

我国闸门结构可靠度分析的现状

谢智雄¹ 周建方¹ 李典庆²

(1. 河海大学机电工程学院 江苏 常州 213022 ; 2. 武汉大学水利水电学院 湖北 武汉 430072)

摘要 : 从荷载和抗力的统计分析、可靠度计算、闸门设计规范的校准、可靠度设计表达式和分项系数的确定等方面 , 对可靠度理论在我国闸门结构设计中的应用进行了较为系统的总结和讨论。针对我国闸门结构可靠度分析中存在的问题 , 提出相应的解决方法。论述了闸门设计规范采用可靠度理论的必要性和可行性 , 认为我国水利水电工程领域最终会全面应用可靠度理论 , 将闸门的设计规范修改成按可靠度理论设计宜早不宜晚。

关键词 : 水工结构 ; 钢闸门 ; 可靠度分析 ; 闸门设计规范 ; 规范校准

中图分类号 : TV663 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-764X(2006)05-0083-04

Present state and some problems in reliability analysis of hydraulic steel gates in China//XIE Zhi-xiong¹, ZHOU Jian-fang¹, LI Dian-qing² (1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China ; 2. College of Water Resource & Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : The application of the reliability theory to design of hydraulic steel gates in China is summarized and evaluated systemically from aspects of statistical analysis of loads and resistances, reliability calculation, calibration of the hydraulic steel gate design specification, determination of the expression for reliability design and the partial coefficient, etc. In respect to some problems in reliability analysis, some effective methods are presented. Furthermore, the necessity and feasibility for the hydraulic steel gate design specification employing the reliability theory is discussed, and it is drawn that the reliability theory will be widely applied to the whole field of hydraulic and hydroelectric engineering in China, and that the hydraulic steel gate design specification should be revised based on the reliability theory as soon as possible.

Key words : hydraulic structure ; steel gate ; reliability analysis ; steel gate design specification ; specification calibration

自从 1984 年我国颁布以结构可靠度理论为基础的《建筑结构设计统一标准》^[1]以来,又先后颁布了《工程结构可靠度设计统一标准》^[2]、《港口工程结构可靠度设计统一标准》^[3]、《铁路工程结构可靠度设计统一标准》^[4]、《公路工程结构可靠度设计统一标准》^[5]。经过 20 多年的努力,根据上述统一标准的有关规定,我国已有 50 多本结构设计规范按结构可靠度理论进行了修编,其中《建筑结构可靠度设计统一标准》和《钢结构设计规范》还都分别于 2001 年和 2003 年进行了新一轮的修订^[6-7]。迄今为止,我国是在结构设计标准中采用可靠度理论最广泛的国家之一。可靠度理论在我国各种结构设计规范中应用的规模和深度也超过了世界上一些先进国家,这大大提高了我国结构设计规范的科学水平,使我国的工程结构设计规范水平已跻身于世界先进行列。从目前国内外结构设计方法和设计标准编制的发展趋势来看,对各种设计标准和规范按结构可靠度理

论进行修编可以说是势在必行。

在水利水电行业,我国于 1994 年颁布了《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[8],随后又根据这个标准,先后颁布了《水工混凝土结构设计规范》^[9]、《水工建筑物抗震设计规范》^[10]、《水工建筑物荷载设计规范》^[11],可靠度理论已经得到了应用。虽然目前我国《水利水电工程钢闸门设计规范》^[12]仍然采用容许应力法,但有关可靠度理论在钢闸门上的应用研究一直没有停止过,文献 [13-25] 列出了其中的一些主要成果。本文试图从下面几个方面对我国闸门结构可靠度分析的现状和存在的问题进行总结和探讨,以期对这一领域开展深入研究提供一些意见和建议。

