

全国高职高专工程测量技术专业规划教材

控制测量技术

林玉祥 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

全国高职高专工程测量技术专业规划教材

控制测量技术

林玉祥 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书是为适应当前测绘类专业高等职业技术教育的需求而编写的。全书共分10章,第1章为绪论;第2章至第5章及第9章系统地讲述了平面控制测量的技术设计、外业观测、成果验算、概算和平差计算等理论和技术方法;第6章、第7章讲述了高程控制测量的理论、技术方法和平差计算等内容;第8章介绍了将地面的测量元素归算至高斯平面的计算方法,第10章新增了测量常用坐标系及其转换等内容。

为增加实用性,本书较全面地介绍了相关的测量平差、高斯投影和坐标转换等软件。

本书可作为高职测绘类专业及相关专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

控制测量技术

林玉祥 主编

图书在版编目(CIP)数据

控制测量技术/林玉祥主编. —北京:中国电力出版社, 2007

全国高职高专工程测量技术专业规划教材

ISBN 978-7-5083-5494-1

I. 控… II. 林… III. 控制测量-高等学校:技术学校-教材 IV. P221

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第055202号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策划编辑:王晓蕾 责任编辑:侯伟

责任印制:陈焊彬 责任校对:蔺淑艳

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2007年8月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·15印张·375千字

定价:30.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

前 言

控制测量技术是为适应测绘技术的发展以及测绘类专业高等职业技术教育的需求而编写的。本书可作为高职测绘类专业的选用教材,也可供测绘专业和其他相关专业的工程技术人员参考使用。

本书由传统的控制测量学、测量常用坐标系与转换及其相关的计算机软件三部分有机组合而成。

随着测绘技术的发展和高职教育的普遍需求,本书中将控制测量部分的内容作了较大幅度的调整,从整体上淡化了高深的理论内容,强调了实用性;删除了部分过时的内容,增加了目前较常用的实用控制测量技术方法。测量常用坐标系与转换部分是满足实际测量工作的需求而新加入的内容,该部分理论完整,叙述细致,又有实用软件与之配套,非常实用。计算机软件部分介绍了目前常用的测量平差软件和坐标转换软件,这些软件在网上可以下载得到。

在本书的编写过程中,参阅了大量的文献资料,在此谨向有关作者表示衷心感谢!

本书由林玉祥主编,付铁链、聂琳娟、喻艳梅副主编。参加编写的人员有:王勇智、肖宏、蔡元平、谭立萍。全书共10章,另附两个极有实用性的附录。第5章、第6章由付铁链编写,第3章由喻艳梅编写,第7章由聂琳娟编写,第2章由肖宏(辽宁经纬测绘公司教授级高工)编写,第10章由王勇智编写,第4章由谭立萍编写,附录1由蔡元平编写,其余由林玉祥编写。

本书由李恩宝(辽宁省测绘质检站教授级高工)担任主审。

建议本书全部内容在90~110学时内完成,各院校也可根据各自不同的需要,酌情选定教学内容与教学课时。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免会有错误之处,恳请使用本书的老师和广大读者提出宝贵意见,以便日后进一步修正、补充、完善。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 控制测量的任务及作用	1
1.2 控制网的分类及其建立方法	2
1.3 国家控制网的布设	4
1.4 工程控制网的布设	9
1.5 控制测量新技术的发展概况	11
习题	15
第 2 章 控制网技术设计	16
2.1 概述	16
2.2 控制网布设的基本形式及精度估算	18
2.3 在技术设计中应注意的若干问题	23
2.4 技术设计编制的步骤和方法	26
2.5 控制网的选点与埋石	28
习题	30
第 3 章 精密角度测量	31
3.1 精密经纬仪的结构特点	31
3.2 J_2 经纬仪简介	38
3.3 经纬仪三轴误差	40
3.4 精密光学经纬仪的检验与校正	43
3.5 精密测角的误差来源及影响	52
3.6 方向观测法	56
3.7 垂直角测量	61
习题	63
第 4 章 精密距离测量	65
4.1 概述	65
4.2 电磁波测距的基本原理	66
4.3 中短程测距仪简介	69
4.4 电磁波测距的误差分析	78
4.5 相位式测距仪的检验	80
4.6 测距作业要求及测距成果的改正计算	83
习题	86
第 5 章 导线测量	88
5.1 概述	88

