

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.05.027

应用复杂网络的航空维修安全信息辐射模型

汪筱阳¹, 王 瑛¹, 朱 琳²

(1. 空军工程大学 装备管理与安全工程学院, 710051 西安; 2. 95645 部队, 400037 重庆)

摘 要:为减少航空维修差错率和研究安全信息在复杂网络上辐射的性质和规律,基于复杂网络的相关理论,针对航空维修安全信息在维修人员中的辐射进行研究.通过构建安全信息辐射模型,定义节点间以安全信息为媒介的辐射规则,基于改变维修人员的本质安全度和改变网络结构,动态考察网络中节点状态的变化.从微观层面模拟节点之间交互时,不同本质安全度的人员比例和不同网络拓扑结构对安全信息辐射范围和周期的影响.计算机模拟表明:维修人员的不同本质安全度和网络结构在很大程度上影响安全信息的辐射,提高维修个体的本质安全度有利于安全信息的辐射.

关键词:航空维修;安全信息辐射;本质安全度;NW 网络;BA 网络

中图分类号: TP391, X913.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)05-0166-06

A model of safety information radiation of aviation maintenance applied complex networks

WANG Xiaoyang¹, WANG Ying¹, ZHU Lin²

(1. Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, 710051 Xi'an, China;
2. Unit 95645, 400037 Chongqing, China)

Abstract: To reduce the aviation maintenance error rate and study the properties and rules of aviation maintenance safety information radiation on the complex network, we study the aviation maintenance safety information radiation in the maintenance personnel based on the theory of complex network. By building a safety information radiation model and defining the radiation rules between nodes through the medium of safety information, dynamic inspect the transformation of the node status in network based on changing the inherent safety degree of the maintenance personnel and the network structure. We analyze the influence of personnel proportion of different inherent safety degree and different network topology structure on the scope and period of safety information radiation when simulate the interactive between nodes on a micro level. With the help of computational simulation, it results that the different inherent safety degrees of the maintenance personnel, as well as the difference of network topology structure, have a lot of impact on safety information radiation. It is beneficial for the safety information radiation to improve the inherent safety degree of the maintenance personnel.

Keywords: aviation maintenance; safety information radiation; inherent safety degree; NW network; BA network

航空维修工作中维修差错发生的比率大,已成为当前危及空、地安全的主要问题之一.近年来,针对航空维修差错的分析已经成为研究的热点.文献[1]建立了基于模糊综合评判方法的航空维修差错控制能力评估模型,对维修差错数据进行分析,但是没有考虑差错的诱因.文献[2]通过建立系统动力学(SD)模型,分析了组织因素影响航空维修安全的作用机理;文献[3]基于模糊层次分析法对人为因素进行了分析与评价;文献[4]提出一种基于贝叶斯网络的机务维

修差错调查模型算法.但这些文献都只是对组织或人为诱因进行分析,没有从系统的角度整体考虑人一机一环一管之间的相互作用.文献[5]通过实证调研建立了维修单位质量控制员胜任力模型;文献[6]分析了个体行为与航空维修的相互影响;文献[7-8]基于审计结果在人为因素分析与分类系统(HFACS)的基础上建立了安全预测模型;文献[9]基于聚类规则研究了人为差错,找到了人为差错与人为因素直接的关系;文献[10]基于模糊数学和神经网络理论,建立了模糊神经网络事故诊断模型;文献[11]从人一机一环一管4个方面分析了维修安全管理影响因素;文献[12]从人一机一环一管系统角度,运用网络分析法(ANP)结合三角模糊函数对机务系统的安全水平进

收稿日期: 2015-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金(71171199).

作者简介: 汪筱阳(1987—),男,博士研究生;

王 瑛(1967—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 汪筱阳, wangxiaoyang1987@163.com.

