

基于贝叶斯网络的核电厂安全系统可靠性分析

顾健¹, 薛峻峰¹, 彭建平¹, 王志强¹, 宫海光², 佟立丽²

1. 中核集团福建福清核电有限公司, 福建福清 350318
2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 针对核电厂改进的辅助给水系统(ASG), 研究了基于贝叶斯网络的系统安全评价方法。通过故障模式与影响分析构建 ASG 系统可靠性框图, 根据可靠性框图与贝叶斯网络的映射关系, 建立 ASG 系统贝叶斯网络, 利用网络推理计算事件发生概率, 对系统进行了可靠性分析。研究表明, 该方法通过贝叶斯网络的正向推理、反向推理和双向推理, 能够计算任意节点事件的发生概率, 表征设备多态失效模式和获得更多评估信息, 与传统的故障树方法相比, 具有更强的分析能力和更接近实际, 适用于核电厂安全系统的可靠性评价, 且具有一定的优越性。

关键词 核电厂; 安全系统; 可靠性分析; 贝叶斯网络方法; 辅助给水系统

中图分类号 TL364.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.33.008

Reliability Analysis of Safety System in Nuclear Power Plant Based on Bayesian Network

GU Jian¹, XUE Junfeng¹, PENG Jianping¹, WANG Zhiqiang¹, GONG Haiguang², TONG Lili²

1. CNNC Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing 350318, Fujian Province, China
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract With respect to the improved Auxiliary Feedwater System (ASG) of Nuclear Power Plant (NPP), this paper studies the safety evaluation method based on the Bayesian Network (BN). The first step is to set up the Reliability Block Diagram (RBD) of ASG through the Failure Mode and the Effect Analysis (FMEA). Then the BN of the ASG is built in terms of the mapping relation between RBD and BN. Based on the network reasoning, the event occurrence probability is calculated and the system reliability is analyzed. It is indicated that through the forward reasoning, the backward reasoning and the bidirectional reasoning, the occurrence probability of an arbitrary node can be calculated and more information about the reliability evaluation can be obtained. Compared with the traditional Fault Tree Analysis(FTA), this method enjoys a more powerful analysis ability and its results are more closely verified by practice. It can be applied to the reliability analysis of the safety system in NPP.

Keywords nuclear power plant; safety system; reliability analysis; bayesian network method; ASG

0 引言

核电厂安全问题历来受到关注, 随着科技水平的提高和研究工作的深入, 需要对现有核电厂安全系统进行改进, 以进一步提高核电厂安全水平。美国核管理委员会(NRC)管理导则^[1,2]要求, 核电厂安全系统的改进需要进行概率安全评价^[3,4]。安全评价通常采用故障树分析方法^[5], 该方法适用于故障机制、故障逻辑关系清晰的系统, 并需要进行简化假设, 如事件状态

的二态性、基本底事件间的相互独立性和故障逻辑关系的确定性等^[6], 而这与实际情况存在一定差异, 例如阀门存在正常、拒开和破裂等多故障状态, 许多故障间的因果关系是不确定性的逻辑关系等。同时, 在获得新的故障样本后, 需要及时分析系统故障和更新分析数据, 而故障树方法在处理类似更新问题所需要的改动工作量大, 难以满足需求。

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是一种以概率论与图

收稿日期: 2013-03-28; 修回日期: 2013-09-24

作者简介: 顾健, 研究员级高级工程师, 研究方向为核电厂的设计、安全质量及信息管理; 佟立丽(通信作者), 博士, 高级工程师, 研究方向为核电厂安全评价方法, 电子信箱: lltong@sjtu.edu.cn

论为基础的推理网络,在1988年由 Pearl^[7]提出,主要研究贝叶斯网络方法在机器学习、数据挖掘及数据统计中的应用。随着贝叶斯网络研究的不断发展和改进,在系统可靠性领域的应用研究不断深入^[8-10]。贝叶斯网络方法可以克服由于研究领域数据样本匮乏,不能通过机器学习取得网络的困难,因此可避免故障树方法的缺陷。本文以福清核电厂改进的辅助给水系统(ASG)为对象,研究基于贝叶斯网络的系统安全评价方法。

