

混凝土坝观测技术培训班教材

混凝土坝外部观测技术

上册

赵志仁 叶泽荣 王文兴

武汉水利电力学院

T

混凝土坝观测技术培训班教材

混凝土坝外部观测技术

上 册

赵志仁 叶泽荣 王文兴

江苏工业学院图书馆
藏书章

武汉水利电力学院

前 言

我国水利资源极为丰富，建国以来虽已建成大中型水库2600多座，其中混凝土坝百余座，但已开发的水力资源仅占3%左右。随着我国经济建设事业的迅速发展，将会兴建更多的混凝土大坝，这些大坝的投资和效益都是巨大的。为了提高设计水平，加快施工进度，保证施工质量，安全合理地控制运行，充分发挥工程效益，必须加强大坝的原型观测工作，系统而准确地掌握大坝的实际工作状态，这是工程管理极其重要的一环。

外部变形观测是大坝原型观测重要内容之一，它包括对大坝的位移、倾斜、挠度、基岩变形、接缝及裂缝的移动、扬压力以及水流形态等方面的观测。这些观测内容，大都综合而直观地反映了大坝的工作状态，对监视大坝是否安全极为重要，是科学管理所不可少的，因此受到人们的普遍重视。

近几年来，大坝原型观测在观测仪器、观测技术和有关理论等方面都得到迅速发展，从事工程管理的工程人员，急需掌握有关科学技术知识，以适应工作需要。根据水利电力部关于举办混凝土坝观测技术培训班指示的要求，我们编写了本教材。在编写过程中，根据实际工作需要，首先介绍测量误差和测量平差的基本知识，然后在此基础上对各个观测项目的目的意义，设计布置，仪器设备，施工安装，观测方法，精度计算等作系统的介绍，力图做到理论与实际相结合，并适当反映目前国内外的先进技术，将一些较为成熟的科研成果编进教材，以期帮助观测人员在掌握基本理论和基本技术的基础上，对目前该学科的发展情况和新成果有所了解。

本教材是在82年举办的第一期培训班所编的《混凝土坝的外部技术》和《误差理论与大坝变形观测》二本教材的基础上经过合并修改补充编成。其中赵志仁同志编写了第一、四、五、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十五章以及第六章中的第六节，叶泽荣同志编写了第二章中的第七节，第六章（第六节除外），以及第七章，王文兴同志编写了第二章（第七节除外），并与叶泽荣同志合编了第三章。由于编者水平低，经验不足，加以编写时间仓促，错误和不妥之处，一定不少，恳切希望各方面同志批评指正。

编 者

一九八三年九月

目 录

(上 册)

前 言

第一章 概 论

- § 1—1 外部观测的目的和意义..... (1)
- § 1—2 外部观测的内容和要求..... (2)
- § 1—3 外部观测技术的发展..... (4)

第二章 测量误差的基本知识

- § 2—1 概 述..... (8)
- § 2—2 测量误差的分类..... (8)
- § 2—3 偶然误差及算术平均值原理..... (9)
- § 2—4 衡量精度的标准..... (11)
- § 2—5 观测值函数的中误差..... (13)
- § 2—6 同精度观测值的中误差..... (17)
- § 2—7 不同精度观测..... (19)
- § 2—8 数字运算的凑整规则..... (27)

第三章 测量平差的基本知识

- § 3—1 条件平差..... (29)
- § 3—2 间接平差..... (47)

第四章 现场检查

- § 4—1 现场检查的必要性..... (54)
- § 4—2 混凝土坝可能产生的缺陷..... (55)
- § 4—3 现场检查的范围..... (57)
- § 4—4 现场检查的方法..... (59)

第五章 挠度观测

- § 5—1 观测的目的和方法..... (66)
- § 5—2 倒垂线观测..... (68)

§ 5—3	正垂线观测.....	(75)
§ 5—4	垂线观测仪.....	(79)

