

水工钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析

周建方¹ 李典庆² 李朝晖³ 张金宏⁴ 姜谋余⁴ 石贵余⁴

(1. 河海大学机电工程学院 江苏 常州 213022 ; 2. 上海交通大学船舶与海洋工程学院 上海 200030 ;
3. 河海大学数理部 江苏 常州 213022 ; 4. 水利部科技推广中心 北京 100044)

摘要 基于可靠性原理 ,建立了水工钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析的极限状态方程 ,提出了钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析的 3 种计算模式 ,即将相对变形限值分别看作常量、随机量和模糊量 ,并分别给出了其统计参数 .在现有荷载统计数据的基础上 ,采用 JC 法对水工钢闸门设计规范正常使用极限状态可靠指标进行了校准计算和分析 .结果表明 ,可靠指标满足国际标准《结构可靠性总原则》的要求 ,且露顶门可靠指标大于潜孔门可靠指标 ,从而建议了现行水工钢闸门设计规范正常使用极限状态的目标可靠指标 .

关键词 水工钢闸门 ;正常使用极限状态 ;可靠度

中图分类号 :TU311.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2003)03-0310-04

目前对于承载能力极限状态 ,国内外开展的研究较多 ,其成果也已在各类标准和规范中体现^[1~4] .相比之下 ,对于正常使用极限状态 ,各国开展的研究相对较少 ,其成果也不成熟 .在国内现行的一些标准和规范中 ,如《建筑结构设计统一标准》^[3]、《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[4] ,还没有对正常使用极限状态可靠度提出要求 .但随着各类高强度材料在工程上的广泛应用 ,正常使用极限状态问题越来越显现 ,因此《结构可靠性总原则》^[1]补充了这方面的内容 ,正在修订中的《建筑结构设计统一标准》也新补充了正常使用极限状态可靠度设计要求^[5] .

对于闸门结构来说 ,虽然目前还没有采用可靠度方法设计 ,但承载能力极限状态可靠度的研究已有一定的成果^[6~10] ,而对正常使用极限状态可靠度的研究还鲜有报道 .闸门结构的刚度问题是十分重要的 ,如对闸门结构的变形控制不够(尤其是深孔门) ,就会引起闸门漏水 ,甚至产生振动 ,影响闸门的使用 ,从而影响整个水工建筑物的运行 .因此 ,对闸门结构的刚度进行可靠性分析是非常必要的 .

1 极限状态方程的建立

由于闸门结构的变形主要是由其主梁变形起控制作用 ,因此本文主要以闸门主梁为例进行分析 .梁的相对变形的一般形式为

$$f = \frac{S}{CEI} \tag{1}$$

式中 : S ——荷载效应 ; C ——与两端部约束条件、跨度等有关的系数 ; EI ——抗弯刚度 .闸门主梁一般简化为受均布荷载的简支梁 ,因此有 $C = 384/40L$, $S = qL^2/8$.

根据现行闸门设计规范^[11] ,变形验算规定 : $f \leq [f]$ (2)

式中 $[f]$ ——规范规定的相对变形的允许限值 ,露顶门 $[f] = 1/600$,潜孔门 $[f] = 1/750$.由式(2)可建立闸门结构正常使用的极限状态方程

$$[f] - f = 0 \tag{3}$$

在此极限状态方程中 ,荷载效应和抗弯刚度均在 f 中反映 ,与承载能力极限状态方程的表示不相一致 .为此 ,定义抗力

$$R = CE[f] \tag{4}$$

将式(1)代入式(3) ,并根据式(4) ,有

$$R - S = 0 \tag{5}$$

与承载能力极限状态方程完全一致 ,可用目前国内外广泛通行的 JC 法来分析计算其可靠指标 .

收稿日期 2002-04-08
作者简介 周建方(1961—) ,男 ,江苏武进人 ,教授 ,工程力学专业 ,主要从事计算力学和工程结构可靠度方面的研究 .

式(5)中的荷载效应统计参数已在文献[12]中给出.另外跨度 L 根据闸门技术条件^[13]中给出的制造误差规定,其变异性很小,变异系数不大于 2×10^{-4} ,可作为常量考虑.因此下面主要对抗力 R 作一统计分析.

