

泵站工程风险评估辅助系统开发及应用

曹邱林¹,王兴华²,周逢强²

(1. 扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009; 2. 无锡市水利设计研究院有限公司,江苏 无锡 214000)

摘要:针对泵站工程风险分析的需要,采用层次分析法(AHP)和事故树分析法(FTA),以 Visual Basic 程序设计语言开发了泵站工程风险评估辅助系统。系统由泵站运行风险事故树分析模型、底事件风险度计算、泵站各组成部分的权重计算以及计算结果输出 4 个模块组成,可直观、方便、快捷地计算泵站运行风险概率及判定风险等级。将系统应用于大套第一抽水站的风险评估,得出大套第一抽水站运行风险概率为 74.921%,风险等级为 I 级,与实际计算结果一致,表明该系统具有可应用性。

关键词:泵站;风险评估;风险概率;风险等级;系统开发;大套第一抽水站

中图分类号:TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0077-05

Development and application of a risk assessment system for pumping stations//CAO Qiulin¹, WANG Xinghua², ZHOU Fengqiang² (1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Wuxi Hydraulic Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: To satisfy the needs of risk analysis for pumping stations, a risk assessment system for pumping stations was developed based on Visual Basic programming language by adopting the methods of analytic hierarchy process (AHP) and the fault tree analysis (FTA). The system consists of four modules, the FTA model of running risk, the risk degree analysis of basic events, the weighting calculation for each part of the pumping station, and the output of the calculated results. The intuitive, convenient and efficient calculation of pumping station running risk probability as well as determination of the risk level can be realized by this system. The system was applied to the risk assessment of the Datao First Pumping Station. The results suggest that the operating risk probability of the pumping station is 74.921%, and its risk degree is I-level. The results agree with the computed results which indicate that the system has good applicability.

Key words: pumping station; risk assessment; risk probability; risk degree; system development; the Datao First Pumping Station

泵站工程担负着区域性的防洪、除涝、灌溉、调水和供水的重任,为合理调度和管理水资源发挥了巨大功效。由于我国大中型泵站大多数运行时间较长,经长期运行后出现较多问题^[1],可能导致工程事故的发生,因此有必要对在役泵站工程进行风险分析,为管理人员判断病险泵站工程的风险程度提供依据,以便采取相应的处理方案或工程措施。

随着风险评估理论方法的不断发展,风险评估辅助系统在信息、电力、灾害、医学等领域得到了广泛应用,而在泵站工程方面的研究及应用较少。泵站工程风险分析涉及多种方法及较多数据,计算过程较为繁琐,为更方便地对泵站工程进行风险分析,提高泵站工程运行风险概率计算效率,本文在对泵站工程风险分析方法、内容等风险评估关键问题进

行研究的基础上,结合目前泵站工程安全评价需求,以计算泵站运行风险概率及判定风险等级为目标,利用 Visual Basic 6.0 开发了泵站工程风险评估辅助系统,并将其应用于大套第一抽水站的风险评估。

1 泵站工程风险分析方法

风险分析是指对给定系统进行危险辨识、概率计算、后果估计的全过程,是一种基于数据资料、运行经验、直观认识的科学方法^[2]。通过将风险量化,便于进行分析比较,可为泵站工程管理的科学决策提供可靠的依据,以便能够合理运用有限的人力、物力和财力等资源条件,采取最为适当的措施,达到彻底消除风险的最终目的。风险分析方法有多种,本文应用层次分析法和事故树分析法对泵站工程进

1.1 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)是一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法,它将决策者的经验判断进行量化,在目标因素结构复杂并且缺乏必要数据的情况下更便于使用,在实践中得到了广泛应用^[3-4]。根据层次分解法的基本原理,按照病险发生的部位、性质及病因之间的相互关系,对泵站工程病险进行划分归类,形成一个递阶层次结构,利用 AHP 中规定的比例标度对同一层次有关的因素的相对重要性进行比较,按从上到下的顺序,依据递阶层次结构对测度进行组合,以获得各个组成部分相对于决策目标的测度,即各组成部分的组合排序权值。

