

高等学校教学用书

矿区控制测量

上册

阜新矿业学院 中国矿业学院
焦作矿业学院 合编

煤炭工业出版社

高等学校教学用书
矿区控制测量
上册

阜新矿业学院 中国矿业学院 焦作矿业学院 合编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $19^{1/2}$

字数464千字 印数1—6,400

1980年2月第1版 1980年2月第1次印刷

书号15035·2253 定价2.00元

前 言

《矿区控制测量》教材是根据煤炭工业部1978年高等教育座谈会制定的矿山测量专业教学计划和教学大纲的要求编写的。总结了1973年阜新矿业学院、四川矿业学院、焦作矿业学院、西安矿业学院等四院校合编《矿区控制测量》教材的经验，加强了基础理论，增加了电磁波测距和应用电子计算机平差三角网等新技术，加强了矿区控制网平差计算和设计等有关内容。

本教材分上、下两册，上册共七章，包括：总论、矿区控制点点位的设置、精密长度测量、精密光学经纬仪及其检验、精密角度测量、高程测量、椭球与高斯投影平面直角坐标、三角测量概算。下册共五章，包括：三角网按条件观测平差、三角网按间接观测平差、应用电子计算机平差三角网、矿区控制网精度估算、矿区控制网设计。本教材供煤炭系统高等院校矿山测量专业试用、也可供煤炭系统矿山测量专业技术人员参考。

本教材由阜新矿业学院负责主编，参加编写的有：阜新矿业学院刘光宗(第七、八、九章)、杨志强(第六、十一章)、袁维山(第五章)，中国矿业学院叶玉田〔总论、第一、二、十(部分)、十二章〕，焦作矿业学院季振邦〔第三、四、十(部分)章〕等同志。

承武汉测绘学院、同济大学、中国人民解放军测绘学院等院校的测量教研室，云南大学数学教研室，北京矿务局、长江流域规划办公室、河南省煤田地质局物测队、湖北综合勘察院等单位为本教材提供了资料和提出了宝贵意见，谨向这些单位和同志们表示衷心的感谢。

由于我们理论水平不高，实践经验不足，本教材肯定存在不少缺点甚至错误，恳请读者予以批评指正。

编 者

一九七八年十二月

目 录

总论	1
第一节 矿区控制测量的任务和内容	1
第二节 测定控制点点位的方法	2
第三节 国家控制网的基本概念	9
第一章 矿区控制点点位的设置	15
第一节 矿区控制测量的踏勘	15
第二节 矿区水平控制网的选点工作	15
第三节 矿区三角测量觇标的建立	22
第四节 矿区三角测量中心标石的埋设	27
第五节 矿区高程控制网的选线和标石的埋设	31
第二章 精密长度测量	33
第一节 概述	33
第二节 电磁波测距的基本概念	33
第三节 相位法测距原理	36
第四节 JCY-2精密激光测距仪简介	48
第五节 JCY-2精密激光测距仪的使用方法	51
第六节 JCY-2精密激光测距仪观测成果的整理	55
第七节 激光测距的误差分析	60
第八节 铟钢尺丈量距离简介	64
第三章 精密光学经纬仪及其检验	73
第一节 精密光学经纬仪简介	73
第二节 光学测微器原理	80
第三节 经纬仪三轴误差	83
第四节 精密光学经纬仪的检验和校正	89
第五节 精密光学经纬仪的维护	101
第四章 精密角度测量	103
第一节 水平角观测误差	103
第二节 方向观测法及其测站平差	112
第三节 方向分组观测法及其测站平差	118
第四节 归心改正及归心元素的测定	122
第五节 垂直角观测	134
第六节 观测作业的实施及成果整理	139
第七节 制定观测限差的方法	141
第五章 高程测量	146
第一节 精密水准仪、水准尺及其检验	146
第二节 水准测量的误差影响及其减弱的措施	156
第三节 水准观测及其限差	158
第四节 跨越障碍物的水准测量	164

第五节	水准面的不平行性和高程系统	166
第六节	水准测量外业计算	169
第七节	水准网的平差计算	174
第八节	三角高程测量	178
第九节	三角高程测量成果整理与平差计算	182
第十节	三角高程测量的精度及其应用	187
第六章	椭球与高斯投影平面直角坐标	190
第一节	椭球的基本知识	190
第二节	地面观测值化算至椭球面	205
第三节	椭球面上的元素化算至高斯平面的概念	207
第四节	高斯投影的基本公式	211
第五节	椭球面上三角网的起始数据化算至高斯投影平面上的示例及说明	228
第六节	高斯坐标的换带	235
第七节	新、旧坐标的换算	246
第七章	三角测量概算	252
第一节	外业资料检查	252
第二节	编制起算数据表和绘制三角网略图	253
第三节	归心改正计算	254
第四节	方向改正计算	258
第五节	按三角网几何条件检查观测成果的质量	261
第六节	几何条件闭合差超限时的误差分析	268
附录		272
附录一	三角测量归心改正计算用表	272
附录二	计算球面角超、方向改正、距离改正所需的 f 、 f' 表	294
附录三	方向改正数 δ 表	295
附录四	距离改正数 ΔS 计算用表	300
附录五	法截线曲率半径计算用表	302
附录六	卯酉圈、子午圈、平均曲率半径 N 、 M 、 R 表	304
主要参考文献		305

总 论

第一节 矿区控制测量的任务和内容

一、矿区控制测量的任务和作用

矿区控制测量的任务是，在矿区范围内的地面上，通过建立水平控制网和高程控制网，精确地测定控制点的位置——水平坐标（ x 、 y ）和高程（ H ）。

矿区控制测量和其它科学一样，它的发生和发展从一开始便是由生产决定的。当前为了发展煤矿生产，向现代化进军，就要大力开发各种矿藏资源，提供物质基础。为此，就需要查清矿产资源的埋藏及矿床的分布情况；拟定矿区开发规划和工程设计；组织矿区建设和指挥生产等。进行这些工作首先都需要有详细和精确的地形图。为使测绘的地形图能互相拼接和保持精度均匀，不致发生重测、漏测的现象，在一个矿区就要建立一个具有必要精度和坐标系统统一的矿区控制网，作为全矿区施测地形图的基础。

