

# 基于贝叶斯网络的电力企业安全生产风险管控系统<sup>①</sup>

章伟林, 张学东

(国家电网浙江省电力公司, 杭州 310007)

**摘要:** 分析了建立电力企业安全生产风险管控系统的必要性和设计框架, 并提出了基于贝叶斯网络的动态风险评估模型. 通过对风险因素的识别和评估, 构建了贝叶斯网络结构和参数, 在此基础上对安全生产风险进行了风险评估、风险诊断. 最后, 依据分析得到的结果进行风险控制. 该系统可以满足电力企业安全生产风险管控的需求.

**关键词:** 贝叶斯网络; 安全生产; 风险评估; 风险管控

## Safety Production Risk Management and Control System of Electricity Production Enterprise Based on Bayesian Networks

ZHANG Wei-Lin, ZHANG Xue-Dong

(Zhejiang Electric Power Co. Ltd., State Grid, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** The necessity of constructing risk management and control system for safety production in electricity production enterprise is analyzed, and the design framework of the system is introduced. The dynamic risk management model based on Bayesian network is put forward. Bayesian network structure and parameters are also built after risk factors identification and evaluation. Based on these, the risk assessment and risk diagnostic for safety production are carried out. Finally, the risk is controlled in accordance with the result. This system could meet the needs of safety supervision and management in electricity production enterprise.

**Key words:** Bayesian network; safety production; risk assessment; risk control

随着经济的高速发展, 工业用电、居民用电不断攀升. 用电需求量迫使电网的不断升级改造, 电网线路更为复杂, 现场作业规模不断加大, 导致人身伤亡、电缆着火、电气误操作、风电大面积脱网、大型变压器损坏、开关设备事故、输电线路事故、电力电缆损坏、继电保护等安全生产风险也不断提高.

现有安全风险管控体系在智能化、自适应方面已无法满足实际工作的要求, 主要体现在以下几方面:

(1) 风险评估标准缺乏有效的升级修订机制. 当前的风险评估标准根据后评估结果和各单位反馈的情况, 人工定期对风险评估标准进行更新修订. 效率低下.

(2) 风险评估智能化不足, 不仅工作量大, 且在较大程度上影响了风险评估的科学性和准确性. 现有的

风险评估主要由专业人员对照评估标准进行人工判定, 评估人员往往需要查阅大量的历史数据方能进行准确的风险评估, 工作量较大.

(3) 控制措施针对性不足. 控制措施执行是对现场作业进行风险管控的具体抓手, 当前控制措施主要由基层单位在完成风险评估后人工制定, 因此控制措施的针对性主要依赖于制定人员的经验, 使作业现场管控的成效大打折扣.

因此, 企业迫切需要建立一种全新的安全生产管控手段, 解决管理瓶颈, 控制风险隐患, 以科技创新推动安全管理生产水平提升, 提高风险评估的科学性和准确性, 减轻基层单位的负担, 真正发挥风险管控对现场作业的指导作用, 确保作业安全.

目前, 在各类行业中的风险评估所采用传统常用

<sup>①</sup> 基金项目:浙江省电力公司科技计划(5211UZ15007V)

收稿时间:2016-07-04;收到修改稿时间:2016-09-01 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005696]

方法有层次分析法(AHP)<sup>[1]</sup>、故障树法(FTA)<sup>[2]</sup>、“海因里希”法则<sup>[3]</sup>。传统的系统安全分析方法在风险评估中存在一定局限性<sup>[4]</sup>，譬如 FTA 假设事件是二值的、相互独立的，不能很好地解决复杂系统的建模问题，计算精确度低并且浪费时间<sup>[5]</sup>。

