

# 水工金属结构健康诊断

## 理论、方法及应用

杨光明 郑圣义 王钢钢 杨坤◎著



河海大学出版社  
HOHAI UNIVERSITY PRESS

# 水工金属结构健康诊断 理论、方法及应用

杨光明 郑圣义 王钢钢 杨坤 著



河海大学出版社  
HOHAI UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

水工金属结构健康诊断理论、方法及应用 / 杨光明  
等编著. —南京:河海大学出版社, 2013.12

ISBN 978 - 7 - 5630 - 3605 - 9

I. ①水… II. ①杨… III. ①水工结构—金属结构—  
检测 IV. ①TV34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 311344 号

书 名 / 水工金属结构健康诊断理论、方法及应用

书 号 / ISBN 978 - 7 - 5630 - 3605 - 9/TV · 373

作 者 / 杨光明 郑圣义 王钢钢 杨 坤

责任编辑 / 谢业保

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编: 210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

网 址 / <http://www.hhup.com>

照 排 / 南京紫藤制版印务中心

印 刷 / 南京工大印务有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 343 千字

版 次 / 2013 年 11 月第 1 版

印 次 / 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

# 序

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事而导致整个工程失事的教训。因此,水工金属结构的安全性及其健康诊断问题研究显得尤为重要。

当前,我国在役水工金属结构设备有许多已达到或超过折旧年限,有的甚至已达到设计使用年限而仍在服役,这些设备的健康状况不明,有些甚至长期带病运行,存在重大安全隐患;而且,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,1994年水利部首次颁布了《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》(SL101),其后我国先后颁布了闸门、启闭机、压力钢管等相关水工金属结构的检测、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。

在水利水电工程领域,经过科研人员的不懈努力,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。而关于水工金属结构健康诊断理论与方法研究尚处于起步阶段,为保证工程安全健康运行,迫切需要进一步研究相关的健康诊断理论和方法。

《水工金属结构健康诊断理论、方法及应用》一书是作者多年对水工金属结构设备健康诊断理论与方法研究成果的总结,其主要研究成果包

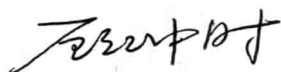
括:(1)建立了较为完善的水工金属结构健康诊断指标体系以及闸门和启闭机相应的诊断指标等级标准,提出了定性和定量指标的量化方法,并结合工程案例详细分析了诊断指标的获取及其确定方法。(2)研究并建立了适用于水工金属结构健康诊断的指标赋权和诊断方法,如信息扩散赋权法、模糊层次分析赋权法、信息增益赋权法等;并构建了水工金属结构健康诊断的多层模糊综合评判模型、BP神经网络集成模型以及聚类数据挖掘模型等。(3)提出了水工金属结构健康综合诊断相容方法集的构建方法,设计了相应的结构健康综合诊断框架体系,开发了水工金属结构健康诊断系统。

该书综合运用现代数学、力学理论和坝工知识,以及数据挖掘技术和计算机科学,深入系统地研究和提出了水工金属结构健康诊断理论与方法。本书不仅具有较高的学术水平,也具有重要的实际意义。

该书的出版,将为水利水电工程安全和防洪调度决策提供有力的支持;同时,为研究人员客观地分析水工金属结构的健康状况提供了理论基础和实践指导。

水工金属结构健康综合诊断智能系统的建立与运用,是今后水利水电工程安全监控领域发展的必然趋势,随着安全监(检)测技术、诊断技术、计算机技术以及相关学科的不断发展和完善,基于人工智能、数据库以及数据挖掘等技术的水工金属结构健康综合诊断智能系统必将有着广阔的应用前景,并在水利水电工程安全领域发挥着越来越重要的作用。我深信本书的出版问世,必将对这个领域的研究起到良好的推动作用,我也深信著者们一定乐意听取同行读者们所提出的一切意见和问题,而把这一研究推上到新的高度。

欣喜之余,写了如上个人感受,谨以为序。



2013年8月

# 前 言

随着世界能源的日益紧缺,各国政府对可再生能源的开发与利用越来越重视,并投入了大量的人力和物力资源研究与开发建设太阳能、风能、水力发电、生物质发电等新能源。在各种新能源的获取过程中,设备的安全性是保证工程正常有效运行的重要保障。水利水电工程金属结构的安全运行,是水利枢纽安全运行的重要环节,是保证水利水电工程发挥巨大效益的重要条件。

