

8-13-2020

Analysis of Risks Transmission and Control in Subway Construction

Qingjun Guo

School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

Hongyu Yan

School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

Bosen Li

School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis of Risks Transmission and Control in Subway Construction

Abstract

Abstract: The process of the transmission and control of hidden dangers in subway construction is very similar to that of infectious diseases. *Based on an engineering example, the characteristics of the complex system in the subway construction site are analyzed, and a simulation method using the propagation dynamics model to describe the interaction and propagation of various elements is proposed.* Hazard source and hidden danger data of a section of Qingdao metro line 4 from march to August 2017 are selected as the original state, using by MATLAB R2014a simulation calculation, the densities of different elements are gotten, the process of *the element changed from the hazards state to the hidden state and to the controlled state is innovated, the spread and control law of the elements are displayed, the measures are adopted the special nodes are intervened, the optimal control effect is explored.*

Keywords

hidden trouble, small world network, propagation dynamics, control factor

Recommended Citation

Guo Qingjun, Yan Hongyu, Li Bosen. Analysis of Risks Transmission and Control in Subway Construction[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(8): 1617-1625.

地铁施工中隐患的传播及控制分析

郭庆军, 闫竑宇, 李博森

(西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 地铁施工中隐患的传播和管控过程与传染病的传播过程极为相似, 众多元素相互关联、动态影响。基于工程实例, 通过分析地铁施工现场复杂系统的特征, 提出使用传播动力学模型描述元素间相互作用和传播的仿真方法。选取青岛地铁 4 号线某标段 2017 年 3 月份到 8 月份的危险源及隐患数据作为原始状态, 使用 MATLAB R2014a 仿真计算, 得到不同元素的密度变化规律, 将元素由危险源状态到隐患状态再到受控状态的过程显性化, 展示元素的传播及控制规律, 采用外界措施对特殊节点进行干预, 探索最优控制效果。

关键词: 隐患; 小世界网络; 传播动力学; 控制因子

中图分类号: F272.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 08-1617-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0135

Analysis of Risks Transmission and Control in Subway Construction

Guo Qingjun, Yan Hongyu, Li Bosen

(School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The process of the transmission and control of hidden dangers in subway construction is very similar to that of infectious diseases. Based on an engineering example, the characteristics of the complex system in the subway construction site are analyzed, and a simulation method using the propagation dynamics model to describe the interaction and propagation of various elements is proposed. Hazard source and hidden danger data of a section of Qingdao metro line 4 from march to August 2017 are selected as the original state, using by MATLAB R2014a simulation calculation, the densities of different elements are gotten, the process of the element changed from the hazards state to the hidden state and to the controlled state is innovated, the spread and control law of the elements are displayed, the measures are adopted the special nodes are intervened, the optimal control effect is explored.

Keywords: hidden trouble; small world network; propagation dynamics; control factor

引言

据不完全统计显示, 截至 2019 年 6 月份, 全国累计 37 座城市建成投运城轨道交通线路

6 126.82 km, 地铁 4 656.83 km, 占线路总长的 76.00%。预计到 2020 年, 地铁将在全国 50 多个城市建成并运营, 其线路总长度将超过 6 000 km^[1], 地铁已经进入快速发展时期。由于地铁施工现场是一个涉及元素众多的复杂系统, 各元素状态存在动态传播、相互交错影响^[2], 容易引发坍塌、爆炸、坠落等重大事故。

在施工过程中, 施工人员行为、技术系统运行和环境演化的风险随时可能发生, 具有很强的动态



收稿日期: 2019-04-01 修回日期: 2019-12-11;
基金项目: 陕西省软科学研究计划(2020KRM149);
作者简介: 郭庆军(1978-), 男, 河南林州, 博士, 教授, 研究方向为土木工程建造与管理; 闫竑宇(1992-), 女, 河南南阳, 硕士, 研究方向为土木工程建造与管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1617 •

性和不确定性^[3]。被动的现场安全管理对时刻变化的安全风险不敏感，难以实时识别多种安全风险，并正确地响应安全事故的发生，不能有效保障施工安全。应树立“隐患即事故”的理念，探究制度提升对隐患数量的影响^[4]，将安全管理重心由事故后转移至事故前。将隐患显性化管理，实现安全的全过程动态即时管理，对系统未来的状态进行预测，进而做出系统调控，保障系统维持在一个特定状态中，为提升地铁施工安全管理水平提供借鉴。

