

水工钢闸门可靠度分析

莫慧峰

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:在结构可靠度理论的基础上,根据水工钢闸门的运行特点,对其主要随机变量的分布规律和统计量进行初步研究.在论证用三维有限元计算闸门强度控制点的基础上,利用应力系数法引出控制点的极限状态方程;用常用的可靠度计算方法求出闸门的可靠指标,并计算出相应的安全系数,对闸门的安全度进行初步估计.

关键词:水工建筑物;钢闸门;可靠度;随机变量

中图分类号:TV34

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)05-0030-03

闸门是水工建筑物的重要组成部分,其运行情况既关系到整个枢纽建筑物的安全,又关系到枢纽综合效益的充分发挥,以及枢纽下游城乡居民的安危.我国目前正在运行的水工钢闸门中有许多已达到或超过折旧年限,有些甚至达到设计使用年限而仍在服役.这些闸门的可靠性状况模糊不清,有些甚至存在重大隐患.对于这些水工金属结构的安全评估和鉴定工作就显得非常紧迫.闸门安全度的估算,可对超过折旧年限的闸门的继续使用提供科学的依据.

1 门前水位随机变量及统计量

作为活动挡水结构,闸门上的静水压力是其主要荷载之一,是影响其可靠度设计的首要因素.由于水压力荷载是作用水头的函数,因而可以从对闸门作用水头的分析入手,来解决问题.根据文献[1]对于81座大型水库的门前水位的研究,闸门门前年峰水位基本服从正态分布、对数正态分布或极值Ⅰ型分布,以正态分布的拟合度最佳.门前峰水位与坝前峰水位分布特征存在着差异,这是由于闸门和大坝的水压力历时过程是有差别的.在一般水位情况下,闸门和坝共同承担挡水任务,而当水位达到高水位时,闸门退出或部分退出挡水作业,造成门前水位峰值和坝前水位峰值有所不同,所以在对闸门进行可靠度设计及进行有关荷载规范制定时应予以考虑.门前年峰水位均值与正常高水位、设计水位分别高度线性相关^[1],通过回归分析得出门前年峰水位均值与正常高水位、设计水位的关系为

$$H_{\mu} = 0.9960H_{\text{正常}} - 2.6770 \quad (1)$$

$$H_{\mu} = 0.9977H_{\text{设计}} - 6.7506 \quad (2)$$

式中: H_{μ} 为门前年峰水位均值,m; $H_{\text{正常}}$ 为正常高水位,m; $H_{\text{设计}}$ 为设计水位,m.

对于其它的变量,如材料尺寸、浪压力、风压力、止水的摩擦力等,因缺乏统计资料,且影响较小,在进行可靠度分析时,当作为常量处理或忽略不计.因此,根据门前峰水位的概型、分布函数和特征值,就可以开展对一般闸门的可靠度设计和校核.

2 水荷载影响系数的确定

水荷载是闸门的主要荷载,而且水荷载与荷载效应之间难于建立显式方程,所以建立极限状态方程有相当难度.水工结构由于工作和安全的要求,目前都按许可应力法设计,结构中材料都处在弹性工作阶段.因此,对于闸门的某点应力,可以采用应力系数法,用叠加原理建立某点强度条件的极限状态方程.现将该法简述如下:

对于某结构,设已用力学方法求出各种单位荷载作用下所求点的应力影响系数为 r_i ($i=1,2,\dots,n$), n 为荷载的总数,则这些荷载对该点的实际影响值 S ,由文献[2]中的叠加原理得:

$$S = \sum_{i=1}^n r_i P_i \quad (3)$$

式中: P_i 为第 i 种荷载的总作用.

对于起空间作用的闸门,水位随机变化的作用,可以用较为精确的方法建立水位与荷载效应的关系,通过计算几个不同水位 H 及对应的荷载效应 S ,以寻找曲线.然后,根据水位 H 的统计量,即可求得

作者简介:莫慧峰(1974—),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事水工金属结构研究.

荷载效应 S 的统计量. 这样就可以建立显式的极限状态方程.

3 算 例

某多主梁平面钢闸门, 上游止水, 滚轮支撑, 有胸墙, 闸门尺寸 $12.7\text{ m} \times 6\text{ m}$, 设计水位 264.5 m , 闸门结构材料为 Q235 钢, 容许应力为 140 MPa , 弹模 $E = 2.06 \times 10^5\text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$. 选取闸门门前水位 H_T , 构件锈蚀量 Δt , 构件材料的屈服强度 R 为基本随机变量.

3.1 随机变量及特征值的导出

3.1.1 门前水位 H_T

根据以上的讨论, 门前年峰水位服从正态分布, 均值 $H_\mu = 257.14\text{ m}$, 变异系数 $V = 0.0175$, 标准差 $\sigma = 4.5\text{ m}$. 在设计基准期 T 内的分布 $F_T(x)$ 可近似地认为服从正态分布, 其统计参数的近似值可以用以下公式^[3]计算.

$$m_{x_T} \approx m_x + 3.5(1 - 1/\sqrt{T})\sigma_x \quad (4)$$

$$\sigma_{x_T} \approx \sigma_x/\sqrt{T} \quad (5)$$

式中: m_x, σ_x 分别为基本分布的均值和标准差; m_{x_T}, σ_{x_T} 分别为设计基准期 T 内分布的均值和标准差.

