



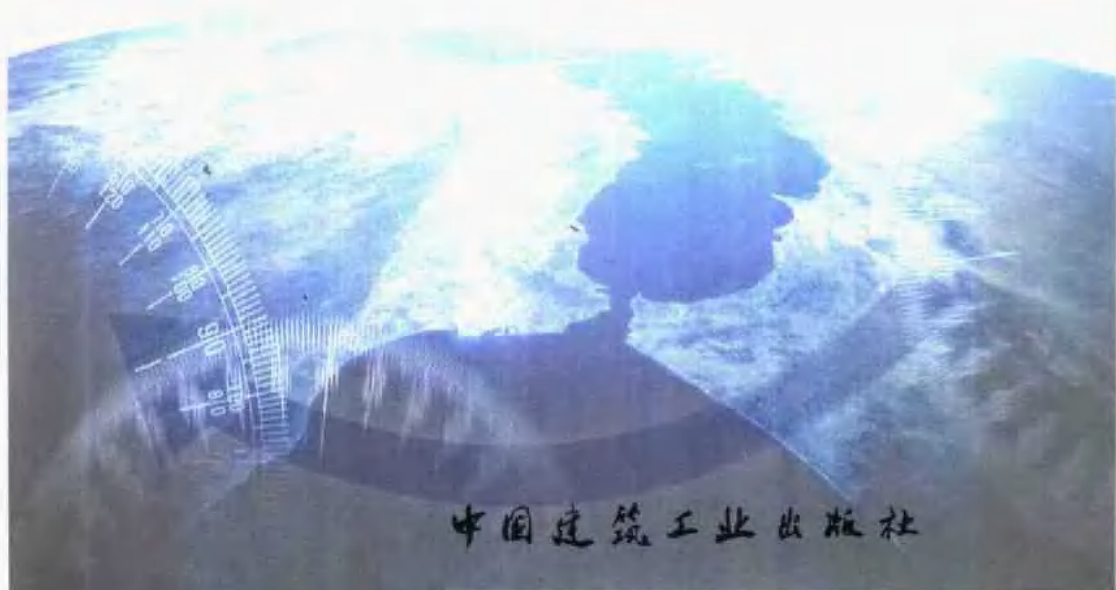
中等职业教育国家规划教材

全国中等职业教育教材审定委员会审定

控制测量

测量工程技术专业

主 编 李玉宝



中国建筑工业出版社

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

控 制 测 量

(测量工程技术专业)

主 编	李玉宝
责任主审	田青文
审 稿	田青文 史经俭

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

控制测量/李玉宝主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2003

中等职业教育国家规划教材. 测量工程技术专业

ISBN 7-112-05423-0

I. 控… II. 李… III. 控制测量-专业学校-教材
IV. P221

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 021057 号

本书是作为中等职业教育国家规划教材测量工程技术专业教材。

全书共分七章, 介绍了控制测量的任务和基本方法; 讲述地球椭球和观测元素的归化问题; 讲述角度测量、电磁波测距、导线测量、高程测量; 介绍 GPS 定位测量的基本原理和基本过程。

本教材的体系具有系统性、科学性, 反映了测绘科学的新知识、新材料、新方法, 适应测绘科学进步的需要。

本书既可作为中专、中职测绘类或相关中专、中职专业的教科书, 也可作为相关专业技术人员的业务参考书。

* * *

责任编辑 王 跃 陆 维

中 等 职 业 教 育 国 家 规 划 教 材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

控制测量

(测量工程技术专业)

主 编 李 玉 宝

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10½ 字数: 254 千字

2003 年 5 月第一版 2003 年 5 月第一次印刷

印数: 1—2,000 册 定价: 13.00 元

ISBN 7-112-05423-0

TU·4747(11037)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2002 年 10 月

前 言

控制测量是其他测量工作的基础性测量工作,是测绘类教学的主要课程之一。随着科学技术的不断发展和进步,控制测量的理论、应用、仪器等也经历了一个不断提高和完善的过程,同样也促进了控制测量的教学方法和内容不断地充实和创新。教材建设是提高教学质量,培养合格的专业人才的重要环节。

本书是教育部 21 世纪专业系列教材之一。本书根据现行的中等职业教育工程测量专业以及其他测绘类专业的《控制测量》教学大纲编写。

本书对经典的方法进行了精简,如三角测量,已经有很长时间,很少有人再采用该方法来建立控制网。故本书只做了简单的介绍,以使学生对国家控制网的建立有一个较完整的认识,保持知识的系统性。结合不同的知识点,相应地引进了控制测量先进的技术、仪器和作业方法。整个教材内容的采用和编排,都紧密结合现行作业规范,理论联系实际,由浅入深,重视基础,强调发展,注重应用;充分考虑到了知识的系统性、实用性、先进性和可读性。适合中专、中职层次教学的特点和要求。本书可作为中专、中职测绘类或相关中专、中职专业的教科书,也可作为专业技术人员的业务参考书。

