

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.012

考虑时变效应的水工金属结构安全风险评价模型

李洪煊^{1,2,3} 蔡新^{1,2,4} 徐锦才⁵ 易剑刚^{1,2} 杨光明²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京市市政设计研究院, 江苏 南京 210008;
4. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 5. 水利部农村电气化研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为了对水工金属结构进行安全风险评价, 针对传统安全系数法的缺陷, 采用模糊聚合和可靠度法, 建立基于时变可靠度理论的单目标、多层次水工金属结构安全风险评价数学模型, 并采用 Delphi, Fortran 语言和 ANSYS 软件混合编程实现. 工程实例应用分析表明: 该安全风险评价数学模型较之传统安全系数法更加科学、合理, 实际评价过程更加简单、快捷和实用, 可为水工金属结构的安全风险评价和水电站除险加固提供参考.

关键词: 水工金属结构; 风险评价; 时变效应; 层次分析法

中图分类号: TV34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)06-0660-05

水工金属结构在水利工程中担负着防洪、灌溉、引水发电等多项控制性任务, 其安全运行是保证水利工程发挥巨大经济效益、社会效益的重要条件. 截至 2009 年, 我国已建成水库 86 353 座, 其中病险水库 30 413 座, 占水库总数的 35%^[1], 金属结构安装量接近 400 万 t^[2]. 大部分病险水库的金属结构均已接近设计基准期, 结构破坏严重, 因此研究水工金属结构安全风险评价体系具有重要的理论意义和实用价值, 特别是对病险水库的金属结构.

传统水工金属结构安全风险评价主要采用单一安全系数法, 其具有半理论半经验性质. 基于可靠度的安全风险评价法是一种新的安全评价方法, 该法能给予水工金属结构统一的安全度评价标准. 水工金属结构安全风险评价主要包括安全性、适用性和耐久性. 文献[2-6]从安全性和耐久性方面提出了闸门和启闭机的安全评价体系, 该体系通过分层考虑各个子目标的可靠度, 进而得到水工金属结构整体可靠度.

在设计基准期内, 影响水工金属结构安全性的主要因素是动态变化的, 即其安全性具有时变效应. 荷载的时变效应主要体现在统计参数的动态变化上, 抗力的时变效应主要由材料内部作用和周边环境作用引起. 考虑水工金属结构的时变效应, 以可靠度为基本度量方法, 以模糊聚合为基本手段, 本文提出一种操作性更好的水工金属结构安全风险评价动态模型, 并以水工闸门为例进行分析, 可为病险水库水工金属结构更新改造和农村小水电站的安全运行提供参考.

1 水工金属结构安全风险评价

1.1 水工金属结构安全影响因素

文献[2]通过对 21 个工程失事的 44 扇弧形闸门和 8 个工程失事的平面闸门的事故原因剖析, 得出影响水工金属结构安全性的主要因素有强度、刚度、稳定性、振动、设计、上下游流态、焊缝质量、金属材质、空蚀气蚀、锈蚀和工程管理等因素.

1.2 安全风险评价指标体系

1.2.1 评价指标体系的构建原则

- a. 规范性原则. 评价指标必须在国家相关规范、规程、标准的基础上进行拟定.
- b. 全面性原则. 评价指标应能完整地反映出金属结构安全性的各项特征.

收稿日期: 2010-08-20

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(200801019); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项基金(2009586012)

作者简介: 李洪煊(1986—)男, 江西九江人, 硕士, 主要从事水利工程安全评价研究. E-mail: wind328@163.com

c. 层次性原则. 评价指标应力求条理清晰, 层次鲜明.

d. 独立性原则. 评价指标应能独立地反映水工金属结构的工作性态.

e. 可操作性原则. 评价指标应能被现有的方法所度量.

1.2.2 评价指标体系的构建

通过对水工金属结构安全影响因素的分析研究, 结合安全风险评价的基本原则, 构造出单目标、多层次的水工金属结构安全风险评价体系框架, 如表 1 所示. 以水工金属结构整体可靠度为总目标, 将总目标分解为安全性、适用性和耐久性 3 项子目标, 每项子目标再分为一级指标和二级指标.

