



普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

大坝安全监测

武汉水利电力大学 李珍照 主编

64
L6

242

中国电力出版社

普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

991127

大坝安全监测

武汉水利电力大学 李珍照 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书首先阐述了大坝安全监测的目的、意义、内容、要求,介绍了大坝监测的发展情况,然后分章论述了大坝监测技术、监测资料分析环节、监测数学模型、性态分析监控等监测基本问题,最后介绍了重力坝、拱坝、土石坝的监测实例。书中在阐明理论、方法的同时,紧密结合工程实际,归纳分析了变形、渗流、应力应变、温度等主要监测效变量的变化规律、影响因素、分布情况。还对大坝第一次蓄水期的监测、运行期定期检查鉴定、安全监控指标等问题作了介绍。

本书既收纳了有关大坝监测和分析的基本知识内容,可供本科学学生学学习;又反映了国内外大坝监测的新近发展和前沿问题,对一些较深入的技术内容作了论述,可作研究生教材使用。对于从事水工设计、施工、运行、科研、管理的科技人员,本书也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

大坝安全监测/李珍照主编. -北京:中国电力出版社,
1997
高等学校教材
ISBN 7-80125-327-2

I. 大… II. 李… III. 大坝-监测-高等学校-教材
N. TV698.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04602 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市梨园彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

1997 年 11 月第一版 1997 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 175 千字

印数 0001—2000 册 定价 8.20 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

我国是一个坝工大国，已建成的大坝数量及正在建设的大坝数量均居世界首位。随着坝工建设的发展，作为大坝安全“耳目”的监测工作也日益受到重视，大坝安全监测技术有了迅速的进步，成为水工学科中一个充满活力的分支。

在我国一些高等学校中，正在卓有成效地开展大坝安全监测的理论和技术的研究，并在研究生及本科生中开设了有关大坝安全监测的课程。鉴于这些课程教学对统编教材的迫切需要，在电力工业部普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会所编制的教材建设规划和中国电力企业联合会所核定的教材编审出版计划中，列入了“大坝安全监测”一书。

本教材由武汉水利电力大学李珍照主编。各章执笔人为：第一、三、五章，李珍照；第二章，薛桂玉；第四章，李民；第六章，何金平。执笔人均为武汉水利电力大学教师。主审人为武汉水利电力大学（宜昌校区）（原葛洲坝水电工程学院）吴汉明。

在本书编写、审稿和出版过程中，得到了中电联教培部、高校水电工程类教学专委会暨水工教学组、武汉水利电力大学（宜昌校区）、中国电力出版社等单位及有关同志的支持与帮助，在此谨表衷心谢意。

由于我们的水平和时间条件的限制，本书难免存在一些不妥和疏失之处，恳望读者给予批评指正。

编 者

1997年7月

2010/10/07

目 录

第一章 概述	1
第一节 大坝安全监测的目的和意义	1
第二节 大坝监测的内容与要求	2
第三节 大坝监测的发展	4
思考题	5
参考文献	5
第二章 大坝监测技术	7
第一节 变形监测	7
第二节 渗流监测	16
第三节 应力应变及温度监测	25
第四节 大坝监测自动化	35
思考题	37
参考文献	37
第三章 大坝监测资料分析的内容和主要环节	39
第一节 大坝监测资料分析的要求和内容	39
第二节 大坝监测资料分析的主要环节	41
思考题	46
参考文献	47
第四章 大坝监测数学模型	48
第一节 简述	48
第二节 大坝监测统计模型	48
第三节 大坝监测确定性模型	72
第四节 大坝监测混合模型	74
思考题	79
参考文献	80
第五章 大坝实测性态与安全监控	81
第一节 大坝实测结构性态	81
第二节 大坝安全监控	98
思考题	106
参考文献	106
第六章 大坝监测实例	108
第一节 重力坝安全监测实例	108
第二节 拱坝安全监测实例	111
第三节 土石坝安全监测实例	115
思考题	120
参考文献	120

第一章 概 述

第一节 大坝安全监测的目的和意义

大坝安全监测 (Safety Monitoring of Dams) 是通过仪器观测和巡视检查对大坝坝体、坝基、坝肩、近坝区岸坡及坝周围环境所作的测量及观察。此处的“大坝”一般泛指与大坝有关的各种水工建筑物和设备;“监测”既包括对坝固定测点一定频次的仪器观测,也包括对大坝外表及内部大范围对象的定期或不定期的直观检查和仪器探查。