全书共分七章。第一章介绍了控制测量的任务和基本方法;第二章讨论了地球椭球和观测元素的归化计算以及测量坐标系问题;第三章主要讲 J_2 型光学经纬仪及其角度观测方法;第四章主要讨论固频相位式电磁波测距仪、全站仪的基本原理和测距成果的计算;第五章主要讨论导线测量的精度估算、测量方法、概算和验算;第六章主要讨论精密水准仪和精密水准标尺、测量误差及高程系统、水准测量的实施;第七章讨论 GPS 定位的基本原理和数据采集及其数据处理的方法、程序、步骤等。

为了加强学生对所学知识的理解、巩固学习效果,在每章后面,对每章的重点内容都有配套的复习思考题。为了更好地培养学生分析问题和解决实际问题的能力,针对一些要求学生必须掌握的内容,还配有相应的习题。在本书后面附有习题答案。

第一、三、四、五章由东南大学李玉宝编写,第二章由昆明旅游学校郭启荣编写,第六章由东南大学沈学标编写,第七章由东南大学吴向阳编写。李玉宝负责主编。受教育部委托由长安大学地质工程与测绘工程学院田青文教授和西安科技学院测量工程系史经俭副教授审稿,并由田青文教授主审。

编者在编写本书的过程中,参考了有关院校、单位和个人的某些文献资料,在此表示衷心感谢!

由于业务水平所限,难免有错漏之处,敬请读者提出宝贵意见和建议。

编者

2002 年 10 月

目 录

第一章 控制测量概述	1
第一节 控制测量的任务	1
第二节 建立控制网的基本方法	2
复习思考题	8
习题	8
第二章 地球椭球和地面观测值的归算	9
第一节 地球椭球	9
第二节 控制测量的坐标系	10
第三节 地面观测值向椭球面上的归算	14
第四节 椭球面观测值向高斯平面上的归算	18
第五节 选择局部坐标系的方法	21
复习思考题	23
习题	23
第三章 角度测量	24
第一节 J_2 型光学经纬仪	24
第二节 电子测角	31
第三节 经纬仪误差	32
第四节 J_2 型光学经纬仪的检视、检验和校正	36
第五节 水平角观测误差	43
第六节 方向观测法及其测站平差	46
第七节 垂直角观测	53
复习思考题	55
习题	55
第四章 电磁波测距	57
第一节 概述	57
第二节 相位法光电测距误差	67
第三节 测距成果的计算	70
复习思考题	74
习题	75
第五章 导线测量	76
第一节 导线测量技术设计	76
第二节 导线测量的精度估算和分析	83
第三节 导线测量外业工作	90

复习思考题	106
习题	107
第六章 高程测量	109
第一节 国家高程控制网的布设	109
第二节 精密水准标尺和精密水准仪	113
第三节 水准测量误差	120
第四节 高程系统和水准原点	128
第五节 水准测量的实施	132
复习思考题	141
习题	141
第七章 GPS 定位测量	143
第一节 GPS 定位的基本原理	143
第二节 GPS 定位测量的基本过程	150
复习思考题	158
习题	158
习题答案	159
参考文献	161

第一章 控制测量概述

第一节 控制测量的任务

一、控制测量及其任务

在工程建设区域内，以必要的精度测定一系列控制点的水平位置和高程，建立起工程控制网，作为地形测量和工程测量的依据，这项测量工作称为控制测量。

工程控制网分为平面控制网和高程控制网两部分，前者是测定控制点的平面直角坐标，后者是测定控制点的高程。控制测量在工程建设三个阶段中的具体任务是：在勘测设计阶段建立测图控制网，作为各种大比例尺测图的依据；在施工阶段建立施工控制网，作为施工放样测量的依据；在施工和运营阶段建立变形观测控制网，作为工程建筑物变形观测的依据。

控制测量在建立地理信息系统方面的具体任务是：为数据采集、数据处理、系统的运行管理和变更提供统一坐标系中的基础控制，并保证系统内各要素必要的精度。

控制测量对测绘地形图的控制作用如下：地形图是分幅测绘的，它要求测绘的各幅地形图，必须无漏洞、无重叠和无歪曲地互相拼接成一个整体，并具有相同的精度。如果在测区内建立了统一的平面控制网，精密地测定网中各控制点的高斯平面直角坐标，就可以在实地上准确地确定各个图幅的位置。因而分幅独立测图时，各相邻图幅之间就不会出现漏洞、重叠和歪曲。同时，因测定的控制点点位精度高，各幅地形图平面位置的测量误差，将受到控制点的限制，不会积累得很大，从而保证各幅图的平面位置具有相同的测图精度。因此，各相邻两幅地形图的平面位置，可以在测图精度之内互相接合。

