

编 著 ● 邓小川 姜本海 范自力 何廷贵 张 宇 张抚宾
主 审 ● 冯 晓 徐世涛



实用测量技术及 案例分析

SHIYONG CELIANG JISHU JI ANLI FENXI



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

实用测量技术及案例分析

邓小川 姜本海 范自力 编著
何廷贵 张宇 张抚宾
冯晓 徐世涛 主审



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

实用测量技术及案例分析 / 邓小川等编著. —成都:
西南交通大学出版社, 2012.6
ISBN 978-7-5643-1723-2

I. ①实… II. ①邓… III. ①测量技术 IV.
①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 072442 号

实用测量技术及案例分析

邓小川 姜本海 范自力 编著
何廷贵 张 宇 张抚宾

责任编辑	张 波
特邀编辑	姜锡伟
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都勤德印务有限公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	14
字 数	385 千字
版 次	2012 年 6 月第 1 版
印 次	2012 年 6 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1723-2
定 价	36.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

本书是测量人员的长期测量理论与实践研究的总结,具有较高的理论研究价值以及工程应用价值。完全由一线工程技术人员总结编写的工程测量专业书并不多见,因为它一般具有很强的实践性和针对性,相信本书的出版一定能受到广大一线生产技术人员欢迎。

冯 晓

2011 年 7 月

前 言

本书是几位作者从事几十年的测绘勘测专业和特大型工程，道路、铁路、隧道、水利等工程的测量施工放样工作以来，把在生产实践过程中的一些体会（想法）和遇到的难于解决的问题，还有一些工作中的经验和教训总结起来编写成的“本子”，共有十三章。第1章，测量的基本知识，介绍一些通用而普通的测量常识，同时还有教训和警示，给尚未接触过测绘勘测专业或者接触时间还不太长（初学），又未通过测绘专业知识的培训和学习的读者，提供一般而又必备的测量技能和测量知识，使读者在今后实际工作中能少走弯路，尽早适应工程需要。第2章，使用简易设备检校测量仪器，介绍一种在室内、只需一人即能完成检校仪器的方法。第3章为平面控制测量。第4、5章，水准测量和施工测量基础，是作者在生产实践过程中的实例和该如何去处理和解决常易出现而又容易被忽视的一些问题。第6、7章是工程测量的应用章节，其中第6章，隧道测量，主要描述如何准确地进行国家基础设施建设，特别是隧道工程的施工放样，确保隧道工程贯通质量（既不超挖也不欠挖），介绍一些方法以及常用的 fx-5800 可编程计算器在隧道放样中的软件程序。第7章，三角高程测量精度分析及案例，提供给长期从事测绘勘测专业、热爱这个专业的同志们，望能起到抛砖引玉的作用，从而进一步从纵深方面去探讨“大气折光差”对测量的影响，怎样尽可能地减弱和消除它。

第8、9和10章的内容，是作者多年在生产第一线的实例，也是经验的总结。第11、12和13章，是CAD制图（地形图）、配合全站仪和编程计算器的综合运用体会与经验，以及市面上最常用编程计算器（fx-4800和fx-5800）的一些常用程序。

由于水平有限，本书难免存在疏漏和不足之处，特别是理论方面的论述，只能以客观的现象进行表面分析，缺乏较全面、深入的钻研和探讨，更缺乏理论方面的依据，敬请读者批评指正。

编 著

2011年8月于江津

目 录

第 1 章 测量的基本知识	1
1.1 测 量	1
1.2 人类最早使用的测量工具	2
1.3 测量计算的基础原理	3
1.4 测量系统	4
1.5 测量过程中的误差及其防止	6
1.6 测量的等级	10
1.7 测量规范	10
1.8 地形图	13
第 2 章 使用简易设备检校测量仪器	18
2.1 场地和目标的布设选择	19
2.2 校正项目和计算表	19
2.3 检校的精度	25
2.4 存在的问题	27
第 3 章 平面控制测量	28
3.1 导线测量	28
3.2 GPS 测量	30
第 4 章 水准测量	50
4.1 水准测量的基本原理	50
4.2 水准测量	50
4.3 水准测量的主要误差来源	52
4.4 i 角和诸多误差的影响	53
4.5 减弱误差的影响	55
4.6 数字水准仪	55
第 5 章 施工测量基础	64
5.1 施工放样测量	64
5.2 建筑物放样测量	64