我国目前正在运行的水工金属结构有许多已达到或超过折旧年限,有的甚至达到设计使用年限而仍在服役,这些金属结构设备的健康状况不明,有些甚至存在重大安全隐患;其次,由于设计、制造、安装及运行管理等方面的原因,不少金属结构设备先天不足,长期带病运行,但由于运行性态不明,不能及时发现隐患,时常造成突发事件,给国家和人民生命财产带来巨大损失;再者,随着时间的推移,达到或超过折旧年限的金属结构设备越来越多,更新改造任务也越来越重。若能尽快地对这些设备进行安全检测和诊断,就可为主管部门编制更新改造计划进行决策提供科学依据,从而防止事故发生,避免资金盲目投入。因此,开展水工金属结构健康综合诊断理论与方法的研究,具有重要的理论意义和实用价值。

传统的主要依靠专家经验的诊断方法容易受到各种因素的干扰,诊断过程不规范,诊断方法单一,诊断指标体系的构建亦不尽科学、合理,使得诊断结论的可靠性难以得到有效的保证。随着计算机和人工智能等相关技术快速发展和广泛应用,以及检测及数据采集系统自动化、分析处理智能化的不断提高,在水工金属结构健康诊断领域研究与开发基于人工智能、数据库以及数据挖掘等相关技术的水工金属结构健康综合诊断智能系统,对水工金属结构设备进行快速、全面、有效的健康诊断就显得尤为迫切与必要。水工金属结构健康综合诊断智能系统的建立与实现运用是今后水利水电工程安全监控(测)领域发展的必然趋势,将在水利水电工程安全领域发挥着越来越重要的作用。

本书针对水工金属结构设备健康诊断理论与方法及健康诊断系统的关键技术开展研究,并基于这些相关关键技术,开发设计水工金属结构健康综合诊断与分析

软件系统。全书共分7章,主要内容与章节如下:

第一章:分析国内外水工金属结构安全检测、健康诊断指标、健康诊断理论与方法的研究现状,提出了当前所需要解决与研究的相关问题。

第二章:通过对水工金属结构健康影响因素及其诊断指标的分析,构建水工金属结构健康诊断指标体系及健康诊断数学模型;本着科学性与合理性的原则,对闸门和启闭机分别构建各自独立的诊断指标体系结构。

第三章:介绍了水工金属结构健康诊断指标参数获取及分析处理方法,构建水工金属结构健康诊断指标等级标准,提出并研究水工金属结构健康诊断定性和定量指标的量化方法,结合工程实际案例分析了闸门和启闭机健康诊断指标参数的获取与分析处理方法以及传统的评价方法。

第四章:研究水工金属结构健康诊断指标的层次分析法和信息扩散赋权方法;在层次分析法中引入模糊一致矩阵,提出水工金属结构健康诊断指标赋权的模糊多层次权重解析法(FAHP法),并确定了水工金属结构健康诊断各层次指标的权重;运用信息增益法研究水工金属结构安全性、适用性和耐久性各层次指标的重要程度。

第五章:建立水工金属结构健康诊断的多层模糊综合评判模型和BP神经网络集成模型;提出并研究应用关联规则检验各指标数据之间一致性的方法,并采用聚类数据挖掘技术分析诊断结论的可靠性;结合工程案例验证了基于FAHP法的健康诊断模型的科学性、合理性和可靠性。

第六章:提出并研究水工金属结构健康综合诊断相容方法集的构建方法;设计水工金属结构健康综合诊断软件功能结构,并开发了相应的分析软件。结合工程实例,验证了健康综合诊断软件所具备的各项分析功能。

第七章:对本书全文的研究成果进行总结,提出在今后工作中需要进一步深入研究的课题。

本书在撰写过程中,得到了顾冲时教授、蔡新教授以及赵二峰等老师的鼎力支持与帮助,研究生贾文斌、黄勇、景攀德等在资料的收集、整理以及校对等方面做了较多工作;同时,书中所引用的一些数据资料和工程检测资料均来自于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,一并表示最诚挚的感谢!

