

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.008

基于贝叶斯网络的沙河集水库大坝风险分析

周建方 张迅炜 唐椿炎

(河海大学机电工程学院 江苏 常州 213022)

摘要 :根据沙河集水库大坝风险分析的内容和破坏模式 ,分别建立了 18 个事件树对应的 18 个贝叶斯网络 ,再根据引起大坝溃决的原因 ,合并成由坝体渗漏、坝基渗漏、坝体边坡逐渐破坏、涵洞渗漏及溢洪道渗漏导致溃决的 5 种状况的贝叶斯网络 ;根据这 5 个贝叶斯网络的结构形式和变量情况合并成 3 个贝叶斯网络 ;最后进一步凝炼综合成 1 个贝叶斯网络 ,该贝叶斯网络至少包含 6×18 个事件树的信息 .运行该贝叶斯网络 ,可以得到所需要的各种结果 ,显示出贝叶斯网络在风险分析中的特点和功能 .该方法为水库大坝安全风险评价提供了一种新的思路 .

关键词 :贝叶斯网络 ;事件树 ;大坝风险 ;沙河集水库

中图分类号 :TV64 ;N945.1 **文献标志码** :A **文章编号** :1000-1980(2012)03-0287-07

Dam risk analysis of Shaheji Reservoir based on Bayesian network

ZHOU Jian-fang , ZHANG Xun-wei , TANG Chun-yan

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

Abstract : According to the content and failure mode of dam risk analysis of the Shaheji Reservoir , 18 Bayesian networks (BNs) corresponding to 18 event trees were built , and the 18 BNs were incorporated into five BNs based on the causes of dam failure , which include seepage of the dam body and dam base , the failure of the side slope , and seepage of culverts and spillways . Then , the five BNs were united into three BNs according to their structure forms and variable states . Finally , a synthetic BN was generated , containing information on 6×18 event trees . This Bayesian network can be used to obtain various results that are needed , and proves that the BN is powerful in dam risk analysis . This method provides a new way of dam risk assessment for reservoirs .

Key words : Bayesian network ; event tree ; dam risk ; Shaheji Reservoir

目前 ,在国内外大坝风险分析中常用的系统分析方法为事件树、故障树方法^[1-5] ,它们能够较好地表达系统中不同层次事件间的逻辑关系 ,以及事件之间的关联程度 ,进而对系统进行定性与定量分析 .但当系统比较复杂、事件状态较多、存在共因失效或者需要逆向推理时 ,事件树、故障树方法对系统的表述和分析就会很困难 ,甚至无能为力^[6] .

贝叶斯网络则能克服这些困难 ,它可以将事件树、故障树及决策树综合起来描述复杂多态系统^[6] .自从贝叶斯网络方法提出后^[7] ,已在许多领域得到应用^[8-9] ,但在水利行业应用还很少^[10-12] . Bromley 等^[10]利用贝叶斯网络帮助进行综合水资源规划 ;李典庆等^[11]应用贝叶斯网络对 1 个土石坝的可靠性进行了分析 ;周建方等^[12]则对大坝风险分析中常见的 1 个事件树和 1 个故障树 2 个例子用贝叶斯网络进行了计算 .可以看出 ,这些应用都只是初步的尝试与探索 .本文在文献^[12]的基础上 ,结合沙河集水库大坝风险分析^[13] ,阐述了沙河集水库大坝风险分析贝叶斯网络模型的构建及简化 ,探讨了贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用 ,从而展示了贝叶斯网络对大坝风险分析的强大应用功能 .

收稿日期 :2011-05-03

基金项目 :“ 十一五 ” 国家科技支撑计划 (2006BAC14B07) ;中央高校基本科研业务费专项 (2009B30014)

作者简介 :周建方 (1961 —) 男 ,江苏常州人 ,教授 ,博士 ,主要从事工程力学、可靠性及风险分析研究 .E-mail :zhouchen101@yahoo.com.cn

1 沙河集水库大坝的风险模式

沙河集水库位于安徽省滁州市市区西北约 18 km 的长江下游滁河支流清流河上,集水面积 300 km²,总库容 1.85 亿 m³,是一座以灌溉为主,结合防洪、城市供水、养殖等综合利用的大(2)型水库。水库正常蓄水位 40.5 m,设计洪水位 42.35 m(500 年一遇),校核洪水位 43.2 m(万年一遇)。工程于 1958 年动工兴建,1979 年基本完成。

