

文章编号: 1001-5485(2003) 04-0024-05

# 现役水工钢闸门正常使用寿命预测

李典庆<sup>1</sup>, 唐文勇<sup>1</sup>, 周建方<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 船舶与海洋工程学院, 上海 200030; 2. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 针对目前水工钢闸门结构正常使用寿命预测方法缺乏足够理论依据的问题, 基于可靠性原理, 确定了现役钢闸门结构构件最低可靠度设置标准。提出了基于可靠度理论的现役钢闸门结构构件正常使用寿命预测算法, 采用可靠度理论推导出了钢闸门结构构件正常使用寿命预测的近似计算公式, 并对工程实例中闸门使用寿命进行了预测。算例结果表明, 该方法对闸门构件使用寿命的预测是有效的。

**关键词:** 钢闸门; 现役结构; 使用寿命; 预测; 可靠度

**中图分类号:** TV 663. 4      **文献标识码:** A

由于荷载作用、材料内部作用及环境作用等因素的影响, 随着闸门使用年限的增长, 闸门的老化问题日益突出<sup>[1]</sup>, 如何预测钢闸门结构的使用寿命及对其采取何种有效的措施, 已成为一个迫切需要解决的课题。在我国, 钢闸门结构传统的安全评估及寿命预测方法缺乏足够充分的理论依据, 而采用可靠度理论评估现役钢闸门安全度及其寿命预测, 正成为世界各水利大国研究的热点问题<sup>[2, 3]</sup>。文献[4]基于传统的容许应力法分析了简单的板构件使用寿命的计算公式, 文献[5]以简单受拉构件为例, 采用可靠度理论分析了钢闸门的承载能力寿命, 但是它将构件原始尺寸、屈服强度和荷载均假定为确定值, 实际上这些变量都是随机变量, 简化计算会给评估结果带来误差。同时文献[4, 5]都没有考虑到荷载及不同荷载组合对闸门使用寿命的影响。文献[6]基于可靠度理论分析了闸门结构构件承载能力寿命, 但是对闸门结构来说, 正常使用寿命也是一个非常重要的方面, 要完整地対闸门结构进行寿命预测, 必须对闸门的承载能力寿命和正常使用寿命分别加以研究, 为此本文对现役钢闸门结构构件正常使用极限状态最低可靠度标准的设置及正常使用寿命预测算法作了分析, 同时提出了钢闸门结构构件正常使用寿命预测的近似计算公式。

## 1 钢闸门正常使用寿命评估准则

要预测钢闸门结构的使用寿命, 首先要考虑的问题就是如何确定钢闸门结构寿命评估准则, 即寿命终

止的确切定义。由文献[3]知, 当以可靠指标作为结构寿命的评估指标时, 结构寿命终止定义为结构可靠指标低于某一水平时, 就认为结构达到了寿命的终点。为了通过衡量结构构件的可靠指标来预测结构的使用寿命, 则应首先确定出最低可靠指标。对于闸门结构来说, 设计使用寿命相当于《水利水电工程金属结构报废标准》(SL 105—95)中规定闸门的折旧年限, 大型闸门 30 a, 中小型闸门 20 a。笔者建议将上述 2 个数值作为闸门的设计使用寿命, 同时将闸门在设计使用寿命终止时的可靠指标  $\beta_{30}$  (大),  $\beta_{20}$  (中、小) 作为闸门结构的最低可靠指标限值  $\beta_0$ 。在考虑抗力时变的情况下, 以中、小型闸门为例, 分析现役钢闸门结构构件的最低可靠指标限值。

设极限状态方程为

$$R - S_w = 0, \quad (1)$$

为了便于讨论, 取  $R, S_w$  为正态分布, 根据钢闸门时变刚度可靠度分析方法<sup>[7]</sup>, 经过推导可得

$$\beta = \frac{K_R \cdot (1 - v(t - 5)/d) - K_{S_w}}{\sqrt{(K_P \cdot (1 - v(t - 5)/d) \cdot \delta_R)^2 + (K_{S_w} \delta_{S_w})^2}}, \quad (2)$$