由于作者的水平有限,书中的不当与错误之处在所难免,恳请广大读者批评与指正!

作者

2013年7月于南京·河海大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	001
1.1 概述 .....	001
1.2 国内外研究现状 .....	003
1.3 需要解决与研究的问题 .....	013
1.4 主要研究内容 .....	014
<b>第二章 水工金属结构健康诊断指标体系</b> .....	016
2.1 概述 .....	016
2.2 健康诊断指标构成 .....	017
2.3 健康诊断指标体系构建原则和方法 .....	026
2.4 水工金属结构健康诊断指标体系结构 .....	029
2.5 诊断指标分析 .....	033
2.6 健康诊断数学模型 .....	035
<b>第三章 水工金属结构健康诊断指标获取及量化方法</b> .....	037
3.1 概述 .....	037
3.2 指标参数获取及处理方法 .....	038
3.3 指标判别标准确定方法 .....	051
3.4 指标量化方法 .....	056
3.5 工程案例 .....	071
<b>第四章 水工金属结构健康诊断指标赋权方法</b> .....	132
4.1 概述 .....	132
4.2 指标权重赋权方法分析 .....	133
4.3 水工金属结构健康诊断主观赋权法 .....	148
4.4 水工金属结构健康诊断指标模糊赋权法 .....	152
4.5 水工金属结构健康诊断指标信息增益赋权法 .....	160
4.6 案例分析 .....	166



<b>第五章 水工金属结构健康诊断模型</b> .....	171
5.1 概述 .....	171
5.2 诊断理论与方法分析 .....	172
5.3 水工金属结构健康诊断多层模糊综合评判模型 .....	181
5.4 水工金属结构健康诊断 BP 神经网络集成模型 .....	187
5.5 水工金属结构健康诊断聚类数据挖掘模型 .....	200
5.6 案例分析 .....	213
<b>第六章 水工金属结构健康诊断系统实现</b> .....	233
6.1 概述 .....	233
6.2 健康诊断相容方法集构建方法 .....	234
6.3 水工金属结构健康诊断框架体系 .....	238
6.4 水工金属结构健康诊断软件功能分析与实现 .....	245
6.5 水工金属结构健康综合诊断案例 .....	250
<b>第七章 结语</b> .....	254
7.1 总结 .....	254
7.2 后续研究课题 .....	255
<b>参考文献</b> .....	257

## 第一章

# 绪论

### 1.1 概述

我国在建国 60 多年来,修建了大量的水利水电工程。其中,金属结构的制造量就接近 500 万吨,在水利水电工程中担负着防洪、灌溉、引水发电等多项控制任务。水利水电工程金属结构的安全运行,是水利枢纽安全运行的重要环节,是保证水利水电工程发挥巨大效益的重要条件。

然而根据相关文献对金属结构折旧年限的规定,我国目前正在运行的水工金属结构中有许多已达到或超过折旧年限,有的甚至达到设计使用年限而仍在服役,这些金属结构设备的健康状况不明,有些甚至存在重大安全隐患。此外,由于设计、制造、安装及运行管理等方面的原因,有不少金属结构设备先天不足,长期带病(隐患)运行,但由于运行性态不明,不能及时发现隐患,时常造成突发事故,给国家和人民生命财产带来巨大损失。从安全运行和科学管理的角度出发,有必要对这些设备进行安全检测与健康诊断。另一方面,随着时间的推移,达到或超过折旧年限的金属结构设备越来越多,更新改造任务也越来越重,若能尽快地对这些设备进行安全检测和健康诊断,为主管部门对这些设备更新改造计划的正确决策提供科学依据,就可使管理部门得以按轻重缓急制定合理的更新改造计划,防止事故发生,避免资金盲目投入。因此,在役水工金属结构的安全鉴定评价工作具有深远的社会意义和重要的经济意义。

近年来,各级领导和工程管理部门既重视了建设、又重视了运行管理,认识到水工金属结构安全检测与健康诊断工作的重要性,主动要求对已运行二三十年或遭受意外事故破坏的金属结构进行安全检测与健康诊断的单位越来越多,检测与诊断任务日益繁重。