以江苏省大套第一抽水站为例,其病险识别模型见表 1。

表 1 大套第一抽水站病险识别模型

目标层	结构层	准则层
泵站运行风险 A	建筑物风险 B ₁	进水建筑物 C ₁
		站身建筑物 C ₂ 站身稳定 D₁ 渗流稳定 D₂ 结构承载能力 D₃
		出水建筑物 C ₃ 翼墙稳定 D₄ 出水池稳定 D₅
	机电设备风险 B ₂	水泵 C ₄ 汽蚀 D₆ 锈蚀 D₇ 磨蚀 D₈
		电机 C ₅ 绕组直流电阻 D₉ 绕组绝缘电阻 D₁₀ 吸收比 D₁₁
		变压器 C ₆ 吸收比 D₁₂ 绕组直流电阻 D₁₃ 绕组连同套管绝缘电阻 D₁₄
		拍门 C ₇ 门体 D₁₅ 门铰 D₁₆
		拦污栅 C ₈ 锈蚀 D₁₇ 断裂 D₁₈
	金属结构风险 B ₃	

1.2 事故树分析法

事故树分析法(fault tree analysis,FTA)也称为失效树分析法或故障树分析法,是安全系统工程中

的重要分析方法之一,是一种定性和定量相结合的分析方法^[5-7]。它是从要分析的特定事故或故障开始,层层分析其发生原因,一直分析到不能再分解为止;将特定的事故和各层原因(风险因素)之间用逻辑门符号连接起来,得到形象、简洁地表达其逻辑关系(因果关系)的逻辑图形,即事故树;通过对事故树简化、计算达到分析、评价的目的。事故树分析的程序常因评价对象、分析目的、粗细程度不同而不同,但一般可按以下程序进行:①确定分析对象系统和要分析的各对象事件(顶事件);②调查原因事件;③构建事故树;④定性分析;⑤定量分析;⑦得出结论。

江苏省大套第一抽水站运行风险事故树分析模型见图 1。

为便于对事故树作定性分析和定量计算,通常采用结构函数对事故树进行数学描述。考虑由 n 个不同的独立底事件所构成的事故树,引入二值变量 x_i 表示第 i 个底事件 e_i 的状态, x_i 仅取 0 或 1 两种状态,并定义:

$$x_i = \begin{cases} 1 & e_i \text{ 发生} \\ 0 & e_i \text{ 不发生} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

同样引入二值变量 $\Phi(X)$ 表示顶事件 T 的状态,并定义:

$$\Phi(X) = \begin{cases} 1 & T \text{ 发生} \\ 0 & T \text{ 不发生} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

因为顶事件的状态完全由底事件的状态所决定,所以顶事件的状态变量也完全由底事件的状态变量取值所决定,则有:

$$T = \Phi(X) = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

称函数 $\Phi(X)$ 为事故树的结构函数。

任何已知事故树都可以找到其结构函数,而且可以看成与门(并联)和或门(串联)的组合。如用 x_i 表示底事件 M_i 发生的概率, P_{TOR} 表示或门顶事件发生概率, P_{TAND} 表示与门顶事件发生概率,则有

$$P_{TOR} = \Phi(X) = \bigcap_{i=1}^n x_i \quad \underline{x_i(1,0)} \quad \prod_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

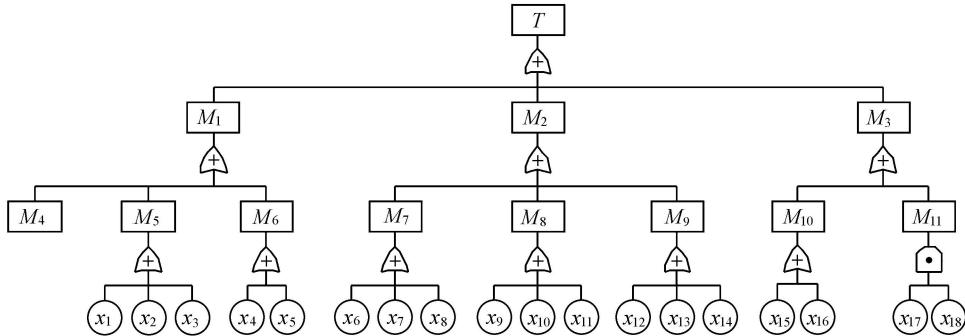


图 1 大套第一抽水站运行风险事故树分析模型

$$P_{TAND} = \Phi(X) = \bigcup_{i=1}^n x_i x_i(1,0)1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \quad (5)$$

