

水工金属结构 理论与应用研究

◎ 蔡一飞 韩云峰 梅 伟 著

非
外
借

 吉林大学出版社

水工金属结构

理论与应用研究

◎ 蔡一飞 韩云峰 梅 伟 著

 吉林大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水工金属结构理论与应用研究 / 蔡一飞, 韩云峰,
梅伟著. —长春: 吉林大学出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-5692-4464-9

I. ①水… II. ①蔡… ②韩… ③梅… III. ①水工结
构—金属结构—研究 IV. ①TV34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 050206 号

书 名 水工金属结构理论与应用研究

作 者 蔡一飞 韩云峰 梅伟 著

策划编辑 魏丹丹

责任编辑 魏丹丹

责任校对 王婷

装帧设计 凯祥文化

出版发行 吉林大学出版社

社 址 长春市人民大街 4059 号

邮政编码 130021

发行电话 0431-89580028/29/21

网 址 <http://www.jlup.com.cn>

电子邮箱 jdcbs@jlu.edu.cn

印 刷 河北纪元数字印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 12.75

字 数 211 千字

版 次 2019 年 3 月 第 1 版

印 次 2019 年 3 月 第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5692-4464-9

定 价 51.00 元

前 言

水利工程是我国民生建筑工程的重要组成部分，它关系到我国民生的发展和人民的基本生活需要。在施工的过程中，水工金属结构的安装工作起着不容忽视的作用，对确保水利水电工程质量有着十分重要的意义。

水工金属结构是水利水电工程建筑物的重要组成部分，担负着防洪、灌溉、引水、发电等多项控制任务，其运行性态直接影响着整个工程的安全性、适用性和耐久性，国内外均有因水工金属结构故障或失效而导致整个工程失事的教训。因此，水工金属结构理论与应用研究问题尤为重要。

当前，我国在役的水工金属结构设备有许多已达到或超过折旧年限，有的甚至在达到设计使用年限后继续服役，这些设备的健康状况不明，有些甚至长期“带病”运行，存在重大的安全隐患。随着时间的推移，达到或超过折旧年限的设备将越来越多，健康诊断及相应的更新改造任务也越来越重。为此，水利部于1994年出台了《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》，其后我国又颁布了闸门、启闭机、压力钢管等与水工金属结构相关的检测、验收、报废以及设备管理等级评定等一系列的标准、规程或规范。这些标准、规程或规范指导了水工金属结构的安全检测与健康诊断工作，并对其主管部门按轻重缓急制定合理有序的更新改造方案、避免资金的盲目投入、实现防灾减灾的目标具有重要的指导意义。

科研人员经过不懈的努力，在水利水电工程领域，尤其在大坝安全监控方面，已取得了较为系统的工程健康诊断研究成果，并已广泛应用于大坝工作性态的综合评估。我国关于水工金属结构健康诊断理论与方法的研究尚处于起步

阶段，为保证工程安全健康地运行，迫切需要进一步研究相关的健康诊断理论和方法。基于此，笔者借鉴了大量的实践经验，同时结合近年来水工金属结构的相关研究成果，对水工金属结构的基础理论与应用进行了梳理和研究。

全书共分7章，主要内容与章节安排如下：第1章绪论为水工金属结构的国内外研究现状，在详细阐述健康诊断相关理论与方法的基础上，解决了若干关键技术问题。第2章论述了水工金属结构基本知识及专业术语，通过对专业术语的解读帮助读者了解水工金属结构的基本知识，认识焊接接头与焊缝强度、变形的基本计算。第3章笔者结合相关知识建立了水工金属结构健康诊断指标体系，提出了层次分析法和信息扩散赋予权方法，并确定了水工金属结构健康诊断指标构成，进而提出了健康诊断的数学模型。第4章研究健康诊断指标获取及量化方法，通过大量的数据分析软件处理方法，结合工程实例验证了健康诊断的各项分析功能。第5章提出并研究了水工金属结构健康诊断相容方法集的构建方法，结合实例介绍了水工金属结构健康诊断软件功能的结构及其用法，并对水工金属结构健康综合诊断中诊断模型的选择问题进行了论述。第6章阐述了水闸安全鉴定与检测技术、水闸工程基本情况、水闸安全管理现状、安全鉴定单位及其职责、水闸安全鉴定的基本程序、工程复核计算、水闸安全评价成果审查等方面的内容。第7章介绍了四个水利水电工程金属结构腐蚀状况的案例并论述了相应的保护措施。

