

贝叶斯网络在组织因素对系统可靠性影响中的应用

余童兰,张 力*

(南华大学 计算机学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:介绍了核电站系统在运行过程中的组织因素对系统可靠性的影响以及贝叶斯网络的理论基础,以贝叶斯概率和贝叶斯网络基本理论为基础建立了相应贝叶斯网络模型,并对该模型展开了进一步分析与解释.

关键词:组织因素;贝叶斯网络;可靠性分析

中图分类号:TB114.3 **文献标识码:**A

Applying Bayesian Network to Study Organizational Factors Influencing System Reliability

YU Tong-lan, ZHANG Li*

(College of Computer Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The paper first introduces the concept of organizational factors in the socio-technical system and the basic theory of Bayesian Network, and then develops a Bayesian Network model for it. Finally, a deep analysis has been carried out over the model to explain the quantitative and qualitative description.

Key words: organizational factors; Bayesian Network; reliability analysis

0 引言

传统的人因可靠性分析方法是从个体的角度进行研究,研究个体的人误类型、形式以及个体各种行为的可靠性.随着对人因因素的更深入研究,引发了一个新的热点,即组织因素管理对复杂系统的影响.已经有报告指出,事故的引发并不能归咎于单独的技术失误或个体人因失误,而应归咎于受强烈竞争环境各种压力影响下的系统性的组织行

为^[1].英国心理学家 Reason 最早在自己的著作《人误》一书中首次提出了“潜在错误”的概念. Reason 认为,任何一个复杂的社会技术系统中任何技术失效或人误只是事故的必要而非充分条件,只有多种人误或技术失效的发生在时间上重合,才可能引发事故.他所指的潜在因素特指组织管理因素^[2].德国心理学家 Wilpert 和挪威学者 Qvale 主编的《危险工作系统的可靠性与安全》中,汇集了许多著名心理学家对潜在错误因素的观点.总结这些专家的

收稿日期:2009-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70573043).

作者简介:余童兰(1976-),湖南岳阳人,南华大学计算机学院讲师.主要研究方向:软件工程.*通讯作者.

研究,典型的组织因素包括:管理系统的缺陷、不充分的培训、不良的安全文化、管理者的错误决策等.国内王二平曾从组织行为学角度探讨了组织失误形成机制,进而分析了组织失误、组织因素对人误的作用^[3].根据世界核营运者协会(WANO)历年报告的人因事故进行深入统计分析,在核电站人因事故中 45% 的事故缘于管理者和操作者的判断失误及操作者的粗心大意;另外 43% 的事故缘于管理者与被管理者之间的缺乏交流及合作者之间的缺乏交流,可见考虑组织管理因素对系统可靠性的影响意义重大.

分析组织因素对可靠性的影响,不仅仅要关注可能存在于社会-技术系统各层次中的最终决定事故的组织管理因素,更要研究他们之间的关联方式和对系统的影响因子.传统的分析方法有故障树、人工神经网络、密度估计、分类、回归和聚类等方法.用故障树模型研究人因事故的原因是常用的方法,但故障树模型一旦建造好就不容易更改,不容易接受和处理新信息并难于将与事故无关但可以用以分析事故原因的相关信息考虑到人因事件分析过程之中.人工神经网络方法学习速度很慢,网络训练失败的可能性较大.由于组织因素本身的不确定性、指标体系的复杂性,文章提出了一种基于贝叶斯网络的组织管理因素分析模型.该模型以 WANO 事件报告为原始数据,构造并表达各个组织因素之间的关联性,有助于及早发现潜在的人因事故,从而及时采取措施减少事故发生可能性.

1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是一个有向无环图,由代表变量的节点及连接这些节点的有向边构成.节点代表随机变量,节点间的有向边代表了节点间的相互关联关系.图 1 描述了一个简单的贝叶斯网络.有弧直接射入的节点成为子节点,而射出该弧的节点成为父节点(例如在图 1 中 X_1 射出一条弧到 X_2 ,因此 X_1 为 X_2 的父节点),没有任何弧射入的节点成为根节点.(图 1 中的 X_3).贝叶斯网蕴涵了条件独立性假设,可以用条件概率表(conditional probabilities table, CPT)来描述节点与节点之间关联,表达了节点同其父节点的相关关系——条件概率.没有任何父节点的节点概率为其先验概率.表 1 为图 1 的 CPT.

有了节点及其相互关系与条件概率表后,贝叶斯网络可以表达网络中所有节点的联合概率.

