

基于耗散结构理论的复杂流程网络安全风险渗透

李超¹, 王瑛¹, 陈超¹, 胡洪宇², 张兵³

(1. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 陕西西安, 710051;

2. 空军驻成飞公司军事代表室, 四川成都, 610092; 3. 空军驻162厂军事代表室, 贵州安顺, 561018)

摘要 针对生产/服务流程安全风险分析问题, 运用耗散结构理论从结构和演化2个层面阐述流程风险渗透机理; 构建复杂流程安全风险网络, 以网络节点触发概率、重要度和吸引力为渗透参数, 刻画流程安全风险的传播、累积、耗散过程, 并运用极大熵模型和灰关联熵模型计算安全风险触发概率和渗透强度; 最后, 建立改进蚁群算法最高安全风险路径渗透模型。结合机务准备流程实例, 验证了模型的有效性, 为复杂流程安全风险提供新方法。

关键词 耗散结构; 蚁群算法; 流程风险; 机务准备

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.019

中图分类号 N945 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0081-04

Study on Safety Risk Pervasion Model of Complicated Business Process Network Based on Dissipation Structure Theory

LI Chao¹, WANG Ying¹, CHEN Chao¹, HU Hong-yu², ZHANG Bing³

(1. Equipment Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Air Force Military Representative Office in CAC, Chengdu 610092, China; 3. Air Force Military Representative Office in 162 Factory, Anshun 561018, Guizhou, China)

Abstract: Aiming at the safety analysis of complicated business process, its pervasion mechanism is expounded both from structure and evolution. The course of its transfer, accumulation and release is depicted with frequency and penetrability of safety risk network node, which are calculated by maximum entropy model and grey relation entropy model. Finally, an applied case of flight line maintenance process is provided to illustrate the feasibility of finding the process risk path based on ant algorithm, and to verify the efficiency to find the process risk nodes which become the proofs for the availability of process risk management.

Key words: dissipative structure; ant algorithm; business process risk; flight line maintenance

随着现代生产/服务流程规模扩大和工艺复杂, 流程系统安全性问题日益突出, 尤其是航空、煤矿等复杂流程领域事故频发, 造成巨大损失。FMEA方法^[1]、Markov方法^[2]等传统安全风险分析方法, 从事事故的因果关系、先验概率着手分析, 且仅关注单台设备或环节。但是实际流程系统的事故类型很多,

穷举事故模式难度较大, 限制了以上方法的应用。近年来, 复杂网络理论^[3]在分析网络静态结构方面以及耗散结构理论^[4]在描述网络动态演化方面均显示出优越性。如果将复杂流程系统抽象为流程网络, 通过网络结构特性、耗散特性, 分析系统安全性通用特征参数, 则将系统安全性研究从传统的可靠

收稿日期: 2011-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171199)

作者简介: 李超(1984—), 男, 河南信阳人, 博士生, 主要从事复杂系统安全性分析与控制研究。

E-mail: leecharle@sina.com

性方法转移到更为有效的网络方法。

1 复杂流程安全风险网络耗散分析

复杂流程网络以流程活动为网络节点,以他们之间的逻辑关系为网络边^[5]。复杂流程安全风险主要来自流程运行环境状况、流程产品/服务过程质量特性以及人员能力水平。流程指令、规程、工艺等则是安全风险在复杂流程网络上的渗透动力,实现流程运作所需的物质流、能量流、信息流的动态关联和流转。在此过程中,安全风险利用流程网络固有结构禀赋形成安全风险渗透能力,并不断累积安全风险势能(由势函数 V 表征)。当安全风险势能 V 达到阈值 p 时,流程网络产生“巨涨落”,安全风险以事故形式释放势量,形成新的稳定结构。许峰等^[6]运用节点度、介数等参数来度量并表征安全风险节点在总体网络中的重要度和渗透能力。复杂流程网络特征参数形式化定义如下:

定义 1 复杂流程网络:复杂流程网络 $PG = \langle V, E \rangle$ 是一个二元变量。其中,流程活动为网络节点 v_i ,他们之间的关联关系为网络边 e_{ij} 。