1 地铁施工隐患的传播机理

地铁施工项目具有施工环境复杂、施工场地狭窄等特点，由于城市地下管线相互交织，施工技术复杂等原因，使得施工中存在许多安全隐患，如未检查出的故障机械、人的疲劳操作等。地铁施工现场是基于人-技术系统-环境交互的复杂系统，多个元素之间相互影响，而施工现场的隐患传播和管控过程与传染病的传播过程极为相似，可类比运用传染病模型，显示隐患扩散的可能路径^[5]，将传播时期分为易感时期、感染时期和免疫时期^[6]，以此来研究地铁施工网络中人为失误或者机械局部故障造成事故的原因。

地铁施工复杂系统中正常的传播与交互能够有助于系统的正常运行，但是，异常传播会打乱系统原有秩序，达到无序状态。所以，在复杂系统中探索异常元素的传播过程及传播规律，对有效控制起到重要作用。这里以人的因素为例，如果施工班组内在没有定期进行安全文化宣传、安全培训和激励情况下，会造成安全氛围偏低的现象。以班组中的核心关键人物为首，新工人会模仿关键人物的作业陋习，如果在首次尝试中没有出现危险，则新工人会继续延续这种不安全行为，导致不安全行为的传播。

由于受到干扰，使本应处于有序、无误的运行状态出现异常。具体表现在：施工人员在生理、行为等表现出的异常；设备的损坏；环境的不良影响；管理的缺陷以及规章制度不完善等。这些异常会影

响正常的运行状态，有些会迅速影响元素状态的转变，有些会在一定的条件下才能逐步转变状态，反映不同的传播过程。

2 传播动力学模型构建

通过建立小世界网络，用传播动力学模型描述地铁施工中各元素相互作用及传播过程，使用 MATLAB R2014a 仿真计算^[7]，将元素由危险源状态到隐患状态再到受控状态的过程显性化，得到元素的传播规律，采用外界措施对特殊节点进行干预。

2.1 传播模型的数学描述

元素危险源状态、隐患状态和受控状态随着时间动态演化。由于系统中先出现异常，然后才被检测或识别，因此会存在一定的时间延迟 Δt 。

SIR 模型中元素的状态演化被间隔为 2 个阶段：第 1 个阶段是系统中存在危险源节点，并以传播参数 α 进行传播，到隐患节点被识别的时间 Δt 为止，此阶段是从危险源状态向隐患状态演变的过程；第 2 个阶段是从异常情况被发现的时间 Δt 开始，到由于系统自身的修复能力，使部分的隐患节点以传播参数 β 传播至受控状态，或者危险源节点以传播参数 β 传播至受控状态，此阶段是从危险源状态到受控的演变，以及隐患状态到受控状态的演变，如图 1 所示。

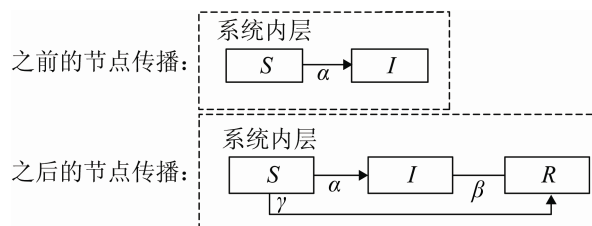


图 1 元素节点传播过程

Fig. 1 Process of element node propagation

假设 SIR 模型中，受控状态恢复以后的节点将不再参与新一轮的传播过程。令 $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ 分别为 t 时刻危险源节点、隐患节点、受控节点的比例，数学描述为：

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

式中: $\frac{dS(t)}{dt}$, $\frac{dI(t)}{dt}$, $\frac{dR(t)}{dt}$ 分别为危险源节点密度、隐患节点密度、受控节点密度的变化率; α, β, γ 分别为危险源到隐患、隐患到受控节点、危险源到受控节点的传播参数, 且 $\alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$ 。

2.2 小世界网络上的元素传播动力学

2.2.1 小世界网络

节点元素之间的关系连线呈现指数分布, 具有小世界的特性。Watts 和 Strogatz 以规则网络为基础, 引入少量的随机性, 产生具有小世界特征的网络模型, 当随机重连的概率等于 1 时, 就会变成随机网络, 所以小世界网络介于规则网络和随机网络之间^[8], 兼具有规则网络和随机网络的特性^[9]。图 2 是 3 种网络的转化过程, p 表示网络中每条边随机重连的概率。

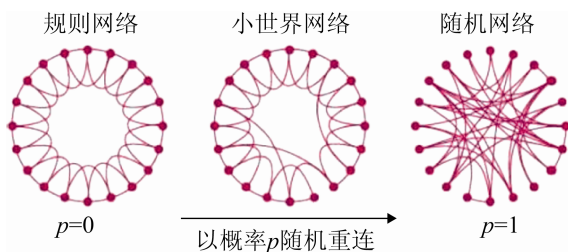


图 2 随机重连小世界网络

Fig. 2 Random reconnect small world network

通过隐患排查和安全监控数据, 统计青岛 4 号线某标段的隐患数据, 收集 2017 年 1 月到 2018 年 2 月的样本, 有效数据 1 562 条, 如表 1 所示。

