

# 第一章 绪 论

## 1.1 测绘学及其发展

测绘学是研究测定和推算地面点的几何位置、地球形状及地球重力场，据此测量地球表面自然形态和人工建（构）筑物的几何分布，编制全球或局部地区各种比例尺的地形图和专题图的理论与技术的学科。由于政治、经济和科学文化发展的需要，测绘学科在人类历史进程中很早就产生了，并与人们的生产和生活紧密联系。根据史料记载，4000多年前，埃及尼罗河水经常泛滥，洪水消退后为了重新测定土地边界，就曾用到了测量学的知识。公元前6世纪希腊哲学家毕达哥拉斯提出地球为圆球形的学说，直至公元前3世纪由希腊天文学家埃拉托色尼初步测定，公元15世纪哥伦布发现新大陆才得以证明。公元16世纪墨卡托创造了著名的地图制图方法，称为墨卡托投影。公元18世纪初，测定地面高低起伏形状的水准高程测量方法产生了。公元19世纪德国著名数学家、天文学家和测量学家高斯提出了横轴椭圆柱面投影学说（高斯投影），并创立了最小二乘法，这些学说与方法至今仍是测量与地图学的基础。第一次世界大战期间，为了快速解决军事用图的需要，航空摄影测量诞生了。至今，正由光学模拟测量，解析摄影测量，发展成为全自动数字摄影测量。

测绘科学在我国的发展始于公元前21世纪。《史记·夏本纪》中著名的夏禹治水所用的“准、绳、规、矩”就是实际测量的工具。春秋战国时期，测绘学科有了新的发展。从《周髀算经》、《海岛算经》、《管子》（地图篇）、《孙子兵法》等有关论述，可以说明我国测绘学科在当时已经达到了相当高的水平。公元前3世纪，我们的祖先已利用磁石制成了世界最先进的指南工具“司南”。西晋裴秀（公元224~271）在总结前人制图经验的基础上，编制了小比例尺地图法则，称为《制图六体》，是世界上最早的地图制图规范。魏晋的刘徽著“重差术”是世界上最早的地形测量规范。唐代的张遂于公元724年主持在今河南境内直接丈量了长达300km的子午弧长，并用日圭测定太阳阴影以确定纬度，在世界上最早用子午线弧长测量方法测定地球形状与大小。到公元11世纪，我国已有四种指南针装置与制作方法。元代郭守敬（公元1231~1316）拟定了全国纬度测量计划。清康熙年间（公元1684~1718）开展了大规模的经纬度测量和地形测绘，编制了著名的《皇舆全览图》。

中华人民共和国成立后，我国测绘事业有了长足发展，已经在全国范围内建立了国家大地控制网、水准网、基本重力网和卫星多普勒网。应用GPS卫星全球定位

系统测量技术 (Global Positioning System, GPS) 北起大兴安岭 南至南沙群岛, 西自塔克拉玛干沙漠 东到沿海地区大陆架 测定了 700 多个 GPS 定位点 定位精度已经达到国际先进水平。完成了珠穆朗玛峰高程测量和南极长城站及中山站地形图测绘。在举世瞩目的长江三峡水利工程、北京正负电子对撞机安装、上海越江隧道、秦山核电站等大型工程建设中, 测绘工作者都做出了卓越的贡献。

随着现代科学技术的发展, 测量手段正由传统的高程测量、角度测量、距离测量发展为激光测量、全自动测量和 GPS 定位测量 正在对大地测量学、工程测量学等的理论和方法产生革命性影响。星载或机载 GPS 卫星测量还在航天航空摄影测量中起着重要作用。我国 GPS 局域或广域差分技术研究与应用, 将实现覆盖全国及周边地区的实时、可靠的定位和导航服务。摄影测量由获取航空摄影照片的解析摄影测量发展为航空航天遥感测量 (Remote Sensing, RS), 直接获取被测物的数字影像信息。人们熟悉的地图、地形图等正在发展成为数字地图, 并在此基础上形成地理信息系统 (Geography Information System, GIS)。GPS、GIS、RS 等高新技术的集成产生了地球空间信息学。随着“数字地球”的建立, 测绘学科在国民经济、工程建设和国防建设中的应用将更加广泛。例如, 在 1998 年长江百年不遇的大洪水中 利用 GPS 卫星测量技术实时可靠地提供长江荆江段大堤的变形监测数据, 保证了两岸数十万人民的生命财产安全。同时 GPS 测量用于大型施工控制网建立 高层建筑、大型构筑物的变形监测 遥感技术用于对地观测与全球变化研究 使人类对于自己生存的地球有了新的认识。其中差分干涉雷达成像技术的发展, 正在为地震监测、城市大型工程安全性运行以及快速生成数字地面模型提供又一高新技术手段和方法; 地理信息系统用于政府管理决策、大型工程的仿真研究; 地理信息系统与计算机虚拟现实技术结合, 使城市规划研究正在发展成为规划专家、政府决策人员与普通市民共同参与的城市规划。