在矿区建设和生产时期，还需要进行各种工程测量。如按照设计要求，在地面上对各种建筑物进行放样和安装设备，要使它们轴线之间的相关位置达到一定的精度要求；地面和井下的联系测量、巷道相向工作面的贯通测量、采空区的地表移动观测等，都需要矿区控制测量提供有关地面控制点（如近井点）的精确位置——水平坐标和高程。所以，矿区控制网也是矿区各种测量工作的基础。

由此可见，矿区控制网在矿区测量中发挥了控制全局，限制测量误差的传递和积累，供作各项测量工作的基础等作用。

矿区控制网是矿区一项重要的基本建设，是开发矿藏资源不可缺少的重要一环。在一定意义上说，矿区控制测量工作的好坏，将直接影响着矿区建设的速度和各项工程质量，甚至会造成严重事故。为此，我们矿山测量工作者，一定要明确自己的光荣职责，为革命刻苦钻研技术，努力学好《矿区控制测量》知识，增强为人民服务的本领，迅速而又高质量地完成各矿区控制测量任务，为我国在本世纪实现四个现代化做出应有的贡献。

至于国家控制网，除了具有矿区控制网相同的任务外，还肩负着科学任务即：为研究地球的形状和大小提供主要资料；为研究地壳水平、垂直运动，大陆漂移，海洋面高度变化等提供精确的数据。

二、矿区控制测量研究的内容

地面上一点的位置是由水平位置—— x 、 y 和高程—— H 确定的。从《测量学》中知道，这些元素是根据测定的边长、角度、高差计算得到的。确定高级控制点点位和确定图根点点位的方法基本上一样，所不同的只是它的边较长，精度要求较高。根据上述矿区控制测量的任务，它是一门研究在矿区广大的面积上，如何精确测定点位的一门技术科学。为此，矿区控制测量研究的主要内容为：

按照总路线的精神，多快好省地建立全矿区统一的控制网——水平控制网和高程控制网，并确定相应的精度指标；

控制点点位既是根据相应的边长、角度、高差等元素值计算确定的。所以，要研究测边、测角、测高的仪器的构造、性能，作业方法以及消除或减弱各种误差影响的措施，以保证测量成果有足够的精度；

根据野外观测的边长、角度、高差，研究推算控制点点位的理论和方法，求得点位的坐标、高程的最或是值。

第二节 测定控制点点位的方法

一、野外测量的基准面——水准面和大地水准面

地面观测都是在复杂的地球表面上进行的。那么，地球表面是一个什么样的表面呢？

地球是在不停地旋转。因此，地球上每一点都有一个离心力；另外，地球本身又有巨大的质量，对地球上每一点又有一个吸引力。所以，地球上每一点都受两个力的作用，即离心力和地球吸引力(图 1)。这两个力的合力，就是作用于该质点的重力。重力的作用线就是铅垂线。

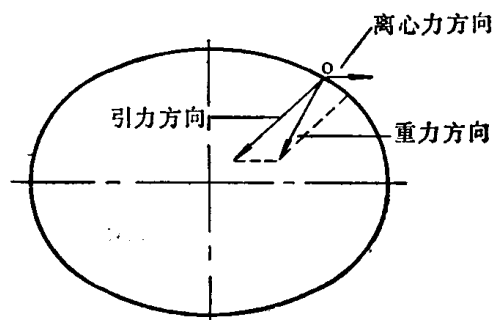


图 1

当液体处于静态时，其表面必然处处与重力方向(铅垂线)正交，否则液体就要流动(图 2)。

我们称液体的静止表面为水准面。可见，水准面是一个客观存在的，处处与铅垂线相垂直的面。例如不论将容器放在那里，只要注入液体，就形成一个水准面。由于地球附近的空间或内部，处处都有重力作用存在，所以通过不同高度的点，都有一个水准面。在起伏不平的地球表面就存在着无数个水准面。

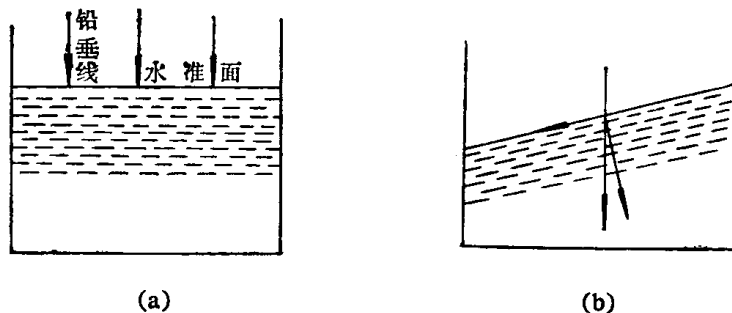


图 2

控制测量的水平角观测，是在仪器整平、对中的情况下进行的，所以，测得的角度值是在某一水准面上的水平角度；长度测量则是距离二端点铅垂线间的距离，故它是某一水准面上的长度；测得的高差是水准面间的垂直距离。因此，通常将水准面称为测量野外作业的工作表面。

显然，在起伏不平的地球表面上，测得的各种成果，是在不同水准面上的数值。但是，要比较各观测值的大小，必须要有一个共同的标准，为此，就要在无数个水准面中选择一个作为共同的基准面，来比较它们的大小、长短和高低。

那么，应选择那个水准面作为基准面呢？

在地球表面上，我们知道海洋面占地球总面积的百分之七十，所以，海洋的静止表面

是地球上最广大的一个水准面，其形状和大小均接近地球的自然表面，这个水准面在测量上称为大地水准面。它所包围的整体，称为大地体。大地水准面是实际存在的，同时，它的位置也比较稳定，因此，我们就选择大地水准面作为测量的基准面。

既然选择大地水准面作为测量的基准面，那末测量的成果就应该以它作为共同的基准面。但从实践和理论证明，各点所测的水平角，虽然是在各个不同水准面上，而它和以大地水准面为准的角值相差甚小，完全可以忽略。因此，各等级水平控制测量测得的角值，均可直接看作是大地水准面上的角值；至于在不同高度的水准面上量得的边长，则须化算到大地水准面上；地面点的高程则是从静止的海洋面起算的。

