



普通高等教育“十二五”规划教材

水工建筑物检测与健康诊断

徐存东 主编

武汉工业学院图书馆



01383114

98.2



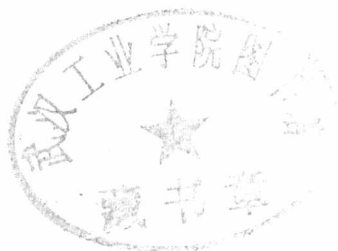
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

水工建筑物检测 与健康诊断

徐存东 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了水工建筑物监测、病害检测以及健康诊断方面的内容、理论和方法。全书共6章,包括绪论、常规监测、专项监测、安全监测数据的采集与分析、水工建筑物常见病害检测、水工建筑物健康诊断等内容。

本书可作为高等院校水利、岩土等专业的师生用书,也可作为从事水利水电工程、岩土工程和土木工程等领域设计、施工、运行管理和科研工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物检测与健康诊断 / 徐存东主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2012.9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0216-1

I. ①水… II. ①徐… III. ①水工建筑物—检测—高等学校—教材 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第230537号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 水工建筑物检测与健康诊断
作 者	徐存东 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 344千字
版 次	2012年9月第1版 2012年9月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

我国水资源和水能资源十分丰富，其中水能蕴藏量和技术可开发量均居世界第一位，丰富的水能资源成为促进我国经济发展的重要能源基础。新中国成立以来，我国的水利建设取得了突飞猛进的发展，各种水利工程遍布全国各地，先后建成了葛洲坝、黄河小浪底、南水北调东线工程、二滩、长江三峡等大型的水利工程，各类中小型的水利工程更是星罗棋布，数量众多。这些水利工程在防洪、除涝、灌溉、供水、发电、航运和改善生态环境等方面发挥了巨大效益。

但是在我国水利水电工程的建设高速发展的同时，也应该清醒地认识到，目前我国相当一部分水工建筑物已运行 30 年以上，安全隐患逐渐显现，仅就水工建筑物的安全运行而言，比较突出的问题表现为：各类水工建筑物的监测与检测设施尚不够完善，水工建筑物内在缺陷监测与检测的技术不够先进，大型水工建筑物安全运行缺乏可靠的健康诊断方法，建筑物由于内在缺陷得不到及时的诊断和修复引起的功能失效等。还有一些水工建筑物的设计洪水标准偏低，安全度较小，尤其是中小型水库，其病害更为严重，不仅影响着工程效益的发挥，还威胁下游人民的生命财产安全。因此，水工建筑物的安全已引起水利工作者的普遍关注。

近年来，我国广泛开展了水工建筑物安全监测、病害检测及健康诊断等工作，对相关的理论和应用研究也十分活跃。本书是在系统总结这方面的研究成果的基础上，为适应新形势下水工建筑物安全运行的需要，探求科学实用的检测技术方法和健康诊断模式而编写的。本书以水工建筑物安全运行理论为核心，以运行监测、病害检测和健康诊断的方法和理论为主线，详细介绍了水工建筑物运行的常规监测、专项监测、常见病害检测和健康诊断等内容。

全书分 6 章，第 1 章简要介绍了水工建筑物病害检测与健康诊断的意义、目的、内容、理论方法及发展概况；第 2 章着重介绍了变形监测、应力应变监测、渗流监测、环境量监测以及巡视检查等大坝常规监测内容与方法；第 3 章

着重介绍了结构动力性状监测、老化监测、水力学特性监测、混凝土温度控制监测、岩体应力监测及爆破影响监测等专项监测的内容与方法；第4章着重论述了安全监测数据的采集、整理分析、管理等安全监测数据采集与分析理论和方法；第5章介绍了水工建筑物常见的病害类型以及检测的技术方法；第6章着重介绍了水工建筑物监测数据的统计模型，以及根据监测数据进行健康诊断的理论体系及方法。

本书由华北水利水电学院徐存东主编，韩立炜、张宏洋任副主编。华北水利水电学院徐存东、韩立炜、张宏洋、张先起、王燕、刘慧卿，兰州理工大学侯慧敏、樊建领，宁夏回族自治区水利厅李小龙、李岷参与编写。具体分工如下：第1章由徐存东、王燕编写；第2章由张先起、刘慧卿编写；第3章由韩立炜、侯慧敏编写；第4章张宏洋、樊建领编写；第5章由韩立炜、张宏洋编写；第6章由李小龙、李岷编写。全书由徐存东、韩立炜、张宏洋负责统稿。

本书在编写过程中，参考引用了一些有关书籍、教材等文献的论述，在此向有关作者和专家学者表示深深的谢意。限于作者水平，书中难免存在不足之处，敬请各位读者批评指正，提出改进意见。