大坝安全监测的首要目的是掌握坝的实际性状,为判断大坝安全提供必要信息。众所周知,大坝所拦蓄的水在正常利用时会带来显著的经济效益和社会效益,但一旦溃坝,突然失控的水流将给下游人民的生命财产带来巨大的灾害。尽管大坝在设计时采用了一定的安全系数,使坝能安全承担所考虑的各种荷载组合,但是由于设计中不可能对坝的工作条件及承载能力作出完全准确的估计,施工质量也不可能完美无缺,坝在运用过程中还可能发生某些不利的变化,因此国内外仍有一些坝曾出现失事。如美国 63m 高的圣弗朗西斯 (St. Francis) 重力坝 1928 年破坏;93m 高的提堂 (Teton) 土坝 1976 年溃决;法国 67m 高的马尔巴塞 (Malpasset) 拱坝 1959 年垮坝;意大利 262m 高的瓦依昂 (Vajont) 拱坝 1963 年因库岸大滑坡导致涌浪翻坝且水库淤满失效;我国板桥和石漫滩两座土坝 1975 年洪水漫坝失事等,都是一些典型的事例。根据国际大坝委员会 (ICOLD) 对 33 个国家的统计,1.47 万座大坝中有 1105 座有恶化现象,有 105 座坝发生了破坏。由此可见,保证大坝安全是一个十分重要的很实际的问题。

大坝安全监测可以及时获取第一手的资料来了解坝的工作性态,为评价大坝状况和发现异常迹象提供依据,从而可以制订适当的水库控制运用计划及坝的维护修理措施来保障大坝安全,在发生险情时还可发布警报减免事故损失。因此大坝安全监测是保证大坝安全的重要措施,是坝工建设和运行管理中非常必要、不可或缺的一项工作。我国 1991 年以第 77 号国务院令发布的《水库大坝安全管理条例》明确规定:“大坝管理单位必须按照有关技术标准,对大坝进行安全监测和检查;对监测资料应当及时整理分析,随时掌握大坝运行状况。”这充分体现了我国政府对大坝监测的重视。

国际坝工界也很关注大坝安全与监测的关系。在国际大坝委员会第 68 号会刊上刊载的各国大坝委员会所撰写的报告中,都提及到大坝监测的重要性。美国的报告指出,一些已发生的严重事故说明,为了尽早预知和防止发生事故,对大坝进行监测是绝对必要的。只有通过每一结构的仔细检测,才能察觉出事故的苗头。意大利的报告认为,对大坝作安全评估,主要在于把监测数据与数学模型预测的数据作比较,这样得出的评估才是客观、合理和迅速的。澳大利亚报告强调了监测对大坝安全的重要性,尤其是对较老的大坝,监测资料可说明坝的实况与最新的安全准则相符合的程度。法国的报告将大坝监测的首要目标

列为检验坝的安全，以对坝不失时机地进行妥善维护，防止发生损坏和事故。奥地利的报告认为，坝的安全不仅取决于设计和施工质量，还取决于在整个运行期间的维护和监测，为了评价一座坝的状况，需要合理地设计和运用监测系统，以获取有关坝性态的精确资料。日本的报告指出，对于确保大坝及其地基的安全而言，最有效的是监测大坝初次蓄水时的渗漏和变形，对大坝安全性的评价应根据常规连续实测资料的精确记录得出。葡萄牙报告认为，安全监测始于设计阶段，并应贯穿于坝的施工、运行的整个寿命期。加拿大报告认为，监测的目的是取得坝在施工期、初次蓄水期和运行期的资料，以评价坝的特性、发现异常趋势、采取合适的补救措施。总之，各国都将监测列为大坝建设和运行管理中一项必不可少的工作，并把它放在一个十分重要的地位。

大坝监测除了作为判断安全的耳目以外，还是检验设计和施工的重要手段。由于实际情况的复杂性和坝工科技水平的限制，至今大坝设计理论还不够成熟和完善，一些设计前提带有某种程度的假定性，若干因素只能简化地加以考虑，作用于结构上的某些荷载还不能准确算出，对结构破坏机理、发展过程、安全界限等的认识都不够清楚和准确，坝体和坝基各部位的物理力学参数更难以精确给定。而大坝监测项目全、测点多，观测频次密、跨越时期长，能体现现场复杂的实际条件及反映出坝的真实状态，因此可以作为检验设计方法、计算理论、施工措施、工程质量、材料性能等的有效手段。它可以改变和加深人们对坝工有关问题的认识，开发更合理的设计准则，改善设计和施工，从而促进坝工学科的发展。在坝工史上诸如对混凝土坝坝基扬压力的存在和分布规律的了解、对帷幕及排水降压作用的验证、对混凝土坝变形与应力受温度变化影响的认识、对地震时坝体加速度分布图形的掌握、对地震动水压力威斯特伽特（Westergaard）计算公式的检验以及根据应力应变实测值对拱坝试载法的验证等，都是通过实际监测得到的。大坝监测对坝工技术进步做出了重要的贡献。

第二节 大坝监测的内容与要求

一、各阶段的监测工作

大坝监测工作贯穿于坝工建设与运行管理的全过程。监测工作包括观测方法的研究和仪器设备的研制、生产，监测设计，监测设备的埋设安装，数据采集、传输和储存，资料整理和分析，大坝实测性态的研究、评价等。

