



# 水工钢闸门系统可靠度研究综述

王蛟, 杨斌

(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 水工钢闸门的可靠度研究一直是热点, 国内外学者已经做了许多探索和试验, 取得了较多成果, 同时也提出了更多问题。在这些研究中, 闸门的系统可靠度逐渐显现出其研究的重要性和迫切性。就闸门系统可靠度的研究历史及进展做简要的综述, 并对系统可靠度的研究方向作适当展望, 希望能为后续研究提供参考。

**关键词:** 水工钢闸门; 单一可靠度; 过渡可靠度; 系统可靠度

中图分类号: TV 663

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0147-04

## On system reliability for hydraulic steel gates

WANG Jiao, YANG Bin

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The reliability analysis of hydraulic steel gates has always been a hot spot. Domestic and foreign scholars have conducted a lot of explorations and experiments. They have achieved many achievements and meanwhile raise more questions. Among these studies, those on the system reliability of gates gradually show great importance and urgency. This paper summarizes the research on the system reliability for hydraulic steel gates and makes an appropriate outlook for it, hoping to provide reference for further research in this field.

**Key words:** hydraulic steel gate; single reliability; transitional reliability; system reliability

利用结构可靠性理论进行设计能更好地反映和降低结构的风险, 促使尚未采用此方法进行设计的领域开始着手研究结构可靠性理论的应用, 使其设计水平更符合工程实际<sup>[1-2]</sup>。在闸门可靠度研究方面, 国内外学者已经做了许多探索和试验, 取得了较多成果, 同时也提出了更多问题<sup>[3-4]</sup>。在这些研究中, 闸门系统可靠度逐渐显现出其研究的迫切性和重要性。

其迫切性体现在: 闸门作为一个系统, 具有许多破坏模式, 只是单一地考虑闸门某构件的破坏所得出的结论是很难对整个闸门的破坏情况做出合理预判的, 而且在闸门的寿命预测和疲劳计算等方面的研究结果也表明, 只有在闸门系统可靠度研究取得有效成果的前提下, 这些方面的研究才可能取得实质性的突破。所以加快研究闸门

的系统可靠度刻不容缓。

其重要性体现在: 闸门系统可靠度的研究比较复杂, 虽然这个课题已经提出很久, 但这方面的研究成果并不多, 多数是针对闸门的某构件, 如主梁等。对整体来说, 必须考虑构件间的联系、构件对整个结构的影响以及多种失效模式的组合等, 这样才能得到更合理的结论。

闸门系统可靠度研究的重要意义如下: 1) 使设计具有更全面、合理、统一的理论依据, 减小人为因素引起的误差, 同时也便于工程的统一协调; 2) 使设计在经济上找到最合理的平衡点: 既满足工程需要, 同时所耗资源最少; 3) 能加快闸门其他方面的研究, 例如疲劳问题、振动问题和寿命预测问题等。

本文就闸门系统可靠度的研究历史及进展

收稿日期: 2013-04-03

作者简介: 王蛟(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利工程结构设计方面的研究。

(分为单一可靠度、过渡可靠度和系统可靠度3部分)做简要综述,并对系统可靠度的研究方向作适当展望,希望能为这方面的后续研究提供一些参考。

## 1 单一可靠度

闸门单一可靠度的研究主要包括两方面:

1)影响闸门性能的荷载统计分析;2)闸门单一构件的研究。其中,对主梁的研究最多,而对边梁、面板等其他构件的研究较少。此外,弧门支臂的可靠度对闸门的整体可靠度有较大影响<sup>[5]</sup>。由于单一可靠度研究的针对性较强,所以研究的可行性强,方法也多,成果也最为显著。

荷载统计分析是个初始工作,所以这方面的研究开展早,研究成果也较成熟。李典庆<sup>[6]</sup>对多种荷载的统计参数和概率分布做了全面的计算与分析;张照煌<sup>[7]</sup>统计了运行情况下闸门门前水位的统计规律;周建方等<sup>[8]</sup>分析得出了门前水头与主梁荷载的线性关系;周美英<sup>[9]</sup>推导了闸门静水压力的统计参数;刘云俊<sup>[10]</sup>采用“当量正态化”计算蚀余厚度的均值分布与方差,利用大量的统计数据,为将钢闸门设计规范修订成可靠度理论设计提供了基础数据支持。虽然这方面已经取得许多理论成果,但在荷载效应数据的统计分析方面还有待投入更多的人力物力<sup>[11]</sup>。

