

课程导入

教学目标

通过本课程导入的学习，学生应能够了解工程测量的任务，掌握测量常用的坐标系和高程，知道常规测量工作的主要内容和原则。

课程导入概述

工程测量是测量学的组成部分，广泛应用于土木工程的勘测、设计、施工和管理的各个阶段。在土木工程中，测量是前提，也是必不可少的环节，它对整个工程的正确安全运营起着关键作用。工程测量是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用，是综合性的应用测绘科学与技术。



某市由于城市的迅速发展，交通压力日益加重，为此拟建一条符合高速公路标准、速度为80 km/h 的城市快速路，线路长12 km。



图 0-1 测量

初测阶段，需测绘规划线路沿线1：500带状地形图，宽度为规划红线外50 m，遇规划及现状路口加宽50 m，同时调查绘图范围内地下管线。

定测阶段，进行中线测量和纵横断面测量。

测绘成果采用地方坐标系和地方高程系。



想一想

什么是坐标系？什么是高程系？

什么是初测？什么是定测？

0.1 工程测量概述

0.1.1 测量学及其分类

测量学是研究获取反映地球形状，地球重力场，地球上自然和社会要素的位置、形状、空间关系、区域空间结构的数据的科学和技术。

它的主要任务有三个方面：一是研究确定地球的形状和大小，为地球科学提供必要的数据和资料；二是将地球表面的地物地貌测绘成图；三是将图纸上的设计成果测设至现场。

根据研究的具体对象及任务的不同，测量学分为大地测量学、地形测量学、工程测量学、摄影测量与遥感学、地图制图学、海洋测量学、全球卫星定位系统、遥感学、地理信息系统。

0.1.2 工程测量的作用和分类

测量学是国家经济建设的先行者。随着科学技术的飞速发展，测量学在国家经济建设和发展的各个领域发挥着越来越重要的作用。工程测量是直接为工程建设服务的，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、航天和国防等各种工程建设部门。

工程测量学是研究在工程建设的设计、施工和管理各阶段中进行测量工作的理论、方法和技术的科学。工程测量是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用，是综合性的应用测绘科学与技术。

按工程建设的进行程序，工程测量可分为规划设计阶段的测量、施工兴建阶段的测量和竣工后的运营管理阶段的测量。规划设计阶段的测量主要是提供地形资料。取得地形资料的方法是在所建立的控制测量的基础上进行地面测图或航空摄影测量。施工兴建阶段的测量的主要任务是，按照设计要求在实地准确地标定建筑物各部分的平面位置和高程，作为施工与安装的依据，一般也要求先建立施工控制网，然后根据工程的要求进行各种测量工作。竣工后的运营管理阶段的测量，包括竣工测量以及为监视工程安全状况的变形观测与维修养护等测量工作。

按工程测量所服务的工程种类，工程测量可分为建筑工程测量、线路测量、桥梁与隧道测量、矿山测量、城市测量和水利工程测量等。此外，人们还将用于大型设备的高精度定位和变形观测称为高精度工程测量，将摄影测量技术应用用于工程建设称为工程摄影测量，而将

以电子全站仪或地面摄影仪为传感器在电子计算机支持下的测量系统称为三维工业测量。

按工作性质的不同，工程测量可分为测定工作和测设工作。测定是指使用测量仪器和工具，通过测量和计算，得到一系列测量数据或成果，从而求出各类目标点的坐标的过程，测量成果供经济建设、国防建设、规划设计及科学研究使用。测设是指使用测量仪器和工具，把图纸上规划设计好的建（构）筑物的位置信息，用一定的测量方法标定在实地上的过程，测量成果作为施工的依据。

0.1.3 工程测量的任务

以线路工程为例，铁路、公路在建造之前，为了确定一条最经济合理的路线，事先必须进行线路沿线的测量工作，由测量的成果绘制带状地形图，在地形图上进行线路设计，然后将设计路线的位置标定在地面上以便施工。待施工结束后，还要测绘竣工图，供日后扩建、改建和维修之用；对某些重要的建筑物在建成之后需要进行变形观测，以保证建筑物安全使用。