定义 2 节点重要度:设 l_i 为复杂流程网络的节点 i 的重要度, k_i 为节点 v_i 的节点度,有:

$$l_i = k_i / \sum_{i=1}^n k_i \quad (2)$$

定义 3 节点吸引度:设 δ_i 为复杂流程网络节点 i 的吸引度, ϕ_i 为节点 v_i 的介数,有:

$$\delta_i = \phi_i / \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (3)$$

2 复杂流程安全风险渗透参数

复杂流程网络安全风险渗透相应的参数为触发概率、渗透强度。计算方法如下:

2.1 触发概率

触发概率 p_i 是流程活动风险出现的频度。考虑到安全风险数据的小样本特征,本文采用最大熵方法提高先验概率估算精度,以先验信息作为约束条件,不引入任何假设,结果更为准确可信。对于节点 v_i ,令其触发概率 p_i 的概率密度函数为 $f(x)$ 。以熵函数 H 为目标函数,以流程网络运行数据样本 S 各阶统计矩 M_i 为约束条件,求解熵函数 H 最大值来估计各网络节点安全风险触发的概率密度^[7]。则构建其最大熵模型:

$$\max H = \int_S [-f(x) \ln f(x)] dx \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \int_S f(x) dx = 1$$

$$\int_S x^i f(x) dx = M_i$$

根据文献[8]运用 Lagrange 乘子法得到 $f(x)$,进而求得相应的触发概率:

$$p_i = \sqrt{\int_S x^2 f(x) dx / \left(\int_S x f(x) dx \right)^2 - 1} \quad (5)$$

2.2 渗透强度

渗透强度是指安全风险在流程网络结构上渗透能量的累积程度,其影响参数包括介数^[9]和节点重要度。令节点 v_i 直接传递到节点 v_j 的传播强度为 I_{ij} 。基于 l_i 和 δ_i 定义渗透强度为:

$$I_{ij} = \begin{cases} \omega_l l_i l_j + \omega_\delta \delta_i \delta_j, & v_i, v_j \text{ 存在连接边时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中 ω_l, ω_δ 分别为介数和节点度所对应的权重,采用灰关联熵法确定^[10]。对 I_{ij} 归一化处理,得到 $I_{ij} = I_{ij} / \sum_i \sum_j I_{ij}$ 为流程安全风险网络连节边权重。

3 复杂流程网络风险渗透建模

蚁群算法因其较好的并行搜索能力被广泛用于路径寻优。由于蚂蚁在选择流程网络节点时,没有考虑剩余节点的空间态势,造成蚂蚁被迫在远距零散节点间跳跃,影响了搜索效率。这一问题可通过在路径网络上进行同心圆簇覆盖,并用由外到内赋值递减的权重修改蚂蚁转移概率的方法解决^[11],但是权重的分配和取值仍难以把握。本文通过建立关于触发概率和渗透强度的直角坐标系,将 n 个流程网络节点定位,计算任意剩余节点与触发节点之间的距离,形成 $(n-1) \times 1$ 的距离索引向量 $A_{j,1} (n-1)$,对蚂蚁从 v_i 到 v_j 的选择概率 p_{ij} 作如下修改:

$$p_{ij} = p_{ij} + \omega_j \quad (7)$$

式中 $\omega_j = \frac{A_{j,1} - \min_j |A_{i,1}|}{\max_j |A_{j,1}| - \min_j |A_{j,1}|}$ 为 v_j 的给定

权重,其他参量同原始蚁群算法。则根据复杂流程网络的分步渗透机理,可得到:

$$\max \sum_{k \geq 1} p_k I(V_{k-1, k})$$

$$\text{s. t. } \prod_k I_k \leq p, \quad i \in S_{k-1}, j \in S_k \quad (8)$$

式中 S_k 为第 k 步的安全风险渗透节点集合。每经过一次循环,各条路径上的信息素按下式更新:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}, \quad \Delta \tau_{ij} = \sum_{l=1}^{N_a} \Delta \tau_{ij}^l \quad (9)$$