1 荷载的统计分析

根据《水利水电工程钢闸门设计规范》^[12],作用在闸门上的荷载主要有静水压力、动水压力、自重、

泥沙压力、波浪压力、启闭力、地震动水压力、冰压力、水锤压力、温度荷载等。虽然《水工建筑物荷载设计规范》^[1]对各种荷载的取值作了一些规定,但并没有全部给出其统计参数和分布,因此并不能满足闸门可靠度分析的要求,还必须作进一步研究。

对于静水压力,仅有文献[14, 26-28]进行过统计分析。文献[14]是对一个具体工程实例的统计;文献[27-28]是对坝、闸上游水位的统计,正像文献[28]所分析的那样,坝前水位与门前水位是有差别的,并不能将结果直接应用到闸门结构上,仅有文献[28]是真正对作用在闸门结构上的水头做了统计分析,但其成果相对来说还比较粗糙。对于泥沙压力、波浪压力等作用在闸门结构上的其他荷载,目前仅有文献[29]根据有关计算公式和规定做了分析计算,得到了一些统计参数,显然,所有这些统计参数还可作进一步的论证。

从现有的闸门结构可靠度分析结果来看,所有这些参数总体上看还是合适的,只是要将其在规范中使用,还有必要进行更深入和精细的研究。从技术层面讲只要有关部门组织进行即可。值得注意的是静水压力下闸门结构的情况要比闸、坝复杂得多,要根据闸门的工作特性、工作环境和闸门类型分门别类进行统计,切忌把它们混在一起作为一个大样本来统计。例如露顶门和潜孔门,其静水压力的变异系数显然有很大的差别^[29]。对于泥沙压力、波浪压力等,由于相对静水压力所占比重较小,因此如果统计有困难,笔者认为可以结合专家经验和相应的计算公式综合分析以确定其统计参数。

2 抗力的统计分析

由结构可靠度理论可知,影响结构或构件抗力的因素主要有材料性能、几何尺寸和计算模式等。由于工业与民用建筑钢结构对此的统计分析较为深入完善,所以目前在钢闸门可靠度分析时一般均采用工业与民用建筑钢结构中的统计参数,针对闸门结构进行统计分析的不多,这实际上意味着将闸门结构的抗力特性看成与工业与民用建筑钢结构的抗力特性完全相同。从大的方面看,在缺乏统计分析的情况下,这样做也是可行的。但同时也必须看到,它没有反映出闸门结构本身固有的特性,也还有更深入的必要。

2.1 材料性能的统计分析

由于闸门结构所用钢材与其他钢结构完全一样,故材料性能的统计参数可以采用现有的《钢结构设计规范》中的数据,不需另作分析。

2.2 几何尺寸的统计分析

总体来讲,我国闸门结构的加工制造水平应该与其他行业相当,但闸门结构也有其特殊性,目前还未见有文献对闸门结构的几何尺寸直接做过统计分析。在缺乏统计数据的情况下,笔者认为利用现有的一些文献资料和有关规定也是可以的。例如,对于型钢和构件厚度,一般在闸门制造时不作加工,因此其统计参数可直接应用现有的统计数据^[30]。对于构件的长度和宽度,由于闸门制造安装时对其公差有明确的规定^[31-32],因此可根据这些公差规定分析出其统计参数。由于闸门结构的尺寸一般都比较小,而公差又比较小,因此构件长度和宽度的变异系数一般都很小,把它们作为定量也未尝不可,对结果的影响不会很大。

2.3 计算模式的统计分析

所谓计算模式的不定性主要是指根据力学计算模型所得到的内力、位移等与其真实值的差异。这是闸门结构在抗力计算中与其他钢结构最大的不同之处,但目前还未见有文献对此进行分析,一般粗略地认为与其他钢结构相同。闸门结构是一个空间结构,目前工程中广泛应用的方法是将这个空间结构根据传力途径简化成几个平面体系,然后采用结构力学或材料力学的方法进行分析求解,显然其计算结果与真实情况是有差异的,因此有必要对此进行深入的研究。方法是选择一些典型的工程实例,分别采用平面计算体系方法和空间有限元方法进行分析,然后对比分析其结果,得到平面计算体系方法不定性的统计参数。如能对这些工程实例进行原型监测,并和有限元结果相互校正,则更好。当然,从规范的继承性和纯粹是对规范进行可靠度“套改”,认可目前平面计算体系方法的合理性,也是可行的。

