

基于情景的大坝运行安全突发事件动态演化模型

林 芝,郭玉嵘

(国家能源局大坝安全监察中心,浙江 杭州,311122)

摘 要:从突发事件特点和应急决策需求出发,将大坝运行安全突发事件看成是一个连续动态的演化过程,提出大坝运行安全突发事件情景五元组描述方法,构建基于目标节点演化阶段的贝叶斯网络模型,并将该模型应用到洪水对大坝运行安全影响事件的情景构建中。本方法揭示了突发事件的内在规律和演化逻辑,使应急措施更具科学性和可操作性。

关键词:大坝运行安全;突发事件情景演化;结构化描述;动态演化模型

Title: Scenario-based dynamic evolution model for dam operation emergencies// by LIN Zhi and GUO Yurong// Large Dam Safety Supervision Center, National Energy Administration

Abstract: Starting from the characteristics of emergencies and the requirements for emergency decision-making, this study treats dam operation emergencies as a continuous dynamic evolution process, proposes a scenario quintuple description method for dam operation emergencies, and constructs a Bayesian network model based on the evolution phases of target nodes. This model is applied to scenario development where flood impacts dam operation safety. The approach reveals the intrinsic patterns and evolutionary logic of emergencies, thereby enhancing the scientific rigor and operational feasibility of emergency measures.

Key words: dam operation safety; emergency scenario evolution; structured representation; dynamic evolution model

中图分类号:TV697

文献标志码:B

文章编号:1671-1092(2025)04-0001-07

0 引 言

大坝运行安全突发事件具有突发性和不可预测性,且事件演变规律复杂,发生初期信息往往模糊、碎片化、矛盾或缺失,导致决策难度加大。近年来地震、泥石流、极端暴雨频发,导致大坝运行安全突发事件时有发生,如2023年甘肃积石山地震、2019年汶川县彻底关沟泥石流、2023年北京永定河洪水等突发灾害均对大坝运行安全产生了一定影响。以往对大坝运行安全突发事件的描述通常采用“严重”“较大”“可能”等模糊表述,且事件关键信息分散,难以快速构建事件的时空演化图谱,影响应对的科学性和针对性。

分析以往事件案例发现,突发事件的发展总是遵循一定的规律,沿着一定的演化阶段变化;同一突发事件,在事件演化的不同阶段具有不同的特点,应采取不同的应急处置策略。因此,采用动态

演化的“情景-应对”响应模式,能够为应急决策提供有效的支持。突发事件情景演化的描述由来已久,早在1967年,Herman Kahn等首次将“情景”定义为“对未来情形和能使事态由初始状态发展为未来状态的一系列事实的描述”^[1]。

国内外大量研究关注具体类型的突发事件演化特征和规律,如Cooke利用系统动力学方法分析了1992年加拿大新斯科舍地区矿难发生、演化的原因^[2];Cheung等对由暴风雨引起的洪水灾害事件的发生、演化规律进行了研究^[3];赵廷彦探讨了社会突发事件的成因和演化趋势及周期,研究了社会转型期东北区域社会突发事件演化机制,并提出了社会突发事件应急处理的建议^[4];孙琦等将供应链突发事件的发生演化过程划分为预防、控制和应对三个阶段进行分析^[5];在突发事件演化模型相关研究方面,Steven Fink提出的突发事件演化F模型^[6]和Mitroff等提出的突发事件演化M模型^[7]是其中较为

著名的模型;魏一鸣等运用复杂系统模拟工具 Swarm,建立洪水灾害时空演化模拟平台,通过实例模拟,获得洪水灾害演化的时空规律^[8];方志耕等结合贝叶斯推理工具和 GERT 网络模型,构建了基于贝叶斯推理的灾害演化动态 GERT 网络模型^[9];袭承柱等运用复杂系统理论和 Multi-Agent 建模方法,构建了煤矿水害演化模型,定性展示了水害演化过程和水害防治策略的效果^[10]。

本研究从大坝运行安全突发事件可能导致的影响后果和严重程度出发,对大坝运行安全突发事件的风险因素、事件后果和应对任务逐一进行解剖,提出了大坝运行安全突发事件情景结构化描述方法,并构建了基于情景的大坝运行安全突发事件动态演化模型。该模型可以直观、全面地描述事件的要素属性,有助于决策者根据事件演化情况在关键决策点做出科学、有效的应急响应。

