

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第一章 绪论                    | 1  |
| 第一节 测量学的研究对象和任务           | 1  |
| 第二节 测绘工作在社会主义建设中的作用       | 2  |
| 第二章 测量学的基本知识              | 4  |
| 第一节 测量上常用的度量单位            | 4  |
| 第二节 地球形状和大小的概念            | 5  |
| 第三节 表述地表形态的几个基本概念         | 7  |
| 第四节 比例尺                   | 9  |
| 第五节 地形测量工作概述              | 13 |
| 第三章 距离丈量 and 直线定向         | 17 |
| 第一节 地面点的标志及直线定线           | 17 |
| 第二节 丈量距离的工具               | 19 |
| 第三节 丈量距离的方法               | 20 |
| 第四节 钢卷尺的检定                | 24 |
| 第五节 长度计算                  | 25 |
| 第六节 钢卷尺丈量长度的误差            | 27 |
| 第七节 直线定向                  | 29 |
| 第四章 水准测量                  | 33 |
| 第一节 高程测量概述                | 33 |
| 第二节 水准测量的原理               | 34 |
| 第三节 测量仪器上的望远镜             | 36 |
| 第四节 水准器                   | 40 |
| 第五节 水准仪                   | 43 |
| 第六节 水准标尺和尺垫               | 47 |
| 第七节 测量仪器的使用和维护            | 49 |
| 第八节 水准测量                  | 50 |
| 第九节 图根水准路线的高程计算           | 55 |
| 第十节 水准仪的检查校正              | 57 |
| 第十一节 水准测量的误差来源            | 62 |
| 第五章 角度测量                  | 69 |
| 第一节 角度测量的概念               | 69 |
| 第二节 J <sub>6</sub> 型光学经纬仪 | 70 |
| 第三节 水平角观测                 | 75 |
| 第四节 垂直角观测                 | 81 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第五节 经纬仪的检查校正.....     | 85  |
| 第六节 水平角观测的误差来源.....   | 90  |
| 第六章 解析图根控制测量.....     | 94  |
| 第一节 概述.....           | 94  |
| 第二节 解析图根测量的外业工作.....  | 98  |
| 第三节 电子计算器.....        | 101 |
| 第四节 坐标计算的基本公式.....    | 102 |
| 第五节 图根导线计算.....       | 105 |
| 第六节 单三角形计算.....       | 112 |
| 第七节 前方交会点计算.....      | 115 |
| 第八节 侧方交会点计算.....      | 117 |
| 第九节 后方交会点计算.....      | 117 |
| 第十节 辐射点和距离交会点计算.....  | 127 |
| 第十一节 线形锁计算.....       | 130 |
| 第七章 三角高程测量.....       | 148 |
| 第一节 三角高程测量原理.....     | 148 |
| 第二节 独立交会高程点.....      | 151 |
| 第三节 多角高程导线.....       | 152 |
| 第八章 视距测量.....         | 155 |
| 第一节 概述.....           | 155 |
| 第二节 定角视距测量的原理及公式..... | 156 |
| 第三节 视距乘常数的测定.....     | 159 |
| 第四节 视距计算表.....        | 161 |
| 第五节 视距导线测量.....       | 162 |
| 第六节 定角视距的精度.....      | 163 |
| 第七节 视差法测距.....        | 163 |
| 第九章 图解图根测量.....       | 168 |
| 第一节 大平板仪.....         | 168 |
| 第二节 小平板仪.....         | 170 |
| 第三节 平板仪的整置.....       | 171 |
| 第四节 大平板仪的检查校正.....    | 172 |
| 第五节 平板仪图解交会法.....     | 174 |
| 第六节 平板仪导线测量.....      | 179 |
| 第十章 大比例尺平板仪地形测图.....  | 183 |
| 第一节 概述.....           | 183 |
| 第二节 地形图的分幅和编号.....    | 183 |
| 第三节 高斯投影和平面直角坐标系..... | 188 |
| 第四节 地物符号.....         | 191 |
| 第五节 地貌的表示方法.....      | 193 |

|             |                    |            |
|-------------|--------------------|------------|
| 第六节         | 平板仪地形测图的准备工作       | 197        |
| 第七节         | 地形测图时的测站点          | 206        |
| 第八节         | 测定地形特征点的方法         | 206        |
| 第九节         | 大比例尺平板仪地形测图        | 209        |
| 第十节         | 地物的测绘              | 212        |
| 第十一节        | 地貌的测绘              | 218        |
| 第十二节        | 图边测图及原图的拼接、整饰      | 224        |
| 第十三节        | 原图的检查验收            | 225        |
| 第十四节        | 经纬仪测绘法             | 226        |
| <b>第十一章</b> | <b>地形图的应用</b>      | <b>230</b> |
| 第一节         | 地形图的野外判读           | 230        |
| 第二节         | 根据等高线确定高程和斜坡坡度     | 235        |
| 第三节         | 根据地形图绘制断面图         | 237        |
| 第四节         | 在平整土地中的应用          | 239        |
| 第五节         | 确定汇水面积             | 241        |
| 第六节         | 图上面积计算             | 241        |
| 第七节         | 地形图的缩放             | 245        |
| <b>第十二章</b> | <b>测量误差理论基础</b>    | <b>249</b> |
| 第一节         | 测量误差及其分类           | 249        |
| 第二节         | 偶然误差               | 250        |
| 第三节         | 衡量精度的标准            | 251        |
| 第四节         | 误差传播定律             | 254        |
| 第五节         | 算术平均值及其中误差         | 263        |
| 第六节         | 等精度观测值的中误差         | 265        |
| 第七节         | 同类量等精度双观测值的中误差     | 269        |
| 第八节         | 观测值的权              | 270        |
| 第九节         | 观测值函数的权            | 274        |
| 第十节         | 广义算术平均值及其中误差       | 276        |
| 第十一节        | 单位权中误差             | 278        |
| <b>第十三章</b> | <b>图根控制和地形图的精度</b> | <b>286</b> |
| 第一节         | 高程测量的精度            | 286        |
| 第二节         | 图根导线测量的精度          | 292        |
| 第三节         | 测角交会点的精度           | 296        |
| 第四节         | 单三角形的精度            | 303        |
| 第五节         | 线形锁的精度             | 306        |
| 第六节         | 图解测站点的精度           | 308        |
| 第七节         | 碎部点平面位置的精度         | 313        |
| 第八节         | 地形图高程的精度           | 314        |
| <b>参考文献</b> |                    | <b>318</b> |

# 第一章 绪 论

## 第一节 测量学的研究对象和任务

测量学是研究如何测定地面点的平面位置和高程，将地球表面的起伏形态及各种固定物体测绘成图，以及确定地球的形状和大小的科学。随着整个社会生产的发展，测绘业务逐渐专门化，测量学亦随之分出各个分支，成为各个独立学科，这些学科通常分为：