式中:  $K_R, K_{S_w}$  分别是抗力和静水压力的均值与标准值之比;  $\delta_R, \delta_{S_w}$  分别是抗力和静水压力的变异系数;  $v$  是锈蚀速度;  $d$  是初始板厚;  $t$  是闸门的使用年限。

有

$$\beta_0 = \frac{K_R \cdot (1 - v(20 - 5)/d) - K_{S_w}}{\sqrt{(K_R \cdot (1 - v(20 - 5)/d) \cdot \delta_R)^2 + (K_{S_w} \delta_{S_w})^2}}, \quad (3)$$

收稿日期: 2003-02-24  
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2000024802)  
作者简介: 李典庆(1975-), 男, 湖北十堰人, 上海交通大学船舶与海洋工程学院博士研究生, 主要从事工程结构可靠度和风险评估研究。  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



$$\beta_T = \frac{K_R - K_{S_w}}{\sqrt{(K_P \cdot \delta_R)^2 + (K_{S_w} \delta_{S_w})^2}}, \quad (4)$$

式中  $\beta_T$  为钢闸门的目标可靠指标, 那么

$$\alpha = \frac{\beta_0}{\beta_T} = \frac{\frac{K_R}{K_{S_w}}(1 - 15v/d) - 1}{\frac{K_R}{K_{S_w}} - 1} \cdot \sqrt{\frac{(\frac{K_R}{K_{S_w}} \frac{\delta_R}{\delta_{S_w}}(1 - 15v/d))^2 + 1}{(\frac{K_R}{K_{S_w}} \frac{\delta_R}{\delta_{S_w}})^2 + 1}}. \quad (5)$$

对于某一类型闸门来说, 式中  $K_R, K_{S_w}, \delta_R, \delta_{S_w}$  都是常数, 所以  $\alpha$  只是  $v$  和  $d$  的函数, 即  $\alpha$  只与  $v/d$  有关。同理也可推导出 2 种荷载组合时  $\alpha$  的计算公式, 限于篇幅, 这里就不再列出具体的结果。上面的推导是假定各变量都是正态分布, 本文也对各变量按实际分布的情况做了计算, 结果表明, 可靠指标  $\beta$  及折减系数  $\alpha$  的误差都小于 0.05, 因此在精度要求

不高时, 可以利用 (5) 来直接计算  $\alpha$ , 图 1, 2 是露顶门  $\alpha$  的计算结果。

由图 1, 2 可以看出, 当  $v$  一定时,  $\alpha$  随着  $d$  的增加而增大, 当  $d$  在 6~22 mm 时,  $\alpha$  从 0.81 变化到 0.95。当  $d$  一定时,  $\alpha$  随着  $v$  的增加而线性减小, 当  $v$  在 0.01~0.08 (mm/a) 时,  $\alpha$  从 0.98 减小到 0.82。可见  $v$  和  $d$  对  $\alpha$  取值有明显的影响, 不能简单地取一个  $v$  和  $d$  来确定  $\alpha$  值, 本文以不同  $v$  和  $d$  时  $\alpha$  的平均值作为最终的  $\alpha$  值。表 1, 2 分别是中、小型露顶门与潜孔门在不同荷载组合下的  $\alpha$  及  $\beta_0$ 。

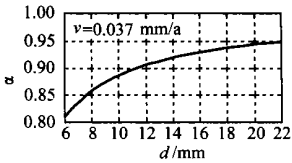


图 1 不同初始板厚时的  $\alpha$   
Fig.1 The  $\alpha$  of different initial plate thicknesses

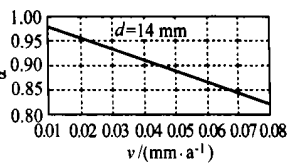


图 2 不同锈蚀速度时的  $\alpha$   
Fig.2 The  $\alpha$  of different corrosion rates

表 1 露顶门的  $\alpha$  及  $\beta_0$

Table 1 The  $\alpha$  and  $\beta_0$  of an exposed-top gate

	$\beta_T$	$\alpha$				$\alpha$		$\beta_0$	
		$W$	$W+B$	$W+D$	$W+Z$	平均值	建议值	平均值	建议值
$v=0.037$	1.60	0.899	0.900	0.901	0.902	0.901	0.9	1.442	1.45
$d=14$	1.60	0.901	0.901	0.902	0.903	0.902	0.9	1.443	1.45