1 概述

福清核电厂的1号机组和2号机组在2代加电厂的基础上对其安全系统进行了改进,其中辅助给水系统(ASG)的配置改进是其重要的改进项目之一。ASG系统的改进新增了1台冗余汽动泵,包括相应管线,汽动泵回路中的手动阀及止回阀,蒸汽供应回路中的隔离阀、截止阀及调节阀,以及通往汽轮机002TC的相关管线等^[9]。改进后,每一机组的ASG系统由1个贮水箱、2台电动泵、2台汽动泵,以及对应的气动流量调节阀、限流孔板、各类阀门、测量仪表和连接管道等组成,ASG系统的管道与主给水管道的连接处尽可能靠近蒸汽发生器入口,以保证辅助给水系统管道与主给水系统管道保持最大的独立性。

2 基于BN的可靠性分析方法

2.1 贝叶斯网络推理

贝叶斯网络由网络拓扑结构和局部条件概率表(Conditional Probability Table,CPT)两部分构成。网络拓扑结构由代表变量的节点及连接这些节点的有向弧构成。有向弧由父节点指向子节点,没有任何父节点的节点称为根节点,对应的条件概率称为先验概率,而没有任何子节点的节点称为叶节点,除根节点与叶节点外的所有节点称为中间节点通过定义网络中所有节点、节点间的关联和给定条件概率表,就能表达BN中所有节点的联合概率,可以在已知任意节点状态信息条件下,进行网络推理,计算其他任意节点的故障发生概率。BN正向推理可获得网络中节点的联合概率和任意节点的故障发生概率,其数学描述为:论域中 $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 对应于网络中的 n 个节点,节点状态变量用对应的小写字母 $\{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\}$ 表示,则任意节点变量 X_i 处于状态 x_i^k 的概率计算公式为

$$\begin{aligned}
 P(X_i=x_i^k) &= \sum_{X_j} P(X_1, X_2, \dots, X_i=x_i^k, \dots, X_n) = \\
 &= \sum_{Pa(X_i)} P(X_i=x_i^k, Pa(X_i)) = \\
 &= \sum_{Pa(X_i)} P(X_i=x_i^k | Pa(X_i)) P(Pa(X_i))
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

n 个节点的联合概率 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的计算公式为

$$P(U) = P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | Pa(X_i)) \tag{2}$$

式中, $Pa(X_i)$ 为 X_i 父节点集合,其概率为 $P(Pa(X_i))$; $X \setminus X_i$ 表示除变量 X_i 外其他所有变量构成的集合。对于 $P(Pa(X_i))$,可以计算至已知的根节点的先验概率,随着根节点先验概率的代入,乘式中父节点的数目减少,直到计算出最后的结果 $P(X_i=x_i^k)$ 。任意多个变量的联合概率分布的求解以此类推。

当网络中出现证据时,假定已知 $X_i=x_i^k$,要求计算假设变量 X_j 的信度,即要求计算概率 $P(X_j | X_i=x_i^k)$,则根据条件概率的定义,计算公式为

$$P(X_j | X_i=x_i^k) = \frac{P(X_j, X_i=x_i^k)}{P(X_i=x_i^k)} \tag{3}$$

2.2 ASG系统贝叶斯网络的建立

将ASG系统划分为5个子系统:ASG泵回路子系统,包括电动泵001PO回路及002PO回路、汽动泵003PO回路及004PO回路;ASG供水管线子系统,包括电动泵3列供水管线PV1、PV3、PV5,汽动泵3列供水管线PV2、PV4、PV6,供水管线靠近蒸汽发生器(SG)位置各安装2个逆止阀VD24_27、VD25_28、VD26_29,防止事故下SG的排空;ASG蒸汽大气排放阀子系统,包括大气排放回路GCTA-1、GCTA-2、GCTA-3;ASG供水箱子系统;ASG给水流量调节子系统。通过对各子系统流程图和故障模式与影响分析,构建ASG系统可靠性框图(Reliability Block Diagram,RBD),如图1所示。根据ASG系统可靠性框图向贝叶斯网络转化,建立ASG系统贝叶斯网络(限于篇幅,网络模型节点图省略)。

