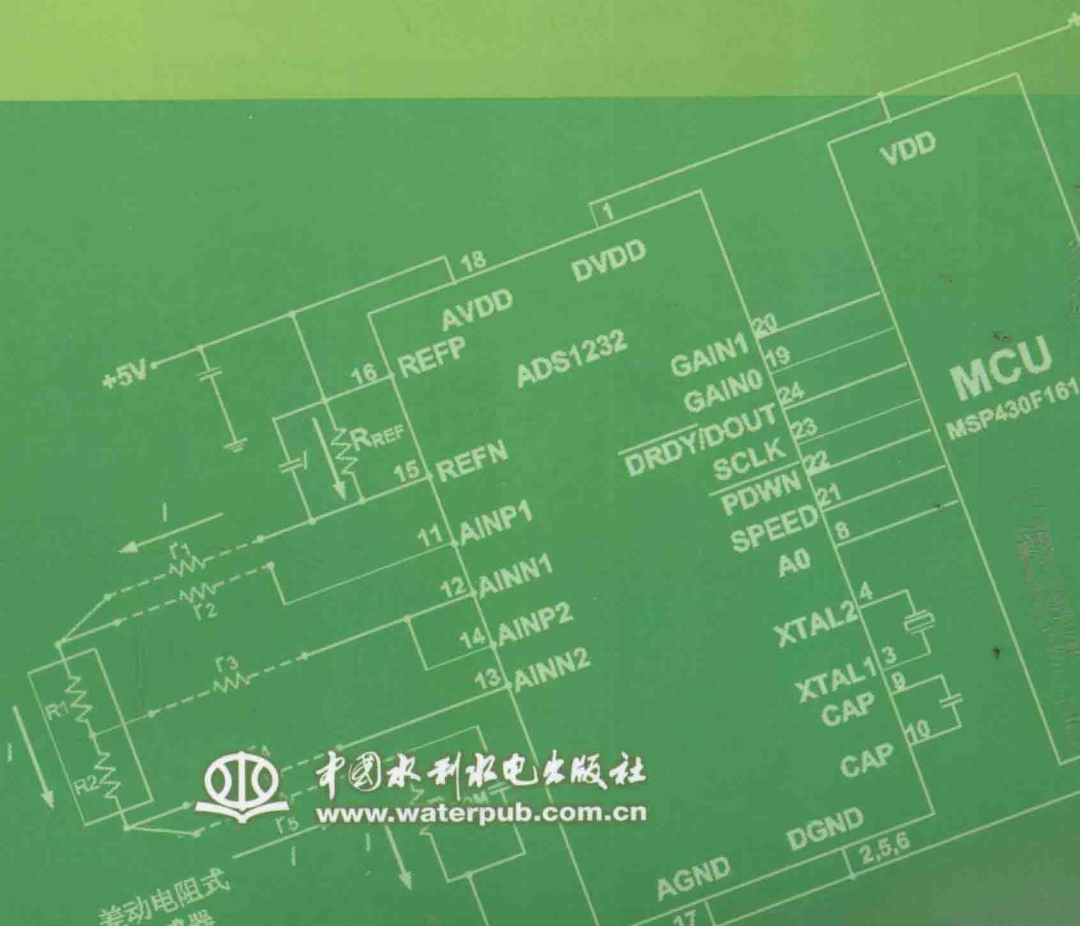


SHUIDIAN GONGCHENG ANQUAN JIANCE JISHU YU YINGYONG

# 水电工程安全监测技术与应用

田冬成 王万顺 孙建会 熊成林 著

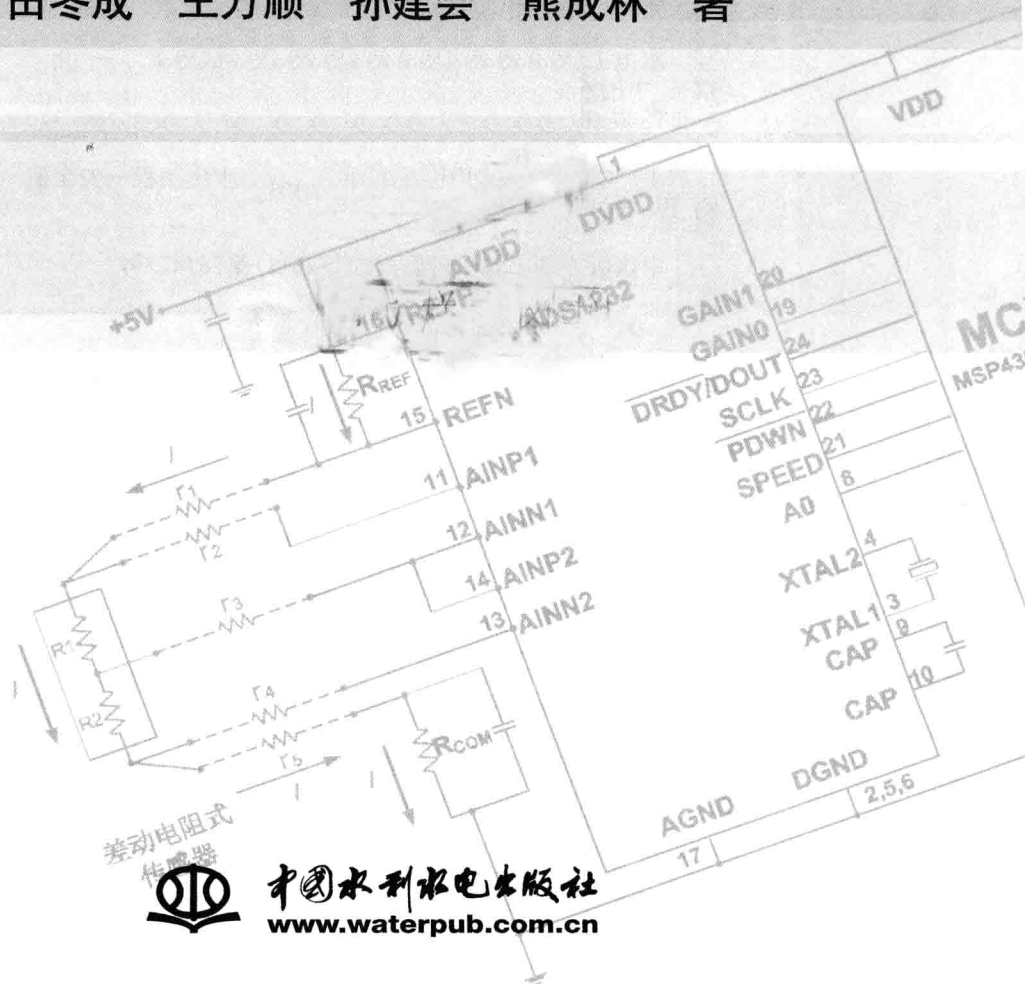


中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

差动电阻式  
传感器

# 水电工程安全监测技术与应用

田冬成 王万顺 孙建会 熊成林 著



差动电阻式  
传感器



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书介绍水电工程安全监测的监测目的、监测范围、监测项目，不同坝型监测项目的设计原则和布置，与监测项目对应的监测技术和方法及其工作原理、应用（安装埋设）、监测资料整编及分析等，包括外部变形监测、内部变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测、水力学观测、地震反应监测、自动化监测等。

本书可供水电工程安全监测施工、运行管理技术人员阅读，也可供设计及科研单位相关专业技术人员及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目（C I P）数据

水电工程安全监测技术与应用 / 田冬成等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2012. 1  
ISBN 978-7-5084-9373-2

I. ①水… II. ①田… III. ①水利水电工程—安全监测 IV. ①TV513

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281472号

审图号: GS (2012) 133 号

书 名	水电工程安全监测技术与应用
作 者	田冬成 王万顺 孙建会 熊成林 著
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
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11印张 261千字
版 次	2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00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