同样的道理，如果在工程建设区域内建立了统一的高程控制网，精密地测定网中各控制点的高程，则分幅独立测图时，各相邻图幅的等高线，可以在测图精度之内互相接合。

二、大地测量及其任务

建立国家或地区大地控制网，所进行的精密控制测量工作，称为大地测量。它所测定的控制点，称为大地控制点，简称大地点。

国家大地控制网由国家水平控制网和国家高程控制网两部分组成，前者是测定网中各大地点的大地坐标（大地经度 L 和大地纬度 B ）或高斯平面直角坐标（纵坐标 x 和横坐标 y ），后者是测定网中各大地点的高程。

大地测量的任务是：为地形测图和大型工程测量提供基本控制，为空间科学技术和军事用途提供有关数据，为研究地球形状、大小和其他地球物理科学问题提供重要资料。

大地测量和面积达 25km^2 以上的控制测量，在建立水平控制网中，通常必须考虑地球曲率的影响。为此，要选择一个合适的参考椭球面，作为处理地面观测成果和进行测量计算的基准面。也就是说，在地面上观测得到的水平方向值和边长值，须归化到这个基准面上，然后在该面上计算出大地点的大地坐标。如果需要确定大地点或控制点的高斯平面直

角坐标, 则可进行两种坐标之间的转换计算, 或将参考椭球面上的观测成果归算到高斯平面上, 然后在该面上把它们计算出来。

大地测量具有全局性、基础性的特点; 而控制测量相对于大地测量来说, 则具有局部性和对于某项工程针对性较强的特点。

第二节 建立控制网的基本方法

控制测量建立工程控制网的原理和方法, 与大地测量建立国家大地控制网的原理和方法基本相同, 而且工程控制网一般都与国家高等大地点相联系。因此, 了解布测国家大地控制网的有关情况则是十分必要的, 也是控制测量学习的首要内容。

一、建立国家水平控制网的基本方法

(一) 常规大地测量方法

1. 三角测量法

(1) 基本原理

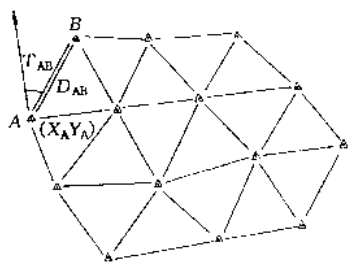


图 1-1

三角测量的方法和基本原理是: 在地面上按一定的要求选定一系列的点, 每一个点都设置测量标志, 并以三角形的图形把它们连接成地面上的三角网。精确地观测所有三角形的内角, 以及至少一条三角边的长度, 用一定的投影计算公式, 把这些地面观测成果归算到高斯投影平面上, 使地面上的三角网转化为高斯平面上的三角网, 见图 1-1。

以归算后的平面边长 D_{AB} 为起始边, 用平面三角学的正弦定理依次解算各个三角形, 算出各平面边长 D_{ij} , 以已知的 AB 边平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角, 用归算后的水平角依次算出各边的平面坐标方位角 T_{ij} 。利用三角学公式:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_{ij} &= D_{ij} \cdot \cos T_{ij} \\ \Delta Y_{ij} &= D_{ij} \cdot \sin T_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

算出各相邻点间的坐标增量 ΔX_{ij} 和 ΔY_{ij} 。最后, 以已知起始点 A 的平面直角坐标 (X_A, Y_A) 和各坐标增量 ΔX_{ij} 、 ΔY_{ij} , 逐个推算出各点的平面直角坐标。

(2) 布网的基本原则

1) 分级布网、逐级控制

我国领土辽阔, 有多种自然地理条件, 各地区的经济建设发展很不平衡, 对测图的要求不尽相同。如果为了控制大比例尺测图 (如 1:2000), 用全面布网法布设国家三角网, 即以密度大、精度高和等级相同的三角网一次布满全国, 不但需要很长时间, 而且在特殊困难地区也难以实现; 其次, 它难以满足迫切用图地区的测图需要。另外, 用短边三角网推算边长和方位角的误差将很大, 势必增加布测起始边和起始方位角的工作量, 同时网的整体平差也很复杂。因此, 合理地布网方法应当是分级布网、逐级控制, 即三角点的密度应先稀后密, 逐次加大; 三角点的精度应先高后低, 逐级递降。我国三角网按精度分为一、二、三、四等 4 个等级。