在撰写本书过程中，笔者进行了大量的资料收集、整理以及校对等方面的工作，为本书的写作奠定了基础。此外，书中所引用的一些数据资料和工程检测资料均来自水利部水工金属结构安全监测中心全体人员多年共同工作所积累的成果。在此，特向王静、郭建平、焦达先、陈若炜、李兴彩、张宇、王国花、刘德辉、马丛科表示最诚挚的感谢！

由于笔者水平有限，书中的不当之处在所难免，恳请广大读者批评与指正。

蔡一飞

2018年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外相关研究现状	3
1.3 主要研究意义及内容.....	12
第 2 章 水工金属结构基本知识及专业术语介绍	17
2.1 通用术语介绍.....	17
2.2 专用术语介绍.....	28
2.3 常见金属结构件.....	45
2.4 焊接接头基本知识.....	51
2.5 焊缝强度与变形的基本计算.....	55
2.6 焊接变形的计算.....	61
第 3 章 水工金属结构健康诊断指标体系	66
3.1 概述.....	66
3.2 健康诊断指标构成.....	67
3.3 健康诊断指标体系构建原则和方法.....	77
3.4 水工金属结构健康诊断指标体系结构.....	80
3.5 诊断指标分析.....	85

3.6	健康诊断数学模型	87
第4章	水工金属结构健康诊断指标获取及量化方法	89
4.1	概述	89
4.2	指标参数获取及处理方法	90
4.3	指标判别标准确定方法	93
4.4	指标量化方法	95
4.5	工程案例	109
第5章	健康诊断系统实现	118
5.1	概述	118
5.2	健康诊断相容方法集构建方法	119
5.3	水工金属结构健康诊断框架体系	124
5.4	水工金属结构健康诊断软件功能分析与实现	131
5.5	水工金属结构健康综合诊断案例	134
第6章	水闸安全鉴定与检测技术研究	137
6.1	水闸工程基本情况	137
6.2	水闸安全管理现状	142
6.3	安全鉴定单位及其职责	146
6.4	水闸安全鉴定的基本程序	149
6.5	工程复核计算	150
6.6	水闸安全评价成果审查	175
第7章	水利水电工程金属结构腐蚀状况及措施案例	177
7.1	淮河入海水道海口挡潮闸钢闸门腐蚀状况及措施	177
7.2	镇江市谏壁节制闸钢闸门腐蚀状况及措施	181

7.3 射阳河闸钢闸门牺牲阳极保护	184
7.4 望亭水利枢纽钢闸门牺牲阳极保护	187
参考文献	190
后 记	193

第 1 章 绪论

近年来，我国水利水电建设工作的发展速度十分喜人，一些成就在世界相关领域中占有一席之地。如我国是世界上拥有水库大坝数量最多的国家，200 米以上的高坝全世界共有 77 座，我国拥有 20 座，占比 26%；而 300 米以上的大坝，我国的数量占全世界的 2/3；世界前 100 名的高坝我国占有 27 个席位。我国的水库大坝超过 100 米的共有 191 座，其中 137 座的水库库容大于 10 亿立方米。而我国较为出名的水利水电工程，如三峡、溪洛渡、南水北调、小湾等，广为人知。

水利水电工程主要负责地方防洪、水力发电和灌溉等，需要大量的金属结构，所以金属结构的制造成了水利水电工程中的重要环节之一，是保证水利水电工程发挥巨大效益的重要条件。

1.1 概述

如今，高速发展的科学技术对水工金属结构提出了更高的要求，这使得水工金属结构的设计制造更具有挑战性。经过不断的努力，我国在水工金属结构制造方面已经取得了长足的发展，尤其一些成果已经占据世界领先地位。现就国内的水工金属结构的现状进行简要概括。

1.1.1 闸门及启闭机规模方面

因近些年高坝水库逐渐受到青睐,所以闸门孔口的尺寸也逐渐增大,水压也越来越高。比如小湾水电站的闸门孔口水头达到了 160 m,孔口的尺寸为 5 m×7 m,水压达到了 115 000 kN,而清江水布垭水电站闸门孔口水头达到 152 m,孔口的尺寸为 6 m×7 m,水压达到了 89 600 kN,这些指标都已经达到甚至超过了世界先进水平。水库的闸门孔口除了尺寸有变化以外,其造型也越来越多样,例如广西大藤峡枢纽低孔弧形闸门的孔口尺寸为 9 m×18 m,总水压力达到 72 600 kN,由于水库的布置因素,整个工程弧形闸门采取了露台整体钢梁支撑,这是我国第一例完全使用钢梁支撑的闸门,因其钢梁的质量达到了 230 t,质量较大,在设计和制造上十分有难度,其安装也较为困难。