贝叶斯网络使变量的联合概率求解大大简化.假设所有变量都是布尔值变量 True 或 False 时,对于 k 个变量的情况,应用普通的链规则求联合概率需要指定 2^k 个独立的联合概率.而应用贝叶斯网络使变量的联合概率求解大大简化,不超过 k^2 ,当 k 值增大时,需要指定的概率显著减少,这种减少使得复杂问题变得更容易处理.在可靠性分析中,可以将组织管理因素作为节点来构造贝叶斯网络,预测组织管理因素对于系统可靠性的影响.

表 1 图 1 的条件概率表

Table 1 Conditional probabilities table of figure 1

X_1	状态 1		状态 2	
X_3	状态 1	状态 2	状态 1	状态 2
X_n 状态 1	0.9	0.2	0.5	0.3
X_n 状态 2	0.1	0.8	0.5	0.7

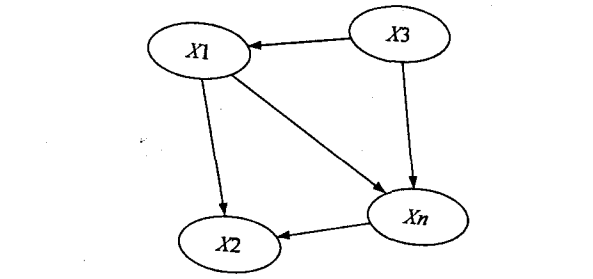


图 1 一个简单的贝叶斯网络

Fig. 1 A simple bayesian network

2 组织因素贝叶斯网络的构造

2.1 组织因素

在复杂社会技术系统中,组织失误产生过程的事件序列中有多个参与者:管理者、被管理者、操作章程等,显性人因事故只不过是组织和系统潜在失误的复杂长链中的最后体现.分析 WANO 提供的核电事故报告得出:组织管理缺陷、与规程有关的缺陷、培训不足、人员之间交流不足以及缺乏监督检查、组织决策失误、组织文化不良与人员操作失误之间存在很高的置信度,是导致操作员失误的重要根本原因.根据专家研究与报告^[4],文章选取组织文化、组织结构、规程、培训、组织沟通以及监督检查、组织决策七个组织因素进行分析,七个影响因素的定义见表 2.

表 2 组织因素及其定义
Table 2 Definition of organizational factors

组织因素	定义
组织文化	长期发展形成的组织成员共有的标准、信念、价值体系、行为规范和模式
组织结构	组织内部分工与协调的基本形式
规程	员工遵守的规章制度,专业人员使用的各种说明书、规程及指导性文字
培训	对员工在技能和知识上的训练与学习,目的是使员工能够安全有效工作
组织沟通	上层与下层,层内人与人之间的信息交流和协同
监督检查	对影响组织目标实现的组织和员工行为的监督和反馈指导
组织决策	组织对未来实践活动的理想、意图、目标、方向 and 为达到理想、意图、目标和方向的原则、方法和手段所作的决定.

2.2 组织因素贝叶斯网络构造过程

为了构造组织因素贝叶斯网络模型来分析各因素对系统可靠性的影响,必须明确定义每一个节点和它所有可能的状态,对每一个节点需要为每一种可能的状态确定一个条件概率.首先要综合考虑构成贝叶斯网络的各个节点.可以把所有节点分为两大类:人因事故节点以及导致人因事故发生的组织因素节点.根据现有数据样本,计算各节点的条件概率.

根据专家经验,本文选取组织文化、组织结构、规程、培训、组织沟通以及监督检查、组织决策七个组织因素作为事故引发节点,选取人因事故和严重损失两个结点作为事故节点.然后对人因事件数据库中的组织因素进行离散化,即将各因素划分为若干状态,每个状态对应一个离散值.大量人因事件数据离散化后得到部分样本属性如

下:
组织文化 (X_1): good (1), average (2), poor (3);
组织结构 (X_2): good (1), average (2), poor (3);
规程 (X_3): good (1), average (2), poor (3);
培训 (X_4): good (1), average (2), poor (3);
组织沟通 (X_5): good (1), average (2), poor (3);
监督检查 (X_6): good (1), average (2), poor (3)
组织决策 (X_7): right (1), wrong (2)
人因事故 (X_8): yes (1), no (2);
严重损失 (X_9): yes (1), no (2);
部分样本数据见表 3.

