

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.023

事件树、故障树、决策树与贝叶斯网络

周建方 ,唐椿炎 ,许智勇

(河海大学机电学院 ,江苏 常州 213022)

摘要 :在简要介绍贝叶斯网络技术的基础上 ,通过大坝失效事件树分析、导弹发动机故障树分析以及汽车销售决策树分析 3 个实例 ,分别将事件树、故障树及决策树 3 种分析方法与贝叶斯网络分析方法进行了比较 ,并给出了事件树、故障树和决策树向贝叶斯网络转化的一般规律 :事件作为贝叶斯网络中的结点 ,根据事件之间的因果或影响关系将网络中的各结点用有向弧连接起来并由已知数据或专家经验确定各结点条件概率表 .结果表明贝叶斯网络具有处理多状态复杂模型以及双向推理的优点 .

关键词 :事件树 ;故障树 ;决策树 ;贝叶斯网络

中图分类号 :N945.1 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)03-0351-05

事件树(event tree)、故障树(faulty tree)和决策树(decision tree)是系统分析方法中重要并且得到广泛应用的方法^[1-9] ,该方法能够对系统的危险性、薄弱环节以及效益值等进行识别评价 ,具有简明、形象化的特点 ,体现了以系统工程方法研究问题的系统性、准确性和预测性 .但事件树、故障树和决策树不能表达更复杂变量(如故障树不能表达多态变量)以及复杂结构 .

贝叶斯网络(Bayesian networks)是包含一个条件概率表的有向无环图 ,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 .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 ,适用于表达和分析不确定性和概率性的事物 ,应用于有条件地依赖多种控制因素的决策 ,可以从不完全、不精确或不确定的知识或信息中做出推理^[10-11] ,自 1986 年由 Pearl^[12]提出后 ,已成为表示概率知识基础上的不确定性的有力工具 .贝叶斯网络另外一个重要优点就是能够表达复杂变量并且结构简单(贝叶斯网络的大小随问题规模增加呈线性增长) .

事件树、故障树、决策树与贝叶斯网络都能有效解决系统风险问题 ,因此两者之间的关系目前已成为研究热点 ,其中故障树向贝叶斯网络的转化已有一些文献做过介绍^[13-15] ,而事件树和决策树向贝叶斯网络转化的研究目前较少 .本文在简要介绍贝叶斯网络技术的基础上 ,通过 3 个例子对事件树、故障树和决策树向贝叶斯网络的转化方法进行研究 ,并在此基础上总结了事件树、故障树和决策树向贝叶斯网络转化的一般规律 .

1 事件树与贝叶斯网络

事件树分析(event tree analysis ,ETA)方法是一种逻辑演绎分析方法 ,它在给定的一个初因事件的前提下 ,分析此初因事件可能导致的各种事件序列的结果 ,从而可以评价系统的可靠性和安全性 .

图 1 是某坝的一个事件树模型^[16] .该坝的设计洪水重现期 $T_r = 1\,000\text{ a}$,导致大坝风险失事的初始事件

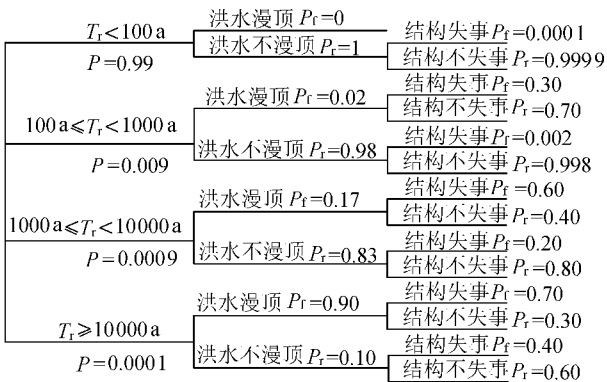


图 1 某大坝的事件树
Fig. 1 Event tree of a dam

是入库洪水.根据流量或洪水频率的区间划分,将事件树做首次分支.在一定的入库洪水条件下,洪水位可能超越坝顶,亦可能不超越坝顶,这就形成了事件树的第 2 次分支.洪水漫顶情况下,大坝可能失事,亦可能不失事.同样,洪水不漫顶条件下,可能会发生渗透管涌或边坡失稳等结构失事事件,亦可能不发生.这样,事件树形成了第 3 次分支.根据事件树的计算规则,可求出大坝总风险率为 0.000 479.

现使用贝叶斯网络分析法来分析该模型.事件树向贝叶斯网络转化可按以下步骤进行:

步骤 1 对事件序列中的每个事件,在贝叶斯网络中建立一个结点,并根据该事件名称命名,对重复事件只建立一个结点.如入库洪水事件在贝叶斯网络中建立为“入库洪水”结点.