低水头大孔口闸门的设计不仅在防洪和航运方面更符合要求,也因为融合了更多的创新元素,其设计也更符合景观的要求,比如引江济汉 60 米宽双开弧门(三角闸门)、目前最大的护镜闸门——南京三汊河 40 米宽护镜闸门、安徽塘西河口 30 米宽立轴旋转闸门以及江苏常州大运河 90 米宽闸门等。因大孔口水闸优势明显,促使水利设计师们努力研究更大的孔口水闸。这些形式特殊的闸门都是在特定的设计条件下完成的,所以在实施之前需要在经济和可实施性上做好充分比较。

随着国家对水利水电工程的广泛重视及水利水电工程的高速发展,水库的启闭机性能和容量都逐渐有了提高,液压启闭机也得到了更加广泛的应用。如今,启闭机容量在已开工或将要开工建设的高坝已达到较高水平,例如溪洛渡水电站进口快速闸门液压启闭机容量达到了 1×10^4 kN,向家坝导流洞固定卷扬式启闭机容量达到 2×10^4 kN。

在西藏旁多水库泄洪兼导流洞,由于更多地应用了新材料,定轮闸门轮压得以提高,使水库的轮压达到了 6 350 kN。因高水头链轮事故闸门的技术越来越成熟,而且具有更加广泛的应用性,使得这一项技术得到了极大地推广。

1.1.2 升船机及船闸闸门规模方面

到目前为止,我国的三峡水库船闸尺寸居世界之最,其最大的人字闸门尺

寸为34 m×38.5 m, 船闸已经运行了将近15年, 年通过量超过1.1亿吨。尽管如此, 三峡水库的运行情况依旧良好。我国首创的水力式升船机, 在景洪550 t级水力筒式升船机中得到了应用。

随着技术手段的不断更新, 人字闸门的高度屡创新高, 大藤峡水利枢纽的闸门高度达到了47.5米, 具备通航3 000 t船舶的能力。正在建设的引江济淮工程枞阳枢纽中的双向挡水船闸, 是我国闸门行业的顶尖代表。

1.1.3 大量新技术、新材料应用方面

各国的科研人员和工程技术人员在新技术、新材料创新领域取得了长足的发展, 为各国相互学习、借鉴彼此之间的先进技术打下了良好基础。比如伸缩水封弧形闸门、链轮闸门、高水头偏心铰弧形闸门都为我国建设世界级高坝奠定了基础。此外, 还解决一些长期困扰我们的难题。比如因启闭机设计引进的折线卷筒技术解决了卷筒多层缠绕的难题, 从而使得大容量的卷扬式启闭机得以广泛应用。由铸铁合金门槽替代传统门槽解决了困扰我们多年的金属腐蚀问题。在清洁机器方面, 我国采用了苏联带导向槽液压抓斗技术, 解决了困扰我们多年的水电站进口清洁问题, 在此基础上, 我国的科研人员又自主开发了新型的低水头渠道大污物清洁技术。以上的一系列问题都是在互相借鉴和自主研发中, 得以解决的。

1.2 国内外相关研究现状

自改革开放以来, 我国各行各业飞速发展, 通过我国科研人员的自主研发以及对西方国家先进技术的借鉴, 在水工金属结构制造方面取得了初步成效, 比如升鱼机、鱼道金属结构的研究, 闸门防冻、无电开闸研究等。下面就国内外的相关水工金属结构安全及健康诊断指标的最新研究进展进行详细阐述。

1.2.1 水工金属结构安全检测

因为水利水电工程多建设在人烟稀少、地址偏远的地方, 所以不论是在施

工还是后期测试与使用上都会受到恶劣环境因素的影响。工程在建设完工之后,需要对水工金属结构的安全性进行检测,尽量在早期把安全隐患排查完毕。

在各国水工金属结构安全领域,人工智能、数据库、数据挖掘技术以及现代信息化计算相关的技术手段的应用程度都比较低。在进行自主分析以及对水利工程的综合诊断上,开展得都不多,就算偶有开展,程度也比较单一、不够全面,而且对整个项目也缺少更为系统的设计和开发。