**大地测量学** 是研究在广大地面上建立国家大地控制网，精确地测定地球的形状和大小以及地球重力场的理论、技术和方法的学科。大地测量工作为其他测量工作提供起算数据。为空间科学技术和军事用途提供资料，并为研究地球形状、大小、地壳变形及地震预报等提供重要资料。

**地形测量学** 是研究测绘地形图的基本理论、技术和方法的学科。其任务是应用各种测量仪器或利用地面像片，将地球表面测绘成图。

**摄影测量学** 通过摄影像片和辐射能的各种图像记录手段，对其进行处理、量测、判释和研究，以测得物体的形状、大小和位置的模拟形式或数学形式的成果以及关于环境可靠信息的一门学科。其任务早先主要用以测绘地形图，而现在已愈来愈广泛地用于其他方面。

**工程测量学** 是研究工程建设勘测设计，施工和管理阶段所进行的各种测量工作的学科。其任务是在城市规划、工业设计、农田水利、交通运输、地质勘探等不同规模 and 要求的工程建设中，完成勘测设计、施工以及竣工后所需的各种各样的测量工作。

**制图学** 是研究地图及其制作的理论、工艺和应用的学科。其任务是利用已有的测量成果、成图，编制各种基本图和各种专业地图。完成地图复制和印刷出版工作。

上述几门学科，既自成系统，各有专务，又必需密切联系，相互配合，才能更好地为测绘事业服务。

测量学和其他科学一样，是在人类生产活动过程中产生和发展起来的。它是一门古老的科学。在世界上，早在纪元前 18 世纪，古埃及就进行过土地丈量。纪元前 6 世纪，埃及人民在建设尼罗河与红海之间的运河及尼罗河灌溉系统之类的工程中，都应用了测量学的知识。公元 7 世纪，阿拉伯人将中国的指南针传入欧洲，对测量中的定向问题，作出了重要的贡献。公元 17 世纪，哥白尼、加利略、开普勒及牛顿等科学家在科学上的发现与发明，如：望远镜、显微镜和水准器等光学上和力学上的成就，以及三角学在测量上的应用，对于测量学的发展曾经作出了重大的贡献。19 世纪，德国人高斯，在地图投影和测量平差方面也作出了重大的贡献。20 世纪 20 年代，航空摄影测量的应用，开始了测量工作的机械化时代。60 年代以来，由于近代光学、电子学、人造卫星摄影和航天技术的迅猛发展，为测量技术的自动化、电子化及数字化开辟了广阔的前景，而且在某些方面已将这些先进成果应用在测量工作中。例如利用遥感资料编制近海区域的海洋地图，以及电子计

算机、电磁波测距的广泛应用,显著地提高了测绘工作的效率,并大大减轻了作业中的繁重体力劳动。人造卫星定位技术、数字地形图技术的发展,势将引起测绘技术革命性的变化。总之现代测量技术正处在一个革新和不断发展的新阶段。

中国是世界上历史悠久的文明古国之一,测量学在我国历史上也有其光辉的一页。相传早在公元前 21 世纪夏禹治水时,就已采用了准、绳、规、矩这些简单的测量工具。在二千多年前的《管子》一书中,已有关于地图作用的论述。在长沙马王堆汉墓中出土的文物中,有公元前 2 世纪制作的《地形图》、《驻军图》和《城邑图》,这些图件证实了古书上有关论述的可靠性,它们是当今世界上能保存下来的最早的地图。公元 1 世纪,汉人张衡制成了较准确的天文测量仪器——浑天仪。公元 3 世纪,晋人裴秀编绘了《禹贡地域图》和《地形方丈图》,并总结了制图经验,提出编绘地图的原则,称为制图六体,即道里(距离)、准望(方向)、高下(地形起伏)、方邪(地物形状)、迂直(河流、道路的曲直)、分率(比例尺)。公元 724 年,曾在河南的滑县到上蔡一带,直接丈量了 300 km 长的子午线弧长,并用日圭观测太阳照射物体的阴影,以定纬度。这是我国第一次用弧度测量的方法确定地球的形状和大小。在公元 13 世纪和 18 世纪初,我国都进行过较大规模的大地测量工作。在 18 世纪初,曾根据大地测量成果编制了全国地图。

自 1840 年起直到解放前的百年来的历史,是中国人民遭受帝国主义、封建主义、官僚资本主义凌辱欺压的历史。反动统治严重地阻碍了我国生产力的发展,测绘事业也处于极端落后和停滞的状况。虽然也建立了测绘机构,创办了测绘学校,进行了一些测量工作,但成效甚小,成果、成图的质量不高。

1949 年,中华人民共和国成立后,我国测绘事业得到了迅速地发展。1950 年,中国人民解放军总参谋部测绘局成立,同时各大军区分别建立了测绘学校。1952 年清华大学等 6 所高等院校设置了测量专业,积极培养测绘技术人员。1956 年,建立了全国统一的测绘机构——国家测绘总局,管理全国性的测绘业务事宜。在建国后的十年内,基本上完成在全国范围建立大地控制网的工作,同时施测了大量的国家基本地形图。在治理淮河、黄河、根治黄河及长江流域规划等的勘测、设计工作中,测绘了各种比例尺的地形图。在进行工矿、农田、水利、城市、交通等各项经济建设中,有关部门也进行了大量的工程测量并测制了大比例尺地形图。在科学考察活动中,我国测量工作者和有关科学工作者协同努力,克服了各种艰难险阻,精确地测定了珠穆朗玛峰的高度(8848.13m),并对青、藏地区进行了较全面的综合科学考察。参加了南极探险,进行了极地的测绘工作。我国的测绘仪器制造业也相应地得到了发展,在较短的时间内,研制了普通的测绘仪器、航测仪器和某些较精密仪器,有的已达到国外同类型仪器的水平。测绘科学的研究工作也在有计划的进行并取得一定的成绩。

测绘事业虽然在十年浩劫时期遭到了严重的破坏,但这毕竟是前进中的挫折。在建设繁荣富强的社会主义祖国的伟大而艰巨的事业中,测绘工作有着极其重要的地位和作用。测绘事业也必将随着实现四个现代化的进程而得到不断的发展和进步。

## 第二节 测绘工作在社会主义建设中的作用

我国幅员广大,辽阔的土地需要我们去描绘和规划;丰富的地下矿藏,天然的水下资

源要靠我们去勘察、开发和利用，当世界上还存在着侵略者和破坏者的时候，美好河山、现代化的建设以及人民的幸福生活就需要我们去保卫。在建设和保卫祖国的伟大事业中，测绘工作的作用和意义是十分巨大的。