在工程设计阶段，需提出大坝安全监测系统的总体设计方案，监测布置图，仪器设备清单，施工详图及埋设安装技术要求，各监测项目测次的规定，监测系统的工程概算等。在施工阶段，需作好仪器设备的检验、率定、埋设、安装、调试、维护，施工期的监测，竣工报告及监测报告的编写等。在运行阶段，需进行日常的及特殊情况下的监测工作，定期采集数据及作巡视检查，及时整理、整编和分析监测成果并编写监测报告，建立监测档案，做好监测系统的维护、更新、补充、完善工作。特别需要指出的是，第一次蓄水期是大坝安全的一个关键时期，应专门制定此时期的监测计划，拟订主要的安全监控指标，精心做好监测工作，对大坝工作状态作出评估。在运行期若遇地震、大洪水以及大坝工作状态异

常时，应作为特殊情况，加强巡视检查和重点部位的监测。

二、主要监测项目

不同级别的大坝要求监测的项目有所不同。对于一级和二级大坝，仪器监测主要有下列项目。

(1) 工作条件监测：包括坝上、下游水位，库水温，气温，坝前淤积，下游冲淤等监测。

(2) 渗流监测：包括渗流量，绕坝渗流，渗水透明度及化学分析，混凝土坝的扬压力，土石坝的浸润线、坝基渗水压力、导渗降压等监测。

(3) 变形监测：包括水平位移和垂直位移，接缝和裂缝，混凝土坝的挠度和倾斜，土石坝的固结等监测。

(4) 应力应变及温度监测：包括混凝土坝的混凝土应力、应变，钢筋应力，钢管、蜗壳的钢板应力，混凝土温度、坝基温度，土石坝的孔隙水压力、土压（应）力等监测。

(5) 其他监测：包括近坝区岸坡稳定，局部结构的应力、应变，坝体地震反应，水力学项目等监测。可根据具体需要选设。

三、主要检查项目

施工期及运行期，各级大坝均需进行巡视检查。混凝土坝有下列主要检查项目。

(1) 坝体：相邻坝段间的错动情况，伸缩缝开合及止水情况，坝面、廊道壁、宽缝内表面的裂缝及漏水情况，混凝土有无破损、溶蚀及侵蚀现象，排水孔工作状态，渗水量和水质有无显著变化等。

(2) 坝基和坝肩：基础岩体有无挤压、错动、松动、鼓出，坝体与基岩结合处有无错动、开裂、脱开、漏水，坝肩有无裂缝、滑坡、溶蚀、绕渗，坝基排水设施工作是否正常，渗水水量及浑浊度有无显著变化等。

(3) 引水和泄水建筑物：进水设施有无淤堵、损坏，泄水建筑物有无裂缝及损伤，消能设施有无磨损、冲蚀，下游河床及岸坡冲淤情况等。

(4) 其他：近坝区岸坡地下水露头变化情况，岸坡裂缝变化情况，闸门及门槽、支座、止水情况，启闭设施能否应急启动工作，电气控制系统及备用电源能否正常工作等。

土石坝主要检查项目有：坝体有无裂缝、滑坡、塌陷、坍塌、表面冲蚀、坡脚凸起，背水坡及坝脚有无散浸、漏水、管涌、流土、沼泽化现象，泉眼、减压井、反滤排水沟等的渗水有无异常变化，渗水是否浑浊或带色，块石护坡有无松动、翻起、塌陷、垫层流失、架空，表面排水有无损坏或淤积，有无害虫（白蚁）、害兽（鼠、獾等）活动痕迹等。

四、监测和检查次数

仪器观测的测次因项目和阶段而异。第一次蓄水前及第一次蓄水后头五年运行中，一般每旬一次至每月一次；第一次蓄水期一般每天一次至每旬一次；经过第一次蓄水且运行超过五年以后，一般每月一次至每季一次。各时期上下游水位及气温每日均需观测。内部观测的传感器在埋设后头一个月内需加密测次，间隔从4h、8h、24h到5d，以后逐渐转入常规频次。如遇地震、大洪水及其它异常情况，应适当增加测次。自动化监测项目测次可适当加密。经过长期运行后，可通过鉴定对测次作适当调整。

巡视检查分为日常巡查、年度巡查及特殊巡查三类。日常巡查在施工期宜每周一次；水库第一次蓄水或提高水位期间每 1~2d 一次，正常运行期间每月不少于一次，汛期特别是高水位期应加密检查次数；年度巡查应每年 2~3 次，在汛前、汛后及高水位、低气温时进行；特殊巡查在发生有感地震或大洪水以及其他特殊情况下立即进行。

五、对监测工作的要求

对监测工作的基本要求是：全面、准确地反映大坝工作性态，及时发现异常迹象，有效地监视大坝安全，为设计、施工和运行管理提供可靠资料。

对监测工作各环节的要求是：

(1) 监测设计的仪器布置应能全面反映大坝工作状况，目的明确、重点突出。监测重点放在坝体结构复杂、承荷大或地质条件复杂的部位。

(2) 监测仪器设备应精确可靠、稳定耐用、便于观测。自动化观测设备应有自检、自校功能，可长期稳定工作且具备人工观测条件。

(3) 监测施工必须严格按设计要求精心进行，确保埋设、安装质量，做到竣工图、考证表及施工记录齐全。

(4) 应切实做好施工期及运行期观测数据的采集工作，严格遵守规程规范，做到记录真实、注记齐全、整理上报及时。

(5) 应定期对监测结果作分析研究，对大坝工作状态做出评估。大坝状态可按“正常状态”、“异常状态”、“险情状态”三级来评估。当大坝工作状态评为异常或险情状态时，应立即向主管部门报告并通报给设计单位。