1.3 水工金属结构安全风险评价方法

1.3.1 评价指标赋权方法

评价指标体系的权重赋值方法可采用层次分析法 (analytic hierarchy process, 简称 AHP 法)、Delphi 法、专家评判法、频数统计分析法. 其中层次分析法得出的权重分配具有一定的理论基础, 较以往采用的经验法更能反映实际情况, 可减少人为因素的影响, 使得权重分配具有较高的真实性和合理性. 本文采用层次分析法来确定各指标体系的权重, 其具体步骤如图 1 所示. 实际指标赋权时, 可由多位专家分别对评价指标进行赋权, 再综合各个专家不同的权重, 最后得到考虑多个专家不同专业水平的权重向量.

1.3.2 二级指标可靠度计算方法

工程结构可靠度的计算方法主要有蒙特卡罗法、均值一次二阶矩法、JC 法 (因被国际安全度联合委员会 JCSS 采用, 故称为 JC 法)、随机有限元法和概率法等. 水工金属结构的强度、刚度、稳定性等可靠指标的计算可采用 JC 法、随机有限元法等, 其他评价指标可采用等级评分法或频数统计法. 等级评分法是将二级指标划分相应等级标准, 标准的上下限对应相应的可靠度, 进而通过直观的等级评分换算出二级指标的可靠度, 详细计算方法见文献 [2, 5, 7-9].

1.3.3 安全风险计算方法

由层次分析法计算出评价指标的权重后, 考虑二级指标的可靠度, 即可构建水工金属结构安全风险模型:

$$\beta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p R_i S_{ij} T_{ijk} \beta_{ijk} \quad (1)$$

式中: β ——水工金属结构的整体可靠度; n ——子目标数, m ——第 i 子目标的一级指标数, 随 i 的变化而变化; p ——第 i 子目标的第 j 一级指标的二级指标数, 随 i, j 的变化而变化; R_i ——子目标 i 的权重; S_{ij} ——子目标 i 的一级指标 j 的权重; T_{ijk} ——子目标 i 的一级指标 j 的二级指标 k 的权重; β_{ijk} ——子目标 i 的一级指标 j 的二级指标 k 的可靠度.

1.3.4 敏感度分析

对式 (1) 进行二级指标权重敏感度分析, 可知水工金属结构安全性的主要影响因素及其失效模式, 可为水工金属结构的安全运行、除险加固排序、更新改造提供参考.

表 1 水工金属结构安全风险评价体系框架

Table 1 Safety risk assessment model of hydraulic metal structures

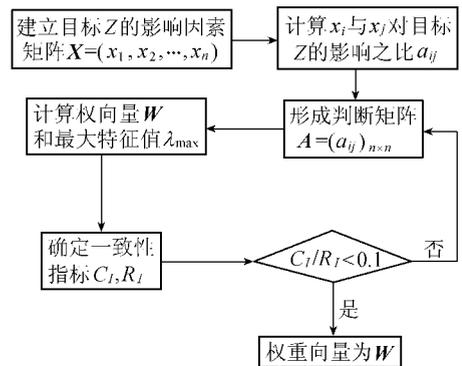
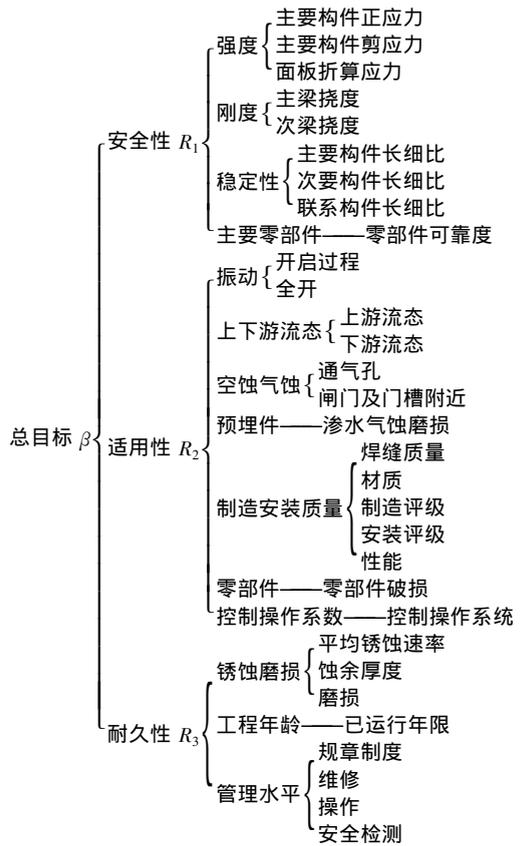


图 1 层次分析法流程

Fig. 1 Flow chart for AHP

1.4 评价标准

参照文献[10]中水工结构目标可靠指标(表2),根据水工金属结构安全级别及破坏类型,当其整体可靠度小于表中相应数值时,结构不安全,需要更新改造或整体报废;反之,结构安全.1.3.2节中等级评分法相应标准的上下限亦参考该标准.