编者

2012年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水工建筑物病害检测与健康诊断的必要性	1
1.2 水工建筑物病害检测的内容	2
1.3 水工建筑物的健康诊断方法	4
1.4 水工建筑物检测与健康诊断的发展现状	6
第 2 章 常规监测	9
2.1 概述	9
2.2 变形监测	10
2.3 应力应变监测	40
2.4 渗流监测	46
2.5 环境量监测	57
2.6 巡视检查	71
第 3 章 专项监测	74
3.1 结构动力性状(模态)监测	74
3.2 建筑物老化监测	83
3.3 水力学特性监测	87
3.4 混凝土温度控制监测	92
3.5 岩体应力监测	101
3.6 爆破影响监测	112
第 4 章 安全监测数据的采集与分析	119
4.1 安全监测数据的采集	119
4.2 监测资料的整理与分析	127
4.3 安全监测资料的管理	139
第 5 章 水工建筑物常见病害检测	142
5.1 裂缝检测	142
5.2 滑坡检测	151
5.3 渗漏检测	159

5.4	腐蚀检测	180
5.5	淤积检测	181
5.6	冲刷及消能检测	185
5.7	空蚀检测	186
5.8	动物危害检测	188
第 6 章 水工建筑物健康诊断		192
6.1	概述	192
6.2	变形和应力观测统计模型	192
6.3	渗流观测量的统计模型	200
6.4	确定性模型和混合模型	207
6.5	混凝土坝健康诊断结构体系及方法	211
6.6	土石坝健康诊断结构体系及方法	216
参考文献		222

第 1 章 绪 论

1.1 水工建筑物病害检测与健康诊断的必要性

水利历来是治国安邦的大事。新中国成立以来,我国水利事业发展迅速,水利建设成效显著。新中国成立之初,全国坝高 15m 以上的水库仅 22 座,江河堤防只有 4.2 万 km。截至 2007 年,根据水利部开展的全国水库大坝安全状况普查统计资料,我国已建成各类水库 87085 座(不含港、澳、台地区),其中大型水库 510 座、中型水库 3260 多座,小型水库更是星罗棋布,水利工程年供水能力达到 6591 亿 m^3 ,累计解决了 2.72 亿农村人口的饮水困难和 1.65 亿农村人口的饮水安全问题;已修建堤防 28.69 万 km,防洪保护区 5.7 亿人口、4.6 万 hm^2 耕地以及重要基础设施的防洪安全基本得到保障;建成小型水电站(装机容量 5 万 kW 以下) 4.5 万余座,总装机容量 5127 万 kW;全国农田灌溉面积扩大到 8.77 亿亩,占世界总额的 1/5,居世界首位;累计初步治理水土流失面积 101.6 万 km^2 ,实施封育保护面积 72 万多 km^2 。

目前我国已基本形成了防洪抗旱减灾、供水灌溉排水、水土保持及水生态环境保护等比较完整的水利基础设施体系,大大减小了水旱灾害的发生频率,有力地保障了防洪安全、粮食安全、供水安全和生态安全。

但是,在对新中国成立以来水利建设的成就作出应有评价的同时,也应该清醒地看到,我国水利工程重建设轻管理的问题依然十分突出。仅就水工建筑物的安全运行而言,比较突出的问题表现为:各类水工建筑物的监测与检测设施尚不够完善,水工建筑物内在缺陷监测与检测的技术不够先进,大型水工建筑物安全运行缺乏可靠的健康诊断方法,建筑物由于内在缺陷得不到及时的诊断和修复引起的功能失效等。所以,对众多的水工建筑物开展及时的健康诊断已成为水利工程技术界的重要课题。

我国目前已建成 8.7 万多座大坝,由于历史原因和当时的经济、技术条件,一些大坝的安全度较低或者设计标准偏低等,以及多年运行,年久失修,约有 1/3 的大坝存在较多的隐患和老化病害,尤其是中小型水库其病害更为严重,影响着这些工程效益的发挥,甚至威胁下游人民的生命财产安全。另外,随着水能资源的深入开发,一些新建或待建的大坝坝址的地质条件越来越复杂,大坝的规模也越来越大,增加了大坝出事的风险因素。如近些年来我国已建坝高在 150m 以上的工程,有二滩、龙羊峡、乌江渡、白山、三峡等,对这些水利工程实施安全检(监)测和健康诊断十分必要。

水工建筑物的特点,不仅表现在投资大、效益大,设计施工复杂,也表现在其失事后果严重。大坝建成后,随着结构老化以及其他随机性的原因,出现事故,也难于完全避免。另外,水工建筑物在复杂的自然条件影响下,在各种外力的作用下,其状态和工作情况始终不断地在变化着。水工建筑物究竟有没有病害,能否安全运用、发挥效益,就必须