第六章 水平位移观测

§ 6—1	概 述.....	(85)
§ 6—2	威特T ₃ 经纬仪	(85)
§ 6—3	活动觇牌视准线法观测水平位移.....	(96)
§ 6—4	小角度法观测水平位移.....	(114)
§ 6—5	激光准直法观测水平位移.....	(119)
§ 6—6	引张线法观测水平位移.....	(132)
§ 6—7	前方交会法观测水平位移.....	(148)
§ 6—8	导线法观测水平位移.....	(154)
§ 6—9	工作基点稳定性的检查.....	(161)

第一章 概 论

§ 1—1 外部观测的目的和意义

一、确保大坝安全运用

对大坝进行认真系统的观测，能及时掌握状态变化，发现异常时，及时采取加固补强措施，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，以致有些工程缺陷未能及时发现而进一步发展，最后导致垮坝失事，酿成巨大灾害。例如，法国的马尔巴塞拱坝（Malpasset），高66.5米，于1956年建成，由于左岸局部岩石软弱，蓄水后的扬压力使拱坝发生不均匀变形和滑坡而导致崩溃。拱坝于1959年12月2日溃决后，历时仅45分钟，坝下游八公里处一兵营500名士兵几乎全部死亡，距坝十公里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份坝基已经向下游移动了80厘米，左岸重力墩向下游移动了2米。事后调查委员会认为：该坝运行期间没有设置仪器，对建筑物缺少定期检查是失事的因素之一。并认为主要经验教训是：“应配备足够数量的观测人员和仪器，对坝进行系统的观测”。

我国混凝土坝未曾发生过类似事故，这与开展了外部观测工作是分不开的，例如，1962年11月6日我国梅山连拱坝右岸山坡漏水严重，垂线仪测出13#垛向左岸倾斜达57.2毫米，引起了警惕，及时在垂线仪监视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，将可能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成了问题，因之不得不于1965~1966年断然放空水库予以加固。

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程度，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，观测发现坝体渗漏量、坝基扬压力和坝顶位移值很大，如有百年一遇的洪水，大坝有倾覆的危险，据此采取了灌浆等加固补强措施，不仅保证了大坝安全，而且使汛末水位可比正常高水位高出4米，可多发电3亿多度。

又如泉水拱坝建成后，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，只能在低水位运行。经过第一次进行蓄水观测试验结果，判断坝体工作正常，因而使蓄水位达到了正常高水位运行发电。

三、验证设计数据，提高设计水平

由于对自然规律的认识还有待深入，不可能对影响大坝的各种因素都进行精确的计算，

因此设计中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1:1的模型，通过观测可以验证设计的正确性，修正设计的不合理部分。

例如，上猷江大坝设计规定的最高水位为198米，经过对历年变形观测值的分析，确认可以改变设计标准，提高到200米，1970年汛期水位升到200.27米，大坝仍然安全无恙。

又如法国为赞比亚和罗得西亚设计赞比西河的卡里巴(Kariba)拱坝围堰时，有意识采用了河谷宽高比大至16:1的拱围堰，装设了大量仪器，为今后在宽河谷中建造拱坝取得了技术资料。

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继续施工提供了情报。例如葛洲坝大坝是建在产状平缓、多软弱夹层的地质上，岩性的特点是砂岩、砾岩、粉砂岩、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。通过安装的大量基岩变形计在施工期间及1981年大江截流和百年一遇洪水期间的观测结果，表明基岩处理后，变形量在允许范围以内，没有滑动现象，齿墙接缝没有发生变化。因而保证了施工的正常进行并及时投入运行蓄水发电。

五、为科学研究提供资料

从理论计算、模型试验和原型观测三种手段来看，起决定作用的是原型观测，它是对坝工技术革新的最实际的行之有效的的重要手段。例如，新丰江大坝于1959年10月开始蓄水后，即产生了频繁的地震活动。为此进行了两期加固及大量的观测工作。根据原型观测资料发现地震活动主要受水位的影响。水位快速上升到高水位，地震活动随之增强，当水位升高到50~60米时，渗透压力变大，形成一系列的小震和震级 ≤ 3.0 级的较强地震，当水位达到峰值时，渗透压力变得最大，地震活动也出现高潮，产生最强的地震，为研究水库和地震的关系提供了宝贵资料。