第 6 章 隧道测量	68
6.1 概 述	68
6.2 隧道控制	68
6.3 隧道施工放样	71
6.4 隧道测量软件	72
6.5 源程序 SD	76
6.6 程序的缺陷部分	84
第 7 章 三角高程测量精度分析及案例	86
7.1 电磁波测距三角高程测量代替三等水准的试验	86
7.2 对向观测高差不符值	96
7.3 特大型桥梁挠度测量的精度与误差	101
第 8 章 施工控制网的应用案例	104
8.1 工程概述	104
8.2 网型设计	104
8.3 控制网外业观测	105
8.4 控制网数据处理	106
8.5 结 论	108
第 9 章 GPS 在工程施工控制网中的应用案例	109
9.1 嘉陵江亭子口水电站独立控制网	109
9.2 乌东德水电站首级施工控制网测量及若干关键技术	112
第 10 章 建筑物内外变形监测与滑坡监测应用案例	119
10.1 内、外观仪器在变形监测中的应用	119
10.2 溪洛渡水电站上下游土石围堰表面变形监测	123
10.3 嘉陵江亭子口水电站大圆包滑坡监测分析	127
第 11 章 计算工具及软件的使用	134
11.1 测量工具	134
11.2 AutoCAD、全站仪和编程计算器（三合一）	136
11.3 等高线自动内插方法	138
11.4 MAPINFO 与 AutoCAD 在土地复垦测量中的应用	141
11.5 长江勘测软件的使用体会	144
11.6 南方 CASS 软件的使用体会	148

第 12 章 计算器软件（程序）	151
12.1 fx-4800 计算器编辑程序简介	151
12.2 fx-5800 计算器编辑程序简介	179
第 13 章 测量实务	206
13.1 熟悉工程图（做好施工前的准备）	206
13.2 编写测量报告	207
13.3 论测绘产品质量控制对技术细节的要求	209
参考文献	212

第1章 测量的基本知识

1.1 测 量

测量的主要目的是测得（研究）一个地区或地面某一范围内（以至地球的形状和大小）的长度、宽度、高度和它的面积及平面位置等信息数据，然后按一定比例绘制成图（地形图），并根据这些信息再结合各种工程的需求，设计绘制成工程图，供国防工程和国民经济建设的规划、设计、管理和科学研究使用。测设是将设计图上的工程构造物的平面位置和高程在实地标定出来，作为施工的依据。

测量是一门多元学科，若按它所研究的对象不同，所要求和利用的、应用的目的不同，传统的测量学可分为如下几门学科：

普通测量学——研究地球表面局部范围内的地貌及人工构造物，并将其测绘成比较大的比例尺图的基本理论和方法的学科，是测量学的基础。

大地测量学——研究地球表面较大区域内的点位测定以及整个地球的形状、大小和地球重力场以及它局部范围的变化、测定的理论和技术的学科。

工程测量学——研究工程建设在规划、设计、施工、运行、管理等各个阶段进行的控制测量和地形测绘、施工放样、变形监测工作的理论与技术的学科。

摄影测量与遥感测量学——研究利用摄影或遥感技术获取被测地表面物体影像的信息数据，进行分析处理，绘制成地形图或数字模型的理论和方法的学科。

制图学——研究将地球表面的点、线状物体经过投影变换后，绘制成能满足各种不同要求的地图的学科。

海洋测绘学——研究以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制工作的学科。

随着空间技术和计算机技术的不断发展并且在测绘中的普及应用，测绘的作业方式和应用领域都已经发生了重大变化，传统的按作业方式和应用领域的分类已经不能完全适合测绘学科的现状。

20 世纪末，以全球定位系统（GPS）、遥感（RS）和地理信息系统（GIS）——“3S”技术——为代表的现代测绘技术得到很快的发展并已普遍应用于测绘生产行业各个领域；测绘的产品也逐步实现向数字高程模型（DEM）、数字正射影像（DOM）、数字线划图（DLG）和数字栅格图（DRG）等数字“4D”产品方面的过渡。现阶段，我国提出了数字城市、数字中国，它们的实现会为水利建设、国土资源管理、城市规划、海洋资源开发等提供越来越多的服务。