步骤 2 对影响后果,建立一个子结点,并根据后果的数目确定该结点的状态空间.如漫顶失事和结构失事都是失事后果,在贝叶斯网络中统一设为“大坝失事”结点.

步骤 3 根据事件树中的逻辑关系,将各结点用有向弧连接起来形成贝叶斯网络的拓扑结构.

步骤 4 根据事件树中的事件序列和发生的概率确定父结点先验概率表和各子结点的条件概率表,如表 1~3 所示.

表 1 不同洪水重现期入库洪水结点先验概率

Table 1 Prior probability of flood nodes under different flood return periods			
$T_r < 100\text{ a}$	$100\text{ a} \leq T_r < 1000\text{ a}$	$1000\text{ a} \leq T_r < 10000\text{ a}$	$T_r \geq 10000\text{ a}$
0.99	0.009	0.000 9	0.000 1

表 2 不同洪水重现期洪水漫顶结点条件概率

Table 2 Conditional probability of overflow nodes under different flood return periods				
洪水漫顶	$T_r < 100\text{ a}$	$100\text{ a} \leq T_r < 1000\text{ a}$	$1000\text{ a} \leq T_r < 10000\text{ a}$	$T_r \geq 10000\text{ a}$
是	0	0.02	0.17	0.90
否	1	0.98	0.83	0.10

表 3 不同洪水重现期大坝失事结点条件概率

Table 3 Conditional probability of dam failure nodes under different flood return periods								
结构失事	$T_r < 100\text{ a}$		$100\text{ a} \leq T_r < 1000\text{ a}$		$1000\text{ a} \leq T_r < 10000\text{ a}$		$T_r \geq 10000\text{ a}$	
	洪水漫顶	洪水不漫顶	洪水漫顶	洪水不漫顶	洪水漫顶	洪水不漫顶	洪水漫顶	洪水不漫顶
是	0	0.000 1	0.30	0.002	0.60	0.20	0.70	0.40
否	1	0.999 9	0.70	0.998	0.40	0.80	0.30	0.60

转换后贝叶斯网络模型如图 2 所示.应用贝叶斯网络软件(HUGIN)^[17]计算得系统的失效概率为 0.000 478 84,与事件树分析结果相同.同时通过逆向推理功能可计算出当该大坝失事时 $1000\text{ a} \leq T_r < 10000\text{ a}$ 的洪水(发生概率 0.504)是导致该大坝失事的主要因素,从而为工程设计人员、管理人员提供了设计、管理依据.这是事件树方法难以做到的.可见,贝叶斯网络与事件树相比简洁直观,能表述多状态复杂事件,且能进行双向推理.

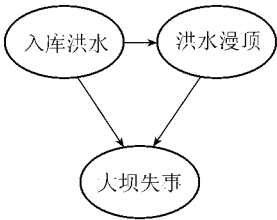


图 2 某大坝的贝叶斯网络模型
Fig. 2 Bayesian network model of a dam

2 故障树与贝叶斯网络

故障树分析法是以系统最不希望发生的事件作为发生的目标(顶事件),找出系统内可能发生的部件失效、环境变化、人为失误等因素(各种底事件)与系统失效之间的逻辑联系,用倒立树状图形表示出来.它可用于系统故障分析,分析某项故障产生的原因,可用于系统故障模式识别,进行故障预测和诊断,找出系统中的薄弱环节,以便在设计中采取相应的改进措施,实现系统的设计优化.

图 3 是某舰空导弹发动机意外点火的一个故障树模型^[6].原文献计算出该发动机意外点火的概率为 0.002 1.现用贝叶斯网络分析该问题.首先将故障树向贝叶斯网络转化,步骤如下:

步骤 1 对故障树中的每个事件(底事件、中间事件和顶事件),在贝叶斯网络中建立一个父结点或子结点,并根据该事件名称进行命名.对于重复事件只建立一个结点.如故障树中的 Event1、Gate4 对应贝叶斯网络中的父结点 Event1 和子结点 Gate4.

步骤 2 按照故障树中各事件之间的连接关系建立贝叶斯网络中各结点之间的连接.

步骤 3 按照故障树中相应底事件的失效概率确定贝叶斯网络中父结点的先验概率.

步骤 4 按照故障树中的逻辑门确定贝叶斯网络中各结点的条件概率,列于表 4,具体可见文献[14-15].