注:  $W$  为水压力;  $B$  为波浪力;  $D$  为动水压力;  $Z$  为地震动水压力;  $N$  为泥沙力;  $v$  的单位为 mm/a;  $d$  的单位为 mm。表 2 同。

表 2 潜孔门的  $\alpha$  及  $\beta_0$

Table 2 The  $\alpha$  and  $\beta_0$  of a submerged gate

	$\beta_T$	$\alpha$				$\alpha$		$\beta_0$	
		$W$	$W+B$	$W+D$	$W+Z$	平均值	建议值	平均值	建议值
$v=0.037$	0.50	0.524	0.690	0.525	0.640	0.595	0.6	0.298	0.3
$d=14$	0.50	0.528	0.692	0.528	0.643	0.598	0.6	0.299	0.3

由前面的分析可以看出, 在确定  $\beta_0$  时, 折减系数  $\alpha$  的取值很关键。目前闸门可靠度分析仅限于构件可靠度的层次上, 由于受计算理论和方法的限制, 有关闸门结构体系可靠度以及单个构件可靠指标对闸门体系可靠指标的影响还无法确定。同时, 由于可靠指标在很大程度上依赖于实际数据的可靠和完善, 为此本文建议目前可保守地取  $\alpha=0.9$  (露顶门),  $\alpha=0.6$  (潜孔门)。

2 使用寿命预测算法及计算公式

根据荷载及抗力的统计参数<sup>[7]</sup> 就可以对现役钢闸门结构构件进行刚度可靠度计算, 计算时考虑如下的极限状态方程

$$R - S_w - S_Q = 0, \quad (6)$$

式中:  $S_w$  为静水压力,  $S_Q$  为波浪力、泥沙力等。在计算出时变刚度可靠指标后, 就可以对现役钢闸门结构进行使用寿命预测, 本文提出了图 3 所示的钢闸门结构使用寿命预测流程图。

按照图 3 对闸门结构构件使用寿命进行预测时, 一般要通过编程才能进行。但从 (2) 式发现, 将 (2) 式变换可以得到使用寿命  $T$  的近似计算公式, 经过推导得

$$T = 5 + \frac{d}{v} \left[ 1 - \frac{\frac{K_{S_w}}{K_R} \left( 1 + \sqrt{1 - (1 - \delta_R^2 \beta_0^2)(1 - \delta_{S_w}^2 \beta_0^2)} \right)}{1 - \delta_R^2 \beta_0^2} \right]. \quad (7)$$

同理可得形如 (6) 式的使用寿命的近似计算公式为

$$T = 5 + \frac{d}{v} \left[ 1 - \frac{K_{S_w} + \rho K_{S_Q}}{K_R(1 + 0.5\rho)} \right].$$



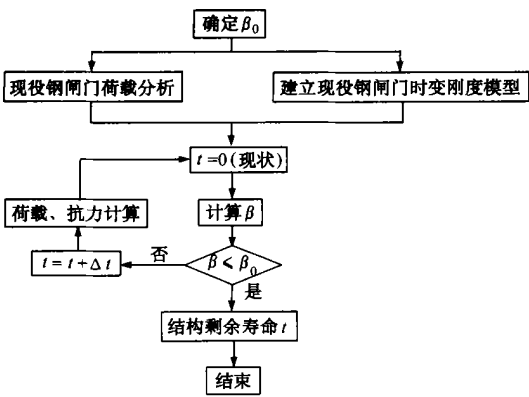


图3 闸门结构使用寿命预测流程图

Fig.3 Flow chart of service lifetime prediction for steel gate structures

$$1 + \frac{[1 - (1 - \delta_R^2 \beta_0^2)(1 - \beta_0^2((K_S \delta_{S_w})^2 + \frac{(\rho K_S \delta_{S_q})^2 / (K_S + \rho K_S)^2)J^{\frac{1}{2}}}{\delta_R^2 \beta_0^2})]}{1 - \dots} \rightarrow \dots \quad (8)$$