第三节 大坝监测的发展

大坝监测是顺应大坝安全的需要并随着坝工建设的进展而发展起来的，可划分为三个阶段。

第一阶段是从远古到 19 世纪末，是早期阶段。筑坝材料是土石，对坝的监测、了解只是外表观察、感性认识。

第二阶段是本世纪初到 50 年代末，是发展阶段。坝工理论逐渐形成体系，混凝土坝大量建成，当地材料坝也有很大发展。为监测混凝土坝的扬压力普遍安设了测压管；为测定水平位移和垂直位移出现了三角测量法、视准线法和精密水准法；以后又出现了观测大坝挠曲的垂线法和观测倾斜的静力水准法；1919 年谢弗 (Schaefer Otto) 首创了弦式仪器；1932 年卡尔逊 (R. W. Calson) 发明了差动电阻式仪器。此后许多坝埋设了上述电测仪器，开展了坝内温度、应变、应力、接（裂）缝张合和孔隙压力等观测项目。到 50 年代，大坝观测已形成较齐全的体系，坝的各主要观测项目都有了成型的观测仪器，光学的、机械的和电测的方法得到了普遍应用。这一阶段取得了大量监测资料，对实测值与设计值及实测值与模型试验值之间作了许多比较。一些设计计算方法如拱坝试载法、重力坝坝基扬压力计算法等被观测资料所验证而得到肯定和推广。

第三阶段是 60 年代以来的成熟阶段。新建的高坝、大库迅速增加，许多坝建筑在复杂

的地形、地质条件下，涌现了一些新的结构形式和新的施工方法，坝工建设对大坝监测提出了更高的要求。同时马尔巴塞、瓦依昂及提堂等坝的失事引起了公众及政府对大坝安全的深切关注，大坝安全监测被提到了更重要的地位。这一阶段大坝监测的对象从坝体及坝基浅部扩展到坝基深处及近坝区更大范围，对地基、坝肩及岸坡的观测给予了更多的重视，出现了观测深部岩体变形的多点位移计、滑动测斜仪等新仪器。观测技术向更高水平发展，自动化和半自动化仪器逐渐取代了手工观测仪器。大坝监测从逐个单点就地观测发展为遥测、遥控、自动成批地观测，采用了与计算机网络相联结的自动化监测系统。在监测资料分析上普遍应用了数学模型技术，正分析和反分析方法都有不少进展，监控指标的建立被深入研究，不少坝建立了监测数据库或监测信息系统，基于监测资料的大坝实际性态研究取得了丰富成果，有的坝已实现了远距离在线实时监控。

我国的大坝监测起步于 50 年代，40 年来特别是近十余年来有了很大发展。大中型混凝土坝及大型土坝一般都设置了监测系统，配备了专职人员进行常年观测。先后成立了电力工业部大坝安全监察中心、水利部大坝安全监测中心、中国水力发电学会大坝安全监测专业委员会、全国大坝安全监测信息网等全国性归口管理机构或学术组织。颁布了《混凝土大坝安全监测技术规范》、《土石坝安全监测技术规范》、差动电阻式仪器的系列型谱及国家标准等标准、规范。按照原水利电力部《水电站大坝安全管理办法》及原能源部《水电站大坝安全检查施行细则》的规定，约有 100 座水电站大坝进行了定期检查，检查中对大坝监测资料都做了系统整理分析，并用作评价大坝安全的重要依据。经过不断改进，我国已能生产各种大坝观测仪器及自动化监测系统，其中有的已达到国际领先或先进水平。我国一些高等学校和科研、设计单位致力于大坝安全监测技术及分析理论、方法的研究，取得了不少新成果。目前正在建设的长江三峡水利枢纽工程，其大坝安全监测的规模和先进性是国际国内前所未有的。我国大坝监测正和坝工建设同步迅速发展，并逐渐步入这一领域的世界前列。

思 考 题

1. 为什么大坝安全监测既包括仪器观测又包括直观检查，两者缺一不可？如何理解它们相互间的不可替代性？
2. 一座精心设计、精心施工的坝，是否还需要进行安全监测？为什么？
3. 为何大坝监测可以促进坝工技术的进步？试根据你的水工知识举出本章中已列举例证以外的一、两个例证来加以说明。
4. 在大坝主要监测项目中，你认为最重要的监测项目是哪几个？为什么？

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国能源部、水利部，SDJ336—89 混凝土大坝安全监测技术规范（试行），北京：水利电力出版社，1989
- 2 中华人民共和国水利部、电力工业部，SL60—94 土石坝安全监测技术规范，北京：水利电力出版社，