行定量分析.但这些文献都忽略了维修个体之间的相互关系.文献[13]选择模糊网络分析法进行维修因素风险评价,虽然考虑了各种风险因素之间的相互影响,但是忽略了维修个体之间在安全性上存在的差异.文献[14]运用安全氛围和计划行为理论对不安全行为进行预测,虽然考虑了安全氛围,但是忽略了个体之间复杂的交互关系.

安全信息辐射 SIR(safety information radiation)是指复杂系统内部安全度相对较高的智能体组元通过辐射介质向安全度相对较低的智能体组元进行安全信息(包括机器信息、环境信息、安全管理信息等要素)转移和传播的资源优化配置过程^[15].因此,研究安全信息在复杂网络上辐射的性质、规律,对实现复杂系统结构的本质安全有着一定的现实意义.目前,航空维修差错的研究大都基于贝叶斯网络、模糊网络和神经网络等.然而,考虑复杂系统节点间的关联关系,最为常用的方法就是复杂网络.基于复杂网络建模可以从系统角度考虑维修中的各种因素,并且可在网络中通过对节点加入点的属性、边权重等来进一步刻画系统,但是目前基于复杂网络的航空维修差错研究还较少.

本文运用复杂网络方法,将参与航空维修的所有人员作为复杂网络的节点,将机器、环境和安全管理因素作为安全信息在以人构建的复杂网络模型上进行辐射,研究安全信息在复杂网络上的辐射性质和影响.

1 安全信息辐射网络模型

1.1 影响 SIR 的因素

由安全信息辐射的概念可知,影响安全信息在航空维修人员网络上辐射的因素有 2 个.

1)不同网络拓扑结构和中心节点的差异必然影响安全信息辐射的最终结果.文献[16]认为研究网络的拓扑结构有利于深刻理解信息在网络中的传播过程以及网络所具有的拓扑特性.所以,有必要在不同网络拓扑结构中对安全信息辐射的影响进行研究.

2)维修人员在维修活动中,可以获得各式各样的安全信息(应对和适应环境变化的能力、对飞机熟悉的程度、有关的规程、条令、指令等专业的或安全方面的要求).良好的业务水平可以避免机务人员在直接行为中出现失误,经验丰富的维修人员要比经验欠缺的维修人员对安全信息的响应能力强,在复杂网络中不同能力的维修人员所占的比例也必然影响安全信息的辐射.

1.2 模型模拟方法

在结构本质安全的复杂系统中,不同组元具有不同的安全信息度,当一个安全信息需要辐射出去时,

首先由系统中具有较大辐射面的组元进行辐射,反映在复杂网络中就是具有较大度的节点开始辐射信息.

在定义的安全信息辐射网络中,每一个节点代表一个航空维修个体.而连接则表示他们之间有联系,以一定的概率进行安全信息的辐射.安全信息辐射网络中描述的是安全信息在航空维修人员中的传播过程,其中每个节点可能处于以下 3 种状态:

1)辐射态(radiated).安全值较高且在网络里辐射安全信息时的状态.处于辐射态的节点所属的集合记为 **R**,初始网络中少量节点处于辐射态,对应为航空维修人员中的安全员和安全信息辐射源.

2)安全态(safe).安全值高于最低安全值(安全阈值)但不会辐射安全信息时的状态.处于安全状态的节点所属的集合记为 **S**,对应为航空维修中正常状态的人员.

3)危险态(dangerous).安全值低于安全阈值时的状态.处于危险态的节点所属的集合记为 **D**,初始网络中大部分节点处于危险态,对应为航空维修中出差错概率大的人员,经常处于疲惫、心理压力等状态.

构造安全信息辐射模型,作以下假设:

假设 1 组元只要接受安全信息,就会增加安全值.

假设 2 辐射态的组元仅对安全态和危险态的组元进行辐射.

假设 3 只考虑组元与其他组元联系的存在性.模型中的连接没有权重和方向.事实上大多数的人际网络都是简单无向图.

假设 4 网络是连通的,不存在孤立的组元.因为信息辐射首先要具备的条件就是有辐射的路径.