在地质矿产勘查中，测绘工作是一项重要的先行性、基础性并具有精确性特点的工作。现已成为一门专业测绘——地勘测绘。它为地质矿产资源勘查、矿山建设、环境地质监控和治理等方面，提供基础信息资料和科学技术方法。例如，为地矿资源勘查区（陆地、海洋、空间）提供大地定位基础；为描述勘查区各种地形、地质、矿产分布形态规律和赋存关系，测绘或编制各种地形图、地质图、专题地图；为防治地质灾害，监测地面沉降、滑坡、泥石流等及时提供各种形变数据；为矿山开发建设提供测绘保障；等等。

在农业和林业中，正确地进行土地整理以及森林的建设与经营，改良土壤、整理土地、开垦荒地以及实现许多旨在发展农业和林业的其他措施时，不仅需要利用地图和地形图，更需要进行精确的测量工作。

在交通运输业中，当修建铁路、公路、通航运河及它们的附属建筑工程时，初步方案，要根据地形图来制定；在勘察、设计和施工的各个阶段，都要进行测量工作。

在水利建设工程中，例如新安江水电站及举世闻名的葛洲坝综合水利枢纽工程，在进行规模如此巨大的工程建设时，首先要根据详细的地形图作出初步方案研究，然后进行勘察、设计、施工。测量工作应在勘察过程中为工程设计提供原始资料；在施工过程中，应保证正确地将设计转移到实地上。即使工程已经建成并交付使用后，仍然要进行精确的测量工作，以观察和发现工程建筑物所产生的变形、下沉和偏移，并提出准确的资料。

在城市建设中，科学的规划和整理居民地，城市的扩充与改建计划，建设城市交通路线，敷设地下管线、兴建地下铁道等，都必须有地形图和地图，并进行专门的测量工作。

人类赖以生存的土地，如何科学地利用和管理，是每个国家都必须解决的问题。而为了解决这一问题，首先就要进行地籍测量工作。

测绘工作在国防方面也是不可缺少的，地形图有“军人的眼睛”、“指挥员的参谋”之称。在现代战争中，研究地形、制定作战计划、指挥各兵种、军种的联合作战以及发射远程炮弹和导弹等等，都需要各种类型的地形图，并进行精密的测量工作。

综上所述可知，测绘工作在经济和国防建设方面有着多么重大的意义和作用。随着国家各方面建设工作的规模日益巨大、复杂的形势下，测绘工作在国家建设事业中所承担的任务也就愈来愈大。人们把测量工作者称作社会主义建设事业的“尖兵”，这是对测绘事业最崇高的评价。

## 习 题

1. 测量学的研究对象是什么？目前测量学分成了哪些独立学科，它们分别研究什么？
2. 地形测量学的主要任务是什么？
3. 试述测量学在我国社会主义建设中的作用。

## 第二章 测量学的基本知识

### 第一节 测量上常用的度量单位

要量测某量(长度、角度等)的大小,就需要有相应的度量单位。这些度量单位有的是经国际会议制定的,有的是根据各国自己的习惯制定的。

测量学中常用的是长度、角度、面积等度量单位。亦要用到重量、温度、时间等度量单位。下面分别介绍测量上常用的三种度量单位。

#### 一、长度单位

自1959年起,我国规定计量制度统一采用国际单位制。计量制度的改变,需要有适应过程,所以在一定时期内许可使用我国原有惯用的计量单位,叫做市制,并规定了市制与国际单位制之间关系。

国际单位制中,常用的长度单位的名称和符号如下:

基本单位为米(m),还有千米(km),分米(dm),厘米(cm),毫米(mm),微米( $\mu\text{m}$ )。其间关系为:

$$1\text{ m}=10\text{ dm}=100\text{ cm}=1\,000\text{ mm}$$

$$1\text{ mm}=1\,000\text{ }\mu\text{m}$$

$$1\text{ km}=1\,000\text{ m}$$

长度的市用制单位有:里、丈、尺、寸,其间关系为:

$$1\text{ 里}=150\text{ 丈}=1\,500\text{ 尺}=15\,000\text{ 寸};\quad 1\text{ m}=3\text{ 尺}$$

长度的市制单位规定使用到1990年为止。

#### 二、角度单位

我国采用的角度单位为 $360^\circ$ 制的度( $^\circ$ )、分( $'$ )、秒( $''$ )。即将一圆周角作360等分,每一等分为 $1^\circ$ 。 $1^\circ=60'$ , $1'=60''$ 。

在电子计算中,一般采用以上述度为单位的十进制(DEG)。如 $57^\circ354'$ 。

有些军用仪器上,角度单位采用密位制。即将一圆周角6000等分,每一等分叫1密位。

有些国家采用百进制的度(g)、分(c)、秒(cc)。即将一圆周角作400等分,每一等分为1g, $1^\circ=100^\circ$ , $1'=100''$ 。

测量计算工作中,在推导公式和进行运算时,较小的角度经常需要用另一种度量角度的单位,即用与半径等长的弧所对的圆心角作为量角的单位,叫做“弧度制”。

如果圆角上一段弧长 $\widehat{MM'}$ 与该圆半径 $OM$ 的长度相等,则此时 $\widehat{MM'}$ 所对应的圆心角 $\alpha$ 的大小,就叫做1弧度。通常以 $\rho(\text{rad})$ 表示,即:

$$\alpha = \frac{\widehat{MM'}}{OM} = 1$$

因为圆的周长是  $2\pi R$ , 所以一个圆周角的弧度值是:  $2\pi R/R=2\pi$ ; 平角是  $\pi$ ; 直角是  $\pi/2$  等等。这样, 圆周角的  $360^\circ$  制与弧度制之间的换算关系式是:

$$180^\circ = \pi \text{ 弧度 (rad)}$$

$$1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ 弧度} \approx 0.0174533 \text{ 弧度}$$

反之

$$1 \text{ 弧度 } (\rho^\circ) = \frac{180^\circ}{\pi} = 57^\circ 17' 45'' \approx 57.29578$$

$$(\rho') = 3437.747' \approx 3438'$$

$$(\rho'') = 206264.8'' \approx 206265''$$

### 三、面积单位\*

国际采用的面积主单位是平方米( $\text{m}^2$ )。我国大面积单位可用平方公里( $\text{km}^2$ )、公顷( $\text{hm}^2$ )。农业上习惯用市亩、分、厘作面积单位。

$$1 \text{ km}^2 = 100 \text{ hm} = 1\,000\,000 \text{ m}^2 = 1\,500 \text{ 市亩}$$

$$1 \text{ hm}^2 = 10\,000 \text{ m}^2 = 15 \text{ 市亩}$$

$$100 \text{ m}^2 = 0.15 \text{ 市亩}$$

$$[1 \text{ 市亩} = 10 \text{ 分} = 100 \text{ 厘}; 1 \text{ 市亩} = 60 \text{ 平方丈} = 666.6 \text{ m}^2]$$