1994

- 3 ICOLD. Bulletin 68, Monitoring of Dams and Their Foundations-State of the art. Paris; ICOLD Publishers, 1989
- 4 中华人民共和国国务院. 水库大坝安全管理条例. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 5 李珍照. 混凝土坝观测资料分析. 北京: 水利电力出版社, 1989
- 6 王宏硕主编. 水工建筑物(专题部分). 北京: 水利电力出版社, 1990
- 7 武汉水利电力学院主编. 水电厂近代技术. 南京: 河海大学出版社, 1990
- 8 张启岳. 土石坝观测技术. 北京: 水利电力出版社, 1993

第二章 大坝监测技术

第一节 变形监测

大坝在水压力和温度等因素的影响下将会发生变形，变形量大小及其变化规律，对于分析大坝运行是否安全以及论证坝工设计理论等均有重要作用。因此，变形监测是大坝观测中重要项目之一。

变形监测包括水平位移、垂直位移、挠曲、倾斜、裂缝、接缝、土坝固结等监测。

一、水平位移与挠度监测

观测水平位移的常用方法是：用光学或机械方法设置一条基准线，每次测出坝上测点相对于基准线的位置，即可求出测点的位移。根据基准线的不同，可分为垂线、引张线、视准线、激光准直线等。此外，也采用一些大地测量方法，如边角网与交会点、导线法等。对于土石坝，常在坝体内部埋设相对位移计、测斜仪等仪器观测内部水平位移。

根据 SDJ 336—89《混凝土大坝安全监测技术规范》规定，水平位移正负号为：向下游和左岸为正，反之为负。

(一) 垂线法

基准线是一条一端固定铅直张紧的不锈钢丝。安装在坝内井、管、空腔内或坝体、坝基钻孔中。它通过测出沿线不同高程的测点相对于垂线固定点的水平投影距离，计算出各测点的水平位移值。因沿高程各测点水平位移反映了坝体挠曲情况，故也称为挠度观测。

当垂线的顶端固定在坝顶附近其下端用重锤张紧钢丝时称为正垂线，见图 2-1(a)。而当垂线的底端固定在基岩深处其上端用浮体装置将钢丝张紧时则称为倒垂线，见图 2-1(b)。

1. 观测布置

通常把垂线布置在坝高最大、地基软弱、典型坝段及位移基点等处，并注意与其它监测项目的配合。垂线的数量应根据工程规模、坝体结构及观测要求决定，一般大型水坝不少于 3 条，中型坝不少于 2 条。根据大坝的不同情况，正垂线与倒垂线可以单独使用，也可以联合使用。一般情况下，在同一坝段设置一条垂线即可，但对于构造特殊的大坝，可将坝体从上向下分成 2~3 段，相应地设多根垂线串联起来。每一条垂线可根据坝高等情况在不同高程布置若干测点，一般

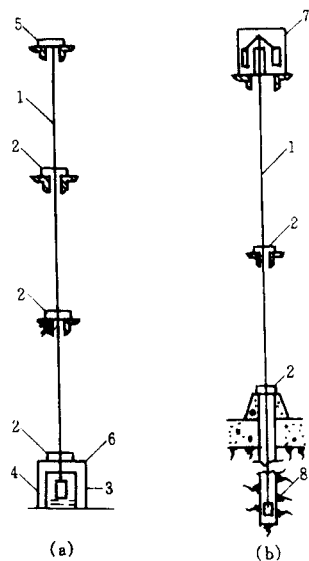


图 2-1 垂线观测装置示意图

(a) 正垂线；(b) 倒垂线

1—垂线；2—观测仪器；3—重锤；
4—油箱；5—支点；6—观测墩；7—
浮体组；8—锚固点

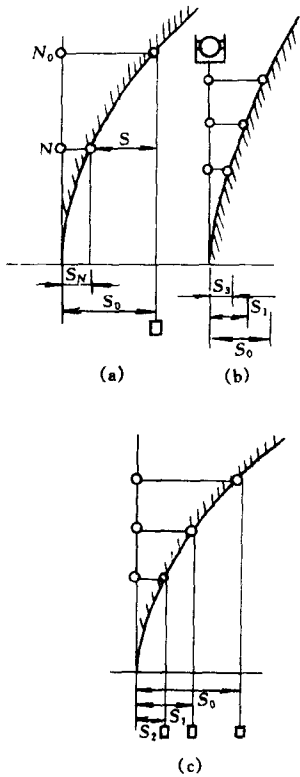


图 2-2 垂线观测方式
(a) 多点观测站法正垂线；
(b) 多点观测站法倒垂线；
(c) 多点支持点法正垂线

沿坝高不少于 3 个测点。

2. 观测方法

垂线的观测方法有两种，一是“一点支承多点观测”，如图 2-2 所示。此法适用于正、倒垂线，但正垂线测得的观测值是坝顶悬挂点与不同高程各测点之间的相对水平位移，如图 2-2(a) 中的 S 值， S_N 为测点 N 处的挠度值 ($S_N = S_0 - S$)；倒垂线测得的观测值则是各测点相对于基岩深处锚固点的绝对水平位移，如图 2-2(b) 所示。另一种“多点支承一点观测”，仅适用于正垂线，如图 2-2(c) 所示。在各测点处埋设垂线支持点，观测时顺次把垂线夹在各支持点上，并将观测仪器安置在垂线最低点处进行观测，测得的观测值是各测点与垂线最低点之间的相对水平位移。