ASG系统的5个顶事件与贝叶斯网络推理时已知节点证据的对应关系见表1,在进行ASG系统贝叶斯网络推理分析时,只需增加各项事件相应的已知节点证据,即可对ASG系统各项事件下的贝叶斯网络模型进行可靠性分析。

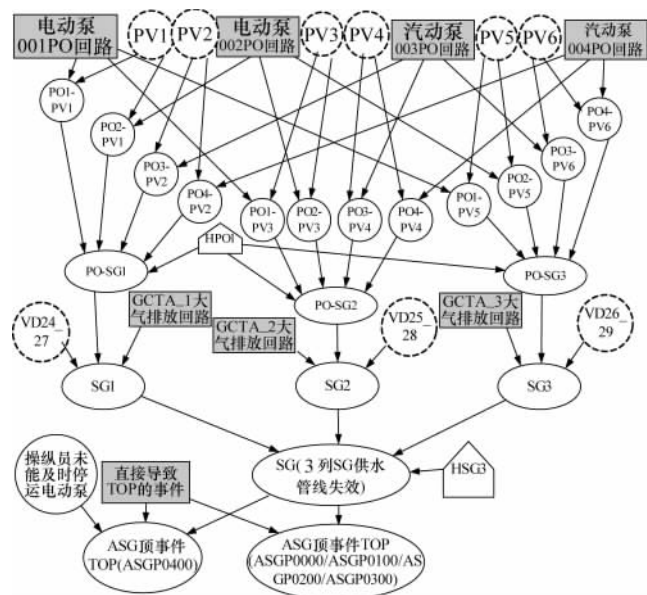


图1 ASG系统的可靠性框图逻辑
Fig.1 RBD of ASG

表 1 功率运行工况下 ASG 系统顶事件定义与已知节点证据的对应关系

Table 1 Mapping relationship between ASG top event definitions and the evidences in the BN inference

顶事件代号	ASG 系统顶事件定义	已知节点证据
ASGP0000	4/4 台 ASG 泵列失效, 或相应的 3/3 台 SG 供水管线失效, 或相应 GCT-A 阀排出失效	HPO1=1, HSG3=1
ASGP0100	4/4 台 ASG 泵管线失效, 或相应的 2/2 台 SG 供水管线失效, 或相应的 GCT-A 阀排出失效	HPO1=1, HSG3=2
ASGP0200	3/4 台 ASG 泵列失效, 或相应的 3/3 台 SG 供水失效, 或相应的 GCT-A 阀排出失效	HPO1=3, HSG3=1
ASGP0300	2/2 台 ASG 汽动泵列失效, 或相应的 3/3 台 SG 供水失效, 或相应的 GCT-A 阀排出失效	HPO1=2, HSG3=1
ASGP0400	4/4 台 ASG 泵列失效, 或相应的 3/3 台 SG 供水失效, 或相应的 GCT-A 阀排出失效, 或操纵员未能及时停运电动泵	HPO1=1, HSG3=1 并考虑“操纵员未能紧急停运电动泵”事件

表 1 和图 1 中, 泵列失效 HPO1 和供水管线失效 HSG3 为根节点; HPO1 是三状态节点, 状态 1 对应 4/4 泵失效, 状态 2 对应 2/2 汽动泵失效, 状态 3 对应 3/4 泵失效; HSG3 是二状态节点, 状态 1 对应 3/3 台 SG 失效定义, 状态 2 对应 2/2 台 SG 失效。

2.3 ASG 系统贝叶斯网络参数的确定

以顶事件 ASGP0000(4/4 台 ASG 泵列失效, 或相应的 4/4 台 SG 供水管线失效, 或相应 GCT-A 阀排出失效) 为对象进行 ASG 系统可靠性分析。首先构建 ASGP0000 顶事件对应的贝叶斯网络, 该网络共有 104 个根节点, 47 个中间节点和 1 个叶节点, 然后确定贝叶斯网络参数。