2) 具有足够的密度

国家三角点的密度要求, 取决于测图比例尺的大小和成图的方法。测图比例尺越大, 三角点的密度便越大; 航测法成图的三角点密度, 要比平板仪测法成图小。根据测图实践, 在 1:100000 和 1:50000 比例尺测图地区, 按正常航测法成图时, 应使每约 150km² 面积内有一个国家三角点; 在 1:25000 和 1:10000 比例尺测图地区, 应使每约 20km² 和 6km² 面积内分别有一个国家三角点。这些面积, 也就是在不同的情况下, 每一个三角点所有效控制的面积, 用 P 表示。

上述的国家三角点密度要求, 在作业中是通过三角边的平均长度来体现的, 而这个平均边长又与国家某个等级三角网的边长规定值相对应。面积 P 和边长 S 的关系为:

$$S \approx \sqrt{\frac{P}{0.85}} \tag{1-2}$$

3) 具有足够的精度

国家三角点点位的精度要求, 应综合考虑生产、科研等方面的需要和可能来确定。为了保证国家控制网的精度, 必须对起算数据和观测元素的精度、网中图形角度的大小及平均边长等, 都做出了适当的要求和规定。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。

4) 要有统一的技术规格

建立国家三角网, 除中央主管部门负责外, 还要各有关部门和测绘单位共同配合完成。因此, 在建立国家三角网时, 除采用统一的国家坐标系外, 对于三角网的等级划分和密度、精度及作业方法等技术要求, 应共同执行我国 1958 年制订的《中华人民共和国大地测量法式(草案)》(下称 1958 年法式) 的技术要求及相应国家规范的规定。这样, 不仅可以汇集各个部门的三角测量成果构成规格统一的国家三角网, 而且还可以资料共享, 避免重复和浪费。

按 1958 年法式和国家规范布测的国家三角锁网, 其主要技术规格见表 1-1。

国家三角锁网布设规格 表 1-1

等级	边 长		图形角度限制				测角中 误差	三角形 最大闭 合差	起算元素精度		最弱边相 对中误差	最弱点位 位中误差 估算值
	边长 范围 (km)	平均 边长 (km)	单一角 形任意 角	中点多 边形任 意角	大地四 边形任 意角	个别小 角度			起始边长	天文观测		
一	15~45	平原 20 山区 25	40°	30°	30°		± 0.7"	± 2.5"	1:35 万	$m_s \leq \pm 0.5''$ $m_t \leq \pm 0.3''$ $m_g \leq \pm 0.3''$	1:15 万	m ± 0.16
二	10~18	13	30°	30°		25°	± 1.0"	± 3.5"	1:35 万	与一等相同	1:15 万	m ± 0.10
三		8	30°	30°		25°	± 1.8"	± 7.0"			1:8 万	m ± 0.14
四	2~6		30°	30°		25°	± 2.5"	± 9.0"			1:4 万	m ± 0.13

(3) 国家三角网的布设方案

1) 一等三角锁系的布设

一等三角锁系又称天文大地网, 它是国家大地网的骨干, 又为研究地球形状和大小提

供重要资料,故必须达到尽可能高的精度。

一等三角锁尽量沿经纬线方向布设,纵横锁互相交叉而构成网状(图 1-2)。在纵横锁交叉处布设起始边,在起始边的两端点上施测天文经纬度和天文方位角,用以计算拉普拉斯方位角。以作为大地网的起算数据,它既用来控制边长和方位角推算误差的积累,又便于天文大地网的平差和推算地球的形状与大小。

相邻两起始边之间的三角锁称为锁段,锁段长度一般在 200km 左右。一等三角锁由近于等边的三角形组成。根据地形条件,也可由大地四边形和中点多边形组成。

2) 二等三角网的布设

如图 1-3,在一等三角锁环内布设的二等三角网,是国家大地网的全面基础,它也必须达到尽可能高的精度。

全国的二等三角网要连成整体,与一等三角锁一起进行天文大地网的整体平差。因此,二等网不仅要与周围的一等锁联接起来,还要和相邻一等锁环内的二等网妥善地联接,以构成连续的全面三角网。