沙河集水库枢纽由拦河大坝、3 座涵洞(南涵、北涵、小北涵)、溢洪道和非常溢洪道组成。由于施工中坝基及坝头接触面清基不彻底、坝身填筑土料混杂且碾压不实、多期施工接合面未处理好、正常与非常溢洪道未按设计完成等原因,水库蓄水后不久即出现坝后渗漏、坝身多次塌陷及开裂、涵洞洞身断裂漏水、正常溢洪道冲刷水毁等险情,虽经多次加固处理,未能彻底根治工程安全隐患,水库一直限制水位在高程 37.00 m 以下运行,远没能发挥设计效益,并对下游造成巨大风险。

影响沙河集水库大坝安全的因素和破坏模式有许多,文献[13]分析归纳主要有如下几种状况。

状况 1:由坝体渗漏引起溃决,其破坏路径为

坝体集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→坝体溃决;

坝体集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→坝体溃决;

坝体集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→塌陷/坝顶沉降溃决;

坝体集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→边坡失稳漫顶溃决。

状况 2:由坝基渗漏引起溃决,其破坏路径为

坝基集中渗漏→继续大渗漏→坝基冲刷发展→干预失败→坝体溃决;

坝基集中渗漏→继续小渗漏→坝基冲刷发展→干预失败→坝体溃决;

坝基集中渗漏→继续大渗漏→坝体边基冲刷发展→干预失败→塌陷/坝顶沉降溃决。

状况 3:由坝体边坡逐渐破坏引起溃决,其破坏路径为

坝体边坡逐渐破坏→形成管涌→管涌发展→干预失败→坝体溃决;

坝体边坡逐渐破坏→坝体边坡破坏继续→坝体边坡破坏发展→干预失败→边坡失稳漫顶溃决。

状况 4:由涵洞渗漏引起溃决,其破坏路径为

涵洞集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决;

涵洞集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决;

涵洞集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展→干预失败→塌陷/坝顶沉降溃决。

状况 5:由溢洪道渗漏引起溃决,其破坏路径为

溢洪道翼墙集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决;

溢洪道翼墙集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决;

溢洪道翼墙集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展→干预失败→塌陷/坝顶沉降溃决。

文献[13]按照上面的破坏路径,建立了 10 000 a~PMF(可能最大洪水)一遇洪水下的 18 个事件树,并根据各事件的发生概率计算得到了各种破坏模式下的溃决概率。

2 基于贝叶斯网络的大坝风险分析

贝叶斯网络^[14-15]的分析推理本质上是进行概率计算。对一个确定的贝叶斯网络模型,输入已知条件,利用贝叶斯概率中条件概率的计算方法,即可求解出某一结点所代表事件发生的概率。根据事件树向贝叶斯网络的转化规律^[6],可以很方便地将文献[13]中的 18 个事件树转化成 18 个贝叶斯网络,而这仅仅是贝叶斯网络的一种初步应用。本文的目的即是把 18 个事件树综合成 1 个贝叶斯网络。

2.1 状况 1 的贝叶斯网络模型

沙河集水库大坝分 3 个坝段,图 1 是其中 1 个典型坝段 0+000—0+300 包含前 2 种破坏路径的事件树^[13],图中数值表示事件发生的条件概率。这样对应 3 个坝段有 3 个事件树,相应图 1 的贝叶斯网络见图 2。与图 1 相比,图 2 增加了 1 个洪水结点。因为图 1 中的事件树明确是针对 10 000 a~PMF 一遇洪水的,而实际上文献[13]将洪水分成 6 个频率区间,即 1~20 a,20~100 a,100~500 a,500~1 000 a,1 000~10 000 a,

10 000 a ~ PMF,因此当洪水在其他频率区间如 1 000 ~ 10 000 a 时,也将另有对应的 1 个事件树.如此事件树的总数为 6×18 个,文献 13 只给出了 10 000 a ~ PMF 一遇洪水下的事件树.与图 1 相比,其他洪水频率下的事件树形式相同,仅各事件的发生概率不同.为了反映这些情况,本文增加了 1 个洪水结点.这样,图 2 实际包含了 6×1 个事件树.