---

进入 21 世纪,我国进入了水电大发展的时期,2020 年前将是中国水电发展的高峰期和关键时期,将建成一大批水电工程。我国已建各类水库 8.6 万余座,遍及全国山丘区,在防洪、灌溉、发电、城乡供水、航运和水产养殖等方面发挥了巨大的经济效益,但大部分水库是在 20 世纪 60~70 年代兴建的,其中部分水库已成为病险水库,不能按设计正常运用。水电工程一旦失事,势必会造成惨重后果。针对水电工程在设计、施工、运行等阶段存在的不确定性,如何防范水电工程失事是工程安全管理重中之重。水电工程安全监测作为安全管理的一个重要手段,在工程勘测、设计、科研、施工、运行各阶段都是非常必要的,安全监测在其中也发挥了越来越大的作用,能有效减少事故隐患,预防和控制恶性灾难事故发生。

水电工程安全监测技术与监测仪器相伴而生,监测技术在理论上可行,需要通过监测仪器来实现,有时须进行大量的科学研究和试验比对,确定仪器的原理、安装埋设工艺、数据采集与计算方法等,形成较为完整的监测技术应用体系,并伴随监测仪器的不断改进完善而发展。根据水电工程监测的特点和需要,对新技术进行不断地研究和改进,形成了许多技术先进、测量精度满足水电工程要求、便于操作和数据处理的安全监测技术,水电工程安全监测技术与监测仪器研发迈入了多元化发展新阶段。水电工程安全监测技术不断适应水电工程设计、施工、运行管理的需要,在应用中不断创新和发展。

本书介绍了水电工程安全监测的监测范围、监测目的、监测项目,不同坝型监测项目的设计原则和布置,与监测项目对应的监测技术和方法及其工作原理、应用(安装埋设)、资料整编及分析等,包括外部变形监测、内部变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测、水力学观测、地震反应监测、自动化监测、监测资料整编及分析等。

全书共 10 章,第 1 章概论;第 2 章水电工程安全监测设计及布置;第 3 章外部变形监测技术与应用;第 4 章内部变形监测技术与应用;第 5 章渗流监测技术与应用;第 6 章应力应变及温度监测与应用;第 7 章泄水建筑物水力学监测;第 8 章地震反应监测;第 9 章安全监测自动化;第 10 章安全监测资料整编分析。

本书编写过程中,中国水利水电科学研究院张金接教授、葛怀光教授对本书提出了许多宝贵意见,郭永刚教授、陈文学教授分别参与了地震反应监测、水力学监测章节的编写,在此一并向他们表示谢意!

本书第 1 章、第 2 章由田冬成执笔,第 3 章由田冬成、朱赵辉执笔,第 4 章由熊成林、武学毅、姜龙执笔,第 5 章由王万顺执笔,第 6 章由孙建会、王万顺执笔,第 7 章、