利用式(4)和式(5)依照已建成的事故树逻辑结构即可计算任何已知事故树顶事件的发生概率。

2 系统设计

基于层次分析法和事故树分析法,泵站工程风险评估辅助系统的总体目标为计算事故树各底事件风险度,先计算泵站各组成部分的权重,在此基础上确定各底事件的发生概率,并且计算顶事件(泵站运行风险)加权发生概率,判定风险等级。

基于对在役泵站工程主要失效途径的研究,遵循尽可能全面涵盖泵站工程风险分析的主要影响因素的原则,得到引起泵站不能正常运行的13种中间事件及29种可能的底事件,用户可根据具体工程实际情况确定主要的影响因素和评价指标,采用层次分析法和事故树分析法进行评估,系统总体结构见图2,以大套第一抽水站为例,由表1可知影响该泵站不能正常运行的主要有11种中间事件及18种底事件,用户即可在系统界面内进行相应选择及输入,进行风险评估。由于目前泵站工程还没有统一的风险分级划分标准,可借鉴堤防工程的划分方法^[8-9],泵站工程风险分级见表2。

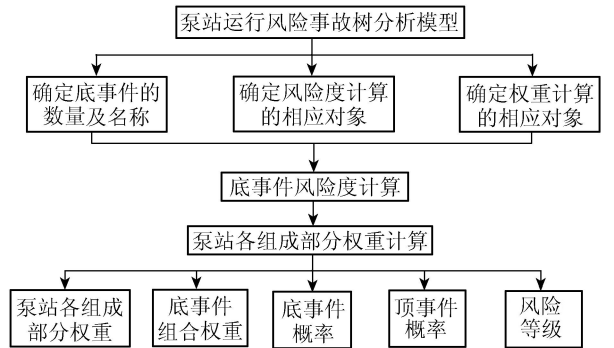


图2 系统总体结构

表2 泵站工程风险分级

风险等级	含义	概率值	安全性
I级	运用指标无法达到设计标准,技术状态差,建筑物存在严重安全问题,可降低标准运用或报废重建	≥0.6	危 险
II级	运用指标达不到设计标准,建筑物或设备存在一定损坏,经对建筑物大修、加固或对主要设备进行大修、更新改造后,能保证安全运行	0.4 ~ <0.6	较危险
III级	运用指标基本达到设计标准,建筑物和设备存在一定损坏,按常规维护保养即可保证安全运行	0.2 ~ <0.4	较安全
IV级	运用指标能达到设计标准,无影响正常运行的缺陷	0 ~ 0.2	安 全

3 系统功能实现

泵站工程风险评估辅助系统采用可视化程序设计语言 Visual Basic 编程,由泵站运行风险事故树分析模型、底事件风险度计算、泵站各组成部分的权重计算以及计算结果输出4个模块组成。通过各个模块功能的实现,该系统为用户提供了能够辅助风险等级判别工作的软件平台,系统界面见图3。



图3 系统界面

3.1 泵站运行风险事故树分析模型模块

该模块包含事故树模型选定、底事件名称及数量统计两项功能,模块界面见图4,其功能实现方法如下:

a. 事故树模型选定。根据事故树法相关内容在设计界面内绘制出泵站运行风险事故树分析模型,共分为4层,第1层为事故树的顶事件,第2、3层为事故树的中间事件,第4层为事故树的底事件,分别以 A 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 $C_2 \cdots C_{10}$ 、 D_1 、 $D_2 \cdots D_{29}$ 表示。除第1层外其他各层组成元素均对应一个CheckBox,单击时表示“选中”,再次单击时表示“未选中”。在代表字母(Label)的Click事件中设置相关Label的BackColor属性值及CheckBox的Value值,用户通过单击界面代表字母即可实现事故树中各风险因素的选定及其他模块中相关内容的自动选定。