通过对水工建筑物进行认真系统的检测,及时掌握水库的变化动态,发现不正常情况,及时采取加固补强措施,把事故消灭在萌芽状态,以确保水工建筑物的安全运用。而且,由于材料性能、施工过程中造成的人为等因素,随着时间推移,大坝存在不同程度的老化、病变和裂缝等问题。这些缺陷或隐患问题若不能够被及时诊断发现并采取措施解决,将会时刻影响大坝的安全运行,严重情况下将会导致大坝溃决等灾难性事故。因此加强水工结构的安全检(监)测和健康诊断是水利工程运行特点的需要。

21 世纪将是老坝加固、病坝除险的高峰期。为适应“无人值班,少人值守”的要求,在加强大坝安全健康诊断,提高大坝安全性的同时,充分运用现代计算机科学、网络技术、数据库技术、人工智能等各学科理论,研制大坝健康诊断及其预警系统,将大坝健康综合诊断结果及时反馈给大坝安全管理的决策人员,确保在发生灾害性事故之前,及时预警并采取有效的补救措施,将灾害损失降到最低。因此加强水工结构的安全检(监)测和健康诊断是新时期水利工程管理的需要。

由于我们对自然规律的认识还有待深入,不可能对所有水工建筑物都进行精确的计算,对已成水利工程进行全面系统的检(监)测,不仅能够验证设计的正确性和鉴定施工质量,而且可以取得最可靠的第一手资料,提高科学技术建设与管理水平;另外,通过日常巡视和监测,可以及时掌握水工建筑物的各种变化和不正常现象,分析原因采取措施,改善运用方式,防止发生破坏事故,确保水工建筑物的安全和最大效益的发挥。可见,加强对水工建筑物运行状况的检(监)测,及时掌握建筑物的运行模态和运行状态;适时开展水工建筑物的病害检测和健康诊断,用科学检测手段和方法及时评估建筑物的病害程度,对水利工程的安全运行具有重要意义。

1.2 水工建筑物病害检测的内容

1.2.1 病害检测的目的

运行中的水工建筑物,受到各种荷载和自然因素的作用,工作情况随时都在变化,甚至状态也会发生变化。这种由正常状态转化为病害状态或由病害状态转化为危险状态的变化,是一个建筑物病害发展由量变到质变的过程,随着时间的推移,必然会出现一些异常的现象。所以加强病害检测工作,能及时发现问题,采取有效措施,把隐患消灭在萌芽状态,以确保建筑物的安全。例如我国丰满水库是坝高为 91m 的混凝土重力坝,为新中国成立前修建,工程质量很差。1950 年观测成果表明,坝体渗漏严重,坝基扬压力和坝身的水平位移都很大,据观测资料分析,在百年一遇洪水到来时,大坝将会有倾覆的危险。据此进行了紧急加固,从而降低了坝基扬压力和渗流量,提高了大坝的稳定性,保证了大坝的安全。反之,若忽视检测工作,不能及时发现问题,一旦险情发展,措手不及,往往导致事故的发生。

从施工至整个运行阶段对水工建筑物进行全面系统地观测,不仅可以验证其安全状况,作为鉴定工程质量的依据,而且可以为提高设计水平提供第一手资料。如刘家峡水库大坝的扬压力分析是按通常的设计假定计算的,但观测资料表明实际的扬压力较小,这不

仅对坝身稳定有利，也为同类工程提供了宝贵的经验。

水利工程管理的目标是既能安全可靠地运行，又能发挥最大效益，而这两者常常是矛盾的，片面追求某一个方面必然忽视另一方面。水工建筑物病害检测能了解工程的工作情况和状态变化，掌握工程变化规律，再结合水情预报，可为管理单位负责人分析和制定正确的运行方案提供科学依据。

综上所述，病害检测工作的目的主要在于：

- (1) 及时发现异常现象，分析原因，指导维修工作，防止事故发生，保证工程安全。
- (2) 通过原型观测，对建筑物的设计理论、计算方法和计算指标进行验证，有利于设计理论水平的提高。
- (3) 监视水情和水流状态、工程状态和工程情况，掌握水情和工程变化规律，为科学管理提供依据。
- (4) 根据水质变化动态与演变规律，做出水环境质量预测，以便于有关部门及时采取措施，控制和消除对建筑物有侵蚀破坏、对水体有污染的水质，便于早期做好防治工作，以延长建筑物使用寿命和保证安全运用。
- (5) 通过分析施工期观测资料，控制施工进度，保证工程质量。