又如刘家峡大坝根据外部观测结果进行反演分析，得出了初期时效位移分量，坝体混凝土弹模，渗透扩散率及横缝作用等有关结构本身特性的讯息。

由上述可见，大坝建成后受到各种外界因素的影响，始终处在运动过程中，大坝究竟有没有病害，能否安全运用发挥效益，原型观测是管理工作中不可缺少的组成部分。因此在我国以及美、苏、英、法、意、德、日、葡、捷、瑞等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。

§ 1—2 外部观测的内容和要求

一、测观项目

由于各坝的结构型式、尺寸、地形、地质等条件不同，其观测项目也不完全相同，以下综合几个方面，可根据各坝的具体情况和观测要求选定。在观测过程中，还可根据实际情况的

变化进行适当调整。

1、现场检查。对大坝的上下游坝面、廊道、空腔、坝肩等外露部分进行检查。内容包括：裂缝、渗水、结冰、冲蚀、磨损、松软老化、排水止水、淘刷等。

2、变形观测。包括坝的垂直位移、水平位移、挠曲、倾斜、接缝及裂缝移动、基岩变形及滑坡等。

3、渗透观测。包括渗流量、扬压力、绕坝渗流、浮托力、水质分析等。

4、水力学观测。包括水流形态、脉压压力、振动、气蚀、进气量、动水压力等。

5、水文及泥沙观测。包括水位、水深、水温、气温、流量、淤积、含沙量、冲刷等。

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，包括观测项目和测点布置，观测仪器设备的选定，特殊仪器及附件的设计加工图、观测布置图及施工详图，并应编写观测设计说明书和观测规程规范。

2、设备埋设安装。安装前要对仪器设备进行必要的标定、检查、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。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。应按规定要求、测次、时间进行观测记录，并要求做到四无、四随和四固定。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。测次有变动时，应报请上级主管部门批准。

4、资料整编分析。对现场观测成果要进行校对、造册、及时整理分析，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，提出工程运用和维修意见，研究影响因素及大坝变化规律。

三、具体要求

1、测点布置要突出重点照顾全面，便于掌握大坝的工作状态和变化规律。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连系和校核。在特殊情况下，可适当调整测点、测次和项目。

2、测次安排的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。一般在施工期及运行初期测次较多，经长期观测掌握变化规律后，测次可适当减少。

当最高、最低水位，最高、最低温度，水位急变，地震以及有其它异常情况时，应增加测次。必要时可增加测点和项目。各种观测项目应配合进行观测，宜在同一天或邻近时间内分别进行观测。

3、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。观测组应由观测技术人员和有经验的工人参加，这些人员要热爱这项工作，并且是十分实事求是的，决不可把正常的观测成果掩盖起

来。他们应该是大坝的知心朋友，在大坝未稳定以前，主要人员应避免调动。

4、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应有一个交接和熟悉过程。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、资料等要妥加维护。

§ 1—3 外部观测技术的发展

一、我国混凝土坝外部观测技术的发展

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了迅速发展，取得显著成绩。早在五十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、电测水位计和三向测缝器等，此外还成功地利用方格座标法观测水跃、水面线，用透明度管观测渗水浑浊度等简易有效的观测方法。到了六十年代开始普及引张线、倒垂线及倾斜仪。七十年代以来，外部观测技术已提高到一个新阶段，对引张线、正、倒垂线的电测、遥测、垂直位移及测压管水位的自动化观测，应用激光观测水平位移等新技术进行了试验和推广。此外，超声波探伤，同位素测含沙量等技术也日益普及。