1. 规划设计阶段

规划设计阶段测量的任务是为规划、设计、开发提供相应的地形、定位等数据。该阶段的测量工作主要是测绘，即按一定的手段和方法，使用测量仪器和工具，通过测量和计算，得到一系列测量数据，或把地球表面的地形缩绘成地形图。

2. 施工阶段

施工阶段测量的任务是按照工程设计文件的要求，把图纸上规划好的建筑物或设计数据标定在地面上，作为施工和安装的依据。该阶段的测量工作称为测设或放样。

3. 运营管理阶段

工程竣工后，为监视工程的状况、保证安全，需进行周期性的重复观测，即变形观测。

0.1.4 工程测量的发展史

工程测量学是一门历史悠久的学科，是从人类生产实践中逐渐发展起来的。在古代，它与测量学并没有严格的界限。到近代，随着工程建设的大规模发展，才逐渐形成了工程测量学。

古代的测绘技术起源于水利和农业。古埃及尼罗河每年洪水泛滥，淹没了土地界线，水退以后需要重新划界，从而开始了测量工作。公元前 2 世纪，中国司马迁在《史记·夏本纪》中叙述了禹受命治理洪水的情况：“左准绳，右规矩，载四时，以开九州、通九道、陂九泽、度九山。”这说明在公元前很久，中国人为了治水，已经会使用简单的测量工具了。

工程测量学的发展在很长的一段时间内是非常缓慢的。直到 20 世纪初，由于西方的第一、二次技术革命和工程建设规模的不断扩大，工程测量学才受到人们的重视，并发展成为测绘学的一个重要分支。以核子、电子和空间技术为标志的第三次技术革命，使工程测量学获得

了迅速的发展。1964 年国际测量师联合会 (FIG) 为了促进和繁荣工程测量,成立了工程测量委员会 (第六委员会)。从此,工程测量学在国际上作为一门独立的学科开展活动。

现代工程测量已经远远突破了为工程建设服务的狭窄概念,而向所谓的“广义工程测量学”发展。苏黎世高等工业大学马西斯教授指出:“一切不属于地球测量,不属于国家地图集范畴的地形测量和不属于官方的测量,都属于工程测量。”

工程测量学的发展经历了一条从简单到复杂、从手工操作到测量自动化、从常规测量到精密测量的发展道路,它的发展始终与当时的生产力水平同步,并且能够满足大型特种精密工程对测量所提出的愈来愈高的需求。

工程测量的发展趋势为:测量内外业作业的一体化;数据获取及处理的自动化;测量过程控制和系统行为的智能化;测量成果和产品的数字化;测量信息管理的可视化;信息共享和传播的网络化。

0.2 工程测量的研究对象和方法

0.2.1 地球的形状和大小

测绘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。

1969 年 7 月 20 日,美国登月宇宙飞船“阿波罗”11 号的宇航员登上月球的时候,就看到了带蓝色的浑圆的地球,有如在地球上观月亮一样。科学家们根据以往资料和宇航员拍下的像片,认为最好把地球看作一个“不规则的球体”。

地球的自然表面是很不规则的,其上有高山、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 11 034 m,其相对高差不足 20 km,与地球的平均半径 6 371 km 相比,是微不足道的。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,如图 0-2 所示。静止的海水面称作水准面。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。

水准面的特性是处处与铅垂线相垂直。同一水准面上各点的重力位相等,故又将水准面称为重力等位面,它具有几何意义及物理意义。水准面和铅垂线就是实际测量工作所依据的面和线。

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。如图 0-3 所示,它是由椭圆 NESW 绕短轴 NS 旋转而成。