贝叶斯网络参数的确定, 包括根节点的先验概率和中间节点的故障发生概率。由于核电厂尚处于建设阶段, ASG 系统贝叶斯网络参数由通用数据确定。

根节点的先验概率, 大部分采用故障树模型中基本事件发生概率, 新增的共因失效模式的发生概率则采用 MGL 共因失效模型计算获得。

中间节点的故障发生概率, 根据系统顶事件定义和可靠性框图中各组成子系统间的关系, 参照逻辑门与网络节点的局部条件概率 (CPT) 对应关系确定。BN 根节点各故障状态的 CPT 参数如图 2 所示, 根据通用数据确定根节点各故障状态的 CPT 参数, 并找出前 10 位 CPT 参数的节点编号和故障状态值。在图 3 中给出了 2 个典型的多态根节点的 CPT 参数, 根节点 22 是汽动泵 003POP 设备的根节点编号, 该节点状态变量为 1~7, 正常状态对应的节点状态变量为 1; 而根据 ASG

系统 FMEA 表, 该设备有 6 种失效模式, 分别为需求一阶共因失效、需求二阶共因失效、运行一阶共因失效、运行二阶共因失效、泵破裂以及泵试验维修不可用, 依次对应为节点 22 的状态变量 2~7。根节点 104 为辅助给水箱失效, 该节点状态变量为 1~3, 正常状态对应的节点状态变量为 1, 状态变量 2 为辅助给水箱温度过高, 状态变量 3 为辅助给水箱运行失效。图 4 给出了中间节点 151、152 的 CPT 参数, 节点 151 (向 3 个 SG 供水情况的中间节点) 的 CPT 参数为与门逻辑关系, 即在该节点的所有父节点同时故障时该节点的故障状态才会发生; 节点 152 (表示顶事件 ASGP0000) 的 CPT 参数为或门逻辑关系, 即该节点只要有任意 1 个父节点故障, 节点的故障状态就会发生。

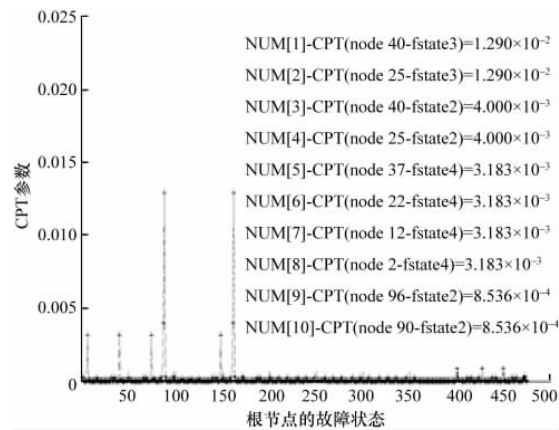


图 2 BN 根节点各故障状态的 CPT 参数
Fig. 2 CPT Parameters of BN root node fault state

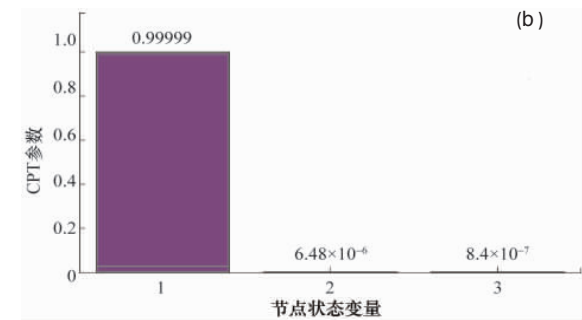
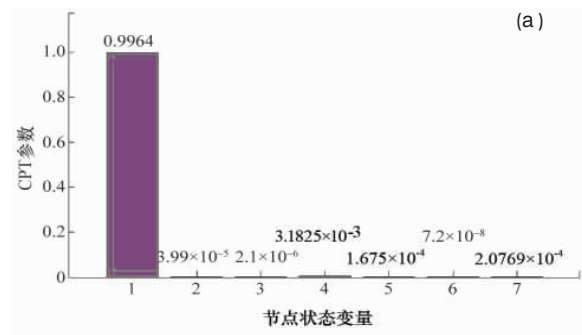
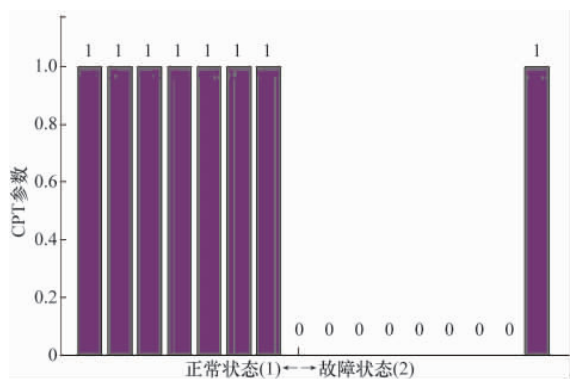
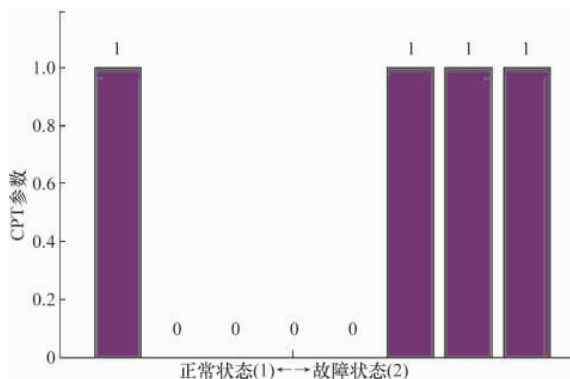