85.2	单导线的精度分析	88
85.3	导线测量的实施	95
85.4	导线测量边、角错误的检查	101
85.5	导线测量平差算例及软件介绍	101
习题		102
第6章	高程控制测量	103
6.1	高程基准面与高程系	103
6.2	高程控制网的布设	104
6.3	精密水准仪和水准标尺	106
6.4	精密水准仪及水准标尺的检验	112
6.5	数字水准仪及条码标尺	118
6.6	精密水准测量的主要误差来源及影响	119
6.7	精密水准测量的实施	124
6.8	正常水准面的不平行性及改正计算	128
6.9	水准测量的概算	129
6.10	水准网平差算例及软件介绍	131
习题		134
第7章	三角高程测量	135
7.1	三角高程测量计算公式	135
7.2	球气差系数的测定	136
7.3	三角高程测量的精度	137
7.4	三角高程测量的计算	139
7.5	三角高程网的平差算例及软件介绍	140
习题		140
第8章	将地面的测量元素归算至高斯平面	141
8.1	椭球的基本概念	141
8.2	将地面观测值归算至椭球面	147
8.3	将椭球面上的观测元素归算至高斯平面——高斯投影	150
8.4	高斯投影的分带	151
8.5	将平面控制网投影至高斯平面	153
8.6	高斯投影的正反算计算公式	154
8.7	平面子午线收敛角	156
8.8	曲率改正和距离改正	157
8.9	高斯平面坐标的换带计算	160
8.10	高斯投影算例及软件介绍	161
习题		161
第9章	平面控制测量的概算与平差计算	163
9.1	概述	163
9.2	概算的准备工作	163

9.3	将观测成果归化至高斯平面上的计算	163
9.4	依控制网几何条件检查观测质量	165
9.5	平面控制测量平差算例及软件介绍	166
10	习题	166
第10章 坐标系及换算		167
10.1	坐标系的类型	167
10.2	地球坐标系的建立	169
10.3	介绍几种常用坐标系	177
10.4	坐标系的转换	181
10.5	坐标转换算例及软件介绍	185
习题		185
附录1 平差易 PA2005		186
附录2 坐标转换软件 (COORD Global Manage 2.0)		223
参考文献		234

第1章 绪 论

1.1 控制测量的任务及作用

1.1.1 控制测量的任务

控制测量是研究精确测定地面控制点空间位置的技术。它是在大地测量学基本理论的基础上,以工程建设测量为主要服务对象而发展和形成的。其主要任务是:在一定的区域范围内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,即平面坐标 (x, y) 和高程 H 。

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(通常测区面积在 2000km^2 以下),并且在监测手段和数据处理方法上还具有多样化的特点。

工程建设工作进行过程中,大体上可分为设计、施工和运营三个阶段。每个阶段控制测量的具体任务如下:

(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,在房地产业中,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,控制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,以便指导施工的进行。对于不同的工程来说,控制测量的具体任务也不同。例如,隧道控制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;建筑控制测量的主要任务是使各建筑物按照设计的位置修建。在施工放样过程中,放样所需的方向、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监测专用控制网。例如,超高层建筑和大型水库等工程,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,在工程竣工后的运营阶段,需对这种有怀疑的建筑物或市区进行变形监测,为此需布设变形监测控制网。由于这种变形的数值一般都很小,为了能够精确地测出它们,要求变形监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 控制测量的作用

由上所述,控制测量在工程建设的各个不同阶段的基本任务是建立控制网,以精确确定

控制点的位置。可见，控制网是控制测量的具体体现，其主要作用有以下几点：

(1) 控制网是进行各项测量工作的基础。对勘察设计阶段建立的控制网而言，基本控制网是扩展图根控制和进行测图的基础；对施工控制网而言，基本控制网是各种工程建筑施工放样的基础。

(2) 控制网具有控制全局的作用。对勘察设计阶段建立的控制网而言，控制网具有控制全局，保证所测的各幅地形图具有一定的精度，且能够互相拼接成为一个整体的作用；对施工控制网而言，控制网具有控制全局，保证各建筑物轴线之间的相关位置具有必要的精度，以满足设计与施工要求的作用。