## 第二节 地球形状和大小的概念

所有测量工作总是在地球表面进行的, 因此, 必然会涉及地球的形状和大小问题。测绘工作者必需对地球的形状和大小应具有明确的概念。

整个地球究竟是一个什么形状? 应怎样来表述它? 这是自然科学研究的极其重要的问题之一。但是虽经长期的测定和研究, 直到现在还没有作出十分完善准确的结论。这一课题仍然是需要进一步探讨的重要课题。

地球的自然表面有海洋和陆地, 是一个十分复杂的不规则表面。据推算, 海洋表面约占地球表面积的 71%, 而陆地约占 29%。陆地表面虽然高低起伏, 但最高的珠穆朗玛峰高出海面也不过 8848.13m, 与珠峰高度相差不多的山峰也是很少的。大部分陆地比一般海平面高不了多少, 所以陆地上的高低起伏差别, 相对于地球体积来说是极微小的。因此, 我们可以设想用一个均衡的海洋面来代表地球的表面。即设想一个静止在平均高度上的海洋面(即所谓平均海水面), 将它扩展延伸使穿过整个大陆和岛屿的下面。这个假定的海洋面是一个没有皱纹和棱角的、连续的封闭曲面, 它处处与重力方向垂直, 这个表面叫做大地水准面。大地水准面所包围的形体, 叫做大地体, 通常用大地体代表地球的一般形状。

长期的测量和研究结果表明: 地球是一个沿赤道稍微膨大而两极略为扁平的椭球(地球自转的结果)。现在根据卫星大地测量的资料分析, 进一步确定大地体是北极地区稍许凸

\* 经国务院批准的《技监局量发[1990]660号》文规定, 1992年1月1日起我国土地面积法定计量单位的名称系列为: 平方公里(平方千米)、公顷(平方百米)、平方米;

取消与国际单位制并用的公亩(a)(=100m<sup>2</sup>)计量单位, 这是由于公亩(a)的单位较小, 仅是市亩的1/6(即0.15市亩)。而市亩即将废除, 故完全可用公顷的分数单位或平方米的倍数单位来表示。在实用上也就没有必要再采用这一名称。

出（仅约 20 m），而南极地区稍许凹进的略显梨形的椭球。

静止的水面叫做水准面。水准面可以有无数多个，其中与平均海面一致且包围全球的水准面也就是大地水准面。水面静止时，即其表面处处受力（重力作用）均衡，所以水准面处处与重力方向垂直，但由于地球表面起伏不平 and 地球内部质量分布的不均匀，因此，地球引力不是处处一致的。亦即各点上铅垂线方向有不同的变化。所以大地水准面也是一个不规则曲面。在这个不规则的表面上，是无法进行各种测量计算的。为了能在地球表面上进行各种计算，我们就以一个和大地体非常接近的、有规则表面的数学形体，即旋转椭球体来代替大地体，并且将它作为测量工作中实际应用的地球形状。定位后的旋转椭球体，叫做参考椭球体。

旋转椭球体的形状和大小，是由它的长半径（轴） $a$  和短半径（轴） $b$  所决定的；也可由任一半径和扁率  $\alpha = \frac{a-b}{a}$  来决定。如图 2-1 所示。

上述半径  $a$ 、 $b$  和扁率  $\alpha$ ，叫做旋转椭球体元素。

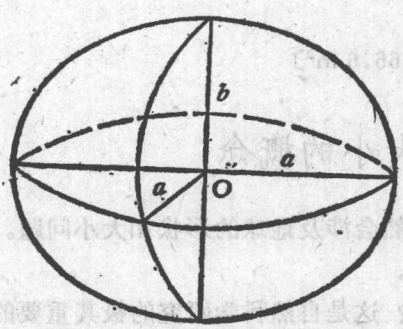


图 2-1 地球形状和大小

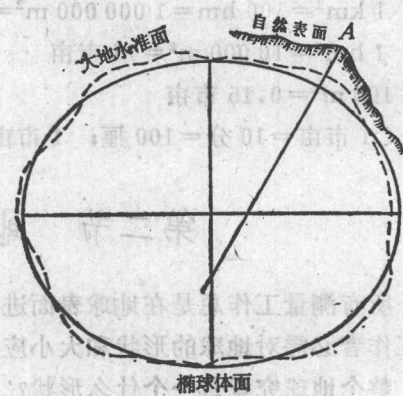


图 2-2 自然表面、大地水准面和椭球体面

很早以来，测绘和科研工作者，对地球的形状和大小曾不断地进行了测定和研究。20 世纪 60 年代以后，根据全球人卫观测资料，国际上也陆续地推算得一些新的椭球体参数。测定旋转椭球体元素是一项具有国际性和长期性的科研工作。随着空间技术的不断发展和完善，各国之间观测资料的交流和综合应用的发展，测定的结果无疑日趋精确。表 2-1 列举了有代表性的几个测定结果，以供参考。

表 2-1

| 年 代  | 国 家 | 推 算 者    | 长半轴 $a$ , m | 短半轴 $b$ , m | 扁 率 $\alpha$ |
|------|-----|----------|-------------|-------------|--------------|
| 1800 | 法 国 | 德 兰 勃    | 6375653     | 6356564     | 1:334.0      |
| 1841 | 德 国 | 贝 塞 尔    | 6377397     | 6356079     | 1:299.152    |
| 1880 | 英 国 | 克 拉 克    | 6378249     | 6356515     | 1:293.459    |
| 1910 | 美 国 | 海 福 特    | 6378388     | 6356912     | 1:297.0      |
| 1940 | 苏 联 | 克拉索夫斯基   | 6378245     | 6356863     | 1:298.3      |
| 1979 |     | 国际大地测量协会 | 6378137     |             | 1:298.257    |

各国测绘科技工作者，都希望推求适合于本国情况的参考椭球元素。由于历史所形成的原因，我国解放后一直采用克拉索夫斯基椭球元素。

由上述可知,地球表面除自然表面外,尚有大地水准面和参考椭球面这样三种表述方式。三者的关系如图 2-2 所示。可以看出:大地水准面和参考椭球面是不一致的,有的地方大地水准面高于椭球面,有的地方则低于椭球面。但其差数最大不超过  $\pm 150\text{m}$ ,在两极不超过  $\pm 30\text{m}$ 。

由于旋转椭球体的扁率很小(仅约  $\frac{1}{300}$ ),因此在某些测量计算工作中,可以近似地把地球作为圆球看待,亦能满足要求。此时,其半径则采用与椭球体等体积的圆球半径,即:

$$R = \sqrt[3]{\{b\}_{\text{km}} \cdot \{a\}_{\text{km}}^2} \approx 6371 \text{ km}$$