贝叶斯网络是人工智能、概率理论、图论、决策分析相结合的产物，是目前不确定知识表达和推理领域中最有效的理论模型之一<sup>[6]</sup>。近几年来，贝叶斯方法广泛应用于各个领域。李天纵<sup>[7]</sup>、任雪利<sup>[8]</sup>等将贝叶斯网络应用于软件项目风险管理和风险评估中；王昕<sup>[9]</sup>将贝叶斯网络用于大型建设工程项目风险评估；陆莹<sup>[10]</sup>将贝叶斯网络应用于地铁运营安全风险预测；郭发蔚<sup>[11]</sup>将贝叶斯网络应用于隧道施工风险综合评估等。用贝叶斯网络能很好地弥补传统安全性评估方法的不足<sup>[12]</sup>。但目前将贝叶斯网络应用于电力系统智能化安全生产风险管控系统还未见报道。

本文将贝叶斯网络方法应用于电力系统智能化安全生产风险管控，实现电力系统安全生产风险评估。

## 1 系统概述

电力系统智能化安全生产风险管控信息系统总体架构图如图 1 所示。在技术体系架构设计上，信息系统根据面向服务(SOA)的核心构架思想，采用组件化和面向对象的开发模式和基于 J2EE、B/S 结构的技术体系架构，数据库为 MongoDB，采用以业务为驱动的自顶向下的顶层框架设计方法，贯彻以新建和整合相结合的系统建设方式进行总体设计。系统包括 OS 硬件层、数据层、传输层、应用与服务层，其中又以应用与服务层中的风险管控信息系统为核心。

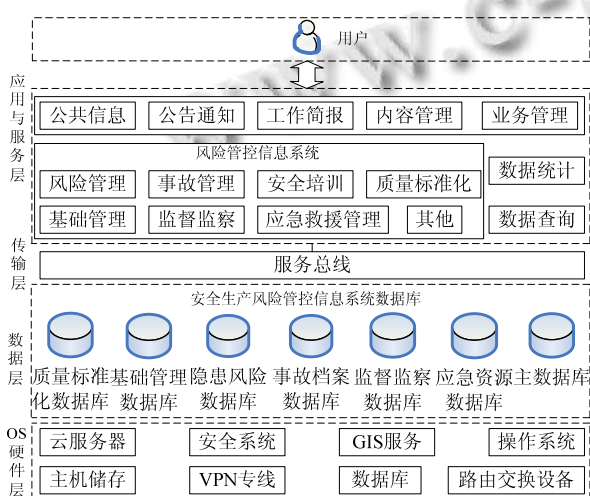


图 1 安全生产风险管控信息系统总体架构图

风险管控信息系统主要包括风险管理、事故管理、基础管理、应急救援管理、监督检查、质量标准化管理和安全培训等子系统。

风险管理子系统的主要功能是利用基于贝叶斯网络模型的软件算法对危险源进行辨识的基础上进行风险评估、衡量风险发生的概率以及其可能造成的损失，最终确定风险管理标准和措施。

事故管理子系统实现事故通报、责任追究以及事故报表等功能，实现对检查出的隐患信息进行上报和汇总。

质量标准化子系统主要包括标准库查询、检查表生成、检查结果录入、评比和汇总查询。

监督检查子系统负责管理安全活动的制定、检查活动后检查通报的发布以及管理单位对被检查问题的整改落实情况和对检查结果的最后总结。

应急救援管理子系统主要是针对突发和具有破坏力的紧急事件，主要包括应急救援平台、预案和演练。

## 2 贝叶斯网络的基本理论

### 2.1 贝叶斯定理

贝叶斯定理是概率统计中的应用所观察到的现象对先验概率进行修正的标准方法，即当分析样本大到趋近总体数时，样本中事件发生的概率将接近于总体中事件发生的概率<sup>[13]</sup>。