1.2.2 病害检测的内容

1. 病害检测的项目

- (1) 水工建筑物的巡视检查。主要检查的内容有外观、变形、渗漏、损坏等。
- (2) 变形监测。变形监测的内容包括建筑物的垂直位移、水平位移、裂缝、混凝土建筑物的挠度、伸缩缝监测等。
- (3) 应力应变监测。水工建筑物的应力监测内容包括土压力、孔隙水压力监测。混凝土和砌石建筑物的应力监测内容包括应力、应变、温度应力、钢筋应力等。应力、温度监测通常又称为内部监测，因此，也有将变形监测称为外部监测的。
- (4) 渗流监测。水工建筑物的渗透监测包括扬压力、浸润线、渗流量、渗透水质、导渗效果及绕坝渗流等监测。
- (5) 环境量监测。包括水位、气温和水温、降水量、水质和地震监测等。
- (6) 专项监测。包括结构动力性状、建筑物老化、水力学特性以及爆破影响监测等。
- (7) 现场检测。包括裂缝、滑坡、渗漏、淤积、冲刷、空蚀以及动物危害等的检测。

检测工作的步骤包括：监测系统的设计、监测设备的安装和埋设、现场监测、成果的分析研究和资料的整编刊印等。

2. 检查监测工作的基本要求

- (1) 水库工程必须严格按照规定的测次和时间进行全面、系统和连续的观测。各种相互联系的观测项目，应配合进行。
- (2) 掌握特征测值和有代表性的测值，研究工程运用情况是否正常，了解工程重要部位和薄弱环节的变化情况。
- (3) 保证观测成果的真实性和准确性。
- (4) 对观测成果应及时进行整理分析，绘制图表，并做好观测资料的整编工作。如发

现观测对象的变化不符合一般变化规律或有突变现象时, 应进行复测, 并根据复测结果, 分析原因, 进行检查, 研究处理。

所有检查工作都要认真进行, 详细记载。发现问题, 应暂时保持现场, 迅速研究处理。如情况严重, 应采取紧急措施, 及时报告上级主管部门。

1.3 水工建筑物的健康诊断方法

在监视水工建筑物的安全运行状态时, 通常在水工建筑物内部或基础(主要是坝体)埋设各种监测仪器, 以定期或实时监测埋设仪器部位的变形、应力应变和温度、渗流等, 并通过对这些资料的分析和反分析, 评价和监控水工建筑物的安全状况, 这种方法称为原位监测。原位监测技术主要分为传感器技术及自动监测技术。然而, 并非所有出现隐患、病害等部位均预埋有监测仪器, 或者预埋仪器失效, 因此需要用现场检测加以弥补。尽管如今现场检测技术多种多样, 但从国内外水工建筑物安全检测工作的成果来看, 检测还难以定量, 尚处于定性阶段, 是一个薄弱环节; 尤其是以无损探测为主的安全检测, 其技术尚需要进行研发和提高。因此, 在进行水工建筑物安全运行评价时, 要综合检测与监测技术的信息和成果, 给出正确的评价。

综上所述, 利用监测仪器或现场检测技术, 定期或实时监测或检测水工建筑物的运行情况, 并依据这些信息和资料, 对水工建筑物的安全状况作出评价和监控的过程, 即为水工建筑物的健康诊断。

1.3.1 健康诊断的目的

随着世界各国水资源的不断开发和利用, 大坝及其他类型的水工建筑物的数量在不断增加。因而, 水库大坝及其他水工建筑物的安全问题也越来越引起社会公众的关心。国内外的大坝失事事件表明, 大坝失事有一个从渐变到突变的过程。开始时大坝出现一些缺陷或故障, 随着大坝运行时间的推移, 这些症状继续发展, 当症状发展到一定程度时, 大坝及水工建筑物迅速恶化, 失事随即发生。因此, 需要及时收集水工建筑物安全监测资料, 并且在较短的时间内根据水工建筑物安全监测信息, 实时地对其健康状态做出正确诊断和综合评价, 最终确保水工建筑物的安全运行。

水工建筑物健康诊断的主要目的就是: 对水工建筑物运行性态及影响水工建筑物的安全因素进行实时监控健康诊断, 预测其安全运行趋势, 用以辅助决策和及时预警, 让决策者及时准确地掌握水工建筑物健康状况, 并对发现的不安全因素或病险征兆提前采取预防措施, 将水工建筑物出现不安全、灾难等危险问题解决在孕育阶段, 从而提高水工建筑物安全水平。

本书对水工建筑物健康诊断主要是以土石坝和混凝土坝的健康诊断为重点进行研究的。对于土石坝, 变形和渗流性态是土石坝健康状况的综合反映。因此, 可以用变形和渗流的观测与巡查资料作为土石坝健康的诊断指标, 同时由于渗流、变形以及侵蚀等影响, 大坝的材料参数会发生变化, 从而影响大坝的强度和稳定状态, 健康诊断应考虑其影响。对于混凝土坝健康状态的诊断分析是对其进行及时、准确地预警的前提和基础, 也是大坝

