

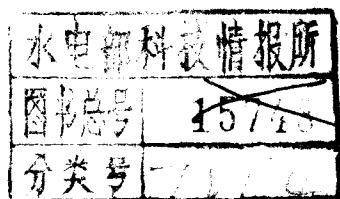
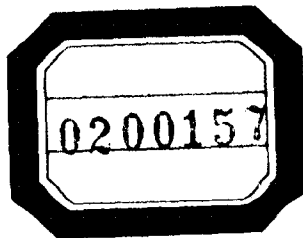
大坝观测技术培训教材

混凝土坝外部观测技术

赵志仁 叶泽荣

DABAGUANCEJISHU
PEIXUNJIAOCAI

水利电力出版社



大坝观测技术培训教材



005718 水利部信息所

混凝土坝外部观测技术

赵志仁 叶泽荣

水利电力出版社

**大坝观测技术培训教材
混凝土坝外部观测技术**

赵志仁 叶泽荣

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 21.5印张 485千字
1988年11月第一版 1988年11月北京第一次印刷
印数0001—2290册 定价0.00元
ISBN 7-120-00388-7/TV·133

前 言

解放以来，在党的领导下，我国的水利水电建设事业得到了蓬勃的发展。原型观测技术也相应地取得了可喜的进步，积累了丰富的经验。实践使人们认识到：原型观测不仅能指导施工和运行，也是开展科学研究验证理论、发展理论的重要手段。

党的十一届三中全会以来，在尊重科学，尊重人材的方针指引下，加强科学管理，保证大坝安全，提高工程效益，受到了人们的普遍重视。从而对原型观测技术提出了更高更迫切的要求。为了提高观测质量，开展观测研究促进观测工作的更快发展，当务之急是加强人才培养，迅速提高观测人员的科学技术水平。

从当前和今后发展的需要出发，水电部电力生产司委托武汉水利电力学院于1982年和1983年举办了二期大坝原型观测技术培训班，邀请水电部南京自动化研究所储海宁、水电部天津勘测设计院科研所赵志仁、武汉水利电力学院李珍照、叶泽荣等担任主要课程的讲授，并负责编写教材。本次出版的就是经两期培训班试用，并在广泛听取意见的基础上进行修改充实的教材。教材分《混凝土坝内部观测技术》、《混凝土坝外部观测技术》、《混凝土坝观测资料分析》等三册出版。

本教材由武汉水利电力学院陆述远主编，由五位同志分工执笔：《混凝土坝内部观测技术》储海宁；《混凝土坝外部观测技术》赵志仁、叶泽荣、王文兴；《混凝土坝观测资料分析》李珍照。水电部电力生产司组织了教材的审查工作，邀请长期从事观测技术工作的专家，教授和工程技术人员讨论，提出许多宝贵意见，由电力生产司赵振民、谷云青、杨金栋审阅定稿。

在编写、审稿和出版过程中，得到了水利电力部科技司、水利电力出版社以及许多同志的热情支持和帮助，提供了不少资料和宝贵意见，在此一并致谢。

由于我们水平有限，教材中难免存在一些错误和不妥之处，诚恳地希望广大读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 外部观测的目的和意义	1
第二节 外部观测的内容和要求	3
第三节 外部观测技术的发展	4
第四节 观测误差的基本知识	8
第二章 挠度观测	24
第一节 观测的目的和方法	24
第二节 倒垂线观测	26
第三节 正垂线观测	36
第四节 垂线观测仪	40
第三章 水平位移观测	48
第一节 概述	48
第二节 活动觇牌法	48
第三节 小角度法	75
第四节 激光准直法	84
第五节 引张线法	101
第六节 前方交会法	120
第七节 导线法	126
第八节 工作基点稳定性的检查	131
第四章 垂直位移观测	147
第一节 测点布设	147
第二节 精密水准仪	152
第三节 观测方法	161
第四节 误差来源及其影响	166
第五节 精度估算	177
第六节 平差计算	182
第七节 水准点稳定性的分析	189
第五章 倾斜观测	192
第一节 观测的目的和方法	192
第二节 观测的原理与计算	193
第三节 直接观测法	194
第四节 间接观测法	198
第五节 倾斜仪的检验	217

第六章 基岩变形及滑坡观测	220
第一节 观测的目的和意义	220
第二节 基岩相对变形观测	222
第三节 基岩绝对变形观测	231
第四节 滑坡观测	237
第七章 绕坝渗流及渗透流量观测	247
第一节 观测的目的和分类	247
第二节 绕坝渗流观测	248
第三节 渗透流量观测	260
第四节 渗流水质监测	266
第五节 渗流观测实例	268
第八章 扬压力观测	273
第一节 观测的目的和意义	273
第二节 观测的设计布置	274
第三节 测压管的构造和安装	277
第四节 渗压计的试验和应用	280
第五节 扬压力的现场观测	285
第九章 水文观测	292
第一节 观测的目的和意义	293
第二节 水位观测	292
第三节 水深观测	298
第四节 流态观测	302
第五节 水温观测	307
第六节 气温观测	309
第十章 现场检查	316
第一节 现场检查的必要性	316
第二节 混凝土坝可能产生的缺陷	318
第三节 现场检查的范围	319
第四节 现场检查的方法	321
第五节 安全改善与应急措施	332
主要参考文献	334