先验概率和后验概率这两个概念是相对于某组证据而言。设  $H$  和  $E$  为两个随机变量， $H = h$  为某一假设， $E = e$  为一组证据，在考虑证据  $E = e$  之前，对事件  $H = h$  的概率估计  $P(H = h)$  称为先验概率，而在考虑证据之后，对  $H = h$  的概率估计  $P(H = h | E = e)$  称为后验概率，贝叶斯公式描述了先验概率和后验概率之间的关系<sup>[13]</sup>：

$$P(H = h | E = e) = \frac{P(H = h)P(E = e | H = h)}{P(E = e)} \quad (1)$$

### 2.2 贝叶斯网络概述

贝叶斯网络<sup>[14]</sup>是一种有向图模型，在贝叶斯网络中，每一个原因变量和结果变量都由节点表示，并用概率表示变量之间的关系强弱，每个节点都有自己的节点概率分布以表征父节点对子节点产生的影响。通过贝叶斯网络可以汇总各种数据并对这些数据进行综合推理。总的来说，贝叶斯网络是一个具有如下特征的图形结构<sup>[15]</sup>：

- (1) 由节点和连线组成的有向无环图；

(2) 网络节点代表随机变量, 节点间的有向连线表示随机变量之间的条件依赖关系. 指向节点 A 的所有节点称为节点 A 的父节点, 而节点 A 称为其父节点的子节点;

(3) 节点条件概率表表征该节点相对于其父节点的所有可能的条件概率.

### 3 基于贝叶斯网络的风险管理过程

贝叶斯网络通过实践积累可对网络结构参数进行更新改进, 本文用贝叶斯网络实现电力企业安全生产风险管控应用过程如图 2 所示.

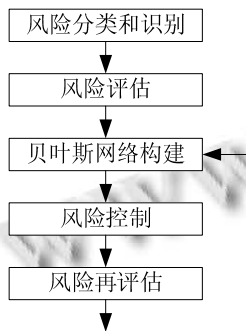


图 2 基于贝叶斯网络的安全生产风险管控过程图

#### 步骤 1: 风险分类和识别

此阶段, 对安全生产有风险因素进行归类分级, 根据历史数据、专家经验, 调查分析等列出重要的风险因素.

#### 步骤 2: 风险评估

此阶段, 步骤 1 的每项风险因素进行定级, 确定风险等级数据集便于贝叶斯网络的分析. 风险等级可由式(2)表示:

$$Risk = (DL) \times (PO) \tag{2}$$

式中, Risk 为风险等级, DL 为损失程序, PO 为发生概率. 风险等级数据集通过图 3 的风险等级矩阵进行规范处理后用于贝叶斯网络.

低风险R1, 高风险R3

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
|    | R2 | R2 | R3 | R3 | R3 |
| 程度 | R2 | R2 | R2 | R3 | R3 |
| 失报 | R1 | R2 | R2 | R2 | R3 |
|    | R1 | R1 | R2 | R2 | R2 |
|    | R1 | R1 | R1 | R2 | R2 |
|    |    |    |    |    |    |

发生可能性

图 3 风险等级矩阵图

#### 步骤 3: 贝叶斯网络构建

贝叶斯网络通过结构性学习进行构建, 并用来检验风险因素之间的关系. 每个风险因素的可能性可通过参数学习进行计算.

设安全生产指标为  $e_n (n=1,2,3\cdots)$ , 风险因素 H 发生的概率为  $P_n$ , 则有  $P(H|e_1=P1), P(H|e_2=P2), \dots, P(H|e_n=Pn)$ , 则该风险因素 H 的发生概率为  $P(H|a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 由于各安全度指标之间相互独立, 则有:

$$\begin{aligned}
 P(H|a_1, a_2, \dots, a_n) &= \frac{P(a_1, a_2, \dots, a_n, H)}{P(a_1, a_2, \dots, a_n)} \\
 &= \frac{P(a_1, a_2, \dots, a_n | H)P(H)}{P(a_1)P(a_2) \cdots P(a_n)} \\
 &= \frac{P(a_1 | H)P(a_2 | H) \cdots P(a_n | H)P(H)}{P(a_1)P(a_2) \cdots P(a_n)} \\
 &= \frac{P(H|a_1)P(a_1)P(H|a_2)P(a_2) \cdots P(H|a_n)P(a_n)P(H)}{P(a_1)P(a_2) \cdots P(a_n)P(H)^n} \\
 &= \frac{P(H|a_1)P(H|a_2) \cdots P(H|a_n)}{P(H)^{n-1}} \\
 &= \frac{P_1 P_2 \cdots P_n}{P(H)^{n-1}}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

其中, P(H)为 H 的风险发生概率.