大地水准面确定为控制测量工作的基准面。

那么，大地水准面具有什么特性呢？若地球内部质量分布均匀，地球又是一个真正的椭球，则所有的铅垂线必然按照一个简单的规律逐渐变化，水准面就成为一个简单的曲面。但实际上地球表面是起伏不平的，地球的地壳内部物质密度分布也极不均匀。由于地下物质密度分布不均匀，使各点吸引力大小不同，也就引起地面各点的铅垂线方向发生不规则的变化(图3)。所以，处处和铅垂线方向成正交的大地水准面，是一个略有起伏不规则的表面。

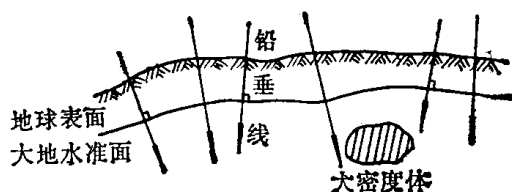


图 3

在上节曾指出，控制点的点位是由野外测得的边长、角度、高差等基本元素计算得到的。显然，大地水准面虽被确定为野外测量的基准面，由于它的不规则性，仍不能在此表面上进行计算，尚待于选取一个能用数学方法表示的、在形状和大小方面都很接近大地体的基准面来代替这一表面。有关这一问题将在第六章中介绍。

二、测定控制点水平位置的方法

(一) 天文测量方法

宇宙间天体的相关位置和运行都有一定的规律。天文测量就是利用其规律，在选定的地面点上，观测某天体（主要是恒星）的高度和方向，并记录观测瞬间的时刻，从而确定该地面点的地理位置——天文经、纬度及由该点至另一地面点的天文方位角。这种方法是各点单独进行观测的，彼此之间没有任何依赖关系。因此，它的优点是工作组织简单和测量误差不致累积。但是天文测量方法测定点位的精度不高（ $\pm 5 \sim 9$ 米），而且受垂线偏差的影响很大，如果地面上某点的垂线偏差达到 $\pm 3'' \sim 4''$ 时，则表现在地面上的点位误差就将达到 $\pm 90 \sim 120$ 米，即使经过垂线偏差改正，它的剩余误差仍有 $1''.0 \sim 1''.5$ 左右，这在地面上的点位误差仍有 $30 \sim 50$ 米。所以，一般不用天文测量方法来直接测定点位。

但是，天文测量对垂线偏差的确定，重力点位置的测定，在没有大地点的区域进行小比例尺测图，拉普拉斯方位角的测定，以及起始点坐标、起始方位角的确定等仍有它的实际意义。

(二) 大地测量方法

大地测量方法是根据大地基准点的起始数据(坐标和方位角)，借助于地面测得的水平距离和水平角，来推算控制点坐标的一种方法。这种方法要求各点间互相联系，彼此通视，因此组织工作比较复杂，而且在推算过程中，测量误差还会不断累积。但它是利用几何图形关系来推算各点坐标的，能够达到很高的精度，所以，它是建立水平控制网的主要

方法。大地测量方法，按其构成控制网的形式和直接观测元素的不同，可以分为三角测量、导线测量和三边测量等，现分别介绍如下：

1. 三角测量法

在地面上选定一系列互相通视的点，彼此构成一系列的三角形，如图 4 中的 1、2、3……等，这些三角形所构成的图形称为三角网。所有三角形的顶点称为三角点。

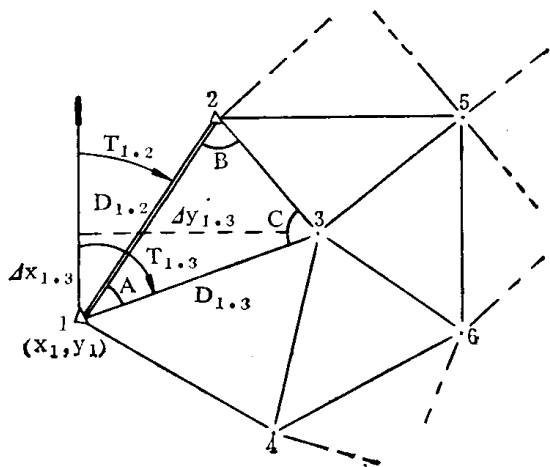


图 4

若已知其中 1 点的坐标，1 至 2 点的边长 $D_{1.2}$ 及方位角 $T_{1.2}$ ，并通过观测得到的网中各个角度如 A、B、C 等，并化为平面上的角值。那就可推算出三角网的边长、各边的坐标方位角，各点的平面坐标。如在三角形 1 2 3 中，

$$D_{1.3} = D_{1.2} \frac{\sin B}{\sin C} \quad T_{1.3} = T_{1.2} + A$$

$$\Delta x_{1.3} = D_{1.3} \cos T_{1.3} \quad \Delta y_{1.3} = D_{1.3} \sin T_{1.3}$$

$$x_3 = x_1 + \Delta x_{1.3} \quad y_3 = y_1 + \Delta y_{1.3}$$

这就是由 1 点推求 3 点坐标的计算公式。同理，可依次推得网中其它各点的坐标。这就是三角测量的基本原理和方法。

以三角形作为三角网的基本图形是因为：（1）三角形是最简单的几何图形；（2）便于应用正弦定理推算边长；（3）对所测的内角有足够的几何条件的校核。

在网中，至少应该知道一条边长、一个点的坐标及一条边的坐标方位角，通常分别称它们为三角测量的起始边长、起始坐标和起始坐标方位角，并统称为三角测量的起始数据或起始元素。在各三角点上所观测的水平角（或方向）则称为三角测量的观测元素。由起始元素和观测元素的平差值推算得到的边长、坐标方位角和坐标称为三角测量的推算元素。

矿区控制测量中，三角网起始数据可由下列方法取得：

（1）起始边长：测区内已有国家三角网（或其它单位施测的三角网）的成果，其精度又能满足矿区控制测量的要求，则可直接利用已知的边长为起始边长。当原有三角网边长精度不能满足要求时（或测区附近没有已施测的三角网可供利用），则应直接丈量三角网某一边（或用基线与基线网求得某一边长）作为起始边长。