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也提高了质量和精度。

在观测资料整理分析方面，已广泛采用计算机进行多元和逐步回归分析，并已开始进行反演分析。提出了丰满、新安江、新丰江、丹江口、刘家峡、泉水、柘溪、响洪甸等坝的分析成果并进行了大坝鉴定。不仅保证了大坝的安全运用，而且为病险坝的处理和大坝的设计、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、科研和高校互相协作，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，召开了一些经验交流会和技术讨论会，特别是在1964年5月和1982年3月先后召开了两次全国混凝土坝工程建筑物原型观测学术讨论会，对交流工作经验，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》专业刊物，进一步推动了观测技术交流和成果的推广应用。1978年水利电力部修订出版了《水工建筑物观测工作手册》，1980年原电力工业部颁布《电力工业技术管理法规》，1981年原水利部颁布《水库工程管理通则》及其它有关的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。

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途。

二、国外混凝土坝外部观测技术的发展

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来测位移，到1925年，美国垦务局开始对爱达荷州高25米的亚美利加—佛尔兹坝进行扬压力观测，此后直到五十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，观测技术也逐步得到发展。特别是五十年代末和六十年代初，法国高66.5米的马尔巴塞坝和意大利高262米的瓦昂坝先后失事，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多年来世界各国对混凝土坝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届会议才又重见这方面的议题，此后则几乎每届会议都有这方面的议题，（详见表1—1）。到1964年第8届会议已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，以及岩石力学的地位以及现场试验的观测技术等。对于议题29，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的理论之不足。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10届会议议题38讨论：（1）有关坝和水库安全的监测与其有关的制度和规定，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：（1）测定渗漏根源和渗漏水量的方法；（2）渗漏与排水对坝的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：（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和修复；（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：（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。

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”，可视为指导开展混凝土坝观测工作的国际性规程。

此外，1955年国际材料试验联合会在葡萄牙召开了“建筑物观测”专题讨论会。1969年国际测量协会成立了变形观测及其自动化小组”。1982年第14届国际大坝会议上成立了“大坝安全委员会”。

许多国家的大坝委员会或政府都对大坝的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“法国关于坝工观测及监控法规”。日本大坝委员会于1973年制定了“大坝构造物管理基准”。

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”。意大利政府的正式法令规定每一个坝都必须建立并执行定期的观测计划，观测结果要定期向政府公共工程部的大坝司呈报。

历届国际大坝会议有关外部观测方面的议题

表 1—1

届	年	会 址	议 题
1	1933	瑞典, 斯德哥尔摩	议题 1, 重力坝的内部温度及变形
6	1958	美国, 华盛顿	议题 21, 坝体及基础和坝肩的应力和变形观测
8	1964	英国, 爱丁堡	议题 28, 现块岩石的物理力学性质其确定方法改进措施
			议题 29, 各种坝型的坝体观测结果及其分析
9	1967	土耳其, 伊斯坦布尔	议题 32, 从地基看坝体的安全及水库岚坂的稳定问题
			议题 34, 坝的性态和老化
10	1970	加拿大, 蒙特利尔	议题 38, 运行中的坝及水库的管理
12	1976	墨西哥, 墨西哥城	议题 45, 渗漏调查研究及坝体与基础的排水
13	1979	印度新德里	议题 49, 大坝的消坏或失事
14	1982	巴西, 里约热内卢	议题 52, 运行中大坝的安全
			议题 54, 水库淤积及其边坂的稳定

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、美国规定 5 年。在特殊条件下更应经常进行检查。

国外多数大坝都设置各种观测设备进行经常性观测。在外部观测方法方面，本世纪初仅利用平面测量方法观测坝的位移，二十年代发展了扬压力观测，三十年代发展了接缝及裂缝观测，四十年代发展了正垂线，五十年代发展了倾斜仪，六十年代发展了反垂线和引张线，七十年代注意滑坡观测并利用激光测位移及微处理机的自动监控系统，以及用电话和广播报警。

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观测目的和要求，法国特别重视第一次蓄水观测，而且要求分段

蓄水，并依此作为工程是否允许运行的根据。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。

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。并已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，法国规定在观测后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，所以还应该充分重视人的作用。应采用在线处理和离线处理相结合，不能完全依赖设备的自动化。