1.3 模型的参数及定义

设定 3 个特定的网络:ER 随机网络、NW 网络和 BA 网络.

ER 随机网络:给定 n 个节点,假定任意一对节点之间存在一条边的概率为 p ,记这样形成的网络为 $G_{n,p}$.这里取 $G_{100,0.07}$.

NW 网络:具有 N 个节点的规则环形网络,假定环上每一个节点都与两侧各 m_0 条边相连,然后不去断开原来环形初始网络的任何一条边,而只是在随机选取的节点对之间以概率 p_0 增加一条边(这时新连接的边很可能是长程边).这里取 $N = 100, m_0 = 2, p_0 = 0.05$.

BA 网络:初始设定 M 个全连接的小网络,然后不断引入新的节点.每次引入的新节点要与网络中已经存在的 m (其中 $m \leq M$)个节点进行随机连接,连接的概率和被选节点的度成正比(称为择优连接).这里取 $M = 15, m = 3$.

本质安全程度决定了组元在安全信息辐射网络中对安全信息收发能力.文献[17]运用BP神经网络对航空机务人员本质安全程度进行评价,并进行了仿真验证.根据其结果并考虑机场航空维修人员现实情况,可以将航空维修人员的本质安全度大致分为四类,各类人员所占比例如表1所示.

表 1 SIR 网络中不同本质安全度的人员比例

本质安全度	比例%
高	30
较高	30
一般	20
差	20

每一个节点都有以上全部的属性.属性的定义和解释如表2所示.如果一个节点和其邻居有关联,当且仅当一个辐射态的节点和另一个安全态或危险态的节点连接,那么在一定的概率下进行安全信息的辐射.同时设定辐射态的节点有一定的概率转化为安全态,转化的概率和与其关联的危险点数和节点总数有关.

表 2 SIR 网络中节点的参数

属性	描述	默认值
ID	每个节点唯一的标志	1~N 的正整数
Status	节点的状态	辐射态(R)、安全态(S)、危险态(D)
本质安全度 k	节点对安全信息收发能力	高(k=1)、较高(k=2)、一般(k=3)、差(k=4)

具体的安全信息辐射网络辐射规则如下.

规则 1 假定节点 $i \in \mathbf{R}$, 节点 i 与 j_k 关联, 设 $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \lambda_k, \mu_k$ 为转化概率, 则

$$j_k \in \mathbf{D} \begin{cases} \xrightarrow{\alpha_k} j_k \in \mathbf{S}, \\ \xrightarrow{\beta_k} j_k \in \mathbf{R}, \\ \xrightarrow{\gamma_k} j_k \in \mathbf{D}, \end{cases}$$

其中 $\alpha_k + \beta_k + \gamma_k = 1$.

$$j_k \in \mathbf{S} \begin{cases} \xrightarrow{\lambda_k} j_k \in \mathbf{R}, \\ \xrightarrow{\mu_k} j_k \in \mathbf{S}, \end{cases}$$

其中 $\lambda_k + \mu_k = 1$.

规则 2 若节点 $i \in \mathbf{R}$, 则 $i \in \mathbf{R} \xrightarrow{m=(q-p)/q} i \in \mathbf{S}$, 其中 p 和 q 分别为与 i 关联的危险节点个数和节点总数.

这里定义 3 个衡量安全信息辐射效果的指标: 1) 在整个安全信息辐射的过程中辐射节点数 $R(t)$ 的峰值 $\text{Max}(R(t))$, 它在一定程度上反映了安全信息辐射所造成的最大影响; 2) 安全信息辐射结束后, 即 $R = \emptyset$, 安全节点最终数目 $S(t)$, 记为

$\text{Final}(S(t))$; 3) 完成一个安全信息辐射的周期 Total , 即一个安全信息结束后所需的总时间.