（2）起始坐标：当测区内已有国家三角网（或其它单位已施测的三角网）的坐标成果，则由已有的控制点坐标传递。若测区附近没有已知的坐标成果可供利用时，如有条件，可在一个三角点上用天文测量方法测定其经、纬度，再换算成平面直角坐标，否则也可采用假定的起始坐标。

（3）起始坐标方位角：当测区内已有国家三角网（或其它单位已施测的三角网）的坐标方位角成果可供利用时，则从已知坐标方位角传递。否则用天文测量方法直接测定某一边的天文方位角作为起始方位角（当要求不高时可测定某一边的磁方位角作为起始坐标方位角）。

2. 导线测量

在地面上选定相邻点间互相通视的一系列点 1、2、3……，联成一条折线，称为导

线(图 5)。若已知其中一点的坐标和一条边的坐标方位角, 如 x_1 、 y_1 和 $T_{1.0}$, 再测量其中

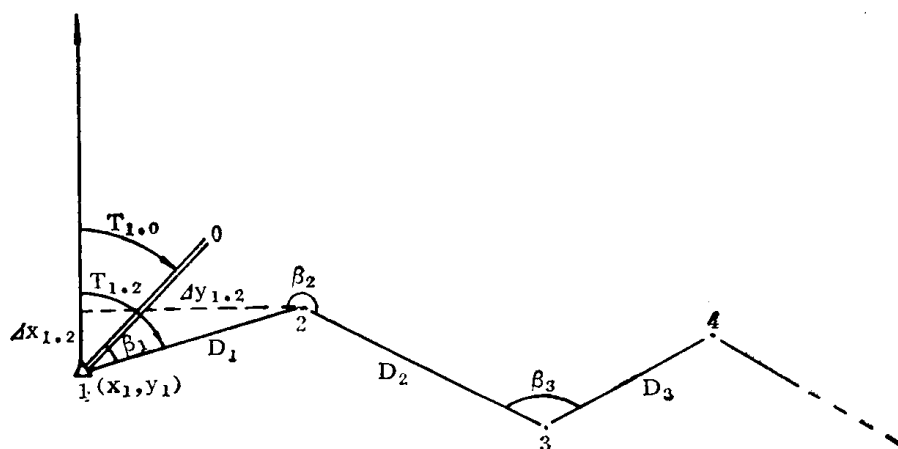


图 5

各边边长及转折角, 并化算为平面上的边长和角度。则根据已知的平面方位角 $T_{1.0}$ 和点 1 的平面坐标 x_1 、 y_1 , 依次推算导线中各边的方位角和各点的坐标, 如

$$T_{1.2} = T_{1.0} + B_1$$

$$\Delta x_{1.2} = D_1 \cos T_{1.2}$$

$$\Delta y_{1.2} = D_1 \sin T_{1.2}$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x_{1.2}$$

$$y_2 = y_1 + \Delta y_{1.2}$$

以上各式即由 1 点推求 2 点坐标的公式。同理, 可推得其它各边的坐标方位角和各点的坐标。这就是导线测量的基本原理和方法。

这时的起始元素是: 起始坐标和起始坐标方位角; 观测元素是: 各边边长和各顶点的折角; 推算元素是: 各边的坐标方位角和各点的坐标。

3. 三边测量

随着电磁波测距技术的发展, 克服了量距的困难, 提出了三边测量的方法。所谓三边测量就是在三角网中不测各三角形的内角, 而用电磁波测距仪直接测定各三角形的边长, 利用三角学中的余弦定理推算各三角形的内角, 最后推得各边的方位角和各点坐标(图 6)。

$$\cos A = \frac{D_b^2 + D_c^2 - D_a^2}{2D_b D_c}$$

$$T_{1.3} = T_{1.2} + A$$

$$\Delta x_{1.3} = D_c \cos T_{1.3}$$

$$\Delta y_{1.3} = D_c \sin T_{1.3}$$

$$x_3 = x_1 + \Delta x_{1.3}$$

$$y_3 = y_1 + \Delta y_{1.3}$$

以上各式是三边网由 1 点推算 3 点坐标和 1-3 边坐标方位角的公式。同理, 可推出其它边的坐标方位角和各点坐标。

在三边网中的起始元素是: 起始坐标方位角和起始点坐标; 观测元素是: 三角形各边边长; 推算元素是: 三角形各内角、各边坐标方位角, 各点坐标。

综上所述, 三角测量采取网状布设时, 控制面积较大, 网的几何条件多, 作业中便于检核, 精度较高。但是网中除起始边外, 其余各边均是推算出来的, 距起始边越远, 推算

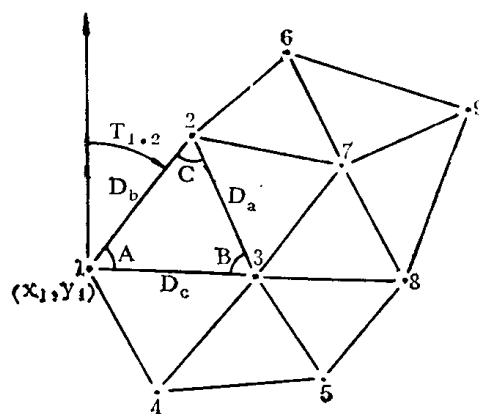


图 6

边长的精度越低,因而边长精度不均匀。但是,若在网中适当位置上加测起始边和起始方位角,可以控制误差的传播,弥补上述缺点,保证三角网有足够的精度。

导线测量用单线布设,比较灵活,在隐蔽地区容易克服地形障碍;边长都直接测定,精度均匀。但是,在结构上几何条件少,作业中难于及时检核,在精度上不如三角测量有保证,而且在野外作业中,既要测角又要测边,工作组织比较复杂。

上述对比表明,三角测量是建立控制网比较适合的一种方法。至于导线测量虽然由于电磁波测距技术的发展,克服了量距的困难,布设网形灵活,选点较易;但是,它在几何结构及组织工作上的缺点,使它在一般地区,在经济上、效率上仍不如三角测量有利,所以未能得到广泛应用。目前只能把它作为在高原、荒漠、人烟稀少等特殊困难地区布网的一种方案。因此,三角测量仍是当前布设国家和矿区控制网的最主要方法。