第二章 测量误差的基本知识

在大坝原型观测中,不可避免地会产生误差。本章主要介绍有关测量误差的基本知识,为进行误差分析、误差处理和精度评定打下必要的基础。

§ 2—1 概 述

在测量工作中,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,数学上平面三角形三个内角之和应是 180° ,但用经纬仪观测三角形的三个内角,其和经常不会等于 180° 等等。所以在一些测量工作中,各观测值之间或观测值与其理论值之间总是存在着某些差异,产生这些差异的原因,是由于观测值中包含有测量误差的缘故。

观测值是由观测者使用仪器和工具,按照一定的观测方法,在一定的外界条件下测得的,由于观测者的感觉器官的鉴别能力有一定的限制,操作技术水平各有差别,所使用的仪器和工具本身不尽完善,精度不一;观测方法也不能完美无缺;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随时变化。凡此种种,都会使观测值产生这样或那样的误差,所以测量误差是不可避免的。

我们研究测量误差的目的在于: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,力求避免和减少不利因素的影响,使观测成果达到预定精度。另一方面,在研究测量误差的基础上,对观测成果进行合理的处理,消除各种矛盾,对测量成果的质量作出评定。

在测量工作中,还可能产生错误。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,而错误往往是由于测量工作人员的粗心大意而造成,在测量成果中是不允许存在的,本章研究的测量误差,显然不包括错误在内。

§ 2—2 测量误差的分类

根据对观测成果影响的不同,测量误差可分为系统误差和偶然误差两种。

一、系统误差

在相同的观测条件下,即用同样的仪器、同样的方法、在同样的自然条件下,对某一定量进行多次观测,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,用一把具有尺长误差 Δl 的钢卷尺量距时,每丈量一尺就包含有 Δl 的距离误差,丈量的距离愈长,所积累的误差也就愈大。又如水准仪校正得不完善,视准轴和水准管轴互不平行,则在水准测量中距离愈长,在水准尺上的读数与正确读数相差就愈大。这些都是由于仪器不完善而产生的系统误差。有时可能由于温度和大气折光等

的影响而产生系统误差。此外有些观测者在照准目标时，习惯于把望远镜的十字丝照准目标中央的某一侧，也会使观测带有系统误差。

系统误差对观测值有累积的影响，有时会相当显著，在测量工作中，必须掌握它的规律，设法消除和削弱它对观测成果的影响。如在量距前，将钢卷尺进行检定，求出尺长误差的大小，对所量得的距离加入尺长改正数，即可消除尺长误差对所量距离的影响。

二、偶然误差

在相同的观测条件下，对某一量进行了多次观测，其误差在大小和符号上都不相同，也就是从表面上来看，它们的大小不等，符号不同，没有明显的规律，这种误差称为偶然误差。偶然误差的产生也是由于人、仪器和外界条件等因素引起的。例如在水准测量读数时，可能读大一些或小一些，这就产生读数误差；在经纬仪测量中，用十字丝瞄准目标，可能瞄得偏左一些或偏右一些，这就产生瞄准误差，其次仪器受温度风力等外界条件的影响，对测量结果也可能产生符号不同、大小不等的误差，所有这些都属于偶然误差。

在测量工作中，偶然误差是无法消除的，因此观测成果的精度与偶然误差有密切的关系，以下我们将对偶然误差作进一步分析。

§ 2—3 偶然误差的特性及算术平均值原理

一、偶然误差的特性

少数几个偶然误差的出现，好象没有什么规律性。但实践证明，大量的偶然误差确呈现出一定的统计规律性。例如：在相同的观测条件下，对174个三角形的全部内角进行了观测，由于观测值带有误差，各三角形内角和不等于180，其差数按误差大小和正负号分别列于表2—1。

表 2—1

误差区间 (秒)	正 误 差		负 误 差	
	个 数	相 对 个 数	个 数	相 对 个 数
0—10	32	0.184	31	0.178
10—20	23	0.132	21	0.121
20—30	15	0.086	17	0.098
30—40	11	0.063	11	0.063
40—50	5	0.029	4	0.023
50—60	2	0.012	2	0.011
60以上	0	0	0	0
和	88	0.506	86	0.494