第一章 概 论

第一节 外部观测的目的和意义

外部观测是大坝原型观测的主要内容, 它包括大坝的水平位移、垂直位移、倾斜、挠曲、基岩变形、滑坡、绕坝渗流、渗透流量、扬压力、水流流态及现场检查等, 通过这些能够综合而直观地反映大坝的工作状态, 在监视大坝安全运行方面发挥重要作用, 因此普遍地受到水利水电工作者的重视。

一、确保大坝安全运用

对大坝进行认真系统的观测, 能及时掌握性态变化, 当发现异常时采取相应的补救措施, 以防重大事故。国外不少垮坝实例证明, 由于缺少必要的观测, 以致有些工程隐患未能及时发现, 进而导致垮坝失事, 造成巨大灾害。

例如, 法国的马尔巴塞双曲拱坝 (Malpasset), 高66.5m, 于1954年建成, 施工质量良好。但由于左坝肩岩体由带状片麻岩组成, 断裂构造发育, 使拱坝推力与片麻岩的片理平行, 当推力传入地基时, 并不象均质弹性体那样向四周扩散, 而是集中在一个狭长地带, 蓄水后在扬压力作用下, 左坝肩部分岩体产生不均匀变形和滑动, 最后导致大坝完全毁坏, 遂使全世界的坝工建设者认识到, 拱坝的主要危险在于两岸坝座岩体的不稳定, 因而将观测范围从坝体扩展到地基、坝肩及库岸。

该坝于1959年12月2日溃决后, 历时仅45min, 坝下游8km处一兵营的500名士兵几乎全部死亡, 距坝10km处的弗雷茹斯城变成废墟, 坝体荡然无存, 唯一剩下右坝肩及一小部分坝基已向下游移动了80cm, 左岸重力墩向下游移动208cm。事后调查委员会认为, 该坝运行期间没有系统地设置观测仪器及对建筑物缺少定期检查是失事的原因之一, 并在主要经验教训中认为“应配备足够数量的观测人员和仪器, 对大坝进行系统的观测”。该坝只进行少量位移观测没进行渗流观测。

我国混凝土坝尚未发生过类似事故, 这与开展了外部观测工作是分不开的, 但也出现过一些险情。例如, 1962年11月2日, 发现我国梅山连拱坝右岸基岩漏水严重, 垂线仪观测出第13*坝垛向左岸倾斜达57.2mm, 向下游位移9.4mm, 因而引起了警惕, 及时在垂线仪监测下放空水库进行加固处理, 避免了事故扩大。如果没有仪器观测是难以发现大坝移动的, 若延误了处理时间可能会造成不堪设想的后果。又如佛子岭大坝运行后, 观测发现不均匀沉陷和裂缝严重, 使某些坝段的抗滑稳定发生问题。因之, 决定于1965~1966年断然放空水库予以加固, 并经受了1969年特大洪水的考验。

二、充分发挥工程效益

根据观测结果可以推断大坝在各种水位下的安全度, 确定安全控制水位, 指导大坝的运行, 使其在安全的前提下充分发挥效益。例如, 丰满重力坝系伪满时所建, 当初工程质

量十分低劣,观测发现坝体渗透流量、坝基扬压力及坝顶位移值很大,如有百年一遇洪水,大坝将有倾覆的危险,据此采取了灌浆、预应力锚固等加固措施,不仅保证了大坝安全而且经受了汛末水位高于正常高水位的考验。

又如泉水双曲拱坝建成后,因地质条件差和坝型单薄,担心坝肩稳定问题而不能正常蓄水,只在低水位运行。经过专门进行蓄水观测验证坝体工作正常,从而使蓄水位达到了正常高水位运行发电。

刘家峡水电厂重力坝,根据外部观测结果的综合分析,表明大坝的工作偏于安全,因而决定把运用水位比正常高水位提高1.0m,在1979年即超蓄0.49m,1985年又超蓄0.80m,可见观测挖掘了大坝潜力。