三边测量工作组织较复杂,经费开支也比三角测量大,几何条件也不如三角测量。另外,由于网中各边方位角是通过边长推算的,精度较低。为了保持一定的精度,就要布设相当密度的天文点,从而增加天文测量的工作量,所以,这种方法还没有被普遍采用。

若在测角三角网的基础上,加测某些边的边长(或全部边长),称为边角同测法。这种方法,可以提高三角网的精度,减小点位的误差。由于加测了求距边,网中的图形形状可不受那么严格的要求,从而降低了对点位的苛刻要求,使选点灵活、造标费用降低。所以这是一种比较适宜的布网方法,是今后改进三角网测设的一个方向。

(三) 卫星大地测量

随着第一颗人造地球卫星进入轨道,近二十年来航天技术有了飞跃的发展。卫星大地测量就是随着航天技术的发展而发展起来的一门新兴学科。

卫星大地测量一般分为几何卫星大地测量和动力卫星大地测量两种。前者按几何方法推算大地点位,后者按卫星轨道求地球重力场、地球形状和大小以及卫星轨道运动的各种摄动。

几何卫星大地测量,又可按其是否需要已知卫星轨道参数,分为空中三角测量法和轨道法两种。

空中三角测量法,是一种在卫星轨道参数未知时,确定测站位置的一种方法。按观测方法的不同分为:方向观测法(摄影观测法)、激光测距法、多普勒方法等三种。现分别介绍如下:

1. 方向观测法(摄影观测法):方向观测法是在地面测站上,以恒星为背景,对卫星进行拍摄,将得到一张上面既有卫星影象,又有恒星影象的底片。由于各恒星在摄影瞬间的天球坐标是已知的,所以,可借此推算得到卫星的天球坐标值,从而也确定了测站点至卫星的方向 γ_A 。如果我们在A、C两测站上对卫星进行同步摄影观测,就能分别得到测站A、C至卫星S的方向 γ_A 、 γ_C ,它们与连结测站的弦AC构成了一个平面——同步平面(图7)。如果测站A、C上还进行了第二次同步摄影观测,又将得到一个同步平面,两个同步平面的交线,即为连结两测站的弦AC。如果在测站B、C之间也进行了这样的同步观测,BC弦也能确定。若A、B为已知测站,那么可以从解算三角形ABC中,求得C点——未知点的坐标值。依此逐点扩展就可构成卫星大地网。

2. 激光测距法:激光测距法是在地面三个已知点A、B、D和一个未知点C上,对三个卫星进行同步测距(图8)。这一方法的基本思想是,先在三个已知点上,以前方交会确

定卫星 S_1 、 S_2 、 S_3 的位置；再以后方交会法由已知卫星位置 (S_1 、 S_2 、 S_3) 确定未知点 C 的坐标值。

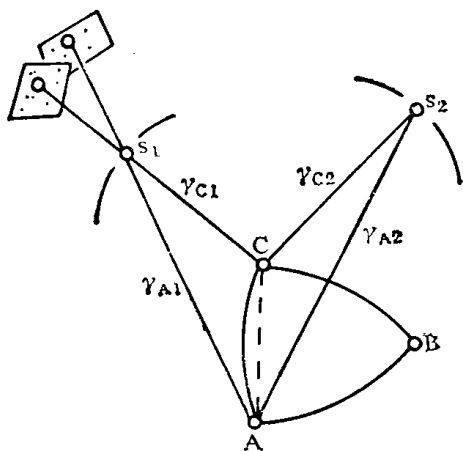


图 7

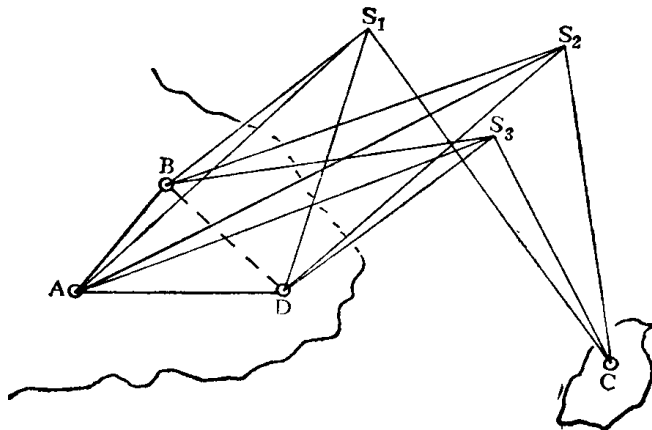


图 8

3. 多普勒方法：多普勒方法测定点位是利用多普勒效应在测站上测得测站点至卫星的径向距离差的变化，达到测站定位的目的。

卫星上发射固定频率为 f_s 的电磁波，由于卫星和地面接收站有一个相对速度，所以地面站接收到的卫星信号，就有频率的变化，即变化的接收频率 f 。这种频率变化的现象称为多普勒效应。由物理学知，接收频率 f 是发射频率 f_s 、传播速度 c 和单位时间内距离变化 $\frac{dD}{dt}$ 的函数，即

$$f = f_s \left(1 + \frac{\frac{dD}{dt}}{c} \right)$$

或

$$\frac{dD}{dt} = \frac{c(f - f_s)}{f_s}$$

式中的 D 为卫星到地面站的距离； $\frac{dD}{dt}$ 为单位时间内的距离变化，也称径向速度。卫星发射频率 f_s 和地面站收到的频率 f 的差值 $\Delta f = f_s - f$ 称为多普勒频率或多普勒频移(位移)，即

$$\Delta f = f_s - f = -\frac{f_s}{c} \frac{dD}{dt} = -f_s \frac{\frac{dD}{dt}}{c}$$

