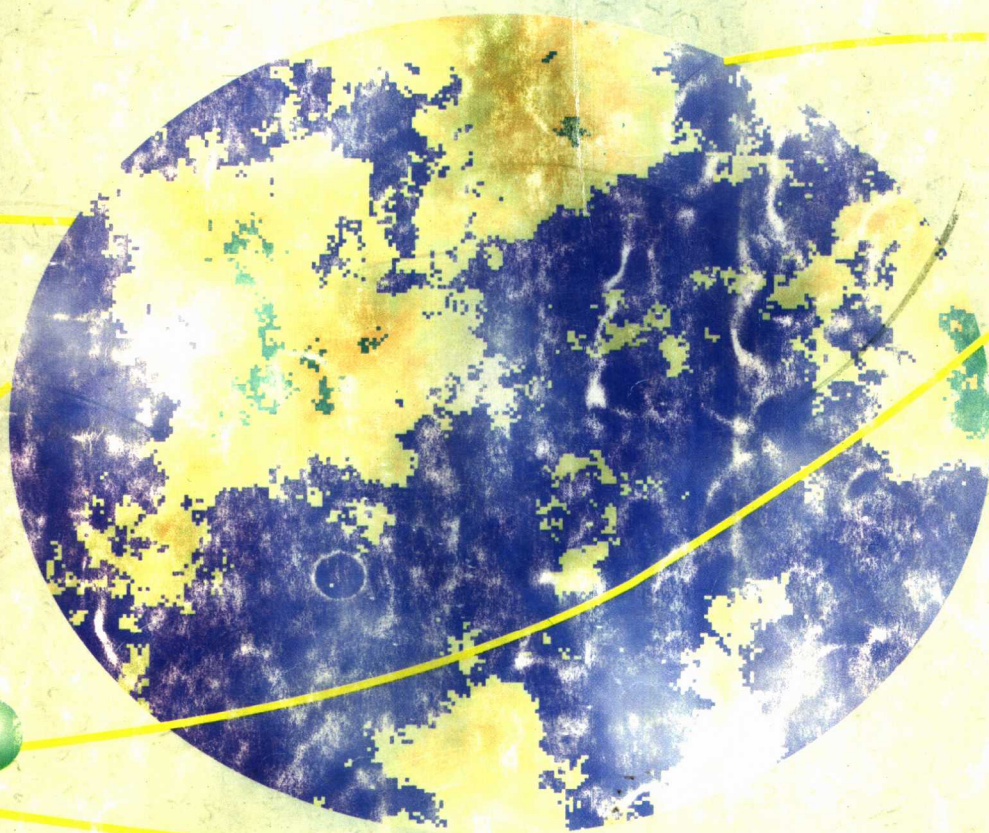


测绘科技丛书

控制测量学

孔祥元 梅是义 主编

上册



武汉测绘科技大学出版社

测绘科技丛书

控制测量学

上册

孔祥元 梅是义 主编

武汉测绘科技大学出版社

(鄂)新登字 14 号

内 容 简 介

《控制测量学》分上、下两册,本书是上册,共六章。

本书系统介绍了建立工程及国家测量控制网的原理、方法和使用的仪器,包括水平控制网和高程控制网的布设原则、技术设计、精密测角、测距及测高的方法和仪器,以及在这些方面的最新研究成果,同时还讲述了 GPS 卫星定位基础及应用。

本书为高等学校测量工程专业本科(包括日校和成人教育)教材,也可供其他测绘专业师生及科研和生产技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制测量学(上册)/孔祥元,梅是义主编. —武汉:
武汉测绘科技大学出版社,2000.2(2000.7重印)
ISBN 7-81030-479-8

I. 控… II. ①孔…②梅… III. 控制测量-测量学 IV. P221

责任编辑:张立福 封面设计:曾 兵
武汉测绘科技大学出版社出版发行
(武汉市珞喻路 129 号,邮编:430079)
核工业中南三〇九印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:18 字数:458千字
1996年10月第1版 2000年7月第5次印刷
印数:5501—7500册 定价:19.80元

前 言

控制测量学是高等学校测量工程专业的一门主干课程,在专业课程设置中具有重要地位和作用。十几年来,在学校大力支持下,我们在控制测量学教学及课程建设等方面做了一定的改革工作,在总结日校和成人教育多年教学经验和科研成果的基础上,根据现行教学大纲,特为测量工程专业本科学生新编了这套《控制测量学》上册及下册教材。

《控制测量学》上册内容主要讲述建立工程和国家水平及高程测量控制网的理论和方法。近年来,由于测量优化理论、自动化精密测量仪器以及空间大地测量技术的迅速发展,控制测量的内容也发生了很大变化。例如,建立在精度、可靠性及经济等全面质量标准基础上,以求得最佳设计方案的测量控制网设计理论日趋完善并开始运用;电子经纬仪、电子全站仪、精密电磁波测距仪以及精密自动安平及数字水准仪等新测量仪器和测量方法的出现和使用,特别是以GPS卫星定位技术为代表的空间大地测量技术的发展和运用,极大地促进着控制测量学的发展,并大大丰富了课程内容。显然,在本书中容纳如此繁多的内容,在教材组织及教学安排上都将有相当大的困难。为适应科技发展和教学改革需要,我们在编写本书时,紧紧围绕“测量控制网建立原理及方法”这一根本教学目的,精选教材内容,删繁就简,吐陈纳新,力求在加强基础理论和方法的基础上,理论联系实际,反映近代控制测量的新发展。

本书由孔祥元和梅是义主编,参加编写工作的有:刘志德、周泽远、张琰等。

本书承邢永昌教授、刘近伯副教授初审、朱鸿禧教授复审,并经测绘教材评审委员会审定通过,作为全国普通高等教育测绘类规划教材。在审定过程中提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨致衷心的感谢。由于编者水平有限,对书中可能存在的不足和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