三、验证设计数据、提高设计水平

由于对自然规律的认识有待深入,目前尚不能对影响大坝的各种因素都进行精确计算,设计时往往采用一些经验公式、实验系数或简化公式作为近似解。已建大坝是真正的原型,通过观测可验证设计的正确性。例如,混凝土重力坝的扬压力是设计的重要荷载,而规范规定的设计图形和系数却是假定的,通过新安江、刘家峡等大坝的观测发现实测值均小于设计假定值。因此,1984年12月水利电力部颁发了《混凝土重力坝设计规范SDJ21-78(试行)补充规定》^{[1][2]},其中第3条对作用于坝基的扬压力作了重新规定,进一步减小了灌浆和排水的扬压力折减系数。由于通过观测修订了规范,就减少了设计荷载,节约了投资。

又如上猷江大坝设计最高水位为198m,经过对历年外部观测值的综合分析,确认可以改变设计标准而提高到200m,1970年,汛期水位曾达到200.27m,大坝仍然安全无恙。

四、鉴定施工质量,加快施工进度

大坝在施工期间的变化反映了施工质量并为改进施工提供了信息,例如葛洲坝大坝是建在产状平缓多软弱夹层的地层上,岩性的特点是砂岩、砾岩、粉砂岩及粘土质粉砂岩互层状。因此担心开挖后基岩稳定被破坏,影响坝体安全运行。通过安装基岩变形计,在施工期间、大江截流及百年一遇洪水期间的观测表明,加固处理后基岩变形量在允许范围以内,齿墙接缝没有发生变化,因而保证了正常施工和蓄水发电。

五、为科学研究提供资料

目前坝工技术研究主要依靠理论计算、模型试验和原型观测三种手段,由于影响因素较多,一般理论计算和模型试验都存在一些假定或简化,特别对新型和复杂结构更是如此,而原型观测则反映了各种因素的影响,通过对观测结果的反馈及分解,可修正理论的不足和试验的局限性,进一步提高坝工建设的技术水平。因此,原型观测是起决定作用的,它是坝工技术革新实际的、行之有效的、手段,可以说具有不可替代性。

例如,根据外部观测结果对刘家峡大坝进行反演分析,得出了初期时效位移分量、坝体混凝土弹性模量、渗透扩散率及横缝对大坝整体结构的作用等有关结构特性的信息,这

说明通过观测可获得关于建坝材料和基础总体老化演变各阶段定量的全过程。近年来工程实践表明,跟踪效应量的缓慢变化或偏离,对评价大坝安全是十分重要的。

由上述可见,大坝受到各种外界因素的影响,始终处于运动状态,通过原型观测可以了解随着时间的推移能否安全运用,所以观测是管理工作中不可缺少的组成部分。因此在我国以及世界各国陆续开展并普遍重视不是偶然的,而是随着生产的需要发展起来的。

第二节 外部观测的内容和要求

一、观测项目

由于各坝的结构型式、尺寸、地形、地质等条件的不同,其观测项目也不完全相同,可根据各坝的具体情况和对观测的要求选定,在观测过程中,还要根据实际情况的变化进行适当的调整。这里我们将混凝土坝的外部观测项目概括为以下四方面。

- (1) 变形观测。包括大坝的垂直位移、水平位移、挠曲、倾斜、基岩变形及滑坡等。
- (2) 渗流观测。包括渗透流量、绕坝渗流及扬压力等。
- (3) 水文观测。包括水位、水深、水流流态、水温及气温等。
- (4) 现场检查。包括对坝体、坝基、坝肩、库岸及附属工程进行检查。项目有裂缝、渗水、冻胀、冲蚀、磨损、松软老化、塌方、掏刷及排水、止水情况等。

二、工作过程

1. 观测设计布置

应在大坝结构设计的同时进行观测系统的设计,包括观测方案、项目及仪器设备的选定,观测布置图、施工详图及某些特殊仪器和附件的设计加工图,编写观测设计说明书、技术要求及检查制度等。

2. 设备埋设安装

安装前要对仪器设备进行必要的检验、标定及配套,然后严格按设计图施工。如欲修改设计,应经上级批准并备案留查。要做好安装记录、填写考证表及绘制竣工图。

3. 现场检查观测

可分为现场检查和定期观测两方面,均应按规定要求、频次及时间进行。观测要求做到四无、四随及四固定。四无,即无缺测、无漏测、无违时、无不符精度。四随即随观测、随记录、随计算、随校核。四固定即人员、仪器、测次、时间固定。当观测规定需要改变时,要经过上级批准。

4. 资料整编分析

对现场观测成果要进行校对、造册并及时整编分析,发现异常应找出原因并采取措施。同时要定期对观测工作进行技术总结,对大坝工作状态进行鉴定,研究影响因素及大坝变化规律,提出工程运用和维修意见。

三、具体要求

1. 测点布置

要突出重点照顾全面，以便于全面掌握大坝的工作状态和变化规律。首先要选择有代表性的部位布置较多的测点进行重点观测，对于渗漏、位移等基本项目最好大部分坝段都设置测点，同时还要注意各个观测项目的联系和校核。布点范围应包括坝体、坝肩、基岩及水库岸坡等。必要时可适当调整测点、测次和项目。