选取盖挖法施工中 3 月~8 月的数据, 发生隐患频率较高的 6 个月份, 共计隐患 373 条、危险源 51 条, 作为初始数据, 统计相关参数, 见表 2。

表 1 隐患排查数量
Tab. 1 Number of hidden dangers

年-月	隐患数量	年-月	隐患数量
2017-01	109	2017-08	113
2017-02	105	2017-09	113
2017-03	117	2017-10	114
2017-04	113	2017-11	117
2017-05	109	2017-12	115
2017-06	113	2018-01	105
2017-07	116	2018-02	103

表 2 状态参数表

Tab. 2 State parameter table

状态	初始个数	对应参数	状态改变个数	对应参数
危险源状态	51	$S_0=0.112$	17	0.34
隐患状态	373	$I_0=0.781$	37	0.10
受控状态	53	$R_0=0.107$	12	0.22

在 WS 小世界网络的构造过程中, 涉及网络规模 N 、重连概率 p 和平均度 K , 结合地铁施工中危险源与隐患的实际个数, 将网络参数设置见表 3。

表 3 地铁施工中的节点元素网络生成参数

Tab. 3 Parameter generation of node element network in subway construction

网络类型	网络规模 N	重连概率 p	平均度 K
WS 小世界网络	300	0.1	3

基于小世界网络, 将表中的参数带入公式(1), 使用 MATLAB R2014a 对不同元素状态的 SIR 模型进行仿真分析, 可得到基础情景, 在没有外部干扰情景下, 易感期、染病期和痊愈期对应危险源状态密度、隐患状态密度、可控状态密度的变化情况, 如图 3 所示。

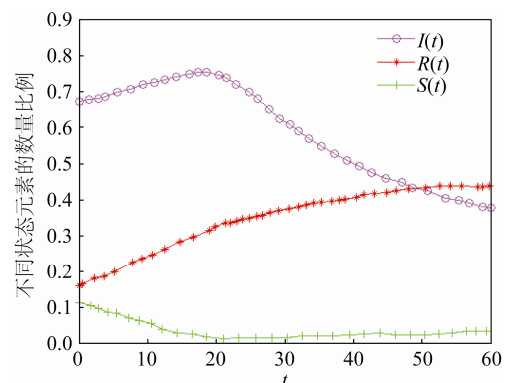


图 3 无控制措施下元素的数量比例

Fig. 3 Number and proportion of elements without control

2.2.2 模型假设

传播范围 S 表示当隐患爆发时, 由于隐患的传播而导致整个网络中失效节点的总数。假设复杂网络中隐患节点总数为 N , 表示由于隐患爆发而失效的第 i 个节点元素($i=1, 2, \dots, N$)。

$$S = \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

传播规模 $S \in [0, N]$, 即当某一节点发生异常以后的最终传播范围可能是 0, 也可能是所有隐患节点。

失效时间总 T 表示 S 个节点失效所需要的总时间, 用公式表示如下:

$$T = \sum_{i=1}^S t(x_i) \quad (3)$$

式中: $t(x_i)$ 为第 i 个节点元素失效的时间。

传播参数是指单个节点失效所需要的平均时间, 用来表示传播快慢程度, 公式表示如下:

$$V = \frac{S}{T} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{\sum_{i=1}^S t(x_i)} \quad (4)$$

2.2.3 模型推导

在元素节点出现异常之前, 节点自身会有一个暂时抵抗风险的修复能力, 超过一定的阈值, 节点开始出现异常。假设某个元素节点 x_i 在 t 时刻属性值 $x_i(t)$, 当 $x_i(t)$ 时表示 t 时刻元素节点状态稳定; 若 $x_i(t)$ 的值偏离 0, t_{ij} 代表节点已经开始出现异常。假设任意一元素节点 x_i 某一功能受损的时刻为 t_{ci} , 隐患传播的数学描述为:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{-x_i(t)}{\tau_i} + \phi \left(\sum_{j \neq i} \frac{M_{ij} x_j(t-t_{ij})}{f(o_i)} e^{-\frac{\beta t_{ij}}{\tau_i}} \right) \quad (5)$$