图 3 BN 根节点 22(a) 和 104(b) 的 CPT 参数
Fig. 3 CPT Parameters of root nodes 22 (a) and 104 (b)



(a)



(b)

图4 BN中间节点151(a)和(b)152的CPT参数对应与或门逻辑关系

Fig. 4 CPT Parameters of middle nodes 151 (a) and 152 (b) in BN corresponding to AND/OR logic

3 ASG系统可靠性的贝叶斯网络分析

3.1 ASG系统的贝叶斯网络推理

网络中任意节点事件的状态均未知时,应进行贝叶斯网络的正向推理,对ASG系统进行可靠性分析。在无证据时,网络中最可能的事件组合是所有事件都正常,且对应的最或然概率为 9.36×10^{-1} 。贝叶斯网络可以计算父节点与子节点间的联合概率,图5为子节点152(ASGP0000顶事件)与其父节点的联合概率分布。从图5中可以看出,顶事件发生有3种情况,在父节点135(直接导致顶事件发生的中间节点)故障时顶事件的发生概率最高,为 7.40×10^{-6} ;其次,父节点151故障导致的顶事件发生概率为 1.09×10^{-8} ;事件发生概率最低的情况是2个父节点(节点135和节点151)同时故障。可见父节点135故障是顶事件发生的直接原因。

在已知顶事件发生时网络证据为 $evidence\{TOP\}=2$,通过贝叶斯网络后向推理进行可靠性分析,对ASG系统故障进行诊断,可得到故障树模型不容易获得的分析结果。网络中最可能发生的事件组合是节点104和节点135故障导致ASG系统顶事件发生,对应的最或然概率为 6.07×10^{-6} 。此时,子节点及其父节点的联合概率分布如图6所示。分析发现,在顶事件发生时子节点故障中有99.9%是由于节点135故障导

致,它是导致顶事件发生的关键中间节点,而向蒸汽发生器供水失效故障对顶事件的影响只有0.1%。

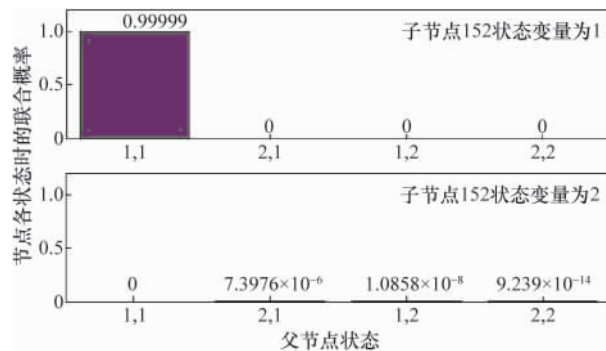


图5 无证据时子节点与父节点联合概率分布

Fig. 5 Joint probability distribution of child node and its father nodes in no-evidence condition