第8章由田冬成、王万顺执笔，第9章由贺虎、李娜执笔，第10章由朱赵辉执笔，全书由田冬成、王万顺、孙建会、熊成林统稿。

本书编写过程中，因时间仓促、学术水平有限，难免存在疏漏之处，敬请各位专家和读者批评指正。

作者

2011年12月10日

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 水电工程安全监测的意义 .....	1
1.2 水电工程安全监测的目的 .....	3
1.3 水电工程安全监测演变 .....	3
1.4 水电工程安全监测技术应用与发展 .....	4
<b>第 2 章 水电工程安全监测设计及布置</b> .....	7
2.1 概述 .....	7
2.2 仪器选型 .....	7
2.3 监测范围和监测项目 .....	8
2.4 混凝土坝安全监测 .....	9
2.5 混凝土面板堆石坝安全监测 .....	12
2.6 地下洞室安全监测 .....	15
<b>第 3 章 外部变形监测技术与应用</b> .....	17
3.1 概述 .....	17
3.2 常规变形测量 .....	18
3.3 三维激光测量技术 .....	24
3.4 地面微波干涉微变形测量 .....	26
3.5 干涉合成孔径雷达测量 .....	29
3.6 GPS 测量 .....	32
<b>第 4 章 内部变形监测技术与应用</b> .....	34
4.1 概述 .....	34
4.2 水平向位移监测技术与应用 .....	34
4.3 垂直向位移监测技术与应用 .....	43
4.4 轴向位移监测技术与应用 .....	52
4.5 挠度监测技术与应用 .....	58
4.6 缝开合度监测技术与应用 .....	61
<b>第 5 章 渗流监测技术与应用</b> .....	67
5.1 概述 .....	67
5.2 渗流监测布置 .....	68

5.3 渗流监测技术与应用 .....	70
<b>第6章 应力应变及温度监测与应用 .....</b>	<b>78</b>
6.1 概述 .....	78
6.2 监测仪器设备 .....	78
6.3 应力应变监测布置 .....	80
6.4 工程应用 .....	84
<b>第7章 泄水建筑物水力学监测 .....</b>	<b>88</b>
7.1 概述 .....	88
7.2 压强监测 .....	88
7.3 流速与流量监测 .....	89
7.4 水面线观测 .....	90
7.5 消能与冲刷监测 .....	90
7.6 振动监测 .....	91
7.7 通气与掺气监测 .....	91
7.8 空化空蚀监测 .....	92
7.9 泄洪雾化监测 .....	93
<b>第8章 地震反应监测 .....</b>	<b>94</b>
8.1 概述 .....	94
8.2 监测台阵仪器布置与安装 .....	96
8.3 监测台阵运行管理 .....	99
8.4 强震动加速度记录与分析 .....	103
8.5 振动测试记录的功率谱分析与相干分析 .....	107
8.6 强震加速度记录的反应谱分析 .....	108
<b>第9章 安全监测自动化 .....</b>	<b>110</b>
9.1 概述 .....	110
9.2 监测自动化常用传感器 .....	110
9.3 监测自动化系统设计 .....	120
9.4 监测自动化采集设备 .....	125
9.5 监测自动化软件 .....	132
9.6 监测自动系统的运行管理 .....	142
<b>第10章 安全监测资料整编分析 .....</b>	<b>146</b>
10.1 概述 .....	146
10.2 监测资料整编分析内容 .....	146
10.3 监测资料整理整编 .....	150
10.4 监测资料分析 .....	157
<b>参考文献 .....</b>	<b>170</b>

# 第 1 章 概 论

水电是可再生、无污染的清洁能源，水电作为电力行业中最重要清洁能源和可再生能源类型，发展空间非常大，进入 21 世纪，我国水电建设加速发展。2004 年，以公伯峡 1 号机组投产为标志，中国水电装机容量突破 1 亿 kW，超过美国成为世界水电第一大国。溪洛渡、向家坝、小湾、拉西瓦等一大批巨型水电站相继开工建设。2010 年，以小湾 4 号机组投产为标志，我国水电装机已突破 2 亿 kW。国家“十二五”规划为我国水电建设带来新的机遇，大型水电建设项目的启动已是必然的趋势，我国将在“十二五”期间增加 1 亿 kW 水电装机容量。按照初步规划，2015 年中国水电发展目标 3.10 亿 kW（抽水蓄能电站 0.30 亿 kW），2020 年为 3.80 亿 kW（抽水蓄能电站 0.50 亿 kW），未来 10 年将是中国水电发展的高峰期和关键时期，一大批水电工程将建成投产。

我国是世界上洪水危害严重的国家之一，从公元前 206~1949 年的 2000 多年间，发生较大的洪水灾害 1029 次，平均每两年就发生一次。新中国成立后，党中央国务院非常重视江河防洪工程，依靠广大群众，开展了大规模的江河整治工作，修建了大量的拦截江河的水库大坝工程。截至 2001 年底，我国已建各类水库 8.5 万余座，其中库容 1 亿  $\text{m}^3$  以上的大型水库 433 座，库容 1000 万~1 亿  $\text{m}^3$  的中型水库 2736 座，库容 10 万~1000 万  $\text{m}^3$  的小型水库近 8.2 万座。水库总库容量 5281 亿  $\text{m}^3$ ，其中大型水库库容量 3927 亿  $\text{m}^3$ ，中型水库库容量 758 亿  $\text{m}^3$ ，小型水库库容量 596 亿  $\text{m}^3$ 。这些水库星罗棋布，遍及全国山丘区，在防洪、灌溉、发电、城乡供水、航运和水产养殖等方面发挥了巨大的经济效益。当现有水库发挥巨大防洪和兴利效益的同时，我们应该清醒地看到已建的大部分水库是在 1958 年“大跃进”年代和 60~70 年代“文革”动乱时期兴建的，当时由于技术力量和经验不足，缺乏科学态度，多在边勘测、边设计、边施工情况下进行的，建成后防御洪水标准低，施工质量差，工程运行管理滞后，在遭遇大洪水中垮坝失事，损失严重。部分水库建成后成为病险水库，不能按设计正常运用，这些水库直接关系到水库下游广大人民生命财产的安全和国民经济的发展。

无论是新建的水电工程还是已建的水库大坝，从施工到完建，从挡水到运行，其安全健康性状处于不断变化之中，也隐含着相应风险。水电工程安全监测就是通过监测仪器设备对拦河大坝、泄水建筑物、地下洞室、近坝区岸坡、高边坡及周围环境进行监测和巡视检查，掌握工程实际健康安全状况，为判断工程安全提供必要信息。