考虑一个由 100 个节点组成的网络, 在每一个时间步长中, 网络中的辐射点都会以一定的概率将安全信息辐射给邻居节点. 选取安全管理专家顾问和安全管理委员会的 10 位专家分别对各类机务人员的各个状态转化率进行量化估计, 取平均估值作为最终的转化概率, 得到如表 3 所示的不同本质安全度的人员转化概率. 由于对各状态转化概率估计标准进行过量化划分处理, 且取平均值作为最终采样数据, 因此有效减弱了专家打分主观性因素的影响. 而安全管理专家顾问和安全管理委员会的成员, 平时兼有安全监察的任务, 因此他们的打分数据具有较高的可信程度.

表 3 不同本质安全度节点状态转化概率

类型	α	β	γ	λ	μ
高	0.70	0.054	0.246	0.066	0.934
较高	0.55	0.038	0.412	0.051	0.949
一般	0.38	0.024	0.596	0.037	0.963
差	0.20	0.010	0.790	0.024	0.976

1.4 算法实现

使用邻接矩阵来表示网络, 在程序开始阶段, 首先初始化, 在生成 NW 或 BA 网络之后, 要确定网络中的辐射点、安全点和危险点. 为了确定节点的类型: 1) 计算网络中节点的度的极值, $D = \text{Degree}_{\max}$, $d = \text{Degree}_{\min}$; 2) 根据极值计算划分集合的界限, $R_{\text{line}} = d + (D - d) \times a$, $S_{\text{line}} = d + (D - d) \times b$, 这里取 $a = 0.9$, $b = 0.8$; 3) 由界限划分节点类型, $R = \{i \mid \text{Degree}(i) > R_{\text{line}}\}$, $S = \{i \mid S_{\text{line}} < \text{Degree}(i) < R_{\text{line}}\}$, $D = \{i \mid \text{Degree}(i) < S_{\text{line}}\}$. 在安全信息辐射过程中, 安全点和危险点将以一定的概率接收辐射点辐射的安全信息, 之后得到一个相应的邻接矩阵来表示初始化后构建的网络. 辐射时首先判断节点的属性, 包括节点状态, 当判断为辐射点时才进行辐射. 然后在已经生成的网络中寻找该节点的邻居节点, 并同时判断其邻居节点的属性, 包括节点状态和本质安全度, 如果其邻居节点为安全点或危险点, 那么就进行安全信息的辐射, 然后根据邻居节点的本质安全程度以相应的概率进行安全信息的接收. 图 1 所示为安全信息在 BA 网络辐射的过程.

利用不同网络拓扑结构以及上述安全信息辐射规则模拟安全信息辐射网络, 具体算法如图 2 所示.

算法步骤如下:

Step 1 构建安全信息辐射网络. 假设该网络由 100 个节点组成, 根据不同的网络拓扑结构来构建该网络.