2. 测次安排

原则是能掌握测点变化的全过程并保证观测资料的连续性。一般在施工期及蓄水运行初期测次较多，经长期运行观测掌握变化规律后，测次可适当减少。各种观测项目应配合进行观测，宜在同一天或邻近时间内进行。

当最高、最低水位，最高、最低温度，水位急变，地震及有其它异常情况时，应增加测次。

3. 观测组织

为了搞好混凝土坝的观测工作，组织一个精干的观测班（组）是完全必要的。在人员问题上的疏忽，会给工作带来不应有的损失。观测组应有技术人员和有经验的工人参加，这些人员要热爱这项工作，并且应该是实事求是的，决不可把不正常的观测成果掩盖起来。他们应该是大坝的知心朋友，在大坝性态稳定以前，主要人员应避免调动。

4. 竣工移交

当大坝竣工移交给运行单位时，应交出全部观测仪器和设备的竣工文件和观测资料。为了保证观测工作的顺利进行，移交人员和接收人员的工作要有一个交接和熟悉的过程。

在观测工作中，还必须注意人身安全，防止发生事故。对于观测仪器、设备、资料等要妥加保管和维护。

第三节 外部观测技术的发展

一、我国的发展

我国解放前混凝土坝寥寥无几，所以外部观测技术就无从谈起。解放后我国水利水电建设事业取得了巨大成就，外部观测技术也得到迅速发展，取得显著成绩。早在50年代就普遍开展了垂直位移、水平位移和扬压力等项目观测。各地还创制了多种垂线仪、电测水位计、三向测缝器及透明度管等简易有效的观测方法。到了60年代开始普及引张线、倒垂线及倾斜仪。70年代以来，外部观测技术已提高到一个新阶段，开始对引张线、正垂线、倒垂线及觇标的遥测，垂直位移及测压管水位的自动观测。80年代开始生产视准仪及多点变位计并对应用激光观测水平位移等新技术进行了试验和推广，已经研制成自动跟踪、数字显示记录的激光探测器，能较好地减少随机误差，提高工作效率。同时进一步研制了真空激光准直测量系统，可同时观测大坝的水平和垂直位移，适用于长距离测量。另外还进行了弦矢导线、三向基点、三角高程及二维引张线的试验研究，建立了变形观测试验室，

使变形观测的仪器设备和试验条件有了较大的改善。此外,利用超声波进行现场检查及同位素观测渗流等技术也开始应用。

观测设计和仪器安装也积累了一套经验,测点布置更加合理,观测范围已从坝体扩展到基岩和库岸。在设备安装和现场观测方面创造了倒垂孔的孔口导向及埋管纠偏等方法,提高了质量和效率。

在观测资料整理分析方面,已广泛采用电子计算机进行多元和逐步回归分析^[6],并开始进行反馈分析,已经提出了丰满、新安江、牛路岭、丹江口、刘家峡、泉水、柘溪、三门峡、响洪甸等坝的分析成果或检查报告,并进行了一些大坝的鉴定,不仅保证了安全运用,而且为病险坝的维修加固和设计、施工、科研提供了宝贵的第一性资料。

观测工作的技术队伍也逐渐成长壮大起来,设计、施工、运行、科研和高等院校互相协作,扬长避短,发挥各自的优势,促进了观测工作的开展。与此同时,多次举办观测技术培训班,召开经验交流会和技术讨论会,特别是在1964年和1982年先后召开全国混凝土坝原型观测学术讨论会,对交流工作经验和提高技术水平起了很好的作用。

1979年国家科委批准公开出版《大坝观测与土工测试》双月刊^[23],进一步推动了观测技术交流和成果推广应用。1978年水利电力部修订出版了《水工建筑物观测工作手册》^[3],1980年原电力工业部颁布《电力工业技术管理法规》^[4],1981年原水利部颁布《水库工程管理通则》^[5]及其它有关单项观测技术规范中,都明确规定了对混凝土坝外部观测的技术要求,为观测工作的顺利开展创造了条件。

近几年来,随着四化建设事业的发展,对外部观测提出了大量的任务和课题,为此,水利电力部于1983年9月成立了“大坝安全监测技术组”,制定了“1984~1990年混凝土大坝安全监测科技攻关项目,并于1985年和1986年先后召开了‘坝基及坝肩渗流观测’等学术讨论会”,使混凝土坝外部观测技术得到不断改进和提高。

此外,为了更好地学习国内外的实用经验和交流各单位的研究成果,水利电力部于1982年9月成立了“全国水工建筑物观测情报网”,出版网刊《观测技术》^[14],并于1984年11月专门召开“全国大坝外部观测技术讨论会”,进一步促进了国内外观测技术信息和情报的交流。