安全监控中的重要环节。混凝土坝健康诊断主要是对于大坝及其周边环境等监测数据和资料信息采用定性和定量等各种诊断方法，并依据大坝健康诊断指标等，对大坝健康状况进行综合分析和评价。

1.3.2 健康诊断的理论和方法

目前，国内外工程界对水工建筑物的健康诊断，主要是对检测和监测等实测资料进行分析，然后对建筑物进行安全评价和监控。在健康诊断时一般将检测资料作为隐患病害的定性或定位分析的依据，而将监测资料作为定量分析的依据，因此需要将检测和监测资料进行集成和融合，以获得建筑物被测信息的一致性，得到准确可靠的反映水工结构安全状态的信息，为工程安全分析提供可靠依据。而对于水工建筑物进行综合性的老化机理分析、寿命评估，进而进行健康诊断并建立预警系统的理论和方法还处于摸索阶段。

目前依据实测资料对水工建筑物进行安全分析评价方法主要包括大坝的馈控理论和综合分析理论等。

1.3.2.1 大坝安全分析评价的馈控理论

大坝的馈控即根据监控模型，对水工建筑物进行安全分析评价和监控，进一步监视大坝，使其在安全状态下运行，融合监控模型和反演分析成果，通过计算力学的分析计算与演绎，并从中挖掘水工建筑物运行的规律和信息，据此反馈和优化设计施工，从而馈控水工建筑物的安全运行。

通过以上论述可以看出，为了对水工建筑物进行安全分析评价，首先要建立监控模型。国外于 20 世纪 30 年代就开始对监测资料进行分析，主要代表有 D. Tonini 和 M. Rocha，他们首次将影响大坝位移的因素分为水位、温度和时效三个分量，以函数式表达各个分量，然后用回归分析法建立回归模型。P. Bonaldi 等于 1977 年用有限元计算了水位和温度分量及时效的统计模式，然后用最小二乘法建立确定性模型或混合模型，借以评价和监控大坝的安全状况，用时效分量的变化规律分析大坝的安全变化趋势。

国内在 1974 年以前，主要通过绘制过程线以及统计最大与最小值等特征值，借以定性分析和评价大坝的运行状况。其后，从事水利工程的科研人员应用统计回归法逐步建立了大坝安全评价统计模型，现在的科研人员在本领域的研究工作主要包括对上述的统计模型、确定性模型、混合模型的因子用坝工理论和力学原理等进行分析和演绎，应用多种统计数学结合实测资料，建立各类监测量的测点及空间位移量的统计模型；或者用有限元法分析计算水压分量、温度分量和时效分量；结合实测资料，用范数的最小二乘法，建立测压孔和变形测点及空间位移场的确定性模型和混合模型等；与此同时，也应用时序分析法、灰色系统、模糊数学、混沌理论、神经网络等建立水工结构的健康状况预测模型。应用这些模型对大坝、坝基与库岸岩体边坡等的安全状况进行定量分析评价和监控。

1.3.2.2 大坝安全综合分析评价方法

随着国内外病险坝的逐渐增多，要求实时或及时掌握大坝的安全状况，而其影响因素又极其复杂，工程界发现单用监控模型或反分析等理论和方法，对水工结构安全状况做出分析评价和监控有其局限性。随着自动化监测技术、现代计算理论和方法、人工智能、计算机科技等的发展，从 20 世纪 90 年代起，国内外监测界开始研发水工结构安全综合分析

评价的专家系统。

以意大利结构和模型研究所 (ISMES) 为代表, 早期开发的微机辅助监测系统 (MIDAS) 是一个管理和辅助程序, 可实现监测数据的实时存储、更新和图形显示, 并应用回归统计模型、确定性模型和混合模型进行简单的对比分析。其后, 相继开发了 DAM-SAFE 的决策支持系统等, 将人工智能技术应用于大坝安全管理, 并与 Internet 连接, 用于管理显示解析监测数据, 检索设计、试验及专家对大坝评价等资料, 还有 Web 浏览器供用户访问等。

我国在 20 世纪 80 年代, 结合“七五”和“八五”国家科技攻关项目, 研发了基于微机的大坝监测数据管理系统, 主要用于存储和管理监测数据、制作图表、统计分析及异常值的识别等。其中河海大学与电力部大坝安全监察中心合作, 于 20 世纪 80 年代末开始, 研发了“一机四库”(即综合推理机、知识库、方法库、工程数据库和图库) 的大坝安全综合评价专家系统。在基于分布式 C/S 或 B/S 体系及网络上实现了对大坝安全进行及时或实时分析评价和综合评价的两大功能。其中, “实时分析评价”为及时或实时发现异常测值, 并对其进行物理成因解析提供了辅助决策的技术支持; “综合评价”为结合大坝每五年一次定期安全检查的需要, 实现了对大坝安全级别做出综合评价, 对病险坝提出辅助决策的建议。这里需要说明的是, 因工程需要, 有时将综合推理机和知识库合并为综合分析推理库, 因此构成了由“四库”组成的在线监控及反馈分析系统。国内的有关研究单位也研发了具有类似功能的系统。从应用情况来看, 监测系统采集资料的可靠性、软硬件平台的水平及运行管理的水平等, 是专家系统应用于实际工程的关键。