### 第三节 表述地表形态的几个基本概念

#### 一、可用水平面代替水准面的限度

当进行大区域、高精度测量工作时,应严格地基于参考椭球面进行各项运算。而处理地形测量学中一切需要考虑地球曲率的问题时,通常可以把地球当作圆球,其精度对于实用目的是足够的。

在地形测量中,当测区的面积不大时,还可以进一步把地球表面的个别部分当作平面,即将一部分水准面当作水平面,其所得结果也能满足精度要求。现在需要研究的问题是,在多大的范围内这样的简化是适宜的。

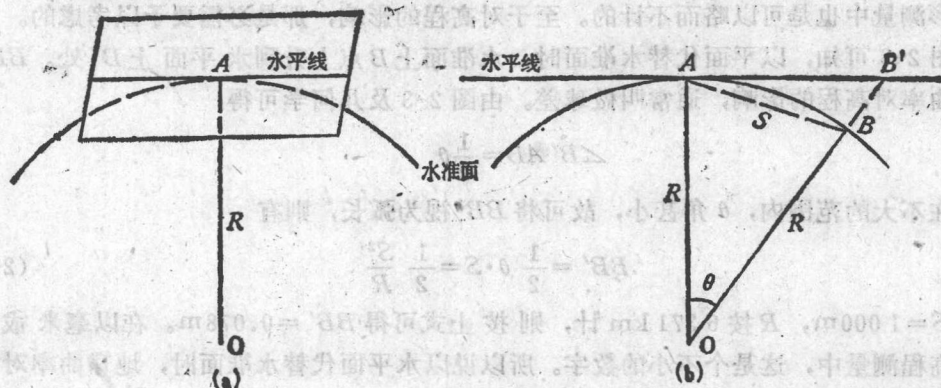


图 2-3 地球曲率对长度的影响

如图 2-3(a)所示,设球心为  $O$ , 半径为  $R$  的一部分球面为水准面。过水准面上任一点  $A$  作水准面的切平面,该平面叫做过  $A$  点的水平面。水平面上过  $A$  点的任意直线叫做过  $A$  点的水平线。

在图 2-3(b)中,  $A$ 、 $B$  为水准面上的两点,  $\widehat{AB}$  所对的圆心角为  $\theta$ 。延长  $OB$  与水平面的交点为  $B'$ 。

由图可得:

$$AB' = R \cdot \tan \theta$$

$$\widehat{AB} = R \cdot \theta$$

则两者的长度之差为:

$$\Delta S = AB' - \widehat{AB}$$

$$= R \cdot \operatorname{tg} \theta - R \cdot \theta$$

$$= R(\operatorname{tg} \theta - \theta)$$

上式经过数学变换, 并设  $\widehat{AB} = S$ , 最后可得

$$\Delta S = \frac{S^3}{3R^2} \quad (2-1)$$

$\Delta S$  就是以水平面代替水准面时, 长度所产生的误差。故 (2-1) 式即为长度误差的计算公式。若  $R = 6371 \text{ km}$ , 则依上式可得表 2-2 所列结果。

表 2-2

| 距 离 $S$ , km         | 10          | 50       | 100      |
|----------------------|-------------|----------|----------|
| 长度误差 $\Delta S$ , cm | 1           | 103      | 821      |
| 相对误差 $\Delta S/S$    | 1/1 000 000 | 1/49 000 | 1/12 000 |

由表 2-2 可以看出, 当地球表面上长度为 10 km 时, 用水平面代替水准面所产生的长度误差, 小于直线长度的 1/1 000 000, 而现代最精密的距离测量, 其误差也能达到 1/1 000 000, 所以在地形测量中, 当测量面积不超过 100 km<sup>2</sup> 时, 一般不考虑地球弯曲对长度的影响, 其原因就在这里。此外, 地球弯曲对角度测量的影响在 100 km<sup>2</sup> 范围内最大不超过 0."5, 这在地形测量中也是可以略而不计的。至于对高程的影响, 那是必需要予以考虑的。

由图 2-3 可知, 以平面代替水准面时, 水准面上  $B$  点上升到水平面上  $B'$  处。  $BB'$  即为地球曲率对高程的影响, 通常叫做球差。由图 2-3 及几何学可得:

$$\angle B'AB = \frac{1}{2}\theta$$

因在不大的范围内,  $\theta$  角甚小, 故可将  $BB'$  视为弧长, 则有

$$BB' = \frac{1}{2} \theta \cdot S = \frac{1}{2} \frac{S^2}{R} \quad (2-2)$$

当  $S = 1000 \text{ m}$ ,  $R$  按 6371 km 计, 则按上式可得  $BB' = 0.078 \text{ m}$ 。在以毫米或厘米计算的高程测量中, 这是个不小的数字。所以说以水平面代替水准面时, 地球曲率对高程的影响即使只有几百米距离, 也是需要予以考虑的。

## 二、垂直投影与中心投影

要将空间立体形状表达在一个平面上, 需采用投影方法。所以, 要把地球表面的高低起伏形状和固定物体位置测绘在平面图纸上, 亦需采用投影的方法。

地形测量中, 常用垂直投影和中心投影。

如图 2-4, 设多边形  $ABCDE$  为一空间图形, 在测区中心作一水平面  $MN$ , 然后从多边形的各顶点向水平面作垂线。这些相互平行的垂线与水平面的交点 (垂足) 分别是  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ , 叫做相应地面点的垂直投影 (也叫正射投影)。直线  $ab$ 、 $bc$ ……叫做相应空间直线  $AB$ 、 $BC$ ……的垂直投影。平面多边形  $abcde$  就是空间多边形  $ABCDE$  的垂直投影。

垂直投影只有当空间直线平行于投影平面 ( $MN$  水平面) 时, 其在投影面上的长度, 才与其原来的长度相等。否则, 空间直线在投影面上的长度总是小于原来的长度。