1.2 人类最早使用的测量工具

1.2.1 测 具

人类最早利用的是水的原理和它的特性，借静止的水面所给出的一条水平线（可无限延伸），也就是我们通常所说的水准轴（相近似），作为依据，用这条水平线去瞄准和观测对面远处目标，此目标的位置就与我们同高。最原始的方法是用一个面盆，内部盛满水，再用一节竹筒放于盆内水面之上（图 1.1），用肉眼观察（通过竹筒顶部这一条线——近似于视准轴），瞄准远处目标，远处的目标就与我们所摆的面盆（竹筒顶部）的位置等高（因竹筒的顶部和它的底部的水面是相互平行的）。可在野外做实验（用水准仪）验证，这种方法所用的器具俗称为测具，主要用于测量高度。

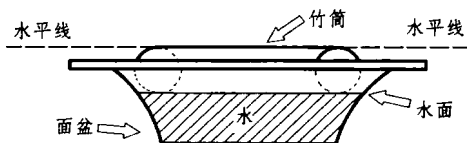


图 1.1

1.2.2 量 具

在古代，我们的祖先就创造性地发明和使用“两脚弓”，也就是世界上最早发明、使用的量测工具，俗称为量具（图 1.2）。它主要用于量取长度。

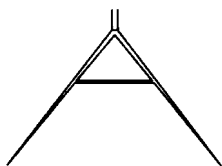


图 1.2

设两脚尖宽为 2 m，当量取 D 段共量 25 次时，求 D 段有多长？即

$$D = 2 \text{ m} \times 25 (\text{次}) = 50 \text{ m}$$

1.2.3 测与量

测与量的组合也就是我们所说的测量。测量工具从古代发展到现代的各种各样仪器有：水准仪和自动安平水准仪、经纬仪、全站仪、GPS 仪、陀螺仪、罗盘仪、回声仪、金属探测仪、皮尺和气压表等。古人云：工欲善其事，必先利其器。有了以上工具我们就可以对各种工程项目开展工作，采集工程中所需的各种信息数据。

1.3 测量计算的基础原理

早期使用的工具是我们前面介绍的最原始和最简单的如“两脚弓”去量长度,利用“水”的物理性质——静止的水面——去求高度。测量器具从这些最原始的工具一直发展到今天的全站仪、GPS,它们广泛应用于各项工程之中,但它们都离不开数学和当代的电子学、光学、机械的发展。测量的最基本原理离不开数学,而用得最多、最为广泛的就是三角函数。

简单一点说,测量主要是依托于数学。古代的勾股定理——勾三、股四、弦五——至今都在我们的工程中得到较为广泛的应用,特别是数学中的三角函数应用更为广泛。在现实的工程中,我们测得了斜距,要计算平距和高差,都离不开三角函数(图1.3和图1.4)。

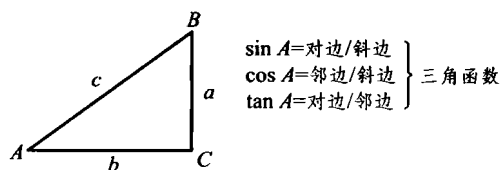


图 1.3

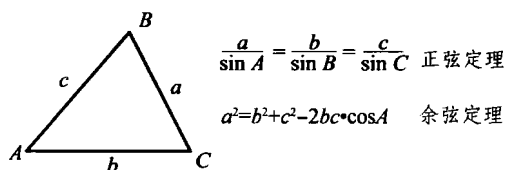


图 1.4

已知:斜距 c (AB)、角度 A , 计算:平距 b (AC)、高差 a (BC)。

由三角函数可知,在直角三角形中:

$$\textcircled{1} \sin A = \text{对边}(a)/\text{斜边}(c)$$

即

$$\text{对边}(a) = \sin A \times \text{斜边}(c) \quad (1.1)$$

$$\textcircled{2} \cos A = \text{邻边}(b)/\text{斜边}(c)$$

即

$$\text{邻边}(b) = \cos A \times \text{斜边}(c) \quad (1.2)$$

任意三角形中,通过正弦定理、余弦定理均可求得边长、角度。

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} \quad (1.3)$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos A \quad (1.4)$$

特别提示:式中的角度 A 是数学的含义,而在测量上的角度 A' ,用的是角 A 的余角 ($90^\circ - A$),因为所使用的仪器(全站仪或经纬仪)的结构是以天顶起零进行设计的竖直角盘,所测的竖直角应为 $A' = 90^\circ - A$,故在测量上将竖直角称为天顶距,如果将天顶距代入式(1.1)、(1.2)、(1.3)、(1.4)中,根据三角函数的关系可知,式中的函数正好相反(正弦变为余弦,余弦变为正弦)。