(3) 控制网具有限制测量误差的传递和积累的作用。建立控制网时所采用的分级布网、逐级控制的原则，就是从技术上考虑了控制网具有限制测量误差传递和积累的作用。

由于工程建设的规划设计阶段、施工阶段以及运营阶段均需使用控制网，可见控制测量技术这门课程对于工程建设的重要性。

1.1.3 控制测量的基本内容

一项控制测量工程和其他工程一样，也分为三个阶段，即设计阶段、施测阶段和使用阶段。各个阶段的基本内容如下：

(1) 在控制网的设计阶段，主要是进行控制网的可行性论证，估算控制网的技术经济指标，撰写技术设计报告等。

(2) 在控制网的施测阶段，主要是根据技术设计报告进行控制网的布测，即踏勘选点、埋石、观测及数据处理等。

(3) 在使用阶段，主要是对控制网的成果进行有效管理，以便能够迅速、准确地为各项工程建设提供有用的资料，此外还包括对控制网的维护和补测等。

应说明的是，以上三个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，因而需局部的修改设计，这实际上又重新进行了设计与施测；同样，在控制网的使用阶段，由于包含了控制网的维护与补测，因而部分地重复上述三个阶段的工作也时有发生。

1.2 控制网的分类及其建立方法

控制网一般分为平面控制网和高程控制网。平面控制网是各种测量工作的平面控制基础，需要确定控制点的平面位置；高程控制网是各种测量工作的高程控制基础，需要确定控制点的高程。

1.2.1 建立平面控制网的基本方法

1. 三角测量

三角测量的形式就是三角网，其网形如图 1-1 所示。在地面上选定一系列点位 1, 2, …, 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。三角网中的观测量是网中的全部（或大部分）方向值，图 1-1 中的每条实线表示对向观测的两个方向。根据方向值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

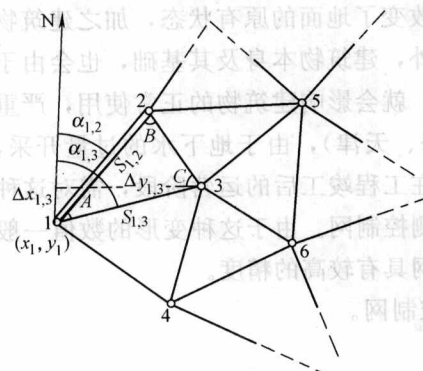


图 1-1 三角网的坐标解算

平面边长 $S_{1,2}$, 坐标方位角 $\alpha_{1,2}$, 便可用正弦定理等数学知识依次推算出三角网的所有边长、坐标方位角及各点的平面坐标。这就是三角测量的基本原理和方法。以图 1-1 为例, 待定点 3 的坐标可按下式计算

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

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

$$\Delta x_{1,3} = S_{1,3} \cos \alpha_{1,3} \quad (1-3)$$

$$\Delta y_{1,3} = S_{1,3} \sin \alpha_{1,3}$$

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

即由已知的 $x_1, y_1, S_{1,2}, \alpha_{1,2}$ 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他各点的坐标。

任何一个控制网, 其数据都分为三类, 它们分别是起算数据、观测数据和推算数据。在控制网中, 如果只有必要的起算数据, 那么该网就称为独立网; 如果控制网内存在多余的起算数据, 那么该网就称为非独立网。

2. 导线测量

导线测量的体现形式为单导线和导线网, 目前单导线的布网形式使用较普遍。导线(网)中的观测值是角度(或方向)和边长。独立导线网的必要起算数据是: 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, 主要优点如下:

(1) 网中各点上的方向数较少, 除结点外只有两个方向, 因而受通视要求的限制较小, 易于选点和降低观测目标的高度。

(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。

导线网的主要缺点如下:

(1) 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, 因而可靠性相对较差。

(2) 导线点控制的面积狭小。

由上述可见, 导线网特别适合布设于障碍物较多的平坦地区或隐蔽地区。

3. 三边测量和边角测量

三边测量和边角测量的体现形式为三边网和边角网。只测边的控制网称为三边网; 在测角网的基础上加测部分或全部边长的控制网称为边角网。实际上导线网也可以看作是边角网的一种特例。

在传统的控制网中, 边角网的精度是最高的, 其工作量也是最大的。

4. GPS 测量

进入 20 世纪 90 年代后, 随着 GPS 定位技术的引进, 许多大、中城市的测绘单位及工程测量单位都开始广泛应用 GPS 方法布设控制网。

目前, GPS 相对定位精度, 在几十千米的范围内使边长相对误差可优于 10^{-6} , 完全可以满足《城市测量规范》(CJJ8—1999) 对城市二、三、四等网的精度要求(二等最弱边相

对精度 $1/300000$)。以上 4 种建立平面控制网的方法中,三角测量早在 17 世纪即被采用。随后经过前人不断地研究、改进,无论从理论上还是实践上,都逐步形成为一套较完善的控制测量方法。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。三角网的主要缺点是:在平原地区或隐蔽地区易受障碍物的影响,布网困难大,工作量大等。