如图 2-5 所示, 若任取一点  $S$  (叫做投影中心, 一般可任意选择), 并将其与空间多边

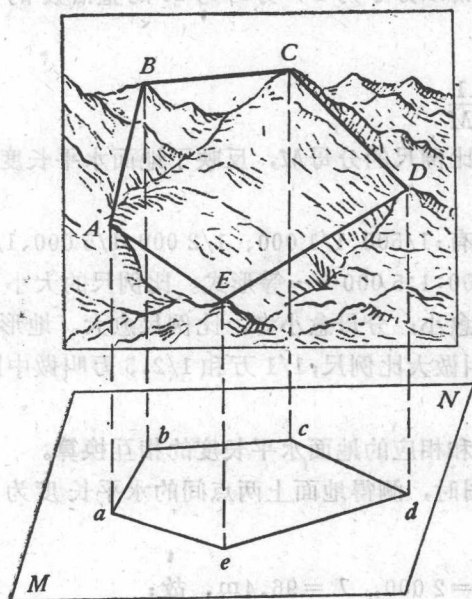


图 2-4 垂直投影

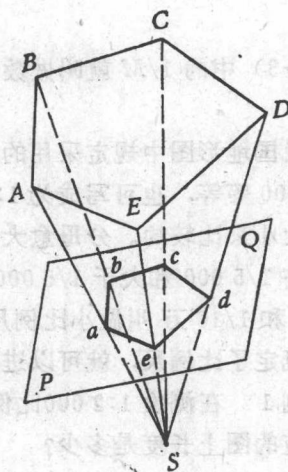


图 2-5 中心投影

形的各顶点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  分别连接，这些直线与平面  $PQ$  相交，则交点  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  叫做相应点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  的中心投影。直线  $ab$ 、 $bc$ ……叫做相应直线  $AB$ 、 $BC$ ……的中心投影。而平面多边形  $abcde$  叫做空间多边形的中心投影。

摄影机所拍摄的像片就是中心投影。当利用地面像片测绘成图时，就有一个把中心投影转换为垂直投影的过程。

### 三、平面图、地图、地形图

以水平面代替水准面，采用垂直投影，将地表起伏形态（地貌）和各种固定物体（地物）按比例缩小，相似地描绘在图纸上，这种图叫做平面图。

将地球上若干现象（自然的、社会的、经济的），按一定数学法则并采用制图综合原则成图的，都叫做地图。如果一张地图要表达大范围（如全县、全省、全国以至全世界）的情况，其图形就不可能是实地的相似形，即存在着一定的变形。但是，人们可按不同的用图目的而采用不同方法对成图某方面的变形加以限制。

如果按一定比例，表示出地面上的地物、地貌平面位置和高程的图，叫做地形图。地形图通常是正射投影图。

必须指出，也有将仅表示小范围内地物平面位置的图叫做平面图的。

## 第四节 比例尺

将地球表面某一地区的地物、地貌测绘在图纸上，不可能按其实际的大小来表示，必须按比例予以缩小一定的倍数来描绘。图上一直线的长度  $l$  与地面上相应直线的水平长度  $L$  之比，叫做图的比例尺，按照表示方法不同，比例尺一般分为两类：

### 一、数字比例尺

为了应用和计算方便,图的比例尺通常以分子为1,分母为10的整倍数的分数形式来表示。依上述比例尺的定义,则有:

$$\frac{l}{L} = \frac{1}{M} \quad (2-3)$$

式(2-3)中的 $1/M$ 就叫做数字比例尺。比例尺的分母 $M$ ,反映了地面水平长度应缩小的倍数。

我国地形图中规定采用的数字比例尺有:1/500、1/1 000、1/2 000、1/5 000、1/10 000、1/25 000等等,也可写成为1:500、1:1 000、1:5 000……等形式。比例尺的大小是以其比值的大小来比较的。分母愈大者,比例尺愈小;分母愈小者,比例尺愈大。地形测量中,通常将1/5 000和大于1/5 000的比例尺叫做大比例尺;1/1万和1/2.5万叫做中比例尺;1/5万和1/10万叫做小比例尺。

确定了比例尺,就可以进行图上长度和相应的地面水平长度的相互换算。

例1 在测绘1:2 000比例尺的地形图时,测得地面上两点间的水平长度为96.4m,求相应的图上长度是多少?

由式(2-3)可得:  $l = \frac{L}{M}$ ; 今已知 $M=2\ 000$ ,  $L=96.4\text{m}$ , 故:

$$\text{图上长度 } l = \frac{96.4\text{m}}{2000} = 4.82\text{ cm}$$

例2 在比例尺为1:25 000的地形图上,量得两点间的图上长度为5cm,求相应的地面水平长度是多少?

由式(2-3)可得:  $L = M \cdot l$ ; 已知 $M=25\ 000$ ,  $l=0.05\text{m}$ , 故:

$$\text{相应的地面两点间的水平长度 } L = 25\ 000 \times 0.05\text{m} = 1250\text{m}$$

## 二、图示比例尺

在测绘和使用地形图时,都要进行图上长度与相应的地面长度的互相换算工作。如果按数字比例尺的关系进行上述运算就显得繁杂和不方便。为此,一般采用较为简便的图示比例尺。

图示比例尺分为直线比例尺和斜线比例尺两种。

### 1. 直线比例尺

直线比例尺是按照规定的数字比例尺来绘制的,其方法如下:

在图纸上先绘一直线,从直线上一端开始,连续截取若干相等的线段,这些等长的线段叫做比例尺的基本单位。基本单位的长度,一般选用便于计算的整数,如1cm或2cm。再将直线上最左端的一个基本单位长度等分为10小段,并以其右端点为零点。然后根据规定的数字比例尺计算得一个基本单位长度和1/10基本单位长度,以及零点到各分点的长度所相应的地面水平长度,分别注记在相应的分点上。

图2-6(a)为已绘成的1:5 000的直线比例尺。在该比例尺上每一基本单位长度为2cm,其相应的实地水平长度为100m,1/10基本单位长度相应的实地水平长度则为10m。在等分为10小段的那个基本单位的右端线上,注记0,则由0点向右的各基本单位分划线依次注记100、200、300、400,最后注上单位m;而由0点向左分别在1/2基本单位分划线及基本单位分划线上注记50、100。再在比例尺的下方写明数字比例尺1:5 000,

