

# 基于故障树法的水闸工程安全预警体系研究

臧英平<sup>1</sup>, 沃玉报<sup>1</sup>, 徐影<sup>2</sup>

(1. 南京市三汊河口闸管理处, 江苏 南京 210036; 2. 河海大学 商学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 针对水闸工程主体运行中, 运行安全事故的发生将造成巨大的人民生命财产损失, 建立了可观测的水闸安全预警体系。以南京三汊河闸门失稳风险为例, 采用故障树法对闸门整体失稳事故进行分析, 得到可观测的预警指标体系。并提出了指标观测方法以及预警指标等级, 便于分级预警工作。该成果可为水管单位开展水闸工程安全运行风险预警工作提供技术指导。

**关键词:** 水闸工程; 故障树法; 安全预警体系; 水管单位

**中图分类号:** TV66      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2015)04-0163-06

## Research on safety warning system of sluice project based on fault tree analysis

ZANG Yingping<sup>1</sup>, WO Yubao<sup>1</sup>, XU Ying<sup>2</sup>

(1. Sancha River office of Estuary Sluice Management of Nanjing, Nanjing 210036, China;

2. School of Business, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Aimed at the operation of sluice project the run security accidents will result in the giant loss of lives and property. In order to set up a warning system of security, the paper took the gate instability risk for example and analyzed gate instability accident, and got the index grade of warning system so as to classify early warning work. Then it also proposed the method of indicator observation and early warning indicator index rating were for the classified early warning. The Result can provide a theoretical basis for water management units to do warning work for the risk of safe operation of sluice project.

**Key words:** sluice project; fault tree analysis(FTA); safty warning system; water project management unit

## 1 研究背景

水管单位作为水利工程的管理机构,水管单位的安全管理直接关系到社会的稳定和国民经济的持续、快速、健康发展。水闸工程的管理作为水管单位的主要管理工作,对水管单位有着非常重要的意义。水管单位只有建立全面的安全管理体系,才能够实现水管单位安全管理精细化的目标。因而对于水闸工程运行中的安全风险预警研究是非常有必要的。

目前对于水闸的安全运行研究大多集中在安全评价研究。李东方<sup>[1]</sup>建立了以水闸稳定性、抗震能力、消能防冲、过水能力等为子目标的递阶层次结构水闸安全性评价指标体系;孙琪琦<sup>[2]</sup>、徐兴中等<sup>[3]</sup>

均将水闸评价指标体系分为四层,并对评价指标体系进行了进一步地细化;张利青<sup>[4]</sup>运用多层次灰色模糊综合评价法,利用 Borland Delphi 7.0 成功开发了拥有良好操作界面的水闸工程安全综合评价系统,徐磊等<sup>[5]</sup>、何艳霞<sup>[6]</sup>引入物元可拓评价理论,建立评价模型进行水闸安全评价,郑茂海<sup>[7]</sup>按复核计算和安全监测内容,建立了与水闸安全鉴定程序对应的评价指标体系。目前,国外对水利工程安全主要集中在技术研究。Estes 等<sup>[8]</sup>认为通过常规视觉信息建立 CI 检查模型监测人字闸的可靠性, Bond 等<sup>[9]</sup>通过声波传播时间断层扫描方法提高大坝的质量评估, Karastathis 等<sup>[10]</sup>利用地震和 GPR 技术进行混凝土大坝的扫描。

收稿日期:2015-01-13; 修回日期:2015-03-09

作者简介:臧英平(1965-),女,江苏南京人,本科,高级工程师,长期从事长江南京河段河道治理、工程管理、水资源管理及组织文化建设等工作。

通讯作者:徐影(1992-),女,吉林白山人,硕士研究生,主要研究工程管理、风险管理。

通过以上文献分析,水闸的安全运行研究大多集中在安全评价研究的视角,而对于水闸安全预警指标构建、预警指标的观测方法以及预警指标分级等预警体系研究较少,本文以安全预警的视角,进行水闸安全预警系统研究。

