

# 项目 1 测量基本知识



## 项目描述

在测绘领域，人们把工程建设中的所有测绘工作统称为工程测量，包括在工程建设勘测、设计、施工和管理运营阶段所进行的各种测量工作。工程测量是直接为各建设项目的勘测、设计、施工、安装、竣工、监测以及营运管理等一系列工程服务的，它的服务和应用范围包括城建、地质、铁路、交通、房地产管理、水利电力、能源、航天和国防等各个行业的工程建设部门。

由于人类的各种建设活动都是在地球表面进行的，要开展相应的测量工作，就要认识地球的形状与大小，测量若干地球表面的点的位置。因此，要认识点的三维位置的表达方式，点的三维位置是通过点的平面坐标和高程来表达的。

本项目主要为后续项目的开展奠定基础，分别介绍地球的形状和大小，测量常用坐标系，点的平面坐标和点的高程，测量的基本工作以及测量误差的基本知识等。



## 学习目标

### 1. 知识目标

- (1) 了解测量工作的基准；
- (2) 掌握测量平面直角坐标系的建立方法；
- (3) 掌握点的高程的表示方法；
- (4) 了解测量的主要工作及要求；
- (5) 了解测量误差的基本概念及偶然误差的特性。

### 2. 能力目标

- (1) 能够认识地球的形状和大小；
- (2) 能描述点的空间位置的表示方法；
- (3) 能遵循测量工作的基本要求。

# 任务 1.1 地球形状与测量坐标系

## 1.1.1 工作任务

测量工作大多是在地球表面上进行的，测量基准的确定，测量成果的计算及处理都与地球的形状和大小有关，都要建立相应的测量坐标系，因此，本任务就是要认识地球的形状和大小，了解对应的测量基准面、基准线，然后通过学习，用列表的方式对比测量的几种坐标系的建立方法和使用范围的不同。

## 1.1.2 相关配套知识

测量工作是在地球表面上进行的，测量基准的确定、观测数据的获得、测量成果的处理都与地球的形状、大小有关。

### 1. 地球的形状和大小

测量工作的主要研究对象是地球的自然表面，从整个地球来看，其形状大致像一个椭球体，其表面极不规则，有高山、深谷、丘陵、平原、江湖、海洋等，最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8 844.43 m，最深的太平洋马里亚纳海沟低于海平面 11 022 m，其相对高差将近 20 km，但是与地球的平均半径 6 371 km 相比是微不足道的。

#### 1) 大地水准面

就整个地球表面而言，陆地面积仅占 29%，而海洋面积占了 71%，因此，我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体，即设想将一静止的海洋面扩展延伸，使其穿过大陆和岛屿，形成一个封闭的曲面。这个静止的海水面被称作水准面。与水准面相切的平面称为水平面。由于海水受潮汐风浪等影响而时高时低，故水准面有无穷多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称作大地水准面。由大地水准面所包围的形体称为大地体。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

大地水准面是测量外业工作的基准面。重力的方向线称为铅垂线，它是测量工作的基准线，铅垂线处处与水准面垂直。在测量工作中，取得铅垂线的方法如图 1-1 所示。



地球的形状和大小视频

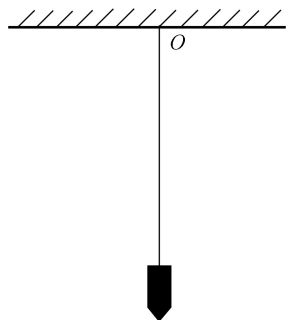


图 1-1 铅垂线

## 2) 参考椭球面

由于地球内部质量分布不均匀，致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化，所以，大地水准面是一个不规则的无法用数学式表述的曲面，在这样的面上是无法进行测量数据的计算及处理的。因此人们进一步设想，用一个与大地体非常接近的又能用数学式表述的规则球体即旋转椭球体来代表地球的形状。

某一国家或地区为处理测量成果而采用的与大地体形状大小最接近，又最适合本国或本地区要求的旋转椭球，这样的椭球体称为参考椭球体，如图 1-2 所示。它是一个规则的曲面体，可用数学公式表示，即