图 9(a) 表示一颗卫星沿其轨道在某时间段内的位置。如 S_i 为时间 t_i 的卫星位置， S_j 为时间 t_j 的卫星位置。卫星在这些时刻发射信号，地面站 M 则在 $t_i + \Delta t_i$ ， $t_j + \Delta t_j$ 时刻接收到这些信号。这里

$$\Delta t_i = \frac{S_i M_i}{c} = \frac{D_i}{c}$$

$$\Delta t_j = \frac{S_j M_j}{c} = \frac{D_j}{c}$$

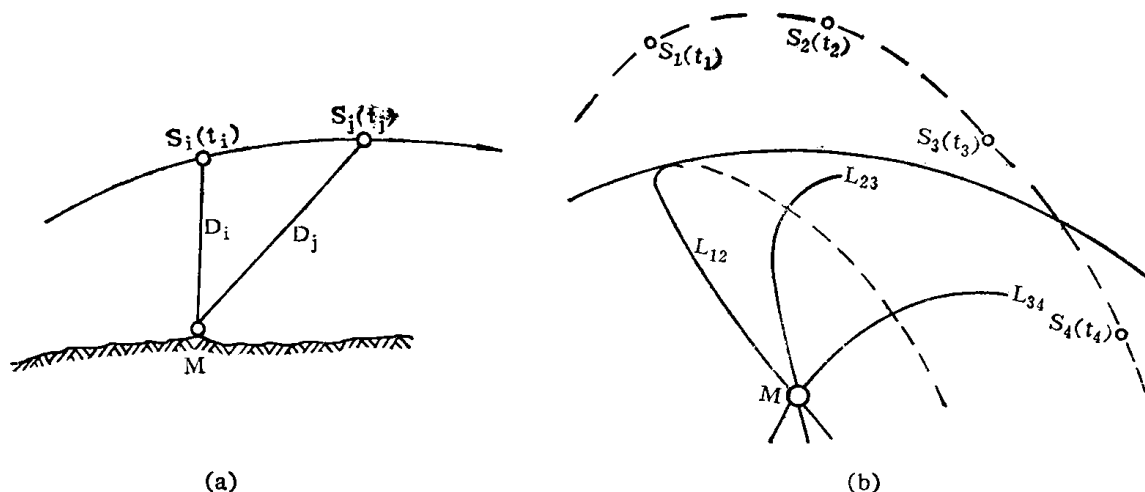


图 9

即信号从卫星送到M点所需的时间。时段 $t_{ij} = t_j - t_i$ 内频移的累积值N称为多普勒计数。若在地面接收机内增加一个固定参考频率 f_K （称本机振荡频率或简称本振频率）。则对于 S_i 到 S_j 的连续时间间隔的N值可用积分方法求得，下面不加推导的给出求N值的公式为

$$N = (f_K - f_s)(t_j - t_i) + f_K(\Delta t_j - \Delta t_i)$$

即

$$\Delta t_j - \Delta t_i = \frac{1}{f_K} [N - (f_K - f_s)(t_j - t_i)]$$

因为 $\Delta t_j - \Delta t_i$ 是运行路程 D_j 和 D_i 的时间差，所以可得距离差的公式为

$$\begin{aligned} D_j - D_i &= c(\Delta t_j - \Delta t_i) \\ &= \frac{c}{f_K} [N - (f_K - f_s)(t_j - t_i)] \end{aligned}$$

上式的右端都是观测量或已知常数。按上式即可求出测站点M到卫星的两个位置 S_1 、 S_2 间的距离差。此方法称为多普勒积分法。

从几何学中知，如果一动点到两定点距离之差为常量，则此动点的轨道是双曲线，两个定点 F_1 、 F_2 叫做双曲线的焦点。因此，当卫星两位置 S_1 、 S_2 已知时，由多普勒积分法求出M到 S_1 、 S_2 的距离差，则M点就应位于以 S_1 和 S_2 为焦点的一个双曲面上，即在该双曲面与地球面相交而得出的一条曲线（ L_{12} ）上〔图9（b）〕；若在 S_2 和 S_3 之间再进行多普勒测量和计算距离差，又可得到第二条曲线（ L_{23} ），这时M点就在 L_{12} 、 L_{23} 二条曲线两个相交点中的一个点上；如再在 S_3 、 S_4 之间进行多普勒测量和计算距离差，就可得到第三条曲线（ L_{34} ），这样就可确定M点的位置。所以，多普勒方法测定点位，就是以相应于时间 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n 的卫星位置 S_1 、 S_2 、 S_3 …… S_n 为焦点的一系列双曲面来确定点位的方法。

从上面简要的介绍可以看出，空中三角测量法的特点是以卫星作为一个空间目标来传递坐标。而所求未知站的坐标与已知站的坐标系是完全相同的。确定测站点坐标除了空

中三角测量法外，还有需要事先知道卫星轨道参数的轨道法。

卫星大地测量除了应用于洲际联测、海岛联测以及沙漠、森林和高山地区测图控制点的建立外，还可作为国家大地网更高一级的控制，从而提高远距离两点间相对位置的精度和国家控制网的精度，以满足经济建设和国防建设现代化的需要。

三、测定控制点高程位置的方法

(一) 几何水准测量

几何水准测量，是利用水准仪直接测定两点间高差的一种方法。这种方法测定的高程可以达到很高的精度。它是目前建立矿区高程基本控制网的主要方法。

(二) 三角高程测量

三角高程测量，是测定两点间的距离和垂直角，通过计算得到两点间高差的一种方法。这种方法受大气垂直折光的影响较大，不宜作矿区基本高程控制网。但它在一定密度的直接高程点控制下，仍是测定各等级三角点高程的主要方法。