水工金属结构安全检测与健康诊断是采用先进的检测方法和仪器设备对在役水工金属结构进行现场检测,通过检测发现不安全因素,再根据历史资料与安全检测成果进行综合诊断,确定结构的健康级别,并提出相应的改造加固措施。显然,

这是一项责任重大的工作,它要求检测与诊断人员应有强烈的责任感和对国家与人民高度负责的精神。同时,安全检测与诊断又是一项技术性较强的工作,涉及多种专业,要求检测与诊断人员应具有扎实的专业知识和较强的实际工作能力。

鉴于安全检测与诊断工作的重要性,为保证检测与诊断质量、提高检测与诊断速度,确保检测与诊断成果真实可信,有必要针对上述问题,对水工金属结构安全检测的方法和判别评价标准进行研究,规定必要的检测项目,确定切实可行的检测方法和诊断方法,并在此基础上,制定相应的检测规程,用以指导工作。多年来,我们在结合工程安全检测与诊断的实践经验基础上,逐步探索研究出一套行之有效的安全检测方法,编制了一系列相应的安全检测技术规程、报废标准等并已颁布实施,用以指导安全检测与诊断工作,使之更加科学化和规范化。

水工金属结构安全检测与诊断工作在上世纪 80 年代末才刚刚在我国逐步开展起来,目前正处于完善、发展阶段。水工金属结构安全检测与诊断工作的发展过程大致可划分为以下四个阶段:

(1) 无序阶段(20 世纪 90 年代以前):该阶段水工金属结构很少进行安全检测与诊断,或仅仅针对工程中实际存在的问题而进行单项检测,只是有针对性的解决表面具体存在的问题。

(2) 前期研究阶段(20 世纪 90 年代):该阶段主要是广泛开展调查研究,分析水工金属结构设备的失事原因和影响水工金属结构健康的主要因素,建立水工金属结构健康诊断体系模型,确定诊断指标等级标准;并在过去检测工作的基础上,借鉴其他行业的有关检测经验,进行充分的比较和分析,确定水工金属结构的安全检测内容、方法和健康诊断方法。在结合工程安全检测与诊断的实践经验基础上,不断修改和完善检测内容、检测方法和健康诊断方法,编制了相应的安全检测技术规程,用以指导安全检测与诊断工作,使之科学化和规范化。

(3) 规范阶段(20 世纪 90 年代末~21 世纪初):该阶段主要是依据水工金属结构的相关检测技术规程和报废标准进行,并在全国水利、电力行业广泛、全面地开展和推广水工金属结构安全监(检)测与健康诊断工作。

(4) 完善与发展阶段(21 世纪初至今):随着科学技术的不断发展,检测仪器设备的日益先进,检测及数据采集系统自动化、分析处理智能化的不断提高,理论研究水平的进一步提高与完善,以及在不断的检测与诊断过程中的经验积累,通过对原有检测内容、检测方法和健康诊断方法的不断修改和完善,使其更科学、合理、安全完善;同时,对前期制定的相关规程、规范进行修改、补充与完善。

而在当今计算机技术高速发展与广泛应用的时代,在本领域内还缺乏运用先进的计算机技术对水工金属结构设备进行快速、全面的健康诊断智能系统。水工金属结构健康诊断智能系统是针对这一问题而进行的研究、设计与开发,是基于人

工智能、数据库以及数据挖掘等相关技术的水工金属结构健康诊断的综合运用。把水工金属结构可靠性作为诊断总目标,以主要影响因素构成主框架,组成一级、二级等多层次指标,精心策划,建成多层次诊断体系,为水利水电工程金属结构进行快速有效的健康诊断提供一种先进、实用、有力的平台。