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} + \frac{Z^2}{c^2} = 1 \quad (1-1)$$

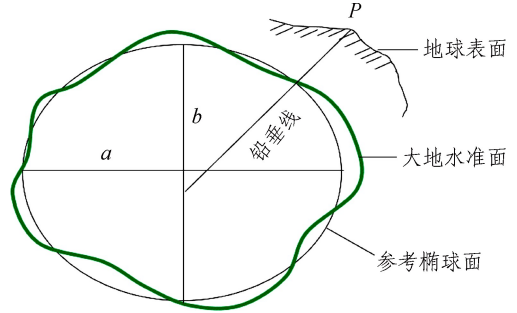


图 1-2 参考椭球体

参考椭球体的外表面称为参考椭球面，参考椭球面只具有几何意义而无物理意义，它是严格意义上的测量计算基准面。

确定参考椭球体与大地体之间的相对位置关系，称为椭球体定位。决定地球椭球体形状和大小的参数有椭圆的长半径  $a$ ，短半径  $b$ ，扁率  $\alpha$ 。其关系式为

$$\alpha = \frac{a-b}{a} \quad (1-2)$$

由于地球椭球体的扁率  $\alpha$  很小，当测量的区域不大时，可将地球看作半径为 6 371 km 的圆球。

在小范围内进行测量工作时，可以用水平面代替大地水准面。

## 2. 常用测量坐标系

地面和空间点位的确定总是要参照于某一给定的坐标系，坐标系是由坐标原点、坐标轴的指向和尺度所定义的。表示球面上点的位置常常用到天文坐标系和大地坐标系。

### 1) 天文坐标系

以大地水准面和铅垂线为基准面与基准线建立的球面坐标系称天文坐标系，在该坐标系中用天文经度、天文纬度表示地面点的位置，如图 1-3 所示，图中 NS 为地球自转轴。

由于地面各点的铅垂线方向的不规则性，过地面某点的铅垂线一般不与地球的自转轴相交。规定过地面点的铅垂线且与地球自转轴平行的平面为该点的天文子午面，过地球质心且与地球自转轴正交的平面为地球赤道面，过格林尼治天文台的天文子午面为起始天文

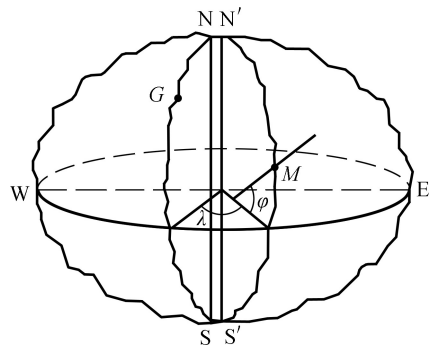


图 1-3 天文坐标系

子午面。

过地面点的天文子午面与起始天文子午面的夹角称为天文经度，从首子午面起算，向东为正，称为东经；向西为负，称为西经，测量上一般用 $\lambda$ 表示。其取值范围为 $0 \sim \pm 180^\circ$ 。

过地面点的铅垂线与地球赤道面的夹角称为该点的天文纬度，从地球赤道面起算向北为正，称为北纬，向南为负，称为南纬，测量上一般用 $\varphi$ 表示，其取值范围为 $0 \sim \pm 90^\circ$ 。

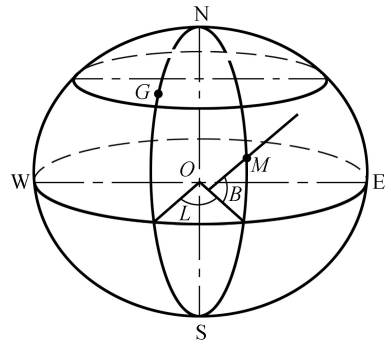


图 1-4 大地坐标系

天文坐标系是以客观存在的自然特性为基础建立的。通过观测合适的天体可以测定地面点的天文经度和天文纬度。

由于过地面点的铅垂线一般不与过该点的法线重合，因而地面点大地经纬度与天文经纬度之间也略有差异。地面点的铅垂线与法线方向的偏差称为“垂线偏差”。垂线偏差是研究地球形状的重要数据，也是将大地观测成果归算到参考椭球面上的重要参数。用天文重力和水准测量的方法可以测定和计算垂线偏差的大小。