1 大坝运行安全突发事件情景构建

1.1 情景定义

大坝运行安全突发事件整体上是一个连续动态的演化过程,可以视为多个情景要素按照发生的时间顺序组成的多属性集合。一般按照事件演化阶段、事件类型、事件影响、事件级别及所采取的响应措施等要素来描述一个具体事件。

事件演化阶段描述了突发事件发展的阶段,一般包括预警期、响应期和善后期,其中响应期还可细分为爆发期、加剧期和缓解期。大坝运行安全突发事件一般包括自然灾害类(如洪水、台风、暴雨、凌汛、地震、滑坡和泥石流等灾害)、事故灾难类(如上游溃坝、上游非正常泄水、库区大体积漂浮物、主体结构缺陷隐患恶化、泄洪建筑物结构受损)、运行管理类(如监测系统故障、水情测报系统故障、闸门及启闭机故障)、社会安全类(如恐怖袭击及其他事件)。事件影响描述了突发事件可能对大坝本质安全造成的影响,包括影响挡水安全、影响结构安全、影响渗流稳定、泄水失控、泄水受阻等。事件级别描述了突发事件对大坝运行安全可能造成后果的严重程度和可控性,分为 I 级(特别重大)、II 级(重大)、III 级(较大)、IV 级(一般)四个级别。处置措施属性描述了针对突发事件不同演化阶段采取的工程措施,可能影响突发事件演化结果,如开启泄洪

通道、临时封堵缺口、疏通下游河道、抢修泄洪设施、上游水电站减少出库流量、土石坝坝前碎石抛填等。

在对突发事件进行描述时,应描述某些要素的属性状态在一定时间范畴内相对稳定的情形,同一状态的要素属性、前后续的事件情景之间都存在逻辑关系。当某一情景的关键要素属性发生改变时,事件就演化为下一个情景,决策者的响应措施也应该随着事件演化情景变化而调整。因此,可以通过提炼突发事件情景的关键要素来建立情景模型,方便决策者实时掌握关键情景的演化情况,为应急决策提供参考。

1.2 情景划分和要素提炼

对于一个大坝运行安全突发事件在某一阶段的情景,可以采用五元组描述方式:

$$S=\{DS, ET, EI, DM, EL\} \quad (1)$$

其中: S (Stage)表示突发事件在某一相对稳定状态下的情景; DS (Development Stage)表示事件演化阶段属性; ET (Event Type)表示事件类型属性; EI (Event Impact)表示事件影响属性; EL (Event Level)表示事件级别属性; DM (Disposal Measures)表示针对当前事件情景采取的处置措施属性。简称 DTIML 模型。

多个事件情景的连续演化可以描述一个突发事件,因此突发事件 Em 可以表示为情景 S 的要素集合,即 $Em=\{S_i \mid i=1,2,\dots,n\}$,其中 i 表示情景个数。

1.3 情景描述实例

基于上述情景划分和要素提炼框架,分析 2023 年积石山县 6.2 级地震导致某电站大坝运行安全突发事件,通过分析提取突发事件的 DTIML 五元组属性,实现对突发事件的结构化描述。

1.3.1 工程概况

电站位于青海省民和县与甘肃省积石山县交界的黄河干流上,水库总库容 411 万 m^3 ,无调节能力。枢纽工程主要由左岸河床式厂房、泄洪闸、右岸砂砾石坝组成,大坝坝顶高程 1 786.00 m。河床式厂房位于左岸滩地,最大坝高 45.5 m;泄洪闸共 3 孔,布置于厂房右侧主河床,最大坝高 45.5 m;右岸砂砾石坝最大坝高 16 m。坝址地震基本烈度为 VII 度,主要建筑物按 VII 度设防。

1.3.2 突发事件经过

2023年12月18日23时59分,甘肃积石山发生6.2级地震,距震中100 km范围内地震烈度Ⅵ度及以上区有4座大坝,其中位于Ⅷ度区的某电站大坝受地震影响明显。地震导致机组全停,全厂失电,以柴油发电机带泄洪闸门及公用排水系统运行。地震发生后立即开展了现场检查,发现2号和3号机组进水口闸门掉落,右岸砂砾石坝顶沿坝轴线方向出现两条裂缝,各长125 m,最大深度1.6 m,最大宽度9 cm。电站采取“闸门全开降低库水位,并恢复至天然河道”的应急措施。地震后开展了加密检查、监测和分析,发现混凝土坝顶防浪墙无明显变形,土坝坝顶路面有开裂、塌陷,坝体中上部上游坝坡有开裂,下游坝坡正常,渗流量和扬压力无明显变化。