王羿<sup>[12]</sup>将闸门主梁设计为弹性支座,不仅减小了断面面积,节约了近30%的钢材,而且降低了安装难度和闸门自重。魏保兴<sup>[13]</sup>则反常道而行,讨论的是闸门可靠度的灵敏性,采用基于蒙特卡罗法的三维随机有限元法对闸门主梁进行了敏感性分析,验证了设计的合理性,虽然依旧是单一构件的可靠度研究,但这种逆向思维值得提倡,为将来的研究提供了一种不错的思路。李典庆等<sup>[14]</sup>基于可靠度原理,建立了闸门面板可靠度分析的极限状态方程,利用统计分析所得数据对闸门面板的可靠度进行了校准计算和分析,提出了水工钢闸门面板结构设计的目标可靠指标取值建议。构件的研究主要是为了解决某个实际工程问题,因此其针对性很强,但也难以取得普适性的研究成果。

## 2 过渡可靠度

所谓“过渡可靠度”即在单一可靠度研究的基础上,对部分构件或因素采用系统可靠度的研究方法进行研究所得的结果。主要涉及闸门腐蚀、疲劳和振动等问题。近年来这方面的研究渐多,这充分说明了加快系统可靠度的研究是整个行业的必然趋势。李典庆<sup>[15]</sup>虽只是对闸门主梁可靠度做了研究,但通过概率故障树模型成功地对主梁的多失效模式进行了系统可靠度分析,使得主梁的系统可靠度水平得到更合理的评估。周建方<sup>[16]</sup>采用经验校准法对钢闸门结构最低可靠度的确定方法进行了探索,得到了钢闸门最低可靠度限值。文献[17]和[18]分别提出了基于可靠度理论的现役钢闸门构件的承载能力极限状态和正常使用极限状态寿命预测方法。疲劳计算主要体现在刚度可靠度的计算上,李典庆等<sup>[19]</sup>通过对钢材锈蚀的统计分析,得到了锈蚀规律,并得到了闸门构件刚度的衰减模型。Binder<sup>[20]</sup>研究了水工钢结构中碳镍合金钢和碳钢在水中的腐蚀原理。Granata等<sup>[21]</sup>研究了腐蚀导致的结构刚度变小、疲劳强度降低等所引发的后果。这些方面的研究都取得了实质性的成果,但终究撇开了系统可靠度的理论前提,对闸门的系统可靠性能未能给出评价,这也是必须进行系统可靠度研究的原因之一。

## 3 系统可靠度

目前针对系统可靠度国外学者做了较多的尝试。Greimann等<sup>[22]</sup>提出了人字门运行状况评估的条件指数方法,并量化了专家意见,在理论中适当地考虑人为因素是理论发展的一个趋势。Allen<sup>[23]</sup>在此基础上将可靠性评估和条件指数检验程序相结合,通过检测数据不断更新结构的可靠度,这种方法就是求解系统可靠度的一种尝试。Estes<sup>[24]</sup>采用层次分析法可以分析不同失效模式的可靠指标,但实际工程证明这种分析法高估了系统可靠度指标,所以如何在系统可靠度分析中合理地考虑不同失效模式的组合作用是系统可靠度研究的一个课题<sup>[16]</sup>。

在系统可靠度研究领域,国内也不乏研究成果。王正中<sup>[25]</sup>对弧形门空间框架体系可靠度作

了计算分析, 提出了空间框架体系可靠度计算的串联模型及计算方法, 但闸门系统远不是一个简单的串并联模型。张春玉等<sup>[26]</sup>基于系统可靠度理论, 将系统可靠度作为结构优化控制参数, 采用分枝限界法判定系统的主要失效模式, 应用PNET法计算系统的可靠度。该方法只是通过一个算例进行了说明, 其普适性以及关键参数的取法还需要更多的工程实践验证。

闸门整体可靠度的研究似乎遇到了一个瓶颈, 在没有先例和切实可行的方法下, 确实很难进行更深入的研究。可靠度的研究, 始于电子原件可靠性的需要, 而这方面系统可靠度的研究已经开展很久, 并且在不断的推陈出新<sup>[27]</sup>。我们不妨参考这些领域的研究成果和工程实例, 从中借鉴一些方法来开展我们的研究, 例如人工神经元模型、模糊层次分析法等。