在闸门的设计基准期 $T = 50\text{ a}$ 内水位 H_T 的统计参数为: $m_T = 266.97\text{ m}$, $\sigma_T = 0.64\text{ m}$.

3.1.2 构件锈蚀量 Δt

锈蚀量和锈蚀率是描述锈蚀状况的两个重要参数, 其值与闸门的类型、环境条件、防腐方法等因素有关. 由于锈蚀量与运行时间有关, 不便比较, 为此, 应首先研究锈蚀率的分布规律和统计参数, 再根据闸门的运行时间换算得出锈蚀量的分布规律和统计参数. 根据对闸门主要构件锈蚀情况的统计结果, 得出锈蚀率服从正态分布, 其均值 $m_k = 0.04\text{ mm/a}$, 标准差 $\sigma_k = 0.01\text{ mm/a}$, 这样推得闸门(主梁)的锈蚀量 Δt 也服从正态分布, 且均值 $m_{\Delta t} = 1.12\text{ mm}$, $\sigma_{\Delta t} = 0.28\text{ mm}$.

3.1.3 构件材料的屈服强度 R

闸门的制造材料是 A3 钢, 其抗力(屈服强度)的标准值可从文献[3]中查得 $R_k = 240\text{ MPa}$, 利用公式^[3](6)可以计算得到抗力的均值 R_m 和标准差 δ_R .

$$R = K_M K_A K_P R_K \quad (6)$$

式中: K_M, K_A, K_P 分别为材料性能、几何特性和设计计算模式的不定性系数; R_K 为构件抗力标准值. 假定 K_M, K_A, K_P 为随机变量, 且相互独立, 则 R 的均值 R_m 为

$$R_m = R_{K_M} R_{K_A} R_{K_P} R_K \quad (7)$$

$$\delta_R = \sqrt{\delta_{K_M}^2 + \delta_{K_A}^2 + \delta_{K_P}^2} \quad (8)$$

式中: R_{K_M}, δ_{K_M} 分别为材料性能不定性的均值和变异系数; R_{K_A}, δ_{K_A} 分别为几何特性不定性的均值和变异系数; R_{K_P}, δ_{K_P} 分别为设计计算模式不定性的均值和变异系数.

3.2 分析模式的选取

由于平面钢闸门是超静定的结构体系, 某个构件的失效并不意味着整个结构体系的失效, 某个构件的可靠度亦不能代表整个结构体系的可靠度. 一个结构体系可能的失效模式多种多样, 要寻找出所有可能的失效模式, 并通过所有的失效模式去计算结构体系的可靠度, 几乎是不可能的. 一般可以通过寻找主要失效模式的方法来简化可靠度计算.

按照可靠度理论寻找主要失效模式的思路, 可确定平面钢闸门有三种失效模式^[4]: ①主梁失效; ②边梁失效; ③面板失效. 经过计算, 主梁的应力值远大于边梁和面板, 所以, 可以进一步简化的主梁可靠度作为闸门的可靠度.

3.3 极限状态方程的建立及计算

根据锈蚀量的统计参数, 取实际锈蚀量 $\Delta t = m_{\Delta t} + 2\sigma_{\Delta t} = 1.68\text{ mm}$, 其保证率为 95.45% . 作用于主梁的荷载主要是水压力荷载, 根据前面所述, 用三维有限元计算不同水位下的荷载效应, 然后可以回归得出水位和荷载效应的显式关系.

在三种水位下, 闸门各主横梁腹板和翼缘的最大主应力计算值见表 1.

表 1 闸门各主横梁腹板和翼缘的最大主应力计算值

部 位		最大主应力/MPa		
		正常蓄水位 263.5 m	原设计水位 264.5 m	最高挡水位 266.5 m
1 号梁	腹板	131.9	143.7	167.3
	翼缘	150.6	164.0	190.9
2 号梁	腹板	124.6	135.6	157.7
	翼缘	140.5	151.0	176.0
3 号梁	腹板	154.4	168.3	196.3
	翼缘	148.5	162.2	189.4
4 号梁	腹板	166.7	181.9	212.4
	翼缘	141.8	154.9	181.1

由于强度的随机性, 梁中任何一个截面都有可能出现塑性铰而导致梁的破坏. 因此, 梁的可靠度计算实际上也属于结构体系可靠度计算问题. 鉴于作用在梁上的荷载一般是相关的, 假定梁的所有截面的抗力完全相关, 则荷载效应最大的截面可靠度即为整个梁的可靠度.