式中: $\rho \in (0, 1)$ 为信息素挥发程度; N_a 为蚂蚁数目; $\Delta \tau_{ij}^l$ 为第 l 只蚂蚁留在路径 (i, j) 上的信息素增

量,有:

$$\Delta\tau_{ij}^l = \begin{cases} QD_l & , \text{蚂蚁经过}(i, j) \text{ 时} \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中:Q为常数;D_l为第l只蚂蚁找到的安全风险渗透路径的目标函数值。

因为风险优先选择渗透风险度最高的节点进行传递,所以将启发式信息值定义为 $\eta_{ij}(t) = I_{ij}^k$,定义t时刻第l只蚂蚁在节点i选择前往节点j的概率为:

$$p_{ij}^l(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in N_i^l} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta} + \omega_j & , j \in N_i^l \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中: α, β 为控制信息素和启发信息对概率影响大小的参数; N_i^l 为蚂蚁位于节点i时的可行邻域节点集合。

4 应用实例

本文以某航空兵团机务大队机务准备流程安全风险分析为例。运用工作分解结构方法识别出机务大队保障流程活动11项^[12],建立规模n为11的流程网络风险散布图见图1。从其安全事故管理系统和质量控制系统导出2012年第1季度的机务准备流程安全风险数据。考虑到本文主要研究流程风险渗透过程,将其节点的触发概率均设为0.02。然后,根据式(6)计算传播强度,并标注在图1上。由触发概率和渗透强度便能计算 ω_j 。蚁群算法中的相关参数设置见表1。

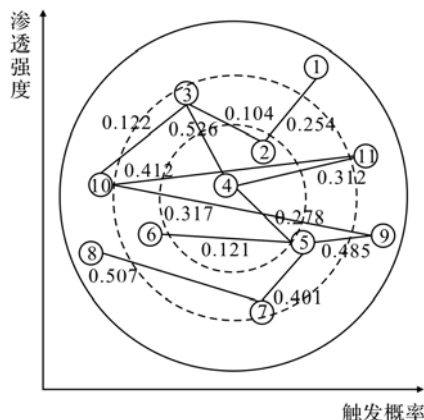


图1 机务准备流程安全风险散布图

Fig. 1 Risk distribution chat of flight line maintenance process

选择不同初始风险网络节点,通过基本蚁群算法和加权蚁群算法,求得最高风险渗透路径均为:3→4→5→9。最高对应的流程活动分别为通导通电、火控通电、军械通电、质量检验。根据故障统计,通道专业和火控专业的故障率最高,其次是军械专业。

质量检验作为机务准备流程的最后关口承担很大风险,因此,所得结果符合实际。这2种算法的区别在于平均路径最高风险路径次数和平均迭代次数上,加权蚁群算法均明显优于基本蚁群算法,具体结果见表2。

表1 蚁群算法参数设置

α	β	ρ	Q	N_a	迭代次数 N_c
2	1	0.8	0.000 1	4	300

表2 2种蚁群算法结果对比

算法名称	最高风险路径次数	平均迭代次数
基本蚁群算法	4	173
加权蚁群算法	6	126

5 结语

本文将复杂网络与耗散结构理论结合起来,通过构造复杂流程网络,较为准确地刻画安全风险的形成和发生。耗散结构方法从结构和演化2个方面较好地揭示其流程安全风险渗透机制。以网络节点风险触发概率、重要度和吸引度为参数,将流程宏观和微观2个层面结合起来,实现安全风险的发生、渗透、耗散的全过程建模分析,并改进基本蚁群算法,以较低的系统开销获得最高风险渗透路径。最后,以飞行机务准备流程安全风险渗透为例,验证了模型的有效性,为复杂流程安全风险提供了新方法。

参考文献(References):

[1] 崔文彬,吴桂涛,孙培廷,等.基于FMEA和模糊综合评判的船舶安全评估[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(3):263-267.
CUI Wenbin, WU Guitao, SUN Peiting, et al. Ship safety assessment based on FMEA and fuzzy comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Harbin engineering university, 2007, 28(3): 263-267. (in Chinese)

[2] 朱正福,李长福,何恩山,等.基于马尔可夫链的动态故障树分析方法[J].兵工学报,2008,29(9):1104-1107.
ZHU Zhengfu, LI Changfu, HE Enshan, et al. The dynamic fault tree analysis method based on Markov chain[J]. Acta armamentarii, 2008, 29(9): 1104-1107. (in Chinese)

[3] 邓宏钟,吴俊,李勇,等.复杂网络拓扑结构对系统抗毁性影响研究[J].系统工程与电子技术,2008,30(12):2425-2428.