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。

GPS 技术的出现给控制测量带来了革命性的变化。由于 GPS 测量具有精度高、测量速度快、经济省力、操作简便、可全天候工作等诸多优点,目前已经成为高等级平面控制测量的首选手段。

1.2.2 建立高程控制网的方法

高程控制网是进行各种比例尺测图和各种工程测量的高程控制基础,建立高程控制网的常用方法有几何水准测量法和三角高程测量法。

1. 几何水准测量法

用水准仪进行水准测量的方法称为几何水准测量法。用该方法建立起来的高程控制网称为水准网。直接用几何水准测量方法传递高程,可以取得很高的精度,它是建立全国性高程控制网、城市控制网等高精度高程控制网的主要方法。

2. 三角高程测量法

三角高程测量法的基本原理,是根据测站点观测照准点的垂直角和两点间的距离(平距或斜距)来计算测站点与照准点之间的高差,进而求得地面点的高程。这种方法简便灵活,受地形限制较小,适用于地形起伏较大的地区或精度要求较低的场合,因此,它也是布测高程控制网的一种辅助方法。

1.3 国家控制网的布设

1.3.1 国家平面控制网

建国初期,为了满足我国经济建设和国防建设的需要,在 960 万平方千米的国家领土上建立了国家三角网,即国家平面控制网。

1. 布设原则

在我国广阔的领土上建立国家平面控制网,这是一项规模巨大的工程。显然事先必须全面规划、统筹安排,制定一些基本原则,用以指导建网工作。

就客观要求而言,国家三角网要解决的问题是很多的,但其主要目的是作为地形测图的控制基础。下面讨论的几条建网原则就是以测图控制网的需要为出发点的。

(1) 分级布网、逐级控制。我国领土辽阔,地形复杂,不可能用最高精度和较大密度的控制网一次布满全国。为了适时地保障国家经济建设和国防建设用图的需要,根据主次缓急

而采用分级布网、逐级控制的原则是十分必要的。即先以精度高而稀疏的一等三角锁尽可能沿经纬线方向纵横交叉地布满全国,形成统一的骨干大地控制网,然后按不同地区、不同特点的实际需要,有先有后地逐级布设二、三、四等三角网。

(2) 应有足够的精度。国家三角网是测图控制的基础,精度是最重要的指标,控制网的精度应根据需要和可能来确定。作为国家大地控制网骨干的一等控制网,应力求高精度才有利于为科学研究和应用提供可靠的资料。对于用于测图控制的各等三角网,它们的精度必须保证各种比例尺测图的实际需要。

为了保证国家三角锁网的精度,必须对起算数据和观测要素的精度、网中图形角度的大小等,提出适当的要求和规定。这些要求和规定均列于《国家三角测量和精密导线测量规范》(以下简称国家规范)中。

(3) 应有足够的密度。控制点的密度,主要根据测图方法及测图比例尺的大小而定。比如,用航测方法成图时,密度要求的经验数值见表 1-1,表中的数据主要是根据经验得出的。

表 1-1 各种比例尺航测成图时对平面控制点的密度要求

测图比例尺	每幅图要求点数/个	每个三角点控制面积/km ²	三角网平均边长/km	等级
1:50000	3	约 150	13	二等
1:25000	2~3	约 50	8	三等
1:10000	1	约 20	2~6	四等

由于控制网的边长与点的密度有关,所以在布设控制网时,对点的密度要求是通过规定控制网的边长而体现出来的。对于三角网而言,边长 S 与点的密度(每个点的控制面积) Q 之间的关系近似为 $S=1.07\sqrt{Q}$ 。将表 1-1 中的数据代入此式得出

$$S_{\text{二等}}=1.07\sqrt{150}\approx 13\text{km}$$

$$S_{\text{三等}}=1.07\sqrt{50}\approx 8\text{km}$$

$$S_{\text{四等}}=1.07\sqrt{20}\approx 5\text{km}$$

因此,国家规范中规定,国家二、三等三角网的平均边长分别为 13km 和 8km。

(4) 应有统一的技术规格。由于我国三角锁网的规模巨大,必须有大量的测量单位和作业人员分区同时进行作业,为此,必须由国家制定统一的大地测量法式和作业规范,作为建立全国统一技术规格的控制网的依据。

2. 布设方案

根据国家平面控制网施测时的测绘技术水平,我国决定采取传统的三角网作为平面控制网的基本形式,只是在青藏高原特殊困难的地区布设了一等电磁波测距导线。现将国家三角网的布设方案和精度要求概略介绍如下。