2 抗力的概率模型

与承载能力极限状态可靠度分析相类似,可把式(4)定义的抗力改写成一般的表达式:

$$R = K_p K_M K_A K_{[f]} R_K \tag{6}$$

式中: R_K ——相对变形达到容许值 $[f]$ 时按闸门设计规范计算的抗力标准值; K_p, K_M, K_A ——反映计算模式、材料性能、几何参数不定性的随机变量; $K_{[f]}$ ——反映客观的相对变形临界值与闸门设计规范规定的相对变形限值之间的差异^[14].抗力的不定性采用随机变量 K_R 来描述:

$$K_R = \frac{R}{R_K} = K_p K_M K_A K_{[f]} \tag{7}$$

其变异系数
$$\delta_{K_R} = (\delta_{K_p}^2 + \delta_{K_M}^2 + \delta_{K_A}^2 + \delta_{K_{[f]}}^2)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

式中: $\delta_{K_p}, \delta_{K_M}, \delta_{K_A}, \delta_{K_{[f]}}$ ——计算模式、材料性能、几何参数和 $K_{[f]}$ 的变异系数.由式(5)知,材料性能是指弹性模量 E ,目前国内采用的统计量为 $K_M = 1.0, \delta_{K_M} = 0.06$.计算模式的不定性,由于闸门主梁是受弯构件,根据文献[14],受弯构件计算模式的不定性统计参数为 $K_p = 1.0, \delta_{K_p} = 0.1$.

几何参数的不定性表现为构件横截面积的惯性矩 I ,对闸门主梁来说其横截面大多为焊接工字形(图1).由工程经验知各量的大致取值范围为 $h = 1 \sim 1.5 \text{ m}, b = 0.2 \sim 0.4 \text{ m}, b = h/4$,因此

$$I \approx \frac{th^3}{12} + \left(\frac{h}{2}\right)^2 bt \times 2 \approx \frac{40tb^3}{3} \tag{9}$$

$$\delta_I = \sqrt{\delta_t^2 + 9\delta_b^2} \tag{10}$$

由于工厂一般不对钢板的厚度进行加工,所以厚度变异系数可取文献[15]中的数据 $\delta_t = 0.022$.而高度一般是要加工的,根据平面钢闸门技术条件^[13]中对构件横截面尺寸制造误差的规定, b 的偏差为 $\pm 2 \text{ mm}$.按 b 的平均值 0.3 m 考虑,其变异系数 $\delta_b = 0.0022$,从而可得 $\delta_{K_A} = \delta_I = 0.023, K_A$ 可取为 1.0 .

对于客观的相对变形临界值与闸门设计规范规定的相对变形限值之间的变异性,考虑3种模式:第一种模式相当于将 $[f]$ 视为常量,即露顶门 $[f] = 1/600$ 、潜孔门 $[f] = 1/750$.这时 $K_{[f]} = 1.0, \delta_{K_{[f]}} = 0$.第二种模式相

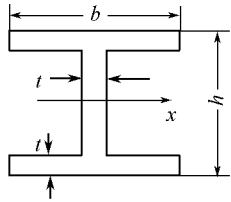


图 1 焊接工字钢截面

Fig.1 "I"-shaped welded cross-section

当于将 $[f]$ 视为随机变量,但目前还缺乏具体统计参数,只能判断其大致的变化范围.根据文献[14],取 $K_{[f]} = 1.00, 1.05, 1.10, \delta_{K_{[f]}} = 0.05, 0.10, 0.15$ 正态分布.这样 $K_{[f]}$ 与 $\delta_{K_{[f]}}$ 组合就有9种情况.本文对此都作了计算.第三种模式相当于将 $[f]$ 看作模糊量.事实上这更符合实际情况,因为实际上变形从允许到不允许只能是逐步过渡,它们之间没有严格的界限,不存在非此即彼的绝对边界.当把 $[f]$ 视为模糊量后,问题的关键在于隶属函数的确定.一般来说隶属函数要通过模糊试验或专家评定,采用模糊综合评判的方法确定.但在暂时缺少足够资料的情况下,也可凭经验假定.参考文献[17,18]中的建议,本文将模糊允许限值 $[f]$ 的隶属函数取为降半梯形分布,即

$$u_{[f]}(f) = \begin{cases} 1 & 0 < f \leq f_1 \\ \frac{f_2 - f}{f_2 - f_1} & f_1 < f \leq f_2 \\ 0 & f > f_2 \end{cases} \tag{11}$$

式中 f_1, f_2 为两个限值.当 $f \leq f_1$ 表示结构完全适用; $f > f_2$ 表示结构完全不适用; $f_1 < f \leq f_2$ 为过渡区.根据闸门设计规范,露顶门 $f_1 = 1/600$ 、潜孔门 $f_1 = 1/750$.而 f_2 的取值目前还没有规定,由工程经验^[18],一般可取 $f_2 = (1.05 \sim 1.3)f_1$.考虑到潜孔门对刚度要求更高,取露顶门 $f_2 = 1.1f_1$,潜孔门 $f_2 = 1.05f_1$.并统一将 f_1 看作是 $[f]$ 的标准值.