1996年5月

目 录

第一章 绪论.....	(1)
§ 1.1 控制测量学的任务及其基本内容	(1)
§ 1.2 控制测量的基准面和基准线	(2)
§ 1.3 控制网的布设形式	(4)
§ 1.4 控制测量新技术的发展概况	(7)
第一篇 测量控制网技术设计与外业观测	(13)
第二章 水平控制网的技术设计	(13)
§ 2.1 国家水平控制网的布设原则和方案.....	(13)
§ 2.2 工程水平控制网的布设原则和方案.....	(18)
§ 2.3 三角锁推算元素的精度估算.....	(19)
§ 2.4 导线网的精度估算.....	(29)
§ 2.5 任意边角网的点位误差的概念.....	(40)
§ 2.6 工程水平控制网优化设计概述.....	(42)
§ 2.7 工程水平控制网技术设计书的编制.....	(47)
§ 2.8 选点、建标和埋石	(49)
第三章 精密测角仪器和水平角观测	(56)
§ 3.1 精密测角仪器的基本构造.....	(56)
§ 3.2 精密光学经纬仪Wild T ₃ 的构造特点	(56)
§ 3.3 Wild T ₃ 光学经纬仪的度盘读数显微镜的光学系统	(65)
§ 3.4 双平行玻璃板光学测微器的构造及测微原理.....	(67)
§ 3.5 双平行玻璃板光学测微器的检验.....	(68)
§ 3.6 双光楔光学测微器的构造及测微原理.....	(72)
§ 3.7 垂直度盘指标自动归零的补偿原理.....	(73)
§ 3.8 经纬仪的视准轴误差和水平轴倾斜误差.....	(74)
§ 3.9 经纬仪的垂直轴倾斜误差.....	(77)
§ 3.10 精密电子测角仪器	(82)
§ 3.11 精密测角的误差影响	(87)
§ 3.12 方向观测法	(92)
§ 3.13 分组方向观测法.....	(101)
§ 3.14 全组合测角法.....	(104)
§ 3.15 偏心观测与归心改正.....	(111)
第四章 电磁波测距.....	(120)

§ 4.1	电磁波及其在大气中的传播	(120)
§ 4.2	电磁波测距的出发公式及电磁波测距仪的分类、分级	(129)
§ 4.3	电光调制和光电转换	(131)
§ 4.4	脉冲法测距的基本原理	(137)
§ 4.5	相位法测距的基本原理	(141)
§ 4.6	相位测量的方法——自动数字测相	(145)
§ 4.7	干涉法测距的基本原理	(151)
§ 4.8	光波测距仪的合作目标	(152)
§ 4.9	光波测距仪的使用	(153)
§ 4.10	光波测距仪的检验	(164)
§ 4.11	光波测距成果的归算	(176)
§ 4.12	光波测距的误差来源及精度估计	(179)
§ 4.13	微波测距概要	(181)
§ 4.14	多波测距的基本理论	(186)
§ 4.15	多功能自动化测量系统简述	(187)
第五章	高程控制测量	(190)
§ 5.1	国家高程基准	(190)
§ 5.2	高程控制网的布设	(191)
§ 5.3	精密水准仪和水准尺	(194)
§ 5.4	补偿式自动安平水准仪	(200)
§ 5.5	精密水准仪和水准尺的检验	(206)
§ 5.6	精密水准测量的主要误差来源及其影响	(215)
§ 5.7	精密水准测量的实施	(221)
§ 5.8	跨河精密水准测量	(225)
§ 5.9	正常水准面不平行性及其改正数计算	(232)
§ 5.10	水准测量的概算	(236)
§ 5.11	三角高程测量	(241)
§ 5.12	电磁波测距三角高程测量的应用前景	(249)
第六章	GPS 卫星定位技术基础	(250)
§ 6.1	人造卫星轨道理论简介	(250)
§ 6.2	GPS 系统的构成与 GPS 信号	(252)
§ 6.3	伪距法定位	(255)
§ 6.4	载波相位法相对定位	(258)
§ 6.5	GPS 定位误差分析	(266)
§ 6.6	工程 GPS 测量技术概述	(272)
§ 6.7	GPS 动态定位基础	(277)
	主要参考文献	(282)

第一章 绪 论

§ 1.1 控制测量学的任务及其基本内容

1.1.1 控制测量的任务

控制测量是研究精确测定地面点空间位置的学科。由这些点位构成的网形称为控制网,其任务是作为较低等级测量工作的依据,在精度上起控制作用。

控制测量的服务对象主要是各种工程建设、城镇建设和土地规划与管理等工作。这就决定了它的测量范围比大地测量要小(例如,测区面积通常都在 $2\ 000\text{km}^2$ 以下),并且在观测手段和数据处理方法上还具有多样化的特点。

作为控制测量服务对象的工程建设工作,在进行过程中,大体上可分为设计、施工和运营3个阶段。每个阶段都对控制测量提出不同的要求,现分述如下:

1. 在设计阶段建立用于测绘大比例尺地形图的测图控制网

在这一阶段,设计人员要在大比例尺地形图上进行建筑物的设计或区域规划,以求得设计所依据的各项数据。因此,控制测量的任务是布设作为图根控制依据的测图控制网,以保证地形图的精度和各幅地形图之间的准确拼接。此外,对于随着改革开放而发展起来的我国房地产业,这种测图控制网也是相应地籍测量的根据。

2. 在施工阶段建立施工控制网

在这一阶段,施工测量的主要任务是将图纸上设计的建筑物放样到实地上去。对于不同的工程来说,施工测量的具体任务也不同。例如,隧道施工测量的主要任务是保证对向开挖的隧道能按照规定的精度贯通,并使各建筑物按照设计的位置修建;放样过程中,仪器所安置的方向、距离都是依据控制网计算出来的。因而在施工放样之前,需建立具有必要精度的施工控制网。

3. 在工程竣工后的运营阶段,建立以监视建筑物变形为目的的变形观测专用控制网

由于在工程施工阶段改变了地面的原有状态,加之建筑物本身的重量将会引起地基及其周围地层的不均匀变化。此外建筑物本身及其基础,也会由于地基的变化而产生变形。这种变形,如果超过了某一限度,就会影响建筑物的正常使用,严重的还会危及建筑物的安全。在一些大城市(如我国的上海、天津),由于地下水的过量开采,也会引起市区大范围的地面沉降,从而造成危害。因此,在竣工后的运营阶段,需对这种有怀疑的建筑物或市区进行变形监测。为此需布设变形观测控制网。由于这种变形的数值一般都很小,为了能足够精确地测出它们,要求变形观测控制网具有较高的精度。