1.3.3 情景梳理及结构化描述

本事件是因地震导致的大坝运行安全突发事件,大致可分为四个阶段。第一阶段:坝址区突发超出设防烈度的地震,导致机组全停,全厂失电,以柴油发电机带泄洪闸门及公用排水系统运行;第二阶段:震后立即开展现场检查,发现右岸砂砾石坝顶沿坝轴线方向出现贯穿性裂缝,采取“闸门全开降低库水位,并恢复至天然河道”的应急措施;第三阶段:震后开展加密检查、监测和分析,初步得出大坝运行安全的结论;第四阶段:进一步评估防渗体系安全性,制定蓄水计划,按计划开展水库蓄水和恢复生产工作。

采用DTIML模型结构化描述上述突发事件,可以表示为:

$$Em = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \left\{ \text{爆发期} \right\} \left\{ (\text{地震}) (\text{机组停机, 全厂失电}) \right\} \left\{ \text{未知} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{启动柴油发电机应急供电} \right\} \left\{ \text{地震Ⅱ级响应} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{响应期} \right\} \left\{ (\text{地震}) (\text{主体结构受损}) \right\} \left\{ \text{影响挡水安全} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{闸门全开、降低库水位、恢复天然河道} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ (\text{地震Ⅱ级响应}) (\text{挡水结构受损Ⅳ级}) \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{缓解期} \right\} \left\{ \text{主体结构受损} \right\} \left\{ \text{初步得出大坝运行安全的结论} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{低水位运行} \right\} \left\{ \text{挡水结构受损Ⅳ级} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{善后期} \right\} \left\{ \text{主体结构受损} \right\} \left\{ \text{初步得出大坝运行安全的结论} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{评估防渗体系安全性, 制定蓄水计划} \right\} \right\} \\ \left\{ \left\{ \text{事件级别降至Ⅳ级以下} \right\} \right\} \end{array} \right\} \quad (2)$$

2 大坝运行安全情景演化模型

2.1 贝叶斯网络模型

贝叶斯网络模型是一种基于网络结构的有向图描述,能够有效地进行不确定知识表达与推理,示意图见图1。

贝叶斯网络模型利用节点变量表示各个信息要素,用连接节点之间的有向边表示各信息要素之间的推理关系,用条件概率表示各信息要素之间的影响程度,节点之间的因果关系和影响程度构成了贝叶斯网络结构。网络中有父节点、子节点和目标节点三种节点,父节点表示初始条件(如图1中的A、B、C、E),子节点即中间节点(如图1中的D、F),既是前置节点的输出,也是后续节点的输入,基于因果关系和条件概率推理得到目标节点(如图1中的G)。

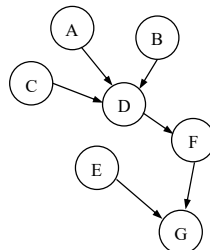


图1 贝叶斯网络

Fig. 1 Diagram of Bayesian network

2.2 目标节点的确定

大坝运行安全突发事件情景演化分析的核心在于要素间作用关系的探究,从微观角度来看,要素间作用关系是要素属性间作用结果的呈现,当要素属性状态发生变化,突发事件即由当前情景演化为下一情景。因此,可以把DTIML模型中的五元组要素看成贝叶斯网络模型中的节点变量,利用要素之间演化关系的融合分析确定目标节点是建立突发事件情景推演的贝叶斯网络模型需要解决的重要问题。

在大坝运行安全突发事件响应决策中,影响大坝本质安全的事件级别是应急决策的主要依据,因此将某一阶段的事件级别要素(EL_i)确定为贝叶斯网络模型中的目标节点。

2.3 动态演化模型

上述贝叶斯网络模型可以表达当前情景下属性要素的作用关系,是相对静态的网络模型。融入事态发展阶段属性,可以使突发事件情景在时间推

理与事件发展上保持一致性与连续性,因此引入动态的贝叶斯网络模型。假设在 t_i 时刻, x 为贝叶斯网络中因果关系的原因集合,在 t_{i+1} 时刻, y 为贝叶斯网络中因果关系的结果集合,则有 $x \rightarrow y$,其中集合 x 包含 m 个节点,每个节点记为 $x_i(i=1,2,\cdots,m)$,节点 x_i 与 y_i 之间存在因果关系与
时序关系,将整个情景演化过程根据时间 t 的推移划分为 n 个发展阶段。根据大坝运行安全突发事件演化特点,事件是否发展为下一阶段主要由目标节点的级别描述来决定,构建基于目标节点演化阶段的网络模型,见图2。