2 考虑时变效应的安全风险评价模型

水工金属结构在长期使用过程中,影响其安全性的诸多因素将会随时间变化,导致其可靠度改变,即水工金属结构的安全可靠度具有明显的时变特征.一方面,水工金属结构的荷载作用随时间变化,如闸门上下游水头、启闭机启闭力、压力钢管内水压力、温度荷载等;另一方面,结构的抗力亦随时间动态变化,如金属结构的腐蚀、疲劳等.

考虑时变效应后水工金属结构安全风险模型可改写为

$$\beta_t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p R_{i,t} S_{ij,t} T_{ijk,t} \beta_{ijk,t} \quad (2)$$

式中下标 t 表示时间为 t 时的指标值.考虑指标体系权重的变化旨在更加科学、合理、动态地评价水工金属结构的安全性.

一般来说可靠度 $\beta_{ijk,t}$ 随时间变化是一维或多维的随机非平稳过程,本文采用较为简单的随机过程模型,即:

$$\beta_{ijk,t} = -\Phi^{-1}(P_{f,t}) = -\Phi^{-1}(P_{f,t_0}) \varphi_{ijk,t} = \beta_{ijk,t_0} \varphi_{ijk,t} \quad (3)$$

式中: t_0 ——水工金属结构完工时间; $\varphi_{ijk,t}$ ——二级指标的可靠度衰减函数.由于 β_{ijk,t_0} 在设计时已知,因此时变可靠度的确定归结为 $\varphi_{ijk,t}$ 的确定, $\varphi_{ijk,t}$ 可取线性函数、指数函数和双曲线函数等^[11-13].

本文主要考虑水工金属结构锈蚀对其可靠度的时变效应,参照文献[13]构造衰减函数:

$$\varphi_{ijk,t} = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq t_c \\ 1 - \frac{v(t - t_c)}{d_0} & t \geq t_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_c ——防腐措施的有效作用时间, a; v ——平均腐蚀速率, mm/a; d_0 ——构件的初始厚度, mm.

3 实例分析

某水库工程是一座以防洪、灌溉为主,兼有发电等效益的综合性四等工程.其中溢洪道共6孔,孔口净宽14 m,堰顶高程242.925 m,设6扇14 m×12.5 m(宽×高)露顶式弧形钢闸门,闸门设计水头12 m,闸门启闭设备为6台2×450 kN固定卷扬式启闭机,于1979年完成安装,2004年完成金属结构安全检测.

对该溢洪道上弧形闸门进行安全检测分析可知,边、纵梁后翼缘板对接焊缝在板厚方向存在较多错位;闸门底槛多为较重锈蚀,局部严重锈蚀,表面布满锈斑、锈包或锈坑,局部密集成片分布;闸门泄水时存在剧烈振动;闸门整体为较重锈蚀,局部有严重锈蚀;所有受检焊缝均未发现裂纹缺陷.

在计算水位下,主横梁的最大折算应力、上下支臂臂杆最大轴向应力、6根小横梁的最大应力均已超过材料相应的容许应力,边纵梁最大应力均小于材料相应的容许应力.闸门上、下主横梁最大挠度值均小于主横梁挠度的容许值;闸门支臂弯矩作用平面内最大稳定计算应力、支臂弯矩作用平面外最大稳定计算应力均小于材料的容许应力.

综合该弧形闸门详细的安全检测分析资料,结合表1所示安全风险评价体系,得出该弧形闸门安全风险评价体系内容如表3所示.

由表3可知,主要构件的正应力、剪应力、稳定性和刚度对闸门整体可靠度影响较大,即这4个因素为闸门安全风险的主要影响因素,该弧形闸门整体可靠度为2.63,小于Ⅲ级安全级别的一类破坏的水工结构目标可靠指标2.7,故该弧形闸门整体可靠度不满足规范要求,应对其相关部件进行更新改造或整体报废.