另外,该系统还可作为大坝安全智能决策支持系统或防洪调度智能决策支持系统的子系统,为大坝安全或防洪调度决策提供有力的支持。

水工金属结构健康诊断系统的建立与实际运用是今后水利水电工程安全监控发展的必然趋势。基于人工智能的水工金属结构健康诊断系统可以使我们更科学、准确、及时地了解 and 预测水工金属结构的健康状况,使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;既可实现防灾、减灾的目标,又可避免资金的盲目投入。因此,开展研究水工金属结构健康诊断理论和方法以及基于人工智能的水工金属结构健康综合诊断系统具有重要的理论意义和工程实用价值。随着安全监测与诊断技术以及相关学科的不断发展和完善,水工金属结构健康诊断系统有着广阔的应用前景,将在水利水电工程安全领域发挥越来越重要的作用。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 水工金属结构安全检测与诊断

安全诊断技术是 20 世纪 30 年代随着保险业发展的需要而兴起的,20 世纪 60 年代取得了较大的发展,最先应用在美国军事工业领域。随后,安全诊断技术不断地应用到航空航天、石油化工以及核工业等领域,通过不断地发展与完善,已在现代安全科学领域占有非常重要的地位。安全诊断技术的发展与运用,为事故诊断及建立预警系统奠定了科学、可靠的理论与方法基础。

影响水工金属结构安全的因素很多,也很复杂,有设计上的问题,有制造安装问题,也有运行管理问题等等。水工金属结构安全检测与诊断工作在我国起步较晚,该项工作在 20 世纪 80 年代末才刚刚逐步开展起来。以往的诊断工作都是依靠人工,根据规范、标准及专家经验知识来进行的,不但计算、分析工作量大,而且往往会受到人为因素的影响,属于半理论半经验的方法。

在较长时间里,在水工金属结构安全领域利用人工智能、数据库、数据挖掘以及现代计算机等相关技术进行自动分析、综合诊断在国内外开展得较少,且大多数只进行了一些单方面的研究,未进行过较系统、较全面的研究、设计及开发。主要

研究活动有:美国石油学会(API)和运输部(DOT)、英国中央电力局(CEGB)等基于腐蚀对钢结构安全影响的研究;美国 API、ASME 和英国 CEGB、BSI 等基于断裂力学的压力钢管安全研究;日本土木工程师协会(JSCE)于1988年发表了题为“结构风险寿命评估”的研究报告,对日本此后包括水闸在内的基于可靠性理论的结构设计与安全诊断工作有着较大的影响;Patev 等(2005)学者通过分析闸门失事的原因,建立了闸门失效的故障树模型,对闸门进行了风险分析。南京水利科学研究所、河海大学开展的“水工金属结构腐蚀现场检测研究”和“黄土高原水工金属结构安全研究”等(1996)主要是针对腐蚀对结构安全的影响以及水工金属结构安全检测方法等进行研究,分析确定了必要的检测项目、切实可行的检测方法和诊断方法,初步拟定了相应的判别评估标准。原玉琴、郑圣义(1997)对基于可靠性的水工金属结构安全诊断方法进行了相关的研究,初步建立了水工金属结构安全诊断综合指标体系和综合评价矩阵。汪滨、李军(2003)的“水电工程钢结构评估软件开发”,是以现行有关规范为评估依据,以现有钢结构校核理论为基础,对水电工程钢结构的安全性进行诊断和对使用寿命进行预估,利用计算机技术开发诊断软件,该软件主要是针对有关腐蚀问题的特点而编制的。Allen 等(2004),Greimann 等(1991),李洪焯等(2010)学者基于现场检测成果对水闸桁架人字门等水工金属结构的时变可靠性及其安全状况诊断进行了研究,考虑水工金属结构的时变效应,以可靠度为基本度量,构建了基于时变可靠度理论的单目标、多层次水工金属结构安全风险诊断模型。Melchers(1999)、Ayyub(1998)、Greimann(1995)、任玉珊(2001,2005)、李典庆等(2003)学者针对钢闸门的耐久性诊断以及结构的使用寿命进行了相关研究,建立了水工钢闸门耐久性模糊评判准则和维修策略;应用概率统计分析方法,基于锈蚀量的确定性和随机性统计分析,获得钢闸门的剩余寿命和可靠性的定量和定性指标,提出了钢闸门2~4 mm的锈蚀安全裕度以及基于可靠度理论的现役钢闸门正常使用寿命或剩余寿命的预测算法。Padula(1994)、Granata 等(1996),Kathir(1996)、Binder(2001)、Zhou 等(2005),Mlakar 等(1990),Patev 等(1998),Putcha 等(2003),郑圣义(2005)、朱雅仙(2002)、李典庆(2007)、王煦等(2006)较多学者针对钢闸门基于腐蚀状况的诊断、腐蚀速率统计分析、腐蚀损伤模型及防腐蚀等相关问题进行了深入的研究,以钢闸门的腐蚀状况为基础,建立了钢闸门安全诊断方法体系以及腐蚀损伤模型,基于概率统计分析方法确定了现役钢闸门腐蚀速率的概率分布模型,并通过对钢结构腐蚀的机理及其原因进行分析,指出环境条件、结构型式和运行工况是钢结构遭受腐蚀的主要影响因素,为进一步选用合理、有效的防腐蚀措施提供科学依据。Zheng 等(1998),McAllister 等(2001)学者对人字门的疲劳损伤问题及其设计标准进行了研究,通过疲劳损伤演化规律实现了损伤理论与有限元分析软件的结合,建立了适用于金属结构的疲劳损伤有