水利水电工程检测涉及多方面的内容,如外观的检查、水工工程腐蚀方面的检查、振动检查、材料检查、结构应力变化和应变方面的检查以及无损探伤等。不同的检测项目涉及的检测方法和检测技术也是不同的,比如,外观检测可以利用卡尺、全站仪和经纬仪进行测量。而在实际的检测过程中,为了检测结果的真实可靠,一般都是综合选择多种检测方法,以此来排除水工结构中存在的安全隐患。

安全检测过程要严格遵从相关规范,其中水工闸门检测依据的主要规范有《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》(GB/T 14173—2008)、《水利水电工程金属结构报废标准》(SL 226—1998)和《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》(SL 101—2014)等。这些规范在水工闸门检测中起着十分重要的作用。

因为闸门的金属结构特性,对闸门进行检测时,不能单纯地只对闸门的外观外形进行检测检查,更为重要的是闸门的金属防锈检查,还有在闸门的使用过程中闸门的抗用性、防变形能力检测,这样才能对闸门的整个安全性能进行全方位的检查,所以在实际操作中,除了对闸门进行外观的普通检查以外,还应定期检查其锈蚀量和强度,这将对闸门的安全使用和长久使用更为有利。

目前需要构建合理、完善、有效的水工金属结构健康综合诊断指标体系,以方便各级政府和工程管理部门制定合理有序的更新、加固、改造计划,实现防灾、减灾的目标,避免资金的盲目投入。研究水工金属结构健康综合诊断定性项目指标常用的方法有:加权集值统计法、锈蚀速率 Bayes 统计更新方法。在此基础上,研究中可采用聚类分析的数据挖掘技术进行分析,用户层为不同类型的用户提供交互接口,诊断层提供指标数据处理以及健康综合诊断功能,

从而不断地修正神经网络模型,挖掘出更为准确的数据,结合实际工程安全检测与诊断案例,明确指出闸门及启闭机存在的安全隐患,提出消除安全隐患的具体措施。

1.2.2 水工金属结构的安全性评估

截至目前,针对水工金属结构健康综合诊断指标进行系统研究的学者及相应的研究成果均较少,且大多数学者所研究的水工金属结构健康诊断指标比较单一(如腐蚀或结构应力),或者为少数的几个主要诊断指标,不够全面、系统,更多的主要是针对腐蚀等相关问题进行的诊断分析。

有关学者对水工金属结构健康综合诊断指标进行了一些相关的研究,并取得了相应的成果,如原玉琴、郑圣义对基于可靠性的水工金属结构的安全方面进行了一系列的研究和诊断,而且对于水工金属结构相关的安全指标体系进行了建立;汪滨、李军等人对水电工程在钢结构的安全性能和使用寿命方面通过计算机软件进行了诊断,诊断包括挠度、腐蚀和强度这三个方面的四个主要指标,该软件的针对性比较强,大多数是针对腐蚀特点而编制的,使用诊断的指标全面性尚不完全;还有学者基于腐蚀状况或腐蚀速率对钢闸门的诊断和腐蚀损伤模型等相关问题进行了研究,以钢闸门的腐蚀状况为基础,建立了钢闸门健康综合诊断方法体系以及腐蚀损伤模型,其诊断主要是针对腐蚀量或腐蚀速率进行的研究分析;另有学者对水工金属结构建筑物安全综合诊断系统进行了相关的研究,其诊断指标体系中也仅包含金属结构的强度、刚度和稳定性等几个重要的指标。

以往的水工金属结构健康综合诊断指标体系通常把闸门和启闭机看作一个整体设备和一个诊断对象,但考虑到两者的指标既有共性同时又存在一定的差异性,且两者在实际使用过程中影响其安全性的因素不尽相同或不可能同时发生,两者安全性状以及使用寿命亦不尽一致,故对闸门和启闭机应分别构建各自独立的健康综合诊断指标体系。从以往的水工金属结构事故中发现,影响水工金属结构的安全因素有很多,不仅包括了枢纽布置、制造安装质量、水工金属结构设计、材质质量和运行管理等因素,还包括了设备在运行过程中的使用周期、运行过程中的锈蚀和门槽质量因素的影响。因此,水工金属结构健康综

合诊断是一个由多个诊断指标构成的多项目、多层次的复杂递归体系，而从诊断的目标来看，各诊断指标对水工金属结构健康状况的影响作用并不是同等重要的。

总之，只有在深入研究分析的基础上，建立科学、完善、合理的水工金属结构健康综合诊断指标体系，并对各指标赋予不同的权重系数，才能得到科学、合理的水工金属结构健康综合诊断结论。