## 2) 大地坐标系

大地坐标系是一种球面坐标系，适用于在地球椭球面上确定点位，如图 1-4 所示， $O$  点为参考椭球中心， $N$  为北极， $S$  为南极，过地面点  $M$  的子午面与首子午面（过英国格林尼治天文台中心  $G$  的子午面）之间的夹角，称为该点的大地经度。大地经度从首子午面起算，向东为正，称为东经；向西为负，称为西经，测量上一般用  $L$  表示，其取值范围为  $0 \sim \pm 180^\circ$ 。过地面点的法线与赤道面的夹角称为该点的大地纬度，从赤道面起算向北为正，称为北纬，向南为负，称为南纬，测量上一般用  $B$  表示，其取值范围为  $0 \sim \pm 90^\circ$ 。

在测量工作中，地面点在参考椭球面上的投影位置一般用大地坐标  $B$ 、 $L$  表示。但实际进行观测时，如量距或测角都是以铅垂线为准，则所测得的数据若要求精确地换算成大地坐标就必须经过改化。在普通测量中由于未经改化的数据精度能够满足工程需要，所以可不考虑这种改化。

### (1) 1954 北京坐标系。

20 世纪 50 年代初，在我国天文大地网建立初期，鉴于当时的历史条件，采用了克拉索夫斯基椭球元素： $a = 6\,378\,245\text{ m}$ ， $\alpha = 1/298.3$ ，并与苏联 1942 年普尔科沃坐标系进行联测，通过局部平差计算建立了我国大地坐标系，定名为 1954 北京坐标系，其大地原点在苏联的普尔科沃。使用该克拉索夫斯基椭球并未依据当时我国的天文观测资料进行重新定位，而是直接由苏联西伯利亚地区的一等锁，经我国的东北地区传算过来的。

### (2) 1980 西安坐标系。

1978 年，我国决定建立新的大地坐标系，命名为“1980 年国家大地坐标系”。该坐标系的大地原点设在我国中部的陕西省泾阳县永乐镇，采用国际大地测量协会 1975 年推荐的参考

椭球 IAG-75 国际椭球，其 4 个几何和物理参数值采用了 1975 年国际大地测量与地球物理联合会推荐的数值：

- ① 椭球长半径  $a = 6\,378\,140\text{ m}$ ，扁率  $\alpha = 1/298.257$ ；
- ② 引力常数与地球质量的乘积  $GM = 3.986\,005 \times 10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$ ；
- ③ 地球重力场二阶带球谐系数  $J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$ ；
- ④ 地球自转角速度  $\omega = 7.292\,115 \times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。

(3) 2000 国家大地坐标系。

2008 年，我国启用 2000 国家大地坐标系。2000 国家大地坐标系的原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心， $Z$  轴指向 BIH1984.0 定义的协议极地方向（BIH 国际时间局）， $X$  轴指向 BIH1984.0 定义的零子午面与协议赤道的交点， $Y$  轴按右手坐标系确定。采用的地球椭球参数如下： $a = 6\,378\,137\text{ m}$ ， $\alpha = 1/298.257\,222\,101$ 。

(4) WGS-84 世界大地坐标系。

WGS-84 坐标系统是美国国防部建立的大地坐标系，为全球定位系统 GPS 所使用的坐标系统。WGS-84 坐标系的定义是：原点是地球的质心， $Z$  轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极（CTP）方向， $X$  轴指向 BIH1984.0 的零度子午面和 CTP 赤道的交点， $Y$  轴和  $Z$ 、 $X$  轴构成右手坐标系。