## 2 风险因子识别

### 2.1 风险因子识别方法比较

我国常用的施工事故风险因子的识别方法有专家经验法、生产流程分析法、德尔菲(Delphi)方法、

故障树法(FTA),在对这些方法进行了对比之后(见表1)。本文采用故障树法进行风险因子识别。

### 2.2 安全运行风险因子识别

水利工程在运行中存在很多风险。通过对2013年事故的分类整理,总结出发生频率较高的三类事故,即人身事故、闸体整体失稳事故、闸门事故。本文以南京市三汊河闸体整体失稳事故为例,从事故发生的角度进行事故机理分析,其它几类事故可以以此种方法进行类推分析。

表1 风险因子识别方法对比分析

方法名称	优点	缺点	备注
专家经验法	简便、易行	受辨识人员知识、经验和占有资料的限制,可能出现遗漏	
生产流程分析法	可寻找辨识关键的风险点。对关键风险点进行历史资料分析,可以评估风险事件发生的频率	分析过程复杂	
德尔菲方法	对不易确定的因素可用此法,对可确定的因素也用此法作为引证	受预测者本人主观因素的影响,可能使结果产生偏差,操作繁琐	
故障树法	通过对事故发生的逻辑关系进行识别,具有准确性和预测性,并且可以进行进一步的定量分析	构造故障树的多余量相当繁重,难度也较大,对分析人员的要求也较高,	√

造成水闸整体失稳事故( $T_1$ )的因素很多,主要分为:结构破坏( $A_1$ )、基础破坏( $A_2$ ),见表2。分别从故障发生的逻辑关系对其进行安全运行风险因子识别:结构破坏事件主要由混凝土劣化( $B_1$ )导致,而导致混凝土劣化的因素主要为混凝土碳化( $X_1$ )、钢筋锈蚀( $X_2$ )、水流冲刷侵蚀( $X_3$ );基础破坏( $A_2$ )事件主要由渗透破坏( $B_2$ )、滑动破坏( $B_3$ )以及不均匀沉降( $B_4$ )所导致,其影响因素分别为:

(1) 渗透破坏( $B_2$ )。由扬压力过大( $C_1$ )以及冲刷破坏( $C_2$ )两方面导致,其中扬压力过大( $C_1$ )相关因素包括防渗铺盖损坏( $X_4$ )以及排水反滤层失效( $X_5$ ),冲刷破坏( $C_2$ )由闸门启闭未按要求严格进行( $X_6$ )以及消能防冲设施损坏( $X_7$ )。

(2) 滑动破坏( $B_3$ )。由上下游水位差过大( $C_3$ )以及扬压力过大( $C_1$ )两方面导致,其中上下游水位差过大( $C_3$ )相关因素包括水文预报不及时、不准确( $X_8$ )以及闸门启闭未按照严格要求进行( $X_6$ ),扬压力过大( $C_1$ )相关因素包括防渗铺盖损坏( $X_4$ )以及排水反滤层失效( $X_5$ )。

(3) 不均匀沉降( $B_4$ )。相关因素包括超荷载作

用( $X_9$ )以及不均匀荷载作用( $X_{10}$ )。

表2 安全运行风险因子

类型	风险因子
结构破坏 ( $A_1$ )	混凝土碳化( $X_1$ )
	钢筋锈蚀( $X_2$ )
	水流冲刷侵蚀( $X_3$ )
	防渗铺盖损坏( $X_4$ )
	排水反滤层失效( $X_5$ )
基础破坏 ( $A_2$ )	闸门启闭未按要求严格进行( $X_6$ )
	消能防冲设施损坏( $X_7$ )
	水文预报不及时、不准确( $X_8$ )
	闸门启闭未按照严格要求进行( $X_6$ )
	防渗铺盖损坏( $X_4$ )
	排水反滤层失效( $X_5$ )
	超荷载作用( $X_9$ )
	不均匀荷载作用( $X_{10}$ )