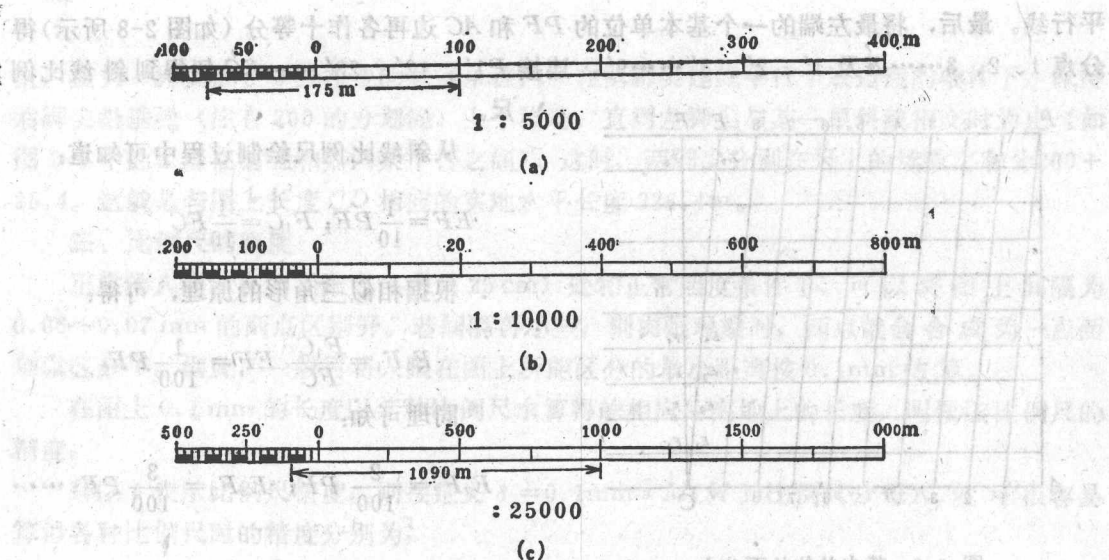


图 2-6 直线比例尺

这样就成为 1:5000 的直线比例尺。按照同样的方法,可以绘制其他各种缩比的直线比例尺。

下面以实例说明直线比例尺的使用方法。

例 3 在 1:5 000 直线比例尺上,试量取相应于实地水平长度 175m 的图上长度。

在图 2-6(a)上,用两脚规的一个脚尖对在 0 线左边相当于 75m 的分划线上,而另一个脚尖则在 0 线右边为 100m 的分划线上,这时两脚尖之间的固定长度,就是所求的相当于实地水平长度 175m 的图上长度。

例 4 在 1:25 000 比例尺的地形图上,用两脚规截取了一段长度  $l$ ,试求其相当于实地水平长度是多少?

不改变截取的两脚尖之间的长度  $l$ ,在图 2-6(c)上,以一脚尖对在 0 线右边适当的基本单位分划线上(如 1000m 分划线),使另一脚尖落在 0 线左边的基本单位内。这时,两脚尖在直线比例尺上的读数之和 (1000 + 90),即相应于  $l$  的实地水平长度 (1090m)。

## 2. 斜线比例尺

从直线比例尺的使用中知道,基本单位的  $1/10$  可在比例尺直接量取,而小于  $1/10$  基本单位则只能目估了。为了能准确地直接量取基本单位的  $1/100$ ,可应用斜线比例尺。

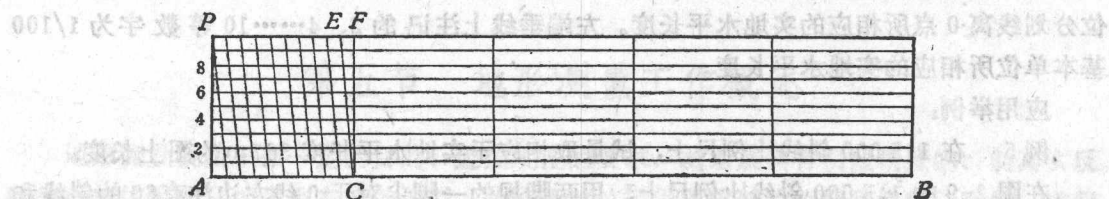


图 2-7 斜线比例尺的绘制图

斜线比例尺的绘制方法,如图 2-7 所示。在 AB 直线上按确定的基本单位长度,自一端起连续截取若干等长线段,从各分点作 AB 直线的垂线(通常使垂线长度等于一个基本单位的长度,理论上可选任意长度),并将两端的垂线各作十等分,再由此各分点作 AB 的

平行线。最后，将最左端的一个基本单位的  $PF$  和  $AC$  边再各作十等分（如图 2-8 所示）得分点 1、2、3…… $E$  及 1'、2'、3'……9'，连接  $P1'$ 、 $12'$ 、 $23'$ …… $EC$  便得到斜线比例尺。

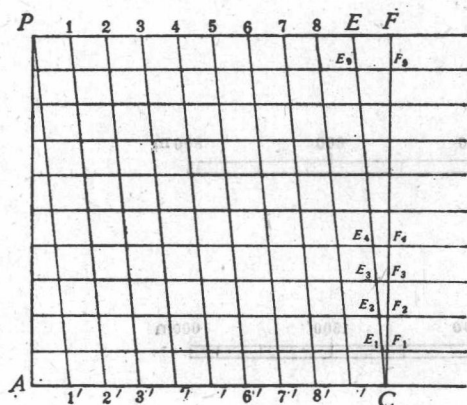


图 2-8 基本单位的百分之一

从斜线比例尺绘制过程中可知道：

$$EF = \frac{1}{10} PF, F_1C = \frac{1}{10} FC$$

根据相似三角形的原理，可得：

$$E_1F_1 = \frac{F_1C}{FC} EF = \frac{1}{100} PF$$

同理可知：

$$E_2F_2 = \frac{2}{100} PF; E_3F_3 = \frac{3}{100} PF; \dots\dots$$

$$E_9F_9 = \frac{9}{100} PF$$

上述表明：线段  $E_1F_1$ 、 $E_2F_2$ …… $E_9F_9$  中，任意两相邻线段之间都相差  $1/100$  基本单位。所以，在这种比例尺上就能准确地直接量取基本单位的  $1/100$ 。

上述图形绘制好后，再应按确定的数字比例尺在所绘的斜线比例尺上分别标记各相应的数字。

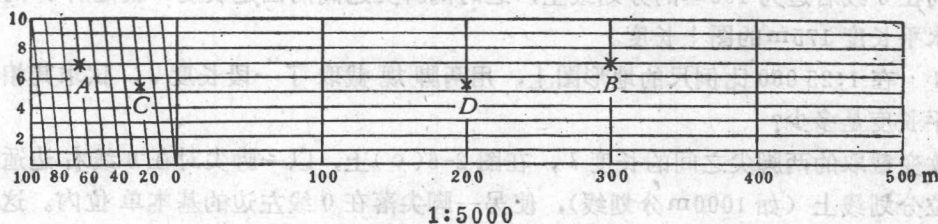


图 2-9 1:5000 斜线比例尺

图 2-9 为 1:5 000 斜线比例尺。比例尺底边上注明的 100、200……500m 为各基本单位分划线离 0 点所相应的实地水平长度。注记有 20、40……100 等数字为各  $1/10$  基本单位分划线离 0 点所相应的实地水平长度。左端垂线上注明的 2、4……10 等数字为  $1/100$  基本单位所相应的实地水平长度。

应用举例：

例 5 在 1:5 000 斜线比例尺上，试量取相应于实地水平长度 367m 的图上长度。

在图 2-9 的 1:5 000 斜线比例尺上，用两脚规的一脚尖对于 0 线左边注有 60 的斜线和第 7 条平行线的交点  $A$  上，将另一脚尖对在 0 线右边注有 300 的垂直线和第 7 条平行线的交点  $B$  上，则  $AB$  之间的长度就是所求的长度。