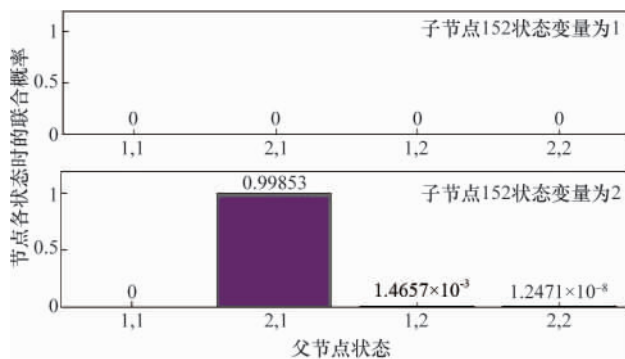


图6 有证据时子节点与父节点联合概率分布

Fig. 6 Joint probability distribution of child node and its father nodes in evidence{TOP}=2

若已知ASG系统中有1列电动泵和1列汽动泵都已发生故障,对应中间节点证据为 $evidence\{PO1\}=2$ 和 $evidence\{PO4\}=2$,简称为 $evidence\{2PO\}=2$,在该证据下可应用贝叶斯网络双向推理功能,向前推理预测ASG系统顶事件(即叶节点)和其他节点的故障发生概率,向后推理找出在该证据时最可能发生的根节点事件。网络中最可能发生的事件组合为节点集合{2,40,105,127,129,131,134,140,142,144},对应的失效状态分别为状态4、状态3、状态2、状态2、状态2、状态2、状态2、状态2、状态2、状态2,其最或然概率为 3.92×10^{-5} 。比较网络中在无证据、证据为 $evidence\{TOP\}=2$ 和证据为 $evidence\{2PO\}=2$ 时,PO_{SG1}(泵回路及1列供水管线事件)、SG₂(向1台SG供水事件)、SG(向3台SG供水事件)和TOP(顶事件)4个节点的故障件发生概率,如图7所示。有证据时各节点故障发生概率高于无证据时,说明已知一定节点状态可以进一步确定其他节点状态的信息。在已知顶事件故障证据时,各节点的故障发生概率明显高于其他2种情况,这说明顶事件发生对这些节点的影响最大。因此,通过贝叶斯网络可以由已知的网络证据,对ASG系统故障作进一步可靠性分析,有助于找出具体故障原因和提出有效的维修途径。图8



给出了证据为 $evidence\{2PO\}=2$ 时子节点及其父节点事件的联合概率分布,从图 8 中可以看出,顶事件发生在 3 种情况下,与无证据情况比较,节点 151 故障是已知证据为 $evidence\{2PO\}=2$ 时顶事件发生的主要原因,并且 ASG 系统故障发生概率增大了 2 个数量级。

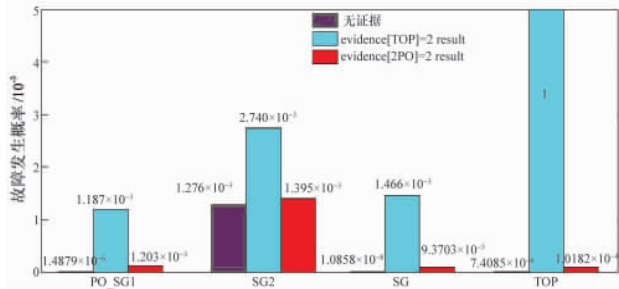


图 7 无证据和已知证据时节点事件发生概率比较
Fig. 7 Comparison of BN inference between no-evidence $evidence\{TOP\}=2$ and $evidence\{2PO\}=2$

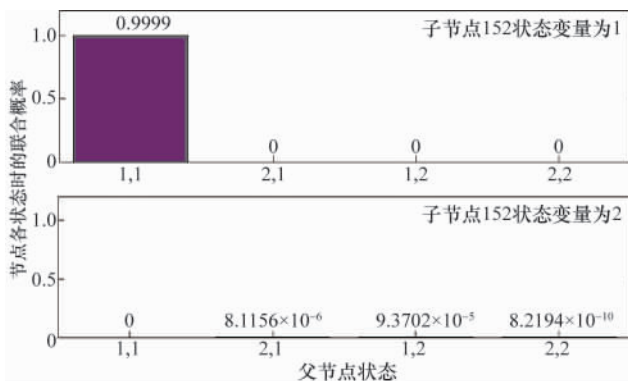


图 8 已知证据时子节点与父节点联合概率分布
Fig. 8 Joint probability distribution of child node and its father nodes in $evidence\{2PO\}=2$