式中: τ_i 为节点 x_i 的修复因子; $\frac{-x_i(t)}{\tau_i}$ 为节点爆发时对节点的修复函数; M_{ij} 为节点元素 x_i 对节点 x_j 的影响强度; t_{ij} 代表节点元素 x_i 到节点 x_j 的传播时间; β 为节点的传播参数; $f(o_i)$ 是程度函数, 是以 x_i 为扩散圆心, 对其他节点扩散程度的描述。

$$\phi(x) = \frac{1 - \exp(-\beta^1 x)}{1 + \exp[-\beta^1(x - \theta_i)]} \quad (6)$$

式(6)代表事件爆发后的传播机制, 是隐患传播过程中的控制参数; 为冗余措施的阈值, 即当隐患爆发后在没有超过时, 在不采取任何控制措施的情况下, 系统会根据自身的风险消除能力使系统正常运行, 反之要采取相应措施来控制隐患的传播。

小世界上的 SIR 传播动力学模型中, 以隐患传播的临界值为例, 当隐患以传播参数向受控节点传播时, 隐患节点的密度 $I(t)$ 随仿真时间 t 变化的非线性微分方程:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -I(t) + \beta \langle k \rangle I(t) [1 - I(t)] \quad (7)$$

式中: $-I(t)$ 为由于系统自身的修复能力, 使一些隐患以单位节点的速度转化为受控节点; k 为小世界网络中的平均度; $\beta \langle k \rangle I(t) [1 - I(t)]$ 为在原有隐患的基础上产生新隐患的密度。

当 $\frac{dI(t)}{dt} = 0$, 即没有隐患产生的状态下, 得出:

$\beta \langle k \rangle I(t) [1 - I(t)] = I(t)$, 对 t 积分可得:

$$I[\beta \langle k \rangle (1 - I) - 1] = 0 \quad (8)$$

$\beta_c = 1/\langle k \rangle$ 即为传播临界值, 此时隐患在稳定时刻的密度公式为:

$$I = \begin{cases} 0 & \beta \leq \beta_c \\ \beta - \beta_c & \beta > \beta_c \end{cases} \quad (9)$$

也就是说, 当隐患的传播参数未达到传播临界值, 隐患的密度会被系统的修复能力控制在 0 值; 当超过传播临界值, 隐患密度会随着传播临界值的增大而呈现指数形式的增加, 最终达到稳定状态。

元素传播状态有危险源状态(S)、隐患状态(I)、受控状态(R), 传播参数分别为: α , β , γ 。为了能够更直观地体现系统外层的干预措施对系统内层不同状态的影响, 以 SIR 模型为基础, 加入不同节点位置的控制参数: α^1 , β^1 , γ^1 , 探索不同控制点, 节点密度的变化情况, 如图 4 所示。

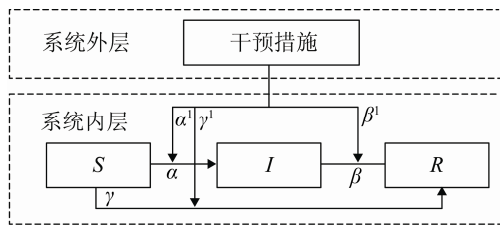


图 4 外界干预措施下的传播模型

Fig. 4 Communication model under external intervention measures

系统外层干预的情况下, 节点密度变化的微分方程变为:

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -(\alpha - \alpha^1)S(t)I(t) - (\gamma - \gamma^1)S(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} &= (\alpha - \alpha^1)S(t)I(t) - (\beta - \beta^1)I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= (\beta - \beta^1)I(t) + (\gamma - \gamma^1)S(t) \end{aligned} \quad (10)$$

3 仿真应用

3.1 首次识别异常情况的时间分析

在安全管理中, 由于人员、设备不同, 导致隐患发生的强弱程度存在差异, 所以隐患首次被发现的时间间隔也不同。如果表示首次识别异常的时间, 分别将其设置为 1、2、3、4 个时间步长, 其他的参数统一设置为: 原始隐患个数为 1; 节点的自我修复因子均为 $\tau_i=10$; 隐患传播参数 $\beta=0.35$; 隐患控制参数 $\beta^1=0.5$ 。使用 MATLAB R2014a 按照上述仿真参数, 对首次识别异常情况进行仿真, 隐患密度变化见图 5, 受控节点的密度变化如图 6 所示。