对比安全检测资料可知,传统水工金属结构安全评价方法只能得出闸门相应构件应力的安全系数,同一

表2 目标可靠指标

结构安全级别	可靠指标值	
	一类破坏	二类破坏
I	3.7	4.2
II	3.2	3.7
III	2.7	3.2

表3 弧形闸门安全风险评价结果

Table 3 Safety risk assessment results of radial gate

子目标	子目标权重 R	一级指标	一级指标权重 S	二级指标	二级指标权重 T	二级指标可靠度	二级指标总权重
安全性	0.731	强度	0.709	主要构件正应力	0.623	2.65	0.322
				主要构件剪应力	0.258	2.70	0.134
				面板折算应力	0.119	2.68	0.062
		刚度	0.129	主梁挠度	0.845	2.70	0.080
				次梁挠度	0.155	2.70	0.015
		稳定性	0.163	主要构件长细比	0.717	2.70	0.085
				次要构件长细比	0.204	2.70	0.024
				联系构件长细比	0.080	2.70	0.009
		振动	0.256	开启过程	0.742	2.20	0.027
				全开	0.259	2.20	0.009
上下游流态	0.221	上游流态	0.426	2.70	0.013		
		下游流态	0.575	2.70	0.018		
适用性	0.143	空蚀气蚀	0.184	通气孔	0.267	2.70	0.007
				闸门及门槽附近	0.734	2.70	0.019
		预埋件	0.054	渗水气蚀磨损	1.00	2.70	0.008
				焊缝质量	0.232	2.70	0.008
		制造安装质量	0.239	材质	0.143	2.70	0.005
				制造评级	0.130	2.20	0.004
				安装评级	0.085	2.70	0.003
				性能	0.412	2.70	0.014
		零部件	0.049	零部件破损	1.00	2.70	0.007
		耐久性	0.127	锈蚀磨损	0.615	平均锈蚀速率	0.310
蚀余厚度	0.342					2.20	0.027
磨损	0.349					2.20	0.027
工程年龄	0.092			已运行年限	1.00	2.20	0.012
				规章制度	0.094	2.70	0.003
管理水平	0.293			维修	0.271	2.70	0.010
		操作	0.380	2.70	0.014		
		安全检测	0.255	2.70	0.009		

注:整体可靠度为2.63。

闸门不同构件其安全系数不一,闸门整体安全性无法度量。本文提出的单目标、多层次安全风险评价方法能够统筹兼顾影响金属结构安全性的各个因素,且能定量给出金属结构整体可靠度,较之传统安全系数法,评价结果更为全面合理。

由闸门安全检测资料可知其平均锈蚀速率 $v = 0.06 \text{ mm/a}$,主梁厚度 $d_0 = 25 \text{ mm}$,闸门完建时刻可靠度为2.9(即影响闸门安全的各个因素都处于最有利状态)则考虑时变效应的弧形闸门安全可靠度如图2所示。由图2可知,随着闸门运行年限的增长,其可靠度呈线性下降趋势,在 $t = 24 \text{ a}$ 时,其可靠度达到规范规定的最小值2.7,即闸门寿命为24 a。通过构造动态可靠度,可以实时监测闸门的安全可靠度,为闸门安全运行、检修、寿命评估和更新改造提供依据。

4 结 语

本文模型将水工金属结构安全风险评价从传统的安全系数法发展到可靠度分析方法,基于可靠度的安全风险评价模型将更加科学并符合实际。实际评价过程中,二级指标可靠度的确定是该安全风险评价模型应用的关键,其中强度、刚度和稳定性的可靠度计算可采用随机有限元法、蒙特卡洛法或JC法,其他的安全评价因素主要采用等级评分法。随着全国病险水库金属结构安全检测和更新改造的进行,在掌握第一手资料的基础上,通过理论分析和专家评审寻找构造出一种合适、精确的时变函数,评价结果将更为科学合理。