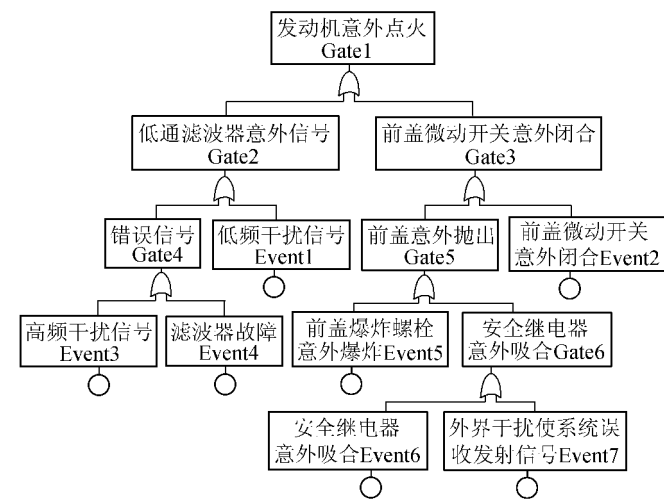


图 3 发动机意外点火的故障树

Fig. 3 Fault tree of unexpected ignition of an engine

Event1或 Event2(0.002 4),Event4(0.000 373),Event3(0.000 086).而这个结果也是原故障树不易推导出来的.与故障树相比贝叶斯网络同样具有简洁直观、能表述多状态复杂事件且能进行双向推理等优点.

3 决策树与贝叶斯网络

所谓“决策”就是为了实现特定的目标,在占有一定信息的基础上,根据主客观条件,对需要决定的问题进行论证,从多种行动方案中选出最佳方案的过程.决策的类型根据方案实现的不同可以划分为确定型决策和不确定型决策.而决策树就是用来解决风险型决策问题的,它是解决决策问题时使用的一种分析工具,是用树状图形来分析和选择行动方案的一种系统分析方法.

图 5 是某微型汽车销售的决策树模型^[9].该微型汽车厂根据目前国内市场情况提出 2 种发展方案,其一是换型,根据市场调研分析,成功的概率为 0.62,失败的概率为 0.38;方案二是对目前的产品进行技术改造,根据市场情况,成功的概率为 0.74,失败的概率为 0.26,无论采用哪种方案,都有保持原产量和增加产量 2 个方案.根据市场调研结果整理分析,未来市场状况将较好的概率为 0.32,一般的概率为 0.47,较差的概率为 0.21.如果换型或技术改造的方案失败,只能继续生产原产品,现需要进行决策如何使企业获得最大的利润,按照决策树计算方法计算出最佳策略为换型并增产,收益为 14.36(文献[9]计算结果为 14.28,有误).

现使用贝叶斯网络来对该问题进行分析计算,先将决策树向贝叶斯网络转化,步骤如下:

步骤 1 将决策树中的每个决策结点、状态结点和结果结点分别对应到贝叶斯网络的决策结点、状态结点和效益结点,相同事件可合并为一个结点.如将算例

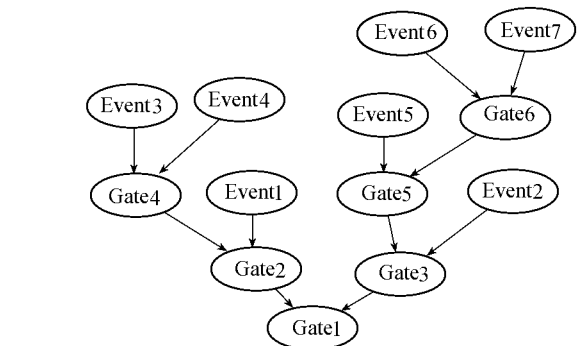


图 4 发动机意外点火的贝叶斯网络模型

Fig. 4 Bayesian network model of unexpected ignition of an engine

表 4 发动机意外点火基本事件发生概率

Table 4 Probability of basic events for unexpected ignition of an engine

序号	基本事件名称	发生概率
1	低频干扰信号 Event1	0.000 005
2	前盖微动开关意外闭合 Event2	0.000 005
3	高频干扰信号 Event3	0.000 074
4	滤波器故障 Event4	0.000 360
5	前盖爆炸螺栓意外爆炸 Event5	0.000 856
6	安全继电器意外吸合 Event6	0.000 910
7	外界干扰使系统误收发射信号 Event7	0.0002 80

该故障树转化后的贝叶斯网络模型如图 4 所示,将其导入到 HUGIN 软件中计算出该发动机意外点火的概率为 0.002 05,和原文献结果基本相同.若该发动机发生意外点火,引起的原因按概率顺序为 Event6(0.444),Event5(0.415),Event7(0.137),

Event1或 Event2(0.002 4),Event4(0.000 373),Event3(0.000 086).而这个结果也是原故障树不易推导出来的.与故障树相比贝叶斯网络同样具有简洁直观、能表述多状态复杂事件且能进行双向推理等优点.