### 2.3 故障树构建

根据识别出的水闸整体失稳风险因子,建立图1故障树。

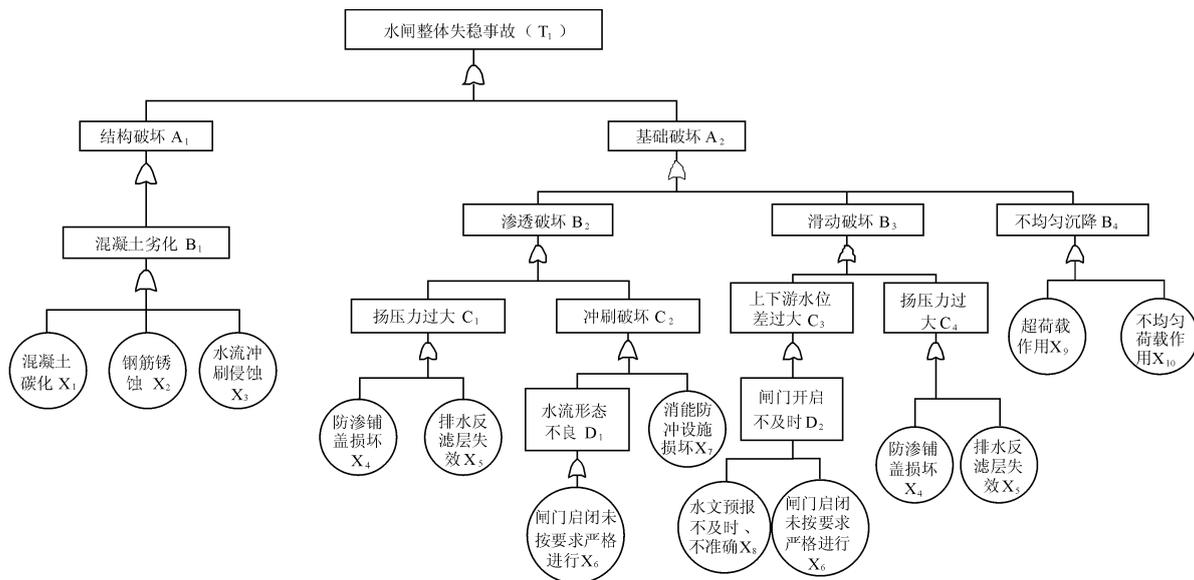


图 1 水闸整体失稳故障树

2.4 故障树分析

(1)求解最小割集。最小割集表示系统的危险性,即某一基本事件的发生导致顶上事件发生并可能带来危险,而且最小割集的数量越多,危险就越大<sup>[11]</sup>。该故障树的结构函数为:

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 + A_2 \\
 &= B_1 + (B_2 + B_3 + B_4) \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3) + (C_1 + C_2) + C_1C_3 + X_9 + X_{10} \\
 &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + D_1 + X_7 + \\
 &\quad D_2(X_4 + X_5) + X_9 + X_{10} \\
 &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + \\
 &\quad (X_6 + X_8)(X_4 + X_5) + X_9 + X_{10} \\
 &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + \\
 &\quad X_4X_6 + X_4X_8 + X_5X_6 + X_5X_8 + X_9 + X_{10} \quad (1)
 \end{aligned}$$

得到 13 个最小割集: $K_1 = \{X_1\}, K_2 = \{X_2\}, K_3 = \{X_3\}, K_4 = \{X_4\}, K_5 = \{X_5\}, K_6 = \{X_6\}, K_7 = \{X_7\}, K_8 = \{X_4X_6\}, K_9 = \{X_4X_8\}, K_{10} = \{X_5X_6\}, K_{11} = \{X_5X_8\}, K_{12} = \{X_9\}, K_{13} = \{X_{10}\}$ 。

