

SHUIGONG GANGZHAMEN
JIEGOU KEKAODU FENXI

水工钢闸门结构 可靠度分析

周建方 李典庆 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑 王德鸿

E-mail: wdh@waterpub.com.cn

电话: 010-63202266-2225



北京瑞兴文化艺术中心 / 刘一黎

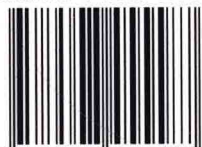
Tel: (010) 68311017 63202266-2701

E-mail: art@waterpub.com.cn

www.waterpub.com.cn / art

封面
设计

ISBN 978-7-5084-5558-7



9 787508 455587 >

定价: 28.00 元

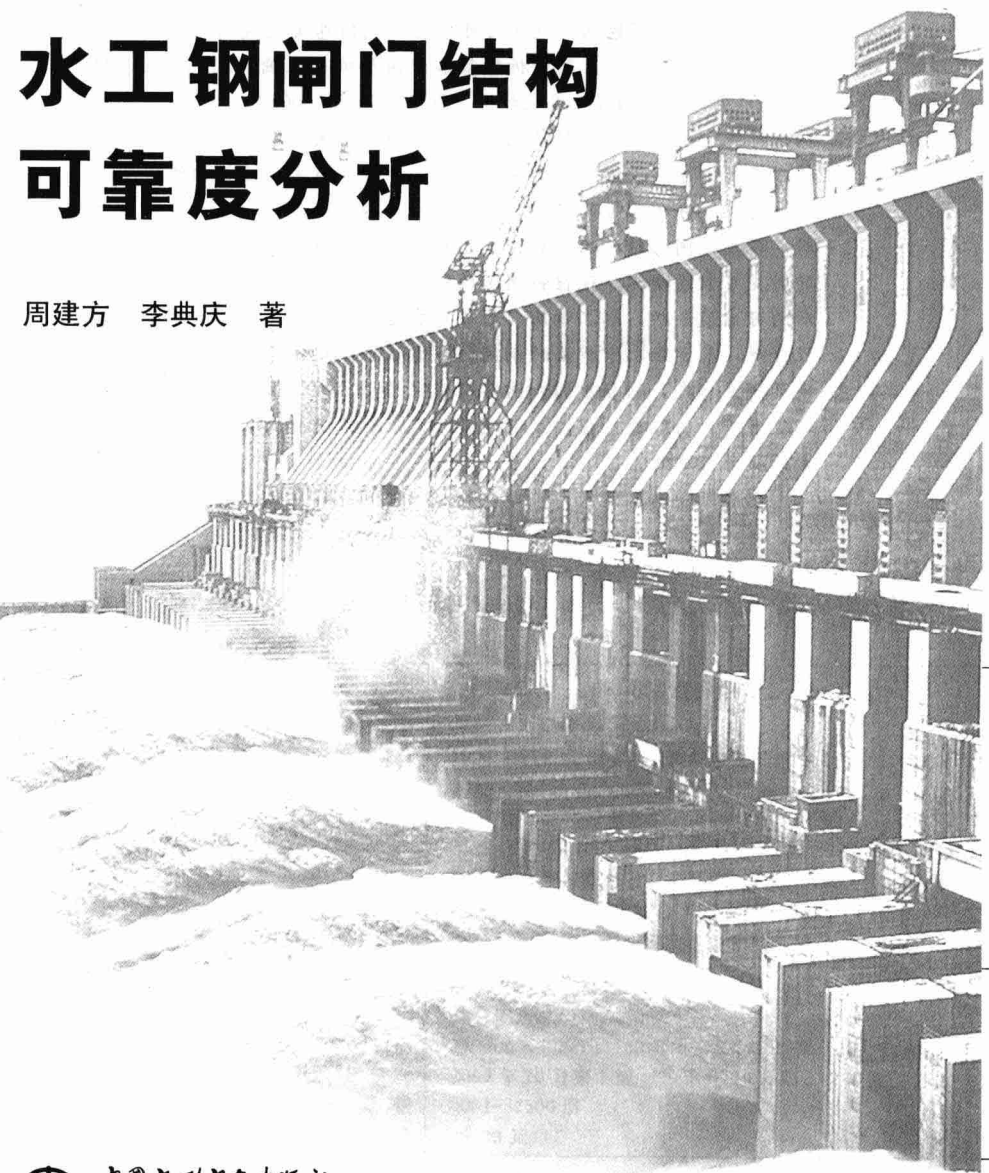
销售分类: 水利水电工程

SHUIGONG GANGZHAMEN

JIEGOU KEKAODU FENXI

水工钢闸门结构 可靠度分析

周建方 李典庆 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

水工钢闸门结构可靠度分析 / 周建方, 李典庆著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5558 - 7

I. 水… II. ①周…②李… III. 钢闸门—结构可靠性—分析 IV. TV663

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 061121 号

书 名	水工钢闸门结构可靠度分析
作 者	周建方 李典庆 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	140mm×203mm 32 开本 6.875 印张 185 千字
版 次	2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

内 容 提 要