3. 观测仪器

垂线观测必须采用专用的垂线观测仪器。常见的有机械式垂线仪、光学垂线仪、遥测垂线仪等。采用机械式和光学垂线仪观测时，都需要观测人员到各测点逐点操作，对于巡回连续观测甚为不便。为提高观测自动化水平，国内相继研制出多种垂线遥测仪。目前，使用较多的是步进电机式和电容感应式两种。由于遥测垂线仪的出现，大大提高了大坝位移观测自动化水平。

用垂线法观测坝体位移，设备简单，观测方便，精度较高，易实现自动观测，因此，垂线法在大坝观测中广泛使用。

(二) 引张线法

引张线法是用一条直径为 0.8~1.2mm 的不锈钢丝，两端施加张力，使之引张成一条水平向的直线，用以量测坝上各测点偏于该线的水平位移。引张线常设在坝顶或不同高程的纵向廊道内，两端设立基墩于两岸。当两岸受地形限制布置基墩有困难时，也可将基墩设在坝内，但需要用其他观测手段对端点基墩的位移进行量测，以求得绝对水平位移。

引张线法观测设备主要由基墩、测点、测线钢丝和测线保护管组成。基墩用钢筋混凝土浇筑而成，墩上装有夹线器、滑轮和重锤等，测点上装有支承钢丝的浮箱和标尺。如图 2-3 所示。测线保护管常用直径 10cm 左右的透明塑料管。测读位移时，除标尺外，另用测微计量测毫米以下的小数。

引张线法在一些重力坝上采用较多。如葛洲坝、丹江口和丰满等大坝。利用电容感应式或步进电机式遥测引张线仪进行观测，

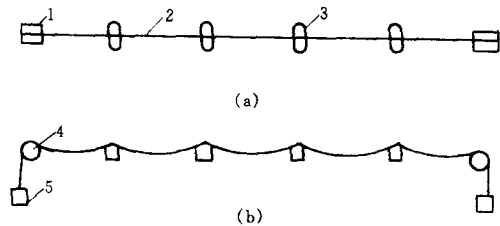


图 2-3 引张线示意图

(a) 平面图；(b) 立面图

1—端点；2—引张线；3—位移测点及浮托装置；4—定滑轮；5—重锤

从而提高了观测精度和观测效率。

(三) 视准线法

视准线法是在坝体表面建立一条基准线，基准线由设置在坝外两岸岩石上或土基上的两个永久性基墩控制。在一岸的基墩上安置精密经纬仪，另一岸基墩上则安装固定觇标。用经纬仪观察对岸固定觇标中心的视线，即为视准线。坝上各测点水平位移的量测，是通过量测各测点离视准线的偏离值来实现的。此偏离值可用测点处的活动觇标量测，称作活动觇标法。偏离值也可用经纬仪量测视准线与坝上标点之间的小角求得，称作小角度法。

采用经纬仪视准线法观测水平位移，虽然方法简便，但受到经纬仪望远镜放大倍率和折光等因素的影响，当量测距离较长时，往往误差较大，观测精度难于满足要求。所以，在混凝土坝上视准线法有可能逐渐被观测精度较高的垂线和引张线法所代替。

(四) 激光准直法

自 60 年代初激光问世以来，激光在各类测量领域里广泛应用。激光是一种新型光源，它具有方向性强，亮度高，单色性和相干性好等特点，将激光应用在大坝变形观测中，可提高观测精度和效率，为大坝观测向电子化，自动化方向发展开辟道路。

激光准直法分大气激光准直法和真空激光准直法。在大气激光准直法中，国内研究了激光束直接准直法、具有衍射效应和投影成像的激光准直法及波带板激光准直法。目前在大坝观测中使用较多的是波带板激光准直法。

1. 波带板激光准直法

波带板激光准直亦称三点准直，它主要由激光器点光源、波带板和接收靶三部分组成。如图 2-4 所示，激光器和接收靶分别安置在两端固定的工作基点上，波带板安置在位移标点上。从激光器发出的激光束照到波带板后，波带板起聚焦作用，对于圆形波带板，在接收靶上形成一个亮的圆点，如是方形波带板，则形成十字形亮线。在接收靶上测定亮点或十字亮线的中心位置，即可决定位移点的位置，从而求出其偏离值。

波带板激光准直法是在固定端点的接收靶上读数，故应将固定端点的读数归算为位移标点的偏离值。如图 2-5 所示，点光源置于 A 点，如 i 点位移至 i' 点，波带板设于 i 点，则在接收靶测得的偏离值 L_i ，按相似三角形可得