#### 4 研究展望

可靠度是衡量结构的一个简便又重要的指标。但就目前而言, 可靠度的研究依然集中于构件, 对结构系统可靠度的研究虽有进展但却远没达到工程需要的应用阶段。结构系统可靠度能更好地反映结构完成预定功能的概率情况, 所以必须加强闸门系统可靠度的研究。其研究方向可参考以下几点:

1) 相对其他行业钢结构的研究情况, 闸门钢结构的研究比较滞后, 聂素萍<sup>[28]</sup>提出了参考普通钢结构的设计方法, 并多加比较, 借此完善水工钢结构设计规范的建议, 这种借鉴可以大大加快规范的完善进度, 值得提倡。而美国水工钢结构设计规范甚至直接采用了该国钢结构设计规范的统计参数<sup>[29]</sup>。周建方等<sup>[30]</sup>则通过闸门可靠度校准分析, 对规范的修订提供更直接的帮助。修订规范有一劳永逸的效果, 只有规范的修订跟上了建设实践的需要才能更好地促进行业的发展。

2) 加强对水工钢闸门结构分析中各基本变量变异性的调查统计分析, 以便合理地确定影响结构可靠性的基本变量的统计参数与概率分布类型, 从根本上解决钢闸门可靠度分析缺乏基本数

据的问题。李典庆等<sup>[31]</sup>早已建议这种做法, 但至今未见有相关成果。

3) 空间体系计算模式虽然已经进行了一些研究, 但并不成熟。将来可结合有限元原理等分析方法<sup>[32]</sup>做更深入的分析, 还可参考PNET法和响应面法等基本的系统可靠度研究方法<sup>[33]</sup>。Niu Zhiguo等<sup>[34]</sup>还指出研究钢闸门的动态稳定性时, 不仅应该在计算体系上改进, 还应该研究闸门和流体的相互作用, 流固耦合对闸门的影响等。

4) 参考其他领域的系统可靠度研究进展。例如电子设备、机械等。这些最先涉及可靠性的领域, 在系统可靠度的研究方面已经取得了许多成果, 参考这些领域的成果和工程实例, 从中借鉴适用的方法来开展我们的研究, 也是一种不错的尝试。例如文献[35], 运用载荷-强度干涉模型、顺序统计量理论和概率微分方程建立随机载荷作用下的失效相关 $k/n$ 系统动态可靠性模型, 研究系统可靠度和失效率随时间的变化规律。

5) 可靠度模糊化。Mohamed等<sup>[36]</sup>使用模糊故障树分析建筑业风险事件的定量评估, 把故障树分析与人的作用合并考虑, 更科学地融入专家的人为因素作用。姚瑶等<sup>[37]</sup>提及了系统模糊可靠性指标。模糊可靠度相比传统可靠度更保守, 但也更接近真实情况。概率事件本来就是一个模糊的状态, 尝试运用模糊可靠度去解决问题是值得试一试的。

6) 闸门系统可靠度研究进展之所以较缓, 主要原因是其复杂性。对闸门构件的性能研究, 疲劳、寿命预测和振动等问题, 都与系统可靠度的研究相辅相成, 应该加快系统可靠度的研究, 但同时也不能放缓其他部分的进展, 进行有关动力作用、结构加固以及设计优化等方面的综合研究。

#### 参考文献:

- [1] GB 50153—1992 工程结构可靠度设计统一规范[S].
- [2] DIZF 5013—1995 水利水电工程钢闸门设计规范[S].
- [3] 吴世伟, 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [4] 谢智雄, 周建方, 李典庆. 我国闸门结构可靠度分析的现状[J]. 水利水电科技进展. 2006, 26(5): 83-86.
- [5] 魏保兴, 朱大林, 聂俊琴. 工程结构可靠性理论在水工