Step 2 初始化每个节点的状态. 1) 进行编号; 2) 根据“度中心性”原理^[18]划分节点状态, 因为现

实情况安全信息一般是从影响力较大的节点辐射出去,所以初始网络中只有少量辐射者和安全者,其余均为危险者;3)由表 1 数据划分节点类型。

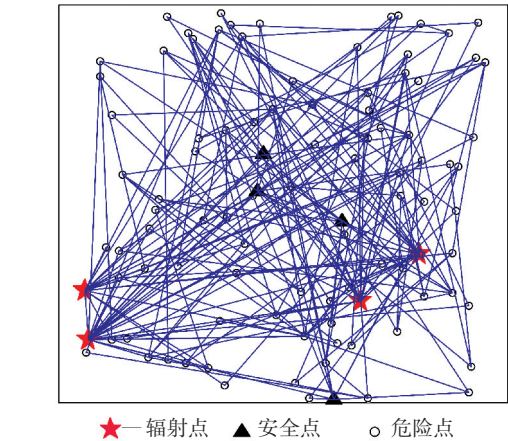


图 1 安全信息在 BA 网络中的辐射过程

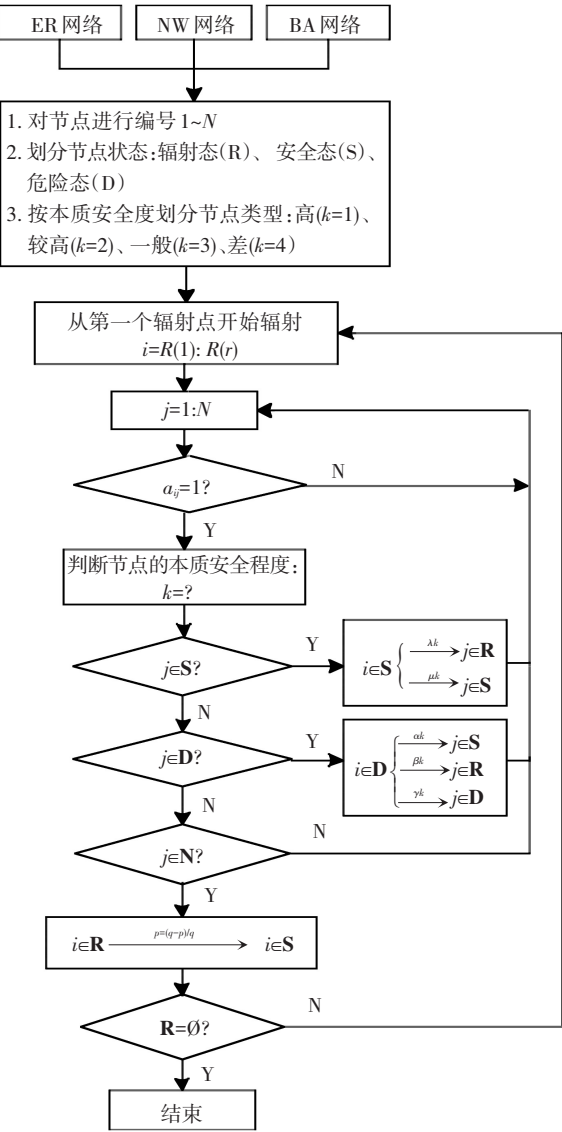


图 2 SIR 算法流程

Step 3 选择辐射集中的第 i 个辐射点开始辐射。
Step 4 令 j 依次遍历每个节点,若节点 i 与 j 关

联,则进行 Step 5,否则继续遍历。
Step 5 判断节点本质安全度,本质安全度决定节点接收安全信息的能力(转化概率)。
Step 6 若 j 不是安全状态,则进行 step7,否则 j 以概率 λ 转为辐射状态,以概率 μ 继续保持安全状态,然后转 Step 4。
Step 7 若 j 不是危险状态,则进行 step8,否则 j 以概率 α 转为安全状态,以概率 β 转为辐射状态,以概率 γ 继续保持危险状态,然后转 Step 4。
Step 8 若 $j = N$,则节点 i 以概率 m 转为安全状态,否则转 Step 4。
Step 9 若 R 为空集,即无节点再对该安全信息进行辐射,则结束,否则转 Step 3。

2 仿真及分析

根据上述算法进行了如下模拟和对比:通过改变维修人员的本质安全度,观察维修人员的本质安全度对安全信息辐射在航空维修人员网络中的影响;通过模拟安全信息分别在 ER 网络、NW 网络和 BA 网络中的辐射,对比不同网络对维修人员结构中安全信息辐射的影响。

2.1 节点初始状态对安全信息辐射的影响

这里讨论的初始状态主要是每个节点的本质安全度的初始设定,表 1 的调查结果给出了现实情况下不同本质安全度的维修人员比例.按照这个比例将辐射态节点、安全态节点和危险态节点的本质安全度由高到低(状态设为 HL)和由低到高(状态设为 LH)依次设定,即将辐射态节点设为高本质安全度和将危险态节点设为高本质安全度的两种初始状态,分别在不同网络中观察两种初始状态的安全信息辐射效果,如图 3 所示。