四、建立控制网的程序

从矿区控制测量研究的内容和测定控制点方法的介绍表明，控制点点位是通过在地面上建立控制网和测定网中各几何元素的关系来实现的。那么，建立控制网须经过那些工作程序呢？

无论建立矿区水平控制网，还是高程控制网，一般都经过如下几个程序：

(一) 踏勘、设计

根据上级下达的任务，收集有关资料和到测区进行实地调查，按布网的理论要求，进行图上设计(在地形图上选定点位、组成网形)。同时制定出野外作业计划。

(二) 实地选点

按照图上设计的点位，到实地根据实际情况最后确定控制点在地面上的位置。

(三) 造标、埋石

经实地选点后，在选定的地面点上，用觇标（高程控制点不建觇标）和标石标志出控制点点位。

(四) 观测

在选定的水平控制网内测定必须的起始边长、起始方位角和各边的夹角；在选定的高程控制网内测定各控制点间的高差。

(五) 概算、平差

对野外观测的成果，按照一定的理论和要求，进行整理、检核、计算和消除成果中的矛盾（即平差）。最后计算控制点的坐标和高程。

建立控制网的全过程，虽然有明显的阶段，但它们不是孤立的，而是密切相联的。其中任何一个工序发生问题，都将直接影响到下一工序和整个控制网的质量。

第三节 国家控制网的基本概念

矿区控制网一般都是在国家控制网的基础上布设的。为了在不同条件下合理地布设矿区控制网，必须了解国家控制网的一些基本概念。

一、布设控制网的基本原则

为了满足经济建设和国防建设的需要，在我国 960 万平方公里的领土上，建立国家大

地控制网，这是一项规模巨大的工作。要做好这项工作，须根据生产实践经验和我国的具体情况，先制定出建网的原则和方案，用以指导建网的实际工作。

就客观要求来讲，国家控制网要解决的问题很多。但最主要、最大量的是作为控制测图的基础。目前我国就是以此作为建网的出发点的。

(一) 分级布网，逐级控制

建立国家控制网的目的，除提供科学研究的数据外，主要是在全国范围内建立一个统一的坐标系统，作为测图控制基础。使各个地区能同时独立地各自进行测图工作，而测得的地形图又可以互相拼接。若在领土广大、地形条件复杂的我国领域内，一次用高精度密集的三角点布满全国，这不但需要很长的时间，甚至是难以办到的。而且这种布网法也不能适应社会主义经济建设和国防建设的各种需要。因此，我国采用了分级布网，逐级控制的原则。按照这一原则建网可以达到：使精度逐级递降，边长逐级缩短，密度逐级增大，针对不同的情况，采用不同的仪器、方法，达到节省人力、物力和时间；在高级网控制下，可按各地区的实际需要分期分区布设低级网，并独立地计算成果，适应急需；使低等点位误差限制在高级点之间，保证在不同时间，不同单位施测的地形图，互相拼接、互相利用等好处。我国目前水平控制网和高程控制网均划分为：一、二、三、四等四个等级。

(二) 要有足够的精度

国家控制网是测图控制的基础，精度是重要的指标，应严格要求。但是它必须以测图控制的实际需要为准，不能忽视快、省等因素而不适当地追求过高的精度。控制点的精度视测图比例尺的大小而定，一般是测图比例尺愈大，对控制点的精度要求愈高。通常要求以国家控制点为基础的首级加密点，相对于起算控制点的点位中误差在实地不超过 0.1 毫米 N (N 是测图比例尺分母)。

(三) 要有足够的密度

控制点的密度是以平均若干平方公里一个点来表示，或用平均点距来表示。点的密度大小主要决定于成图方法和测图比例尺。但是等级控制点作业过程严密，费用也大。所以实践中是在保证成图精度的前提下，以少量的控制点作为基础，再加密大量的图根点进行测图。根据长期测图实践，按平板仪测图，不同比例尺地图对控制点的合理密度要求：1:10000 比例尺测图约 50 平方公里要有一个控制点，1:5000 比例尺测图约 20 平方公里要有一个控制点。

(四) 要有统一的布网方案、精度指标和作业规格

我国领土广阔，建网规模巨大。为了做到迅速建网以满足社会主义革命和建设需要，就必须有许多测绘单位的广大测绘人员，在不同的地区分散进行作业。为此，在建网中，必须遵守统一的布网方案、精度指标和作业规格，才能互相配合，建立全国统一的控制网，满足各方面的需要。国家测绘总局于 1959 年颁布了《大地测量法式(草案)》(以后简称《法式》)，又于 1974 年重新修定了《国家三角测量和精密导线测量规范》、《国家水准测量规范》(以后都简称《规范》)，详细地规定了各级国家网的布设方案，以及如何保证实现方案所要求的指标和规格的具体措施，作为各单位作业的依据。

上面介绍了建网的一些基本原则，那末，在这些原则指导下，一个国家的首级网应采用何种布网形式呢？

首级控制，通常有布设全面网或纵横锁系两种形式。具体采用那种形式，要看具体情

况决定。象我国领土如此广阔，若采用全面网，即使以30公里的边长布设，也需要一万二千个左右的点。这样，测量和平差工作都非常复杂，甚至会遇到难于克服的困难。所以，我国对首级控制的布设采用纵横锁系形式，即沿着经、纬线布设最精密的互相交叉的三角锁系，构成大致成方形的多边形。这就使基于三角测量的工作大为简化，并能更迅速、更经济地以合乎要求的精度，把全国领土控制在统一的坐标系统内。至于一些领土较小的国家，则多采用全面布网法。

二、国家水平控制网的布设方案

三角测量法是当前测定地面点位的主要方法，故在这里仅介绍国家三角网的布设方案。

我国现行的布设方案，是根据国务院1959年批准颁布的《法式》进行的。《法式》规定：国家三角测量分成一、二、三、四等四个等级。现分别介绍于下：

（一）国家一等三角锁的布设方案

一等三角锁是国家控制网的骨干。它的主要作用是控制二等以下各级三角测量，并为研究地球形状和大小提供资料。而控制测图则不是它的主要任务。因此，一等锁着重考虑的是精度问题。一等三角锁一般沿经纬线布成纵横交叉的骨干三角系，锁系交叉点间的一段称为锁段，其长度约为200公里。如图10。

一等三角锁一般采用近于等边的单三角形锁。锁段中图形的平均边长应在25公里（山区）和20公里（平原）左右。三角形的任一角度应不小于 40° 。根据测区地形，一等锁中也可组成大地四边形和中点多边形，但其求距角应不小于 30° 。

在锁段两端应精密测定起始边（精度不低于1:35万），在起始边两端精密测定天文经、纬度和方位角（这些点称为拉普拉斯点），以获得精密的起始数据和控制锁中边长、角度误差的传播。在每一锁段中间的一个三角点上测定天文经、纬度，这些点称为中间天文点。