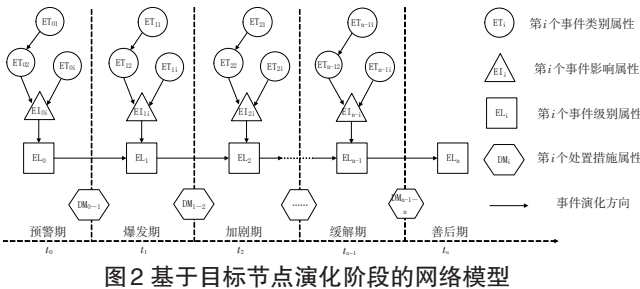


图2 基于目标节点演化阶段的网络模型
Fig. 2 The network model based on evolution phases of target nodes

3 大坝运行安全突发事件动态演化模型应用实例

3.1 洪水事件网络模型

将贝叶斯网络应用到洪水对大坝运行安全影响的情景要素描述过程中,建立父节点、子节点和目标节点之间的网络模型,见图3。父节点的计算基于预测预报、监测监控、信息报告、事件会商等,基于已有的经验知识,匹配相关的定量描述。子节点的条件概率集合多种统计方法得出。在贝叶斯网络中,子节点的状态描述受父节点影响,会随着父节点的增减或新证据的引入而变化。节点之间的因果关系推理可采用数据学习建模、专家知识建模及数据学习与专家知识相结合的建模方法。各节点状态描述见表1。

3.2 某水电站大坝泄洪弧门闸顶过水事件动态演化模型

以2021年某水电站大坝泄洪弧门闸顶过水事件为例,验证分析本研究提出的大坝运行安全突发事件动态演化模型的实用性。

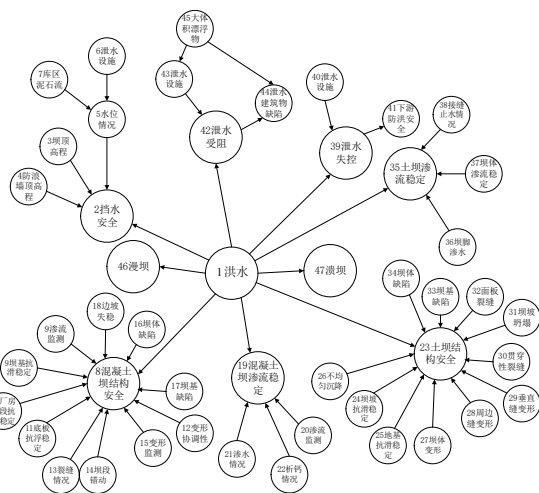


图3 洪水对大坝运行安全影响事件贝叶斯网络
Fig. 3 Bayesian network of flood impact on dam operation safety

3.2.1 工程概况

某水电站位于芙蓉江干流下游河段,水库总库容3 259万 m^3 ,属日调节水库,来水主要受上游梯级水库泄水控制。工程枢纽由碾压混凝土重力坝、坝身溢流表孔、右岸引水流道和发电厂房组成。碾压混凝土重力坝最大坝高55 m,坝顶全长153.07 m,坝顶高程388.00 m。泄洪建筑物为5孔溢流表孔,合计最大下泄流量13 200 m^3/s 。

3.2.2 事件梳理及结构化描述

2021年9月16日,流域遭遇大到暴雨,电站收到《关于启动防汛Ⅳ级应急响应的紧急通知》。至17日4时,电站因入库洪水较大,水位迅速上涨,泄洪时只打开了1扇弧门,在相继开启第2扇至第5扇(共5扇)弧门时,门顶过水,油缸启动压力超过设计值,启门失败。由于泄流能力不足,致使库水位持续上涨。17日13时18分,水库水位最高达到387.44 m,超过校核洪水位387.03 m,距离坝顶高程仅0.56 m,造成水电站大坝险情。经过地方防汛办协调上游水库错峰运行和现场应急抢险,库水位于17时55分降至闸顶383.50 m以下,随即开启剩余4孔泄洪弧门,恢复正常泄洪运行方式。