## 1.1 水电工程安全监测的意义

水电工程具有防洪、发电、灌溉、供水、航运、水产养殖等方面的综合效益，也不能忽视拦河大坝、附属水工建筑物存在溃坝、破坏的潜在风险。水电工程按有关规程规范进行设计，能承受所考虑的各种荷载组合，具有一定的安全系数，但设计时考虑的边界条件



和荷载组合与实际仍存在一定差异，设计时不能对有些条件、荷载、地质情况作出完全准确的估计和判断；在工程施工环节，施工工艺和施工措施的不当或人为因素，使得工程施工质量也可能存在瑕疵；工程运行管理阶段，不能科学、规范地进行运行调度，有时遭遇不利的气象条件或地震等突发事件。针对水电工程在设计、施工、运行等阶段存在的不确定性，如何防范水电工程失事是工程安全管理的中中之重。

我国先后进行过3次溃坝失事的统计。1962年，第1次统计了1954~1961年底的失事坝共532座。1979年，第2次统计在1962年资料的基础上补充整理了1980年底前的溃坝数据，编制了《全国水库垮坝登记册》。当时全国累计溃坝（包括溢洪道及输水洞的冲毁）2976座，平均溃坝率为3.4%；按坝型统计，溃坝总数中土石坝最多，为2944座；按破坏部位划分，坝体破坏2586起（86.9%），溢洪道破坏197起（6.6%），输水洞破坏157起（5.3%）。1991年，第3次统计了1981~1990年的266座溃坝，编写了《全国水库垮坝统计资料》。1991~2002年的12年中，共发生235座水库垮坝事件，其中小型水库233座（99%），中型水库2座。分析溃坝原因，超标准洪水漫坝147座（63%），工程质量差、抢险不力71座（30%），管理不到位、措施不得力17座（7%）。

水电工程一旦失事，势必会造成惨重后果。1963年河北省海河流域发生了大暴雨洪水，垮了5座中型水库大坝、93座小型水库大坝，死亡1464人，造成约60亿元的经济损失。1975年河南省淮河和长江流域发生了大暴雨洪水，垮了2座大型水库大坝、2座中型水库大坝、60座小型水库大坝，其中大型水库板桥垮坝，损失最为惨重，死亡2.6万人，受伤9万多人，造成国民经济损失约100亿元，堪称近代水利史上的一次重大灾难。即便是小型水库，库容虽然较小，但有的大坝较高，一旦垮坝，损失也很大。1993年8月，青海省共和县沟后水库，库容量只有330万 $m^3$ ，但大坝高达71m，大坝失事后，虽然水库下游地广人稀仍然死亡320多人，造成国民经济损失达1.53亿元。2001年10月，四川大路沟水库溃坝，死亡近40人。2003年，因三峡水库蓄水和降雨等综合因素诱发，库区千将坪发生体积约2400万 $m^3$ 的特大型滑坡灾害，死亡24人，直接经济损失超过8000万元，1300多人被迫搬迁避险。

绝大多数水电工程失事成灾需经历从量变到质变的一个缓慢、逐渐累积的过程，通过对重点部位、存在质量缺陷或安全隐患部位的安全监测、连续观测及必要的巡视检查，当这些部位出现异常征兆时，通过获取的安全监测数据资料的整编分析，能及时发现问题，针对工程出现的问题及时进行处理，避免重大事故的发生，防患于未然。如1962年，安徽省梅山水库大坝，监测发现右岸山坡渗流量明显增大，引起了管理人员的重视，通过进一步检查发现，右岸几个坝段向左倾斜达51mm，坝体出现了较长裂缝。经综合分析，判断为右岸基岩发生了部分错动，大坝险情严重，后决定放空水库，并进行了加固处理，有效地避免了一次重大事故。又如1993年，通过监测，发现佛子岭水库大坝向下游位移量明显增大，超过历史最大值30%，水库管理单位立即进行全面检查和分析，判定为大坝遭遇到不利工况所致，考虑到大坝基础、坝体均存在一定的缺陷，决定控制水位运用，避免了大坝安全性态的进一步恶化。

随着水电大开发，在我国西南地区将兴建众多大型水电工程，由于其所处地质环境与设计、施工技术复杂，对工程安全提出了更高、更多的要求。病险水库的除险加固，加强

工程安全运行管理非常重要，建立安全监测系统是必要的工程管理措施。因此，水电工程安全监测作为安全管理的一个重要手段，在工程勘测、设计、科研、施工、运行各阶段都是非常必要的，安全监测在其中也发挥了越来越大的作用，能有效减少事故隐患，预防和控制恶性灾难事故发生，避免群死群伤和重大经济损失，具有十分重要的现实意义和深远影响。

## 1.2 水电工程安全监测的目的

随着我国水电事业的迅猛发展，其工程安全问题也愈来愈受到人们关注。因而确保工程安全是设计、施工、管理各项工作最重要的基本要求，而注意加强工程安全监测，则为其重要环节。

由于地质条件、自然环境等因素的复杂性，人们在认识上尚有一定的局限性，还不能在设计中预见所有的工程安全问题，从而难免潜在万一的风险，特别是在电站下游常有人口稠密的城镇，一旦不测，不仅工程本身不能发挥效益，而且更重要的是危及下游人民的生命财产安全，其损失将极其惨重。因此，为确保工程安全，防患于未然，水电工程必须设置必要的安全监测系统，主要目的为：