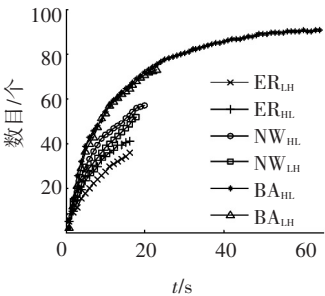


图 3 不同网络中两种初始状态的安全点数量变化

从图 3 中可以看出:1)在不同的网络中,节点的初始状态都会不同程度地影响安全信息的辐射;2)节点的初始状态对 ER 随机网络和 NW 网络的影响仅限于对安全点数量的影响,而对辐射周期几乎没有影响,但是对 BA 网络来说,节点的初始状态不仅影响了安全点的数量,而且还极大地影响了安全

信息辐射的周期;3)不管是在 ER 网络、NW 网络还是 BA 网络中,如果初始状态设为 HL,那么不论在辐射过程中或辐射结束后安全点的数量都会增多,也就是说,初始状态 HL 有利于安全信息的辐射,提高初始辐射点的本质安全度能更好地进行安全信息辐射.以下讨论均在初始状态为 HL 下进行.

2.2 不同本质安全度的维修人员对安全信息辐射的影响

根据表 1 的调查结果设定了不同本质安全度的维修人员比例,研究了不同网络中安全信息在维修人员之间的辐射情况,如图 4~6 所示.另外研究了其他 4 种极端假设中的安全信息辐射情况,分别为:只有本质安全度高的人($k = 1$)、只有本质安全度较高的人($k = 2$)、只有本质安全度一般的人($k = 3$)、只有本质安全度差的人($k = 4$).从图 4~6 可以看出:

1)网络中不同本质安全度的人员比例影响安全信息辐射的结果,人员的本质安全度越高,安全信息辐射速率越快,辐射影响范围也越大.在 ER 网络中,当全为本质安全度高的人时($k = 1$), $Final(S)_{k=1} \approx 40$,当全为本质安全度差的人时($k = 4$), $Final(S)_{k=4} \approx 24$,相差约为 16. 在 NW 网络中, $Final(S)_{k=1} \approx 71$, $Final(S)_{k=4} \approx 40$,相差约为 31. 而在 BA 网络中, $Final(S)_{k=1} \approx 87$, $Final(S)_{k=4} \approx 43$,相差约为 44. 说明在 ER 网络、NW 网络和 BA 网络中不同本质安全度的人员比例对安全信息辐射的影响越来越大.

2)在 ER 网络中,人员本质安全度越高,辐射结束后处于安全态的节点数量越多,表明人的本质安全度越高越有利于安全信息的辐射,NW 网络和 BA

网络同样如此.

3)在 ER 网络和 NW 网络中,不同本质安全度的人员比例对安全信息辐射周期影响不大,但是在 BA 网络中,不同本质安全度的人员比例对安全信息辐射周期影响很大,本质安全度越高,安全信息的辐射周期越长,表明安全信息在 BA 网络中存在的时间越长.

4)在人员比例相同的情况下,ER 网络、NW 网络和 BA 网络中不论是在安全信息辐射过程中或在辐射结束后,安全点数量依次增多,说明 BA 网络更有利于安全信息的辐射.

5)在辐射刚开始的一段时间内,BA 网络中安全点数目上升快(危险点数目下降快),之后变化缓慢,说明在安全信息辐射过程中,各集合中的节点数在 BA 网络中呈指数形式变化.相比 BA 网络,各集合中的节点数在 ER 网络和 NW 网络中呈线性形式变化.值得注意的是,仿真结果表明,按照表 1 估计的实际情况机场不同本质安全度的维修人员比例(Normal),无论在何种网络下安全信息都能够在相应的网络中进行较好地辐射.