以上是我们最为常用的一些数学公式,所以要学好测量专业还必须学好数学。如果要继续研究测量这门学科,就还要在初等数学的基础上更深一步地钻研和学习高等数学。

1.4 测量系统

本节侧重从适用于工程需要出发进行介绍。任何物体（包括地球在内）都有 3 个面：平面、立面、断面（剖面）。测量主要针对平面、立面、断面（剖面）这 3 个方面开展工作（工程）。

1.4.1 平面系统

什么叫平面？平面坐标系是如何形成的？平面有哪些坐标系？

（1）平面——人们从上往下看物体，只能看到物体的前后、左右，顾及不到它的上下关系，我们看到的这一个面就是平面。

（2）平面坐标系——在平面的这些“前后、左右”（几何数据关系）上建立的一个数学系统，我们常用的是平面直角坐标（人们通常讲的、看到的都是经度与纬度，这是大地坐标）。

（3）我国的坐标系：

① 1954 北京坐标系——采用苏联克拉索夫斯基椭圆体，在 1954 年完成测定工作，所以叫 1954 北京坐标系。它是以苏联普尔科沃为原点的 1942 年坐标系的延伸。

X 方向以地球赤道为 0 进行计算，一直向北延伸递增； Y 方向以地球的中央子午线 $0 + 500\,000$ 为起点，向东延伸递增（其中中央子午线又要分 3° 带和 6° 带两种），由此而建立的数学坐标系即为 1954 北京坐标系。它的主要参数如下：

长半轴 $a = 6\,378\,245\text{ m}$

扁率 $f = 1/298.3$

② 1980 西安坐标系——我国 1978 年 4 月在西安召开了全国天文大地网平差会议，确定重新定位，建立新的坐标系。由此才有了 1980 年国家大地坐标系。1980 年国家大地坐标系采用的地球椭球基本参数为 1975 年国际大地测量与地球物理联合会第十六届大会推荐的数据。该坐标系的大地原点设在我国中部的陕西省泾阳县永乐镇，位于西安市西北方向约 60 km，故称 1980 西安坐标系，又简称西安大地原点。

1980 西安坐标系的参考椭球基本参数为：

长半轴 $a = 6\,378\,140\text{ m}$

短半轴 $b = 6\,356\,755.288\,2\text{ m}$

扁率 $f = 1/298.257$

第一偏心率平方为 $0.006\,694\,384\,999\,59$

第二偏心率平方为 $0.006\,739\,501\,819\,47$

地球引力场二阶带谐系数 $J_2 = 1.082\,63 \times 10^{-3}$

地球总质量与引力常数之积 $GM = 3.986\,005 \times 10^{14}\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$

自转角速度 $\omega = 7.292\,115 \times 10^{-5}\text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

椭球定位时，按我国范围内高程异常值平方和最小为原则求解参数。

③ 2000 国家大地坐标系——2000 国家大地坐标系是全球地心坐标系在我国的具体体现，其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心。2000 国家大地坐标系采用的地球椭球参数如下：

长半轴 $a = 6\,378\,137\text{ m}$

扁率 $f = 1/298.257\,222\,101$

地心引力常数 $GM = 3.986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$

自转角速度 $\omega = 7.292\,115 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

④ 独立坐标系——为了城市工程建设的需要，考虑到高斯投影、椭球面改正、长度变形等因素的影响，在某个区域内建立的坐标系。例如，重庆独立坐标，原点位于歌乐山，假设 $X = 50\,000$ ，一直向北延伸递增； $Y = 50\,000$ ，向东延伸递增而建立的一个数学坐标系。

⑤ 假设坐标系——人们为了满足工程的需要，而又不能与所规定的坐标系统联系在一起时（远离所规定的系统，又无 GPS 等困难的条件下），在某一地区或某一小块地范围内建立的一个数学坐标系。它的 X 、 Y 是可以任意假设的，以计算时数据不出现负数为原则（最好在设定起始点的 X 、 Y 值时，充分考虑所用地的范围，偏大一点就行了）。