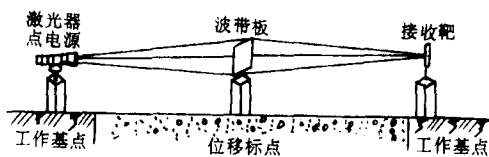


图 2-4 波带板三点准直示意图

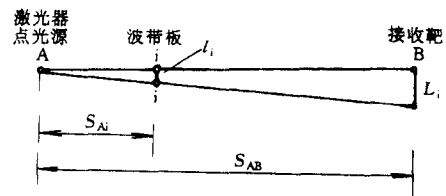


图 2-5 三点准直的偏离值

$$\frac{l_i}{L_i} = \frac{S_{Ai}}{S_{AB}} \quad (2-1)$$

其中 S_{Ai} 和 S_{AB} 分别为 A 至 i 点和 A 至 B 点的距离，可实地量得，令

$$\frac{S_{Ai}}{S_{AB}} = K_i \quad (2-2)$$

K_i 即为 B 点的偏离值化算到 i 点的改正系数，故式 (2-1) 可写为

$$l_i = K_i L_i \quad (2-3)$$

其他各位移标点的观测步骤和偏离值计算与上同。

上述为目视观测法，除此之外，国内研制了光电自动跟踪观测仪，可进行自动遥测。

2. 真空激光准直法

我国首创的真空管道激光准直装置，已在数座大坝上成功运行。它将波带板及激光束放在一个管道系统中，管道抽真空后进行观测，可大大削弱在大气中观测时的折光和湍流影响，精度可达到基准线长度的 1×10^{-7} 。

真空激光准直系统是激光束在低真空管道中传输且每个测点上设有波带板的三点法激光准直系统，其观测方法及基本原理与波带板激光准直法同。

在真空激光准直系统中，关键问题是合理确定真空管道中的真空度。管道中的真空度根据大气折光原理确定。激光束通过大气时，大气对激光束扰动的影响有二：一是由于大气中存在着折射率梯度造成光束偏折（即折光）；另一是因大气湍流和折射率梯度的瞬间变化而引起的光束漂移及光斑抖动。气体在管道中的流动状态与真空度有关。当管道中为粗真空 ($1.3 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5 \text{Pa}$) 时，一般为湍流（紊流）态；低真空 ($1.3 \times 10^{-1} \sim 1.3 \times 10^3 \text{Pa}$) 时，为层流态；高真空 ($1.3 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$) 时，为分子流态。激光束通过粗真空气体，折射和光斑抖动都存在；但通过低真空气体时，光束漂移、光斑抖动现象消失，折射也大大减弱。激光束通过高真空气体时，光斑抖动及折射均消失。由于达到高真空代价太大，大坝变形观测所需真空度以低真空为宜。

当准直线长度及管道的环境温度条件已知时，可根据大气折光原理求出管道的气压值，然后求得所要求的管道真空度，从而确定管道抽真空设备。例如：准直线长 $L=1000\text{m}$ ，折光差限制为 $\epsilon=0.10\text{mm}$ ，管道内温度为 $T=273.2^\circ\text{C}$ （即摄氏 0°C ），温度梯度 dT/dY 为 0.02°C/cm ，管道真空度应不大于 0.28 托 (37Pa)，这一真空度可用简单的机械式真空泵容易获得。

东北丰满大坝于 1978 年 12 月在国内首次建成了第一套长 194m 有 4 个测点的激光真空管道准直系统。经过两年试验研究，解决了真空激光准直在大坝上应用的一些工程技术问题和部分理论问题。现在安设于丰满大坝顶部电缆廊道中的激光准直系统全长 999.41m ，有 52 个测点，这是目前国内投入运行的长度最大的真空激光准直系统，该系统由激光点源、自动探测装置、发射与接收端点结构、测点墩、软连接段、波带板、管道结构与真空泵等组成。长江三峡工程拟采用长两千多米的真空激光准直系统进行大坝变形观测。

(五) 边角网与交会点

边角网与交会点，是在坝址下游区根据地形特点布置一控制网，如图 2-6 中的 E、F、G 和 H 四边形，其中 G 和 H 两点为校核基点，E 和 F 为工作基点。观测时由校核基点 G 和 H，采用测边或测角方法，校核工作基点 E、F 的位移变化情况，然后由 E、F 两点观测坝上各测点的方向（角），通过计算确定这些点的位移。

与视准线法比较，边角网与交会点法的观测与计算都比较复杂，因此它多用于解决某些特殊问题，或与视准线法配合使用。如图 2-6 所示，用视准线 AB 只能测定拱冠一点的水平位移，其它点用视准线法无法观测，有些测点（如拱坝下游坝面）观测人员无法到达，有些坝除了测定垂直于坝轴线方向的位移量外，还需要了解其他方向的位移情况，这时可采用边角网或交会点观测。