本事件是因暴雨导致的超标准洪水叠加闸门运行故障导致的大坝运行安全突发事件,大致可分为五个阶段。第一阶段:流域遭遇暴雨,启动防汛Ⅳ级应急响应;第二阶段:入库洪水较大,水位持续上涨,开启泄洪设施;第三阶段:未能打开所有闸门,泄洪能力不足致使水位超过校核洪水位,距离坝顶仅0.56 m;第四阶段:上游水库拦蓄,减少入库流量,库水位逐渐

表 1 洪水对大坝运行安全影响事件贝叶斯网络节点及状态描述

Table 1 Bayesian network nodes and state representations of flood impact on dam operation safety

序号	节点	状态描述	目标节点级别	节点属性
1	洪水 ^①	重现期 20 年、重现期 100 年、设计标准、校核标准	I、II、III、IV	父节点
2	挡水安全 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
3	坝顶高程 ^③	满足、不满足	—	父节点
4	防浪墙顶高程 ^③	满足、不满足	—	父节点
5	水位情况	历史最高水位、设计洪水位、校核洪水位	—	子节点
6	泄水设施故障 ^⑤	未发生、发生但无影响、有影响	—	父节点
7	库区泥石流 ^⑤	未发生、发生但无影响、有影响	—	父节点
8	混凝土坝结构安全 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
9	坝基抗滑稳定 ^③	满足、不满足	—	父节点
10	厂房坝段抗浮稳定 ^③	满足、不满足	—	父节点
11	通航建筑物底板抗浮稳定 ^③	满足、不满足	—	父节点
12	变形协调性(拱坝) ^④	有异常、无异常	—	父节点
13	裂缝情况 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
14	坝段错动 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
15	变形监测 ^④	有异常、无异常	—	父节点
16	坝体缺陷 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
17	坝基缺陷 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
18	左右岸边坡失稳 ^⑤	未发生、发生但无影响、有影响	—	父节点
19	混凝土坝渗流稳定 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
20	渗流监测 ^④	有异常、无异常	—	父节点
21	渗水情况 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
22	析钙情况 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
23	土坝结构安全 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
24	坝坡抗滑稳定 ^③	满足、不满足	—	父节点
25	地基抗滑稳定 ^③	满足、不满足	—	父节点
26	不均匀沉降 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
27	坝体变形 ^④	有异常、无异常	—	父节点
28	周边缝变形 ^④	有异常、无异常	—	父节点
29	垂直缝变形 ^④	有异常、无异常	—	父节点
30	贯穿性裂缝 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
31	坝坡坍塌 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
32	面板裂缝 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
33	坝基缺陷 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
34	坝体缺陷 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
35	土坝渗流稳定 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
36	坝脚渗水	无、渗水清澈、渗水浑浊	—	父节点
37	坝体渗流稳定性 ^③	满足、不满足	—	父节点
38	接缝、止水情况 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
39	泄水失控 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
40	泄水设施故障 ^⑤	未发生、发生但无影响、有影响	—	子节点

41	下游防洪安全的影响	一般影响、较大影响、重大影响、特别重大影响	—	子节点
42	泄水受阻 ^②	—	I、II、III、IV	目标节点
43	泄水设施故障 ^⑤	有影响、无影响	—	子节点
44	泄水建筑物缺陷 ^⑤	有影响、无影响	—	子节点
45	大体积漂浮物 ^⑤	有影响、无影响	—	父节点
46	漫坝	有、无	I、II	目标节点
47	溃坝	有、无	I	目标节点

注:①节点作为事件类型属性,为网络中的父节点,设置I、II、III、IV级,可根据实际管理需要和大坝防洪标准设置入库流量阈值;②节点作为事件影响属性,其影响级别为网络中的目标节点,设置I、II、III、IV级,可根据父节点的状态描述,确定目标节点级别属性;③节点根据设计及复核情况进行判断,设置满足、不满足;④节点根据监测监控结果分析判断对大坝运行安全是否有影响,设置有异常、无异常;⑤节点根据现场检查情况判断对大坝运行安全是否有影响,设置有影响、无影响。