1.4.2 高程系统

（1）高程——人们从侧面看物体，只能看到物体的上下（暂不要顾及它的左右关系），它们上下的差值叫高差（相对之差），也是两点的高程之差。“原点”高程——经多次、反复的测验之后，得出的一个观测计算值，并以此为起点，去推算其他各个点的高度数据，这个观测计算值就是高程原点，所得的高度数据也就是某一点的绝对高差（高程）。

（2）高程系统——在上下高度之“差”的关系中（几何数据关系）建立的绝对高度系统。

（3）我国的高程系统：

① 1956 黄海高程系——根据青岛验潮站 1950—1956 年验潮资料确定的黄海平均海水面作为高程起算面，以位于青岛市观象山的中华人民共和国水准原点作为原点而建立的国家高程系统。其水准原点的高程为 72.289 m ，国家于 1956 年正式启用，这一整套系统俗称为黄海高程。

② 吴淞高程系——这是我国最早启用的高程系统，早在清朝末年时就有了。该原点建立在我国上海吴淞口（上海造船厂内），现已报废（因造船引起严重下沉），由上海市城建局于 1960 年前重建所代替。

③ 1985 高程基准——基准面采用青岛大港验潮站 1952—1979 年确定的黄海平均海水面（即 1985 国家高程基准）。我国已于 1987 年重新启用、发布新高程系，其差值与黄海高程系只差几十厘米，其水准原点的高程为 72.260 m 。

④ 地方高程系——此高程系比较常见，每一个地区都可以建立一套高程系，如广东的珠江流域有珠江高程系、淮河有淮河高程系、黄河有黄河高程系等。

⑤ 假设高程系——任一地区都可以某点作为该地区的高程零点和高度测量的起测依据，以计算时不出现负数为原则，最好在设定起始点高程之值时，考虑偏大一点。这一套高程系统就是假设高程系。

1.4.3 三维关系

人们常说测量的三维关系就是平面加上高程的结合（ X 、 Y 、 H ）。因此，在我们测绘行业

上通常用 XY 来代表平面 (X 代表南北方向、 Y 代表东西方向), 用 H 来代表高程。

1.5 测量过程中的误差及其防止

测量是在自然环境中进行的, 受外来因素影响不可避免, 这也必然给工程带来不良影响, 甚至造成损失, 轻则返工, 重则造成严重的经济损失。现举两个实例: 一是作者亲身经历的一次返工事例。1992 年在河南的张村, 因大气折光差引起 K 值超限, 造成对向观测的高差之差严重超过国家限差, 返工几天。此类事例在全国还有很多很多……二是万州某水利工地的一条隧道, 因全站仪的 $2C$ 过大, 加上隧道偏长 (12 km 以上), 在贯通时穿袖 (贯通误差达到 2.3 m), 造成经济损失 10 多万。以上例子值得我们高度重视, 不可小看这些误差。我们测量中到底有哪几种误差? 这些误差又该怎样防止和消除?

1.5.1 测量误差

在测量的实施过程中, 尽管观测员和其他配合的工作人员严格认真地执行规定, 甚至采用比较精密的仪器和工具, 而且非常细心地去工作, 但多次观测结果总存在一些差异。在两已知点 (A 、 B) 间施测水准, 结果 $h_{AB} \neq H_A - H_B$; 用钢尺丈量一条边 (200 m), 结果这条边的长度不等于 200 m, 不多就少。这些差值 (误差) 的产生和存在的原因以及它的规律, 采取什么措施去减弱和消除它的影响, 是我们测量工作者的一项重要任务。

1. 人为误差

观测员和配合的工作人员, 由于感觉器官与鉴别能力和习惯、技术水平、工作责任心的不同, 会给测量带来影响 (误差)。

2. 设备误差

使用的设备 (仪器和工具) 在制造过程中由于生产工艺、取材质量以及出厂的检验、校装过程等的不同, 都将产生误差。

3. 外界误差

测量是在自然环境中进行的, 必然要受自然界各种各样的外来因素影响, 如水蒸气、冰雪、雷雨、风暴、地理磁场、地球球面正高、椭圆体等, 这些因素都将严重影响着我们的测量精度和成果。