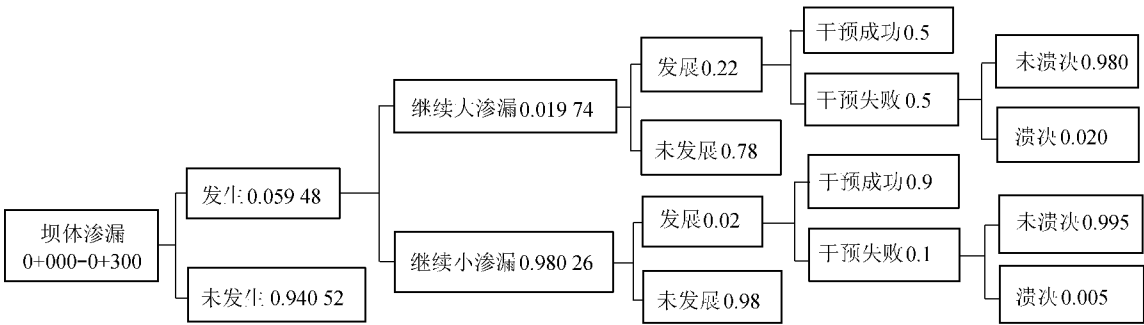


图 1 10 000 a ~ PMF 一遇洪水下坝体 0+000—0+300 段渗流管涌溃决事件树

另 2 个坝段的事件树与图 1 结构形状完全一样,只是每个坝段渗漏形成管涌后溃坝的概率不同.在事件树方法中必须用 3 个事件树来表示 3 个坝段,而在贝叶斯网络中只要增加 1 个坝段结点即可.该结点有 3 个状态,分别是: 0+000—0+300, 0+300—0+670, 0+670—0+700.这样就可以把 3 个坝段的事件树综合在一个贝叶斯网络中,见图 3.当然,坝段结点的子结点——坝体管涌溃决结点的条件概率表必须进行相应的改动,把 3 个坝段不同的溃决概率反映在其中.

从破坏路径可以看出,由坝体渗漏引起的破坏,除了坝体管涌溃决外,还有后 2 种溃决,即塌陷/坝顶沉降溃决和边坡失稳漫顶溃决,同样对应 3 个坝段有 3 个事件树.3 个事件树的结构形式完全与图 1 相同,仅最后溃决形式和概率不同,因此需在贝叶斯网络中增加坝体塌陷沉降溃决和坝体漫顶溃决 2 个结点,就可以把 3 个事件树包含在其中,最后形成的由坝体渗漏导致大坝溃决的贝叶斯网络(图 4),实际其包含了 6×6 个事件树.

Hugin 是一种可视化的贝叶斯网络建模、分析和决策软件.在 Hugin 中建立如图 4 所示的贝叶斯网络,输入已知条件,经运行就可得到各频率洪水下、各个坝段、各种溃决模式溃坝概率.图 5 为坝段 0+000—0+300 在 10 000 a ~ PMF 洪水下 3 种溃决模式的溃坝概率计算的示例,其中各结点的概率值均用百分数表示.除洪水和坝段结点外,其余结点只设定是、否 2 种状态,表示该结点所代表的事件发生或不发生.将洪水结点 10 000 a ~ PMF 状态和坝段结点 0+000—0+300 状态的概率值设置为 1.根据文献 13 的统计数据确定坝体渗漏、坝体继续渗漏、坝体渗漏发展、干预失败 4 个节点的概率,运行计算可得到坝体塌陷沉降溃决、坝体漫顶溃决和坝体管涌溃决 3 个节点的概率值.该结果与事件树的计算结果完全一致.如要显示其他坝段或其他洪水频率下的计算结果,只需改变相应变量的状态即可.

由图 5 可以看出,1 次给出了 3 个计算结果,显示了贝叶斯网络的强大功能和优越性.

2.2 其他状况下的贝叶斯网络模型

限于篇幅,其他状况贝叶斯网络模型建立过程不再赘述,直接给出结果,见图 6.图 6(a)表示由坝基渗漏引起溃决的贝叶斯网络,对应于状况 2,它包含了 6×6 个事件树,图 6(b)表示由坝体边坡逐渐破坏引起溃决

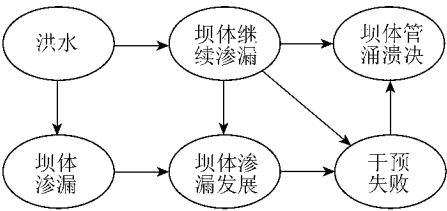


图 2 各频率洪水下坝体 0+000—0+300 段渗流管涌溃决贝叶斯网络

Fig. 2 Bayesian network of piping outburst due to dam body seepage in 0+000-0+300 section at various flood frequencies