降至闸顶以下;第五阶段:开启所有闸门,大坝恢复正常运行。DTIML模型结构化描述可以表示为:

$$Em = \left\{ \begin{array}{l} \{ \text{预警期} \} \{ \text{暴雨} \} \{ \text{无} \} \{ \text{防汛IV级} \} \\ \{ \text{爆发期} \} \{ \text{暴雨} \} \{ \text{洪水} \} \{ \text{影响挡水安全} \} \\ \{ \text{成功开启一扇闸门} \} \{ \text{水位持续上涨,挡水安全IV级} \} \\ \{ \text{加剧期} \} \{ \text{暴雨} \} \{ \text{洪水} \} \{ \text{闸门启闭机故障} \} \\ \{ \text{影响挡水安全} \} \{ \text{泄水受阻} \} \{ \text{无} \} \\ \{ \text{水位超过校核洪水位,泄水受阻、挡水安全II级} \} \\ \{ \text{缓解期} \} \{ \text{闸门及启闭机故障} \} \{ \text{泄水受阻} \} \{ \text{上游水库拦蓄} \} \\ \{ \text{水位下降至闸顶以下,挡水安全、泄水受阻IV级} \} \\ \{ \text{善后期,结束响应} \} \{ \text{无} \} \{ \text{无} \} \{ \text{开启所有闸门} \} \\ \{ \text{大坝恢复正常运行} \} \end{array} \right\}$$

3.2.3 贝叶斯网络动态演化模型

某水电站大坝泄洪弧门闸顶过水事件贝叶斯网络动态演化模型见图4,各节点状态描述见表2。

4 结 语

通过分析大坝运行安全突发事件情景要素中各类属性的共性特点,提出DTIML模型。在此基础上,将贝叶斯网络应用到洪水对大坝运行安全影响的情景演化过程中,构建了贝叶斯网络动态演化模型,并以2021年某水电站大坝泄洪弧门闸顶过水事件案例进行验证分析。

通过构建大坝运行安全突发事件的结构化描述模型,揭示突发事件的内在规律和演化逻辑,使应急措施更具科学性和可操作性。以事件级别为目标节点的贝叶斯网络动态演化模型有助于决策者在微

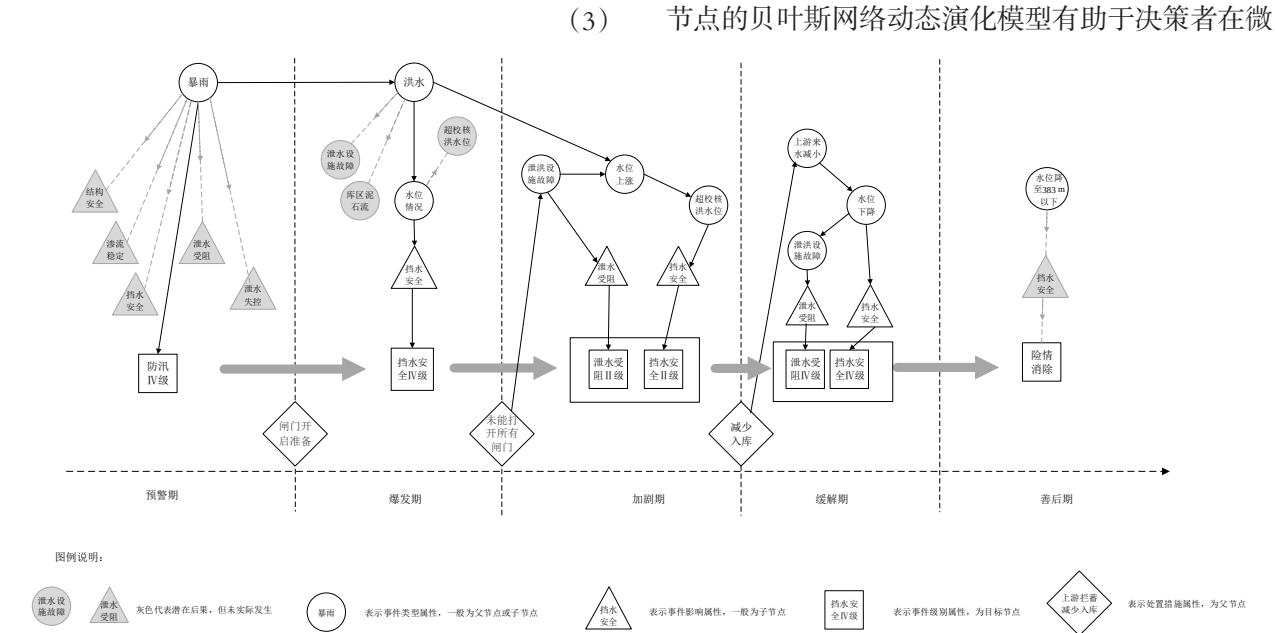


图4 某水电站大坝泄洪弧门闸顶过水事件贝叶斯网络动态演化模型

Fig. 4 Dynamic evolution model of Bayesian network of the radial gate overtopping incident at a hydropower dam