本书主要内容包括:钢闸门可靠度研究的意义及我国钢闸门可靠度研究现状,结构可靠度分析的基本理论和概率基础,GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》和 GB 50068—2001《建筑结构设计统一标准》可靠度理论应用的异同,钢闸门结构荷载的统计分析,现行钢闸门设计规范的强度可靠度分析,钢闸门结构构件强度设计表达式和分项系数的确定,钢闸门结构构件刚度可靠度的计算和分析,现役钢闸门结构的荷载模型和抗力模型的研究,现役钢闸门结构的时变可靠度研究,现役钢闸门结构寿命预测研究,钢闸门结构加固后的可靠度分析,水工钢闸门面板可靠度分析,水工钢闸门系统可靠性分析,基于层次分析法的钢闸门可靠性分配规律等。本书是作者从实际研究出发,结合了国内同类研究及自身工作实践经验编写而成,不仅有重大的理论价值,且有现实的需求、广泛的工程应用背景和重大的社会经济效益。

本书可供水工钢闸门设计、制造、安装、研究人员及大专院校教师、研究生和从事结构可靠性分析领域的人员参考使用。

前 言

目前,结构可靠度理论及方法已日趋成熟,并在各种工程结构中得到了广泛应用。国内建筑结构、港口工程结构、铁路工程结构、公路工程结构和水利水电工程结构均已采用了可靠度设计理论,相关的著作也已有不少,但是目前还没有一本专门论述水工钢闸门结构可靠度理论分析方面的专著,甚是缺憾。

虽然目前我国 DL/T 5013—95《水利水电工程钢闸门设计规范》仍是采用容许应力方法,但是对钢闸门结构可靠度理论和方法,国内已作了许多研究。作者从 20 世纪 90 年代初就开始进行这方面的研究工作,先后完成和正在进行国家自然科学基金、科技部社会公益项目、水利部科技项目等多项科研任务,在各种期刊上发表论文 30 多篇,涉及钢闸门结构可靠度分析的方方面面,有些内容目前国内还无人涉足。本书是上述成果的一次系统总结、凝练和完善,同时也吸收了部分国内其他专家的研究成果。本书力求能自成体系,反映全貌,由浅入深,方便读者阅读。

本书第 1~6 章、第 14 章、第 15 章由周建方编写,第 7~13 章由李典庆编写。全书统稿由周建方完成。

本书中一些内容的研究得到国家自然科学基金

(50609016)、国家自然科学基金委员会——国际（地区）合作与交流项目（50710105013）、科技部社会公益研究专项资金（2000DIB10085）和水利部科技创新项目的资助，在此一并致谢。此外，在本书的编写过程中，唐椿炎、吴帅兵做了许多录入和校对工作，在此表示衷心的感谢！