为了表达误差分布的情况，除了采用误差分布表的形式外，还可以利用图形来表达。在图2—1中，横座标表示误差出现的大小，纵座标表示各区间内误差出现的相对个数除以区间的间隔值（此处间隔值均为 $10''$ ），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0.184。这种图称为直方图。若误差区间无限缩小，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2—1和图2—1可以得出偶然误差的特性如下：

1、在一定的观测条件下，偶然误差的绝对值不会超过一定的限值；

2、绝对值较小的误差比绝对值大的误差出现的机会多；

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，偶然误差的算术平均值趋向于零。

上述四个特性是分析偶然误差的基础，也是处理测量成果的依据。

如果在某组测量成果中，出现了个别的大误差，且超出了一定的限度，则根据特性1，

可判断其属于错误，应该除去，并决定该次观测予以重测或补测。又如在一组测量误差中，正误差远比负误差为多或相反，则由特性3可知，在这组误差中，尚存在明显的系统误差，应分析原因，设法消除系统误差的影响。

特性4是从特性3得到的，它说明在测量工作中，增加测量的次数可以减少偶然误差对测量成果的影响。所以在实际工作中，为了提高观测值的精度和进行校核，总是进行多次测量的。当然，多次测量需要较长的时间，耗费较多的人力物力，其次在较长时间内，观测条件容易发生变化，因此观测次数的选择适当与否，对保证观测成果的质量，多快好省地完成工作任务关系很大。

二、算术平均值原理

由偶然误差的特性可知，对某一个量进行了多次同精度观测，则其算术平均值就是最可靠的测量结果。算术平均值在测量上也称为简单平均值，其原理说明如下。

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

$$\alpha = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n}{n} = \frac{[L]}{n} \quad (2-1)$$

式中 $[]$ 表示总和。

设以 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ 表示为某一个量 n 次同精度观测值 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ 的

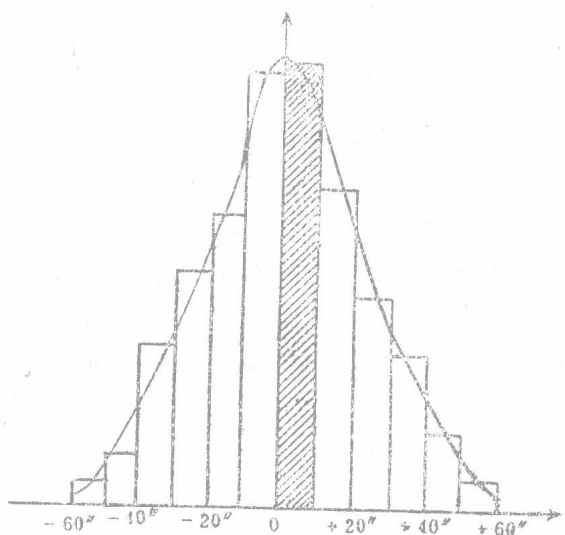


图2—1

独立真误差，则：

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= X - L_1 \\ \Delta_2 &= X - L_2 \\ \Delta_3 &= X - L_3 \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n &= X - L_n \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

将(2-2)各式相加可得：

$$[\Delta] = nX - [L] \quad (2-3)$$

$$\text{或} \quad \frac{[\Delta]}{n} = X - \frac{[L]}{n} \quad (2-4)$$

代入(2-1)式得：

$$x = X - \frac{[\Delta]}{n} \quad (2-5)$$

(2-5)式说明，观测值的算术平均值等于真值减去真误差的算术平均值。由偶然误差特性4可知，当观测次数无限增加时，偶然误差的算术平均值 $\frac{[\Delta]}{n}$ 趋近于零，此时观测值的算术平均 x 值也将趋近于真值 X 。但在实际工作中，对某一个量所作观测的次数总是有限的，因此 x 可以认为是一个近似的真值，是一个比较可靠的结果，通常称它为观测量的最或然值。