通过调查问卷、历史数据、专家讨论, 在考虑安全度指标体系的情况下, 确定贝叶斯网络中所有证据节点的概率. 结合公式(3), 得到安全生产风险概率.

#### 步骤 4: 风险控制

影响安全生产的风险因素通过贝叶斯网络敏感性分析进行评估, 对影响安全生产的风险因素, 采取措施进行控制.

#### 步骤 5: 风险再评估

步骤 4 中需要控制的风险因素确定后, 有些风险因素的改变会导致电力企业安全生产风险的变化, 因此需要更新贝叶斯网络结构参数, 并进行风险再评估.

## 4 安全生产风险管控应用

### 4.1 风险分类和识别

结合电力企业安全生产的历史数据和参考文献, 分析在安全生产过程中可能存在的风险因素, 通过专家调查法确定可能的风险事件类别并对导致各风险事件的风险因素进行分类, 确定风险因素, 最终得到风险识别的结果如下:

管理的因素: 对部门安全管理能力水平、部门安

全生产规范及职责、行业安全生产标准以及规范等相关知识、劳动管理失误、违章指挥、无章可循、交叉作业管理混乱,均有可能导致的人身事故、电网事故、设备事故或障碍;

人的因素:作业人员的不安全行为,如违章操作、违反劳动纪律、专业知识(安全生产规章制度、操作规程、事故应急及逃生知识、专业应急预案内容)掌握程度、员工身体状态、员工心理素质、工作负荷、工作态度不认真等,均有可能导致的人身事故、电网事故、设备事故或障碍;

环境的因素:作业任务种类和等级(如 10KV 配网带电作业、电房变压器抢修、台架式变压器更换、带电核相等)、电压等级、周围近距离的带电设备、作业空间、风雨冰雪天气、温湿度、环境噪声等,均有可能导致的人身事故、电网事故、设备事故或障碍;

物的因素:严重缺陷的、不合格的安全工器具、施工机具、安全防护用品、仪器仪表等,均有可能导致的人身事故、电网事故、设备事故或障碍。

#### 4.2 风险评估

在风险分类识别的基础上还需对风险因素进行分析,明确风险因素发生的可能性和损失严重程度,结合式和图 5 综合确定主要风险因素和风险等级。根据得出的所占比例最高(R3)的因素,经专家讨论最终确定主要风险因素,得到电力企业安全生产的主要风险因素如表 1。

表 1 电力企业安全生产的主要风险因素

| 风险因素类别 | 编号 | 主要风险因素         |
|--------|----|----------------|
| 管理     | A1 | 管理能力水平         |
|        | A2 | 安全生产标准、职责      |
|        | 人  | B1             |
| 人      | B2 | 作业人员的不安全行为     |
|        | B3 | 员工身体状态、工作负荷    |
|        | 环境 | C1             |
| 环境     | C2 | 作业空间           |
|        | C3 | 天气状况           |
|        | C4 | 温湿度            |
|        | C5 | 环境噪声           |
|        | 物  | D1             |
|        | D2 | 施工机具、仪器仪表质量及精度 |