- 钢闸门领域的研究[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 68-71.
- [6] 李典庆. 水工钢闸门结构可靠度分析[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [7] 张照煌, 杨广杰, 叶定海, 等. 水工闸门作用水头概率特性规律研究[J]. 水利学报, 2000, 31(5): 60-64.
- [8] 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, 26(11): 24-30.
- [9] 周美英, 周建方, 李典庆. 水闸钢闸门可靠指标及分项系数的校准[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(6): 17-20.
- [10] 刘云俊, 杨建明, 叶小强. 基于检测数据的在役水工钢闸门主梁可靠度分析[J]. 人民长江, 2010, 41(17): 88-91.
- [11] 李宗利, 王正中. 水工钢闸门可靠度分析有关问题探讨[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 63-65.
- [12] 王羿, 王正中, 孙丹霞, 等. 弹性固支平板钢闸门主梁的可靠度分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(4): 54-58, 79.
- [13] 魏保兴, 朱大林, 聂俊琴. 水利机械中钢闸门可靠度的灵敏性分析[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(3): 24-25.
- [14] 李典庆, 张圣坤, 周建方. 水工钢闸门面板可靠度分析[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(1): 17-20.
- [15] 李典庆, 吴帅兵. 水工平面钢闸门主梁多失效模式相关的系统可靠度分析[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 870-877.
- [16] 周建方, 周美英, 李典庆. 现役钢闸门结构最低可靠度标准的确定[J]. 中国农村水利水电, 2003(5): 48-51.
- [17] 李典庆, 唐文勇, 周建方. 现役水工钢闸门结构正常使用寿命的预测[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 24-28.
- [18] 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): 1 119-1 122, 1 127.
- [19] 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评估[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 1 114-1 118.
- [20] Binder G. Research on protective coating systems for immersed steel structures[J]. Materials and Corrosion, 2001, 52(4): 261-267.
- [21] Granata R D, Wilson J C, Fisher J W. Assessing corrosion on steel structures using corrosion coulometer[J]. Journal of Infrastructure System, 1996, 2(3): 139-144.
- [22] Greimann L F, Stecker J H, Kao A M, et al. Inspection and rating of miter lock gates[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1991, 5(4): 226-238.
- [23] Allen C Estes, Dan M Frangopol, Stuart D Foltz. Using condition index inspection results to update the reliability of miter gates for navigation locks[J]. Structure, 2001(1): 1-6.
- [24] Estes A C, Foltz S D. Two alternative system reliability approaches to the serviceability condition assessment of spillway gate systems on dams[C]//Proceedings of the 17th Analysis and Computation Specialty Conference. St. Louis, Missouri, USA: ASCE, 2006.
- [25] 王正中, 李宗利, 李亚林. 弧形钢闸门空间框架体系可靠度分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1998, 26(4): 35-40.
- [26] 张春玉, 韩雪, 姜封国. 基于系统可靠度的预应力空间网格结构优化[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(5): 377-379, 410.
- [27] 李立亚. 某四状态系统可靠度分析[J]. 湖北第二师范学院学报, 2012, 29(2): 7-8, 11.
- [28] 聂素萍, 聂志华. 水工钢闸门桁架构件可靠度研究[J]. 科技资讯, 2008: 75.
- [29] USACE, Vertical Lift Gates[R]. Washington: U. S. Army Corps of Engineers(USACE), 1997.
- [30] 周建方, 李典庆. 水工钢闸门结构可靠度校准分析[J]. 四川水力发电, 2003, 22(4): 96-97, 100.
- [31] 李典庆, 常晓林. 水工钢闸门可靠度分析研究进展[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(2): 46-50.
- [32] 李蓓蓓, 赵志宏, 胡发宏. Ansys在船闸人字门设计中的应用[J]. 大坝与安全, 2003(4): 4-6.
- [33] 梁利端, 李玲玲. 浅谈系统的结构可靠度[J]. 硅谷, 2008(16): 113.
- [34] Niu Zhiguo, Li Tongchun. Research on dynamic stability of steel radial gates [J]. Earth and Space, 2008(1): 1-6.
- [35] 王正, 谢里阳. 考虑失效相关的k/n系统动态可靠性模型[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 72-78.
- [36] Mohamed A. Aminah R F. Fuzzy reliability analyzer: Quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault-tree analysis[J]. J Constr Eng Manage, 2011, 137: 294-302.
- [37] 姚瑶, 钱存华, 刘敏. 基于模糊状态的串—并联可修系统的模糊可靠性[J]. 价值工程, 2011, 30(20): 20-21.

( 本文编辑 郭雪珍 )