- DENG Hongzhong, WU Jun, LI Yong, et al. Influence of complex network topologic structure on system invulnerability[J]. Systems engineering and electronics, 2008, 30(12): 2425-2428. (in Chinese)
- [4] 何杰, 杨文东, 李旭宏, 等. 基于耗散结构理论的公路快速货运系统演化机理[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 120-125.
- HE Jie, YANG Wendong, LI Xuhong, et al. Evolution mechanism of highway express freight transportation system based on dissipation structure theory [J]. China journal of highway and transport, 2007, 20(2): 120-125. (in Chinese)
- [5] 姜洪权, 高建民, 陈富民, 等. 基于复杂网络理论的流程工业系统安全性分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 806-810.
- JIANG Hongquan, GAO Jianmin, CHEN Fumin, et al. Safety analysis to process industry system Based on complex networks theory[J]. Journal of xi'an jiaotong university, 2007, 41(7): 806-810. (in Chinese)
- [6] 许峰, 毛钢, 秦臻. 复杂网络特征量度及典型网络模型分析[J]. 通信技术, 2010, 43(9): 112-114.
- XU Feng, MAO Gang, QIN Zhen. Analysis of characteristic measurement and typical network models in complex network [J]. Communications technology, 2010, 43(9): 112-114. (in Chinese)
- [7] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics [J]. Physical review, 1957, 106(4): 620-630.
- [8] 李琦, 金鸿章, 林德明. 复杂系统的脆性模型及分析方法[J]. 系统工程, 2005, 23(1): 9-12.
- LI Qi, JIN Hongzhang, LIN Deming. The model and analyzing method for complex system's brittleness [J]. Systems engineering, 2005, 23(1): 9-12. (in Chinese)
- [9] Adilson E, Motter, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks [J]. Physic review, 2002, E66: 065102.
- [10] 胡启洲, 陆化普, 蔚欣欣, 等. 基于关联熵与复合物元的公交系统综合测度模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(1): 186-192.
- HU Qizhou, LU Huapu, YU Xinxin, et al. Compressive measurement of urban public traffic system based on relation entropy and complex matter element [J]. Systems engineering-theory & practice, 2011, 31(1): 186-192. (in Chinese)
- [11] 李扬, 薛瑞红. 基于图形的加权蚁群算法[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(2): 258-260.
- LI Yang, XUE Ruihong. Weighted ant colony algorithm based on graph [J]. Journal of Liaoning technical university: natural science edition, 2008, 27(2): 258-260. (in Chinese)
- [12] 李超, 王瑛, 汪晓程, 等. 基于模块化理论的机务准备流程优化研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(1): 83-86.
- LI Chao, WANG Ying, WANG Xiaocheng, et al. Study on process optimization of flight line maintenance based on modular theory [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1): 83-86. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1] 程湘云, 王英梅, 刘增良. 一种定量的信息安全风险评估模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(6): 56-59.
- [2] 冯博宇, 王瑛, 编队飞行射频辐射的风险计算模型及优化策略[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(4): 16-20.
- [3] 刘莉, 徐浩军, 井凤玲等. 基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评估模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(3): 5-9.
- [4] 宗蜀宁, 端木京顺, 王青等. 飞机整机级系统安全性指标分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(1): 10-14.
- [5] 张天, 潘天峰, 张蓉. 极值理论在飞机操纵系统安全性评估中的应用[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(3): 11-14.
- [6] 张磊, 向德全, 胥杰. 军用信息系统安全效能灰色评估模型和算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(1): 77-80.
- [7] 何宇廷. 飞机安全服役包线的建立[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(2): 1-5.

(编辑: 徐敏)