#### 4.3 贝叶斯网络构建与计算

将上述电力企业安全生产的主要风险因素定为贝叶斯网络基本节点,通过专家讨论确定各节点间的因

果关系,由贝叶斯网络分析软件 GeNIe Ver2.0 构建模型,如图 4 所示。然后统计部分主要风险因素(只有子节点没有父节点的风险因素)处于 R1, R2, R3 的百分比,将得到的风险等级数据输入贝叶斯网络模型中,依据贝叶斯网络模型中节点间的逻辑关系,经过专家讨论确定各节点的条件概率分布,利用贝叶斯网络参数学习功能进行其他节点概率的计算,得出每个节点的边缘概率分布,完成对各风险状态的评估,经过专家反复修正,最终确定贝叶斯网络中的各参数。

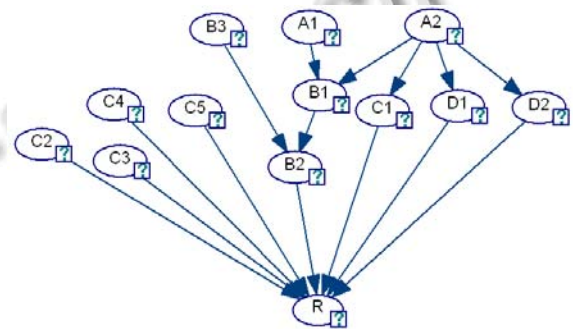


图 4 叶斯网络结构图

对电力企业安全生产风险进行评估,得到电力企业安全生产风险处于危险状态(R)的概率为 61%,如图 5 所示。

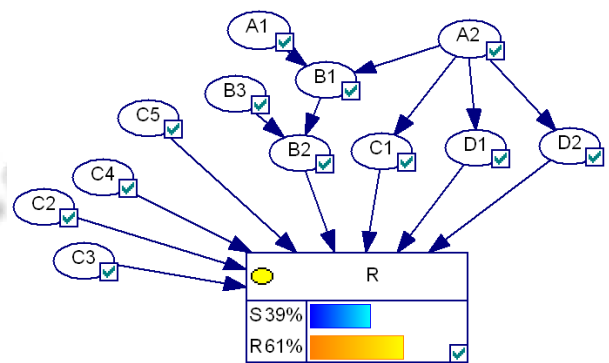


图 5 叶斯网络结构分析结果

#### 4.4 风险再评估

贝叶斯网络具有自动更新的功能,电力企业安全生产风险因素发生变化时,需要及时更新整个网络结构参数,进行风险再评估,使得网络中变量的概率分布发生相应的改变。

例如,在环境噪声良好的地方进行安全作业, C5 因素 R 变为 0,输入证据后,得到更新后的变量的边缘概率,最终电力企业安全生产风险处于危险状态(R)的

概率为 59%，如图 6 所示。

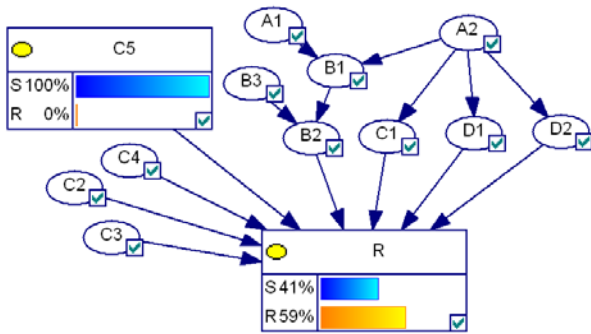


图 6 C5 因素 R 为 0 时的叶斯网络结构分析结果

### 4.5 系统软件实现

安全生产风险管控信息系统所用的贝叶斯网络数学模型采用 GeNIe 软件辅助实现。GeNIe 软件中具备 SMILE 接口。SMILE 库函数是关于决策理论模型和图形概率、贝叶斯网络等影响图和结构方程模型的接口，它允许创建、编辑、保存和加载图形化模型，并把它用在概率推理和决策的不确定性中<sup>[16]</sup>。基于 SMILE 接口的输入与输出流程图如图 7 所示。将参数值，即第一层次风险因素概率输入到 SMILE 接口通过 GeNIe 软件中的模型进行仿真，将输出结果保存为 xdsl 文件。