以上 2,3 阶段布设的两种控制网统称为专用控制网。

1.1.2 控制测量的基本内容

控制测量作为一项工程同样也分为3个阶段。在控制网的设计阶段,主要内容是进行网的可行性论证,估计网的技术经济指标,撰写技术设计报告等。在施测阶段主要是根据技术设计报告进行网的布测:踏勘选点、埋石、建标、观测、数据处理等。在使用阶段,主要是对控制网的成果进行有效的管理,以便能够迅速、准确地为各项工程建设提供有用的资料,此外还包括对网的维护和补测等。

还应说明的是,以上3阶段的划分界线并不是十分明确的。例如在施测阶段,有可能发现技术设计不符合实际,因而需局部地修改设计,这实际上又重新进行了设计和施测;同样在控制网的使用阶段,由于包括了网的维护和补测,因而部分地反复进行上述3阶段的工作也时有发生。

§ 1.2 控制测量的基准面和基准线

1.2.1 铅垂线与大地水准面

地球上的任一点,都同时受到两个作用力:地球自转的离心力和地心引力,它们的合力称为重力,重力的方向即为铅垂线方向(见图1-1)。

处于静止状态的水面,例如平静的湖泊水面,即表示一个水准面。水准面必然处处与重力方向(即铅垂线方向)垂直,否则水就要流动,处于运动状态。在地球引力起作用的空间范围内,通过任何高度的点都有一个水准面。

观测水平角时,置平经纬仪就是使仪器的纵轴位于铅垂线方向,从而使水平度盘位于通过度盘中心的水准面的切平面上。因此,所测的水平角实际上就是视准线在水准面上的投影线之间的夹角。此外,用水准测量所求出的两点间的高差,就是过这两点的水准面间的垂直距离。对于边长的观测值,也存在化算到哪个高程水准面上的问题。

上述3类地面观测值,除水平角外,都同水准面的选取有关,特别是水准测量的结果,更是直接取决于水准面的选择。于是,为了使不同测量部门所得出的观测结果能够互相比较,互相统一,互相利用,有必要选择一个最有代表性的水准面作为外业成果的统一基准。

我们知道,海洋面积约占地球总面积的71%,从总体上来说,海水面是地球上最广大的天然水准面。设想把平均海水面扩展,延伸到大陆下面,形成一个包围整个地球的曲面,则称这个水准面为大地水准面,它所包围的形体称为大地体。由于大地水准面的形状和大地体的大小均接近地球自然表面的形状和大小,并且它的位置是比较稳定的,因此,我们选取大地水准面作为测量外业的基准面,而与其相垂直的铅垂线则是外业的基准线。

1.2.2 参考椭球与总地球椭球

如上所述,虽然大地水准面最适合于作为测量外业的基准面,但是控制测量的最终目的是

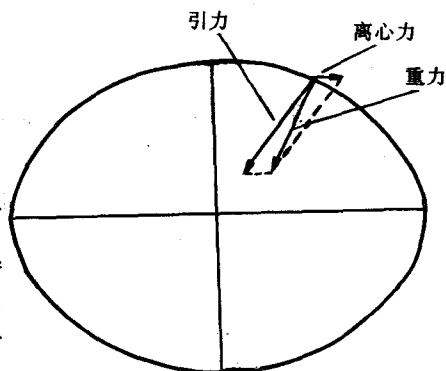


图 1-1

精确决定控制点在地球表面上的位置，为此必须确知所依据的基准面的形状。也就是，基准面的形状要能用数学公式准确地表达出来。大地水准面是否能满足这一要求呢？研究表明，大地水准面是略有起伏的不规则的表面，无法用数学公式把它精确地表达出来，因而也就不确知其形状。这是由于地表起伏以及地层内部密度的变化造成质量分布不均匀的缘故。例如图 1-2 中，高山的右侧是一片谷地，且山体下部有重金属矿体，因而造成左、右两侧局部质量分布的较大差异，以致左侧引力增加，铅垂线向左偏斜，大地水准面稍微隆起，如虚线所示，呈现出不规则的变化。

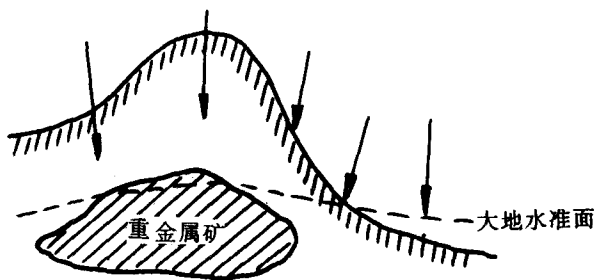


图 1-2

随着科学技术的发展，人类逐渐认识到地球的形状极近于一个两极略扁的旋转椭球（一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体）。对于这个椭球的表面，可用简单的数学公式将它准确地表达出来，因而世界各国通常都采用旋转椭球代表地球。它的形状和大小与椭球的长短半径 a, b 有关，也可用和这两个量有关的其它量来表示。

选好一定形状和大小的椭球后，还不能直接在它上面计算点位坐标，这是因为我们的测量成果不是以这个表面为根据的，而应该首先将以大地水准面为基准的野外观测成果化算到这个表面上。要做到这一点只选定椭球面的形状和大小是不够的，还必须将它与大地水准面在位置上的关系确定下来，这个工作称为椭球定位。

综合以上所述，我们把形状和大小与大地体相近并且两者之间的相对位置确定的旋转椭球称为参考椭球。参考椭球面是测量计算的基准面。世界各国都根据本国的地面测量成果选择一种适合本国要求的参考椭球，因而参考椭球有许多个。这样确定的参考椭球在一般情况下和各国领域内的局部大地水准面最为接近，对该国的常规测绘工作较为方便。然而当我们将各国的测量成果联系起来进行国际间的合作时，则参考椭球的不同又带来了不便。因此，从全球着眼，必须寻求一个和整个大地体最为接近的参考椭球，称为总地球椭球。