已知主梁的极限状态方程和各随机变量的统计参数如下: $R(275.04, 28.8)\text{ MPa}$, 正态分布; $H_T(266.97, 0.64)\text{ m}$, 正态分布, 见表 2.

表 2 闸门各主横梁腹板和翼缘的可靠指标及安全度计算值

部 位		H_T 回归方程	极限状态方程 Z	闸门安全度计算值		
				可靠指标 β	安全系数 K	失效概率 P_f
1 号梁	腹板	$11.800 H_T - 2977.4$	$R - 11.800 H_T + 2977.4$	3.43	1.59	3.02×10^{-4}
	翼缘	$13.436 H_T - 3389.7$	$R - 13.436 H_T + 3389.7$	2.59	1.39	4.80×10^{-3}
2 号梁	腹板	$11.036 H_T - 2783.3$	$R - 11.036 H_T + 2783.3$	3.78	1.69	7.84×10^{-5}
	翼缘	$11.929 H_T - 3003.3$	$R - 11.929 H_T + 3003.3$	3.14	1.52	8.45×10^{-4}
3 号梁	腹板	$13.971 H_T - 3527.1$	$R - 13.971 H_T + 3527.1$	2.40	1.36	8.20×10^{-3}
	翼缘	$13.629 H_T - 3442.6$	$R - 13.629 H_T + 3442.6$	2.63	1.40	4.27×10^{-3}
4 号梁	腹板	$15.236 H_T - 3847.9$	$R - 15.236 H_T + 3847.9$	1.82	1.25	3.44×10^{-2}
	翼缘	$13.100 H_T - 3310.0$	$R - 13.100 H_T + 3310.0$	2.93	1.46	1.70×10^{-3}

3.4 计算结果分析

用一种常用的可靠度计算方法——JC 法计算闸门的可靠指标,并计算出相应的安全系数,计算结果见表 2。从表 2 的计算结果可知:

a. 闸门的可靠指标和安全系数的关系相当密切,在多数情况下, β 值大, K 值也大; β 值小, K 值也小。只是 β 的背后有明确的可靠度,因为它是建立在概率统计理论基础上的。

b. 文献[5]规定延性材料的一级建筑物强度可靠指标为 3.7,因此 4 根主梁的可靠指标均达不到规范的要求,尽管 K 值大于 1,但是该闸门的强度已不满足要求了。

c. 由于截面的抗力和作用荷载均来自相同的随机变量,因此,各主梁的极限状态方程高度相关。根据计算体系可靠度的 PNET 法可知,3 号主梁的失效概率即可作为所有主梁的失效概率。

d. 如前所述,闸门的失效概率为 $P_f = 0.0344$

4 结 语

本文在结构可靠度理论的基础上,结合水工钢闸门的运行特点,得出某些点的强度可靠指标,作为校核水工钢闸门在各种作用下的安全度时的参考及

闸门可靠性评估的一种实用方法。由于目前还缺乏水工金属结构随时间变化的荷载和抗力参数统计规律的资料,而且破坏模式复杂,要建立数学模型来计算其系统可靠度相当困难。

对于服役水工钢闸门系统可靠度及概率寿命估计,还有以下问题需进一步探讨:①服役水工钢闸门系统的随机变量的变化规律及相关性分析;②破坏模式的确定及相关性分析;③维修加固与可靠度之间的关系,这直接影响着闸门运行安全性和使用寿命。

参考文献:

- [1] 杨广杰.水工闸门作用水头随机分布规律研究[J].金属结构,1993(3):1~9.
- [2] 吴世伟.水工结构可靠度分析中几个问题的处理[A].见:吴世伟.结构可靠度安全度与可靠度分析论文集[C].南京:河海大学出版社,1988.106~110.
- [3] 赵国藩.工程结构可靠性[M].北京:水利电力出版社,1984.136~145.
- [4] SL74—95,水利电力钢闸门设计规范[S].
- [5] GB 50199—94,水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].

(收稿日期:2001-10-12 编辑:张志琴)

·简讯·

《水利水电工程勘察设计施工新技术实用手册》已出版

由李国轩主编的《水利水电工程勘察设计施工新技术实用手册》已由吉林摄影出版社出版。该书分为上、中、下三册,以水利水电工程勘察、设计、施工为主线,囊括了水利水电工程勘察、设计、施工各个重点环节和当今世界水利水电前沿的先进技术,集中反映当前国内外水利水电技术发展的新动态,列举了大量工程实例,具有可操作性强、可借鉴性强、权威性强等特点。本书邮购价 768.00 元(免收邮挂费)。另有《水利工程建设与防汛抗旱实务全书》(全三卷),邮购价 798.00 元(免收邮挂费);《水利水电工程施工组织设计指南》(上、下册),邮购价 102.00 元。

邮购地址:北京 55 信箱 清平书店 金莉收.邮编:100053;电话:010-83154081.

户名:北京清平书店有限公司;开户行:招商银行展览路支行;账号:0981106810001.

(刘景阳供稿)