1.3.2.3 风险评价理论和方法

国外对大坝安全进行风险评价已有几十年的历史, 其中最早提出风险概念的是美国陆军工程师团 USACE 的 Hagen, 他将洪水引起溃坝和漫顶等的风险因素及结构隐患的风险因素等作为相对风险指标, 依据专家评判, 定出相对风险指标值, 据此评价大坝运行的风险度。其后美国垦务局提出了现场评分法来评价大坝运行的风险, 除考虑上述风险因素外, 还考虑资金投入与工程效益的风险因素。美国国家气象局则主要以溃坝对下游的影响进行风险分析。加拿大、澳大利亚等国也将风险评估理论引入到了大坝的安全管理中。

国内对大坝风险评价研究的开展相对较晚, 但近几年来逐渐开展了这方面的研究, 针对水利大坝的特点, 提出了用随机模糊法及大坝失事允许概率计算等方法对大坝安全进行风险分析, 但主要是针对防洪的风险因素。另外针对大坝安全复核等问题, 提出了考虑结构安全性及兴利或成灾的影响等因素, 建立了大坝总体安全度概念, 用以判别大坝的安全状况。

1.4 水工建筑物检测与健康诊断的发展现状

水利工程安全检(监)测始于 20 世纪 50 年代, 在这个时期, 水利工程检(监)测及安全控制主要应用于以大坝为代表的建筑物, 并且是以人工检(监)测手段为主; 在 1973 年第 11 次国际大坝会议上, 美国 R. B. Jansen 等提出进行人工巡视检查是大坝安全监测的重要内容, 能较好弥补仪器监测的局限性。但这种检查主要依靠目测或简单工具进

行外表检查,仍难以发现内部存在的隐患。为此,自20世纪70年代,科技人员开始研究大坝病害检测技术,检(监)测手段也由人工转入数据采集的自动化。其中日本、西班牙、意大利、法国、美国及苏联等国的许多大坝安装了自动数据采集系统,同时在数据采集与计算方面配备了高速快捷的计算机,除分析判断检(监)测资料数据的变化规律外,还包括检(监)测成果反馈到水坝安全控制软件方面。20世纪80年代,意大利结构与模型研究所(ISEMS)开始研究用声波层析的方法对大坝进行安全检测,于1990年提出了系统的检测方法,并在第17届国际大坝会议上作了介绍。该法经意大利100多座大坝的应用,被认为是无损检测的经济实用方法,其后在美国多处大坝中应用。日本于1991年在我国丰满大坝进行声波层析检测,得到坝内纵波速的分布。特别是近几年来,国外发明了三维声波层析技术,可以检测坝内的力学参数及病害的立体分布图,分辨率也有较大提高。与此同时,应用探地雷达检测渗流通道等也有较大发展。

至20世纪80年代末,水利工程尤其是土石坝的安全检(监)测进入自动化阶段,并逐步完成了自动化检(监)测系统的多次更新改造,实现了数据采集与传输、数据管理、在线分析、综合成图、成果预警的计算机自动化检(监)控。在监测应力应变、温度和渗流等方面,主要传感器有应变计、应力计、钢筋计、测缝计和渗压计,如美国加利福尼亚大学的Carlson和苏联的Davidenkov于20世纪30年代分别研发了Carlson电阻式传感器和振弦式传感器等,这些仪器在监测混凝土坝的应力应变、温度和渗压等方面得到了广泛应用,并取得了监测的实效。

在变形监测方面,主要有由法国的Telemac公司(现归属加拿大)、美国的Geokon和Sinco公司等生产的光电式、变电容式、光电编码式等非接触式垂线和引张线坐标仪,以及德国的Maihak、Carlzeiss工厂和瑞士的Soileperts公司等生产的激光光学仪等。在地基和滑坡等监测方面,Telemac公司、Geokon公司、Sinco公司、Geomatics公司等生产了多点变位仪、倾斜仪和变位仪等。

在20世纪90年代,美国Honeywell公司研制了有关智能传感器,它将硅敏感元件与微处理器的计算与控制结合起来,该公司还研制了ST3000系列全智能变送器;其后,德国Strohrmann公司研制的二维速度传感器及西门子公司研制的IQ-Sence等智能传感器系统,通过ProfibusDP的通信,使其具有故障的自动诊断性能。