总椭球的确定，必须以全球范围的大地测量和重力测量资料为根据才有可能。然而由于地球上海洋面积约占地球总面积的 71%，因而过去只根据占少数的陆地测量成果推算总地球椭球是不可能的。近年来，由于人造卫星大地测量技术的发展，已根据人造卫星和陆地大地测量的成果求出一些总地球椭球的近似数据供使用。人们最终将使用总地球椭球。

1.2.3 垂线偏差和大地水准面差距

如上所述，无论是参考椭球或总地球椭球，其表面都不可能与大地水准面处处重合，因而在同一点上所作的这两个面的法线，即大地水准面的铅垂线与椭球面的法线也必然不会重合（见图 1-3），两者之间的夹角 u 称为垂线偏差。 u 在子午线和卯酉线上的投影分量通常分别以 ξ, η 表示。大地

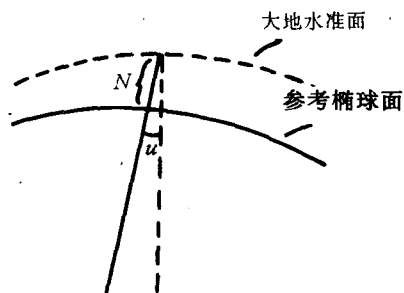


图 1-3

水准面与椭球面在某一点上的高差称为大地水准面差距,用 N 表示。当前者高于后者时, $N > 0$; 反之, $N < 0$ 。

§ 1.3 控制网的布设形式

1.3.1 水平控制网的布设形式

1. 三角网

1) 网形

在地面上选定一系列点位 $1, 2, \dots$, 使互相观测的两点通视; 把它们按三角形的形式连接起来即构成三角网。如果测区较小, 可以把测区所在的一部分椭球面近似看作平面, 则该三角网即为平面上的三角网(图 1-4)。三角网中的观测是网中的全部(或大部分)方向值(有关方向值的观测方法见第三章), 图 1-4 中每条实线表示对向观测的两个方向。根据方向值即可算出任意两个方向之间的夹角。

若已知点 1 的平面坐标 (x_1, y_1) , 点 1 至点 2 的平面边长 $s_{1,2}$, 坐标方位角 $\alpha_{1,2}$, 便可用正弦定理依次推算出所有三角网的边长、各边的坐标方位角和各点的平面坐标。这就是三角测量的基本原理和方法。

以图 1-4 为例, 待定点 3 的坐标可按式计算

$$s_{1,3} = s_{1,2} \frac{\sin B}{\sin C} \quad (1-1)$$

$$\alpha_{1,3} = \alpha_{1,2} + A \quad (1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{1,3} &= s_{1,3} \cos \alpha_{1,3} \\ \Delta y_{1,3} &= s_{1,3} \sin \alpha_{1,3} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= x_1 + \Delta x_{1,3} \\ y_3 &= y_1 + \Delta y_{1,3} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

即由已知的 $s_{1,2}, \alpha_{1,2}, x_1, y_1$ 和各角观测值的平差值 A, B, C 可推算求得 x_3, y_3 。同理可依次求得三角网中其它各点的坐标。

2) 起算数据和推算元素

为了得到所有三角点的坐标, 必须已知三角网中某一点的起算坐标 x_1, y_1 , 某一起算边长 $s_{1,2}$ 和某一边的坐标方位角 $\alpha_{1,2}$, 我们把它们统称为三角测量的起算数据(或元素)。在三角点上观测的水平角(或方向)是三角测量的观测元素。由起算元素和观测元素的平差值推算出的三角形边长、坐标方位角和三角点的坐标统称为三角测量的推算元素。

3) 工程测量中三角网起算数据的获得

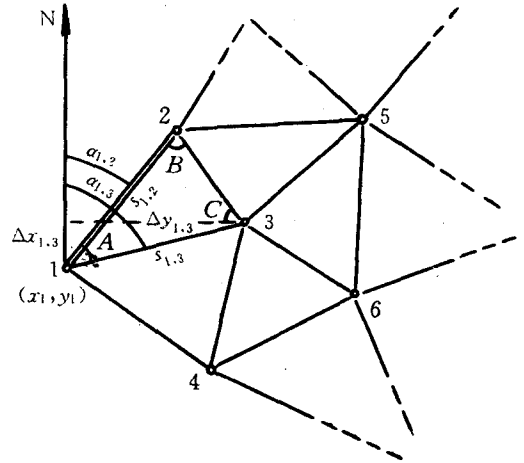


图 1-4

工程测量中,三角网起算数据可由下列方法求得:

(1)起算边长 当测区内有国家三角网(或其它单位施测的三角网)时,若其精度满足工程测量的要求,则可利用国家三角网边长作为起算边长。若已有网边长精度不能满足工程测量的要求(或无已知边长可利用)时,则可采用电磁波测距仪直接测量三角网某一边或某些边的边长作为起算边长。

(2)起算坐标 当测区内有国家三角网(或其它单位施测的三角网)时,则由已有的三角网传递坐标。若测区附近无三角网成果可利用,则可在一个三角点上用天文测量方法测定其经纬度,再换算成高斯平面直角坐标,作为起算坐标。保密工程或小测区也可采用假设坐标系统。

(3)起算方位角 当测区附近有控制网时,则可由已有网传递方位角。若无已有成果可利用时,可用天文测量方法测定三角网某一边的天文方位角再把它换算为起算方位角。在特殊情况下也可用陀螺经纬仪测定起算方位角。

(4)独立网与非独立网 当三角网中只有必要的一套起算数据(例如一条起算边,一个起算方位角和一个起算点的坐标)时,这种网称为独立网。图 1-5 中各网都是独立网,其中(a)称为中点多边形,是三角网中常用的一种典型图形。