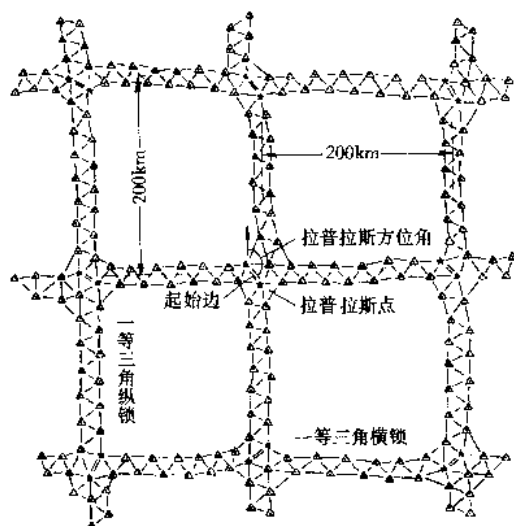


图 1-2

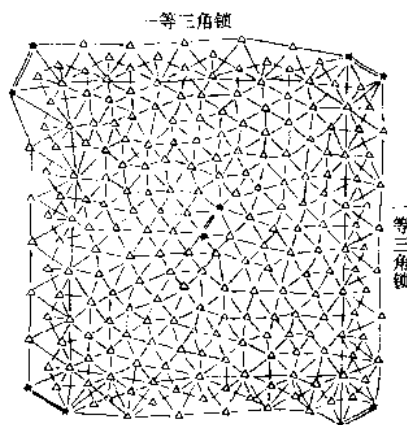


图 1-3

3) 三、四等三角网的布设

三、四等三角网按加密的方法分为插网法和插点法两种。

在高等三角网内,以高等点为基础,布设低等级的连续三角网,以测算低等三角点的坐标,这种加密方法称为插网法,如图 1-4、图 1-5 及图 1-6 所示。其中图 1-4 称为接边网;图 1-5 称为接点网;图 1-6 称为典型插网。

在高等三角形内,以高等点为基础插入一个或几个低等点,使它们与高等点构成独立的插点图形,用以测算低等点的坐标,这种加密方法称为插点法。如图 1-7 所示。因这些插点图形在平差计算时,具有固定的数据处理模型,故也称典型图形。

三角测量的优点是:布设的图形呈网形,控制面积大;测角精度高,几何条件数多;相邻点的相对点位误差较小。缺点是:除起始边和起始方位角外,其余各边及其方位角是用水平角推算出来的;由于测角误差的传播,各边及其方位角的精度不均匀,并且距起始边和起始

方位角越远,它们的精度就越低。另外,三角测量在布测过程中难度较大,效率也较低。

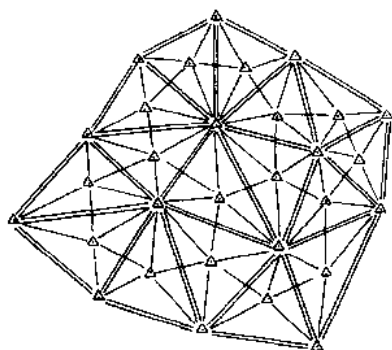


图 1-4

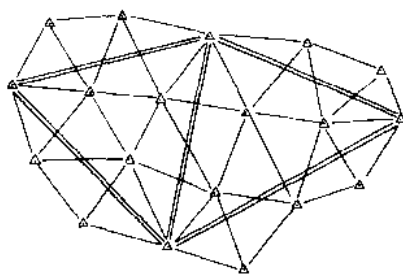


图 1-5

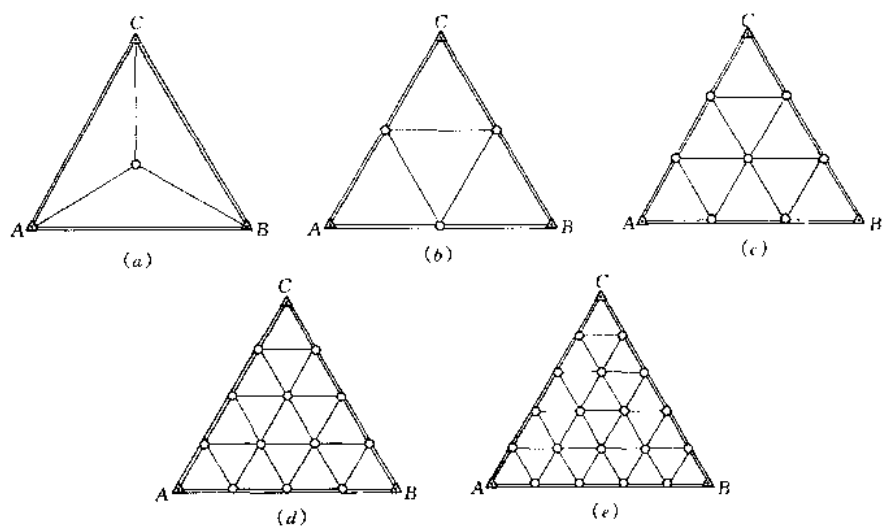


图 1-6

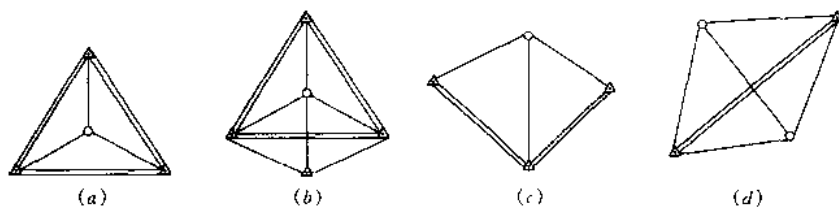


图 1-7

因此,在过去一般用三角测量方法建立国家水平控制网。现在已很少使用。

2. 导线测量法

导线测量的方法和基本原理是:在地面上按一定的要求选定一系列的点,每一个点都设置测量标志,将相邻点连接后构成地面上的导线。精密地测量各导线边的长度和各导线点的转折角,再将这些地面观测成果归算到高斯平面上,见图 1-8。