3 可靠度计算和规范的校准

3.1 可靠度计算方法

目前在闸门构件可靠度计算时一般采用JC法,仅在进行弧门主框架体系可靠度分析时有文献采用过蒙特卡罗法和层次分析法^[33-34],这与其他工程结构可靠度分析的情况相类似。虽然有些可靠度分析方法的精度高于JC法,但由于JC法相对简单,其精度也能满足工程要求,所以被JCSS组织推荐,也为各种工程结构设计规范普遍采用。

3.2 闸门构件的强度可靠度和规范校准

目前关于闸门可靠度的研究,主要集中在两方面:一是针对一些具体工程实例^[14, 19, 35],二是对主梁进行研究^[16-17, 27]。由于笔者分析时对一些参数的统计数据采用得不一致,计算时又往往各作了一

些假设,因此所得可靠指标有较大的差别,但大多在3~4左右,这与其他钢结构的可靠度水平相当。

若要修订现行闸门设计规范,首要工作是搞清楚现行闸门设计规范的目标可靠指标。校准法是现阶段确定目标可靠指标的常用方法,它是通过对现行规范可靠度的校准计算,再经过综合分析和调整来确定规范的目标可靠指标。文献[13,16-17,22]都可以看作是这方面工作的一部分,但较为系统的研究应是文献[15]和[36]。文献[36]是在对一些统计参数作更进一步的研究和考虑了多种荷载及荷载效应比之后进行的,其结果应比文献[15]更为准确。应该说,对闸门设计规范进行可靠度校准目前已经做了不少工作,技术上也不存在什么难度。

3.3 闸门构件的刚度可靠度

结构构件的刚度主要反映的是构件正常使用状况,在原《建筑结构可靠度设计统一标准》^[1]和现行的《水利水电工程可靠度设计统一标准》^[8]中,对其可靠度并未作出明确的规定,但随着可靠度理论研究的深入发展,在新版的《建筑结构可靠度设计统一标准》^[6]中根据《结构可靠性总原则》^[37]的规定,对结构构件正常使用的可靠度也做出了规定。相比其他钢结构,闸门结构的刚度问题往往更重要,因为如对闸门结构的变形控制不够,就会引起闸门漏水,甚至引起闸门振动,因此对闸门结构的刚度可靠度进行分析计算是非常必要的。目前对此开展了一些研究^[24,38],从结果来看,完全满足《结构可靠性总原则》的要求,也符合《建筑结构可靠度设计统一标准》中的规定。

3.4 闸门体系的可靠度

由于闸门结构是一个复杂的空间体系,很难用简单的串并联模型来模拟它,因此目前的研究还主要停留在闸门构件上,对闸门整体可靠度的研究很少,已有的也仅是一些非常简单的情況^[18,34]。研究结构整体可靠度,虽然具有重要意义,但由于其复杂性,目前更多的还是停留在理论研究上,因此在各结构可靠度设计标准中^[2,6,8]还均未采用结构体系可靠度设计。

3.5 闸门构件的时变可靠度和安全性评估

随着时间的推移,结构性能受环境、荷载及材料内部作用而发生缓慢变化,即结构的抗力将不再是一个定值,而是随时间衰减。对于闸门结构,影响抗力的最主要因素是钢材的锈蚀,因此文献[23]首先收集整理了有关文献中的闸门锈蚀数据,得到了闸门的锈蚀规律,然后在此基础上分析得出闸门抗力的衰减函数。由于抗力随时间衰减,很显然闸门构件的可靠度也随时间下降,于是就产生了闸门构件最低可靠指标的确定和基于可靠度理论的现役闸门