由于直接采用模糊随机事件概率模型计算可靠度较繁琐,本文采用了文献[19]中给出的模糊变量当量随机化方法对模糊变量 $[f]$ 作了简化处理.经过计算,

露顶门	$K_{[f]} = 1.05$	$\delta_{K_{[f]}} = 0.027$
潜孔门	$K_{[f]} = 1.025$	$\delta_{K_{[f]}} = 0.014$

有了上述基本统计数据,就可以由式(7)和(10)求出3种模式的 K_R 、 δ_{K_R} 值,具体见表1.限于篇幅,第二种计算模式仅列出了 $K_{[f]} = 1.05$ 的情况.抗力的分布采用对数正态分布.

3 可靠指标的校准结果与分析

有了荷载及抗力的统计数据就可采用JC法对闸门规范正常使用极限状态的可靠指标进行计算分析,在计算时考虑两种荷载的基本组合,即极限状态方程为

$$R - S_W - S_Q = 0$$

式中: S_W ——由静水压力引起的荷载效应; S_Q ——由其它荷载(如波浪力、泥沙力、动水压力等)引起的荷载效应.具体计算结果见表2~3.表2~3中的第二种模式是9种组合情况可靠指标 β 的平均值.为比较,表4中列出了露顶门在 $K_{[f]} = 1.05$ 时的 β 值.

表2 露顶门的 β 计算值

Table 2 Calculated value of β for a top-emergent gate						
计算模式	不同荷载组合					平均值
	W	$W + B$	$W + B + D$	$W + D$	$W + Z$	
第一种	1.628	1.679	1.773	1.724	1.709	1.703
第二种	1.675	1.723	1.809	1.764	1.752	1.745
第三种	1.787	1.842	1.943	1.890	1.872	1.867

注: W —水压力; B —波浪力; D —动水压力; Z —地震动水压力.

表3 潜孔门的 β 计算值

Table 3 Calculated value of β for a submerged gate						
计算模式	不同荷载组合					平均值
	W	$W + N$	$W + N + D$	$W + D$	$W + Z$	
第一种	0.556	0.698	0.688	0.566	0.694	0.640
第二种	0.694	0.820	0.811	0.706	0.816	0.769
第三种	0.698	0.843	0.835	0.711	0.837	0.839

注: N —泥沙力.

由表2~3可以看出,3种模式计算的可靠指标第一种最小,第三种最大.这是因为第一种模式认为,当 f 达到规范规定的相对变形限值 $[f]$ 时就失效,而第二、三种模式则认为此时还有可能不失效,因此可靠指标就大.但总体来讲,3种模式计算的可靠指标接近,且比承载能力极限状态可靠指标小得多.这是因为钢闸门结构达到正常使用极限状态时,仅仅是“不好使用”,而不像强度破坏等承载能力极限状态“不能使用”,这结果也与一般钢结构的情况类似^[14].这些都充分说明本文计算的结果是合理的.另外,露顶门的可靠指标大于潜孔门的可靠指标,这与闸门设计规范规定的露顶门相对变形限值大于潜孔门相对变形限值是相一致的.由表2~4还可以看出,第二种模式9种组合情况的可靠指标的平均值与 $K_{[f]} = 1.05$ 、 $\delta_{K_{[f]}} = 0.05$ 、0.10、0.15 3种组合情况的可靠指标的平均值相当.

由表2~3可以看出,3种模式计算的可靠指标第一种最小,第三种最大.这是因为第一种模式认为,当 f 达到规范规定的相对变形限值 $[f]$ 时就失效,而第二、三种模式则认为此时还有可能不失效,因此可靠指标就大.但总体来讲,3种模式计算的可靠指标接近,且比承载能力极限状态可靠指标小得多.这是因为钢闸门结构达到正常使用极限状态时,仅仅是“不好使用”,而不像强度破坏等承载能力极限状态“不能使用”,这结果也与一般钢结构的情况类似^[14].这些都充分说明本文计算的结果是合理的.另外,露顶门的可靠指标大于潜孔门的可靠指标,这与闸门设计规范规定的露顶门相对变形限值大于潜孔门相对变形限值是相一致的.由表2~4还可以看出,第二种模式9种组合情况的可靠指标的平均值与 $K_{[f]} = 1.05$ 、 $\delta_{K_{[f]}} = 0.05$ 、0.10、0.15 3种组合情况的可靠指标的平均值相当.