对应 WGS-84 坐标系有一个 WGS-84 椭球，该椭球的参数为：

- ① 地球椭球长半径  $a = 6\,378\,137\text{ m}$ ， $\alpha = 1/298.257\,223\,563$ ；
- ② 引力常数与地球质量的乘积  $GM = 3.986\,005 \times 10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$ ；
- ③ 地球重力场二阶带球谐系数  $J_2 = 1\,082.629\,989\,05 \times 10^{-6}$ ；
- ④ 地球自转角速度  $\omega = 7.292\,115 \times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。

GPS 的星历坐标及由 GPS 观测值直接计算的坐标，都是 WGS-84 坐标系的坐标。



## 知识拓展

在古代，人类生活在地球上，由于受到山岳、海洋的阻隔，只能生活在一个很小的范围里。凭着他们的直觉，一般把地球误认为是一个基本平坦的大地。人们都把大地设想为一个漂浮在茫茫水面上的陆地。

在我国，早在两千多年前的周朝，就存在这一种“天圆如张盖、地方如棋局”的盖天说。意思是说，蓝天就像是一个半球状的圆盖，大地则像一块四方的棋盘，并认为蓝天与大海相连。盖天说认为，日月星辰的出没，并非真的出没，而只是离远了就看不见，离得近了，就看见它们照耀。盖天说宇宙结构理论力图说明太阳运行的轨道，持此论者设计了一个七衡六间图，图中有 7 个同心圆。每年冬至，太阳沿最外一个圆，即“外衡”运行，因此，太阳出于东南没于西南，日中时地平高度最低；每年夏至，太阳沿最内一圆，即“内衡”运行，因此，太阳出于东北没于西北，日中时地平高度最高；春、秋分时太阳沿当中一个圆，即“中

衡”运行，因此，太阳出于正东没于正西，日中时地平高度适中。各个不同节令太阳都沿不同的“衡”运动。这种“天圆地方”的盖天说在我国古代一直占有主导地位，并且流传极广，直到今天我们还可以看到这种认识的影响。例如，北京天坛的建筑是圆的，地坛则是方的，就是这种思想的反映。类似的传说在世界其他民族中也曾广泛流传。

中国古代还有一种宇宙学说是浑天说。浑天说最初认为，地球不是孤零零地悬在空中的，而是浮在水上，后来又有发展认为地球浮在气中，因此有可能回旋浮动。浑天说认为全天恒星都布于一个“天球”上，而日月五星则于“天球”上运行，这与现代天文学的天球概念十分接近。因而浑天说采用球面坐标系，如赤道坐标系，来量度天体的位置，计量天体运动。



## 复习思考题

1. 选择题：通常认为，代表整个地球的形状是（ ）所包围的形体。  
A. 水准面      B. 参考椭球面      C. 大地水准面      D. 似大地水准面
2. 测量外业工作的基准面是什么？基准线是什么？
3. 测量计算的基准面是什么？
4. 我国的大地原点在哪里？

## 任务 1.2 点的平面位置及高程

### 1.2.1 工作任务

地理坐标系和大地坐标系都是球面坐标系，在工程测量和施工中，我国普遍使用的是平面直角坐标系。因此，需要把原本球面的问题转化到平面来解决。本任务要求能说出测量平面直角坐标系与数学平面直角坐标系的异同，会进行高斯坐标的投影带带号与中央子午线经度的转换计算，并能区分绝对高程、相对高程、高差的概念。

### 1.2.2 相关配套知识

地面点的空间位置须由 3 个参数来确定，即该点在大地水准面上投影后的平面坐标（2 个参数）和该点的高程（1 个参数）。

#### 1. 独立平面直角坐标系

当地形图测绘或施工测量的面积较小时，可将测区范围内的椭球面或水准面用水平面来代替，一般选取测区西南角的一点作为坐标原点，以过原点的南北方向为纵轴（向北为正，向南为负），东西方向为横轴（向东为正，