希望本书的出版，能有力地促进我国《水利水电工程钢闸门设计规范》尽早采用可靠度设计理论和方法；同时，起抛砖引玉之用，希望能有更多这方面的著作问世。

钢闸门结构可靠度理论的研究还处于发展阶段，鉴于作者学识、水平所限，本书难免有不当之处，敬请批评指正。

作者

2008年1月

目 录

前言 1

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢闸门可靠度研究的意义	1
1.2 我国钢闸门可靠度研究现状	3
1.3 本书主要内容	9
参考文献	12
第 2 章 结构可靠度分析的基本理论和概率基础	17
2.1 随机事件及其概率	17
2.2 随机变量及其分布函数	18
2.3 结构可靠度分析中常用的概率分布	22
2.4 结构可靠度分析的若干基本概念	25
2.5 结构可靠度的计算方法	29
参考文献	35
第 3 章 GB 50199—94 和 GB 50068—2001 可靠度	
理论应用的异同	36
3.1 设计原则及适用范围	36
3.2 荷载的统计分析	37
3.3 设计表达式	38
3.4 分项系数的确定原则	40
3.5 荷载组合原则	41
3.6 荷载组合系数	42
3.7 荷载代表值	43
3.8 短期、长期效应组合	43
3.9 设计使用年限	43
参考文献	44

第 4 章 钢闸门结构荷载的统计分析	46
4.1 静水头的统计分析	46
4.2 波浪压力的统计分析	56
4.3 泥沙压力的统计分析	64
4.4 地震动水压力的统计分析	69
4.5 动水压力的统计分析	71
4.6 平面闸门主梁荷载与水头关系分析	71
4.7 弧形闸门主梁荷载与水头关系分析	74
参考文献	78
第 5 章 现行钢闸门设计规范의强度可靠度分析	81
5.1 抗力统计分析	81
5.2 荷载基本统计数据	84
5.3 闸门规范的可靠指标	85
5.4 结论	93
参考文献	95
第 6 章 钢闸门结构构件强度设计表达式和分项系数的确定	96
6.1 承载能力设计表达式	96
6.2 各分项系数的确定	97
6.3 可靠指标的比较	104
6.4 用钢量的比较	105
参考文献	107
第 7 章 钢闸门结构构件刚度可靠度的计算和分析	109
7.1 极限状态方程的建立	110
7.2 抗力的概率模型	111
7.3 可靠指标的校准结果与分析	114
参考文献	117
第 8 章 现役钢闸门结构的荷载模型和抗力模型的研究	119
8.1 现役钢闸门可靠性鉴定时荷载的统计参数	119
8.2 钢闸门结构时变抗力模型	127

参考文献	133
第 9 章 现役钢闸门结构的时变可靠度研究	135
9.1 闸门结构构件时变强度可靠度分析	135
9.2 闸门结构构件时变刚度可靠度分析	140
参考文献	143
第 10 章 现役钢闸门结构寿命预测研究	144
10.1 现役钢闸门结构最低可靠度标准的确定	144
10.2 现役钢闸门剩余寿命预测	152
参考文献	161
第 11 章 钢闸门结构加固后的可靠度分析	163
11.1 钢闸门加固后的荷载和抗力的统计参数	163
11.2 钢闸门加固后的受弯构件可靠指标的计算	165
参考文献	170
第 12 章 水工钢闸门面板可靠度分析	172
12.1 极限状态方程的建立	172
12.2 荷载和抗力的统计参数	174
12.3 钢闸门面板可靠指标计算	178
12.4 面板的目标可靠指标	180
12.5 结论	182
参考文献	183
第 13 章 水工钢闸门系统可靠性分析	184
13.1 平面钢闸门主梁体系可靠度分析	184
13.2 弧形钢闸门空间框架体系可靠度分析	195
参考文献	198
第 14 章 基于层次分析法的钢闸门可靠性分配规律	199
14.1 层次分析(AHP)法	199
14.2 钢闸门系统可靠性分配规律	203
参考文献	208
第 15 章 结束语	209