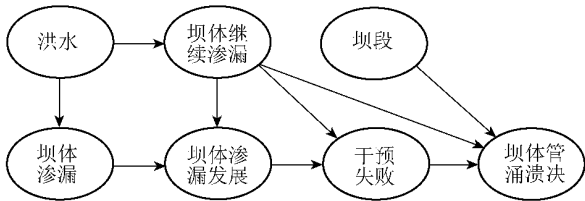


图 3 各频率洪水下坝体渗流管涌溃决贝叶斯网络
Fig. 3 Bayesian network of piping outburst due to dam body seepage at various flood frequencies

了6×2个事件树.

2.3 沙河集水库大坝风险分析的贝叶斯网络综合模型

前文根据可能引起沙河集水库大坝溃决的原因建立了 5 个贝叶斯网络,可以看出,这 5 个网络还可以进一步合并,这是因为:它们之间有的结构形式相同或相似;有的有共同的事件(结点);有的虽然事件不一样,但物理含义相同,将其合并成 1 个事件(结点),只需增加事件(结点)的状态.

图 4 和图 6(a)分别表示由坝体渗漏和坝基渗漏引起的大坝溃决,它们的结构形式大部分相同,除了结点坝体漫顶溃决外,其余结点要么一样,要么有相同的物理意义,因此可以将这 2 个图合并.同时为了反映坝体和坝基的不同,需增加 1 个结点,称之为渗流位置 1.渗流位置 1 有 2 个状态,状态 1 为坝体,状态 2 为坝基,这样形成的贝叶斯网络见图 7.

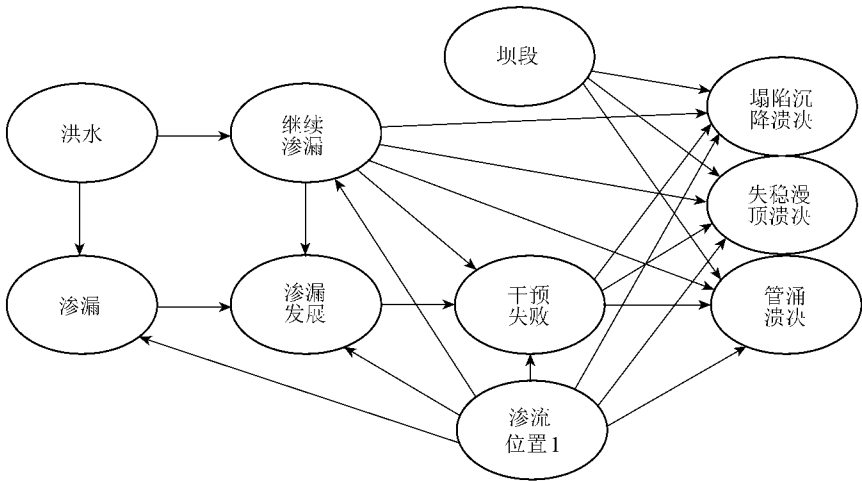


图 7 各频率洪水下坝体与坝基渗漏溃坝贝叶斯网络

Fig. 7 Bayesian network of dam failure due to dam body and dam base seepage at various flood frequencies

图 6(c)与图 6(d)分别表示由涵洞渗漏和溢洪道渗漏引起的大坝溃决,其结构形式完全相同,对应结点表示的物理含义也相同,因此可以将其合并,同样必须增加 1 个反映涵洞和溢洪道状态的结点,称之为渗流位置 2.各频率洪水下涵洞与溢洪道渗漏溃坝贝叶斯网络见图 8.

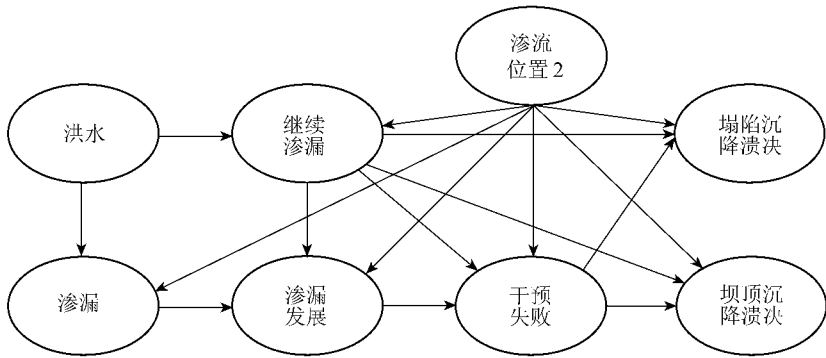


图 8 各频率洪水下涵洞与溢洪道渗漏溃坝贝叶斯网络

Fig. 8 Bayesian network of dam failure due to culvert and spillway seepage at various flood frequencies