结构的安全评估及寿命预测等问题,目前这方面已开展了一定的研究^[20,25,39-40],但还有许多工作可做,如闸门结构锈蚀规律的进一步研究等,这对于闸门结构的合理维修、加固和报废具有重要意义。

4 设计表达式和分项系数的确定

目前在结构可靠度理论中,将JC法直接用于设计还有相当的困难,而且多年以来,工程设计人员已习惯于采用基本变量的代表值(如标准值)和相关的一些系数(如安全系数、分项系数等)进行设计,因此结构可靠度理论能否为广大设计人员所接受的关键因素之一是能否将JC法转化成工程设计人员所能接受的设计表达式。目前这方面的工作已经相当成功,各结构设计标准^[2,6,8]经过优化,普遍采用了以变量的标准值和分项系数表示的多系数设计表达式。但是由于各标准的着眼点不同,具体表达方式上有所差别,例如对于承载能力极限状态,《建筑结构可靠度设计统一标准》中使用的是抗力分项系数,而《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》中使用的是材料性能分项系数,它将计算模式的不定性反映到了结构系数中,而在《建筑结构可靠度设计统一标准》中没有结构系数的概念。

由于闸门设计规范应该遵循《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》的要求,因此其设计表达式和各分项系数必须采用《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》中的规定。文献[21]根据《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[8]、《水工建筑物荷载设计规范》^[11]和《钢结构设计规范》^[7]中的有关规定,经过分析确定出了相应的5个分项系数值,并对可靠度理论设计的用钢量和按现行闸门容许应力法设计的用钢量进行了对比,说明了所取分项系数值的合理性。

5 结 语

a. 相对于其他工程领域,我国目前水利水电工程中应用可靠度理论总体上看并不广泛和深入。除了习惯上的阻碍和概率统计知识还不够普及以外,主要在于水利水电工程的复杂性和缺乏大量系统的统计数据。因此有意见认为,既然有些基本变量如荷载、材料性能等统计资料尚不充分,对其确定人为因素多,难度也大,可靠度理论不如安全系数设计法好。但是必须看到,结构可靠度理论在各工程领域中的应用是国内外发展的一个趋势,我国水利水电工程领域最终会全面应用可靠度理论。因此,及早开展这方面的研究无疑是有益的,可以大力地促进水工结构设计的进一步科学化与合理化,促进水

工行业标准的科技进步。

b. 对于闸门设计规范 ,如果仍然采用安全系数法显然不合时宜。美国的水工钢结构设计标准在 1993 年就已采用了可靠度理论^[41]。我国闸门设计规范必须遵循的《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[8]、《钢结构设计规范》^[7]、《水工建筑物荷载设计规范》^[1]均已采用了可靠度理论。闸门设计规范如与这些标准和规范不统一、不一致 ,容易引起混乱 ,给设计、施工、验收等带来不便。因此 ,将闸门设计规范修改成按可靠度理论设计也是宜早不宜迟的事。

c. 从上面的分析可以看到 ,虽然目前闸门设计规范采用的是安全系数法 ,但对可靠度理论在闸门结构设计中的应用已经进行了相当的研究 ,从技术层面上讲 ,由于《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》、《钢结构设计规范》、《水工建筑物荷载设计规范》这些上一级的标准、规范已采用了可靠度理论 ,闸门规范采用可靠度理论已无大的问题。即使对目前一些统计数据不充分的变量 ,也可参考前阶段建筑、铁路、公路等部门各设计规范‘套改’的经验 ,对现行闸门设计规范安全系数设计法进行一定的分析、换算 ,再结合工程经验来确定其统计量或设计代表值 ,从而可以首先在形式上与可靠度理论达到一致 ,以后再逐步改进。可以说 ,经过努力闸门设计规范采用可靠度理论是完全可以实现的。