## 1.2 测绘学与土木工程

在土木工程应用中, 测绘学的任务主要包括地形测绘、施工测设和监测三个方面内容。地形测绘是通过一定的测量方法将地球表面的一定区域缩绘成图, 供国防和国家经济建设的需要。施工测设是将设计在图纸上的建(构)筑物位置标定到实地 作为建筑施工的依据。监测则是对各类建(构)筑物(如高层建筑、大型水工构筑物、城市高架桥等)、山体、地壳等因各种荷载变化或外力作用后产生的变形进行实时测量。

测绘学根据其研究对象、要求和手段不同, 已经形成了一些分支。普通测量学是研究地球表面较小范围内测量的基本技术、方法与应用的学科。当前, 大比例尺地形图的数字成图和可视化技术应用将使普通测量学得到进一步发展。大地测量学是研究和测定地球形状、大小、地球重力场以及建立国家大地控制网。现代大地

测量已经突破了经典大地测量的时空限制，进入以空间大地测量为主的新阶段，它将为人类提供高精度、高分辨率、适时、动态的定量空间信息，是研究地壳运动与形变、地球动力学、海平面变化、地质灾害预测等的重要手段之一。摄影与遥感测量是通过航空、航天遥感的手段获取被测物影像或数字信息，进行分析处理后得到被测物的位置、形状、大小及其他属性特征，进而生成各种比例尺地图、地形图和专题图。全数字摄影测量、机载实时测图、航空航天遥感影像信息融合、数据挖掘、图形和图像数据库、数字地面模型、数字表面模型和虚拟现实正在成为这门学科的关键技术。工程测量学研究大型工程建设在勘测、规划、设计、施工和管理阶段的测量技术和方法。工程测量学面向大型、特种工程建设。从电磁波测距、电子测角到全站仪以及测量机器人技术、卫星测量技术等都在大型土木工程施工与监测中得到大量应用。测量自动化、测量数据的三维可视化和激光技术等在大及特种工程中起着重要作用。

GPS 卫星测量又称导航卫星全球定位系统，通过安置在地面（或车、机载平台）上的 GPS 卫星信号接收机，接收来自太空的 GPS 卫星发射回地球的导航电文。据此，可在很短时间内计算得到接收机天线中心的三维坐标。地理信息系统是利用计算机数据库技术与地球有关的空间位置和属性特征（例如地面植被分布、地表水质、地下矿藏储量等数据）存放在数据库中，在此基础上实现智能化应用。由于地理信息系统管理着丰富的与地球空间位置有关的地理、环境、资源、人文等属性数据，已经在包括土木工程在内的众多领域有着广泛应用。

人类随着对于自己生存的地球的认识的加深，将会越来越多地依赖于测绘遥感信息与技术。在工农业生产方面，从工程的勘测、规划、设计到施工组织、竣工验收、工程安全性监测等都要进行大量的测量工作。GPS、GIS 技术还在大型水工构筑物变形监测与仿真研究中起着重要作用。在国防建设中，军事测绘、GPS 实时定位技术正在成为大规模诸兵种协同作战的技术保障之一。GPS、GIS、RS 与计算机虚拟现实技术结合使远距离精确制导武器的威力越来越大。在空间武器、人造卫星或航天器发射中，测绘学科除了提供精确的空间坐标外，还要提供有关的空间重力场资料。在科学研究方面，随着各类航天器的发射，特别是高空间分辨率、高光谱分辨率和高时相分辨率遥感卫星的发展，使全球监测与预报研究在国民经济中的地位更加凸显。

上述有关测绘科学的各项高新技术，已在或正在土木工程各专业中得到广泛应用。在工程建设的规划设计阶段，各种比例尺地形图、数字地形图或有关 GIS 用于城镇规划设计、管理、道路选线以及总平面图设计和竖向设计等，以保障建设选址得当，规划布局科学合理；在施工阶段，特别是大型特大型工程的施工，GPS 技术和测量机器人技术已经用于高精度建构物的施工测设，并适时对施工、安装工作进行检验校正，以保证施工符合设计要求；在工程管理方面，竣工测量资料是扩建、改建和管理维护必须的资料。对于大型或重要建构物还要定期进行变形



多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面。大地水准面是测量工作的基准面，大地水准面包围的地球形体称为大地体。

地球内部质量分布不均匀，使铅垂线的方向产生不规则变化[图 1.1(c)]。因此，大地水准面仍然是一个复杂的曲面，人们还是无法在这个曲面上直接进行测量的数据处理。从地球动力学的角度看，地球是一个旋转的均质流体，其平衡状态是一个旋转椭球体[图 1.1(b)]，大地测量也证明了地球是一个沿赤道稍稍膨起和两极略扁的椭球体。为此，通常用一个非常接近大地水准面的旋转椭球面代替地球表面。旋转椭球体的表面是一数学面，可以作为测量计算工作的基准面。其参数方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1.1)$$

式中： $a$ ——椭球体的长半轴；

$b$ ——其短半轴。

定义椭球体的扁率  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{a - b}{a} \quad (1.2)$$

目前，我国采用的椭球参数为： $a = 6\,378\,137\text{m}$ ， $\alpha = 1 : 298.57$ 。

经过椭球体定位，得到我国的大地坐标系，称为国家大地坐标系。我国大地坐标的原点在陕西省泾阳县永乐镇。由于旋转椭球体的扁率很小，当测区面积不太大时，可以把地球近似当作圆球看待，其平均半径为 6371km。