(1) 监测运行中工程的性态变化，监视工程运行安全，实时掌握工程安全健康性状，为工程的安全管理服务。

(2) 监测工程的重点部位、具有潜在危险的部位，分析判断这些部位施工期的安全稳定性。根据施工期监测资料，掌握工程的实际性状，据以修改、补充设计或施工技术方案的。

(3) 监测资料反馈于设计，检验和完善设计理论与方法，以验证、调整、优化工程设计，提高设计水平。

(4) 优化施工工艺，指导施工，及时提出监测成果和对下一步施工的合理化建议，使工程施工质量和进度得到有效控制。

(5) 动态监测工程运行期所监测部位的性态，根据监测成果进行预测预报，以便及时进行维护，避免事故发生，保证工程正常运行、经济运行。

(6) 系统总结分析监测成果，配合工程科学研究，与工程结构设计参数、数值计算成果、模型试验成果、材料力学参数及施工技术特性等进行全方位对比分析研究，提高设计、施工、运行管理水平。

## 1.3 水电工程安全监测演变

大坝安全监测始于19世纪末，1891年德国的埃希巴赫重力坝进行了变形观测。20世纪初，澳大利亚的鲑溪拱坝和瑞士的孟萨温斯拱坝进行了挠度观测，孟萨温斯拱坝坝体内还埋设了压阻式仪器，美国新泽西州的波顿重力坝进行了温度观测。起初的监测目的主要是为了研究大坝设计计算方法，发展坝工技术。在水电工程安全监测起步阶段，伴随着工程失事人们在不断地寻求监测手段，以求在事故发生前获取到信息，进行准确判断，及时采取有效防范措施，这样可以尽可能地避免事故的发生，这种希望的寄托使得监测工作逐步受到重视。

因经验不足,我国水电工程安全监测经历过无技术规范、无经验可循、比较盲目的阶段,存在许多亟待解决的问题。在安全监测设计方面,无规范性的技术依据,无法与工程和地质结构特点相结合,难以做到经济、适用、安全可靠;在仪器设备选择方面,无质量标准 and 选型原则,盲目进口仪器或主观采用自己习惯的和自制的仪器,造成仪器失效或测值不符合计量标准,无法分析,浪费现象时有发生;在仪器埋设技术和观测方法方面,缺少标准和成功经验,要么不敢用新的仪器,要么安装埋设技术要求得不到保证,观测方法又不当,造成仪器闲置或失效、观测成果失真。

我国大坝安全监测始于20世纪50年代,在永定河官厅水库和淮河南湾、博山等大型水库大坝上进行了水平位移、垂直沉降和浸润线等项目的观测;在丰满、佛子岭、梅山水电站以及上犹江、流溪河等水库大坝上安装了温度、应变计等监测仪器。20世纪60年代后期,在一些大型水库大坝上开始对渗流、渗流量、渗水蚀度、波浪、倾斜、挠度、扬压力、接裂缝和应力应变以及水位、雨量等项目进行观测。20世纪70年代以前称为原型观测,这一时期的典型工程,如新安江、丹江口、柘溪、刘家峡等都布置了比较系统的观测设施,积累了许多经验。

20世纪70年代中期以后,对于监测项目的确定、仪器的选型、仪器的布置、仪器的埋设技术与观测方法、观测资料整理分析等方面的研究工作逐渐深入,在工程设计中也同时进行监测仪器的布置,编写监测实施技术要求。随着科学技术的发展和人员素质提高,监测仪器质量、安装埋设技术水平、资料分析能力以及观测成果的应用等都取得了较大进展,自20世纪80年代中后期以来,监测仪器自动化采集系统和资料处理分析技术得到了快速发展。这个阶段的工程如葛洲坝、东江、漫湾、隔河岩、二滩等,工程安全监测在设计、施工、运行等方面取得了成功,自动化监测得以实现。监测仪器的应用也出现多元化的格局,一些振弦式、差动电阻式、差动电感式、电容式仪器以及其他类型的监测仪器得到了较为广泛的应用,为水电工程安全监测的发展奠定了基础、积累了经验。20世纪90年代后,水电工程安全监测规模和技术水平发展迅速,自动化监测技术不断升级换代,非常重视新建水电工程安全监测的设计、施工及运行管理,实现了数据采集、数据管理、在线分析、成果预警的自动化监测功能。

今后一段时期是我国水电发展的机遇期,一批水电工程相继建设,对大坝安全监测的要求将越来越高,除了常规的内观、外观、渗流渗压等监测项目之外,还需开展水力学、振动、地震等新型监测项目,一些监测新技术和先进仪器在不断研发和应用比对,先进的测量技术、网络传输技术、数据整编分析等不断引入水电工程安全监测领域,我们有理由相信,水电工程安全监测将日趋完善、技术创新能力不断增强,真正成为水电工程的“安全卫士”、“健康医生”。

#### 1.4 水电工程安全监测技术应用与发展

水电工程安全监测技术与监测仪器相伴而生,监测技术在理论上可行,需要通过监测仪器来实现,有时须进行大量的科学研究和试验比对,确定仪器的原理、安装埋设工艺、数据采集与计算方法等,形成较为完整的监测技术应用体系,并伴随监测仪器的不断改进完善而发展。20世纪60年代以前,我国工程安全监测仪器以进口为主。20世纪60年代

以后,通过引进吸收和自主研发,经过工程应用总结和改进,国产监测仪器性能及质量基本能满足工程监测的技术要求。20 世纪 80 年代以后,差动电阻式、差动电感式、振弦式、电位计式、差动变压器、电容式等仪器类型不断丰富和发展,为实现监测目的可组合多种监测技术及方法。进入新世纪,紧跟国内外各种测试、测量技术发展的新动向,根据水电工程监测的特点和需要,对新技术进行不断的研究和改进,形成了许多技术先进、测量精度满足水电工程要求、便于操作和数据处理的安全监测技术,水电工程安全监测技术与监测仪器研发迈入了多元化发展阶段。