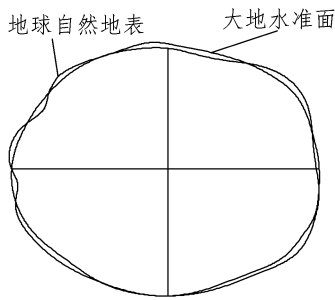


图 0-2 地球自然表面

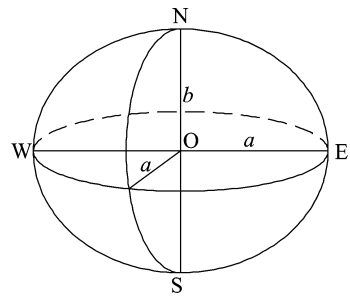


图 0-3 旋转椭球体

某一国家或地区为处理测量成果而采用与大地体的形状大小最接近，又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。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。参考椭球体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。

几个世纪以来，许多学者分别测算出了许多椭球体元素值，表 0-1 列出了几个著名的椭球体。我国的 1954 北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球，1980 西安坐标系采用的是 1975 国际椭球，而全球定位系统（GPS）采用的是 WGS-84 椭球。

表 0-1 常用的参考椭球

椭球名称	长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	计算年代和国家	备注
贝塞尔	6 377 397	6 356 079	1 : 299.152	1841 德国	
海福特	6 378 388	6 356 912	1 : 297.0	1910 美国	1942 年国际第一个推荐值
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1 : 298.3	1940 苏联	中国 1954 年北京坐标系采用
1975 国际椭球	6 378 140	6 356 755	1 : 298.257	1975 国际第三个推荐值	中国 1980 年西安坐标系采用
WGS-84	6 378 137	6 356 752	1 : 298.257	1979 国际第四个推荐值	美国 GPS 采用
CGCS2000	6 378 137	6 356 752	1 : 298.257	2008 年 7 月 1 日起中国全面启用	称为“2000 国家大地坐标系”

由于参考椭球的扁率很小，在小区域的普通测量中可将地（椭）球看作圆球，其半径 $R=(a+b)/3=6\,371\text{km}$ 。

0.2.2 地面点位的表示方法

测量的实质是确定地面点的位置。地面点的位置需用平面坐标和高程三维量来确定。坐标表示地面点投影到基准面上的位置，高程表示地面点沿投影方向到基准面的距离。根据不同的需要可以采用不同的坐标系和高程系。

1. 地理坐标系

当研究和测定整个地球的形状或进行大区域的测绘工作时，可用地理坐标来确定地面点

的位置。地理坐标是一种球面坐标，视依据球体的不同而分为天文坐标和大地坐标。

(1) 天文坐标。

以大地水准面为基准面，地面点沿铅垂线投影在该基准面上的位置，称为该点的天文坐标。该坐标用天文经度和天文纬度 (λ, φ) 表示。

如图 0-4 所示，将大地体看作地球，NS 即为地球的自转轴，N 为北极，S 为南极，O 为地球体中心。包含地面点 P 的铅垂线且平行于地球自转轴的平面称为 P 点的天文子午面。天文子午面与地球表面的交线称为天文子午线，也称经线。而将通过英国格林尼治天文台埃里中星仪的子午面称为起始子午面，相应的子午线称为起始子午线、本初子午线或零子午线，并作为经度计量的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的两面角就称为 P 点的天文经度。用 λ 表示，其值为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，在本初子午线以东的叫东经，以西的叫西经。

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为赤道面。它是纬度计量的起始面。赤道面与地球表面的交线称为赤道。其他垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为纬线。过点 P 的铅垂线与赤道面之间所夹的线面角就称为 P 点的天文纬度。用 φ 表示，其值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，在赤道以北的叫北纬，以南的叫南纬。

(2) 大地坐标。

以参考椭球面为基准面，地面点沿椭球面的法线投影在该基准面上的位置，称为该点的大地坐标。该坐标用大地经度和大地纬度 (L, B) 表示。

如图 0-5 所示，包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 的大地子午面。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的两面角就称为 P 点的大地经度，用 L 表示，其值分为东经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和西经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。过点 P 的法线与椭球赤道面所夹的线面角就称为 P 点的大地纬度，用 B 表示，其值分为北纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。我国 1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系就是分别依据两个不同的椭球建立的大地坐标系。