### 1.3.2 确定地面点位的方法

测量工作的根本任务是确定地面点的位置。众所周知，表示地面点的空间位置需要三个分量。测量工作中用该点投影到椭球面上或水平面上的位置和该点到大地水准面的铅垂距离表示，即地面点的坐标和高程。为了方便起见，通常分别是测量点在投影面上的坐标和到大地水准面的距离。

#### 1. 地面点的高程

地面点到大地水准面的铅垂距离称为该点的绝对高程，或称海拔。如图 1.2 所示地面上  $A$ 、 $B$  两点沿铅垂线方向到大地水准面的距离为  $H_A$  和  $H_B$ ，即绝对高程。由于海水面是一个随时间发生变化的动态曲面，为此，在我国青岛海边设立海水涨落观测站，称为验潮站，长期观测海水面的升降变化，同时，建立一个与验潮站相联系的水准基点，作为高程起算点；这个水准基点称为水准原点。

目前，我国采用的“1985 国家高程基准”是根据青岛验潮站 1952~1979 年验潮资料等确定的我国黄海平均海水面起算的高程系统。依此推算出国家水准原点高程值为 72.260m。

在局部地区或根据工程需要，也可以假设一个水准面作为高程起算面。如图

1.2 所示，地面点到该水准面的铅垂距离称为假定高程，或者叫做相对高程。地面点  $A$  的绝对高程为  $H_A$  相对高程为  $H'_A$ 。两个地面点间的高程之差称为高差。地面点  $A$ 、 $B$  之间的高差可写为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A$$

由上式可知，两点间的高差与高程起算面无关。

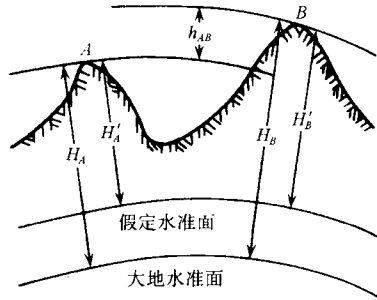


图 1.2 高程系统关系

## 2. 地面点在投影面上的坐标

### (1) 大地坐标系。

当研究整个地球或较大区域的测量工作时，考虑到地球曲率的影响，可建立关于旋转椭球面的大地坐标系（或者建立相应大地直角坐标系）。用大地经度  $L$  和大地纬度  $B$  表示地面点在旋转椭球面上的位置。如图 1.3 所示，以  $O$  为中心的旋转椭球体，其旋转轴与地球自转轴平行，其起始子午面  $NGDS$  与英国格林尼治天文台平均子午面平行。起始子午面与旋转椭球体的截线称为首子午线。设地面一点在旋转椭球面上的投影为  $P$  则该点的大地经度  $L$  就是过  $P$  点的子午面  $NPAS$  与起始子午面  $NGDS$  所构成的二面角。该点的大地纬度为过  $P$  点的法线  $PK$  与赤道面的夹角。我国目前采用的是 1980 年国家大地坐标系。

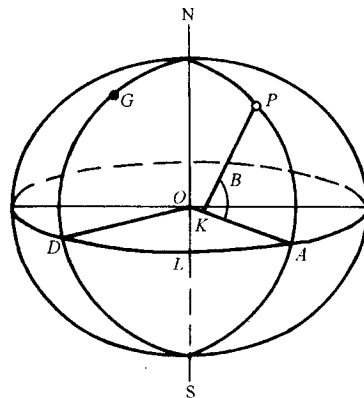


图 1.3 大地坐标系

## (2) 高斯平面直角坐标系。

大地坐标系只能用来确定地面点在旋转椭球面上的位置，而大比例尺地形图的测绘是相对于水平面而言，其测量计算也是在平面上进行。为此，有必要将旋转椭球面上的点位或图形投影到一平面直角坐标系，这种投影称为地图投影。地图投影的方法很多，我国采用的是高斯-克吕格投影方法（简称高斯投影）。