内部观测常用的监测仪器主要有差动电阻式和振弦式两类。差动电阻式仪器又称卡尔逊式仪器,是美国加利福尼亚大学的卡尔逊博士在 1932 年利用电阻丝变形与电阻比成正比的原理研制成功的。这种仪器利用张紧在仪器内部的弹性钢丝作为传感部件,又称为弹性钢丝式仪器,具有密封性能好、长期稳定性好、可靠度高、测试方法简单、可兼测温度等优点,但存在对配套电缆绝缘要求高、内阻低导致电缆电阻及其变差影响测值、仪器灵敏度偏低、测量量程较小等缺点。采用五芯电缆观测和利用恒流源技术的观测仪表,消除了电缆导线电阻及其变差带来的电阻比测量误差。振弦式仪器是利用钢弦振动频率随钢丝应力变化的原理制成的,通过电磁场激振钢弦,由电磁线圈感应钢弦振动频率,测量钢丝应力对应所测量物理量,又称为钢弦式仪器。振弦式仪器具有精度高、分辨率高、量程大、受环境影响小、可长距离传输、便于进行自动化观测等优点,对钢弦材料和制造工艺要求高,20 世纪 90 年代中后期以来振弦式仪器在我国水电工程得以广泛应用,带动了国内弦式仪器的快速发展。利用上述两种测量原理生产的内观仪器有渗压计、钢筋计、测缝计、锚索测力计、锚杆测力计、土压力计、压应力计、应变计、沉降仪、堰流计等。在土石坝内部变形监测中还常用的垂直水平位移计、测斜兼沉降仪、三向测缝计等。垂直水平位移计由垂直位移(即沉降)测量和水平位移测量两部分组成,垂直位移测量主要有水管式沉降仪、钢弦式沉降计等,水平位移测量主要是引张线式水平位移计。测斜兼沉降仪系统则是通过埋在坝体中测斜兼沉降管,采用活动式测斜仪和电磁式沉降仪进行监测。三向测缝计用来监测面板周边缝和斜坡坝基接缝。

外观仪器除了水准仪、经纬仪、测距仪、全站仪等测绘仪器设备外,还常用到垂线坐标仪、引张线、真空激光准直系统等。以激光、红外光以及其他光源为载波的光波测距仪和以微波为载波的微波测距仪统称为电测测距仪,它与传统的钢尺、基线尺量具相比,具有精度高、作业迅速、受地形气候影响小等优点。正倒垂监测是大坝变形监测的重要手段,垂线坐标仪从人工观测发展到自动遥测,遥测垂线坐标仪从接触式发展到非接触式,非接触式坐标仪从步进马达光学跟踪式发展到近年来的 CCD 式和感应式垂线坐标仪。遥测引张线仪与垂线坐标仪原理一样,有电容感应式、电磁感应式、步进电机光电跟踪式。静力水准是监测坝体、基础沉降倾斜的重要手段,因测量要求稳定可靠、精度高,用于一般小量程压力传感器测量达不到此要求,目前的遥测静力水准仪多采用位移测量方式测量液面变化来获得建筑物变形,主要有电容感应式、差动电感式、步进马达式、钢弦式以及涡流式、超声传感器式遥测静力水准仪。真空激光准直测量系统是在激光准直测量基础上消除大气折射影响的一种测量大坝垂直、水平位移的系统,随着 CCD 技术及激光图像处理技术的发展,其测量精度和可靠性都有很大提高。

GPS 工程测量系统是在美国“海军导航卫星系统”技术基础上发展起来的全球卫星定位系统，目前全球有美国 GPS、欧洲“伽利略”、俄罗斯“格洛纳斯”和中国北斗卫星导航四大 GPS 系统。GPS 由 3 部分组成，即由 GPS 卫星组成的空间部分、由若干地面站组成的地面监测系统和以接收机为主体的用户设备。实践表明 GPS 测量系统的平面位置精度相当好，高程方面稍差一些，国内工程上通过改进接收机接收方式，采用多站联测、对电离层和对流层折射进行修正、对天线强制对中等措施，以及使用专业化 GPS 数据精密处理软件来提高精度，以满足大坝变形监测的要求。

空间连续监测技术就是采用可靠的技术进行空间的连续监测，即空间线监测、面监测或体监测。传统的监测技术多为“点测”，即在典型部位或重点部位布置测点、埋设仪器，以测点信息代表监测部位整体，传统“点测”显然有以偏概全、以点盖面的局限。空间连续监测技术包括 TDR（时域反射法）及 OTDR（光时域反射法）可弥补“点测”的局限，能在较大范围内连续监测大坝的位移、渗流、应力、温度场等。TDR 在需监测的部位埋设同轴电缆，采用时域反射仪测量电缆变形可发现坝体变形部位；OTDR 在需监测的部位埋设光缆，其测量原理与 TDR 相似。激光、电磁波、光波等先进技术应用用于监测仪器，产生新的先进的监测技术和监测仪器设备，如三维激光扫描、合成孔径雷达、地震 CT 等，有些技术尚处在试验阶段，有些技术已逐渐应用。新技术的试验研究和应用，对监测技术的创新发展具有导向性，有时可能彻底改变传统的监测模式和行为方式。

自动化监测技术经历了由集中式数据采集系统向分布式数据采集系统发展。20 世纪 60 年代后期国外开始研制并应用大坝安全监测自动化设备。我国大坝监测自动化技术起步较晚，从集中式到分布式，不断尝试、积累、改进，在解决自动化采集系统稳定性、耐久性、兼容性等方面做了许多工作，20 世纪 90 年代中后期有了突破性进展，以分布式数据采集系统为主要结构，采用分布式采集方式、CANbus/RS—485 总线，兼容差动电阻式、振弦式、电容、电感、电位器、变送器、激光准直等各种类型的传感器，可通过光纤、电话线、双绞屏蔽线以及微波通信进行数据传输，可同时进行人工观测。