以上情况充分说明,我国混凝土坝外部观测技术的发展已具有良好的基础和广阔的前景。

二、国外的发展

在国外混凝土坝建设中,第一次进行外部变形观测的是德国于1891年建成的埃施巴赫重力坝,而最早进行温度观测的是美国新泽西州于1903年建成的布恩顿重力坝。

在进行拱坝试荷载分析的同时,人们做了大量的努力,从正在施工的和已建成的拱坝中收集各种有用的数据,第一座在荷载作用下观测变位的拱坝是澳大利亚南威尔士州的巴伦杰克溪薄拱坝,这些测量是在1908~1909年进行的。

从观测技术来看,本世纪初,对混凝土坝的外部观测仅限于用平面地形测量方法观测位移,到1925年,美国垦务局开始对爱达荷州高25m的亚美利加-佛尔兹坝进行扬压力观

测,此后直到50年代观测技术的进展比较缓慢。随着建坝数量逐年增多,坝高增大,坝厚减小,坝基条件愈益复杂,观测技术也逐渐得到发展。特别是50年代末和60年代初,法国高66.5m的马尔巴塞拱坝和意大利高265.5m的瓦昂拱坝先后失事,引起了对混凝土坝外部观测的重视,使本来局限于坝体的各项观测,扩大到现今基岩深处和库岸观测。

从国际大坝会议的有关报告和讨论中,可以看出近20多年来世界各国对外部观测工作的日益重视和发展过程。如首届国际大坝会议是在1933年召开的,会议的第一个议题就是关于重力坝变形观测方面的内容,直到1958年第6届会议的议题21为坝体及基础和坝肩的应力与变形观测,此后几乎每届会议都有这方面的议题。1964年第8届会议吸取了一些大坝失事的教训,在议题28中专门讨论了与坝基和坝肩安全有关的岩石力学问题,强调了坝基安全的重要性、岩石力学的地位及现场试验的观测技术等。在议题29中讨论了各种坝型的观测结果及分析,指出理论计算尚不够科学、不够严密,强调直接进行原型观测比在小比例尺的模型上进行试验更为切合实际,可以补充设计人员所依据理论之不足。这次会议第一次明确提出了原型观测与大坝安全的关系。第9届会议的议题34讨论了坝的性态和老化问题,并成立了“坝及水库老化委员会”。

第10届会议议题38讨论运行中的坝及水库的管理,内容有:1)坝和水库安全的监测及有关的制度和规定,其中包括观测成果的判断和审查;2)渗水的观测及其解析方法;3)自动记录设备,利用计算机进行数据处理等观测技术的新发展;4)洪水时或重大事故时坝的安全问题。

第12届会议议题45讨论渗透调查研究及坝体与基础的排水,内容有:1)观测渗透根源和渗透水量的方法;2)渗透与排水对坝安全运行的重要关系;3)排水系统的监测和维护。

第13届会议议题49讨论大坝的损坏或失事,内容有:1)对坝的性态有影响的损坏情况的监测;2)关于老化和事故的维护与修复;3)施工期间、首次蓄水或由于老化引起的失事、事故和教训。

第14届会议议题52讨论运行中大坝的安全,内容有:1)设计数据的校订;2)大坝安全估算、观测、监测设施和仪器;3)对不安全大坝的保证措施;4)居民安全和报警措施。

第15届会议议题56专门讨论“大坝及地基的监测”,内容有:1)适应坝型、规模及坝龄、安全与运行要求的仪器与监测系统设计;2)仪器及系统的新进展、遥测及自动化;3)仪器可靠性、有缺陷仪器的修理与更换;4)数据处理、分析及解释的新进展;5)原型性状与预测两者的比较、反馈分析及改进分析方法的经验;6)大坝监测立法方面;7)费用、安装及运行等。这次会议于1985年6月在瑞士洛桑市举行,国际大坝会议每三年召开一次,每次有四个议题。

1972年国际大坝委员会曾以23号会刊发表“关于混凝土坝观测的一般意见”^[7],可视为指导开展混凝土坝观测工作的国际性规程。1982年又以41号会刊发表“大坝安全控制的自动化观测”^[8],进一步提出了建议的监控设施和监测方案以及测读频率等。

此外,1955年国际材料试验联合会曾在葡萄牙召开“建筑物观测”专题讨论会。1969

年国际测量协会成立“变形观测及其自动化组”。1982年在国际大坝会议第50届执行会议上成立“大坝安全委员会”，随后又于1984年4月在葡萄牙召开了“国际大坝安全会议”。