第 1 章 绪 论

1.1 钢闸门可靠度研究的意义

在工程结构设计标准中采用以可靠度理论为基础的概率极限状态设计法,是当前国际工程结构领域的一个共同发展趋向。1998年,国际标准化组织(ISO)正式发布了 General Principles on Reliability for Structures^[1],它是指导工程结构设计标准按概率极限状态设计法进行修编的基本文件。我国自从1984年颁布以结构可靠度理论为基础的 GBJ 68—84《建筑结构设计统一标准》^[2]以来,先后颁布了国家标准 GB 50153—92《工程结构可靠度设计统一标准》^[3]、GB 50158—92《港口工程结构可靠度设计统一标准》^[4]、GB 50216—94《铁路工程结构可靠度设计统一标准》^[5]、GB 50283—1999《公路工程结构可靠度设计统一标准》^[6]。经过20多年的连续努力,我国已有50多本结构设计规范根据上述统一标准的有关规定按结构可靠度理论进行了修编,是迄今为止在结构设计标准中采用可靠度理论最广泛的国家之一,其中 GB 50068—2001《建筑结构设计统一标准》^[7]和 GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[8]还分别于2001年和2003年进行了新一轮的修订,《工程结构可靠度设计统一标准》修订稿目前也已完成。因此对于可靠度理论在各种结构设计规范中的应用,我国这项工作的规模和深度已超过了世界上一些先进国家。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,各种设计标准和规范按结构可靠度理论进行修编已经势在必行。

在水利行业和电力行业,美国陆军工程师兵团(USACE)

于 1993 年就颁布了基于可靠度理论的荷载抗力系数 (LRFD) 设计方法的水工钢结构设计规范^[9], 随后又相继颁布了采用荷载抗力系数设计方法的平面钢闸门和弧形钢闸门设计规范^[10,11]。在欧洲, 德国于 1998 年颁布了基于极限状态设计理论的分项系数设计方法的闸门设计规范 DIN—19704^[12]。我国也于 1994 年颁布了国家标准 GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[13], 随后又根据这个标准, 先后颁布了电力行业标准 DL/T 5057—1996《水工混凝土结构设计规范》^[14]、DL 5073—1997《水工建筑物抗震设计规范》^[15]、DL 5077—1997《水工建筑物荷载设计规范》^[16], 但是目前我国 DL/T 5013—95《水利水电工程钢闸门设计规范》^[17]仍然采用容许应力法, 显然已大大落后于形势, 因此有必要开展钢闸门可靠度理论的研究。

另一方面, 新中国成立 50 多年来, 水工钢闸门已安装了 500 多万 t, 价值 100 亿元左右。根据水利行业标准 SL 226—98《水利水电工程金属结构报废标准》^[18]中大型闸门折旧年限为 30 年、中小型闸门折旧年限为 20 年的规定, 目前正在运行的钢闸门有许多已经达到或超过了规定的使用年限, 有些甚至达到设计使用年限而仍在超役运行。因此, 有必要对这些闸门进行安全检测来评估其安全性。为此, 我国颁布了水利行业标准 SL 100—94《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》^[19], 主要是利用现有的检测手段, 应用数学、机械及力学理论, 对现场检测数据进行分析, 并由专家根据现场检测结果对闸门各子构件及钢闸门整体的安全度进行评估, 从而确定钢闸门的检测周期、维修方案和加固措施。这种传统的定性分析方法本质上是半经验半理论的, 缺乏足够充分的理论依据。由于钢闸门的寿命受许多因素的影响, 而这些因素大部分都是随机的, 因此闸门结构的使用寿命也是一个随机变量。显然采用可靠度理论来进行现役钢闸门的安全度评估及寿命预测是十分有必要且合理的, 它正成为世界水利大国进行钢闸门安全度评估的基本技术和标准^[20,21]。因此有必要研究基于可靠度理论的水工钢闸门安全度评估及寿命预测理论。

总之,开展水工钢闸门可靠度的理论和方法研究是一件十分必要且十分有意义的事情。

1.2 我国钢闸门可靠度研究现状

结构可靠度是指结构在规定的时间内,规定的条件下,完成预定功能的概率。GB 50199—94 规定,水工结构在设计使用年限内应满足下列 4 项功能要求:

- (1) 在正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用。
- (2) 在正常使用时,具有设计规定的工作性能。
- (3) 在正常维护下,具有设计规定的耐久性。
- (4) 在出现预定的偶然作用时,主体结构仍能保持必需的稳定性。