表 3 组织因素部分样本数据
Fig. 3 Samples of organizational factors data

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
1	1	2	2	1	2	1	2	2
2	2	1	3	2	1	2	2	2
1	1	1	2	1	2	2	2	2
3	3	2	2	1	3	2	1	1
2	3	2	1	2	3	1	1	2
2	3	3	3	2	3	2	1	1

确定好与建立网络模型有关的变量及其解释后,可以根据专家知识建立一个表示条件独立断言的贝叶斯网络结构图.构造贝叶斯网络首先要找出最符合原始数据的定性网络图关系.为了确定贝叶斯网络的结构,需要预先将变量 $X_1, X_2, \dots, X_9$ 按照拓扑次序排序并确定每一个变量 X_i 的父结点集及为每个状态指派局部概率分布. K_2

算法^[7]中 Z 为样本数为 n 个的变量集合, Z 中的一个变量 X_i 具有 r_i 个可能状态值.令 B_s 表示一个包含 Z 中变量的网络结构, B_p 条件独立. B_s 中的变量 X_i 都有一组父结点,用 Π_i 来表示. $g(I, \Pi_i)$ 为数据变量 X_i 对联合概率密度的贡献值,各个 $g(I, \Pi_i)$ 独立计算.通过对每一个变量 X_i 逐个找出能使 $g(I, \Pi_i)$ 值增大的其他变量 X_i ,直到

$g(I, \Pi_i)$ 的值不再增加为止,这些 X_i 就是 X_i 的父结点,从而获得贝叶斯网络结构.

构造贝叶斯网络的 K2 算法描述如下:

输入: n 个给定次序关系得结点;父结点具有上界 u ;包含若干样本的数据库 Database.

输出:对于每个结点,输出其父结点.

处理:

for($i = 1; i \leq n; i++$)

{ $\Pi_i = 0$;

$Pold = g(I, \Pi_i)$;

$Go = TRUE$;

while($Go \&\& |\Pi_i| < u$)

```
{ let Z be the node in Pred( $X_i$ ) -  $\Pi_i$ 
   $Pnew = calculate( g(I, \Pi_i) \text{ of } Pred$ 
    ( $X_i$ ));
  if ( $Pnew > Pold$ )
    {  $Pold = Pnew$ ;  $\Pi_i = \Pi_i \cup \{ Pred(X_i) \}$ ;
    }
  else  $go = FALSE$ ;
}
```

Print(X_i , "s Parents:", Π_i);

应用上述组织因素数据样本,采用该算法得到的贝叶斯网络结构如图 2.

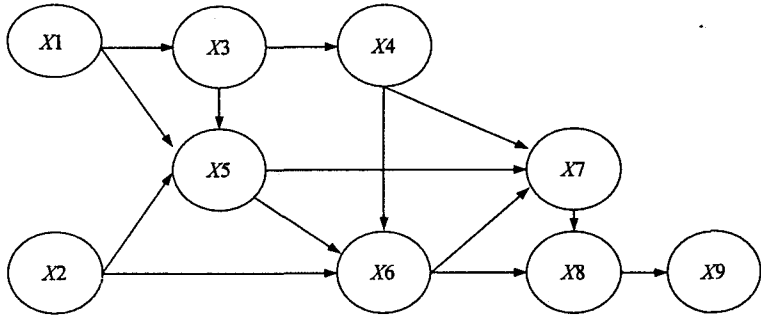


图 2 9 个节点的组织管理因素贝叶斯网络图
Fig. 2 A Bayesian network with nine node of organizational factors

2.3 组织因素贝叶斯网络的模型解释

贝叶斯网络构造的目的是对包含定性知识和定量知识进行结构上的描述,为下一步推理提供依据.

2.3.1 定性描述

定性的概率依赖关系通常可以简单地从贝叶斯网络模型的拓扑结构中获取.在贝叶斯网络模型中的有向边实际上就指明着其起点和终点之间存在有直接的依赖关系.可以采用如下形式对它进行描述: $\langle \text{结点} \rangle$ depends directly on $\langle \text{父结点 } 1 \rangle$ and...and $\langle \text{父结点 } n \rangle$

组织管理因素贝叶斯网络中,部分依赖关系描述样例如下:

$\langle (X3) \rangle$ depends directly on $\langle (X1) \rangle$;
 $\langle (X4) \rangle$ depends directly on $\langle (X3) \rangle$;
 $\langle (X5) \rangle$ depends directly on $\langle (X1) \rangle$ and $\langle X2 \rangle$ and $\langle X3 \rangle$;

2.3.2 定量描述

为了进行准确的定量分析,需要概率依赖关系的定量描述.贝叶斯网络模型中,各节点处的条件概率表反映了概率依赖关系的程度,根据节点

是否存在父节点,相应地存在两类定量知识:先验概率,条件概率.对于不存在父节点的节点如 $X1$ 和 $X2$,其条件概率表实际为其先验概率.具体的先验概率值可以查表得到.对于有父节点的节点而言,它受父节点的影响反映在条件概率表中,可以采用如下形式对它进行描述:

when $\langle \text{父结点 } 1 \rangle$ is $\langle \text{父结点 } 1 \text{ 状态} \rangle$, and ...and $\langle \text{父结点 } n \rangle$ is $\langle \text{父结点 } n \text{ 状态} \rangle$, $\langle \text{结点} \rangle$ is $\langle \text{概率语言值} \rangle$ to be $\langle \text{结点状态} \rangle$.