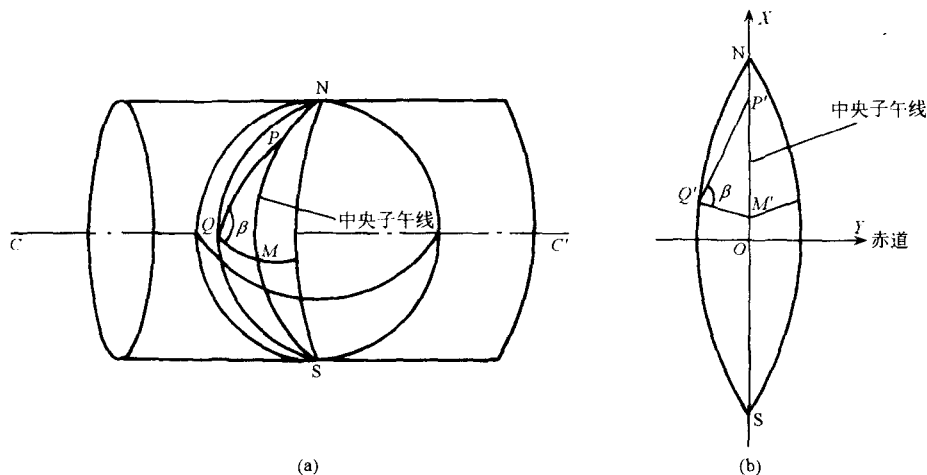


图 1.4 高斯-克吕格投影

如图 1.4 所示，高斯投影是设想用一个椭圆柱面横着套在地球椭球外面，使圆柱的中心轴线  $CC'$  通过地球椭球中心并与地球自转轴垂直，椭圆柱面与地球椭球上一子午线相切。在保证投影前后角度相等的条件下，将切线两侧一定经度差范围内地球表面投影到该椭圆柱面上，然后沿椭圆柱面上过南北极的母线剪开，将其展开成为平面，即高斯投影平面。在高斯平面上原切线（即子午线）是一条直线且长度不变形，称该子午线为中央子午线。离开中央子午线越远，其长度投影变形越大。为了控制投影变形的程度，通常按经差  $6^\circ$  分带，即从地球椭球的首子午线（通过英国格林尼治天文台的首子午线）起，将旋转椭球按经差  $6^\circ$  由西向东划分为 60 个投影带。按每带进行投影，称为  $6^\circ$  投影带。用数字 1、2、3、...、60 表示投影带的号数。则第 1 带的范围自经度  $0^\circ$  到经度  $6^\circ$  该投影带的中央子午线经度为  $3^\circ$ 。

任意带的中央子午线经度  $L_0$ 。按下式计算：

$$L_0 = 6^\circ N - 3^\circ \quad (1.3)$$

式中  $N$  为  $6^\circ$  投影带的带号。

当测绘大比例尺地形图时，要求投影变形更小，则可将旋转椭球按经差  $3^\circ$  从东经  $1^\circ 30'$  起由西向东划分为 120 个带，称为  $3^\circ$  带，如图 1.5 所示。每带中央子午线的经度为

$$L_0 = 3^\circ n \quad (1.4)$$

式中  $n$  为  $3^\circ$  带的号数。

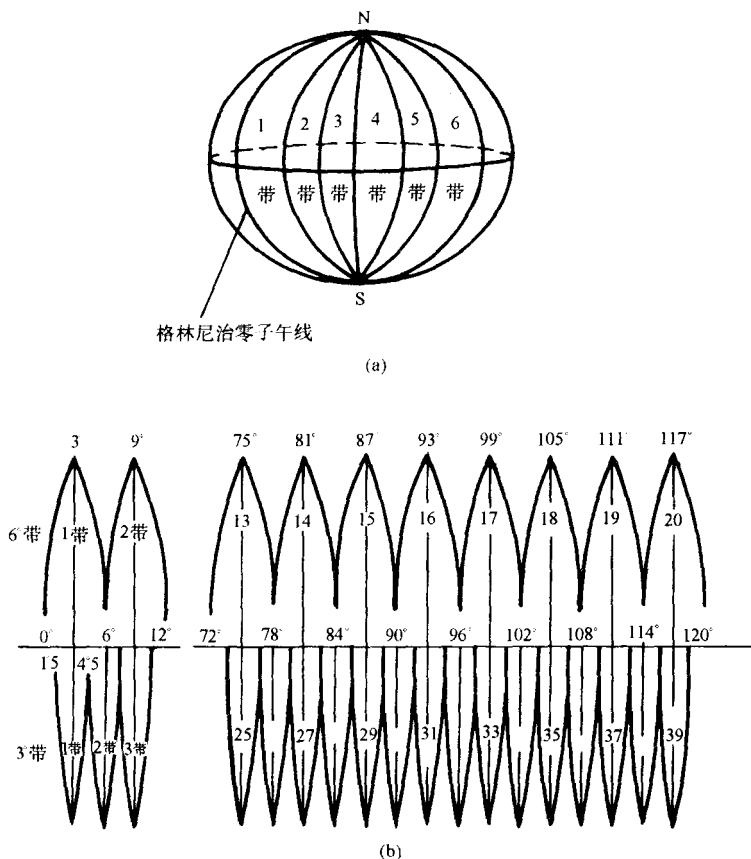


图 1.5 3°/6°分带方法

将各带独立的投影到高斯平面上，以该带中央子午线作为纵轴  $X$  由于高斯平面上赤道的投影线是一条与中央子午线相垂直的直线，可定义为横轴  $Y$ 。两直线的交点为坐标原点  $O$ ，由此建立每带独立的高斯平面直角坐标系。我国位于北半球， $X$  坐标总为正值 而  $Y$  坐标有正有负。为避免横坐标出现负值，将各带坐标纵轴向西平移 500km。设  $A$  点  $x=3380\ 240.85\text{m}$ ,  $y=-286\ 250.36\text{m}$  则横坐标为  $y=(-286\ 250.36)+500\ 000=213\ 749.64\text{m}$ 。前者称为自然值 后者称为统一值。因为不同投影带内的点可能会有相同坐标值，也为了区分其所属投影带，规定在横坐标前冠以带号。例如  $A$  点位于第 18 带 则横坐标为  $y=18\ 213\ 749.64\text{m}$  如图 1.6 所示。