在水闸整体失稳故障树中,任意一组最小割集的基本事件在同一时间发生,就肯定会导导致顶上事件发生,这说明造成顶上事件发生的所有可能途径有 13 个。

(2)结构度分析。结构重要度是指故障树结构中各基本事件的发生对顶上事件产生的影响程度,不同的基本事件对于顶上事件产生的影响程度也不同。第  $j$  个基本事件的结构重要度为<sup>[12]</sup>:

$$I_\phi(j) = \sum_{x_j \in G_r} \frac{1}{2^{n_j-1}} \quad (2)$$

式中: $I_\phi(j)$  为基本事件  $X_j$  结构重要度的近似判别值,  $I_\phi(j)$  值大者,则结构重要度大;  $X_i \in G_r$  为基本事件  $X_j$  属于最小割集  $G_r$ ;  $n_j$  为基本事件  $X_j$  所在的最小割(径)集中包含的基本事件的数目。

结合水闸整体失稳故障树的 13 个最小割集合,可得各基本事件的结构重要度见表 3:

表 3 基本事件的结构重要度值

基本事件	结构重要度值( $I_\phi$ )
$X_1, X_2, X_3, X_7, X_9, X_{10}$	0.08
$X_4, X_5, X_6$	0.23
$X_8$	0.15

通过比较得出各基本事件的结构重要度系数顺序:

$$I_\phi(4) = I_\phi(5) = I_\phi(6) > I_\phi(8) > I_\phi(1) = I_\phi(2) = I_\phi(3) = I_\phi(7) = I_\phi(9) = I_\phi(10)$$

(3)结果分析。从结构度分析结果来看,防渗铺盖损坏、排水反滤层失效以及闸门损坏未按要求严格进行这 3 个因素对水闸失稳事故的影响最大,其次是水文预报不及时、不准确因素,其它因素影响重要度相同,在预警过程中需要分级进行重视。

3 预警指标体系构建

针对水管单位全面安全管理的特点,基于前面对不同事故类型事故-风险因子的分析,采取对不同事故类型分别预警的策略,预警指标的选取采用故障树最小割集分析法,选取各个事故中故障树中

最小割集(即事故发生路径)上可观测的指标直接作为预警指标,若最小割集中无可观测指标,则需要对部分指标进行转化,转化成可观测的其它指标,作为预警指标。

通过分析水闸整体失稳故障树图的最小割集,可以看到,底部13个因素均会对事故的发生产生影响。在分析不同的事故发生路径的基础上,选取了各条路径上可以进行观测的指标,即扬压力、上下游水位差、地基不均匀沉降可直接进行观测,将其直接作为水闸整体失稳事故预警指标,同时,可转化指标包括过水能力、混凝土碳化、钢筋锈蚀、混凝土劣化、抗渗稳定性变差、抗滑稳定性变差等。其中对混凝

土劣化这项指标进行转化可以达到对3、4、5三条路径的预警,从减少管理人员工作量的角度出发,考虑将过水能力、混凝土劣化、抗渗稳定性变差、抗滑稳定性变差也作为预警指标,见表4。

#### 4 预警指标观测方法及分级

建立预警指标体系后,需要针对于预警指标进行相应方法的确定以便预警工作的进行。将这些可观测指标汇总整理,找出每个指标的观测方法,将对每个指标所处的不同的状态划分成4个等级,进行分级预警,见表5。