测量常用  
坐标系视频

向西为负), 建立独立的平面直角坐标系, 如图 1-5 所示, 称为独立平面直角坐标系。在局部区域内确定点的平面位置, 可以采用独立平面直角坐标。测区内的任意一点  $A$  的坐标可以用  $(x_A, y_A)$  表示, 独立平面直角坐标系的象限按顺时针方向编号, 如图 1-6 所示。

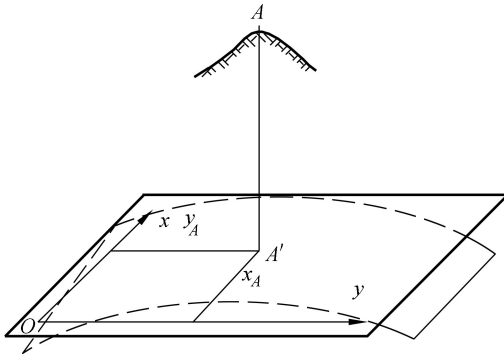


图 1-5 独立平面直角坐标系

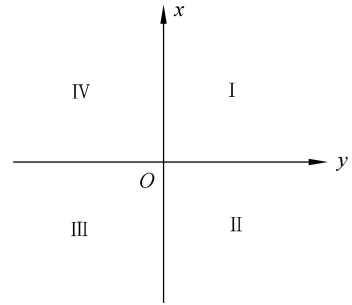


图 1-6 坐标象限

## 2. 高斯平面直角坐标系

在高斯-克吕格投影的基础上建立的坐标系, 称为高斯平面直角坐标系, 简称高斯坐标系。在广大区域内确定点的平面位置, 一般采用高斯平面直角坐标。

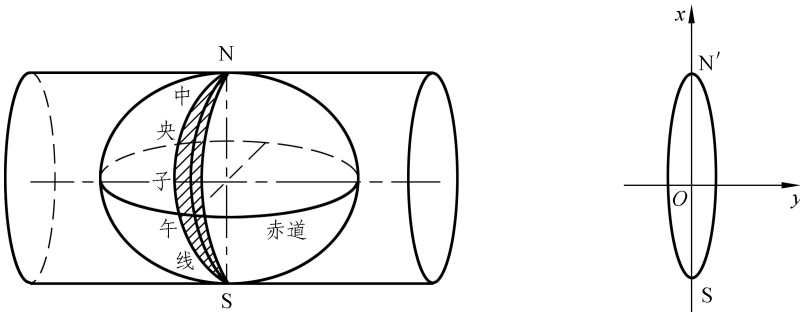


高斯平面直角坐标系视频

### 1) 高斯投影

高斯-克吕格投影是一种等角横轴切圆柱投影。它是假设一个圆柱面与地球椭球体面横切于某一条经线上, 按照等角条件将中央经线东、西各  $3^\circ$  或  $1.5^\circ$  经线范围内的经纬线投影到圆柱面上, 然后将圆柱面展开成平面而成的。该投影是 19 世纪 20 年代由德国数学家高斯最先设计, 后经德国大地测量学家克吕格补充完善, 故名高斯-克吕格投影, 简称高斯投影。

高斯投影是将地球划分成若干带, 然后将每带投影到平面上。如图 1-7 (a) 所示, 假想有一个圆柱面横套在地球椭球体外表面, 并与某一条子午线 (此子午线称为中央子午线) 相切, 圆柱的中心轴通过椭球体中心, 然后用一定投影方法, 将中央子午线两侧各一定经差范围内的地区投影到圆柱面上, 再将此柱面展开即成为投影面, 如图 1-7 (b) 所示, 此投影为高斯投影。



(a)

(b)

图 1-7 高斯投影

高斯投影可以将椭球面变成平面，但是离开中央子午线越远变形越大，这种变形将会影响测图和施工精度。为了对长度变形加以控制，测量中采用了限制投影宽度的方法，即将投影区域限制在靠近中央子午线的两侧狭长地带，这就是分带投影。投影带宽度是以相邻两个子午线的经差来划分，有 6°带、3°带等不同投影方法。