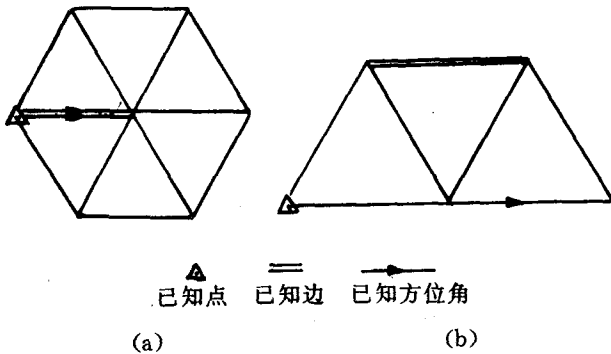


图 1-5

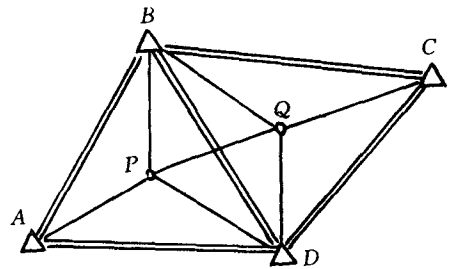


图 1-6

如果三角网中具有多于必要的一套起算数据时,则这种网称为非独立网。例如图 1-6 为相邻两三角形中插入两点的典型图形。A,B,C 和 D 都是高级三角点,其坐标、两点间的边长和坐标方位角都是已知的。因此,这种三角网的起算数据多于一套,属于非独立网,又称为附合网。图中的 P,Q 为待定点。

2. 导线网

导线网是目前工测控制网较常用的一种布设形式,它包括单一导线和具有一个或多个结点的导线网。网中的观测值是角度(或方向)和边长。独立导线网的起算数据是:一个起算点的 x, y 坐标和一个方向的方位角。

导线网与三角网相比,主要优点在于:

- (1)网中各点上的方向数较少,除节点外只有两个方向,因而受通视要求的限制较小,易于选点和降低觇标高度,甚至无须造标。
- (2)导线网的图形非常灵活,选点时可根据具体情况随时改变。
- (3)网中的边长都是直接测定的,因此边长的精度较均匀。

导线网的缺点主要是:导线网中的多余观测数较同样规模的三角网要少,有时不易发现观测值中的粗差,因而可靠性不高。

由上述可见,导线网特别适合于障碍物较多的平坦地区或隐蔽地区。

3. 边角网和三边网

边角网是指测角又测边的以三角形为基本图形的网。如果只测边而不测角即为三边网。实际上导线网也可以看作是边角网的特殊情况。

上述3种布设形式中,三角网早在17世纪即被采用。随后经过前人不断研究、改进,无论从理论上还是实践上逐步形成一套较完善的控制测量方法,这就是“三角测量”。由于这种方法主要使用经纬仪完成大量的野外观测工作,所以在电磁波测距仪问世以前的年代,三角网是布设各级控制网的主要形式。三角网的主要优点是:图形简单,网的精度较高,有较多的检核条件,易于发现观测中的粗差,便于计算。缺点是:在平原地区或隐蔽地区易受障碍物的影响,布网困难大,有时不得不建造较高的觐标。

随着电磁波测距仪的不断完善和普及,导线网和边角网逐渐得到广泛的应用。尤其是前者,目前在平原或隐蔽地区已基本上代替了三角网作为等级控制网。由于完成一个测站上的边长观测通常要比方向观测容易,因而在仪器设备和测区通视条件都允许的情况下,也可布设完全的测边网。在精度要求较高的情况下(例如精密的变形监视测量),可布设部分测边部分测角的控制网或边、角全测的控制网。

4. GPS网

进入90年代,随着GPS定位技术在我国引进,许多大、中城市及工程测量单位开始用GPS布设控制网。目前GPS相对定位精度,在几十公里的范围内可达 $1/1\,000\,000 \sim 1/100\,000$,可以满足《城市测量规范》对城市二、三、四等网的精度要求(二等最弱边相对精度 $1/300\,000$)。然而在高程方面,GPS测得的高程是相对于椭球面的大地高,而水准测量求出的则是相对于大地水准面的高程,由图1-3可知两者之差就是大地水准面差距 N 。目前在大多数情况下,其值难以精确决定,因此GPS暂时只能用于平面等级控制网的布设。

当采用GPS进行相对定位时,网形的设计在很大程度上取决于接收机的数量和作业方式。如果只用两台接收机同步观测,一次只能测定一条基线向量。如果能有三四台接收机同步观测,则可布设如图1-7所示的由三角形和四边形组成的网形。其中图(a),(b)为点连接,表示在两个基本图形之间有一个点是公共点,在该点上有重复观测;图(c),(d)为边连接,表示每个基本图形中,有一条边是与相邻图形重复的。

在GPS网中也可在网的周围设立两个以上的基准点。在观测过程中,这些基准点上始终设有接收机进行观测。最后取逐日观测结果的平均,可显著提高这些基线的精度,并以此作为固定边来处理全网的成果,将有利于提高全网的精度。

1.3.2 高程控制网的布设形式

国家高程控制网是用水准测量方法布设的,其布设原则与平面控制网布设原则相同。根据分级布网的原则,将水准网分成四个等级。一等水准路线是高程控制的骨干,在此基础上布设的二等水准路线是高程控制的全面基础;在一、二等水准网的基础上加密三、四等水准路线,直接为地形测量和工程建设提供必要的高程控制。按国家水准测量规范规定,各等级水准路线一般都应构成闭合环线或附合于高级水准路线上。

工测高程控制网的布设也应遵守前述控制网布设的原则。

关于工测高程控制网的布设方案,《城市测量规范》规定,可以采用水准测量和三角高程测量。水准测量分为二、三、四等,作为工测高程控制网或专用高程控制网的基础。首级水准网等级的选择应根据城市面积的大小、城市的远景规划、水准路线的长短而定。首级网应布设成闭