### (3) 独立平面直角坐标系。

当测量区域较小时，可以把该区域内球面沿铅垂线方向投影到水平面上，用平面直角坐标来表示它的投影位置。为使测区内各点的坐标均为正值，规定以测区的西南角坐标为原点  $O$  南北方向为纵轴 ( $X$  轴) 向北为正 向南为负 以东西方向为

横轴 ( $Y$  轴) 向东为正 向西为负。这与数学上的规定有所不同 测量中取南北方向为纵轴, 目的是为了定向方便。为了将数学中的有关公式直接应用到测量计算中, 在平面直角坐标系中将坐标系的象限定义为顺时针方向编号, 如图 1.7 所示。

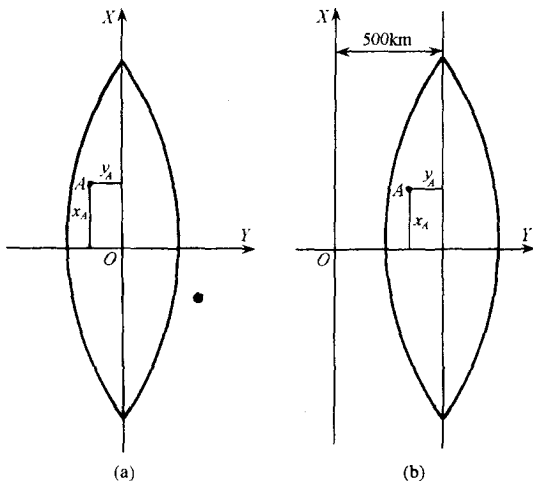


图 1.6 高斯平面直角坐标系

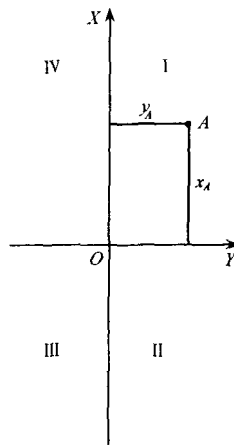


图 1.7 平面直角坐标系

### 3. 地面点的空间直角坐标

随着空间技术的发展, GPS 卫星测量应用领域非常广泛, 特别是在大型土木工程中应用日益增多。GPS 卫星测量获得的是地心空间三维直角坐标, 属于 WGS-84 世界大地坐标系 (World Geodetic System, 1984), 由美国国防部建立并公布。WGS-84 世界大地坐标系的几何定义是: 原点在地球质心,  $Z$  轴指向国际时间局 BIH 1984.0 (Bureau International de l'Heure) 定义的协议地球极 (CTP; Conventional Terrestrial Pole) 方向,  $X$  轴指向 BIH 1984.0 的零子午面和 CTP 赤道面的交点,  $Y$  轴与  $Z$ 、 $X$  轴构成右手坐标系, 如图 1.8 所示。

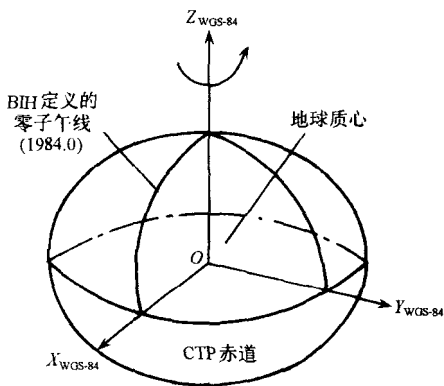


图 1.8 空间直角坐标系

由于地球自转轴在地球内部随着时间而发生位置变化, 也称为极移现象。国际时间局 (BIH) 定期向外公布地极的瞬间位置。WGS-84 世界大地坐标系就是以国际时间局 1984 年首次公布的瞬时地极 (BIH 1984.0) 作为基准建立的坐标系统。

我国的 1980 年国家大地坐标系、城市坐标系、土木工程中采用的独立平面直角坐标系与 WGS-84 世界大地坐标系之间存在相互转换关系。

## 1.4 水平面代替水准面的限度

水准面是一不规则曲面，要在这样的曲面上进行测量计算和工程设计，是很不方便的。但是，用水平面代替水准面，必然会在测量和制图工作中带来误差，并且范围越大，这种影响会越大。为简化测量和绘图工作，并顾及到测量与计算本身的误差，选择在一定范围内用水平面来代替水准面，以保证测绘和测设有足够的精度。

### 1.4.1 对距离的影响

如图 1.9 所示， $A$ 、 $B$  是地面上的两点，它们在大地水准面上的投影是  $a$ 、 $b$  弧长为  $S$ 。在水平面上的投影是  $a'$  和  $b'$  其距离为  $D$ 。现分析由此产生的影响：

$$S = R \cdot \beta \quad D = R \cdot \operatorname{tg}\beta$$

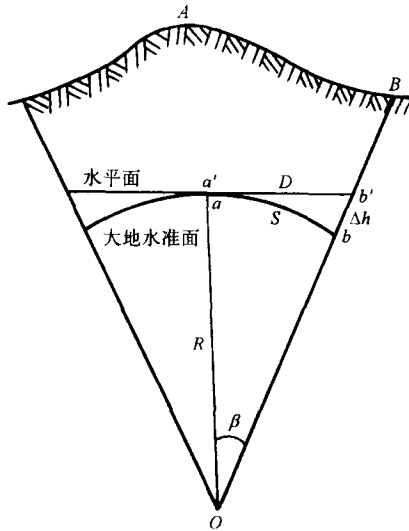


图 1.9

近似地将大地水准面视为半径为  $R$  的球面，用水平面代替水准面所产生的距离差异

$$\Delta D = D - S = R \cdot (\operatorname{tg}\beta - \beta) \quad (1.5)$$

将式中  $\operatorname{tg}\beta$  按泰勒级数展开 即

$$\operatorname{tg}\beta = \beta + \frac{1}{3}\beta^3 + \frac{2}{15}\beta^5 + \dots$$