式中:  $\rho = S_{QK} / S_{WK}$  是荷载  $Q$  与  $W$  的标准值之比;  $K_{S_q}$  是荷载  $Q$  的均值与标准值之比;  $\delta_{S_q}$  是荷载  $Q$  的变异系数, 由于  $K_R, K_{S_w}, K_{S_q}, \delta_R, \delta_{S_w}, \delta_{S_q}, \rho$  是常数, 因此  $T$  只与  $d, v$  及  $\beta_0$  有关。

由使用寿命的近似计算公式 (7), (8) 可以看出, 使用寿命  $T$  是与荷载有一定关系的, 这也是符合实际情况的, 而文献 [4, 5] 均没有考虑不同荷载及不同荷载组合的影响。

3 算例

本文分别按照使用寿命预测流程图 3 及近似公式 (7), (8) 对闸门的使用寿命进行了预测。计算时取  $v = 0.037 \text{ mm/a}$ ,  $d_0 = 14 \text{ mm}$ , 结果见图 4~ 7。图 4, 图 6 分别是露顶门与潜孔门按照流程图 3 预测的使用寿命, 图 5, 图 7 分别是露顶门与潜孔门按照近似公式预测的使用寿命。

(1) 由图 4, 图 6 可以得出闸门在各种不同荷载组合下使用寿命的平均值为: 露顶门 22.1 a, 潜孔门 19 a。图 5、图 7 得出的结果为: 露顶门 21.8 a, 潜孔门 20 a, 近似公式的误差分别

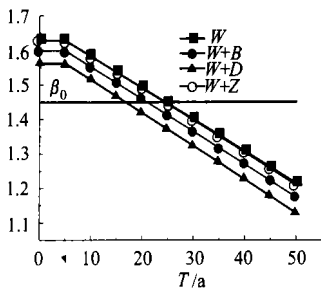


图4 露顶门的使用寿命  
Fig.4 Service lifetime of an exposed-top gate

为 1% 和 5%, 因此近似公式的精确度较高, 而且计算简单。为此, 本文建议在对闸门使用寿命初步预测时可以直接采用近似公式计算。同时还可以看出在相同的锈蚀速度及初始板厚的条件下, 露顶门与潜孔门的使用寿命大致相当。

(2) 由图 4~ 7 可以看出闸门在不同荷载组合下的使用寿命是不同的, 这是因为不同荷载组合下的可靠指标不同, 但是可靠指标限值  $\beta_0$  却是相同的, 而传统的寿命预测方法不能考虑不同荷载及不同荷载组合对使用寿命的影响, 这也体现了本文提出方法的优越之处。

下面结合工程实例作进一步的分析。以作者 1989 年 4 至 6 月对宿迁弧形钢闸门安全检测的数据为例,  $v = 0.033 \text{ mm/a}$ , 已经使用了  $T = 31 \text{ a}$ , 宿迁弧形闸门最薄构件的厚度为  $d = 8 \text{ mm}$ , 将  $K_R, K_{S_w}, \delta_R, \delta_{S_w}$  代入 (2) 式, 可得  $\beta = 1.27$ , 当  $d = 14 \text{ mm}$  时, 同理可得  $\beta = 1.43$ , 当  $d = 20 \text{ mm}$  时, 可得  $\beta = 1.5$ , 其平均值为  $\beta = 1.4$ 。由于宿迁弧形闸门已经安全运行了 31 a, 因此可以认为宿迁闸门构件达到正常使用寿命的可靠指标限值  $\beta_0 < 1.4$ , 此值与一般露顶门  $\beta_0 = 1.45$  差别不大, 这也进一步证明了本文所提方法的正确性。

为了反映构件的不同厚度及不同锈蚀速度对闸门使用寿命的影响, 本文以宿迁弧形闸门为例, 计算了不同厚度及不同锈蚀速度构件的使用寿命, 计算

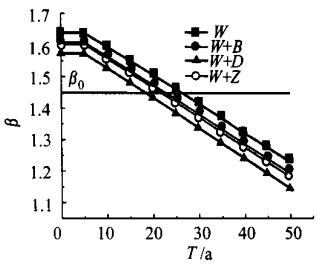


图5 采用近似公式计算的露顶门的使用寿命  
Fig.5 Service lifetime of an exposed-top gate using the approximate formula