(1) 一等三角锁布设方案。一等三角锁是国家大地控制网的骨干,其主要作用是控制二及以下各级三角测量,并为地球科学研究提供资料。

一等三角锁尽可能沿经纬线方向布设成纵横交叉的网状图形,如图 1-2 所示。在一等锁交叉处设置起算边,以获得精确的起算边长,并可控制锁中边长误差的积累。多数起算边的长度是采用基线测量的方法求得的。随着电磁波测距技术的发展,后来少数起算边已由电磁波测距仪来测定。

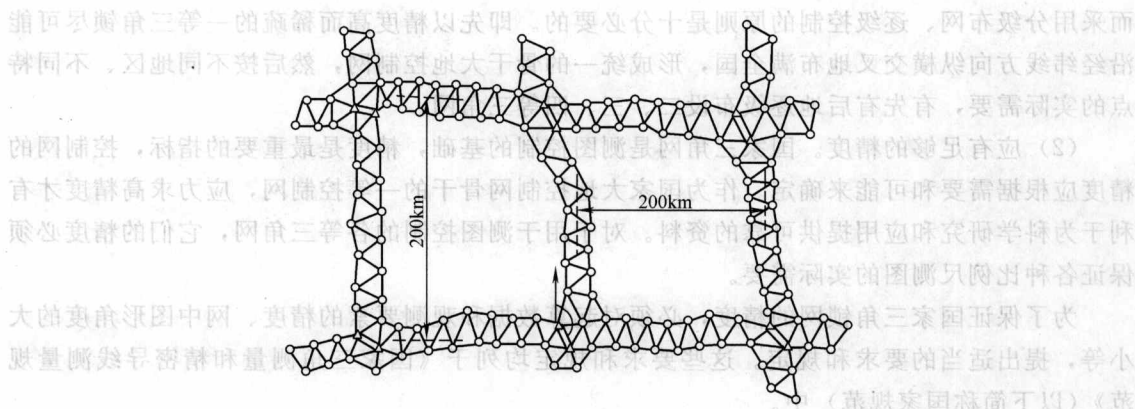


图 1-2 国家一等三角锁布设方案

一等锁在起算边两端点上精密测定了天文经纬度和天文方位角，作为起算方位角，用来控制锁、网中方位角误差的积累。

一等锁两起算边之间的锁段长度一般为 200km 左右，锁段内的三角形个数一般为 16~17 个。角度观测的精度，按一锁段三角形闭合差计算所得的测角中误差应小于 $\pm 0.7''$ 。

一等锁一般采用单三角锁，其平均边长，山区一般约为 25km，平原一般为 20km。

(2) 二等三角锁(网)布设方案。国家二等三角锁(网)是在一等三角锁的控制下布设的，它是国家三角网的全面基础，同时又是地形测图的基本控制。因此，必须兼顾精度和密度两个方面的要求。

20 世纪 60 年代以前，我国二等三角网曾采用二等基本锁和二等补充网的布设方案。即在一等锁环内，先布设沿经纬线纵横交叉的二等基本锁(见图 1-3)，将一等锁环分为大致相等的 4 个区域。二等基本锁平均边长为 15~20km，按三角形闭合差计算所得的测角中误差小于 $\pm 1.2''$ 。另在二等基本锁交叉处测量基线，精度为 1:200000。