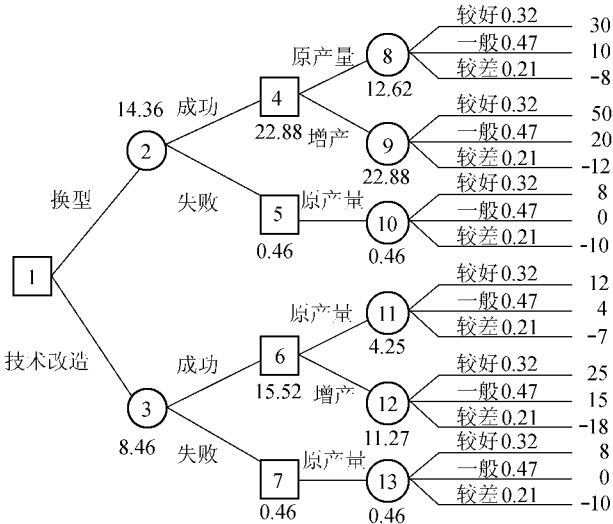


图 5 微型汽车销售的决策树

Fig. 5 Decision tree of sale of mini-cars

中换型或技术改造的决策对应到网络中的“决策”决策结点、效益值对应到网络中的“效益”效益结点等。

步骤2:根据决策树的逻辑关系用有向弧连接决策结点、状态结点以及效益结点。

步骤3:根据决策树中各结点的物理含义确定贝叶斯网络中相应结点的状态和决策类型。如决策结点“产量”有2种状态:增产或原产量。

步骤4:根据决策树中的已知条件和逻辑关系给出各结点的先验概率或效益值表,见表5~7。

表5 “市场状况”结点先验概率

Table 5 Prior probability of market situation nodes

市场状况	结点概率
较好	0.32
一般	0.47
较差	0.21

表6 “结果”结点条件概率

Table 6 Conditional probability of result nodes

结果	结点概率	
	技术改造	换型
决策成功	0.74	0.62
决策失败	0.26	0.38

表7 “效益”结点效益值

Table 7 Benefits of benefit nodes

决策	结果	产量	市场状况	效益值
换型	成功	原产量	较好	30
			一般	10
			较差	-8
	增产		较好	50
			一般	20
			较差	-12
技术改造	失败	原产量	较好	8
			一般	0
			较差	-10
	成功	原产量	较好	12
			一般	4
			较差	-7
	增产		较好	25
			一般	15
			较差	-18
	失败	原产量	较好	8
			一般	0
			较差	-10

根据以上步骤,建立起如图6所示的贝叶斯网络模型。经计算,可得到与决策树分析完全相同的结果,即采用换型并增产的决策可获得最大利润,为14.36单位。

4 一般转化规律

通过上面的3个例子,可总结出事件树、故障树和决策树向贝叶斯网络转化的一般规律:

- a. 对应于事件树、故障树中的每个事件和决策树中的每个结点在贝叶斯网络中建立相应的结点,并确定结点的状态。对于重复事件(结点)只建立一个结点,有时根据问题的性质可合并结点或增加结点。
- b. 根据事件树、故障树和决策树的逻辑关系建立贝叶斯网络中各结点间的弧向连接。
- c. 根据事件树、故障树和决策树中的已知条件和逻辑关系确定贝叶斯网络中父结点的先验概率表、子结点的条件概率表或效益值表。

需要说明的是,上面仅是事件树、故障树和决策树向贝叶斯网络转化的一般规律,对于具体问题还需作具体分析。另外,贝叶斯网络并不一定非要经过事件树、故障树或决策树才能建立,它也可以根据问题的性质直接建立。事实上,根据事件树、故障树和决策树一定可以建立一个贝叶斯网络,但反之并不一定。

5 结 语

- a. 事件树、故障树和决策树都可以按照一定的步骤向贝叶斯网络转化,也就是说贝叶斯网络同时具有事件树、故障树和决策树的功能。
- b. 事件树、故障树和决策树对问题的表达方式不同,而贝叶斯网络表达方式统一,便于计算机统一处理。尤其从贝叶斯网络中很容易看出结点之间的相关性,而在事件树、故障树和决策树中有时必须经过认真辨别甚至分析才能确定结点之间是否有相关性。
- c. 贝叶斯网络表示形式简单,其规模随问题增加呈线性增长,而事件树、故障树和决策树的规模随问题