进入 21 世纪，我国迎来了水电发展的机遇期，水电工程安全监测的理论和方法不断成熟，自动化监测技术日趋完善，一些水电工程开始实现或基本实现无人值守。水电工程安全监测技术不断适应水电工程设计、施工、运行管理的需要，在应用中不断创新和发展。

## 第 2 章 水电工程安全监测设计及布置

### 2.1 概述

为有效监测水电工程施工期和运行期的基本状况及受力效应的变化规律，及时发现异常现象并分析处理，建立水电工程安全监测系统必不可少。水电工程安全监测设计是整个工程设计的一个重要组成部分。监测设计应结合工程基本资料、工程规模、建筑物等级、工程特征、监测目的、监测成果应用、仪器选择与布置等方面，进行系统全面的考虑，确定监测范围、监测断面、监测项目、监测仪器布置。工程安全监测设计遵循以下原则：

(1) 根据工程等级、地质条件、结构特点，按照突出重点、统筹安排选择监测项目，合理布置监测仪器，监控关键部位。

(2) 监测断面选择应设置重点断面（最不利部位）和典型断面（有代表性的部位），水电工程监测断面主要设置在最大坝高处、缺口导流处、主河槽处、不同填筑料接触处、地质条件复杂处、地形突变处等。

(3) 监测断面上的监测项目和测点布置，应考虑建筑物结构的形状尺寸、性态变化规律、设计计算的预计变形和应力及其他参量的分布特征，突出重点、兼顾一般，具有明显的针对性和代表性，各监测项目要尽可能做到自身校核和相互校核，以保证监测成果的可靠性。

(4) 对重要断面（部位）或测点，仪器设备布置可适当重复或平行布置，尽可能消除仪器自身精度或损坏的影响，便于进行相互校核。

(5) 监测项目和仪器设备布置，突出重点且要兼顾全局，注重监测资料的相关性，达到少而精，同时兼顾指导施工、验证设计、反馈分析。

(6) 安全监测与目视、巡视检查相结合，内部观测和外部观测统筹安排。

(7) 安全监测系统能较全面反映各建筑物的运行状态及其变化规律，便于自动化监测、保留人工观测的条件。

### 2.2 仪器选型

选择合理的监测仪器是实现监测目的的重要条件之一。监测仪器的质量和性能是保证工程安全监测仪器安装埋设完好率的前提，需根据工程规模和重要程度、环境条件、使用寿命、对应的监测项目、地质条件、结构形式、施工和运行方式等因素选择监测仪器。因此，在监测设计时本着“实用、可靠、经济、先进”的原则进行仪器设备选型。选择仪器设备应考虑以下条件：

(1) 仪器长期稳定、可靠。选择可靠性高、在安装及运行环境中能长久使用、抗干扰

性强、能保持良好运行的监测仪器。

(2) 具有满足工程监测要求的量程、精度、直线性和重复性。要求监测仪器分辨率及精度高，量程与监测的物理量相匹配，传感器具有良好的直线性和重复性，校正的一致性较好。

(3) 具有成功应用实例。常规监测仪器应选择在其他类似工程中成功应用的仪器，已有较多工程使用又经历时间检验运行正常的仪器应该予以优先考虑。

(4) 性价比。仪器选择应进行综合品评，既要考虑其可靠性、适用性，同时还要考虑其先进性和经济性，进行性能和价格的比较，选择性价比高的仪器。

(5) 仪器类型应尽量少或单一，兼顾自动化监测的需要。仪器类型尽量少或单一，能共用二次仪表，便于人工观测；自动化监测模块类型少，通用性强。

(6) 具有良好的防水防潮性能和较高绝缘度。当要求仪器承受耐水压较高时，仪器的防水防潮性能和绝缘度应进行耐水压性能试验。

(7) 新技术新仪器应进行必要的科学试验研究，通过室内试验和现场应用比对，观测结果满足监测技术指标要求，同时满足仪器选择条件，可以采用。

## 2.3 监测范围和监测项目

水电工程安全监测范围包括水电站大坝（含坝体、坝基、坝端）和与坝的安全有直接关系的输、泄水建筑和设施，以及对大坝安全有重大影响的近坝区岸坡。

监测项目通常有变形、渗流、应力应变、压力、环境量以及地震反应与泄水建筑物水力学监测。其中地震反应及水力学监测属专项监测，不是每个工程都要求进行。

监测方法有人工巡视检查和仪器监测两种方法。实践证明这两种方法应该相互结合，互相补充。

监测项目的设置主要根据工程等级、规模、结构型式以及地形、地质条件和地理环境等因素决定。表 2.3-1 为大坝（混凝土坝、土石坝）安全监测项目分类情况。

表 2.3-1 大坝（混凝土坝、土石坝）安全监测项目分类表

序号	监测类别	监测项目	大坝级别		
			1	2	3
1	巡视检查	坝体、坝基、坝肩及近坝库岸	●	●	●
2	变形	(1) 坝体位移	●	●	●
		(2) 坝基位移**	●	●	●
		(3) 裂缝及接缝变化	●	○	○
		(4) 近坝岸坡位移	●	○	○
		(5) 混凝土面板变形*	●	○	
3	渗流	(1) 渗流量	●	●	●
		(2) 坝基渗压	●	●	○
		(3) 坝体渗流	●	●	○
		(4) 绕坝渗流	●	○	