例 6 在 1:5 000 比例尺地形图上，用两脚规截取的图上长度为  $CD$ ，求其相应的实地水平长度。

把两脚规的一脚尖对在 0 线右边适当的分划线（如图 2-9 中注有数字 200 的垂直线）

上,使另一脚尖放在0线左边的基本单位内。在两脚尖连线平行于底边线的条件下,保持右脚尖沿垂线(注有200的分划线)上下移动,直到左脚尖与某一根斜线相交时为止(如图2-9中的C点在第五和第六条平行之间)。这时,两脚尖分别在尺上的读数之和为200+25.4。这就是与图上长度CD相应的实地水平长度225.4m。

### 三、比例尺的精度

正常的人眼睛在明视距离(约为25cm)处和正常照度条件下,可以将图上间隔为0.06~0.07mm的两点区别开。若间隔再小些,则肉眼观察时,两点就会合成为一点而难以区分了。因此,一般可将人眼在图上所能区分的最小距离按0.1mm估算。

在图上0.1mm的长度以某种比例尺求算得的相应的实地上的长度,叫做该比例尺的精度。

若以 $\delta$ 表示比例尺精度,则按定义 $\delta = 0.1\text{mm} \times M$ ( $M$ 为比例尺分母),就可很容易算得各种比例尺时的精度分别为:

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| 1:2 000 比例尺的精度  | $\delta = 0.2\text{m}$ |
| 1:5 000 比例尺的精度  | $\delta = 0.5\text{m}$ |
| 1:10 000 比例尺的精度 | $\delta = 1.0\text{m}$ |
| 1:25 000 比例尺的精度 | $\delta = 2.5\text{m}$ |

等等。

为了解决地形测量中某些实际问题,我们需要知道比例尺的精度。例如,测绘地形图时,测量距离应准确到什么程度?多大尺寸的物体可以在图上按相似形表示?多大尺寸的物体在图上只能用点或线条表示?这些问题都是与比例尺精度有关。所以,当测图比例尺分别为1:1000、1:5000和1:10000时,测量的实地长度相应的应准确到0.2、0.5和1.0m以内,否则就会影响测图的精度。当地面物体有分别大于0.2、0.5和1.0m的变化时,都能按其形状如实地表示在图上。而轮廓尺寸小于0.2、0.5和1.0m时,只能以点来表示。在地形图上,要表示尺寸小于比例尺精度的某些重要物体时,可采用规定的符号。

反之,若为使某种尺寸的地面情况都能在图上表示出来,则可按要求确定应该选用多大的比例尺。例如要使地面上大于0.5m的一切状态都能在图上表示出来,则可选取比例尺精度等于0.5m,经计算得 $M = 0.5\text{m} / 0.1\text{mm} = 5000$ ,亦即此时测图比例尺不应小于1:5000。

## 第五节 地形测量工作概述

地形测量就是根据一定的目的、遵照规范的要求,测绘成具有相应精度的、能真实反映地面物体情况和地表形态的地形图,为使用单位提供所需要的数据和资料。当然,进行任何一种测量工作,无论采用多么精密的仪器和完善的方法,测量的结果中总是会有误差的。因此,应采取有效的措施,将误差限制在可容许的范围内,并尽量防止误差的累积,以保证测量成果的质量。

对于地形测图来说,总是将一个测区(范围较大时),划分为同样大小的若干图幅,在保持精度一致的情况下,同时平行作业,最后则要求将分散施测的各图幅能拼接成一体。要确实做到这一点,必须在测量作业的每一个环节上采取相应的措施和切实有效的作

业规则。为此,测量规范中确立了“从整体到局部”、“由高级到低级”、“先控制后测图”的作业原则,从而保证了测量工作具有统一的精度。

下面就地形测量中按这些原则进行作业的步骤分别作简要的介绍。

### 一、建立基本控制网(点)

根据作业要求及地形条件,在测区内选择一定数量的具有控制作用的地面点,并在各点上建立固定的测量标志(标石及觇标)。用相应精度的仪器和观测方法,测定这些点的平面位置和高程,以建立测区内统一的平面和高程控制,作为测区内后继测量工作的基础。在此基础上进一步加大控制点密度后,就可利用所有控制点来测绘该测区的地形图。这样既减小了误差的累积,又能够将分幅施测的地形图拼接成一体,从而保证了各项测量工作的精度。

这种按较高精度首先建立的一定数量的地面点,叫做基本控制点。由若干控制点组成的网状图形或其他图形叫做基本控制网,如图 2-10 所示。

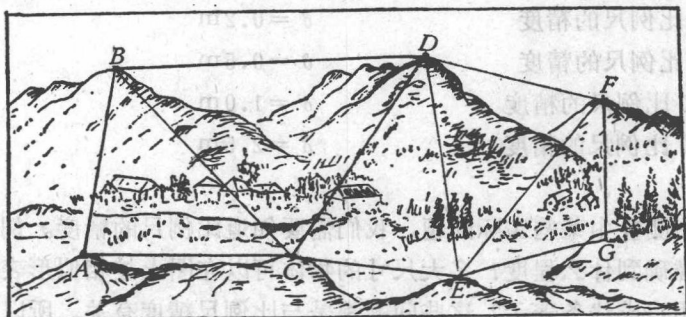


图 2-10 基本控制网

基本控制网一般应是国家等级控制网,或在国家等级控制网的基础上扩展的小三角网。在某些情况下,也可以独立进行布设。测图区内的第一级控制,又叫首级控制。基本控制网分为基本平面控制网和基本高程控制网。

基本平面控制网一般是用三角测量或导线测量的方法来建立的,其目的是求得这些控制点的平面坐标。这些平面控制点相应地叫做三角点或导线点。

基本高程控制网则是用水准测量或三角高程测量的方法来建立的,其目的是求得这些控制点的高程。用水准测量方法测定的高程控制点,叫做水准点。

### 二、图根控制测量

测区内按照上述方法建立的首级平面控制点和首级高程控制点,其数量是不多的,仅仅以这些控制点来测图,其密度是远远不够的。这就有必要进一步以首级控制点(包括平面和高程控制点)为基础,应用适宜的图形和方法在首级控制点之间,加测一定数量的、较首级控制点精度低一些的控制点,这个作业过程叫做加密。这些加密的控制点,叫做图根控制点(简称图根点)。根据测区的条件,在首级控制网的基础上,图根点可以分两级进行加密,以满足地形测图对图根点数量的要求。

### 三、地形测图(碎部测量)

通过上述控制点的测量,使测区内每一图幅中有规定数量的控制点(主要是图根控制点)。当然,有可能受地形条件的限制,某些图幅内局部地方图根点仍然不足,此时可在测