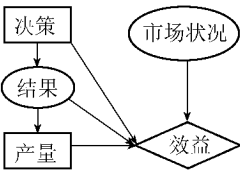


图6 微型汽车销售的贝叶斯网络模型
Fig. 6 Bayesian network model of sale of mini-cars

增加呈指数增长 ,因而贝叶斯网络更易用来处理复杂的系统 .

d. 贝叶斯网络具有很方便的双向推理和自我学习更新功能 ,很容易找到系统的薄弱环节 ,这是事件树、故障树和决策树所难以做到的 .

e. 由于贝叶斯网络极大地简化了模型表示形式 ,所以表示不如事件树、故障树和决策树形象 ,这给直观理解带来了不便 .

总体来说 ,贝叶斯网络无论是在表达方式复杂程度上还是在运算速度上都明显优于对应的事件树、故障树和决策树模型 ,这使得贝叶斯网络成为当前研究不确定性问题 and 系统决策的有力工具 .

参考文献 :

[1] ANG A H-S ,TANG W H. Probability concepts in engineering planning and design :Volume 2. decision ,risk and reliability[M]. New York :John Wiley and Sons ,Inc. ,1984.

[2] 汪元辉. 安全系统工程[M]. 天津 :天津大学出版社 ,1999.

[3] 史定华 ,王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京 :北京师范大学出版社 ,1993.

[4] 江荣汉 ,江晓岳 ,田英杰. 事件树与故障树相结合的系统可靠性分析[J]. 湖南大学学报 ,1995 2X (1) :103-108.

[5] 幸福堂 ,张引弟 ,向晓东. 工业管网水系统事件树探析[J]. 武汉科技大学学报 :自然科学版 ,2006 2X (5) 8-9.

[6] 吴进煌. 舰空导弹发动机意外点火故障树分析[J]. 海军航空工程学院学报 ,2006 2X (6) 653-656.

[7] 邵延峰 ,薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用[J]. 中国制造业信息化 ,2007 3X (1) :72-74.

[8] 王莎莎 ,孙继银 ,李琳琳. 故障决策树模型在诊断专家系统中的应用[J]. 计算机应用 ,2005 2X (增刊) 293-294.

[9] 韩亮. 决策树决策在汽车企业营销决策中的应用分析[J]. 陕西汽车 ,199X (4) 34-38.

[10] JENSEN F V. An introduction to Bayesian networks[M]. London :UCL Press ,1996.

[11] PEARL J. Graphical models for probabilistic and causal reasoning[M]//TUCKER A B. The Computer Science and Engineering Handbook. Boca Raton ,Florida :CRC Press ,1997 697-714.

[12] PERAL J. Fusion ,propagation and structuring in belief networks[J]. Artificial Intelligence ,1986 2X (3) 241-248.

[13] BOBBIO A ,PORTINALE L ,MINICHINO M ,et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian network[J]. Reliability Engineering and System Safety ,2001 71 249-260.

[14] 谢斌 ,张明珠 ,严于鲜. 贝叶斯网络对故障树方法的改进[J]. 绵阳师范学院学报 ,2004 2X (2) 29-33.

[15] 王广彦 ,马志军 ,胡起伟. 基于贝叶斯网络的故障树分析[J]. 系统工程理论与实践 ,2004 (6) 78-83.

[16] 姜树海 ,范子武 ,吴时强. 洪灾风险评估和防洪安全决策[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2005 86-87.

[17] ANDERSEN S K ,OLESEN K G ,JENSEN F V. HUGIN-a shell for building Bayesian belief universes for expert systems[C]//Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Detroit ,USA :Academic Press ,1989 :1080-1085.

Event tree , fault tree , decision-making tree and Bayesian network

ZHOU Jian-fang , TANG Chun-yan , XU Zhi-yong

(College of Mechanical & Electrical Engineering , Hohai University , Changzhou 213022 , China)

Abstract : Based on an introduction to the Bayesian network and the analysis of three examples , an event tree of a dam failure , a fault tree for unexpected ignition of a missile engine , and a decision-making tree for sale of cars , the methods of the event tree , the fault tree and the decision-making tree were compared with the Bayesian network . A general law was developed to translate the event tree , the fault tree and the decision-making tree into the Bayesian network . Firstly , in the Bayesian network the nodes denoted the events . Secondly , the nodes were connected with directed arcs according to the causality and influence of the events . Finally , the conditional probability table for the nodes was determined in terms of the given data or experts ' experience . The results show that the Bayesian network has advantages in dealing with complex multi-state models and bi-directional reasoning .

Key words : event tree ; fault tree ; decision tree ; Bayesian network