3.2 分析结果与比较

借助贝叶斯网络的强大推理功能,能够计算 ASG 系统贝叶斯网络中任意节点的发生概率,包括节点正常状态和故障状态的概率分析,而故障树方法只能对故障概率进行分析计算。以顶事件 ASGP0000 为例,图 9 给出了贝叶斯网络中所有节点正常状态的概率,并给出了正常状态概率在后 10 位的节点事件排序。在已知证据条件下计算得到 ASG 系统贝叶斯网络叶节点发生概率,将叶节点故障状态的发生概率与预先研究工作^[9]中使用故障树分析方法计算结果进行比较,如图 10 所示。通过对比发现,顶事件发生概率基本吻合,贝叶斯网络分析结果小于故障树结果,主要是因为故障树模型采用上限近似值。使用 ASG 系统贝叶斯网络计算中间节点的发生概率,对比 ASG 系统 4 个泵回路在 5 个顶事件下的故障概率,并与故障树模型中 4 个泵回路失效概率比较,如图 11 所示。对于泵回路失效概率,贝叶斯网络分析结果优于故障树分析结果,主要原因是贝叶斯网络模型中考虑了手动阀忘记打开

失效模式和泵/阀的破裂、外漏导致泵所在列的子系统失效,而故障树模型中则缺乏此功能,因此,贝叶斯网络分析结果能够反映 ASG 系统中新增故障模式和逻辑表达,从而更好地评估系统的可靠性。

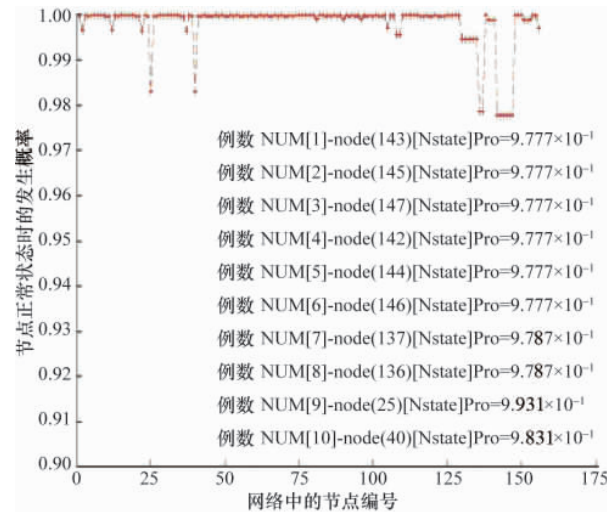


图 9 顶事件 ASGP0000 下 BN 中节点正常状态的概率
Fig. 9 ASGP0000 BN inference and the normal state probability of all nodes

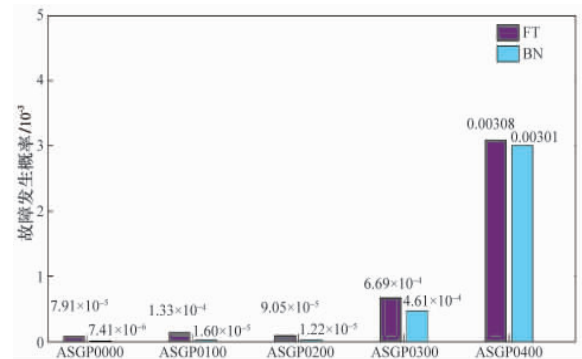


图 10 BN 叶节点与 FT 的顶事件发生概率比较
Fig. 10 Comparison between the fault probability of BN leaf node and FT TOP event probability

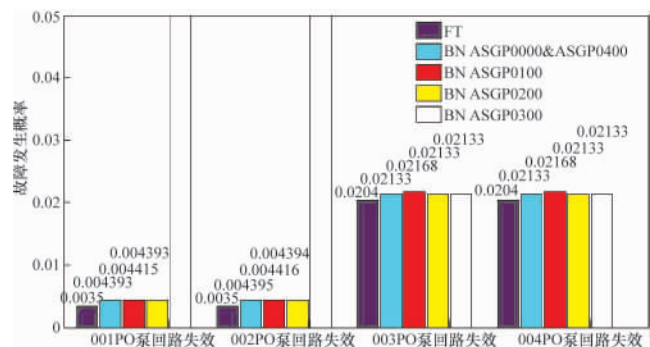


图 11 BN 与 FT 的 4 个泵回路失效概率比较
Fig. 11 Comparison of four pump loop fault probability between ASG-BN and FT