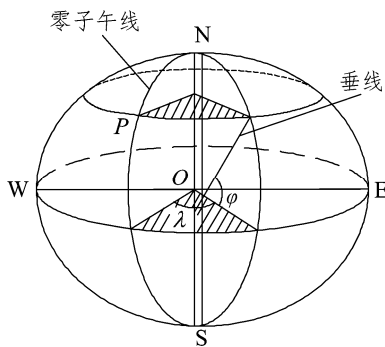


图 0-4 天文坐标

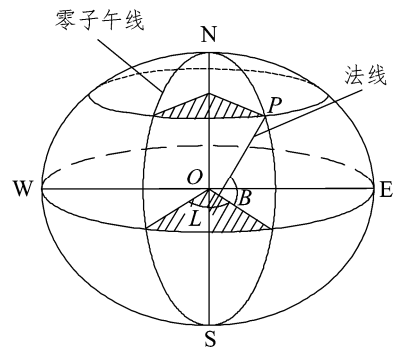


图 0-5 大地坐标

大地坐标因所依据的椭球体面不具有物理意义而不能直接测得，只可通过计算得到。它与天文坐标有如下关系式：

$$\left. \begin{aligned} L &= \lambda - \frac{\eta}{\cos \varphi} \\ B &= \varphi - \xi \end{aligned} \right\} \quad (0-1)$$

式中： η 为过同一地面点的垂线与法线的夹角在东西方向上的垂线偏差分量； ξ 为在南北方向

上的垂线偏差分量。

2. 平面直角坐标

在实际测量工作中，用以角度为度量单位的球面坐标来表示地面点的位置是不方便的，通常是采用平面直角坐标。测量工作中所用的平面直角坐标与数学上的直角坐标基本相同，只是测量工作以 x 轴为纵轴一般表示南北方向，以 y 轴为横轴一般表示东西方向，象限为顺时针编号，直线的方向都是从纵轴北端按顺时针方向度量的，如图 0-6 所示。这样的规定，使数学中的三角公式在测量坐标系中完全适用。

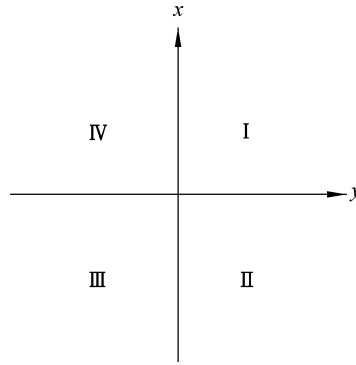


图 0-6 测量平面直角坐标系

(1) 独立测区的平面直角坐标。

当测区的范围较小，能够忽略该区地球曲率的影响而将其当作平面看待时，可在此平面上建立独立的直角坐标系。一般选定子午线方向为纵轴，即 x 轴，原点设在测区的西南角，以避免坐标出现负值。测区内任一地面点用坐标 (x, y) 来表示，它们与本地区统一坐标系没有必然的联系而为独立的平面直角坐标系。如有必要可通过与国家坐标系联测而纳入统一坐标系。经过估算，在面积为 300 km^2 的多边形范围内，可以忽略地球曲率影响而建立独立的平面直角坐标系，当测量精度要求较低时，这个范围还可以扩大数倍。

(2) 高斯平面直角坐标系。

当测区范围较大时，要建立平面坐标系，就不能忽略地球曲率的影响，为了解决球面与平面这对矛盾，必须采用地图投影的方法将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标。目前我国采用的是高斯投影。高斯投影是由德国数学家、测量学家高斯提出的一种横轴等角切椭圆柱投影，该投影解决了将椭球面转换为平面的问题。从几何意义上看，该投影就是假设一个椭圆柱横套在地球椭球体外并与椭球面上的某一条子午线相切，这条相切的子午线称为中央子午线。假想在椭球体中心放置一个光源，通过光线将椭球面上一定范围内的物像映射到椭圆柱的内表面上，然后将椭圆柱面沿一条母线剪开并展成平面，即获得投影后的平面图形，如图 0-7 所示。