与此同时,我国在检测技术上也取得了令国内外瞩目的成果。在20世纪80年代末,我国研制了电阻率检测的电法检测仪,90年代开始应用探地雷达检测大坝隐患,并应用瞬态面波法和瞬态电磁法探测大坝坝基和坝体的隐患和缺陷。研发的混凝土坝声波层析检测系统(ST-200),其性能优于日本的DYD系统,并在丰满等大坝检测中得到成功应用。与此同时,河海大学用同位素跟踪等方法检测渗漏也取得了较大进展。此外,我国在原位监测技术上也有了自己的创新并取得了相应成果。20世纪50年代开始,我国对国外的传感技术进行引进吸收、消化和改进,形成了有中国特色的传感技术,另外,由东北勘测设计院研制的激光传感技术,在监测丰满和太平哨等大坝变形中取得良好的效果。

进入21世纪,水利工程和水工金属结构的安全检(监)测技术有了很大进步,具体表现在将光谱分析技术、磁记忆检测技术、无损检测技术、相控阵超声成像技术、声发射检测技术、激光测振技术等先进的技术应用于工程结构的安全检(监)测。

对于水工程中的堤坝水下部分的安全检测,我国实现的一个主要探测技术突破就是首台国产堤坝安全检测水下机器人的投入使用。2005年,由哈尔滨工程大学研发的国内首台TB-1型堤坝安全检测水下机器人,集水下摄像、检测、地表地形测绘和堤坝内部缺陷(损伤)探测等功能于一身的多功能综合水下探测机器人,工作深度可达水下300m,可用于所有水工程水下检测。

目前,在水利工程的水下安全检测方面,最新的技术设备还包括水下电视、水下照相机、水下声呐和水下超声仪等。

(1) 水下电视。水下电视是将电视应用于水下以获得水下景物影像的一门技术。一个较为完整的水下电视系统包括:①水下电视摄像机;②水下辅助光源;③记录设备;④地面控制器;⑤防水电缆等。其中以微光成像的摄像机最为基本。

(2) 水下照相机。也就是将水下照相机和摄影装置源于水下以实现对水工建筑物的水下照相、摄影和实时监控的技术。

(3) 水下声呐。是指利用水下声能来探测水中建筑物状态的仪器。声呐分主动式和被动式两种,主动式声呐指能辐射水下声能并利用其反射波的仪器;被动式声呐指仅能接收远距离水下声能的仪器。

(4) 水下超声仪。利用超声波方向性强、反射性强和功率大等特点研制的仪表进行水下定位、检测工程结构或地基等缺陷的技术设备,通称为水下超声仪。水下超声仪主要通过射入固体诸如水工程的混凝土结构、地基岩体、金属构件等内部的超声波,遇到缺陷或界面(如混凝土、岩石的孔隙、空洞,金属中的杂质或气泡等)时,部分发生反射,根据透射波和反射波的比较,就能相当准确地确定缺陷的位置、大小及性质。

在水工结构的健康诊断方面,健康诊断指标是对其健康状况进行诊断的一种重要工具。健康诊断指标对于馈控大坝等水工建筑物的安全运行相当重要,其主要任务是根据大坝和坝基等建筑物已经抵御荷载的能力,来评估和预测抵御可能发生荷载的能力,从而确定该荷载组合下监控效应量的警戒值和极值。由于有些大坝可能还没有遭遇最不利荷载,同时大坝和坝基抵御荷载的能力在逐渐变化,因此健康诊断是一个相当复杂的问题,也是国内外坝工界研究的重要课题。

近年来,随着人工智能和信息科学的发展,混沌理论、人工神经网络、小波分析、模糊数学等正逐步被运用到大坝健康诊断的建模中,这些新的理论丰富了大坝安全综合评价的方法,为大坝健康诊断研究工作开辟了新的途径。同时,在大坝安全综合评价方面,人工神经网络的应用刚刚起步,主要工作集中在数据处理、模型预报等方面。目前,对于大坝监测资料的分析诊断和综合评价方法正逐步趋向多元化、智能化。

第2章 常规监测

2.1 概述

水工建筑物的常规监测项目主要包括变形监测、应力应变监测、渗流监测、环境量监测及巡视检查等。它们是水利工程安全监测系统不可缺少的组成部分，在维持水工建筑物的安全运行方面有着不可替代的作用。

2.1.1 常规监测的目的及意义

水工建筑物常规安全监测的主要目的是防止可能发生的工程事故，保证水工建筑物的安全。事故的发生一般都是有征兆的，这些征兆一般会在建筑物运行过程的性状变化中表现出来。跟踪这些性状变化，可以发现事故前兆的蛛丝马迹，使得工程人员赢得避免事故发生的宝贵机会。