许多国家的大坝委员会或政府都对大坝观测制定了更严格更全面的条例。例如，美国大坝委员会编制的“大坝和水库安全监测法规”于1971年开始正式执行，英国大坝委员会于1975年公布了“水库安全管理法”，法国大坝安全管理常务技术委员会于1970年公布了“法国坝工观测及监控法规”，日本大坝委员会于1973年制定了“坝工建筑物管理准则”，苏联电力部于1973年颁布了“电站水工建筑物安全运行监测条例”，芬兰国家水利局于1984年颁布了“芬兰大坝安全法令”等等，上述各国的法规和条例都具体规定了对大坝外部观测的要求^[61]。

由于大坝失事将造成下游生命财产的重大损失，一些国家都规定对大坝和水库要定期进行全面检查。例如，法国规定为1年，挪威规定2~3年，瑞典规定3~4年，芬兰、美国、苏联规定5年，在特殊情况下更应经常进行检查。世界各国越来越认识到，只有通过现场检查和仪器观测相结合，才能给大坝安全以最好的保证，因而强调现场检查的重要性，特别是法国甚至规定原则上每隔10年放空水库彻底检查一次^{[9]、[10]}。

国外多数大坝都设置各种观测设备进行经常观测，在外部观测方面，本世纪初仅利用平面测量方法观测坝的位移，20年代发展了扬压力观测，30年代发展了接缝及裂缝观测，40年代发展了正垂线，50年代发展了倾斜仪，60年代发展了倒垂线和引张线，70年代注意滑坡观测并利用激光观测位移及设置微处理机的自动监控系统，以及警报器、电话和广播等报警。例如法国要求对坝高超过20m或库容超过1500万m³的大坝都建立报警计划，挪威早在1965年就以皇家法令的形式制定了向公众报警系统的主要导则^[11]。

在大坝观测仪器生产方面，瑞士的胡根伯(Huggenbergen)、意大利的伽俐略(Galileo)、法国的特勒马克(Telemac)、德国的麦哈克(Maihak)和蔡司(Ziss)、日本的共和电业等都是世界闻名的观测仪器生产厂家。目前已生产自动激光准直仪，自动遥测垂线仪，遥测渗透流量仪，遥测水管倾斜仪，遥测多点变位计及自动化观测和数据处理系统等。

在观测程序上，葡萄牙等国都倾向于分为施工期、蓄水期、运行期等几个阶段分别进行观测，每一阶段中各有不同的目的和要求。苏联、法国、意大利等特别重视第一次蓄水的观测，而且要求分段蓄水，并根据蓄水观测结果来决定是否允许工程投入运行。意大利已开始进行位移自动化检测和报警，将观测成果与采用有限元法等建立的数学模型相比较，并根据观测结果对数学模型进行校正，如果大坝出现任何问题都要进行分析和处理，但在报警时如何确定测值的允许波动范围还有待进一步研究^[65]。

对观测资料的分析计算，已普遍采用电子计算机和概率统计方法进行定量解析，并开始研究采用理论计算和统计分析相结合的方法。为了迅速及时取得观测成果，法国规定在观测2~4日内完成数据处理和计算，通过电子计算机鉴别观测成果是否超过规定的允许偏差，发现问题采取必要的措施。但根据美国和法国的经验，往往由观测人员判断和发现的问题也不少，所以还要充分重视人的作用。此外，当观测发现问题后，在查明原因和建议

采取合理的措施方面，也要依靠技术人员的分析研究。所以，应采取在线处理和离线处理相结合，不能完全依赖设备的自动化。

第四节 观测误差的基本知识

在大坝原型观测中，不可避免地会产生误差，本节主要介绍有关观测误差的基本知识，为在观测工作中进行误差分析、误差处理和精度评定打下必要的基础。

一、误差的来源及其分类

1. 误差来源

在观测工作中，当对某一确定的量进行多次观测时，所测得的结果总是存在一些差异。例如，对某一段距离用钢卷尺进行往返丈量，两次丈量的结果往往不是一样的。又如观测平面三角形的三个内角，其和经常不等于 180° ，等等。所以在同一量的各观测值之间，或在各观测值与其理论值之间总是存在某些差异，产生这些差异的原因，是由于在观测中包含有误差的缘故。

观测误差的产生，主要来自仪器、观测者和外界条件的影响等三个方面因素。观测时所使用的仪器和工具不尽完善；观测者感觉器官的鉴别能力有限，操作技术水平各有差别；外界条件如温度、湿度、风向、风力，大气折光等因素，在观测过程中的变化，凡此种种，都会使观测成果产生这样或那样的误差，所以观测误差是不可避免的。上述仪器、观测者和外界条件等三个方面的因素，综合起来称为观测条件。观测条件的好坏与观测成果的质量有着密切的关系，观测成果质量的高低则客观地反映了观测条件的优劣。如果观测条件相同，这种观测称为等精度观测；观测条件不同的各次观测则称为不等精度观测。