6°带投影是从英国格林尼治子午线开始，自西向东，每隔 6°投影一次，这样将椭球分成 60 个带，编号为 1~60 带，如图 1-8 所示。各带中央子午线经度为

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1-3)$$

式中  $L_0$  — 中央子午线的经度；

$N$  — 6°带的带号。

3°带是在 6°带基础上划分的，其中央子午线在奇数带时与 6°带中央子午线重合，每隔 3°为一带，共 120 带，各带中央子午线经度为

$$L'_0 = 3N \quad (1-4)$$

式中  $L'_0$  — 中央子午线的经度；

$N$  — 3°带的带号。

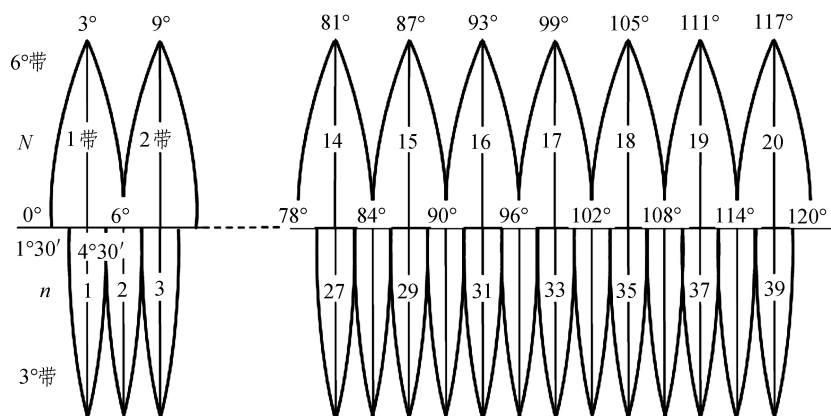


图 1-8 高斯平面直角坐标系 6°带与 3°带的划分

我国幅员辽阔，含有 11 个 6°带，即从 13~23 带（中央子午线从 75°~135°），21 个 3°带，从 25~45 带。



## 2) 高斯平面直角坐标系

根据高斯投影的特点，以赤道和中央子午线投影后的交点为坐标原点，中央子午线投影后的直线为  $x$  轴，北方向为正，赤道投影后的直线为  $y$  轴，东方向为正，由此建立了高斯平面直角坐标系，如图 1-9 所示。

则有投影带内  $P_1$ 、 $P_2$  点的高斯自然坐标如下：

$$x_{P_1} = 302\ 855.650\ \text{m}, y_{P_1} = 136\ 780.360\ \text{m}$$

$$x_{P_2} = 232\ 836.180\ \text{m}, y_{P_2} = -272\ 440.280\ \text{m}$$

高斯自然坐标在同一投影带内  $y$  值有正有负，这对计算和使用很不方便。为了使  $y$  值都为正，将纵坐标轴西移 500 km，并在  $y$  坐标前面冠以带号，得到高斯通用坐标：

$$x_{P_1} = 302\ 855.650\ \text{m}, y_{P_1} = 20\ 636\ 780.360\ \text{m}$$

$$x_{P_2} = 232\ 836.180\ \text{m}, y_{P_2} = 20\ 227\ 559.720\ \text{m}$$

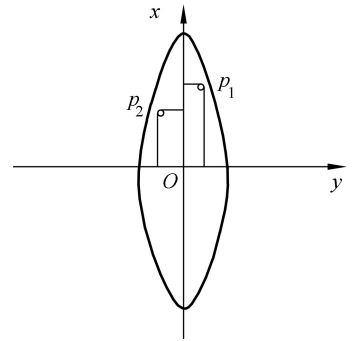


图 1-9 高斯平面直角坐标系

无论是高斯平面直角坐标系还是独立平面直角坐标系，均以纵轴为  $x$  轴、横轴为  $y$  轴，但是，测量中采用的平面直角坐标系与数学上的平面直角坐标系有一些不同， $x$ 、 $y$  轴位置交换，象限的顺序也随之改变，但是坐标轴与象限的相对关系没变，数学上的所有公式都适用于测量坐标系。