续表

序号	监测类别	监测项目	大坝级别		
			1	2	3
4	压力、应力、应变及温度	(1) 孔隙水压力*	●	○	
		(2) 土压力*	●	○	
		(3) 混凝土应力、应变	●	●	○
		(4) 混凝土温度**	●	○	○
5	环境量	(1) 上下游水位	●	●	●
		(2) 降水量、气温	●	●	●
		(3) 库水温	○	○	
		(4) 波浪	○		
		(5) 坝前淤积	○		
		(6) 冰冻	○		

注 1. 有●者为必设项目；有○者为可选项目，可根据需要选设。

2. 有\*者系土石坝项目，有\*\*者系混凝土坝项目。

3. 对必设项目，如有因工程实际情况难以实施者，应报上级主管部门批准后缓设或免设。

## 2.4 混凝土坝安全监测

混凝土坝包括重力坝、拱坝、支墩坝、闸坝等，监测项目的选择要依据建筑物工程等级、坝型、坝高以及安全监测的需要，主要监测项目包括：变形监测、渗流监测、应力应变监测、温度监测、水位监测、水力学观测、地震监测、人工巡视检查等。

### 2.4.1 混凝土重力坝安全监测

混凝土重力坝安全监测包括大坝与地基、岸坡表面与内部变形、挠度、应力应变、大坝与地基渗流及环境量等。

#### 2.4.1.1 监测断面选择

监测断面的选择应依据工程规模、建筑物等级、结构特点、地形地质情况等综合考虑，一般选取重要坝段和典型坝段作为监测断面。对混凝土重力坝而言，选取溢流坝段和非溢流坝段各一个作为重要监测断面，该断面上监测项目齐全、监测仪器集中，能反映建筑物性状。典型坝段作为一般监测断面，具有一定的代表性。

#### 2.4.1.2 变形监测

##### 1. 表面变形监测

表面变形监测的横断面布置应兼顾坝体和地基的变形观测，一般布置在最大坝高处、有代表性的坝段、坝体结构或坝地质条件复杂处，断面数视坝轴线长度而定。纵断面要求与坝轴线平行，通常布置在坝顶及坝基廊道内，无纵向廊道，可布设在平行坝轴线的下游坝面上，当坝高较高时，可在坝体中部视需要增设断面。

表面变形包括水平位移监测、垂直位移监测。水平位移常用的监测方法有视准线法、引张线法、激光准直法、边角网法、交会法及导线法等。垂直位移常用监测方法有精密水准测量法、静力水准测量法及三角高程法等。



## 2. 内部变形监测

内部变形监测包括坝体挠度监测和坝体、坝基倾斜监测。坝体挠度监测的垂线布置在结构和地质条件复杂的坝段、最高坝段或代表坝段等处。倾斜监测断面布置在最大坝高、两坝肩或地质条件较差部位。

坝体挠度监测主要利用垂线进行，顶端固定的垂线为正垂线，低端固定的垂线为倒垂线。垂线观测有多点观测站法和多点支持点法。倾斜的观测方法可分为直接观测和间接观测。直接观测法直接采用气泡式倾斜仪或遥测式倾斜仪测量坝体和坝基的倾斜角。间接观测法通过观测相对竖向位移确定坝体、坝基的倾斜角，根据竖向位移观测方法又分为水管测量法和水准测量法。

## 3. 裂缝、伸缩缝监测

混凝土裂缝监测包括裂缝的位置、长度、宽度、深度以及是否形成贯穿性裂缝等，裂缝漏水时还应观测漏水的情况。混凝土伸缩缝监测可了解伸缩缝开合情况及其变化规律。裂缝、伸缩缝观测的同时可观测气温、水温和上下游水位等环境因素。伸缩缝测点一般布置在最大坝高、地质条件复杂或设置了应力应变测点的坝段。在伸缩缝测点处埋设金属标点、测缝计（电位计式、差阻式、振弦式）等测量缝宽的变化情况。

## 4. 近坝岸坡位移监测

近坝岸坡的稳定性对于大坝、泄洪建筑物、引水建筑物及其附属设施的安全运行至关重要。近坝岸坡监测项目包括表面位移、裂缝、位错、深层位移及地下水位监测等。表面位移测点布置应考虑滑坡体范围及位移分布，一般沿可能滑移方向布置2~4个监测断面；深层位移监测断面与表面位移监测断面相结合，在预计滑动区内布置1~3个监测断面，每个断面布置1~3条测线。工作基点和校核基点布置在靠近观测标点的稳定岩体上。深层位移可采用测斜仪、多点位移计等进行监测。

### 2.4.1.3 渗流监测

#### 1. 坝基扬压力监测

坝基扬压力监测断面应根据坝型、规模、坝地质条件和渗控措施等进行布置，一般设1~2个纵向监测断面，1级、2级坝的横向监测断面不少于3个。纵向监测断面以布置在第1道排水幕线上为宜，每个坝段至少设1个测点，遇到复杂地质条件或强透水带时，可在灌浆帷幕和第1道排水幕之间增设测点。横向监测断面通常布置在河床坝段、岸坡坝段、地质条件复杂的坝段以及灌浆帷幕转折的坝段，每个断面设3~4个测点。建基面以下扬压力观测孔的深度不宜大于1m，深层扬压力观测孔在必要时才设置，扬压力观测孔与排水孔不能互相替代。坝基扬压力监测采用测压管，管口有压时安装压力表，管口无压时安装保护盖，可在测压管内安装渗压计。

#### 2. 坝体渗透压力监测

坝体渗透压力监测断面宜与应力监测断面相结合。坝体渗透压力与坝体水平施工缝上的渗透压力监测采用渗压计。测点通常在上游坝面和坝体竖向排水管之间。测点间距从上游面开始，由密渐稀，靠近上游面的测点与坝面的距离不能小于0.2m。

#### 3. 绕坝渗流监测

当大坝坝肩岩体的节理裂隙发育，或存在透水性强的断层、岩溶和堆积体时，会产生