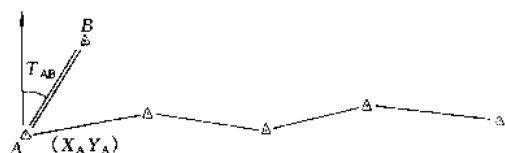


图 1-8

以已知的 AB 边平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角，用归算后的折角依次推算出各导线边的坐标方位角。根据起始点 A 的已知平面直角坐标 (X_A, Y_A) 和平面导线上各导线边的长度及坐标方位角，逐个推算出各导线点的高斯平面直角坐标。

导线测量的优点是：布设的图形呈单折线，除节点外，每个点只需前后两个相邻点通视，故布设比较灵活，容易越过地形和地物障碍；各导线边长均直接测定，精度高而均匀，导线的纵向误差小。缺点是：控制面积狭窄；几何条件数少，导线的横向误差较大。

因此，隐蔽和特殊困难的地区，一般宜用导线测量方法建立国家水平控制网。

另外，还有三边测量法和边角同测法，它们虽然有时用来建立工程控制网，但不宜用于建立国家水平控制网。

(一) 天文定位测量方法

天文定位测量方法是在地面测站上，用天文测量仪器观测天体的瞬时位置，并记录相应的时刻，然后依一定的计算公式，算出测站点的天文经度 λ 、天文纬度 φ 、和测站点至某照准点方向的天文方位角 α 。测定了天文经、纬度的地面点，称为天文点；测定了天文经、纬度和天文方位角的大地点，称为拉普拉斯点。

天文测量的优点是：各点均独立测定，组织工作简单，受地形条件影响小。缺点是：测定点的精度不高。如目前野外测量天文经、纬度的中误差为 $\pm 0.2'' \sim \pm 0.4''$ ，表现在地面上的点位误差约为 $\pm 6 \sim \pm 12\text{m}$ 。

因此，这种方法不能用来建立国家水平控制网。但是，它在建立国家水平控制网中有着重要的作用。具体地说，确定大地原点（又称大地基准点）的起始数据、控制水平角观测误差的积累、为研究地球的形状大小等，都必须有天文定位测量和重力测量与之相配合。

(二) 现代大地测量方法

现代大地测量方法，有卫星大地测量、甚长基线干涉测量和惯性测量，其中用卫星大地测量测定地面测站位置的方法最为广泛。

现在卫星大地测量普遍采用 GPS 全球定位系统，其中载波相位测量方法的静态相对定位精度可达 $(5 + D \times 10^{-6})\text{mm}$ 。在建立或加强国家水平控制网中，它可取代常规的大地测量方法。由于 GPS 定位具有方便、经济、快速、准确以及高科技含量高的优势，目前已基本上得到了广泛的普及；同时它标志着大地测量或控制测量已进入了一个全新的时代。

二、建立国家高程控制网的基本方法

(一) 几何水准测量方法

几何水准测量的方法和基本原理是：在地面上按一定的要求，选定一系列的水准点并设置标志，然后把它们连接成水准路线，进而构成水准网。在水准路线上连续设站，利用水准仪提供的水平视线，在垂直立于地面的水准标尺上读取前、后两转点的分划数，以求得相邻水准点的高差。根据水准网中一个起算点的已知高程，依次推算出各水准点的高程。

几何水准测量的优点是：测定的高程精度高，例如用精密水准测量，可将水准原点的高程传递到 4000 ~ 5000km 远的水准点上，它的高程中误差将不超过 $\pm 1\text{m}$ ；高程的基准面很接近于大地水准面，测得的高程基本上具有物理意义，能很好地为生产服务。因此，几何水准测量是建立国家高程控制网的主要方法。

（二）三角高程测量方法

三角高程测量的方法和基本原理是在国家水平控制网上，用经纬仪测量相邻两点间的垂直角，根据它和两点间的已知水平距离，利用三角学公式算出相邻两点间的高差。以网中一个起算点的已知高程，逐个推算出各大地点的高程。

三角高程测量的优点是：作业简单，布设灵活，不受地形条件的限制。缺点是：因大气垂直折光影响，垂直角观测误差较大，致使测定的高差和高程精度较低；测得的高程以参考椭球面为基准面，没有物理意义。因此三角高程测量是建立国家高程控制网的辅助方法。