合环线,加密网可布设附合路线、结点网和闭合环。只有在山区等特殊情况下,才允许布设水准支线。

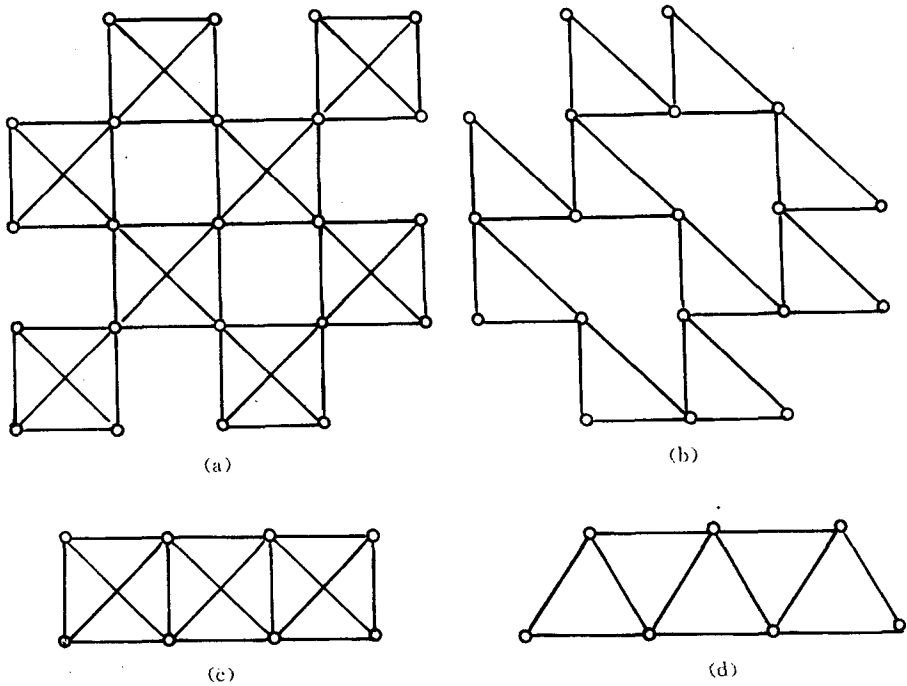


图 1-7 GPS 测量基本图形连接方案

三角高程测量主要用于山区的高程控制和平面控制点的高程测定。应特别指出的是电磁波测距三角高程测量,近年来经过研究已普遍认为该法可达到四等水准测量的精度,也有人认为可以代替三等水准测量。因而《城市测量规范》规定,根据仪器精度和经过技术设计认为能满足城市高程控制网的基本精度时,可用以代替相应等级的水准测量。

§ 1.4 控制测量新技术的发展概况

控制测量的基本任务,就是精确测定地面点的空间位置。过去采用的主要方法,是常规的三角测量和几何水准测量。近 30 年来,由于电子学、激光技术、电子计算机和空间技术的迅速发展,使得控制测量学在理论和技术上都产生了重大变革。以下仅对这些新方法的概况作一简略的介绍,其具体内容将在有关章节作详细说明。

1.4.1 精密测角仪器的发展概况

50 年代,精密测角仪器的主要改进是采用了垂直度盘指标自动归零补偿器和光学对中器,从而取消了指标水准器并使对中精度由 3mm 提高到 0.5mm。精密测角仪器的重大发展是从 60 年代以来实现读数的数字化开始的。由于采用光栅度盘或编码度盘代替了光学玻璃度盘,测量数据可直接在屏幕上显示出来或自动记录在磁带上,进而同微型计算机相结合,实现了角度观测过程中观测值的获取、传输、处理的自动化,这种经纬仪称为电子经纬仪。电子经纬仪的构造,使其能够较好地消除仪器本身的许多误差(如度盘刻划误差等),因此其精度可以达

到甚至超过精密光学经纬仪的精度。例如,瑞士 Kern 公司的 E₂ 电子经纬仪,方向观测的标称精度为 $\pm 0.3'' \sim \pm 0.6''$ 。

为了消除大气折光误差对角度观测值(特别是垂直角)的影响,人们仿照电磁波测距中为削弱这类误差而采用双频载波测距的方法,也采用双频电磁波测角。据悉,欧洲的著名仪器公司已制成这类仪器的样机。

1.4.2 电磁波测距仪发展概况

早在 20 年前,电磁波测距仪已经成为正规的精密测距仪器,并应用于生产实际。以后,由于激光、半导体、微电子技术的发展,促进了电磁波测距仪向着体积小、重量轻、精度高和自动化方向产生飞跃的变化。

第一代电磁波测距仪用普通光源,它只能在夜间观测。后来,用激光光源代替普通光源,出现了激光测距仪。这种测距仪既缩小了仪器的尺寸和重量,又能昼夜进行测距,最长可测至 50km。激光测距仪的最新发展有两种类型:一是短程高精度测距仪,如 Kern 公司的 ME-5000 测距仪,在 8km 的测距范围内误差小于 2mm。另一种是采用双频激光的测距仪,它可用两种不同载波频率的激光测距,以便自动改正气象的影响,它的最大测程约 30km,每公里精度可达 0.2mm。然而由于这种仪器的技术要求复杂,价格昂贵,至今未能批量生产。

60 年代初,采用砷化镓发光管发射的红外光代替普通光,出现了所谓红外测距仪,如瑞士 Wild 公司的 DI-5 红外测距仪。这类测距仪小巧精致并能自动显示距离,精度为 $(3\text{mm} + 2 \times 10^{-6}D)$,用于精密测边测角的专用控制网或导线网中最为合适。这类仪器的最大测程约 3~5km。瑞典 AGA 公司的 AGA-14 型红外测距仪测程为 10km 左右,从而改变了红外测距仪只能进行短程测距的看法。

电磁波测距仪的发展,必然走向与电子经纬仪相结合的途径,从而形成既能测距又能测角的全能仪器,通常称其为全站型电子速测仪。这种仪器具有测距、测角、记录、计算甚至平差等多种功能。在一个测站上就可以得到所需的全部测量数据(甚至包括坐标、方位角等推算数据),故简称为全站仪。

第一台全站仪是 Opton 公司于 1968 年生产的 Elta-14,它的体积虽然较大且比较笨重,但却具备了现代全站仪的雏形。该仪器包括 4 个基本组成部分:电子经纬仪,电磁波测距仪,数据记录仪,反射镜和电源。从仪器结构上来看,全站仪可分为两类。一类是整体式结构,即上述 4 个部分,除反射镜外,均装在同一个机壳内,如 Opton 公司的 Elta2。其测程小于 5km,测距精度为 $\pm (5\text{mm} + 2 \times 10^{-6}D)$,测角精度约 $\pm 0.85''$ 。另一类是组合式结构,即电子经纬仪和电磁波测距仪从外部组合在一起,后者可以取下,或用同一公司生产的其它类型的测距仪替换使用。数据记录器也可单独用于电子经纬仪或测距仪。这种类型的仪器具有很大的灵活性,例如 Wild 公司的 T 2000 S 加测距仪即属此类。该仪器的测角精度约为 $\pm 0.7''$,可配套使用的测距仪有该公司生产的 DI 1000,DI 4,DI 5 等多种。