b. 底事件名称及数量统计。点击图4中的“计算”和“重置”按钮,通过在Click事件中使用IF选择语句和For/Next循环等实现底事件名称及数量统计。

3.2 底事件风险度计算模块

以泵站工程站身建筑物对应的底事件 $x_i(i=1, 2, 3)$ 为例,底事件 x_i 分别为站身抗滑稳定安全系数计算值 k_c 、渗径系数计算值 C 、计算配筋面积 $A_{s\text{计算}}$,当 $[k_c] > k_c$ 、 $[C] > C$ 、 $A_{s\text{计算}} > A_{s\text{实配}}$ 时,可以认为其发生异常(失效),则定义底事件 x_i 的风险度 R_{li} (即风险度值越大越危险)为

$$R_{l1} = ([k_c]/k) \times 100\% \quad (6)$$

$$R_{l2} = ([C]/C) \times 100\% \quad (7)$$

$$R_{l3} = (A_{s\text{计算}}/A_{s\text{实配}}) \times 100\% \quad (8)$$

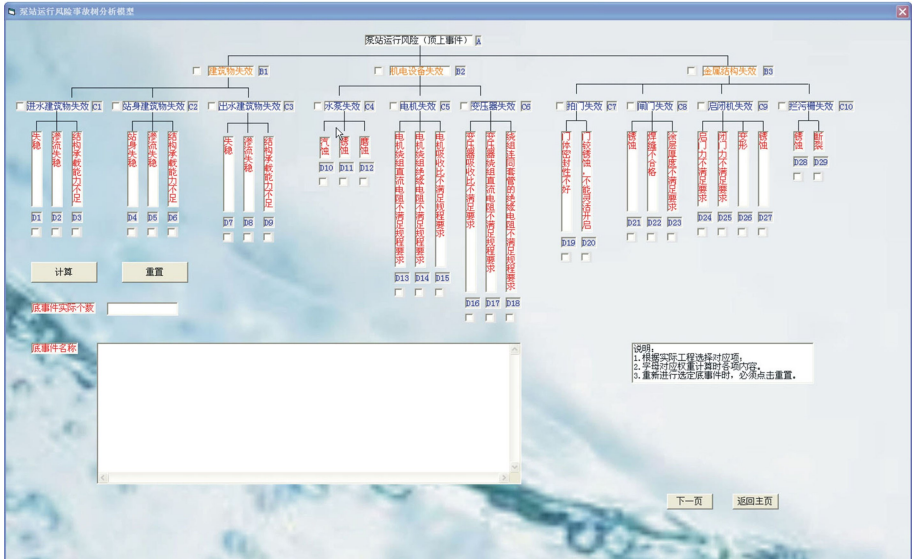


图4 泵站运行风险事故树分析模型界面

式中: $[k_c]$ 为抗滑稳定安全系数允许值; $[C]$ 为渗径系数允许值; $A_{s\text{实配}}$ 为实配钢筋面积。底事件风险度计算模块包含泵站各主要组成部分的风险度(如站身建筑物的风险度、水泵的风险度、电机的风险度、拍门的风险度等),每个风险度下设有相应的底事件指标,风险度值越大越危险,因此用户在进行底事件相应指标输入时应取各工况下使指标值最大的数据。同理,其他风险度可以类似求取。界面说明中变形程度、锈蚀程度分别根据轻微变形(锈蚀)、一般变形(锈蚀)、较重变形(锈蚀)、严重变形(锈蚀)、锈损给出了风险度范围;启闭机闭门力计算值大于0时,风险度为1,闭门力计算值小于0时,风险度为0;用户根据泵站工程实际情况按界面说明中的范围和判断标准进行拍门的变形及锈蚀程度,启闭机闭门力、变形及锈蚀程度,闸门的锈蚀程度和拦污栅的锈蚀及变形程度的数据输入。点击“计算”按钮,通过在Click事件中使用IF选择语句实现底事件风险度计算。