略去高次项 则有

$$\Delta D = R \cdot \left( \beta + \frac{1}{3}\beta^3 - \beta \right) = R \cdot \frac{1}{3}\beta^3 \quad (1.6)$$

顾及  $\beta=S/R$  得

$$\Delta D = \frac{S^3}{3R^2} \quad (1.7)$$

其相对误差

$$\frac{\Delta D}{S} = \frac{S^2}{3R^2} \quad (1.8)$$

取地球平均半径  $R=6371\text{km}$ ，并以不同的  $S$  值代入式 (1.7) 和 (1.8) 进行计算，可得到距离误差  $\Delta D$  及相对误差  $\Delta D/S$  现列于表 1.1。由表列可知，当距离为 10km 时所产生的相对误差为 1:125 万，这样小的误差，对在地面上进行最精密的测量也是允许的。因此，在 10km 为半径的范围内，可以把水准面当作水平面看待，而不必考虑地球曲率对距离的影响。

表 1.1 水平面代替水准面对距离的影响

距离 $S/\text{km}$	距离误差 $\Delta D/\text{cm}$	距离相对误差 $\Delta D/S$
10	0.8	1:1250000
25	12.8	1:200000
50	102.6	1:49000

#### 1.4.2 对高程的影响

如图 1.9 所示，地面一点  $B$  的高程应是沿铅垂线方向到大地水准面的距离  $Bb$ 。用水平面代替水准面后， $B$  的高程近似为  $Bb'$ ，由此产生的高程误差为  $\Delta h$ 。由图可看出

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + D^2 \quad (1.9)$$

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R + \Delta h} \quad (1.10)$$

式中用  $S$  代替  $D$  同时顾及  $\Delta h \ll 2R$  则

$$\Delta h = \frac{S^2}{2R} \quad (1.11)$$

用不同的距离  $S$  代入式 (1.11) 便得到表 1.2 高程误差值。从表 1.2 可以看出，用水平面代替水准面，对高程的影响是很大的。当距离为 2km 高程误差可达 0.31m。因此，就高程测量而言，即使距离很短，也应顾及地球曲率对高程的影响。

表 1.2 水平面代替水准面对高程的影响

$S/\text{km}$	0.1	0.5	1	2	4	5
$\Delta h/\text{cm}$	0.08	2	8	31	125	196

## 1.5 土木工程测量概述

通常，测量工作应遵循“从整体到局部，先控制后碎部”的组织原则，即先进行

整体的控制测量，然后进行局部的碎部测量。这样可以减少测量误差累积，保证测量精度；另外，为防止测量工作中的错误发生，还应严格地进行测量成果检核。

在不同的土木工程项目中以及在上木工程的不同阶段，都需要测量工作给予配合，其测量任务可概括如下。

### 1.5.1 地形图测绘

地球表面复杂的形态可分为地物和地貌两大类。其中河流、湖泊、道路和房屋等固定性物体称为地物，山头、谷地和陡崖等地面上高低起伏形态称为地貌。不论地物或地貌，它们的形状和大小都是由一些特征点的位置所决定，这些特征点在地形图测绘时又称为碎部点。地形图测绘就是测定这些特征点的平面位置和高程。地形图测绘遵循“先控制后碎部”的组织原则，先控制测量，后碎部测量，以保证测图精度；还可以多幅图同时进行测绘、加快测图进度。

### 1.5.2 施工测量

施工测量即测设，又称施工放样。是将图纸上设计好的建（构）筑物的平面位置和高程测设到实地。施工测量贯穿于建（构）筑物施工全过程。施工测量为防止错误的发生和测量误差的累积，同样需要遵循“先控制，后碎部”的测量工作组织原则，以保证施工的正常进行和施工的质量。

### 1.5.3 变形监测

对于高层建筑物、工业厂房及主要设备、大型水工构筑物等，为保证其施工与使用的安全，在施工过程中以及施工完成后一定时期内要对其变形状态进行定期监测。建（构）筑物的变形监测分为沉降监测和倾斜监测。变形监测组织工作程序分为变形控制网测量和变形点的观测。变形监测控制点的布设应注意远离建筑工程影响范围（例如，施工降水影响区），变形监测周期要与建筑物施工的负荷加载过程同步。

综上所述，无论是地形图测绘、施工测量还是变形监测，其实质是测定地面点的位置。高程测量、角度测量和距离丈量是测量的基本工作，测量仪器操作、测量成果计算和绘图是测量工作的基本技能。