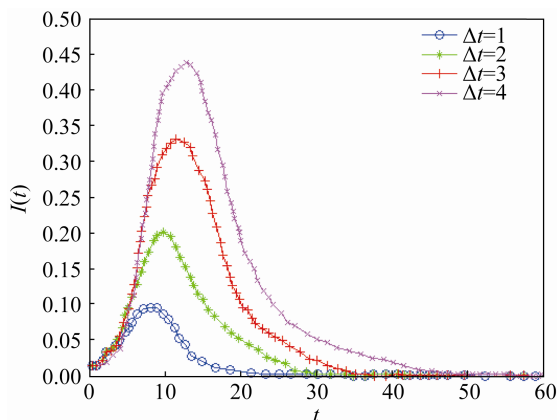


图 5 隐患节点的密度变化

Fig. 5 Density of hidden nodes changes

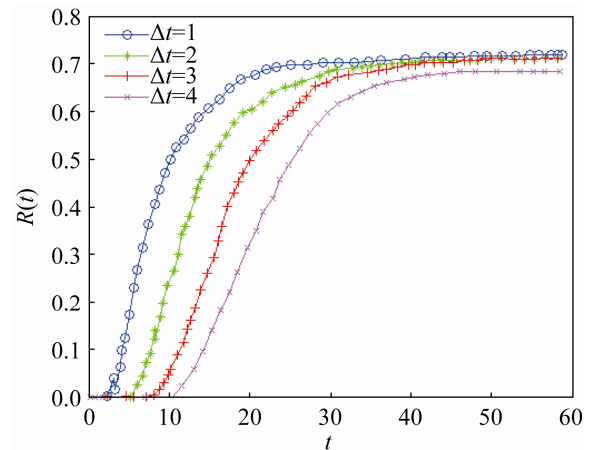


图 6 受控节点的密度变化

Fig. 6 Density variation of controlled nodes

图 5 反映在不同的异常识别时间下, 隐患节点的密度随仿真时间的演化情况。节点密度反映传播范围, 由图 5 可知, 节点峰值随着时间增长呈增大趋势, 依次是 0.1、0.21、0.347、0.46。峰值越大, 代表隐患传播的范围越广; 其次, 隐患节点在控制参数的作用下, 隐患节点的密度趋于 0 的时间随着步长的增大而变长, 代表识别隐患的时间越晚, 隐患传播的时间越长, 随之带来的影响越严重。

图 6 反映异常在不同识别时间下, 受控节点的密度随时间的演化情况。不同识别时间下, 受控节点的变化趋势呈现统一变换, 均呈现增大趋势, 后趋于一致。在受控节点达到稳定之前, 同一仿真时刻的值越大, 受控节点的密度越小。该实验结果说明: 识别异常情况的时间越晚, 处于受控节点的元素就越少, 使隐患大规模传播, 随之带来更多隐患的不良衍生后果。

3.2 隐患传播临界值分析

在地铁施工现场中, 处于受干扰状态的隐患节点 i 在以传播参数 β 干扰相邻节点, 传播参数 β 的大小影响到相邻节点的受干扰状况, 当 $\beta \leq \beta_c$ 时 (为传播临界值), 由于系统本身的抵抗能力, 使隐患未能传播就已经消散^[10]; 当 $\beta > \beta_c$ 时, 隐患向事故的方向蔓延。

为考察不同隐患消除能力下, 传播临界值会变

化,通过改变隐患的控制参数,来反映隐患传播阈值,隐患控制参数 β^1 分别设置为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 设置其他传播模型的仿真参数:原始隐患个数为 1;首次识别异常的时间 $\Delta t=2$;节点自我修复参数 $\tau_i=10$,使用 MATLAB R2014a,按照上述仿真参数,对隐患传播临界值进行仿真,如图 7 所示。

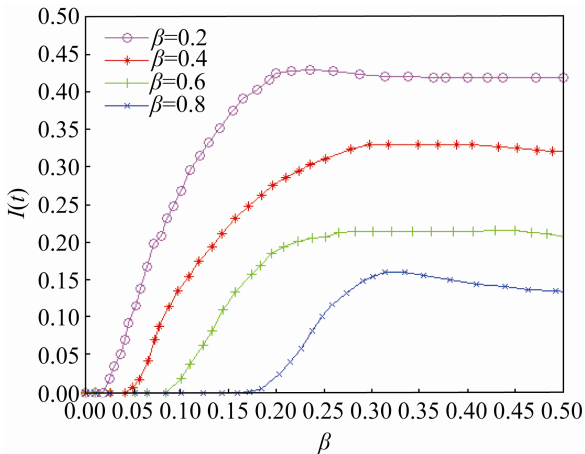


图 7 不同控制参数下隐患节点的密度变化

Fig. 7 Density of hidden trouble node change under different control parameters

从图 7 中可以看出:

(1) 传播临界值与传播范围的关系。曲线并没有一开始就呈现增长趋势,而是超出一定阈值以后,隐患节点的密度开始逐渐增长,在一定程度上处于平稳或下降状态。这是因为元素节点尚未达到隐患状态,还未表现出异常,所以隐患节点密度为 0;超过传播临界值,异常出现,隐患节点的密度呈现增大的趋势。可以得到,隐患密度的增长速度与传播临界值的大小呈反比,传播临界值越小,传播范围越广。