研究观测误差的目的在于：一方面要了解各种条件对观测值所起的作用，对误差性质、产生和积累的规律进行认真的研究，主动采取各种有效措施，力求减少不利因素的影响，使观测成果达到预期精度；另一方面，在研究误差的基础上，对观测成果进行合理的处理，消除各种矛盾，求得观测量的最可靠值，并对其质量作出评定。

在观测工作中，还可能产生各种错误。必须指出，误差和错误其性质是根本不同的。误差是不可避免的，而错误往往是由于工作人员的粗心大意造成的。在观测工作中必需采取各种措施，对成果进行有效的校核，绝对不允许有错误存在。

2. 误差的分类

根据对观测成果影响的不同，观测误差可分为系统误差和随机误差两大类。

(1) 系统误差 在相同的观测条件下，对某一量进行多次观测，如果所产生的误差在大小和符号上是一定的，或者按一定的规律变化或保持常数，则这种误差称为系统误差。例如采用具有某一尺长误差的钢卷尺量距，由尺长误差所引起的距离误差与距离长短成正比。又如水准仪校正得不完善，视准轴和水准管轴互不平行，则在水准测量中，前、后距的差值累积越大，此项误差影响也就越明显。除仪器不完善会产生系统误差外，观测者在照准目标时，习惯于照准偏向某一侧，读数时习惯于总是读大或总是读小等等都会产

生系统误差。外界影响如温度和大气折光都可能对观测成果产生系统性影响。

系统误差具有累积性，有时会相当显著，但在分析和掌握了它的规律以后，可以采取适当措施加以削弱或消除。例如对量距的钢卷尺进行检定，求出尺长的改正值，对观测成果加以改正，即可消除尺长误差的系统影响；在水准测量中，使前距和后距相等，即可消除视准轴不平行于水准管轴所引起的误差，以及削弱大气折光的影响等等。

(2) 随机误差 在相同的观测条件下，对某一量进行多次观测，其误差在大小和符号上都不相同，也就是说从表面上看，各误差大小不等，符号各异，没有明显的规律性，这种误差称为随机误差。仪器、观测者和外界条件等因素都可能产生随机误差。例如：仪器性能不够稳定、观测者照准目标有时略偏左侧，有时略偏右侧，读数时估读时大时小，温度变化忽高忽低，等等，对观测成果将会产生符号不同、大小不等的误差，这些误差都属随机误差。

在观测工作中，随机误差是无法消除的，一般情况下，在观测成果中，设法剔除系统误差或使系统误差削弱至不占主导地位，随机误差则成为衡量观测精度的主要依据。

二、随机误差的特性

从少数几个随机误差来看，确无规律可循，但大量随机误差的分布却表现出一定的统计规律性。例如，在相同的观测条件下，独立地观测了 273 个三角形的全部内角，由于观测值包含有误差，故三角形三内角之和不等于其真值 180° ，若按下列公式计算出各个真误差 4_i ：

$$4_i = (L_1 + L_2 + L_3)_i - 180^\circ \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 273)$$

将真误差 4_i 按其大小和正负号分别统计如表 1-1 所示。

表 1-1 误差分布表

误差的区间 (")	正 误 差		负 误 差	
	个 数	相 对 个 数	个 数	相 对 个 数
0~10	48	0.176	47	0.172
10~20	33	0.121	31	0.113
20~30	25	0.092	27	0.099
30~40	17	0.062	18	0.066
40~50	9	0.033	11	0.040
50~60	3	0.011	4	0.015
60以上	0	0	0	0
Σ	135	0.495	138	0.505

为了表达误差的分布情况，除了采用上述误差分布表的形式外，还可以利用图形来表达。如图 1-1 所示，横坐标表示误差的大小，纵坐标表示各区间内误差出现的相对个数除以区间的间隔值（此处间隔值为 $10''$ ），这样每一误差区间上的长方条面积就代表误差出现在该区间的相对个数。划有斜线长方条面积代表的相对个数为 0.176。这种图称为直方图。当 $n \rightarrow \infty$ ，误差区间无限缩小时，则长方形顶边所形成的折线将变成一条光滑曲线，称为误差分布曲线。

由表1-1和图1-1可以得出随机误差的特性如下:

1) 在一定的观测条件下, 误差的绝对值有一定的限值, 即超出一定限值的误差, 其出现的机会(概率)为零;

2) 绝对值较小的误差比绝对值较大的误差出现机会多;

3) 绝对值相等的正误差和负误差出现的机会几乎相等;