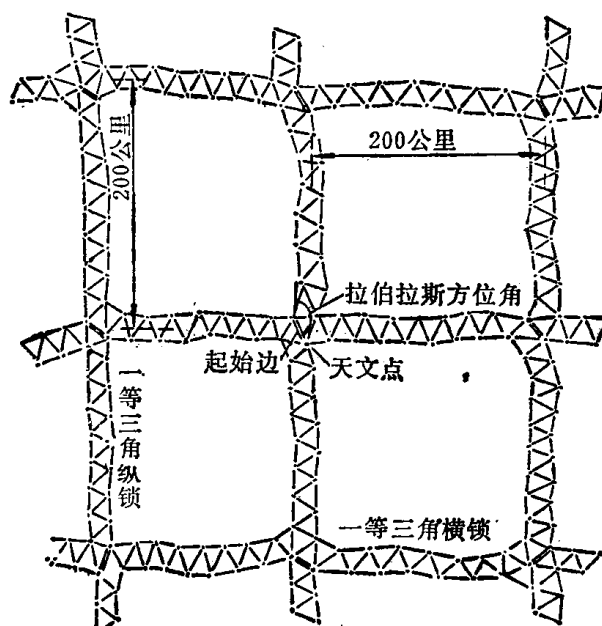


图 10

测定天文经、纬度的点，为计算垂线偏差提供资料。起始方位角（也叫拉普拉斯方位角）是通过点上测定的天文经、纬度和方位角，并结合三角锁成果来推算的。所以，国家一等三角锁系也称为国家天文大地网。

一等锁的测角中误差 $m_\beta \leq \pm 0''.7$ ，最弱边的相对中误差 $\leq 1:15$ 万。

（二）国家二等三角网的布设方案

国家二等三角网是在一等三角锁控制下布设的，是国家三角网的全面基础，必须兼顾精度和密度两个方面的要求。

二等三角网，以13公里左右的边长，用连续网的形式布满在一等锁环内，四周与一等锁联接（图11）。为保证二等网的精度，控制边长误差及角度误差的传播，一般在二等网的

适当位置设置二等起始边,使任意一条二等三角网的边,距最近的一等或二等起始边不多于12个二等三角形,或距最近的一等三角锁边不多于7个二等三角形。一等锁两侧的二等网应构成连续的三角网,且应与一等边作有效的联接。

二等三角网中三角形的每个角一般应不小于 30° ,如受地形限制,或为降低觇标高度,个别角度允许小至 25° 。其测角中误差 $m_\beta \leq \pm 1''.0$,最弱边相对中误差 $\leq 1:15$ 万。

在1958年以前,国家三角网是按旧法式布设的。旧法式除精度指标较低外,布设方法也有区别。按旧法式,我国的二等三角网是分为两级布设的,即在一等锁围成的面积内,先布设“+”或“++”形的交叉锁,称为基本锁(图12)。它的边长平均为18公里。测角中误差 $m_\beta \leq \pm 1''.5$,最弱边相对中误差 $\leq 1:6$ 万。在二等基本锁环内布设连续三角网,称为二等补充网。其边长平均为13公里,测角中误差 $m_\beta \leq \pm 2''.5$,最弱边相对中误差 $\leq 1:3.5$ 万。

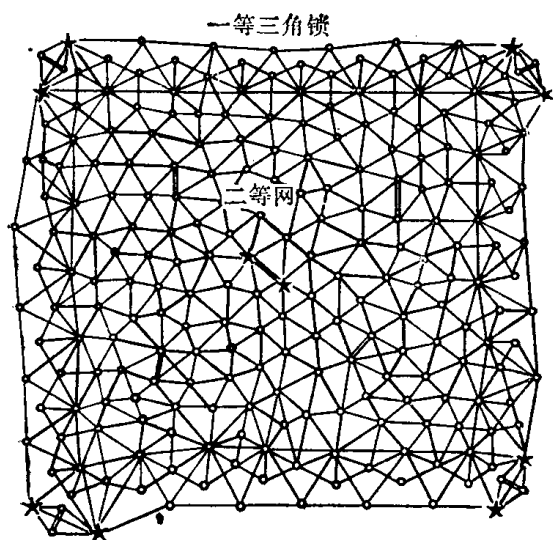


图 11

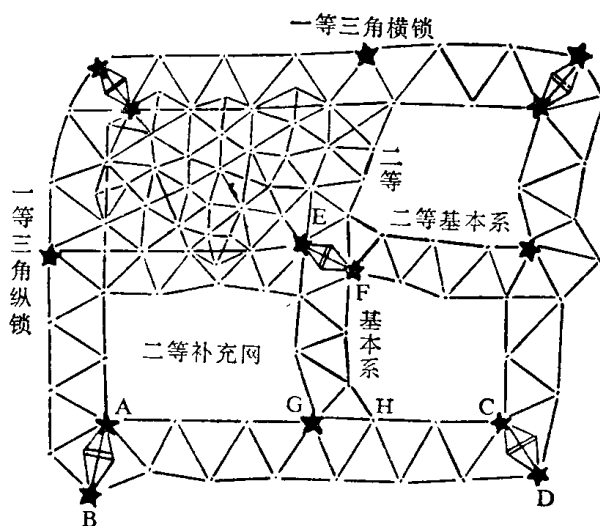


图 12

这种布设方案,由于二等基本锁连接于一等锁段的中央,是一等锁中边长和方位角最弱的地方;用它们作为二等基本锁的起始数据,致使二等基本锁的精度大大降低。在此基础上布设二等补充网,再加上二等补充网的观测精度不高,致使二等补充网的精度仅能满足1:1万比例尺测图。这种布设方案显然不能适应社会主义建设迅猛发展的需要。

(三) 国家三、四等三角网的布设

三、四等三角网是在一、二等三角锁网控制下布设的,直接作为图根测量的基础。因此,点的密度必须与测图比例尺相适应,布设方案视测图和工程需要而定。这是三、四等点布设的主要特点。它的布设以一、二等三角点为基础,一般应采用插网的形式布设,如受地形限制,当加密个别三、四等点时,也可采用插点的方法。

三等三角网边长,一般应为8公里左右。四等三角网的边长,根据测图的需要,或特定的要求,可在2至6公里范围内变动。测角中误差三等 $m_\beta \leq \pm 1''.8$,四等 $m_\beta \leq \pm 2''.5$ 。三、四等三角网中,三角形的每个角度一般应不小于 30° ,受地形限制,或为避免建造高标,允许小至 25° 。