在测量中, 人们总希望每次的观测结果误差越小越好, 甚至趋近于零。但要做到这一点, 就要使用极其精密的仪器设备, 采用十分严密的观测方法, 付出很高的成本。但在现实的生产过程中, 根据不同的工程对象和它所要达到的目的, 在一定规定要求 (要达到的标准) 下是允许测量的结果有误差的, 只要误差满足规范的要求。因此, 我们的目标并不是简单地使测量误差越小越好, 而是要尽可能地将测量误差减弱和消除。

1.5.2 误差的分类及减弱与消除误差

观测误差按其测量影响的性质可分为3类:

1. 粗 差

主要是由人为的疏忽大意、工作缺乏认真造成的明显歪曲测量结果的误差。例如,读数读错、数据记错和测量时标志对错等。

2. 系统误差

(1) 在相同的观测条件下,对某个量进行一系列观测,如果误差出现的符号和误差的大小均相同,或按一定的规律变化,这种误差称为系统误差。系统误差主要来源于仪器设备,如上面讲到的“经纬仪、全站仪的 $2C$ 与指标差”“水准仪的 i 角”“水准尺一米长度值”“全站仪的加、乘常数”“皮尺、基线尺的长度误差”、人为习惯(如看一个东西时,老爱上下或左右偏一点)、仪器的调焦不清等,其中有两处值得注意:

- ① 焦距必须调整以能看清楚物体为准;
- ② 仪器的十字丝必须调整清楚。

人们往往只注意焦距的调整而忽略十字丝必须调整清楚这一关键点。

系统误差具有积累性,对测量结果影响很大。但是,由于系统误差的符号和大小有一定的规律,我们应尽可能减弱、消除它到最低程度。常用的处理方法有:

- ① 检校仪器,把系统误差降低到最低程度;
- ② 加改正数,在观测结果中加入系统误差改正数;
- ③ 采用适当的观测方法,使系统误差相互减弱或抵消。

(2) 减弱和消除系统误差的方法。

所有使用的测绘测量仪器,都必须定期进行检验校正(做到即时发现,即时消除)。

① 第4章将对水准测量中系统误差的减弱和消除做较详细的介绍。其中控制前后视距差(不超过3 m)、前后视距累计差(不超过10 m),水准仪检验与校正并控制 i 角应达到规范要求(小于 $20''$)等都是减弱和消除系统误差的有效途径。

② 经纬仪、全站仪的 $2C$ 和指标差,除了检验校正可消除一部分外,在野外作业过程中,应进行正倒镜同时观测,加以改正和消除,特别是支站,更应采用。

$2C$ ——正镜读数(A) + 倒镜读数(A') $\pm 180^\circ = 2C$ 。用 $2C$ 的一半加正镜读数后作为观测值(以此值参加计算)。

指标差——正、倒镜两数读数之和不等于 360° ,其大于(或小于)的部分为指标差。当大于 360° 时,用大于部分的一半减去正镜读数后作为计算值;当小于 360° 时,用小于部分的一半加正镜读数作为计算之值。

上述方法可有效地克服 $2C$ 和指标差引起的误差(特别是支站,一定要按此方法进行改正)。

③ 皮尺、基线尺的长度误差,用较标准的尺子去作比较,求出它们的正、负差值,以此值对量测值进行改正。

④ 除了加强对仪器设备的检查与检验工作之外,对仪器的附件设备也应加强检查,如仪器脚架松动,全站仪的对中杆、气泡偏离,引起杆不铅垂等。

⑤ 对不利于测量的天气与自然环境（大风、大雨、暴热等恶劣天气）也应避免。

⑥ 加强操作人员的技术培训，提高业务水平，增强责任感的教育。

⑦ 通过测量特殊的技术处理——测量严密平差计算，可消除在测量中带来的系统误差。

在工程应用中如何减弱和消除误差的问题，我们还将介绍几个实例，供读者参考和借鉴。其中第 7.1 节对当前使用全站仪做高程控制导线测量（特别是精度要求较高）时提高观测精度，保证工程质量，提高工作效率有一定的帮助。

3. 偶然误差

在相同的观测条件下做一系列的观测，若误差的大小及符号都表现出偶然性，即从单个误差来看，该误差的大小及符号没有规律，但从大量误差的总体来看，具有一定的统计规律，这类误差称为偶然误差（随机误差）。例如，全站仪在测角中的照准误差；水准测量在过江测量作业时，同一目标进行重复多次观测读数之间出现的误差等。