这样就把 5 个贝叶斯网络缩减成 3 个,而这 3 个贝叶斯网络有 1 个共同的结点洪水,所以还可以把这 3 个贝叶斯网络综合成 1 个贝叶斯网络.同时可以看出,图 7 和图 8 仍有相似的形式,且结点渗流位置 1 和 2 都是反映渗流位置的,可以合并成 1 个结点,称之为渗流位置.它有 4 个状态:坝体、坝基、涵洞和溢洪道.对应这 4 种状态的干预失败结点也可合为 1 个结点,仍称为干预失败结点.而边坡破坏由于贝叶斯网络结构不一样,仍保留干预失败结点,为区别,称为边坡破坏干预失败结点.这样就得到沙河集水库大坝风险分析的综合贝叶斯网络,如图 9 所示.

从图 9 可以看出,该网络还可以进一步凝练,如可以把最后的 7 个溃决结点合并成 1 个结点,通过这个

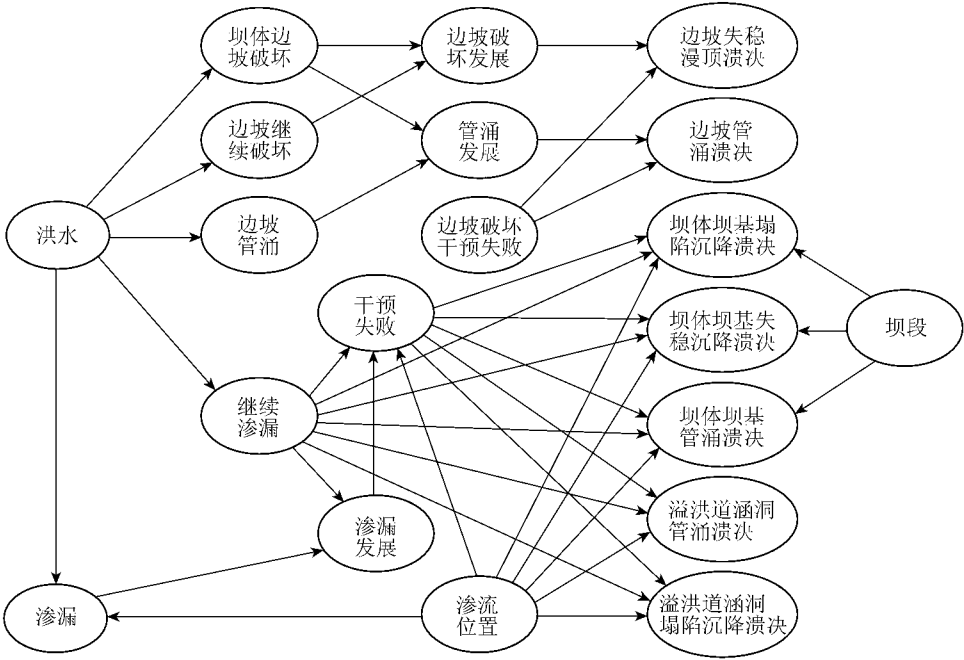


图9 各频率洪水下沙河集水库大坝溃坝贝叶斯网络

Fig. 9 Bayesian network of dam failure of Shaheji Reservoir at various flood frequencies

结点的7种状态来反映这7种溃决形式。很显然,网络越精炼,所表示的物理意义就越复杂,给阅读带来的困难就越大;同时,各子结点的条件概率表也越来越复杂。

运行图9的贝叶斯网络,并对一些结点进行不同的实证(evidence)就可以得到所想要的各种计算结果。这里,除了可以得到文献[13]中18个事件树对应的18个结果外,还可以得到许多其他结果,如可以很方便地得到在其他洪水频率,如1000~10000a下对应18个事件树的结果。同时,对各结点的条件概率表进行适当修改,就可以得到各事件概率发生变化后的结果。例如该大坝经过风险分析后发现其风险远大于允许风险,因此需进行大坝加固。加固后的大坝风险,在事件树方法中必须从头进行分析,而在这里只需将加固后各事件的发生概率在相应结点的条件概率表中进行修改,就可以很方便地得到大坝加固后的风险分析结果。另外,利用图9还可以很容易进行逆向推理,即假设大坝已经溃决,从而寻找出引起大坝溃决的主要因素,这对降低大坝风险是大有益处的。