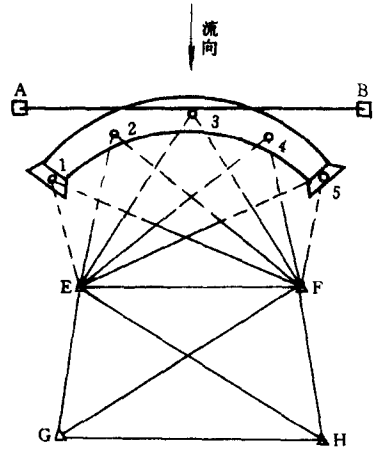


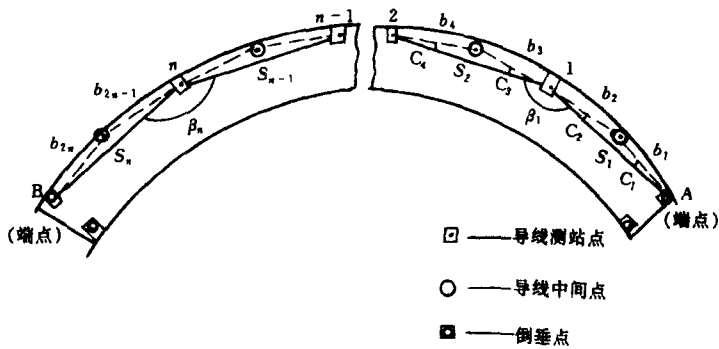
图 2-6 边角网与交会点布置图

(六) 导线法

拱坝的水平位移观测，除了采用视准线法、激光准直法或交会法观测坝顶变形外，为了全面监视和分析大坝的工作状态，经常还要在坝内廊道或基础廊道内布置测点进行观测，这时采用上述方法将有困难，可采用导线法。导线法与交会法一样，可以测定拱坝的径向和切向位移。

1. 导线的布置

导线布置在坝体廊道内，一般每一坝段设置一点。导线观测墩采用槽钢插入坝体墙内。为了减少方位角的传递误差，提高测角效率，采用隔点设站，即分为测站点和中间点。测站点上装有强制对中底盘、微型规标和轴杆头。导线布置如图 2-7 所示。在导线两端的径向方向设置倒垂点，用以测定两端点的绝对位移。



式则须配测斜管（跟踪管道）使用。测斜管是有四个相互垂直导槽的铝合金管或硬质塑料管[见图 2-8(a)]。测斜仪是由测头（探头）、测斜管、电缆和测尺、测读仪表四个部分组成[见图 2-8(b)]。当土体产生位移时，测斜管同土体一起位移，管道的位移（测斜管产生倾斜）量，即为坝体的位移量。向管道内放入测头，测出各个不同分段点处的倾角 θ_i ，则相应的位移增量为

$$\Delta S_i = L_i \sin \theta_i \quad (2-4)$$

若测斜管底作为不动点时，则自管底以上任一测深总位移量为

$$S_i = \sum_{i=1}^n L_i \sin \theta_i \quad (2-5)$$

式中符号含义见图 2-8(c)。

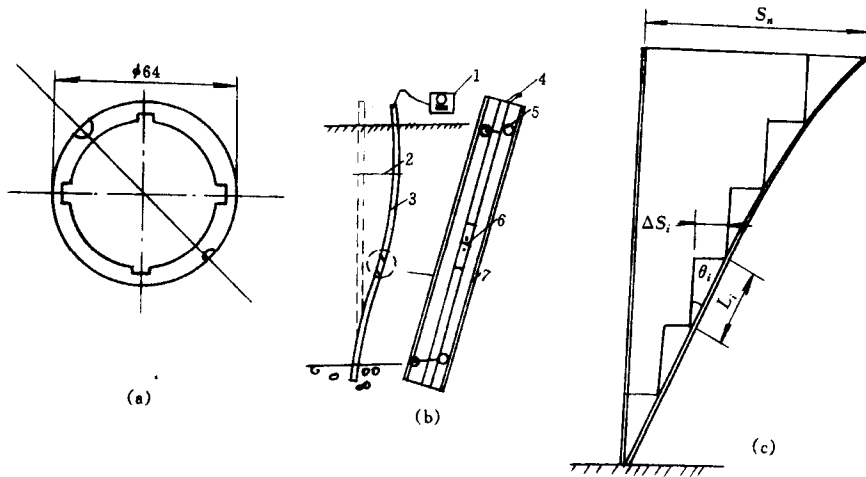


图 2-8 测斜仪工作原理示意图

1—测读仪表；2—水平位移；3—测斜角 α ；4—电缆和测尺；5—导向滑轮；6—测头；7—测斜管

测斜仪测头的传感器目前有四种型式：滑线电阻式、电阻片式、钢弦式、伺服加速计式。在国内，有南京水利科学研究院研制的电阻片式测斜仪；美国 Sinco 公司和 Geokon 公司生产的测斜仪也已在我国一些工程中使用。

测斜仪埋设时应特别注意测斜管的扭曲，周围填土与管壁紧密的衔接，应仔细操作，否则会对观测成果造成很大误差。

二、垂直位移及倾斜监测

垂直位移及倾斜观测与水平位移观测一样，是大坝变形观测中相辅相成的主要项目之一。大坝及其基础在外界因素影响下，沿铅垂方向会产生位移，坝体沿某一铅垂线或水平面还会产生转动变形。为了掌握大坝及基础变形情况，一般大中型水库的大坝，垂直位移及倾斜是必测项目。

垂直位移系指测点在高程方面的变化量。垂直方向上升或沉陷的变化量均称为“垂直位移”。根据规范 SDJ 336—89 规定，测点处垂直位移向下者为正，向上者为负。