限元分析模型。Estes 等(2004)学者则对考虑腐蚀和疲劳损伤的人字门可靠性更新问题进行了进一步分析、研究,提出了一种从整体结构系统分析构件疲劳可靠性的方法。金初阳(2000)、刘柏青(1997)、张志俊(1998,1999)、崔德密(1996)等学者对老化病害水工建筑物的安全检测、诊断指标体系、诊断方法以及计算机诊断系统等方面进行了研究,建立了两个层次的诊断指标体系以及模糊诊断模型,利用系统综合的方法对整个水闸的老化级别进行诊断,提出了一种模糊集合论诊断方法;开发了自动进行诊断并输出诊断结果的老化病害水工建筑物计算机诊断软件。任旭华等(2003)学者通过对水闸的安全诊断、病害类型及其成因、病害检测等进行研究分析,提出了相应的水闸病害防治加固措施。邹春伟等(2003)学者运用基于 TCP 协议的中间件技术,设计了基于客户/服务器方式的工程剩余疲劳寿命诊断系统框架,开发了基于网络环境下的工程剩余疲劳寿命诊断系统。

此外,“水利部水工金属结构安全监测中心”在水工金属结构安全检测与诊断方面进行了以下一些相关的研究工作:

(1) 开展调查研究,广泛收集水工金属结构的有关技术特性、参数、故障及失实例等资料,并在此基础上,分析确定安全检测内容。

(2) 在已有检测工作基础上,同时借鉴其他行业的检测经验,确定水工金属结构安全检测方法。

(3) 研制开发新的检测技术,用以提高检测数据的稳定性和检测成果的可靠性。

(4) 引进工程结构可靠度理论,将荷载和抗力作为随机变量处理,研究结构的可靠度计算方法和使用寿命的计算方法。

(5) 分析影响水工金属结构健康的主要因素,建立水工金属结构健康诊断体系模型,确定诊断指标等级标准。

(6) 在初步确定了检测内容和方法以及健康诊断方法之后,针对具体工程水工金属结构进行实测,进一步验证内容的完整性、检测方法的可行性和健康诊断方法的正确性,并在不断的检测与诊断过程中积累经验,进行修改和完善。

(7) 在检测手段与方法、计算软件以及计算机技术日益成熟与完善的基础上,对诊断指标及其权重、诊断方法等进行深入细致的分析研究,使其更完善、科学合理;并充分利用现代高速发展的计算机技术和网络技术,初步研究开发基于人工智能技术的水工金属结构设备健康诊断系统。

传统的计算机程序可用来解决许多类型的问题,这些问题通常有算法上的解决方法。但是对于水工金属结构健康诊断问题,还需要依赖于专家的经验知识来作出判断。专家系统是人工智能的一个分支,起源于 20 世纪 60 年代,常用于那些没有合适算法或无算法,而推理是唯一可行的情形。专家系统已经在很多领域得

到了广泛的应用,如经典的“DENDRAL 化学结构分析专家系统”、“MYCIN 医疗诊断专家系统”、“PROSPECTOR 矿产探测专家系统”等。而在水利领域,专家系统已应用于大坝安全监控领域,如由吴中如院士和顾冲时教授等开发的“龙羊峡大坝安全评判专家系统”以及福建省水电站大坝安全管理专家系统等。