在一等三角锁和二等基本锁控制下，布设平均边长为 13km 的二等补充网。按三角形闭合差计算所得的测角中误差小于 $\pm 2.5''$ 。

20 世纪 60 年代以来，二等网以全面三角网的形式布设在一等锁环内，四周与一等锁衔接，如图 1-4 所示。

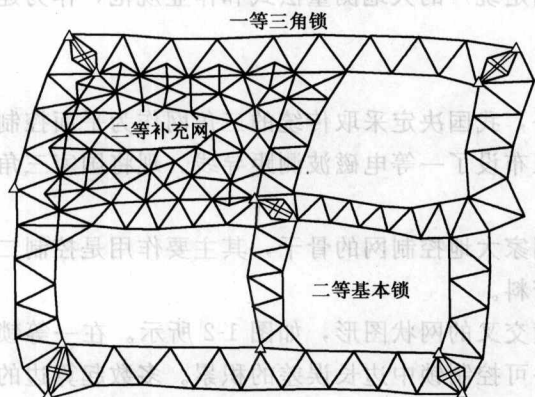


图 1-3 国家二等三角锁(网)布设方案

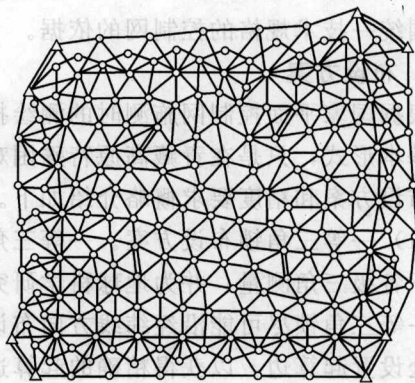


图 1-4 国家二等全面网

为了控制边长和角度误差的积累,以保证二等网的精度,在二等网中央处测定了起算边及其两端点的天文经纬度和天文方位角,测定的精度与一等点相同。当一等锁环过大时,还在二等网的适当位置酌情加测了起算边。

二等网的平均边长为 13km,由三角形闭合差计算的测角中误差小于 $\pm 1.0''$ 。

(3) 三、四等三角网布设方案。三、四等三角网是在一、二等锁网控制下布设的,是为了加密控制点,以满足测图和工程建设的需要。三、四等点以高等级三角点为基础,尽可能采用插网方法布设,但也采用了插点方法布设,或越级布网。这里的越级布网就是在二等网内直接插入四等全面网,而不经三等网的加密。

三等网的平均边长为 8km,四等网的边长在 2~6km 范围内变动。由三角形闭合差计算所得的测角中误差,三等为 $\pm 1.8''$,四等为 $\pm 2.5''$ 。

三、四等插网的图形结构如图 1-5 所示。图 1-5 (a) 中的三、四等插网,边长较长,与高级网接边的图形大部分为直接相接,适用于测图比例尺较小,要求控制点密度不大的情况。图 1-5 (b) 中的三、四等插网,边长较短,低级网只附合于高级点而不直接与高级边相接,适用于测图比例尺较大,要求控制点密度较大的情况。

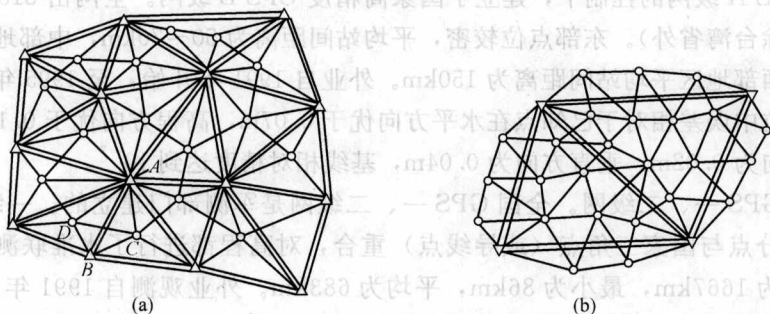


图 1-5 国家三、四等三角网布设方案

三、四等三角点也可采用插点的形式加密,其图形结构如图 1-6 所示。其中,插入 A 点的图形叫作三角形内插一点的典型图形;插入 B, C 两点的图形叫作三角形内外各插一点的典型图形。插点的典型图形很多,这里不一一介绍。

3. GPS 布网方案

GPS 技术具有精度高、速度快、费用省、全天候、操作简便等优点,因此,它广泛应用于大地测量领域和工程测量领域。用 GPS 技术建立起来的控制网叫 GPS 网。一

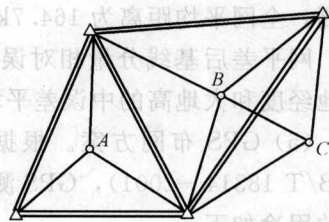


图 1-6 插点加密形式

般可把 GPS 网分为两大类:一类是全球或全国性的高精度的 GPS 网;另一类是区域性的 GPS 网。区域性的 GPS 网是指国家 C, D, E 级 GPS 网或专为工程项目而建立的工程 GPS 网,这种网的特点是控制面积不大,边长较短,观测时间不长。现在,全国用 GPS 技术布设的区域性控制网很多,下面只简要介绍我国利用 GPS 技术已建立的几个全国性的 GPS 网。

(1) 92 GPS A 级网。92 GPS A 级网是在中国资源卫星应用中心和中国测绘规划设计中心的组织协调下,由国家测绘局、原国家地震局、中国石油天然气总公司、原地质矿产部、