(2) 传播临界值与隐患消除能力的关系。随着隐患控制参数的增长,传播临界值分别为 0.17, 0.08, 0.045, 0.02, 呈现减小的趋势。相同的仿真时间内,控制参数 $\beta^1=0.8$ 时,隐患密度已经有明显的下降趋势, $\beta^1=0.2$ 时,隐患密度的趋势刚趋于稳定,还未出现下降趋势。隐患的消除及应对能力取决于传播临界值的大小。控制参数越小,越难控制隐患密度的蔓延,越容易向事故的方向发展。

3.3 隐患传播参数分析

结合地铁施工的实际情况,不同人员的安全素养、技术系统的完善程度、环境因素的影响,导致隐患传播速度和概率也不尽相同。为考查不同传播参数对隐患密度及危险源密度的影响,将传播参数分别设置为 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 其他的参数统一设置为:原始隐患个数为 1;首次识别异常的时间 $\Delta t=2$;节点的自我修复因子均为 $\tau_i=10$;隐患控制参数 $\beta^1=0.5$ 。使用 MATLAB R2014a 按照上述仿真参数,对隐患传播参数进行仿真,呈现隐患和危险源的密度变化,如图 8、图 9 所示,横坐标代表隐患的仿真时间,纵坐标代表隐患节点的密度。

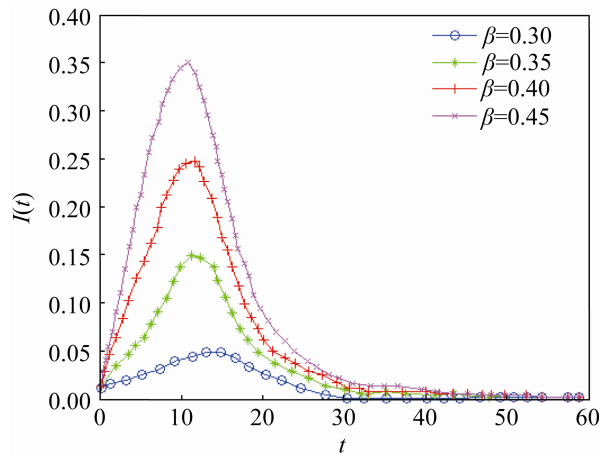


图 8 不同传播参数下隐患节点的密度变化

Fig. 8 Density of hidden nodes changes under different propagation parameters

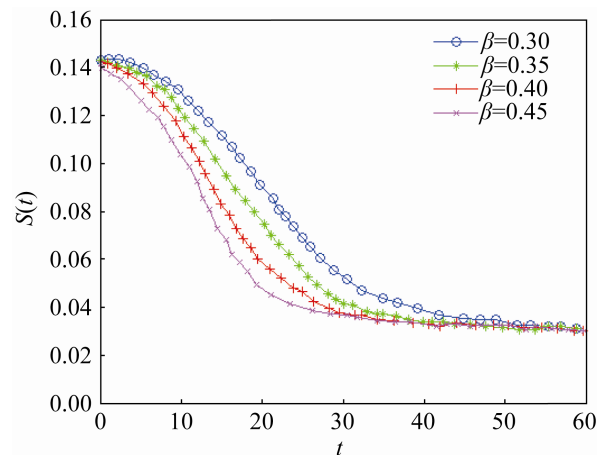


图 9 不同传播参数下危险源节点的密度变化

Fig. 9 Density of hidden nodes changes under different propagation parameters

图 8 中, 同一仿真时间内, 隐患节点的密度率先达到峰值。随着隐患传播参数的减小, 峰值分别为 0.35, 0.25, 0.15, 0.05, 影响规模随着峰值的减小而逐渐降低。

图 9 呈现危险源节点的密度变化。当超过元素自身的传播阈值, 随着隐患密度的增加, 危险源节点的密度逐渐降低, 更多的危险源节点也会转化为隐患节点, 直到稳定。同一仿真时刻下, 隐患传播参数越大, 危险源节点受到的影响就越大, 由危险源状态转化为隐患节点的速度就越快。

3.4 不同状态节点的控制分析

由于隐患风险处于低警状态, 所以使用控制参数为 0.2 的力度, 探究不同节点的传播状态。将表 2 的状态参数作为原始数据, 运用控制变量的方法, 在不同节点处加入控制参数, 设计 3 个新的情景构成实验组, 模拟不同的干预点对元素状态的影响。具体参数设置如表 4 所示。