上面讨论了 $k = 1, 2, 3, 4$ 的极端情况,为了使讨论更加充分,进行混合组合,即不存在本质安全度高的人,其余三种类型人数相同均占 33%,记为 $No\ k = 1$,以此类推.ER 网络、NW 网络和 BA 网络中的情况分别如图 7~9 所示.可以看出:

1)在不同的网络中, $k = 1, 4$ 类型的人都比 $k = 2, 3$ 类型的人对安全信息辐射的影响大,另外,如果缺少 $k = 2, 3$ 类型的人,对安全信息的辐射效果几乎没有影响.

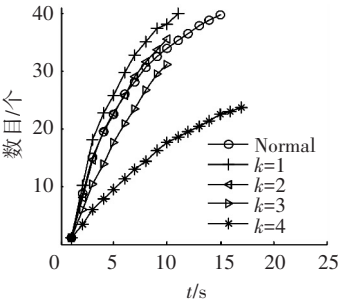


图 4 ER 网络中安全点数量变化

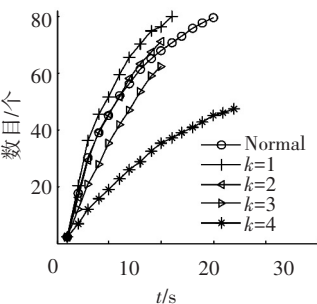


图 5 NW 网络中安全点数量变化

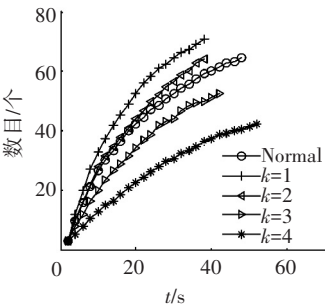


图 6 BA 网络中安全点数量变化

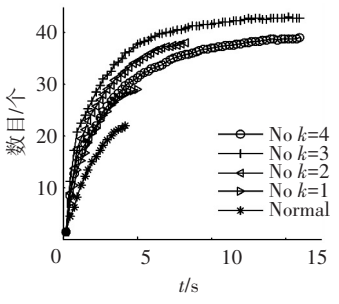


图 7 ER 网络中安全点数量变化

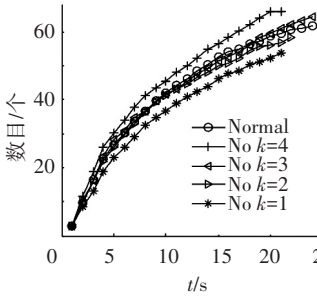


图 8 NW 网络中安全点数量变化

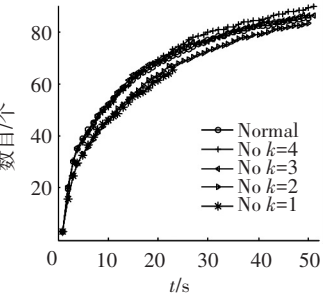


图 9 BA 网络中安全点数量变化

2)从影响的程度上来说, $k = 1, 4$ 类型的人在 ER 网络、NW 网络和 BA 网络中的影响程度依次增大.其中,此两种类型的人对 BA 网络的影响最大,特别是在图 9 中,当没有本质安全度高的人时,不仅是在安全点数量上,而且是在周期上严重影响安全信息在 BA 网络中的辐射.

2.3 不同网络结构对安全信息辐射的影响

图 10 描述的是按照表 1 的人员比例,在整个安全信息辐射过程中,NW 网络和 BA 网络中辐射点数量的变化.从图 10 可以看出,NW 网络的辐射点峰值 $\max(R)$ 大于 ER 网络,而 BA 网络的 $\max(R)$ 约为 NW 网络的两倍,也就是说安全信息在 BA 网络中辐射能造成更大的影响,进一步佐证了图 4~6 的结果.在网络平均路径长度相同的情况下,BA 网络中安全信息辐射影响的范围更大,且安全信息在 BA 网络中存在的时间也较长.