原煤炭工业部等部门所属单位,利用国际全球定位系统地球动力学服务 IGS92 会战的机会,实施完成的一次全国性精密 GPS 定位。其目的是在全国范围内确定精确的地心坐标,建立起我国新一代的地心参考框架及其与国家坐标系的转换参数,以优于 10^{-7} 量级的相对精度确定站间基线向量、布设成国家 A 级网,作为国家高精度卫星大地网的骨架并奠定地壳运动及地球动力学研究的基础。全网由 27 个点组成,平均边长 800km,平差后在 ITRF 91 地心参考框架中的定位精度优于 0.1m,边长相对精度一般优于 10^{-8} 。

(2) 96 GPS A 级网。为了达到进一步完善我国新一代的地心坐标框架的目的,在我国西部地区增加了新的点位,对 92 GPS A 级网进行了改造,尽量增埋了新点。经数据精处理后,基线分量重复性水平方向优于 $4\text{mm}+3\times 10^{-6}D$,垂直方向优于 $8\text{mm}+4\times 10^{-6}D$,地心坐标分量重复性优于 2cm。全网整体平差后,在 ITRF93 参考框架中的地心坐标精度优于 10cm,基线边长的相对精度优于 10^{-8} 。

(3) 国家高精度 GPS B 级网。为了精化我国的大地水准面,提供检校和加强全国天文大地网的依据,初步建立覆盖全国的三维地心坐标框架,精确测定我国大地坐标与地心坐标系之间的转换参数,监测我国地壳形变和板块运动,建立海洋大地测量与陆地大地测量统一的大地基准,在国家 GPS A 级网的控制下,建立了国家高精度 GPS B 级网。全网由 818 个点组成,分布全国各地(除台湾省外)。东部点位较密,平均站间距离为 50~70km,中部地区平均站间距离为 100km,西部地区平均站间距离为 150km。外业自 1991 年开始,至 1995 年结束,经数据精处理后,点位中误差相对于已知点在水平方向优于 0.07m,高程方向优于 0.16m,平均点位中误差水平方向为 0.02m,垂直方向为 0.04m,基线相对精度达到 10^{-7} 。

(4) 全国 GPS 一、二级网。全国 GPS 一、二级网是军测部门建立的。一级网由 40 余个点组成,大部分点与国家三角点(或导线点)重合,对高程都进行了水准联测。一级网相邻点间距离最大为 1667km,最小为 86km,平均为 683km。外业观测自 1991 年 5 月至 1992 年 4 月进行,网平差后基线分量相对误差平均在 0.01×10^{-6} 左右,最大为 0.024×10^{-6} ,绝大多数点的点位中误差在 2cm 以内。二级网由 500 多个点组成,是一级网的加密。二级网与地面网联系密切,有 200 多个二级点与国家三角点(或导线点)重合,所有点都进行了水准联测,全网平均距离为 164.7km。外业观测于 1992~1994 年和 1995~1997 年两个阶段完成。网平差后基线分量相对误差平均在 0.02×10^{-6} 左右,最大为 0.245×10^{-6} ,大地纬度、大地经度和大地高的中误差平均值分别为 0.18cm、0.21cm 和 0.81cm。

(5) GPS 布网方案。根据我国 2001 年所颁布的《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T 18314—2001),GPS 测量按其精度分为 AA, A, B, C, D, E 六级。各级 GPS 测量的用途如下:

AA 级主要用于全球性的地球动力学研究、地壳形变测量和精密定轨;
A 级主要用于区域性的地球动力学研究和地壳形变测量;
B 级主要用于局部形变监测和各种精密工程测量;
C 级主要用于大、中城市及工程测量的基本控制网;
D, E 级主要用于中、小城市、城镇及测图、地籍、土地信息、房产、物探、勘测、建筑施工等的控制测量。

GPS 网的精度指标,通常是以网中相邻点之间的距离误差来表示的,其具体形式为

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (bD)^2} \quad (1-5)$$

式中 σ ——网中相邻点间的距离中误差 (mm);
 a ——固定误差 (mm);
 b ——比例误差系数 (10^{-6});
 D ——相邻点间的距离 (km)。

对于不同等级的 GPS 网,技术指标见表 1-2。

GPS 网精度分级			
级别	固定误差 a/mm	比例误差系数 $b/10^{-6}$	平均距离/km
AA	≤ 3	≤ 0.01	1000
A	≤ 5	≤ 0.1	300
B	≤ 8	≤ 1	70
C	≤ 10	≤ 5	10~15
D	≤ 10	≤ 10	5~10
E	≤ 10	≤ 20	0.2~5