（三）光电测距高程导线测量方法

光电测距高程导线测量的基本原理与三角高程测量相类似。它是在布设的高程导线上，用经纬仪测量相邻两点间的垂直角，用电测距仪测量相邻两点间的倾斜距离，根据三角学公式算出两点间的高差，进而推算各高程导线点的高程。光电测距高程导线测量的精度，可以代替国家一定等级的水准测量。

（四）GPS 高程测量方法

GPS 相对定位可以高精度地测定两点间的大地高高差。GPS 向量网经三维无约束平差后可求得各点的大地高平差值。如网中联测了一定数量的已知正常高高程的点，则可求出与这点相应的高程异常值，以高程异常值和点的大地经纬度为统计量，求出一拟合多项式中的待定系数。在这个基础上，可以任一点的大地经纬度为变量，以点的高程异常值为函数求解，然后以该点的大地高减去相应的高程异常值后，则可得出点的正常高高程。

用该方法确定的 GPS 点的高程，其精度在比较理想的情况下可达到普通几何水准测量的精度。当进行与其精度相匹配的点高程测量和困难地区的高程联测时，这种方法具有明显的实用价值和经济效益。GPS 高程测量精度的提高，还须联合重力测量等方面的数据。这方面的课题还正在进一步研究中。

综上所述，建立国家高程控制网，主要采用几何水准测量的方法，而三角高程测量方法、光电测距高程导线测量以及 GPS 高程测量的方法，都作为辅助和补充方法。

三、建立控制网的基本方法

控制测量与大地测量关系密切，一般说来，控制测量是依附于国家大地控制网进行的，也是国家大地控制网的进一步加密。

根据控制测量的特点，由于不同行业、不同工程的需求，有时对控制网布测的技术规格会有所变通，或选用局部坐标系等。除此之外，在控制网的布设原理和方法、测量仪器使用、观测元素采集、归化计算及平差计算等方面，不论是平面控制网还是高程控制网，其处理问题的方法和途径都基本与大地测量相同。故上述关于建立国家大地控制网的基本方法，也适用于控制测量。在后续的课程中将具体讨论和学习。

复习思考题

1. 试述控制测量的概念和任务。
2. 为什么控制测量能够控制测绘地形图？
3. 大地测量和控制测量的特点是什么？
4. 建立国家水平控制网有哪些方法？
5. 三角测量方法及基本原理是什么？
6. 三角测量布网的基本原则是什么？各等级三角网的布设方案是什么？
7. 建立国家高程控制网有哪些方法？
8. 建立国家高程控制网，为什么以几何水准测量的方法为主？
9. GPS 定位和高程测量有哪些特点和优势？
10. 建立控制网的基本方法与建立国家大地控制网的基本方法有何异同？

习题

1. 工程控制网分为哪两部分？
2. 国家三角网分为哪 4 个等级？
3. 按正常航测法成图时，在 1/5 万和 1/1 万比例尺测图区，各需要 150km^2 和 6km^2 面积内有一个平面控制点。需布测哪些等级的国家三角网，可直接满足这两种情况下平面控制点的密度？

第二章 地球椭球和地面观测值的归算

第一节 地球 椭 球

外业测量工作是在复杂的地球自然表面上进行的，在这样一个复杂的曲面上是无法进行数据处理的。为了确定各控制点的水平位置，首先要选定一个计算基准面，而这个基准面必须与地球的实际形体极为接近才行。

设想将面积占地球表面总面积 71% 的海洋平均海水面扩展，延伸到大陆下面，形成一个包围地球的闭合曲面。该曲面为一个特殊的水准面，则称其为大地水准面。由大地水准面所包围的整个地球形体——大地体，与地球的真实形状、大小是很接近的。大地水准面处处与其相应的铅垂线即重力方向相垂直。但是由于地球内部物质密度分布得很不均匀，造成重力方向产生不规则的变化，使得大地水准面的各个局部存在各种不规则的起伏（见图 2-1），因而也不可能在这个面上进行计算。于是需要进一步找出一个最接近大地体的简单几何形体来代替大地体，然后以它的表面作为计算的基准面。