§ 2—4 衡量精度的标准

表2—1和图2—1，除了说明偶然误差的特性外，还可用以衡量观测精度的高低，现把该曲线再绘制在图2—2上，以实线表示。如果按另一种观测方法，对174个三角形观测后绘制的误差曲线也会绘在图2—2上，以虚线表示。从这两条误差曲线可以看出，第一组的观测精度比第二组高，因为第一组观测的误差曲线，小误差出现的相对个数比第二组多，而大误差出现相对个数比第二组少。但用误差曲线衡量精度的高低，较为麻烦，而且对精度得不到一个数字概念，下面介绍几种常用的衡量精度的标准。

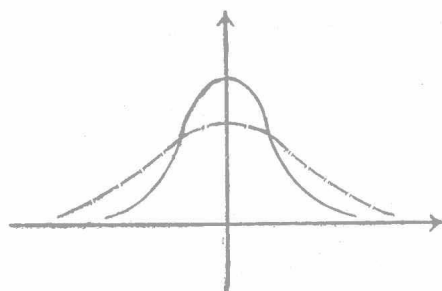


图 2—2

一、平均误差

设对同一个未知量 X 进行同精度多次观测，其观测值为 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ ，真值与各观测值的差数 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ 为独立真误差，我们取真误差之绝对值的平均值叫做平均误差 θ ，则

$$\theta = \pm \frac{[|\Delta|]}{n} \quad (2-6)$$

式中 $|\Delta|$ 表示真误差的绝对值；

$[|\Delta|]$ 表示真误差绝对值的总和；

n 表示观测次数。

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。

二、中误差

设对同一个未知量 X 进行多次同精度观测,其观测值为 $L_1、L_2、L_3\cdots L_n$,真值与各观测值的差数 $\Delta_1、\Delta_2、\Delta_3\cdots\Delta_n$ 为独立真误差,我们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

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}} \quad (2-7)$$

m 称为中误差,也就是指在同样观测条件下一次观测值的中误差。

平均误差和中误差都是衡量观测精度的一种标准,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,就没有这样明显的反映。因此我国统一采用中误差作为衡量观测精度的标准。

三、容许误差

偶然误差的第一个特性告诉我们,在一定的观测条件下,偶然误差的绝对值不会超过一定的限值,如果在测量工作中,某一观测值的误差超过这个限值,就认为这次观测的质量不好,该观测结果就应该舍去。那么应当如何确定这个限值呢?实践证明,大量同精度观测的一组误差中,绝对值大于两倍中误差的偶然误差,其出现的可能性是5%;而大于三倍中误差的偶然误差,其出现的可能性仅有0.3%,因此在实际工作中,常采用二倍中误差作为限值,称为容许误差,即

$$\Delta_{\text{容}} = 2m \quad (2-8)$$

当要求不严格时,也可采用三倍中误差作为容许误差,即

$$\Delta_{\text{容}} = 3m \quad (2-9)$$

容许误差又称极限误差或最大误差。

四、相对误差

在很多情况下,观测值的误差与观测值本身的大小有关,仅用中误差来衡量精度,还不能完全表达观测质量的好坏。例如我们丈量两段长短不等的距离,一段长100米,其中误差为 ± 0.1 米;另一段长1000米,其中误差为 ± 0.2 米,如以中误差来衡量精度,就会得出第一段比第二段的丈量精度要高的错误结论,因为量距误差与距离本身的长短有关,此时应用中误差与观测值之比来说明量距的精度。中误差与观测值之比称为相对中误差。在上例中前一段的相对中误差为

$$\frac{1}{N_1} = \frac{m_1}{L_1} = \frac{0.1\text{米}}{100\text{米}} = 1/1000;$$

后一段的相对误差为

$$\frac{1}{N_2} = \frac{m_2}{L_2} = \frac{0.2\text{米}}{1000\text{米}} = 1/5000,$$