3 结 语

本文将一个复杂的沙河集水库大坝风险分析问题综合凝练成1个贝叶斯网络,该贝叶斯网络不仅包含了原风险分析的18个事件树,而且扩展了风险分析功能。根据该贝叶斯网络,可以进行多种风险分析,得到各种风险分析结果,从而可以看出贝叶斯网络在大坝风险分析中的广泛应用前景和强大的功能。

需要说明的是,本文考虑的事件变量都是离散变量,事实上实际工程中许多变量是连续变量,如洪水发生的概率就应该是一个连续变量。当变量是连续变量时,事件树方法等无法处理,而贝叶斯网络则在一些情况下可以考虑。另外,大坝风险分析中还应包含经济损失和生命损失的估算,这在事件树方法中要单独另行计算,而在贝叶斯网络中只要相应增加一些结点就可以把它们结合起来一起考虑,有关这些方面的内容将另文讨论。

参考文献:

[1] 福斯特 M A,李季川.用事件树法估计土石坝失事的概率:上[J].水利水电快报,2003,24(5):5-7.(FOST M A,LI Ji-chuan. Evaluating the fail probability of earth dam by event tree :on[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2003,24(5):5-7.(in Chinese))

[2] 福斯特 M A,李季川.用事件树法估计土石坝失事的概率:下[J].水利水电快报,2003,24(6):23-25.(FOST M A,LI Ji-chuan. Evaluating the fail probability of earth dam by event tree :w[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2003,24(6):23-

25.(in Chinese))

- [3] 贾超,李新群.高坝风险分析的事件树法[J].水力发电,2006,32(8):71-74.(JIA Chao,LI Xin-qun.Event tree method in risk analysis for high dams[J].Water Power,2006,32(8):71-74.(in Chinese))
- [4] 解家毕,孙东亚.事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2006,4(2):133-137.(XIE Jia-bi,SUN Dong-ya.The constructing principle of event tree method and its application in risk analysis for dykes and dams[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2006,4(2):133-137.(in Chinese))
- [5] 陈在铁.高拱坝失效故障树模型与失效概率[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(6):688-692.(CHEN Zai-tie.Study on fault tree model and failure probability of high arch dams[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2006,34(6):688-692.(in Chinese))
- [6] 周建方,唐椿炎,许智勇.事件树、故障树、决策树与贝叶斯网络[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(3):351-355.(ZHOU Jian-fang,TANG Chun-yan,XU Zhi-yong.Event tree,fault tree,decision-making tree and Bayesian network[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2009,37(3):351-355.(in Chinese))
- [7] PEARL J.Propagation and structuring in belief network[J].Artificial Intelligence,1986,29(3):241-248.
- [8] STRAUB D,KIUREGHIAN A D.Combining Bayesian networks with structural reliability methods:methodology[J].Journal of Engineering Mechanics,2010,136(10):1248-1258.
- [9] STRAUB D,KIUREGHIAN A D.Combining Bayesian networks with structural reliability methods:application[J].Journal of Engineering Mechanics,2010,136(10):1259-1270.
- [10] BROMLEY J,JACKSON N A,CLYMER O J,et al.The use of Hugin to develop Bayesian networks as an aid to integrated water resource planning[J].Environmental Modelling & Software,2005,20:231-242.
- [11] 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[J].武汉大学学报:工学报,2007,40(16):24-29.(LI Dian-qing,YAN Li-li,SHAO Dong-guo.Reliability evaluation of earth-rock dams using Bayesian network[J].Engineering Journal of Wuhan University,2007,40(16):24-29.(in Chinese))
- [12] 周建方,唐椿炎,许智勇.贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用[J].水力发电学报,2010,29(1):192-196.(ZHOU Jian-fang,TANG Chun-yan,XU Zhi-yong.Application of Bayesian networks to dam's risk analysis[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(1):192-196.(in Chinese))
- [13] 李雷,王仁钟,盛金宝,等.大坝风险评价与风险管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [14] 张连文,郭海鹏.贝叶斯网引论[M].北京:科学出版社,2006.
- [15] JENSEN F V,NIELSEN T D.Bayesian networks and decision graphs[M].New York:Springer,2007.