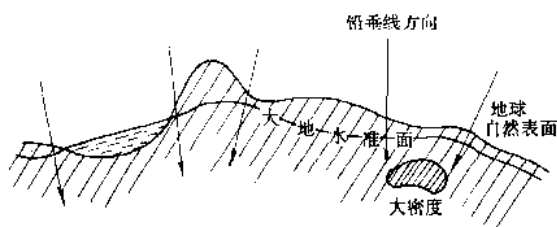


图 2-1

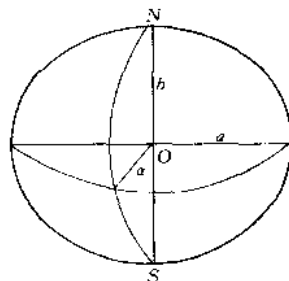


图 2-2

一、总地球椭球

与大地体最为接近的地球椭球，称为总地球椭球，简称总椭球。总椭球应满足以下几个条件：

1. 总椭球中心应与地球质心重合，总椭球的旋转轴应与地球的自转轴重合，即总椭球的赤道应与地球的赤道一致；
2. 总椭球与大地体的体积应相等，大地水准面与总椭球面之间差距的平方和为最小；
3. 总椭球的质量应等于地球的质量；
4. 总椭球的旋转角速度应等于地球的旋转角速度。

二、参考椭球

要求得总椭球，必须有在全球广泛分布的天文、大地测量和重力测量资料，目前要获得这些资料，实际上是很难实现的。19 世纪以来，各国测量学者曾先后根据陆地上的部分天文、大地测量和重力测量资料，求出了许多地球椭球的几何参数（长半径 a 和扁率

α)。然而, 这些地球椭球模型, 由于采用的资料毕竟有限 (71% 的大洋面上的资料难以得到), 都不能与整个大地体最为密合, 而只能与所用资料区域的局部大地水准面充分密合。所以, 过去各个国家或地区不可能统一采用一个总椭球, 而都是采用与本国或本地区大地水准面最为密合的椭球面, 作为测量计算的基准面。这种椭球就称为参考椭球。如图 2-2 所示。

我国解放后, 采用了前苏联克拉索夫斯基椭球 (简称克氏椭球), 其长半径 $a = 6378245\text{m}$ 、 $\alpha = 1:298.3$ 。1972 年, 根据我国资料的推算表明, 此椭球与我国的大地水准面并不相符。我国 1978 年全国天文大地网平差会议决定, 选用国际上推荐的 1975 年大地坐标系 “IAG75” 地球椭球参数, 其长半径 $a = 6378140\text{m}$ 、扁率 $\alpha = 1:298.257$ 。该椭球参数与国际上推荐的 1980 年、1983 年大地坐标系地球椭球参数基本相符。

仅有参考椭球的元素, 还不能解决归化计算的问题, 还必须把参考椭球相对于大地水准面的关系确定下来。这项工作称为参考椭球定位。参考椭球定位工作, 通常是在国家大地网中选择一个比较适中的三角点并有高精度的天文、水准等测量工作相配合完成。该项工作非常复杂, 一般先进行参考椭球的初步定位。进行参考椭球定位的点, 称为 “大地原点”, 亦称 “大地基准点”。依据大地原点的基准数据推算其他三角点、导线点的大地坐标。

我国解放后, 很长一段时期采用的是 1954 年北京坐标系, 其大地原点设在前苏联普尔科沃天文台圆形大厅中心, 相应的椭球采用克氏椭球。以后我国建立了 1980 年国家大地坐标系, 其大地原点设在我国中部地区的陕西省泾阳县永乐镇, 其原点简称 “西安原点”, 参考椭球则采用 “IAG75” 椭球。

第二节 控制测量的坐标系

一、大地坐标系

地面点的大地坐标用大地经度 L 、大地纬度 B 和大地高 H 表示。

在大地坐标系中, 它的基本线和面如下:

过参考椭球面上的某点且与该点处的切平面相垂直的直线, 称为该点的法线。在图 2-3 中, P_1S 是地面点 P 沿着法线方向在参考椭球面上的投影; 含参考椭球短轴 NS 的平面, 称为大地子午面; 经过英国格林尼治平均天文台的大地子午面, 即图中 NCS 平面, 称为起始大地子午面; 垂直于短轴 NS 并过参考椭球中心 O 的平面, 即图中 WRE 平面, 称为赤道面。

地面上 P 点大地坐标的定义如下:

大地经度 L 是 P 点的大地子午面 NP_1S 与起始大地子午面所构成的二面角; 由起始大地子午面起算, 向东为正, 称为东经; 向西为负, 称为西经。角度值自 0° 至 180° 。

大地纬度 B 是 P 点对于参考椭球的法线 PP_1K 与赤道面的夹角。从赤道面起算, 向北称为北纬, 其值为正; 向南称为南纬, 其值为负。角度值自 0° 至 90° 。

大地高 H 是 P 点沿法线到参考椭球面的距离, 从椭球面起算, 向外为正, 向内为负。

通过参考椭球面上点 P_1 的法线和点 Q 的平面与点 P_1 的大地子午面之间的夹角 A 为 P_1Q 方向的大地方位角。从点 P_1 大地子午面的正北方向开始顺时针方向度量, 角度值自 0° 至 360° 。