水工金属结构由于其自身的复杂性,其安全性诊断是一种多层次、多准则的诊断工作。目前,工程界对其健康诊断的方法主要有:可靠度诊断法、安全系数法、结构应力法(有限元计算法)、专家评判法、专家系统法、层次分析法(AHP法)、人工神经网络法、德尔菲法(Delphi法)、综合诊断法等。每种诊断方法都有其优点与不足,有各自不同的适用场合。而水工金属结构健康诊断体系的研究已经发展到了从定性到定量、从感性到理性的程度,所以不能仅仅使用简单的定性或定量的方法进行诊断。

## 1.2.2 水工金属结构健康诊断指标

水工金属结构健康诊断指标是进行水工金属结构健康综合诊断的基础,既有定量分析指标,又有定性分析判断指标,指标拟定的正确与否直接关系到健康综合诊断结果的可信度。健康综合诊断指标的拟定是一个相当复杂的问题,也是需要重点研究的课题。

截止当前,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,而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安全诊断进行了相关的研究,并初步建立了水工金属结构安全诊断综合指标体系及其相应等级评判标准,所建立的水工金属结构安全诊断指标体系是把闸门和启闭机看作一个整体设备和一个诊断对象来构建;汪滨、李军利用计算机技术开发对水电工程钢结构的安全性进行诊断和对使用寿命进行预估的诊断软件,其研究的诊断指标只包括腐蚀、强度(抗弯、抗剪)、挠度三个方面的4个主要指标,且主要是针对有关腐蚀问题的特点而编制的,该软件针对性较强,诊断指标不够全面;Padula、Granata等, Kathir、Binder、Zhou等, Mlakar等, Patev等, Putcha等, 郑圣义、朱雅仙、李典庆等学者基于腐蚀状况或腐蚀速率针对钢闸门的诊断或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,其诊断指标大多主要是针对腐蚀量或腐蚀速率而进行的研究分析;而金初阳、刘柏青、张志俊、崔德密等学者对老化病害的水工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来构建,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对其安全性造成决定性影响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。

通过对水工金属结构失事原因的剖析可知,影响水工金属结构健康的因素较多,如枢纽布置、设计、制造安装质量、材质、运行管理、水力学条件等等;而运行多年的水工金属结构,还同时受到设备运行疲劳、锈蚀、门槽质量等因素的影响。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、完善和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相应权重系数,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。这些诊断方法都有其不同的特点,在运用中也有各自的适用范围和各自的优缺点。

定性诊断法主要是依靠诊断人员的分析能力,借助于经验和判断推理能力来进行评价的一种诊断方法。定性诊断方法一般是由诊断人员或专家组根据所获取的信息,对诊断对象直接进行打分或作出直观的判断,然后对各专家的判定加以归纳,形成最终的诊断意见。在使用这种方法进行健康诊断时,要求诊断人员要具有较高的专业知识以及丰富的实践经验,并且具有在不完整的数据资料中洞察事物特征的能力。定性诊断法不受统计数据的限制,可以发挥人的智慧和经验的作用,也可以避免和减少因统计数据不足或不精确而产生的片面性和局限性;但其诊断结果往往容易受诊断人员主观意识的影响以及经验、知识的限制,易带有个人主观臆断性。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、支红利等学者曾利用定性诊断的方法对系统风险进行了评价。

定量诊断法是通过以模型试验、样本试验获取的信息或其他统计数据为依据,按照诊断指标体系建立数学模型,利用数学手段和计算机技术求得诊断结果,并用数量表示出来的一类诊断方法。定量诊断法消除了个人主观臆断和经验的片面性影响,有较好的科学性和可靠性,特别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量来表示。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,缺少的恰恰是历史数据资料的积累。因此,没有足够的统计数据作为支撑,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,一般来说其健康诊断问题都是比较复杂的,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,但有些则不能。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是可靠度诊断法、层次分析法(AHP法)、专家评判法和结构应力法(有限元算法)等。

### (一) 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