1990 年 Geotronics 公司和 Leica 公司率先研制成功各自的测量机器人并投放市场。这意味着在野外用地面测量仪器采集信息的工作已全部实现了自动化。

所谓测量机器人,是在前述普通全站仪的基础上,采用伺服电机驱动和其它光电技术,进一步实现了寻找和照准给定目标自动化的测量系统。Geotronics 公司测量机器人 Geodimeter 4400 由全站仪主机和遥控定位器(RPU)两部分组成,后者包括反射镜在内。两者都装有遥测通讯线路,以实现信息的相互转换和通讯,作用半径可达 1 600m。在测量员手持反射镜选定观

测目标的同时,可通过 RPU 与测站上的仪器通讯,并控制其完成全部观测任务。当系统工作时,全站仪可根据反射镜反回的测距信号确认和改进它对反射镜的照准,甚至具有跟踪活动反射镜的功能。于是,使用这种仪器只需一个人便可完成普通全站仪至少要两人才能完成的工作,因而该公司称其为“单人全站仪”。

Leica 公司的测量机器人系统简称为 APS (Automated Polar System),主要硬设备为自动经纬仪 TM 3000V 加测距仪,此外还有反射镜、外部微机和控制器。TM 3000V 后面的字母 V 表示仪器望远镜上带有目镜 CCD 摄影机,其功能是实现自动识别目标并使其影像聚焦。测距仪用字母 D 表示,因此 TM 3000 V/D 表示经纬仪上既有 CCD 摄影机,也有测距仪。该系统的观测程序完全由外部微机中的软件(名为 APS Win)控制运行。运行中,仪器自动搜寻目标是以内存中的参考文件的数据为根据的。为了形成这种参考文件,在测站上安置好仪器开始观测前,需由观测员亲手进行概略的预观测。这时,由于仪器上没有通常的制动、微动螺旋,测量员只能使用外部微机上的键盘或用控制器通过操纵杆控制其运行,由此形成初步参考文件。此后,则由微机控制仪器自动进行观测并逐步形成有效的参考文件,然后才能开始正式观测。

测量机器人的应用范围较普通全站仪更加广泛。在过去那种测量员使用普通全站仪难以进行工作的环境下,现在都可用测量机器人代替,因此无论对于控制测量或工程测量的各个领域,其应用前景是极其广阔的。

澳大利亚的新南威尔士大学测量学院于 1990 年购买了一套 APS 并将其改装成便携式系统。图 1-8 是该系统的配置略图。

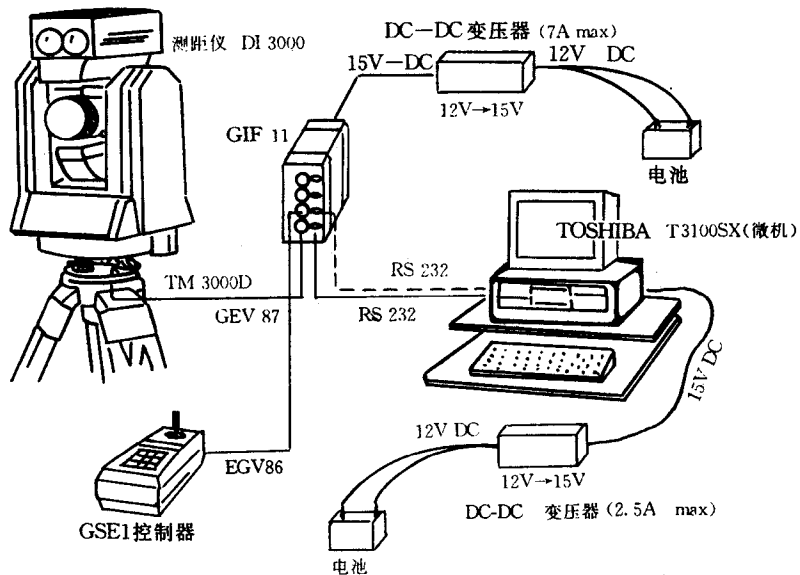


图 1-8 APS 系统配置略图

1.4.3 精密水准仪的发展概况

20 世纪以来,水准仪的发展可分为 4 个阶段。第一阶段是以 1908 年威特(H. Wild)在德国

Zeiss 公司改进的一系列水准仪为标志,其特点是采用了平板玻璃测微器。例如 Wild N₃ 和 Zeiss Ni 004 都属于这种类型的仪器。第二阶段是以 Opton 公司于 1950 年开始发展的自动安平水准仪为代表的仪器。我国引进的 Zeiss 公司的 Ni 007 以及 Opton 公司的 Ni 1 都是精密自动安平水准仪。第三个阶段为“摩托化”水准测量,即用汽车运载仪器、标尺和作业人员以提高作业效率,减轻劳动强度。用于“摩托化”水准测量的水准仪有 Zeiss 公司研制的 Ni 002 自动安平水准仪。它采用悬挂式摆镜,可以旋转 180°并在两个位置上读数,视线绝对水平。仪器的目镜可旋转,观测者在固定坐位上可进行前后视读数。此外,脚架和标尺都作了改变,以适应摩托化的要求。汽车上备有数据记录装置,用以记录观测数据,一段水准路线完成后,立即获得高差。“摩托化”方法是德国德累斯顿工业大学研究成功的。

1990 年 Wild 公司研制出新型水准仪 NA 2000,这标志着水准仪的研究进入了一个新的阶段——数字化阶段。这种仪器做到了水准测量的读数、记录、处理全部自动化,从而基本结束了水准仪的落后状态,达到可与电子经纬仪相媲美的程度。