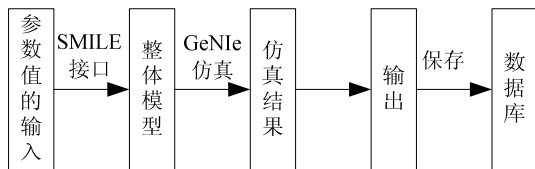


图 7 输入输出流程图



图 8 系统软件实物图

系统软件界面如图 8 所示。在风险预测界面，输入各相关风险因素级数后，点击计算，程序会载入用

GeNIe 软件建立的贝叶斯网络模型的 xdsl 文件，然后调用 SMILE 的应用程序接口将填入的概率代入模型中进行推理计算，并将计算结果显示出来。

### 5 结语

本文运用贝叶斯网络模型实现了对电力企业安全生产风险管控，并根据实际情况可对模型参数进行更新。为风险评估标准提供了可量化数据支撑和动态自适应能力，提高风险评估标准的科学性和适应性，减轻基层负担，提升风险评估对基层单位安全生产的指导作用，发挥风险管控对现场作业的指导作用，确保现场作业安全。本软件系统目前已在本单位进行了实际应用，反应效果良好。

### 参考文献

- 1 You DH, Chen QQ, Yin XG. A study of electrical security risk assessment system based on electricity regulation. Energy Policy, 2011, 39(4): 2062–2074.
- 2 Yan FQ, Wang Y, Yin XG. Research on the security risk assessment system for regional complex power grid. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha. 2015. 1–4.
- 3 王开碧, 申晓留, 李哲, 等. 电力企业安全生产风险管理方法的研究. 黑龙江电力, 2012, 34(4): 228–291.
- 4 姚锡文, 许开立, 王贝贝, 等. 石化装置火灾爆炸贝叶斯网络与防护层集成分析. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(3): 95–100.
- 5 车玉龙, 苏宏升. 基于贝叶斯网络的列控系统安全风险预测方法. 计算机工程与应用, 2013, 49(24): 238–242.
- 6 李晓东, 孙悦. 2010 年我国房屋市政工程生产安全事故分析. 土木工程学报, 2011, 11(S1): 225–229.
- 7 李天纵, 王强. 一种基于贝叶斯网络的软件项目风险管理方法. 计算机系统应用, 2011, 20(2): 226–229.
- 8 任雪利. 粗糙集和贝叶斯网络在软件风险评估中的应用. 计算机系统应用, 2010, 19(5): 202–204.
- 9 王昕, 徐友全, 高妍方. 基于贝叶斯网络的大型建设工程项目风险评估. 工程管理报, 2011, (5): 544–547.
- 10 陆莹, 李启明, 周志鹏. 基于模糊贝叶斯网络的地铁运营安全风险预测. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(5): 1110–1114.

- 11 郭发蔚,王宏辉.基于 Bayesian 隧道施工风险模糊综合评估方法.铁道科学与工程学报,2016,13(2):401-406.
- 12 Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(8): 925-932.
- 13 Jones B, Jenkinson Z, Yang J, Wang. The use of Bayesian network modeling for maintenance planning in a manufacturing industry. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(3): 267-277.
- 14 Greenberg R, Cook SC, Harris D. A civil aviation safety assessment model using a Bayesian belief network (BBN). The Aeronautical Journal, 2005, 109(1101): 557-568.
- 15 李典庆,鄢丽丽,邵东国.基于贝叶斯网络的土石坝可靠性分析.武汉大学学报(工学版),2007,40(6):24-29.
- 16 葛运飞.GeNIe的扩展研究[硕士学位论文].昆明:云南大学, 2012.

WWW.C-S-A.ORG.CN

WWW.C-S-A.ORG.CN