表4 水闸整体失稳事故最小割集可观测指标

割集	路径	可观测指标	可转化指标
1	(混凝土碳化,混凝土劣化,结构破坏,水闸整体失稳事故)		混凝土碳化、劣化
2	(钢筋锈蚀,混凝土劣化,结构破坏,水闸整体失稳事故)		混凝土劣化
3	(水流冲刷侵蚀,混凝土劣化,结构破坏,水闸整体失稳事故)		混凝土劣化
4	(防渗铺盖损坏,扬压力过大,渗透破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)	扬压力过大	渗透破坏
5	(排水反滤层失效,扬压力过大,渗透破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)	扬压力过大	渗透破坏
6	(闸门启闭未按要求严格进行,水流形态不良,冲刷破坏,渗透破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)		渗透破坏
7	(消能防冲设施损坏,冲刷破坏,渗透破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)		渗透破坏
8	((水文预报不及时、不准确,闸门开启不及时,上下游水位差过大)AND(防渗铺盖损坏,扬压力过大),滑动破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)	上下游水位差过大,扬压力过大	滑动破坏
9	((水文预报不及时、不准确,闸门开启不及时,上下游水位差过大)AND(排水反滤层失效,扬压力过大),滑动破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)	上下游水位差过大,扬压力过大	滑动破坏
10	((闸门启闭未按要求严格进行,闸门开启不及时,上下游水位差过大)AND(防渗铺盖损坏,扬压力过大),滑动破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)	上下游水位差过大,扬压力过大	滑动破坏
11	((闸门启闭未按要求严格进行,闸门开启不及时,上下游水位差过大)AND(排水反滤层失效,扬压力过大),滑动破坏,基础破坏,水闸整体失稳事故)	上下游水位差过大,扬压力过大	滑动破坏
12	(超荷载作用,地基不均匀沉降,基础破坏,水闸整体失稳事故)	地基不均匀沉降	
13	(不均匀荷载作用,地基不均匀沉降,基础破坏,水闸整体失稳事故)	地基不均匀沉降	

表 5 预警指标观测方法及等级划分

预警指标	观测方法	等级划分
混凝土劣化	检测混凝土强度;混凝土腐蚀状况、裂缝状况可以对建筑物表面状况进行观测	<p>(1)混凝土强度等级划分</p> <p>混凝土强度的评定以工程现场检测数据和《水工混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度之比为评定指数。</p> <p>(2)混凝土腐蚀状况、裂缝状况等级划分</p> <p>根据《水闸管理技术规程 SL75 - 94》、《危险房屋鉴定标准 JGJ125 - 99》等确定表面状况的评价标准如下:</p> <p>A、外观完好或仅有收缩缝</p> <p>B、表面分布有较细裂缝 (<math>&lt; 0.3\text{mm}</math>) 或出现局部剥落</p> <p>C、表面出现中等程度裂缝或出现有小范围成片剥落</p> <p>D、裂缝或剥蚀现象严重、钢筋外露</p>
渗透破坏	可以通过超声波监测渗流量以及安装渗流压力计监测渗流压力	<p>抗渗稳定性指标衡量综合三个指标,分别是抗渗长度、出逸坡降、最大水平坡降。</p> <p>(1)抗渗长度。采用实际抗渗长度实 <math>L_{\text{实}}</math> 和监测抗渗长度 <math>L_{\text{复}}</math> 之比作为评定指数 <math>L = L_{\text{实}} / L_{\text{复}}</math>。</p> <p>(2)出逸坡降。取监测出逸坡降与允许出逸坡降的比值 <math>K_{\text{d1}}</math> 作为出逸坡降的评定指数,当安全值大于 1.0 时,取 1.0。</p> <p>(3)最大水平坡降。取监测最大水平坡降与允许最大水平坡降的比值 <math>K_{\text{d2}}</math> 作为最大水平坡降的评定指数,当安全值大于 1.0 时,取 1.0。</p>
基底扬压力	基底扬压力一般通过设置纵横断面,安装渗压计进行监测。	
过闸水位差	过闸水位差通过在内、外河的左、右侧翼墙(靠近闸室)迎水面上各安装一组水尺,并在左岸边墩的上下游端头迎水面上,各安装一套超声波自记水位计进行监测。	<p>根据 SL265 - 2001 水闸设计规范,水闸的过闸水位差应根据上游淹没影响,允许的过闸单宽流量综合比较选定。一般平原区的水闸过闸水位差 <math>d</math> 采用评价标准:</p> <p>A、<math>d &lt; 0.3\text{m}</math></p> <p>B、<math>0.3 &lt; d &lt; 0.5\text{m}</math></p> <p>C、<math>0.5 &lt; d &lt; 0.7\text{m}</math></p> <p>D、<math>d &gt; 0.7\text{m}</math></p>