参考文献：

[1] GBJ 68—84 建筑结构设计统一标准(试行) [S] .
[2] GB 50153—92 工程结构可靠度设计统一标准 [S] .
[3] GB 50158—92 港口工程结构可靠度设计统一标准 [S] .
[4] GB 50216—94 铁路工程结构可靠度设计统一标准 [S] .
[5] GB/T 50283—1999 ,公路工程结构可靠度设计统一标准 [S] .
[6] GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准 [S] .
[7] GB 50017—2003 钢结构设计规范 [S] .
[8] GB 50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准 [S] .
[9] DL/T 5057—1996 水工混凝土结构设计规范 [S] .
[10] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范 [S] .
[11] DL 5077—1997 水工建筑物荷载设计规范 [S] .
[12] DL/T 5013—95 水利水电工程钢闸门设计规范 [S] .
[13] 范崇仁 ,徐德新 .水工钢闸门可靠度的分析 [J] .水力发电 ,1993 (8) :34-39 .
[14] 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 .
[15] 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 ,1993 (11) :24-30 .
[16] 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 ,1993 (3) :33-35 .
[17] 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 .
[18] 王正中 ,李宗利 ,李亚林 .弧形钢闸门空间体系可靠度分析 [J] .西北农业大学学报 ,1998 26 (4) :35-40 .
[19] 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 .
[20] 任玉珊 ,牟新河 .既有水工钢闸门耐久性专家评估方法研究 [J] .钢结构 ,2002 ,17 (4) :57-58 .
[21] 周建方 ,李典庆 .水工钢闸门结构系数的确定 [J] .长江科学院院报 ,2002 ,19 (5) :34-37 .
[22] 安旭文 ,侯建国 ,李大庆 .水工平面钢闸门主梁的可靠度校准分析 [J] .长江科学院院报 ,2003 20 (1) :13-16 .
[23] 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 .
[24] 周建方 ,李典庆 ,李朝晖 ,等 .水工钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析 [J] .河海大学学报 :自然科学版 ,2003 31 (3) :310-313 .
[25] ZHOU Jian-fang ,LI Dian-qing ,MICHAEL H F. Reliability assessment and acceptance criteria for steel gate structures subjected to corrosion deterioration[C] //ANDRZEJ S N , DAN M F. Proceedings of the 4th International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructures Systems. Florida :Cocoa Beach ,2005 299-306 .
[26] 吴世伟 ,张思俊 ,余强 .坝上游水位变化规律及其统计量 [C] //吴世伟 .结构安全度与可靠度分析论文集 .南京 :河海大学出版社 ,1988 36-42 .
[27] 许萍 ,周建康 ,费勤贵 .水闸上游水位变化规律统计分折 [J] .扬州大学学报 :自然科学版 ,2001 4 (3) :34-37 .
[28] 张照煌 ,杨广杰 ,叶定海 ,等 .水工闸门水头概率特性规律研究 [J] .水利学报 ,2000 (5) :60-64 .
[29] 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 .
[30] 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 .
[31] DL/T 5018—94 水利水电工程钢闸门制造安装及验收规范 [S] .
[32] GB/T 14173—93 平面钢闸门技术条件 [S] .
[33] 李宗利 ,王正中 .弧门主框架体系可靠度分析模型与蒙特卡洛模拟 [J] .西北水电 ,1993 (3) :41-43 .
[34] 周建方 ,李典庆 .用层次分析法对弧形钢闸门主框架可靠性评估 [J] .水运工程 ,2003 (7) :13-16 .
[35] 朱敏 ,刑贵碧 ,吴风昭 ,等 .樊口大闸钢闸门可靠度分析 [J] .人民长江 ,1993 24 (12) :23-27 .
[36] 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 .
[37] ISO 2394 :1998 结构可靠性总原则 [S] .
[38] 李典庆 ,张圣坤 ,唐文勇 ,等 .闸门结构刚度可靠度分析 [J] .武汉大学学报 ,2002 35 (4) :48-53 .
[39] 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 .
[40] 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) :1119-1112 .
[41] EM 1110-2-2105 ,Design of hydraulic steel structures[S] .

(收稿日期 2006-03-24 编辑 骆超)