3.3 泵站各组成部分的权重计算模块

根据层次分析法进行权重的计算,用户根据泵站运行风险事故树分析模型和判断矩阵标度值,确定实际工程中各组成部分的重要程度并完成判断矩阵的相关输入(只能以整数及小数形式输入)。点击“计算”按钮,通过在Click事件中使用IF选择语句和For/Next循环等实现权重计算并进行判断矩阵一致性检验。由于考虑到泵站工程中一般不会出现“强烈重要”和“极端重要”这些情况,判断矩阵标度取用T. L. Saaty教授的“1~9标度法”的部分标度值,具体含义见表3。

3.4 计算结果输出模块

该模块由泵站运行风险事故树分析模型各组

表3 判断矩阵标度值及其含义

标度值	含 义	专家重要性判断结果
1	指标 u_i 和 u_j 比较,具有同等重要性	同等重要
2	指标 u_i 和 u_j 比较, u_i 比 u_j 大,但差别极小	略微重要
3	指标 u_i 和 u_j 比较, u_i 比 u_j 稍微大,但不明显	稍微重要
4	指标 u_i 和 u_j 比较, u_i 比 u_j 较大	稍加重要
5	指标 u_i 和 u_j 比较, u_i 比 u_j 明显大	明显重要

成部分的权重及组合权重值、底事件概率值、顶事件概率值和风险等级4个部分组成,图4界面中字母与泵站运行风险事故树分析模型中各组成元素的字母相对应。界面内名称及字母为Label,对应的数值为TextBox。点击“计算”按钮,通过在Click事件中使用数学函数等实现组合权重值、底事件概率值、顶事件概率值的计算和风险等级的判别。

4 工程应用实例

以大套第一抽水站为例,根据大套第一抽水站工程安全复核分析报告与机电设备及金属结构检测报告等相关资料,完成对泵站运行风险事故树分析模型的选定及底事件风险度计算模块、泵站各组成部分的权重计算模块的数据输入。进入计算结果输出模块后,泵站各组成部分的权重计算值将显示在界面上,单击“计算”按钮,系统自动计算组合权重、底事件概率、顶事件概率并判别泵站风险等级,同时显示其计算和判别结果,计算结果输出模块界面见图5。由图5可知,大套第一抽水站运行风险概率为74.921%,风险等级为I级。

按照层次分析法和事故树分析法基本原理及公式对大套第一抽水站进行风险分析,经计算得到大套第一抽水站运行风险概率为74.89%,大于60%,风险等级为I级,与系统计算结果相差甚微(计算

