分别依据情形一“距离恒定模型”和情形二“随机游走”模型仿真计算传播过程,计算结果在一定程度上表现出疫情初期蔓延变化过程,且考虑随机游走模型的结果更加接近实际,如表3和图8所示。

表3 多智能体仿真模型数据与“钻石公主号”疫情变化数据

Tab. 3 Multi-agent simulation model data and “Diamond Princess” epidemic change data

| 日期    | 数据来源   |        |        |
|-------|--------|--------|--------|
|       | (1)    | (2)    | (3)    |
| Day01 | 0.028  | 0.231  | 0.385  |
| Day02 | 0.028  | 1.000  | 0.615  |
| Day03 | 0.280  | 1.385  | 0.923  |
| Day04 | 0.280  | 1.615  | 0.923  |
| Day05 | 0.532  | 1.846  | 1.231  |
| Day06 | 0.560  | 2.000  | 1.462  |
| Day07 | 1.708  | 2.308  | 1.846  |
| Day08 | 1.792  | 2.769  | 2.615  |
| Day09 | 1.960  | 3.462  | 3.308  |
| Day10 | 3.780  | 4.385  | 4.385  |
| Day11 | 3.780  | 5.077  | 5.308  |
| Day12 | 4.873  | 6.000  | 6.308  |
| Day13 | 6.105  | 7.154  | 7.385  |
| Day14 | 6.105  | 8.077  | 8.692  |
| Day15 | 7.981  | 9.077  | 10.692 |
| Day16 | 9.941  | 9.538  | 11.923 |
| Day17 | 12.710 | 10.620 | 13.846 |
| Day18 | 15.180 | 11.460 | 15.538 |
| Day19 | 17.390 | 12.000 | 17.846 |
| Day20 |        |        |        |

注:(1)“钻石公主号”数据;(2)距离恒定模型仿真结果;(3)随机游走模型仿真结果。

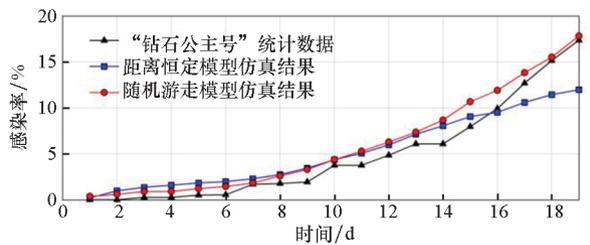


图8 仿真模型数据与“钻石公主号”疫情变化数据

Fig. 8 Simulation data and “Diamond Princess” epidemic change data

#### 4 结论

大型船舶流行病传播涉及因素众多,开展传播规律研究是一项极其复杂的工作。本文所给出

的测算模型构建方法,考虑了人员类别、工作特性、活动空间、防护治疗、传播环境和信息交互等因素对流行病传播的影响,信息量丰富且仿真计算平台简捷易用,可对多种复杂状况进行模拟。仿真试验和前期经验数据表明:大型船舶环境流行病防控措施只能在传播早期起到滞缓流行病蔓延的作用,难以中长期发挥作用,这个控制时间窗口应当不超过 18 ~ 25 d。本文所开展的研究,相关数据和模型具备动态变化调整能力,运用多智能体技术,构建贴近实际的社交网络,可全过程模拟传播进程,可为开展大型船舶流行病防控研究提供有益帮助。

## 参考文献 (References)

- [1] WANG W, TANG M, EUGENE S H, et al. Unification of theoretical approaches for epidemic spreading on complex networks [J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society*, 2017, 80(3): 036603.
- [2] SAMANTA G P. Analysis of a delay nonautonomous predator-prey system with disease in the prey[J]. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2010, 15(1): 97 - 108.
- [3] ERMOLOVA N Y, TIRKKONEN O. SIR statistics and average rates in cooperative spectrum-sharing networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 8178 - 8182.
- [4] AALTO P, LESKELÄ L. Information spreading in a large population of active transmitters and passive receivers [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2015, 75(5): 1965 - 1982.
- [5] COLIZZA V, PASTOR-SATORRAS R, VESPIGNANI A. Reaction-diffusion processes and metapopulation models in heterogeneous networks[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(4): 276 - 282.
- [6] 阮中远. 复杂网络上的流行病传播[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(1): 98 - 117.  
RUAN Zhongyuan. Epidemic spreading in complex networks[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2020, 50(1): 98 - 117. (in Chinese)
- [7] 刘臣, 王育清, 周立欣, 等. 复杂网络上的传播模型研究[J]. *系统科学学报*, 2016, 24(2): 81 - 86.  
LIU Chen, WANG Yuqing, ZHOU Lixin, et al. Researches of spreading models on complex networks [J]. *Chinese Journal of Systems Science*, 2016, 24(2): 81 - 86. (in Chinese)
- [8] 袁叙普, 胡海军, 李娟. 加权网络上一类 SIRS 传染病模型的动力学分析[J]. *应用数学进展*, 2019, 8(3): 371 - 380.  
YUAN Xupu, HU Haijun, LI Juan. Dynamics analysis of an SIRS epidemic model on weighted networks[J]. *Advances in Applied Mathematics*, 2019, 8(3): 371 - 380. (in Chinese)
- [9] 李靖, 李聪, 李翔. 人类时效交互网络的建模与传播研究综述[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2019, 16(3): 1 - 21.  
LI Jing, LI Cong, LI Xiang. A review on modeling and propagation of human temporal contact networks[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2019, 16(3): 1 - 21. (in Chinese)
- [10] ROZENSHTEIN P, GIONIS A, PRAKASH B A, et al. Reconstructing an epidemic over time[C]//*Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016: 1835 - 1844.
- [11] 骆志刚, 丁凡, 蒋晓舟, 等. 复杂网络社团发现算法研究新进展[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(1): 47 - 52.  
LUO Zhigang, DING Fan, JIANG Xiaozhou, et al. New progress on community detection in complex networks [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(1): 47 - 52. (in Chinese)
- [12] LIU T, LI X, LIU X P. Integration of small world networks with multi-agent systems for simulating epidemic spatiotemporal transmission [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(13): 1285 - 1293.
- [13] KIM T, HWANG W, ZHANG A D, et al. Multi-agent modeling of the South Korean avian influenza epidemic[J]. *BMC Infectious Diseases*, 2010, 10(1): 236.
- [14] 李璐, 宣慧玉. 多主体仿真在公共卫生事件应急管理中的应用: 以一个传染病政策仿真系统为例[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2010, 30(1): 57 - 64.  
LI Lu, XUAN Huiyu. Application of multi-agent simulation to emergency management of public health events—with an epidemic control policy simulation system as an example[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2010, 30(1): 57 - 64. (in Chinese)
- [15] 李丹丹, 马静. 双层社会网络上的舆情传播动力学分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(10): 2672 - 2679.  
LI Dandan, MA Jing. Public opinion spreading dynamics in a two-layer social network[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(10): 2672 - 2679. (in Chinese)
- [16] GRANELL C, GÓMEZ S, ARENAS A. Dynamical interplay between awareness and epidemic spreading in multiplex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(12): 128701.
- [17] 李睿谦, 操雨霏, 刘志鹏. 基于复杂网络的信息传播与舆论分析[J]. *应用数学进展*, 2020, 9(1): 86 - 93.  
LI Ruiqian, CAO Yufei, LIU Zhipeng. Analysis of information dissemination and public opinion based on complex network [J]. *Advances in Applied Mathematics*, 2020, 9(1): 86 - 93. (in Chinese)