表 4 不同情景的参数设计表

情景	α	α^1	β	β^1	γ	γ^1	备注
基础情景	0.34	0	0.1	0	0.22	0	基准
情景 1	0.34	-0.2	0.1	0	0.22	0	考察 α^1
情景 2	0.34	0	0.1	0.2	0.22	0	考察 β^1
情景 3	0.34	0	0.1	0	0.22	0.2	考察 γ^1

(1) 不同干扰条件下, 危险源密度的变化情况, 如图 10 所示。

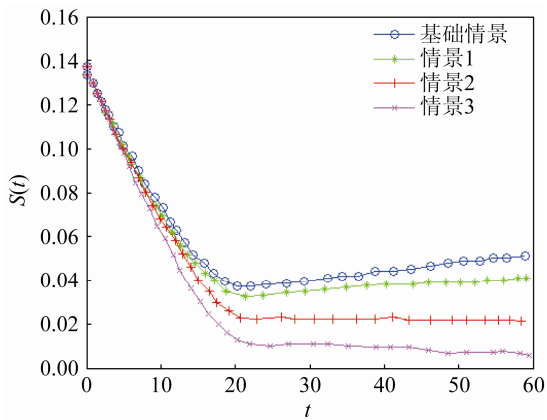


图 10 不同情景下危险源节点的密度变化
Fig. 10 Density of hazard source nodes changes in different scenarios

相比于基础情景, 假设 3 个新的情景均改变了危险源状态原来的密度。由图 10 可知, 在降低危险源密度的下降速度方面, 危险源的密度在情景 1 时下降速度最慢(危险源状态到隐患状态的阻碍作用最佳, 使元素节点依然处于危险源状态), 情景 3 次之(促进危险源状态直接转化为受控状态), 在情景 2 时的下降速度最快(促进危险源状态转化为隐患状态, 再到受控状态, 其效果最差)。

分析其原因, 主要是在发现安全问题后再进行安全管理措施的调整, 一方面, 管理路径过长, 另一方面, 只能采取补救的办法, 是一种被动的安全管理方式, 无法从根本上解决安全问题。

(2) 不同干扰条件下, 隐患密度的变化情况, 如图 11 所示。

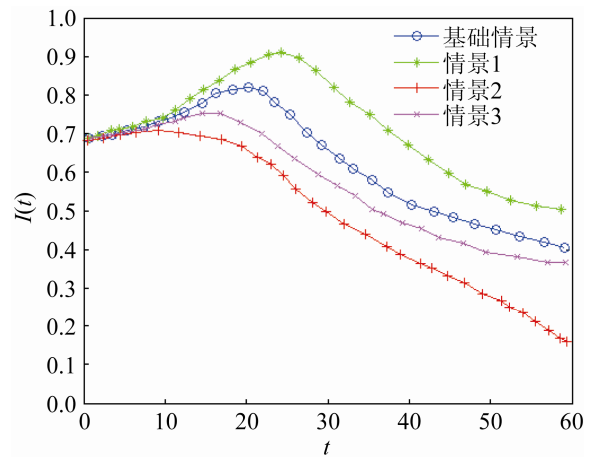


图 11 不同情景下隐患节点的密度变化
Fig. 11 Density of hidden nodes changes under different circumstances

相比于基础情景, 假设 3 个新的情景均改变了隐患状态原来的密度。由图 11 可知, 处于隐患状态的元素已经以网状形式大批量传播, 在某一时刻达到最高峰, 后呈现下降的趋势。在促进隐患密度的下降速度方面, 情景 2 已经不具备波峰, 图形呈现骤降的趋势, 控制效果最佳(促进隐患状态转化为受控状态, 从而减少隐患密度), 情景 3 次之(促进危险源状态直接转化为受控状态), 情景 1 的波峰已经超出基础情景, 且下降速度最慢(阻碍危险源状态到隐患状态的传播)。

究其原因,首先,使更多危险源处于受控状态,能够在源头上减少危险源传播而造成的隐患密度增大,但是控制路径过长,效果不是最佳;其次,对于已经在传播的隐患来说,寻找隐患致因,阻碍危险源状态到隐患状态传播是一种事后补救措施,所以效果最差。