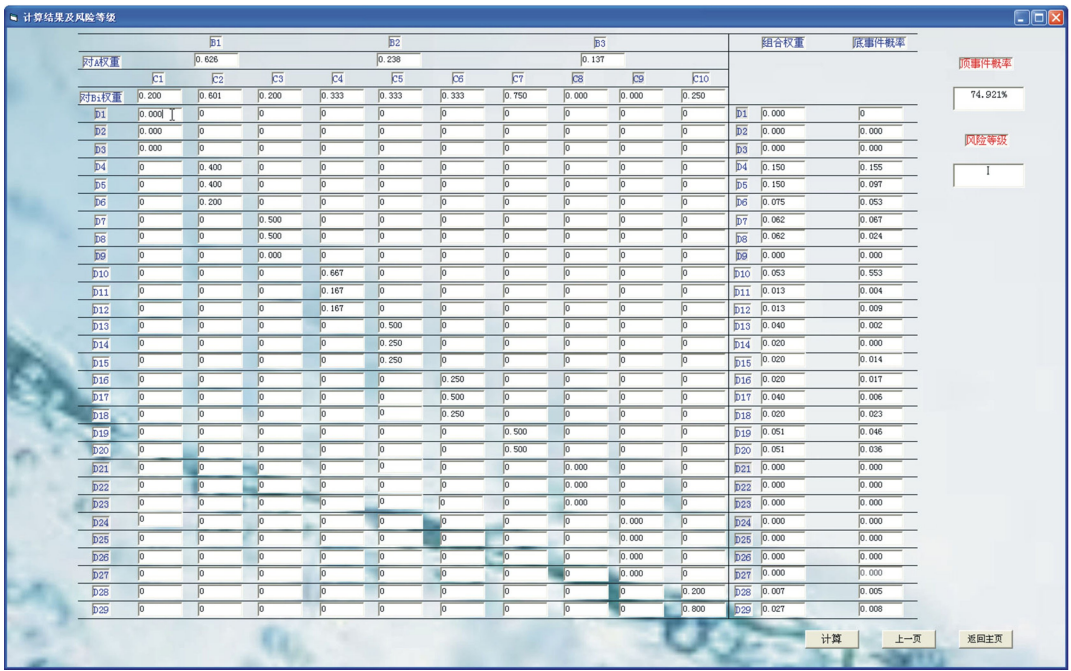


图5 计算结果输出

精度达 10 万分之一),表明系统分析与处理结果满足使用要求。根据大套第一抽水站安全鉴定结果,综合评定大套第一抽水站为四类泵站,系统计算结果表明大套第一抽水站风险等级为 I 级,处于危险状态,与安全鉴定结论一致。

5 结 语

通过泵站运行风险事故树分析模型、底事件风险度计算、泵站各组成部分的权重计算以及计算结果输出 4 个模块来实现泵站工程风险评估辅助系统的开发,达到获得顶事件发生概率及判定风险等级的最终目标。以大套第一抽水站为例,运用所开发的系统,通过人机交互方式录入相关数据后,对该泵站的风险水平做出了较客观的评价。该系统包含了泵站工程各主要组成部分,用户可根据工程实际情况进行选择输入,具有较好的通用性;计算精度可达 10 万分之一,能满足泵站工程风险评估需求,在取得基本资料后,能较快地实现泵站工程的风险评估。系统顶事件概率计算和风险等级判别结果与实际计算结果一致,表明该系统具有可应用性。

参考文献:

[1] 逢辉,高永昕. 分析我国大型灌溉排水泵站存在的主要问题和更新改造的必要性[J]. 黑龙江水利科技,2010,38(1):135-136. (Hui Pang. Analysis of main problems and renovation necessity in large irrigation and drainage pumping station in China[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy,2010,38(1):135-136. (in Chinese))

[2] 余建星. 工程风险评估与控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[3] 郝祥琪,党志良,杨世雷. 层次分析法在建筑热水供应系统评价中的应用[J]. 西南给水,2008,30(2):28-29. (HAO Xiangqi, DANG Zhiliang, YANG Shilei. Analytic hierarchy process in building hot water supply system of the application of the evaluation [J]. Southwest Water & Wastewater,2008,30(2):28-29. (in Chinese))

[4] 凡勇. 层次分析法在飞机维修不安全事件影响因素评价中的应用[J]. 航空维修与工程,2012(1):91-92. (FAN Yong. Evaluation of unsafe incidents influence factors in aircraft maintenance based on analytic hierarchy process [J]. Aviation Maintenance & Engineering,2012,(1):91-92. (in Chinese))

[5] 王文才,岑旺,巴蕾. 矿山冒顶片帮灾害事故树分析[J]. 金属矿山,2010(3):142. (WANG Wencai, CEN Wang, BA Lei. Fault tree analysis of Roof falling accident in Mine [J]. Metal Mine,2010(3):142. (in Chinese))

[6] BOSSCHE A. Computer-aided fault tree synthesis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1991, 33:217-241.

[7] ENGELHARDT M, BAIN L J. On the mean time between failure for repairable system [J]. IEEE Transactions on Reliability,1986,35(4):419-422.

[8] 曹云. 堤防风险分析及其在板桥河堤防中的应用[D]. 南京:河海大学,2005.

[9] 梅亚东,谈广鸣. 大坝防洪安全评价的风险标准[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4):8-9. (MEI Yadong, TAN Guangming. Risk criteria for assessment of dam hydrological safety [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2002,20(4):8-10. (in Chinese))

(收稿日期:2012-10-12 编辑:熊水斌)