1.4.4 电子计算机在测量上的应用

电子计算机的应用使人类生活的各个领域,其中包括控制测量的计算工作,都发生了巨大的变革。以往,测量的计算工作采用手摇计算机进行,因而在内业工作上花费了大量的人力和时间。如今这些工作几乎全部为电子计算机所代替。由此产生的高效率是空前的。例如过去用手算几十个线性方程式已是一项繁重的工作,现在用电子计算机可进行数万个线性方程式的解算。我国天文大地网的平差计算就是利用大型电子计算机完成的。全网由一、二、三等三角网(锁)和导线网组成,总共约有 5 万个控制点和 30 余万个观测方程式,平差工作历时 6 年多。如果不是使用大型电子计算机,要完成规模如此巨大的控制网整体平差是难以设想的。

电子计算技术不仅应用于控制测量的数据处理,而且也普遍用于现代化的数据采集设备(全站仪、数字水准仪、测距仪以及下面将介绍的卫星定位系统、惯性系统等)本身的计算、控制和管理。此外,还应强调的是,由于计算机除具有数值计算的功能外,还具备信息处理的功能,并且随着计算机技术的迅速发展而日益完善。其应用受到社会的普遍重视,各种数据库应运而生,并在此基础上形成大型的信息系统,如 GIS(地理信息系统)等,成为各种领域中信息管理、分析、决策的重要工具。

在测绘领域,“全国测绘资料档案管理系统”已研制成功,近期将开始运行。“全国大地测量资料管理信息系统”是其中的一个子系统,其任务是实现大地(控制)测量资料的管理、检索计算机化,为用户提供规范化的成果,对测绘事业给以有力的专业信息支持。这是电子计算机应用的又一个重要领域。

1.4.5 GPS 系统和 ISS 系统

1. GPS 系统

GPS(Global Positioning System)系统,起初是美国国防部为了满足军事上对定位和导航的需要于 1972 年着手研制的。然而实验证明由于该系统可以连续实时地提供高精度的空间位置,在测量、制图、资源勘察、导航等许多领域有着广泛的应用,因而已引起了有关领域的十分关注。GPS 研究计划于 1995 年以前全部完成。

GPS 系统包括 3 部分:空间部分、地面跟踪控制部分和用户(接收)部分。空间部分包括有 24 颗卫星,分布在 6 个近似圆形的轨道上运行,每颗卫星都可发出两种频率的无线电信号。这

些信号中都加上了包括卫星的位置、状态等信息在内的调制。卫星的轨道参数等有用的信息都由地面跟踪控制部分加以测定,并发射到卫星上去。用户部分主要是地面接收机和信号处理设备,用于接收和加工卫星发出的无线电信号。

由接收机收到的卫星信号中可得到有关卫星位置的信息,从而求得卫星的三维坐标,因而可把卫星看作是在天上的坐标已知的控制点。如果我们能测定地面点 j (即接收机) 与 4 颗卫星之间的距离,则形成一个空间测边交会图形,如图 1-9 所示。根据这 4 颗卫星的坐标和相应的 4 条边长可解算出 j 点的坐标 x_j, y_j, z_j 和时钟差 4 个未知数。这就是 GPS 定位的原理。

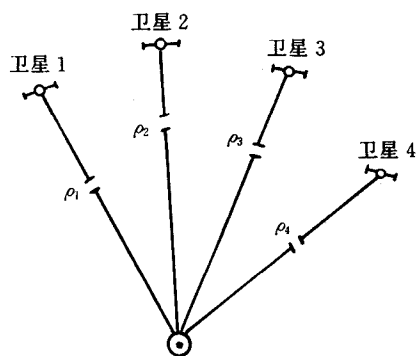


图 1-9

GPS 定位有绝对定位(又称单点定位)和相对定位两种方式。前者可确定测站点在地心坐标系中的绝对位置,精度只有 20m 左右。近年来,由于美国采取保密措施,实行所谓 SA 政策,单点绝对定位精度下降至 $\pm 100\text{m}$ 。相对定位需利用 2 台以上的接收机同时观测同一组卫星,然后计算接收机之间的相对位置。由于此法可抵消大部分误差,因而相对定位精度可达 $1/1\,000\,000 \sim 2/1\,000\,000$ 。以上指的是平面位置的精度,至于在高程方面,由于 1.3.1 之“4”所述的理由,目前用 GPS 确定的高程,还达不到我国有关规范对等级水准的精度要求。

GPS 系统和传统的地面测量方法相比主要有以下优点:

(1) 精度上与精密地面测量的结果相当,且今后进一步提高的潜力还很大。

(2) 作业方便,速度快。使用 GPS 可省去传统的造标工作,选点工作也大为简化;观测可在全天候条件下进行;接收机(测站点)的三维绝对坐标可即时得出;至于精确的相对坐标需在观测完成后,经过平差处理,才能求得。目前已出现手持式小型接收机,空间绝对定位开始变成一项简单的工作。

(3) 从长远看,经济上有利。目前 GPS 接收机价格还较贵,然而随着产品的定型和批量生产以及市场的扩大,价格将迅速下降。

综合以上所述,可见 GPS 系统的应用将使控制测量领域产生深刻的变革,然而 GPS 系统也有它的不足。例如,在选点上,也要求站点向天空有一定宽度的视野等,这就限制了在建筑物较多和不够开阔的地区使用 GPS。另外,在几百米的短距离内,要求得到精确的边长和角度值,使用 GPS 通常还不如用测距仪或经纬仪来得迅速、准确。因此, GPS 系统不可能完全代替传统的测量手段。

2. ISS 系统

ISS 系统全名为 Inertial Surveying System,即惯性测量系统。它是根据惯性导航原理制成的一种自动提供地面点坐标的装置。该装置用汽车或直升飞机运载,从一个已知点出发向待定点前进。从起程开始该装置连续不断地测定自身在固定的空间坐标系中沿三个坐标轴方向的加速度 $\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$,通过系统中的计算机将它们对时间进行两次数值积分,求出相对已知点的三维坐标差,并进而求得其自身在任一时刻的空间坐标。这就是惯性测量系统作业的概略过程。

惯性系统包括惯性平台、加速度计、计算机 3 个主要部分。惯性平台的作用主要是建立一