(3) 不同干扰条件下,受控密度的变化情况,如图 12 所示。

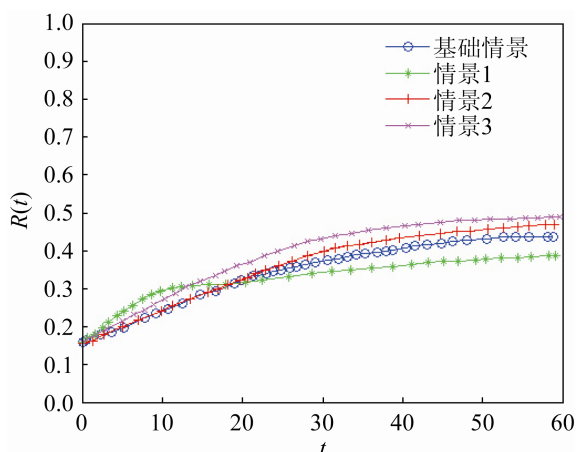


图 12 不同情景下受控节点的密度变化

Fig. 12 Density of controlled nodes change under different scenarios

在控制参数作用下,3 个新的情景均改变了受控状态原来的密度。在增加受控节点密度方面,在仿真时间 $t \leq 15$ 时,情景 1 的效果最为显著(阻碍危险源状态到隐患状态的传播);在 $t > 15$ 时,情景 3 的效果最佳(促进危险源状态直接转化为受控状态),情景 3 的控制效果更有效。

基于传播动力学模型和隐患风险评价模型,3 个不同状态的元素节点有不同的控制效果。在降低危险源密度方面,抑制危险源→隐患的效果优于促进危险源→隐患→受控状态;在抑制隐患密度上升方面,促进隐患→受控状态优于促进危险源→受控状态;在增加受控节点方面,将危险源→受控状态的效果更佳。

4 结论

地铁施工是一个庞大的复杂系统,涉及元素众

多,元素间的作用关系复杂。本文通过分析地铁施工现场复杂系统的特征,明确了元素的传播状态,探索了状态之间的关系。得出以下结论:

(1) 通过使用小世界网络上的元素传播动力学仿真方法,设计控制变量,分析首次识别异常的时间、传播临界值、传播参数,找出不同情况下隐患的影响规模及元素的密度变化,为地铁工程施工安全管理提供新思路。

(2) 通过采用控制措施,对 3 个不同状态节点进行控制,探索不同元素的密度变化情况,得到不同状态节点的最优控制效果,有助于地铁施工安全风险的全过程管理,对提高地铁项目建设安全水平具有参考和借鉴价值。

参考文献:

- [1] 国务院. “十三五”现代综合交通运输体系发展规划, 2013-02-03.
The State Council. The development plan of the “Thirteen-Five” modern integrated transportation system, 2013-02-03.
- [2] Deng Y, Li Q, Lu Y. A research on subway physical vulnerability based on network theory and FMECA[J]. Safety Science (S1001-0505), 2015, 80(07): 127-134.
- [3] 郭庆军, 闫斌宇, 吴杰, 等. 地铁施工中未遂事件的识别与防范研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(4): 29-35.
Guo Qingjun, Yan Hongyu, Wu Jie, et al. Identification and prevention of attempted events in Metro construction [J]. Traffic information and security, 2018, 36(4): 29-35.
- [4] 贺龙, 陈同存, 蔡小东, 等. 责任矩阵在隐患排查治理中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(8): 175-179.
He Long, Chen Tongcun, Cai Xiaodong, et al. Application of responsibility matrix in checking and governing of hidden trouble[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(8): 175-179.
- [5] 许骏. 基于复杂网络的传染病突发事件应急管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Xu Jun. Research of Emergency Management for Infectious Disease Based on Complex Networks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.
- [6] 倪顺江. 基于复杂网络理论的传染病动力学建模与研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
Ni Shunjiao. Research on Modeling of Infectious Disease

- Spreading Based on Complex Network Theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [7] Zippo A G, Gelsomino G, Pieter V D, et al. Small-world networks in neuronal populations: a computational perspective[J]. *Neural Networks: the Official Journal of the International Neural Network Society (S0893-6080)*, 2013: 44.
- [8] 赵璇, 李宝根, 喻祖国. 无标度网络和动态小世界网络上的 SEIS 及 SEIR 模型研究[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2018, 40(1): 58-62.
Zhao Xuan, Li Baogen, Yu Zuguo. SEIS and SEIR models on scale-free networks and dynamic small-world networks[J]. *Journal of Natural Science, Xiangtan University*, 2018, 40(1): 58-62.
- [9] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚. 非线性网络的动力学复杂性的研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2010, 7(2/3): 5-9.
Fang Jinqing, Wang Xiaofan, Zheng Zhigang. Research of Dynamical Complexity of Nonlinear Networks[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, 7(2/3): 5-9.
- [10] Moreno Y, Nekovee M, Vespignani A. Efficiency and Reliability of Epidemic Data Dissemination in Complex Networks[J]. *Physical Review E (S1550-2376)*, 2004, 69(5): 055101.