## 复习思考题

1. 在土木工程中，测绘学的任务是什么？
2. 测绘与测设有何区别？
3. 何谓大地水准面？它在测量工作中的作用是什么？
4. 何谓绝对高程和相对高程？两点之间绝对高程之差与相对高程之差是否相等？

5. 测量工作中所用的平面直角坐标系与数学上的平面直角坐标系有何不同？
6. 已知某点位于东经  $117^{\circ}55'$ ，试计算它所在的六度带号和三度带号，以及相应六度带和三度带中央子午线的经度。
7. 用水平面代替水准面，对距离、水平角和高程有何影响？
8. 测量组织工作的原则及其作用是什么？
9. 确定地面点位的三项基本测量工作是什么？

## 第二章 测量的基本工作

### 2.1 距离测量及钢尺的使用

距离，即两点间的直线长度。由于测量计算及表示点位均为水平投影长度，所以测量所使用的距离则为水平长度。距离测量按照所使用的仪器、工具不同可分为钢尺量距、光电测距和光学视距等。光电测距和光学视距将分别在第三章和第七章介绍，本节仅介绍钢尺量距，它是土木工程测量常用的一种方法。

#### 2.1.1 量距工具

量距工具有钢尺、花杆、测钎、垂球、弹簧秤和温度计等。

钢尺又称钢卷尺，由薄钢带制成，宽 10~15mm，厚 0.2~0.4mm，长度有 20m、30m、50m 和 100m 等，分为盒装和架装两种。钢尺的基本分划为厘米，在米和分米处有数字注记；一般钢尺在起点处 1 分米内刻有毫米分划，新型钢尺基本分划为毫米。

钢尺按零点位置不同可分为端点尺和刻线尺，如图 2.1 所示。以尺环外端为零点位置的，称为端点尺；在钢尺前端以刻线为零点位置的，称为刻线尺，使用时必须注意识别。

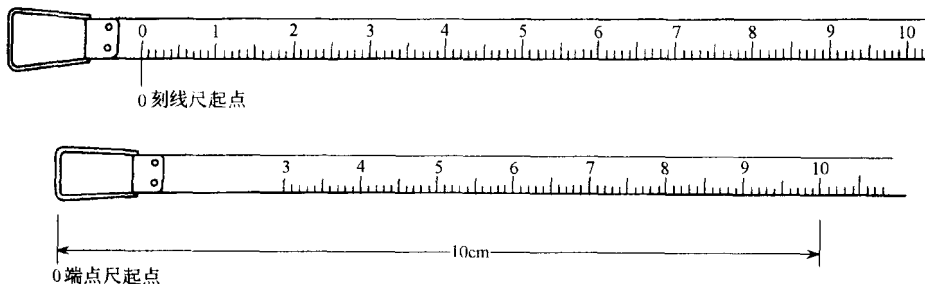


图 2.1 钢尺的零点位置

#### 2.1.2 量距方法

##### 1. 一般量距

##### (1) 量距方法。

当两点间的距离小于一整尺段长时，用钢尺直接丈量。往返丈量后取其平均

值,即为两点间距离。

当地面两点间的距离超过一个整尺段或地势起伏较大无法一次丈量时,需要在两点之间的直线方向上标定出若干点位,以便分段丈量,这一工作称为直线定线。直线定线可以采用经纬仪定线,也可采用目测花杆定线。

量距时,定线与丈量可同时进行。如地面较平坦,可按整尺段定线沿地面逐段丈量,最后量取不足整尺段的余长 $q$ ,则两点间的距离为

$$D = n \cdot l + q \quad (2.1)$$

式中: $n$ ——整尺段数;

$l$ ——整尺段长度。

若地面起伏不平,可将钢尺一端悬空并目测使其水平,以垂球、测钎或花杆对准地面点或向地面投点,测出其水平距离。当地面坡度比较均匀时,也可沿斜坡丈量斜距,然后测出其倾斜角或两点间高差,将斜距改化为水平距离。

(2)成果计算。

为了防止丈量中发生错误及提高量距的精度,一般要求往、返丈量,在返测时要重新定线;当往返测结果符合精度要求时,取往、返丈量的平均值作为丈量结果。量距精度是用相对误差衡量的,即以往、返丈量之差 $\Delta D = D_{往} - D_{返}$ 的绝对值与往、返丈量平均值 $D_{平}$ 之比,并将分子化为1分母取整数表示即

$$K = \frac{|\Delta D|}{D_{平}} = \frac{1}{\frac{D_{平}}{|\Delta D|}} \quad (2.2)$$

相对误差的分母越大,说明量距的精度越高。一般情况下平坦地区量距的精度不应大 $\frac{1}{3000}$ ,地面起伏较大的地区也应达到 $\frac{1}{2000}$ 。如果量距的相对误差超过上述规定,则需重测。

例如测量距离 $D_{AB}$ 往测 $D_{往} = 155.352\text{m}$ 返测 $D_{返} = 155.304\text{m}$ ,距离平均值 $D_{平} = 155.328\text{m}$ 则相对误差 $K = \frac{0.048}{155.328} \approx 1/3200$ ,小于 $1/3000$ 符合量距精度要求。