常规监测的目的具体可归纳为以下几点：

(1) 掌握工程性状变化，服务工程安全管理，保证工程安全。水工建筑物从施工到完建，从挡水到运行，其性状处在不断变化之中，也隐含着不少风险。在施工期要了解临时建筑物及永久性建筑物在建设运行过程中的性状变化和可能发生的安全问题，要了解基坑、洞室开挖爆破、大体积混凝土浇筑、土石方填筑对工程安全可能造成的不利影响。工程完建后，水库蓄水开始试运行，建筑物面临第一次真正的考验。工程安全监测系统应为工程设计和施工部门提供建筑物及其基础工作状况的第一手资料，对工程安全作出第一次评判，并为工程验收提供依据。当工程进入正常运行期后，监测系统已基本建成，应成为工程安全管理部门的耳目和技术手段，在长期的工程运行和安全管理中监测工程性状变化，为识别和规避工程风险，保证工程安全，提高工程效益发挥作用。因此，掌握工程性状变化，保证工程安全是工程安全监测的首要目的。

(2) 检验设计理论。随着水利水电工程数量的增加和难度的加大，要求水工设计人员在设计理论和设计方法方面不断改进，不断创新。但这些新理论、新方法在实践中究竟效果如何，是否与设计人员原来设想的一致，都需要建筑物运行后的实测数据来检验。

(3) 优化施工工艺，指导施工。由于水工建筑物施工的复杂性，为了改进和优化施工方法和施工工艺，有时需要边施工、边监测、边反馈，称这一方法为动态施工。如地下洞室开挖中的监测反馈控制，施工围堰建成后基坑抽水过程的安全监测，大体积混凝土浇筑中的温度控制，以及堤防加固新工艺试验性施工等。

(4) 配合工程科学研究。对于一些规模宏大或技术复杂的水工建筑物，在设计阶段除了要在实验室作模型试验研究外，有时还需要在类似的建筑物上布设仪器作研究，或专门修建实体建筑物予以研究，如陆水水利枢纽工程是作为修建三峡工程的试验坝，还有一些

是利用在建工程的某些施工部位或施工程序做一些专项试验,这些都需要监测工作的配合。

2.1.2 常规监测的原则

水工建筑物的常规监测,必须遵循一定的原则,根据工程等级、规模、结构形式及其地形、地质条件和地理环境等因素,设置必要的相应监测项目及其相应设施,定期进行系统的监测。

水工建筑物的常规监测工作应遵循如下原则:

(1) 各监测仪器、设施的布置,应密切结合工程具体条件,能较全面地反映工程的运行状态;统筹安排,兼顾全面,突出重点,配合布置。

(2) 各监测仪器、设施的选择,要在可靠、耐久、经济、实用的前提下,力求先进和便于实现自动化监测。

(3) 各监测仪器、设施的安装和埋设,必须按设计要求精心施工确保质量。安装和埋设完毕,应绘制竣工图、填写考证表,存档备查。

(4) 仪器监测严格按照规程设计要求进行,相关监测项目力求同时监测;针对不同阶段,突出重点进行监测;发现异常,立即复测;做到监测连续、数据可靠、记录真实、笔记齐全、整理及时,一旦发现问题,及时上报。

(5) 应保证在恶劣气候条件下仍然能进行必要项目的监测。必要时可设专门的监测站(房)和监测廊道。

2.2 变形监测

2.2.1 变形监测的内容及其方法

通过对水工程事故的分析可以看出,事故发生的一种重要表现形式是地基或坝肩的滑动,或地基发生不均匀沉降。而这种滑动或沉降是一种渐变过程,也就是说,是在施工、水库蓄水、建筑物运行过程中,建筑物及地基在多种荷载作用下发生变形、位移,逐渐积累达到失稳或稳定的过程。这种变化在建筑物外部(或表面),表现为水平位移和垂直位移的变化,对于某一侧线则表现为挠度、曲率的变化。变形在建筑物的各种缝面,包括施工缝、预留的温度伸缩缝及各种原因产生的裂缝等则表现为缝面开合度的变化;对于岩体中存在的软弱结构面、可能的滑动面、开裂面等既有张合又有相互错动的表现;对于填筑的土坝坝体、坝身、土基则有明显的沉降变形和固结变形等表现。总之,水工建筑物在施工、蓄水、运行过程中会有各种变形方面的表现,可以使用多种方法进行监测,关键是看测值是否超过了允许的范围。这就要求选择一批对变形最敏感的部位布置测点,使用专门的监测仪器和监测方法,进行连续监测。认真地对实测数据进行处理分析,及时定量的对建筑物及其基础的变形、位移状态及发展趋势作出判断和预测。

监测建筑物水平位移的方法有视准线法、前方交会法、引张线法、激光准直法等;垂直位移的监测方法应用最广泛的是精密水准测量法;挠度监测主要采用垂线法,垂线又有