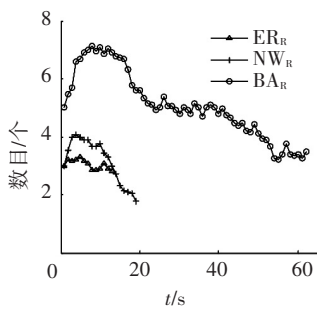


图 10 不同网络中辐射点数量变化

3 结 语

航空维修人员不同本质安全度的节点在网络中的比例一定程度上影响了安全信息的辐射,不同的网络结构也影响和制约着安全信息的辐射.提高机务人员的个人素质,特别是增加本质安全度高的人的数量和减少本质安全度低的人的数量,将在很大程度上加强飞行训练质量,有利于航空维修安全信息的辐射,进而减少飞行事故的发生.

本文通过引入复杂网络理论研究了航空维修的安全信息辐射,虽对人员本质安全度的影响进行了定量分析讨论,但忽略了安全信息组成的多样性、安全信息辐射的强度、组成安全信息要素之间的交互作用、维修人员结构的层次性和维修人员的加入和退役等诸多因素.这些因素也是今后工作中需要考虑的.

参考文献

[1] 焦猛. 基于模糊综合评判的航空维修差错控制能力定量评估[J]. 空军工程大学学报,2007,8(1):24-26.

[2] 高建国,端木京顺,张冰,等. 影响航空器维修安全的组织因素辨识与分析[J]. 中国安全科学学报,2014,24(5):32-37.

[3] WANG Lei, SUN Ruishan, YANG Zhihui. Analysis and Evaluation of Human Factors in Aviation Maintenance based on Fuzzy and AHP Method [C]//Proceedings of IEEM 2009.HongKong:IEEE, 2009.

[4] 魏麟,周长春,谢果. 一种基于贝叶斯网络的机务维修差错调查模型算法[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(8):102-105.

[5] 王霞,孙石磊. 民航维修单位质量控制员胜任力模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013,9(1):64-69.

[6] 邹蓉蓉,于晓亮. 浅析个体行为与航空维修的相互影响[J]. 航空维修与工程, 2005(3):27-28.

[7] HSIAO Yulin, DRURY D, WU Changxu, et al. Predictive models of safety based on audit findings: Part 1: model development and reliability [J]. Applied Ergonomics, 2013,44(2):261-273.

[8] HSIAO Yulin, DRURY D, WU Changxu, et al. Predictive models of safety based on audit findings: Part 2: measurement of model validity [J]. Applied Ergonomics, 2013,44(4):659-666.

[9] ZHANG Renqian, YANG Junling. Association rules based research on man-made mistakes in aviation maintenance: a case study [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2006:545-550.

[10] ZHANG P, ZHANG R, RAN X X. Research of fault diagnosis in flight control system based on fuzzy neural network[J]. Procedia Engineering, 2011,15:70-74.

[11] 陈勇刚,李世林. 民航机务维修安全管理水平未确知测度分析[J]. 中国安全科学学报, 2012,22(11):144-149.

[12] 王永刚,毛覃超. 基于模糊网络分析的民航机务安全评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2012,8(10):197-203.

[13] 张晓全,曹钧,于露. 机务维修风险管理研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012,8(4):166-170.

[14] FOGARTY G J, SHAW A. Safety climate and the theory of planned behavior: towards the prediction of unsafe behavior [J]. Accident Analysis and Prevention, 2010,42(5):1455-1459.

[15] 王瑛,汪送,李超. 面向新型航空装备系统的安全保障模式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011,7(1):54-57.

[16] 刘衍珩,李飞鹏,孙鑫,等. 基于信息传播的社交网络拓扑模型[J]. 通信学报, 2013,34(4):1-9.

[17] 汪送,王瑛,李超. BP 神经网络在航空机务人员本质安全程度评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2010,6(6):35-39.

[18] 任晓龙,吕琳媛. 网络重要节点排序方法综述[J]. 科学通报, 2014,59(13):1175-1197.

(编辑 王小唯 苗秀芝)