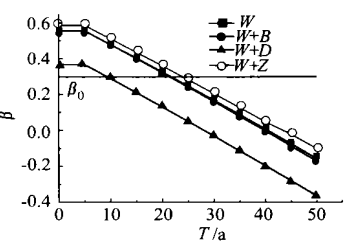


图6 潜孔门的使用寿命  
Fig.6 Service lifetime of a submerged gate

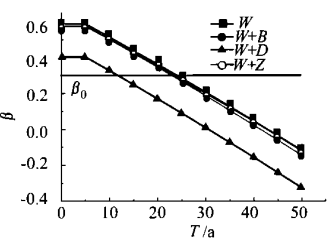


图7 采用近似公式计算的潜孔门的使用寿命  
Fig.7 Service lifetime of a submerged gate using the approximate formula



结果见图 8, 图 9。

(3) 由图 8 可以看出, 对同一闸门来说, 在相同  $\beta_0$  的情况下, 不同初始厚度构件的使用寿命分别为  $T_{20}=70\text{ a}$ ,  $T_{14}=50.5\text{ a}$ ,  $T_{12}=44\text{ a}$ ,  $T_{10}=37.5\text{ a}$ ,  $T_8=31\text{ a}$ 。可见构件的使用寿命与构件的厚度成正比, 构件厚度对其使用寿命影响很大。这就提出了一个问题, 对于同一个闸门来说, 其构件的厚度是不相同的, 是否该以最小厚度构件的剩余寿命作为闸门结构的使用寿命。由于闸门结构不是按照理想的满应力设计准则设计的, 如果简单地将

各构件中最小的使用寿命作为闸门结构的使用寿命, 分析出的结果显然过低估计了闸门结构的使用寿命, 会造成巨大的浪费; 当然更不能以构件中使用寿命最大值作为闸门结构的使用寿命, 这个问题值得进一步研究。本文是以不同厚度构件的使用寿命平均值作为闸门结构的使用寿命。

(4) 由图 9 可以看出, 锈蚀速度对使用寿命有着特别明显的影响, 当锈蚀速度减小时, 使用寿命迅速增加, 由于闸门所有构件中最大使用寿命的构件不起控制作用, 因此锈蚀速度很小的构件可以忽略不计, 如图中  $v=0.003\text{ mm/a}$  可以不予考虑。在图 9 中, 锈蚀速度  $v=0.018\text{ mm/a}$  时,  $T=53\text{ a}$ ,  $v=0.033\text{ mm/a}$  时,  $T=31\text{ a}$ ,  $v=0.048\text{ mm/a}$  时,  $T=23\text{ a}$ ,  $v=0.063\text{ mm/a}$  时,  $T=19\text{ a}$ 。使用寿命平均值为  $T=31.5\text{ a}$ , 此值与实际情况吻合得很好, 它也与锈蚀速度取均值  $v=0.033\text{ mm/a}$  时得出的使用寿命基本相同。由此可以得出结论, 在预测闸门的使用寿命时可以将锈蚀速度取其均值来计算。

(5) 由图 8, 图 9 还可以看出, 在锈蚀速度及初始板厚一定时, 使用寿命与可靠指标限值均成线性关系。当可靠指标限值减小时, 使用寿命将增大很快。因此合理的可靠指标限值的确定将对闸门使用

寿命的准确预测起着重要的作用。

4 结 论

(1) 钢闸门结构构件使用寿命预测应建立在闸门结构检测数据完善的基础上, 本文提出的  $\alpha$  及  $\beta_0$  值是否合理有待进一步讨论及研究, 其正确取值有待工程实践经验的积累及钢闸门结构体系可靠度理论的发展与完善。

(2) 钢闸门的使用寿命与它的锈蚀速度和初始可靠度有很大的关系, 如果锈蚀速度大而初始可靠度又较低, 那么钢闸门的使用寿命会大大缩短, 因此采取有效的防护措施减小锈蚀速度, 可以有效地延长闸门的使用寿命。适当提高其初始可靠度也可以有效地延长其使用寿命, 但究竟应该提高多少, 这涉及到一个优化问题, 有待进一步研究。

(3) 本文计算结果是假定闸门结构在正常使用条件下, 且经过维修或加固的理想情况, 同时假定闸门结构构件是按照满应力设计准则设计。实际上闸门在使用过程中是要进行检测来决定是否采取维修或加固措施, 同时闸门构件也不是按照满应力设计准则设计的, 所以实际工程中闸门的使用寿命一般是大于上述估计结果的。

参考文献:

[1] MELCHERS R E. Corrosion uncertainty modeling for steel structures[J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 1999, 52( 1): 3- 19.