4) 当观测次数无限增加时, 误差的算术平均值趋于零。

上述四条特性是分析随机误差的基础, 也是处理观测成果的依据。

在某组独立观测值中, 出现了个别大误差, 如超过限值, 则依据第一条特性应予舍去; 如观测误差违反了第二条特性, 则说明观测条件不好, 应采取措施加以改进; 如出现正误差明显地比负误差多或相反, 则说明观测值中存在系统误差, 应设法消除或削弱其影响。第四条特性是由第

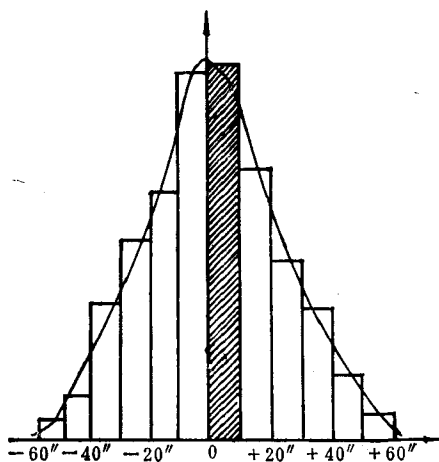


图 1-1 直方图和误差分布曲线

三条导出来的, 说明增加观测次数对减少随机误差的影响有良好作用。

下面利用随机误差的第四条特性来说明算术平均值原理。

设对某个量 X (真值)进行了 n 次同精度观测, 其观测值分别为 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$, 则其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n}{n} = \frac{[L]}{n} \quad (1-1)$$

式中 $[]$ 表示总和。

设 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ 表示其观测值相应的独立真误差, 则

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= X - L_1 \\ \Delta_2 &= X - L_2 \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n &= X - L_n \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

将(1-2)各式相加可得:

$$[\Delta] = nX - [L] \quad (1-3)$$

或

$$\frac{[\Delta]}{n} = X - \frac{[L]}{n} \quad (1-4)$$

代入式(1-1)得

$$\bar{x} = X - \frac{[\Delta]}{n} \quad (1-5)$$

式(1-5)说明, 观测量的算术平均值 $\bar{x}$ 等于真值 X 减去真误差的算术平均值。由随

由误差第四条特性可知, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{[\Delta]}{n} \rightarrow 0$, 此时 $x \rightarrow X$ 。但在实际工作中, 观测次数总是有限的, 因此 x 可以认为是一个近似真值, 是比较可靠的结果, 通常称为观测量的最或然值, 这就是算术平均值原理。

三、衡量精度的标准

设有两组误差的分布曲线如图1-2所示。实线那组误差曲线, 形状较为陡峭, 即误差集中于零的附近较为密集, 离散度小; 而虚线那组曲线形状较为平缓, 即误差对称于零分布的范围较宽, 误差分布较为离散。在绝对值相等的区间内 (如 $-20''$ 至 $+20''$), 实线组小误差出现的相对个数比虚线组多, 而大误差较之为少。由此可知, 实线组的精度比虚线组要高。但用误差分布曲线来衡量精度的高低较麻烦, 且精度得不到一个数学概念, 下面介绍几种常用的衡量精度的标准。

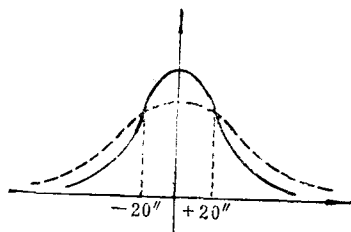


图 1-2 误差分布曲线比较图

1. 平均误差

设对一未知量 X 进行同精度多次观测, 其观测值为 $L_1, L_2, \dots, L_n$, 真值与各观测值的差数 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ 为独立真误差, 取真误差之绝对值的平均值叫做平均误差 θ 。即

$$\theta = \pm \frac{[|\Delta|]}{n} \quad (1-6)$$

式中 $[|\Delta|]$ ——真误差绝对值的总和;

n ——观测次数。

θ 值越小, 说明该组观测精度越高, 因此平均误差是衡量精度的一种方法。

2. 中误差

设对一未知量 X 进行多次同精度观测, 其观测值为 $L_1, L_2, \dots, L_n$, 真值与观测值的差数 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ 为独立真误差, 取各个独立真误差平方和的平均数的平方根, 叫做中误差 (亦称均方误差), 即

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}} \quad (1-7)$$

m 是指在相同观测条件下一组观测值的一次观测中误差。它的大小, 并不代表个别误差的大小, 而是反映了该组观测精度的高低。

平均误差和中误差都是衡量精度的标准, 虽然平均误差比中误差计算简易, 但当观测次数不多时, 平均误差衡量精度则不如中误差可靠, 因为在中误差的计算中, 将每个真误差平方之后, 大的误差就能明显地反映出来, 而平均误差则没有这样灵敏的反映。因此我国统一采用中误差作为衡量观测精度的标准。

3. 允许误差

随机误差的第一个特性告诉我们, 在一定的观测条件下, 随机误差的绝对值不会超过