## 2.精密量距

### (1)量距方法。

精密量距应采用经纬仪定线,按略短于整尺段长度标定点位、设桩,用水准仪测量各相邻桩间高差,用经检定过的钢尺丈量时应使用弹簧秤施以标准拉力(30m尺长,拉力10kg;50m尺长,15kg)记录丈量时温度(最好是测定钢尺本身温度),直读毫米估读至0.5mm。

### (2)成果计算。

成果计算首先对尺段进行尺长、温度和倾斜改正,再计算量距全长。

1)尺长改正。钢尺的标称长度称为名义长度 $l_0$ 。在标准温度(20℃)、标准拉力

条件下的尺长称为实际长度  $l$ ，两者之差称为钢尺的尺长改正  $\Delta l$  即

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.3)$$

当所量尺段的名义长度为  $l'$  时，则该尺段的尺长改正为

$$\Delta l_d = \frac{\Delta l}{l_0} \times l' \quad (2.4)$$

2) 温度改正。钢尺检定时温度  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  称为标准温度，丈量时的温度为  $t^\circ\text{C}$ ，钢尺的线膨胀系数为  $\alpha$  ( $\alpha = 1.25 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )。则由温差所产生的尺长改正为

$$\Delta l_t = l \times \alpha \times (t - t_0) \quad (2.5)$$

当所量尺段的长度为  $l'$  时，则该尺段温度改正为

$$\Delta l_t = l' \times \alpha \times (t - t_0)$$

3) 倾斜改正。丈量倾斜长度后用高差  $h$  或倾角  $\alpha$  可将倾斜长度改化成水平长度如图 2.2 所示。用高差  $h$  改正如下式推算：

$$\begin{aligned} \Delta l_h &= d - d' = \sqrt{d'^2 - h^2} - d' \\ &= d' \left( 1 - \frac{h^2}{d'^2} \right)^{\frac{1}{2}} - d' \end{aligned}$$

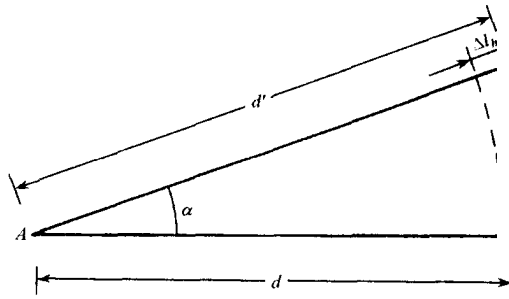


图 2.2 倾斜改正

将括号内展成级数后得

$$\Delta l_h = d' \left( 1 - \frac{h^2}{2d'^2} - \frac{h^4}{8d'^4} - \dots \right) - d' \approx -\frac{h^2}{2d'} \quad (2.6)$$

因为斜距总是大于平距，故倾斜改正永远为负值。

4) 尺段长度计算。尺段长度应为该尺段丈量长度加入尺长改正，温度改正和倾斜改正后的长度 即

$$d = l' + \Delta l_d + \Delta l_t + \Delta l_h$$

5) 全长计算。全长等于各尺段长度之和，即

$$D = d_1 + d_2 + \dots = \sum d$$

往返丈量求其平均值即为最后结果 即

$$D_{\text{平}} = \frac{D_{\text{往}} + D_{\text{返}}}{2}$$

6)精度评定。用式(2.2)对丈量结果精度进行评定。

**例 2.1** 一名义长度为 30m 的钢尺,经检定实际长度为 30.006m 用其在温度 35℃条件下丈量 A、B 两点的倾斜名义长度为 29.432m 已知 A、B 两点的高差为 0.58m 试求 A、B 两点间的实际水平距离 D。

解:①钢尺的尺长改正数

$$\Delta l = 30.006 - 30 = +0.006\text{m}$$

该段尺长改正长度为

$$\Delta l_d = \frac{+0.006}{30} \times 29.432 = +0.006\text{m}$$

温度改正长度

$$\begin{aligned} \Delta l_t &= 29.432 \times 1.25 \times 10^{-5} (35 - 20) \\ &= +0.006\text{m} \end{aligned}$$

倾斜改正长度

$$\Delta l_h = -\frac{0.58^2}{2 \times 29.432} = -0.006\text{m}$$

实际水平距离

$$\begin{aligned} D &= 29.432 + 0.006 + 0.006 - 0.006 \\ &= 29.438\text{m} \end{aligned}$$

## 2.2 高程测量及水准仪使用

测定地面点高程的工作称为高程测量。根据施测方法和所使用仪器的不同,高程测量可分为水准测量、三角高程测量和气压高程测量。水准测量是高程测量中精度最高、应用最广的高程测量方法。本节讲述水准测量及水准仪使用。

### 2.2.1 水准测量原理

水准测量的原理是利用一条水平视线,借助水准尺来测量地面两点间的高差,从而由已知点的高程推算出未知点的高程。

如图 2.3 所示已知 A 点的高程  $H_A$  欲求 B 点的高程  $H_B$  在 A、B 两点间安置一台能提供水平视线的仪器——水准仪,分别读取竖立在 A、B 两点上的水准尺读数  $a$  和  $b$ 。由几何原理可知 A、B 两点间的高差为

$$h_{AB} = a - b \quad (2.7)$$

水准测量时,一般是由已知高程点向待求高程点方向进行。由此,A点称为后