[2] EM 1110- 2- 6054, Inspection, Evaluation and Repair of Hydraulic Steel Structures [ S ].

[3] GREIMANN L, STECKER J, NOP M. REMR management systems - navigation structures, condition rating procedures for tainter dam and lock gates[R]. Washington: U. S. Army Corps of Engineers, 1995.

[4] 夏念凌. 水工钢闸门的锈蚀、使用寿命及防护设计 [ J ]. 金属结构, 1989, (3): 10- 26.

[5] 周建方, 金雅鹤. 闸门构件锈蚀量的统计分析和使用寿命的估算 [ J ]. 金属结构, 1990, (6): 1- 4.

[6] 李典庆, 唐文勇, 张圣坤. 现役水工钢闸门结构剩余寿命的预测 [ J ]. 上海交通大学学报, 2003, 37( 7): 1016 - 1019.

[7] 李典庆, 唐文勇, 张圣坤. 钢闸门结构时变刚度模型及其可靠度分析 [ J ]. 上海交通大学学报, 2003, 37( 7): 1012- 1015.

( 编辑: 周晓雁 )



## Prediction of service lifetime for existing hydraulic steel gate structures

LI Dian-qing<sup>1</sup>, TANG Wen-yong<sup>1</sup>, ZHOU Jian-fang<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Machine and Electricity Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** The present calculation theory and method are insufficient to analyze the service lifetime of structural members for existing hydraulic steel gate structures. To overcome these disadvantages, based on the principles of reliability, minimal reliability criterion was determined to predict the service lifetime. A method for service lifetime prediction was proposed on the basis of the reliability theory. Furthermore, approximate formulae to predict the service lifetime were derived using the reliability theory. Finally, some numerical examples were presented to illustrate the proposed method. The results indicate that the proposed method is very effective in predicting service lifetime of structural members for existing hydraulic steel gate structures.

**Key words:** steel gate; existing structure; service lifetime; prediction; reliability

(上接第 23 页)

## Preliminary study and application of a visual mathematical model and dynamic display system

ZHANG Xi-bing, LONG Chao-ping, JI Xian-gang

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In order to solve the question of indirect displaying of traditional mathematical model, a planar 2-D visualization model and dynamic display system is established by the mixed programming languages of FORTRAN and VB, VC. It can provide visualization during the whole calculation progress, and can give 2-D and 3-D displaying and dynamic demonstration. It has been carried out successfully on the north and south river reach of the estuary of the Yangtze River. Results show that the window is clear-cut, operation convenient, displaying direct, and function powerful. So it improves the efficiency of solving project problems with mathematical model greatly.

**Key words:** plane 2-D; visualization; mathematical model; animation

### • 简讯 •

## 长江科学院参编的大坝安全监测行业标准发布实施

由南京水利水文自动化研究所主编,长江科学院等单位参编的中华人民共和国水利行业标准 SL-268-2001《大坝安全自动监测系统设备基本技术条件》,已由中华人民共和国水利部发布实施。SL-268-2001《大坝安全自动监测系统设备基本技术条件》标准是根据我国大坝安全自动监测系统设备的研制、生产和发展的需要而编制的,是衔接 SL60-90《土石坝安全监测技术规范》和 SDJ336-89《混凝土大坝安全监测技术规范》(试行)两个规范的产品通用性标准,是大坝安全监测系统中的各类仪器设备进行单一产品标准编制的主要技术依据。标准涵盖的范围包括技术要求、试验方法、检验规则、标志、使用说明书、包装、运输、储存等。该标准的发布实施,对大坝监测自动化系统仪器设备的科研、生产和使用有着重要意义,对于设计、施工安装也有一定的参考价值。

(摘自《长江科学院简讯》2003 年第 2 期)