## 3. 点的高程

平面直角坐标只表示了点在地面上的位置，但点的高低的信息还没有表示，在测量上，用高程来表示点的高低信息。

### 1) 我国的高程系统

由于大地水准面是一个理想的面，在实际测量中不易找到其位置，所以高程起算面一般是用对海水验潮求得平均海水面的方法而得到。我国的验潮站设在青岛，同时又在验潮站附近设一固定点，求得该点的高程，将该点作为全国统一的高程起算点，称为水准原点。我国采用 1950~1956 年验潮资料，求得平均海水面位置，进而测得水准原点的高程为 72.289 m，这一高程系统称为“1956 年黄海高程系”；由于验潮资料时间周期短，不精确，为提高大地水准面的精度，国家又根据青岛验潮站 1952~1979 年的验潮资料精确计算，重新确定了水准原点新的高程为 72.260 4 m，这一高程系统称为“1985 国家高程基准”。目前，我国采用的就是“1985 国家高程基准”。



点的高程视频

### 2) 点的高程

选择不同的基准面，就有不同的高程系统。测量中通常以大地水准面作为高程的起算面，因此，把地面点沿铅垂线方向至大地水准面的距离，称为该点的绝对高程，亦称为海拔，用  $H$  表示。如图 1-10 所示，图中的  $H_A$ 、 $H_B$  分别表示了地面点  $A$ 、 $B$  的绝对高程。

当测区附近没有国家高程点可以联测时，也可以临时假定一个水准面作为该测区的高程起算面。地面点沿铅垂线至假定水准面的距离，称为该点的相对高程，用  $H'$  表示。图 1-10

中的  $H'_A$ 、 $H'_B$  表示了地面点  $A$ 、 $B$  的相对高程。

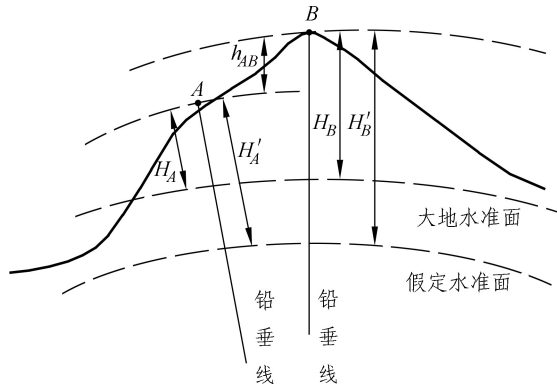


图 1-10 高程与高差

### 3) 高 差

同一高程系中，地面两点高程之差称为高差，用  $h$  表示。高差有方向和正负。如图 1-10 中， $A$ 、 $B$  两点的高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-5)$$

当  $h_{AB}$  为正时， $B$  点高于  $A$  点；当  $h_{AB}$  为负时， $B$  点低于  $A$  点。 $B$ 、 $A$  两点的高差为

$$h_{BA} = H_A - H_B = H'_A - H'_B \quad (1-6)$$

$A$ 、 $B$  两点的高差与  $B$ 、 $A$  两点的高差，绝对值相等，符号相反，即

$$h_{AB} = -h_{BA} \quad (1-7)$$

实际测量中一般是测量未知点与另一个已知高程的点之间的高差来求得未知点高程的。确定了地面点的平面坐标  $x$ 、 $y$  和高程  $H$ ，地面点的空间位置就可以确定了。

### 知识拓展

我国的水准原点位于青岛观象山上的一幢小石屋，屋内全部由崂山花岗岩砌成，顶部中央及四角各竖一石柱，雕琢精细，玲珑别致，室内墙壁上镶一块刻有“中华人民共和国水准原点”的黑色大理石石碑，室中有一约 2 m 深的旱井，水胆玛瑙位于旱井底部。小石屋建筑面积 7.8 m<sup>2</sup>，俄式建筑风格，1954 年建成，如图 1-11 所示。