1.2.3 健康诊断方法

健康诊断方法从宏观层面上一般可分为三类：定性诊断法、定量诊断法和综合诊断法。而这三种诊断方法都各有利弊，每种办法的特点也不尽相同，所以每种方法所适用的范围和情况也有所不同。

所谓的定性诊断法主要依靠诊断人员及专家组的个人分析能力和以往经验来进行，这种方法对诊断人员和专家组在专业上的要求十分苛刻。因为诊断的结果是直接从诊断人员和专家的判定和归纳得出的，所以诊断人员的结论的公正性十分重要。不仅如此，诊断人员还应该具备良好的观察能力和数据统计能力，最大限度地发挥个人的智慧和经验，而不是依靠机器智能和数据统计，只有这样才不会因数据不足或者准确性差而影响诊断结果。也不会出现每篇诊断都大相径庭的结果。但是其诊断的准确性往往会受到诊断人员的主观意识影响，受诊断人员经验和知识的限制，在诊断结果中比较容易掺杂个人主观臆断。定性诊断法主要包括：专家评判法（或专家打分诊断法）、德尔菲法和加权评分法等。Vicki M. Bier、支红利等学者都曾利用定性诊断的方法对系统风险进行过评价。

定量诊断法和定性诊断法则完全不同，它并不单纯地依靠诊断人员的判断，而是用以往的模拟实验、样本抽检或者其他统计数据作为依据。是完全客观地对结果进行诊断，在整个诊断体系建立的过程中，建设相当的数学模型，合理的使用数学和计算机手段来进行诊断，最终使用数据来表示结果的诊断方法。定量诊断法消除了定性诊断法中因主观臆断和经验不足对诊断结果的影响，尤其是计算机技术的应用，大大提高了定量诊断的可行性和时效性，但是在很多情况下有些诊断很难用确切的数据来表示。定量诊断法主要包括：可靠

度诊断法、安全系数法、结构应力法(有限元算法)、数理分析法、主成分分析法、灰度关联分析法和模糊综合诊断法等。

由于水工金属结构很少安装有监测系统,缺少历史数据资料的积累,没有足够的统计数据作为支撑,因此单纯的定量诊断方法不太适用于该领域的研究应用。

对于大多数设备的健康综合诊断,一般来说都是比较复杂的,单纯依靠定性或定量诊断方法往往难以实现或保证诊断结果的客观性和准确性。这就需要把两种诊断方法有机地结合起来,从而发展成为现代广泛采用的综合诊断法。

水工金属结构健康综合诊断指标既有定量分析指标,又有定性分析判断指标,其诊断涉及的影响因素很多,有些可以量化,有些则不能。采用综合诊断法可有效地汲取定量诊断和定性诊断两种方法的长处,同时弥补各自的不足。

综合诊断法主要包括:层次分析法(AHP法)、专家系统法、灰色诊断法以及神经网络诊断法等。在水工金属结构领域,目前最常用的健康综合诊断方法主要有:可靠度诊断法、层次分析法(AHP法)、专家评判法和结构应力法(有限元算法)等。^①

1.2.3.1 可靠度诊断法

可靠性是指结构的安全性、适用性和耐久性,可靠性评价法是将不确定性物体作为研究对象,狭义上是指物体在规定时间内和规定条件下完成规定功能的能力。其中结构设计就存在着不确定性,作为一种风险决策方法,早在1924年Forssell就提出了结构设计应该使结构的初始建造费用和结构倒塌损失期望值总和达到最小的思想。

可靠性问题最早引起广泛重视是在二战期间,到20世纪50年代,美国军事部门、工业部门和有关学术部门联合成立了可靠性研究机构(简称AGREE),对电子产品的设计、制造、试验、运输、使用及存储等方面的可靠性进行研究,奠定了可靠性研究的基础。1965年,国际电工委员会(IEC)可靠性专业委员会的成立标志着国际性的可靠性组织成立,使得可靠性成为一

^① 白雪梅,赵松山.层次分析法在评价综合实力中的应用[J].统计与决策,1997(10):9—10.