水闸整体事故的预警指标有 8 组,分别是混凝土强度、混凝土腐蚀和裂缝状况、抗渗长度、出逸坡降、最大水平坡降、基底扬压力、过闸水位差、闸基垂直位移、闸基水平位移。单指标的等级直接影响到整个事故的等级,如混凝土强度指标;多指标的等级综合影响整个事故的等级,以{基底扬压力、过闸水位差}这一组指标为例,整个事故处于安全状态时

有 4 种情况:两个指标都是 A 级、一个 A 级一个 B 级、一个 A 级一个 C 级、一个 A 级一个 D 级;整个事故处于值得关注状态时有 3 种情况:两个指标都是 B 级、一个 B 级一个 C 级、一个 B 级一个 D 级;整个事故处于危险状态时有两种情况:两个指标都是 C 级、一个 C 级一个 D 级;整个事故处于高度危险状态时只有一种情况:两个指标都是 D 级,见表 6。

表6 水管单位水闸整体失稳事故类型下预警指标预警等级及安全状态

水闸整体失稳事故类型	预警指标	等级划分			
		安全 [100,75)	值得关注 [75,50)	危险 [50,25)	高度危险 [25,0]
混凝土劣化	混凝土强度	A	B	C	D
	混凝土腐蚀状况、裂缝状况	A	B	C	D
	抗渗长度	A	B	C	D
渗透破坏	出逸坡降	A	B	C	D
	最大水平坡降	A	B	C	D
	基底扬压力、过闸水位差	AA、AB、AC、AD	BB、BC、BD	CC、CD	DD
不均匀沉降	闸基垂直位移	A	B	C	D
	闸基水平位移	A	B	C	D

## 5 结 语

(1)通过对水闸整体失稳事故进行故障树分析,得到了13条危险路径,根据指标的可观测性,选择了3条最便于观测的路径,并将路径上的指标进行转化得到了具有可观测性的预警指标体系。

(2)对于所有指标的观测方法进行了分析并对预警指标进行了分级处理,便于实际安全管理工作中的分级预警。

(3)本文事故致因仅考虑了主要影响因素,后续研究中,应当深度分析事故致因因子,厘清影响水闸安全的全面影响路径。

### 参考文献:

- [1] 李东方. 基于改进模糊综合评判理论的水闸安全性评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2004.
- [2] 孙琪琦. 水闸安全检测与评价——综合评判法在水闸安全评价中的运用[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [3] 徐兴中, 张龙天. 基于群决策和变权赋权法在水闸老化模糊综合评判中的应用研究[J]. 科技进步与对策, 2009, 26(21): 148-152.
- [4] 张利青. 水闸工程的安全综合评价系统研究[D]. 扬

州:扬州大学, 2008.

- [5] 徐磊, 何艳霞, 赵晓飞. 物元可拓理论在水闸安全评价中的可行性[J]. 科技信息, 2010(29): 766-767.
- [6] 何艳霞. 山东黄河水闸安全评价方法研究[D]. 济南:山东大学, 2010.
- [7] 郑茂海. 水闸安全评价理论与应用研究[D]. 济南:山东大学, 2010.
- [8] Estes A C, Frangopol D M. Updating bridge reliability based on bridge management systems visual inspection results[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(6): 374-382.
- [9] Bond L J, Kepler W F, Frangopol D M. Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part I - theory[J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(3): 133-146.
- [10] Karastathis V K, Karmis P N, Drakatos G, et al. Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams. Application at the Marathon Dam[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50(3): 247-260.
- [11] 赵冬安. 基于故障树法的地铁施工安全风险因素分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [12] 陈玉毅. FTA故障树分析研究[D]. 北京:北京交通大学, 2005.