1.3.2 国家高程控制网

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、逐级控制的原则,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。我国各级水准网布设的规格及精度见表 1-3。

各级水准网布设的规格及精度					
等 级		环线周长/km	附合路线长/km	M_{Δ}/mm	M_w/mm
一等	平原、丘陵	1000~1500	—	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 1.0$
	山 地	2000	—		
二等		500~750	—	$\leq \pm 1.0$	$\leq \pm 2.0$
三等		300	200	$\leq \pm 3.0$	$\leq \pm 6.0$
四等		—	80	$\leq \pm 5.0$	$\leq \pm 10.0$

注: 1. M_{Δ} ——每千米水准测量高差中数的偶然中误差。
2. M_w ——每千米水准测量高差中数的全中误差。

1.4 工程控制网的布设

1.4.1 工程平面控制网

1. 布设原则

工程平面控制网可分为两种:一种是在各项工程建设的规划设计阶段,为测绘大比例尺地形图和房地产管理测量而建立的控制网,称为测图控制网;另一种是为工程建筑物的施工放样或变形监测等专门用途而建立的控制网,称为专用控制网。建立这两种控制网时也应遵守下列布网原则:

(1) 分级布网、逐级控制。对于工程测量控制网,通常先布设精度要求最高的首级控制网,随后根据测图需要、测区面积的大小再加密若干级较低精度的控制网。用于工程建筑物放样的专用控制网,往往分二级布设,第一级作总体控制,第二级直接为建筑物放样而布设;用于变形监测或其他专门用途的控制网,通常无须分级。

(2) 要有足够的精度。以工程测量控制网为例,一般要求最低一级控制网(四等网)的点位中误差能满足大比例尺 1:500 的测图要求。按图上 0.1mm 的绘制精度计算,这相当于地面上的点位精度为 $0.1 \times 500 = 5\text{cm}$ 。对于国家控制网而言,尽管观测精度很高,但由于边长比工程测量控制网长得多,待定点与起始点相距较远,因而,点位中误差远大于工程测量控制网。

(3) 要有足够的密度。不论是工程测量控制网还是专用控制网,都要求在测区内有足够的控制点。如前所述,控制点的密度通常是用边长来表示的。《城市测量规范》(CJJ 8—1999) 中对于城市三角网平均边长的规定列于表 1-4 中。

表 1-4 三角网的主要技术要求

等级	平均边长/km	测角中误差(″)	起算边相对中误差	最弱边相对中误差
二等	9	± 1.0	1/300000	1/120000
三等	5	± 1.8	1/200000(首级)	1/80000
			1/120000(加密)	
四等	2	± 2.5	1/120000(首级)	1/45000
			1/80000(加密)	
一级小三角	1	± 5	1/40000	1/20000
二级小三角	0.5	± 10	1/20000	1/10000

(4) 要有统一的规格。为了使不同的工程测量部门施测的控制网能够互相利用、互相协调,也应制定统一的规范,如现行的《城市测量规范》(CJJ 8—1999) 和《工程测量规范》(GB 50026—1993)。

2. 布设方案

现以《城市测量规范》(CJJ 8—1999) 为例,将三角网的主要技术要求列于表 1-4,电磁波测距导线的主要技术要求列于表 1-5。从这些表中可以看出,工程测量三角网具有如下的特点:①各等级三角网平均边长较相应等级的国家网边长显著地缩短。②三角网的等级较多。③各等级控制网均可作为测区的首级控制。这是因为工程测量服务对象非常广泛,测区面积大的可达几千平方千米(例如大城市的控制网),小的只有几公顷(例如工厂的建厂测量),根据测区面积的大小,各个等级控制网均可作为测区的首级控制。④三、四等三角网的起算边相对中误差,按首级网和加密网分别对待。对独立的首级三角网而言,起算边由电磁波测距求得,因此,起算边的精度以电磁波测距所能达到的精度来考虑;对加密网而言,则要求上一级网最弱边的精度应能作为下一级网的起算边,这样有利于分级布网、逐级控制,而且也有利于采用测区内已有的国家网或其他单位已建成的控制网作为起算数据。以上这些特点主要是考虑到工程测量控制网应满足最大比例尺 1:500 测图的要求而提出的。

此外,目前我国测距仪或全站仪使用较普遍的情况下,电磁波测距导线已上升到比较重要的地位。表 1-5 中电磁波测距导线共分 5 个等级,其中的三、四等导线与三、四等三角网属于同一个等级。这 5 个等级的导线均可作为某个测区的首级控制。