4 结 论

a. 本文探讨了计算钢闸门结构正常使用极限状态可靠度的3种模式,并对3种模式的统计参数进行了较为详细的讨论,从最后的计算结果看,所取的统计参数是合适的.

b. 3种模式计算的可靠指标接近,露顶门为1.8左右,潜孔门为0.8左右,这可看作是目前闸门设计规范正常使用极限状态可靠度的大致水平.

c. 正常使用极限状态分为可逆和不可逆两类.文献[1]规定,对于可逆的正常使用极限状态其目标可靠

表1 抗力统计参数

Table 1 Statistical parameters of resistance					
计算模式	$\delta_{K_{[f]}}$	K_R		δ_R	
		露顶门	潜孔门	露顶门	潜孔门
第一种		1.000	1.000	0.119	0.119
	0.05	1.050	1.050	0.129	0.129
第二种	0.10	1.050	1.050	0.155	0.155
	0.15	1.050	1.050	0.191	0.191
第三种		1.050	1.025	0.122	0.119

表4 $K_{[f]} = 1.05$ 时露顶门的 β 计算值

Table 4 Calculated value of β for a top-emergent gate at $K_{[f]} = 1.05$							
$\delta_{K_{[f]}}$	不同荷载组合					平均值	总平均
	W	$W + B$	$W + B + D$	$W + D$	$W + Z$		
0.05	1.766	1.819	1.917	1.866	1.849	1.843	
0.10	1.685	1.733	1.819	1.774	1.762	1.755	1.744
0.15	1.574	1.615	1.688	1.650	1.643	1.634	

指标为 $\beta = 0$,对于不可逆的正常使用极限状态其目标可靠指标 $\beta = 1.5$.闸门主梁的变形一般是属于可逆的 ,本文计算的 β 也都大于 0 ,说明闸门设计规范对变形的规定符合结构可靠性总原则的要求.

参考文献：

[1] ISO 2394 :1998 结构可靠性总原则[S].
[2] GB50153—92 工程结构可靠度设计统一标准[S].
[3] GBJ68—84 建筑设计统一标准[S].
[4] GB50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].
[5] 李明顺. 建筑结构可靠度设计统一标准(报批稿)的主要特色[J]. 建筑科学, 2000, 16(6):1—3.
[6] 周建方. 水利水电工程钢闸门设计规范可靠度初校[J]. 水利学报, 1995 (11) 24—30.
[7] 周建方. 弧门主框架可靠性分析及设计[J]. 水力发电, 1993 (5) 41—44.
[8] 范崇仁, 徐德新. 水工钢闸门可靠度的分析[J]. 水力发电, 1992 (8) 34—39.
[9] 朱大林, 游敏, 杜汉斌. 平面钢闸门主梁的可靠度分析及概率设计[J]. 水力发电, 1997 (3) 33—35.
[10] 李宗利. 平面钢闸门主梁可靠度校准分析[J]. 水力发电, 1998 (2) 52—57.
[11] DL/T5013—95 水利水电工程钢闸门设计规范[S].
[12] 周建方, 周美英, 李典庆. 水工钢闸门可靠度分析荷载的统计特性[J]. 金属结构, 2001 (4) 20—25.
[13] GB/T14173—93 平面钢闸门技术条件[S].
[14] 戴国欣, 夏正中. 建筑钢结构实用性分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3) 36—40.
[15] 陈国兴, 李继华. 钢构件材料强度及截面几何特性的统计参数[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1985 (1) :1—33.
[16] 汪建华, 戴静君. 模糊可靠度计算的两类模式[J]. 石油机械, 2000, 28(9) :11—13.
[17] 赵国藩, 李云贵. 混凝土结构正常使用极限状态可靠度模糊概率分析[J]. 大连理工大学学报, 1990, 30(2) : 177—184.
[18] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 28.
[19] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996. 264—265.

Reliability analysis of hydraulic steel gate structures in limit service state

ZHOU Jian-fang¹, LI Dian-qing², LI Zhao-hui³, ZHANG Jin-hong⁴, JIANG Mou-yu⁴, SHI Gui-yu⁴

(1. College of Electomechanical Engineering, Hohai Univ., Changzhou 213022, China ;

2. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong Univ.,

Shanghai 200030, China ;

3. Dept. of Mathematics & Physics, Hohai Univ., Changzhou 213022, China ;

4. Extension Center for Science & Technology Achievements, Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China)

Abstract : Based on the principle of reliability , a limit service state equation for reliability analysis of hydraulic steel gate structures is established . Three mathematical models for reliability analysis are presented , in which the limit value of relative deformation is taken as a constant , a random variable , and a fuzzy variable , respectively , and its statistical parameter is also given . Then , the JC method is used for calibrating and analyzing the reliability index of the hydraulic steel gate in the limit service state indicated in the specifications for steel gate design on the basis of the statistical load data available . It is shown that the reliability index meets the demand of“ general principle of structural reliability ”, and that the reliability index of the top-emergent gate is higher than that of the submerged gate . Furthermore , a target reliability index is finally determined for the design specifications of hydraulic steel gate structures in the limit service state .

Key words : hydraulic steel gate ; limit service state ; reliability