1.5.3 偶然误差的统计特性

偶然误差的产生是多种综合因素所致，由于观测结果中不可避免地存在偶然误差，因此对此类误差，测绘界已作为一项主要误差来研究。就单个偶然误差而言，其大小和符号都没有律规性，呈现出随机性，但就其总体性而言却呈现出一定的统计规律性，并且是服从正态分布的随机变量。即在相同观测条件下，大量偶然误差分布表现出一定的统计规律性。例如，在相同的观测条件下：

电磁波测距三角高程测量代替三等水准试验，正好选择在两个一等水准点（ A 、 B ）上进行，测得一等水准点 A 至 B 的高差 $h_{AB} = 2.112\ 110\text{ m}$ ，通过三等水准试验平差后，算得三等 $h_{AB} = 2.132\ 112\text{ m}$ ，其差值几乎接近于 0。

在三等水准试验中，对 A 、 B 两点进行 24 次观测，每次观测高差减去一等水准的 A 、 B 两点高差（ $h_{AB} = 2.112\ 110\text{ m}$ ）为近似真值，即算得

$$\Delta h_i = h_i - h_{AB} \tag{1.3}$$

式中 h_{AB} ——一等水准的 A 、 B 两点高差（为真值）；

h_i ——三等水准试验每次观测高差；

Δh_i ——以上两数的差值（真误差）。

取真误差 Δh_i ，每间隔 1.0 mm，将 26 个真误差按正、负号与数值大小排列统计，如表 1.1 所示。

表 1.1 误差统计

误差所在区间	正误差（个）	负误差（个）	小 计
0 ~ 1 mm	5	4	9
1 ~ 2 mm	3	5	8
2 ~ 3 mm	2	2	4
3 ~ 4 mm	1	1	2
4 ~ 5 mm	1	1	2
>5 mm	0	1	1
合 计	12	14	26

误差的分布情况,除了采用表 1.1 的形式表达外,还可用图形来表达。例如,以横坐标表示误差的大小,纵坐标表示各个区间误差出现的相对个数 n_i/n (亦称为频率)除以闭合差的增量,即频率/组距来表达。作图时以横坐标误差区间为底,向上作矩形,使每个矩形的面积等于该区间误差出现的频率 n_i/n 。其中, n 为该差的总个数, n_i 为出现在该区间的误差个数,如图 1.5 所示。

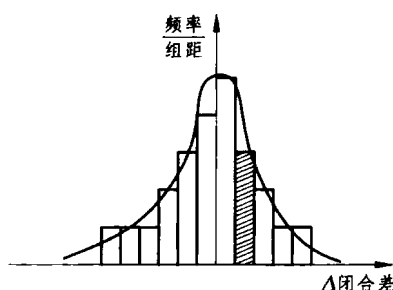


图 1.5

在同一观测条件下,随着观测次数的无限增多,即 $n \rightarrow \infty$ 时,误差出现在各个区间的频率也趋于一个确定的数值,这就是误差出现在各个区间的频率。一定的观测条件下,对应着一种确定的误差分布,若 $n \rightarrow \infty$, $d\Delta \rightarrow 0$,图 1.5 中各长方形顶边所形成的折线将变成一条曲线,该曲线就是误差的频率分布曲线,或叫做误差分布曲线。由此可见,偶然误差的频率分布随着 n 逐渐增大,都是以正态分布为其极限,通常也称偶然误差的频率分布为其经验分布,而将正态分布称为它们的理论分布,这样 Δ 的频率密度式为

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4)$$

式中, σ 为标准差,测量中称为中误差。

误差出现在某一区域内的频率 $P(\Delta)$ 为

$$P(\Delta) = \int f(\Delta) d\Delta \quad (1.5)$$

由表 1.1 和图 1.5 可知误差分布情况有如下 4 个特性:

- ① 绝对值小的误差出现的频率较绝对值大的误差出现的频率大。
- ② 绝对值相等的正负误差出现的频率大致相同。
- ③ 在一定的观测条件下,误差的绝对值有一定限值,也可以说,超出一定限值的误差其出现的频率为零。
- ④ 偶然误差的数学期望值为零。

1.5.4 小 结

测量过程出现误差是必然的,但误差并不可怕,关键在于人。只要我们通过以上分析掌握它的规律,并根据它的特性合理地处理观测数据(即根据一组带有偶然误差的观测值,求出未知量的最或然值,去衡量其精度),以减少偶然误差对测量成果的影响。