表2 某水电站大坝泄洪弧门闸顶过水事件贝叶斯网络节点及状态描述

Table 2 Bayesian network nodes and state representations of the radial gate overtopping incident at a hydropower dam

发展阶段	事件类型	情景描述/处置措施	已造成/将造成的影响	潜在影响	目标节点级别	节点属性
预警期	暴雨	流域遭遇大到暴雨	无	结构安全、渗流稳定、挡水安全、泄水受阻、泄水失控	防汛Ⅳ级	父节点/目标节点
爆发期	洪水	流域降雨持续,且上库相继放水	—	结构安全、渗流稳定、泄水受阻、泄水失控	—	父节点
	水位情况	水位迅猛上涨	将超出正常蓄水位383 m	—	—	子节点
	挡水安全	—	—	—	挡水安全Ⅳ级	目标节点
加剧期	洪水	流域降雨持续,且上库相继放水	—	结构安全、渗流稳定、泄水失控	—	父节点
	入库流量	陡增至4 117 m³/s	接近重现期5年	—	—	子节点
	水位情况	达到387.44 m	超过闸门顶高程	—	—	子节点
	挡水安全	—	闸顶过水	—	挡水安全Ⅱ级	目标节点
	泄水设施故障	5扇闸门只打开1扇,其余4扇未开启	泄流能力严重不足	—	泄水受阻Ⅱ级	目标节点
缓解期	洪水	降雨渐止,上游电站出库流量减小	—	结构安全、渗流稳定、泄水失控	—	父节点
	入库流量	入库流量降至1 300 m³/s以下	—	—	—	父节点
	水位情况	逐渐降低	—	—	—	父节点
	泄水设施故障	闸门及启闭机故障	—	—	泄水受阻Ⅳ级	目标节点
	挡水安全	水位降至闸门顶以下	—	—	挡水安全Ⅳ级	目标节点
善后期	水位	正常蓄水位383 m以下	无	无	结束响应	子节点
	结构安全	—	无	无		目标节点
	渗流稳定	—	无	无		目标节点
	挡水安全	—	无	无		目标节点
	泄水受阻	闸门全部打开	无	无		目标节点
	泄水失控	—	无	无		目标节点

观层面感知事件演化的状态描述,以动态视角进行演化分析,可以在形势紧张、资源相对有限的情况下,为决策者提供科学、有效的救援调度方案。 ■

参考文献:

[1] Herman K,Anthony J W.The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years[M].New York: The Macmillan Company,1967.

[2] Cooke D L.A system dynamics analysis of the Westray mine disaster[J].System Dynamics Review,2003,19(2):139-166.

[3] Cheung K F,Phadke A C,Wei Y,et al.Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management[J].Ocean Engineering,2003,30(11):1353-1386.

[4] 赵廷彦.转型期东北区域社会突发事件生成原因及演化机制研究[D].长春:吉林大学,2009.

[5] 孙琦,季建华.基于快速恢复的供应链突发事件演化过程分析[J].软科学,2012,26(11):5.

[6] Fink S.Crisis Management: Planning for the Inevitable[M].New York: American Management Association,1986.

[7] Mitroff I I,Anagnos G.Managing Crises Before They Happen: What Every Executive and Manager Needs to Know about Crisis Managemeng[M].New York: American Management Association,2001.

[8] 魏一鸣,张林鹏,范英.基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟研究[J].管理科学学报,2022,5(6):39-46.

[9] 方志耕,杨保华,陆志鹏,等.基于 Bayes 推理的灾害演化 GERT 网络模型研究[J].中国管理科学,2009,17(2):102-107.

[10] 龚承柱,李兰兰,柯晓玲,等.基于 multi-agent 的煤矿水害演化模型[J].煤炭学报,2012,37(6):1005-1009.

收稿日期:2025-04-09;修回日期:2025-05-19

作者简介:林 芝(1981—),女,浙江宁波人,高级工程师,主要从事大坝结构安全研究及运行安全管理工作。

作者邮箱:lin_z@hdec.com