上述 (1)、(4) 项表示结构的安全性,(2) 项表示结构的适用性,(3) 项表示结构的耐久性。因此对钢闸门的可靠度研究也主要围绕安全性、适用性、耐久性展开,其分析流程大致可用图 1.1 表示。下面分别从安全性、适用性、耐久性 3 方面来简述我国钢闸门可靠度研究的现状。

1.2.1 钢闸门安全性分析

这是目前研究中相对较为完善的一部分,也是钢闸门可靠度研究中最基础最重要的一部分。它涉及 4 个方面的内容:①载荷的统计分析;②抗力的统计分析;③可靠度校核;④分项系数的确定。

1.2.1.1 载荷的统计分析

根据 DL/T 5013—95,作用在闸门的荷载主要有: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、温度等。虽然 DL 5077—1997 对各种荷载的取值作了一些规定,但许多并没有给出其统计参数和分布,因此并不能满足钢闸门可靠度分析的要求,还必须作进一步

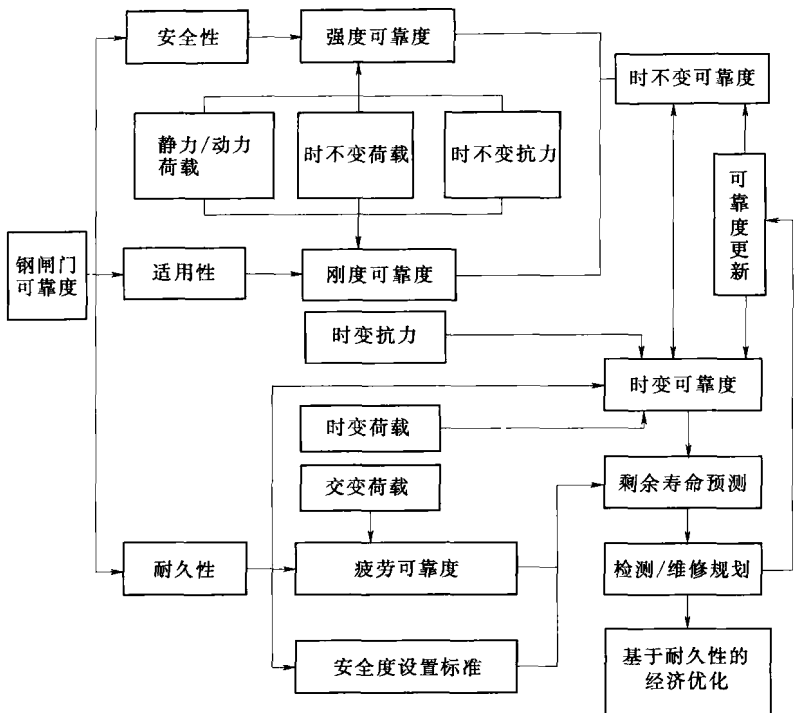


图 1.1 钢闸门可靠度分析流程图

的研究。

对于静水压力，文献 [22] ~ [26] 进行过统计分析：文献 [22]、[23] 是对具体工程实例的统计；文献 [24]、[25] 是对全国一些坝、闸上游水位的统计，正像文献 [26] 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钢闸门结构上；仅有文献 [26] 是真正对作用在钢闸门结构上的水头作了统计分析，但其成果相对来说还是比较粗糙。对于泥沙压力、波浪压力等作用在闸门结构上的其他荷载，目前还未见有文献对此直接作过统计分析，仅在文献 [27] 中根据有关计算公式和有关规定作了分析计算，得到了一些统计参数，显然这些统计参数也还可作进一步的论证。

但是,从现有的钢闸门结构可靠度分析的结果来看,这些参数总体上还是合适的,只是要作为规范的使用,还有必要进行更深入的研究,做更精细的工作。但是,对于静水压力,钢闸门结构的情况要比闸、坝复杂得多,要根据钢闸门的工作特性、工作环境以及该闸门是露顶门还是潜孔门进行分类统计,切忌把它们混合在一起作为一个大样本来统计。例如对于同一座大坝的露顶门和潜孔门,其静水压力的变异系数显然是有很大差别的。对于泥沙压力、波浪压力等,相对静水压力所占比重较小,因此如果统计有困难的话,结合专家的经验 and 相应的计算公式进行综合分析,来确定其统计参数也是可行的。