4 结论

研究了基于贝叶斯网络的核电厂改进 ASG 系统安全性评价方法。通过故障模式与影响分析构建 ASG 系统可靠性框图,进而建立 ASG 系统贝叶斯网络,利用网络推理计算事件发生概率,进行系统可靠性分析。相较于传统的故障树方法,贝叶斯网络方法具有更接近实际、更强的推理能力和更加灵活等优点,且贝叶斯网络可以通过已获得的网络证据找出具体故障原因,为系统维修提供有效途径。将贝叶斯网络应用于多状态模式分析,改善了故障分析中对不确定逻辑关系的表达和对多故障状态的考虑,体现了贝叶斯网络方法应用于核电厂安全系统评价的适用性和优越性。

参考文献 (References)

- [1] USNRC. An approach for plant-specific risk-informed decision-making: inservice testing [R]. Washington DC: Nuclear Regulatory Commission, 1998.
- [2] USNRC. An approach for plant-specific risk-informed decision-making for inservice inspection of piping[R]. Washington DC: Nuclear Regulatory Commission, 1998.
- [3] USNRC. An approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decision on plant specific changes to the licensing basis [R]. Washington DC: Nuclear Regulatory Commission, 1998.
- [4] Kang D I, Hwang M J, Han S H. Estimation of common cause failure parameters for essential service water system pump using the CAFE-PSA [J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(1): 24-31.
- [5] 邵舸, 佟立丽, 曹学武. 辅助给水系统配置改进的概率安全评价[J]. 科技导报, 2012,30(28/29): 24-29.
Shao Ge, Tong Lili, Cao Xuewu. Science and Technology Review, 2012, 30(28/29): 24-29.
- [6] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Comparing fault trees and Bayesian networks for dependability analysis[C]. The 18th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security, Toulouse, France, September 27-29, 1999.
- [7] Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference: revised second printing [M]. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1988.
- [8] 鲍依兰, 黄高峰, 佟立丽. 贝叶斯网络用于屏蔽泵系统故障分析方法的研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(2):103-109.
Bao Yilan, Huang Gaofeng, Tong Lili. Nuclear Science and Engineering, 2012, 32(2): 103-109.
- [9] Langseth H. Bayesian networks in reliability: some recent developments [C]//The 4th International Conference on Mathematical Methods in Reliability. Santa Fe, New Mexico, USA: World Scientific Publishing, 2004: 21-24.
- [10] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks[J]. Reliability Engineering and System Safety. 2001, 71(3): 249-260.

(责任编辑 韩星明)

·学术动态·



数字科技馆科普微视频专栏开通

2013年10月23日,中国科协科普部在中国数字科技馆开通科普微视频专栏(<http://minivideo.cdstm.cn/index.php>)。

科普微视频专栏分为科学实验、科教专题片、科教纪录片、科学TED演讲、科学生活、应急科普6个栏目。第一批上线31个微视频,涉及公众较为关注的PM2.5、地震应急避险、趣味科学小实验等主题,以动画、专题片等多种形式展示科学现象、解释科学原理、对热点问题进行科学解读。

为贯彻落实《全民科学素质行动计划纲要实施工作方案(2011—2015年)》,创新科普传播的内容和形式,2013年3月,中国科协科普部启动科普微视频制作和传播工作,委托中国科技馆、武汉广播电视台、北京科影音像出版社、北京科教电影制片厂、中国医学救援协会、拾柒创意文化(北京)有限公司、嘉星一族广告(北京)有限公司、北京赛恩奥尼文化传媒有限公司、北京赛思特公共关系顾问有限公司9个单位,计划制作科普微视频449集,共计3140分钟,通过中国数字科技馆专栏、公交地铁和高铁动车组电视栏目播放。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15123341.html>。