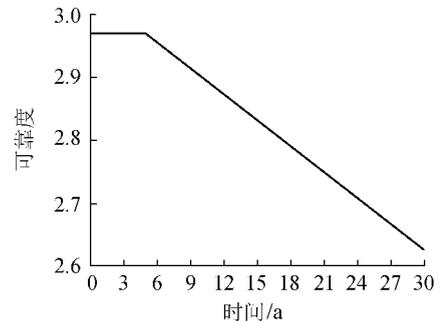


图2 闸门可靠度的时变效应

Fig. 2 Time-varying effect of reliability of radial gate

参考文献:

- [1] 陶丽琴. 重点小型病险水库整治 给群众一个安全的家园[EB/OL].[2010-09-14]. http://www.mwr.gov.cn/slxz/mtzs/zgsllbs/201009/t20100910_236589.html.
- [2] 杨光明. 水工金属结构安全评估系统设计与研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [3] 杨光明, 郑圣义, 胡金义, 等. 水工金属结构安全检测与评估方法研究[J]. 大坝与安全, 2003(6): 58-61. (YANG Guang-ming, ZHEN Sheng-yi, HU Jin-yi, et al. Methods of safety testing and evaluation of hydraulic metal structures[J]. Dam & Safety, 2003(6): 58-61. (in Chinese))
- [4] 杨光明, 陈迪杰, 胡金义. 水工金属结构安全检测与评估在大坝定检中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(1): 58-60. (YANG Guang-ming, CHEN Di-jie, HU Jin-yi. Application of safety inspection and evaluation of hydraulic metal structures to dam safety examination[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004, 28(1): 58-60. (in Chinese))
- [5] 杨光明, 陈伟. 水利水电工程金属结构计算机评估系统研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(11): 56-59. (YANG Guang-ming, CHEN Wei. Study on the computer evaluation system of metal structures for water projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(11): 56-59. (in Chinese))
- [6] 杨光明. 基于人工智能的水工金属结构安全评估系统初步设计[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 645-649. (YANG Guang-ming. Design of safety evaluation system of hydraulic metal structures based on artificial intelligence[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(6): 645-649. (in Chinese))
- [7] 莫慧峰. 水工钢闸门可靠度分析[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 30-32. (MO Hui-feng. Reliability analysis of steel hydraulic sluices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22(5): 30-32. (in Chinese))
- [8] 叶翔. 水工金属结构系统可靠度的失效树分析法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 665-668. (YE Xiang. Fault tree analysis method for reliability of hydraulic steel structures[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(6): 665-668. (in Chinese))
- [9] 卜现港. 水利水电工程门式启闭机金属结构可靠度分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [10] GB50199—1994 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [11] SU Huai-zhi, WEN Zhi-ping, HU Jiang, et al. Evaluation model for service life of dam based on time-varying risk probability[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(7): 1966-1973.
- [12] 杨波, 戴国欣, 陈昌海, 等. 钢结构工程抗力时变模型的构建与验证[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5): 95-99. (YANG Bo, DAI Guo-xin, CHEN Chang-hai, et al. Construction and confirmation of a model for time-dependent resistance of the steel structure project[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(5): 95-99. (in Chinese))
- [13] 周建方, 李典庆, 李朝晖, 等. 钢闸门结构时变抗力模型及其可靠度分析[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 104-109. (ZHOU Jian-fang, LI Dian-qing, LI Zhao-hui, et al. Time-variant resistance model and reliability analysis of steel gate structures[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 104-109. (in Chinese))

Safety risk assessment model of hydraulic metal structures considering time-varying effect

LI Hong-xuan^{1,2,3}, CAI Xin^{1,2,4}, XU Jin-cai⁵, YI Jian-gang^{1,2}, YANG Guang-ming²

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Nanjing Municipal Design and Research Institute, Nanjing 210008, China;
4. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;
5. National Research Institute for Rural Electrification, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to evaluate the safety risk of hydraulic metal structures, the fuzzy analytical hierarchy process (AHP) and the reliability method were employed with regard to the defects in the factor of safety method. Based on time-varying reliability theory, a hierarchical safety risk assessment mathematical model for hydraulic metal structures was established. It could be achieved by use of the mixed language programming of Delphi, Fortran and ANSYS. The assessment results of engineering cases show that the proposed safety risk assessment model is more scientific and reasonable than the traditional factor of safety method, and the assessment process is simple, quick and practical. It can be used for the safety risk assessment of hydraulic metal structures and the rehabilitation of hydropower stations.

Key words: hydraulic metal structure; risk assessment; time-varying effect; AHP