1.2.1.2 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。由于工民建钢结构中对此作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民建钢结构中的统计参数,针对钢闸门结构进行统计分析的不多。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,它没有反映出钢闸门结构的本身固有特性,也还有做更深度研究的必要。

对于钢闸门的材料性能,由于钢闸门结构所用钢材与其他钢结构完全一样,故其统计参数完全可以采用现有钢结构设计规范中的数据,不需另作分析。

对于钢闸门的几何尺寸,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,但也应有其特殊性,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。在条件许可的情况下,进行这方面的研究工作还是很有意义的。对于型钢和构件厚度,一般在闸门制造时不做加工,因此其统计参数可直接应用现有的统计数据^[28]。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^[29,30],因此可根据这些公差规定分析出其统计参数。由于钢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，这样对结果的影响不会很大。

对于钢闸门的计算模式，是在抗力计算中与其他钢结构最大的不同之处，但目前也还未见有文献对此做过专门分析，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，目前在工程实际中广泛应用并已为广大设计人员接受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；但从规范的继承性以及采用可靠度分析对规范进行“套改”来看，认可目前平面计算体系方法的合理性，也是可行的。

1.2.1.3 可靠度校准

若要修订现行钢闸门设计规范，首要的工作是要搞清楚现行钢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 [31] ~ [34] 对闸门主梁进行了可靠度校准分析，可看作是这方面工作的一部分。由于分析时对一些参数的统计数据采用的不一致，计算时又往往各作了一些假设，因此所得可靠指标有一定的差别，但大多在 3~4 左右。校准分析较为系统的是文献 [35]、[36]。文献 [36] 是在对一些统计参数作更进一步的研究并考虑了多种荷载及荷载效应比之后进行的，其结果比文献 [35] 更为准确。应该说，目前对钢闸门设计规范进行可靠度校准已经做了不少工作，基本可满足钢闸门设计规范修订的需要。

1.2.1.4 分项系数的确定

目前在结构可靠度理论中，直接根据可靠度计算公式进行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，其关键的因素之一是能否将 JC 法转化成工程设计人员所接受的设计表达式。目前各结构设计标准^[3~7]，普遍采

用以变量的标准值和分项系数表示的多系数设计表达式, 并采用优化的方法, 确定各个分项系数。

钢闸门设计规范目前对各分项系数的研究并不多见, 仅有文献 [37] 根据 GB 50199—94、GB 50017—2003 和 DL 5077—1997 中的有关规定, 经过分析确定出了 5 个分项系数值, 并对按多项系数表达式设计的用钢量和按现行容许应力法设计的用量进行了对比, 说明了所取分项系数值的合理性, 下一步要做的工作是采用工程实例来进一步验证所取值的正确性。

1.2.2 钢闸门适用性分析

钢闸门结构的功能能否实现, 主要取决于钢闸门结构在整个服役过程中的表现, 这不仅包含对应于承载能力极限状态的安全性要求, 同时也包含对应于正常使用极限状态的适用性要求, 即闸门的刚度可靠度问题。在 GB 50199—94 中, 对刚度可靠度并未做出明确的规定, 但对闸门结构来说, 如果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, 影响闸门的启闭。因此, 对闸门结构的刚度可靠度进行分析是非常必要的, 也是闸门设计规范修订时所必需的。

文献 [38]、[39] 提出了钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析的 3 种分析模式, 对钢闸门正常使用极限状态可靠指标进行了校准分析, 结果表明刚度可靠指标满足 General Principles on Reliability for Structures 的要求, 且露顶门的可靠指标大于潜孔门的可靠指标。在此基础上, 文献 [40] 建立了钢闸门时变刚度模型, 对不同衰减函数下的刚度可靠指标进行了分析计算, 并提出了现行钢闸门设计规范正常使用极限状态的目标刚度可靠指标。

1.2.3 钢闸门耐久性分析

钢闸门耐久性是指钢闸门在设计要求的使用寿命内, 不需要花费大量资金加固处理而保持其安全、使用功能和外观要求的能力, 它是针对现役钢闸门而言的, 涉及的内容广泛。大致可归成