在组织因素贝叶斯网络中,描述样例如下:

$\langle (X1) \rangle$ is $\langle \text{概率语言值} \rangle$ to be $\langle \text{某状态值 of } X2 \rangle$;

when $\langle \text{组织文化}(X1) \rangle$ is $\langle \text{某状态值 of } X1 \rangle$ and $\langle \text{组织结构}(X2) \rangle$ is $\langle \text{某状态值 of } X2 \rangle$ and $\langle \text{规程}(X3) \rangle$ is $\langle \text{某状态值 of } X3 \rangle$, $\langle \text{组织沟通}(X5) \rangle$ is $\langle \text{概率语言值} \rangle$ to be $\langle \text{某状态值 of } X5 \rangle$.

3 结论

应用贝叶斯网络研究组织管理因素具备以下优势:

1) 贝叶斯网络方法有坚实的论基础. 贝叶斯网络以概率推理为基础, 条件独立性可以有力表达组织管理因素之间的关联关系, 推理结果说服力强;

2) 贝叶斯网络能够处理不完备数据集. 对于一般的指导性学习方法而言, 必须知道所有可能的变量输入, 如果缺少其中之一就会对建立的模型产生偏差. 应用贝叶斯网络的概率推理算法, 对已有的信息要求低, 可以进行信息不完全、不确定情况下的推理;

3) 贝叶斯网络具有很强的学习能力, 适合处理数据不断变化的系统. 而贝叶斯网络通过实践积累可以随时进行学习改进网络结构和参数, 贝叶斯网络接受了新信息后立即更新网络中的概率信息. 当专家无法给出全部变量时贝叶斯网络可以根据新的样本重新学习, 调整所得到的贝叶斯网络结构和条件概率表, 计算并更新各节点状态, 使得到的组织因素对系统可靠性的影响参数更加准确.

贝叶斯网络的研究还存在很大的探索空间, 要使贝叶斯网络广泛地应用可靠性分析领域, 还需解决以下技术问题:

- 1) 贝叶斯网络模型的概率获取方法;
- 2) 基于贝叶斯网络的可靠性分析软件平台;
- 3) 结合贝叶斯网络与故障树等其它分析方法的综合技术.

参考文献:

- [1] Organizational factors influencing human performance in nuclear power plant [C]//Report of a Technical Committee meeting, Switzerland, 1995, IAEA: 78 - 102.
- [2] Reason J. A systems approach to organizational error [J]. *Ergonomics*, 1995, 38(8): 1708 - 1721.
- [3] 王二平. 人误研究的组织定向[J]. *人类功效学*, 1999, 5(1): 44 - 47.
- [4] Haber S B. Influence of organizational factors on performance reliability [C]//Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1991: 67 - 74.
- [5] Oien K. A framework for the establishment of organizational risk indicators [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 7: 147 - 167.
- [6] 王 军, 周伟达. 贝叶斯网络的研究与进展[J]. *电子科技*, 1999, 11(8): 6 - 7.
- [7] Madsen A L, Lang M, Kjaerulff U B, et al. The Hugin Tool for learning Bayesian networks [C]//Proceedings Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty 7th European Conference. Berlin, Germany: Springer - Verlag, 2003: 594 - 605.
- [8] Cooper G, Herskovits E. A Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data [J]. *Machine Learning*, 1992(9): 309.
- [9] Ha J S, Seong P H. A method for risk - informed safety significance categorization using the analytic hierarchy process and Bayesian belief networks, Department of Nuclear and Quantum Engineering [J]. *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, 2003, 373(1): 305 - 701.
- [10] Boudali H, Dugan J B. A discrete - time Bayesian network reliability modelling and analysis framework [J]. *Reliab Eng Syst Saf*, 2004, 87: 37 - 49.
- [11] Mohaghegh Z, Mosleh A. A causal modeling framework for assessing organizational factors and their impacts on safety performance [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management. New Orleans, Louisiana, 2006: 04 - 14.