门国际化的技术。

在结构领域进行可靠性研究起源于 20 世纪 40 年代末,苏联学者哈奇诺夫、斯特列律获基和美国学者 A. M. Freudenthal 等都做出了较大的贡献,对结构可靠性研究的兴起与发展起到了积极的推动作用。1947 年, A. M. Freudenthal 发表了题为《结构的安全度》的论文,用全分布概率方法仔细分析研究了传统的安全系数和结构破坏概率之间的内在关系。正是由于 Freudenthal 等人的卓越工作,才促成了结构系统可靠性分析理论由经典向现代的过渡。

在现实中,工程结构物大多由若干构件组成,并且通常有多种可能的失效模式。而实际上,工程师们最终关心的正是结构整体的可靠性。为研究结构整体的可靠性问题,通常需要用—个等效的“系统”来模拟真实结构物,用系统中的元件模拟其中的构件。结构体系可靠性分析是一门新兴的交叉学科,它以数理统计方法概率论和随机过程理论为基础,以结构分析的有限元和网络分析技术为工具,从系统的角度出发,将结构体系的设计、评价、分析、维护和检测等融为一体。目前,结构可靠性理论及应用技术主要是从三个方面进行研究。

(1) 如何高效率地确认结构体系的主要失效模式。冯元生等提出了基于增量载荷法形成主要失效模式的方法; P. Thoft-Christensen 等提出了基于全量载荷法的自动形成主要失效模式的分枝限界法; 有些学者也提出了 β 限界法和改进的分枝限界法等确认主要失效模式的方法。

(2) 如何有效地综合各主要失效模式的失效概率以求得结构体系的失效概率, 1979 年, Ditlevsen 提出了结构体系可靠度计算的窄边法; 1984 年, H. A. Watson 等提出了搜索主要模式的 FTA (Failure Tree Analysis) 法和计算体系失效概率的 PENT (Probabilistic Network Evaluation Technique) 法; 1989 年, Feng 提出了用于结构体系可靠性分析的高精度公式; 1992 年, Song 提出了用数值积分法计算二阶和三阶联合失效概率, 蔡荫林等提出了基于简单界限的近似公式。

(3) 如何实现将结构分析的有限元法与结构体系可靠性分析有机地结合起来, 以便将结构体系的可靠性分析应用到各种元件模拟的工程结构。陈卫东等给出了用杆元、矩形或三角形平面应力元模拟的薄壁结构体系的可靠性分析。

近年来,随着概率、数理统计和随机过程理论的日益完善,以及数学领域中新兴学科(如模糊理论、分形理论、混沌和神经网络等)的发展,结构可靠性理论研究者提出了多种非概率可靠性分析法,如将随机性与模糊性相结合而形成的模糊可靠性分析;考虑随机变量与时间有关的时变可靠性分析;将传统的有限元与可靠性分析相结合而形成的随机有限元方法等等。结构可靠性已从简单、静止、定量的理论研究阶段进入了复杂、动态、定性定量相结合的实用研究阶段。

国内关于结构可靠性问题的研究工作开展得较晚,到20世纪60年代结构工程界才广泛开展结构安全度的讨论与研究。近年来可靠性研究的范围已从最初的基本理论发展到结构体系可靠度、结构模糊可靠度、结构抗震可靠度、随机有限元与结构动力可靠度、结构荷载效应组合、基于可靠度的结构优化设计、结构施工期可靠度和结构老化期可靠度、结构维修加固及结构耐久性等方面,均取得了卓越的成果。国外,美国陆军工程师兵团颁布了基于可靠度理论的钢门设计规范,德国1998年颁布了基于极限状态设计理论的闸门设计规范。1992年,我国颁布了《工程结构可靠度设计统一标准》,在水工结构设计标准方面,也先后颁布了《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》、《水工建筑物荷载设计规范》等。而在水工金属结构领域,Mrazik, Guedes, Melchers, 周建方,李典庆,范宗仁,朱大林,李宗利,王正中等学者对水利水电工程钢闸门可靠性问题进行了深入细致的研究分析与探讨。

1.2.3.2 层次分析法(AHP法)

托马斯·萨蒂(Thomas Saty)是美国著名的运筹学家、匹兹堡大学的教授,他首先提出层次分析法(The Analytic Hierarchy Process,简称AHP法)。层次分析法可以同时处理多种标准、因素和层次的复杂类型的问题,同时它既可以进行定性系统分析、定量系统分析也可以做决策分析和综合分析,是一个十分全面的分析方法,该方法通过将数据进行优等、劣等排序,最终将得到的数据提供给决策人员。层次分析法在20世纪80年代引入我国,成为了我国学者们十分推崇的方法,并且在实际应用中得到了广泛的好评。

所谓的层次分析法其实就是将复杂的问题简单化,大化小、多化简。将分