该投影的经纬线图形有以下特点：

① 投影后的中央子午线为直线，无长度变化。其余的经线投影为凹向中央子午线的对称曲线，长度较球面上的相应经线略长。

② 赤道的投影也为一直线，并与中央子午线正交。其余的纬线投影为凸向赤道的对称曲线。

③ 经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系，说明投影后的角度无变形。

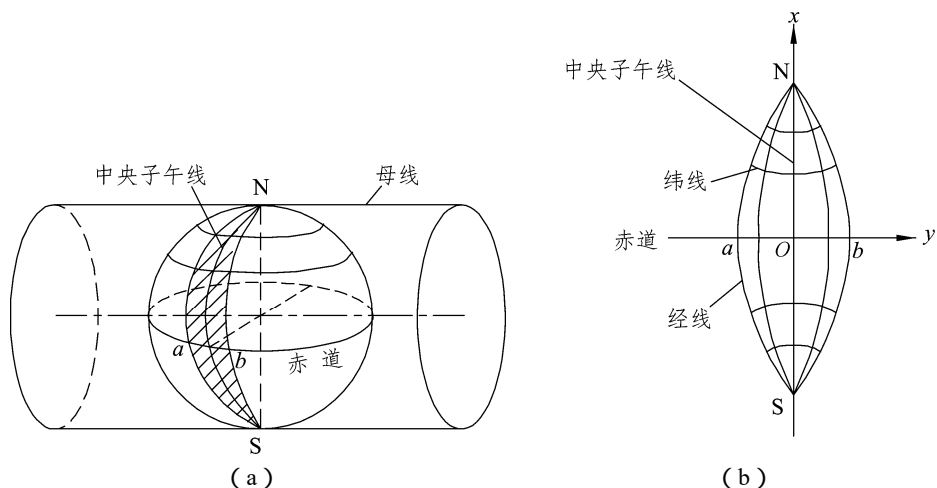


图 0-7 高斯投影概念

高斯投影没有角度变形，但有长度变形和面积变形，离中央子午线越远，变形就越大，为了对变形加以控制，测量中采用限制投影区域的办法，即将投影区域限制在中央子午线两侧一定的范围，这就是所谓的分带投影，如图 0-8 所示。投影带一般分为 6°带和 3°带两种，如图 0-9 所示。

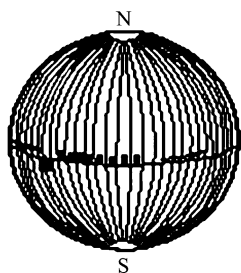


图 0-8 投影分带

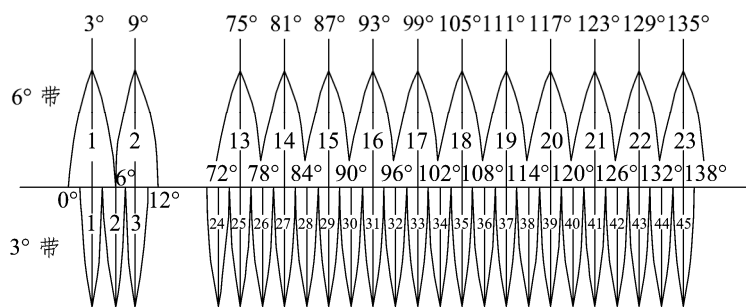


图 0-9 6°带和 3°带投影

6°带投影是从英国格林尼治起始子午线开始，自西向东，每隔经差 6°分为一带，将地球分成 60 个带，其编号分别为 1、2、...、60。每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_6 = (6n - 3)^\circ \quad (0-2)$$

式中： n 为 6°带的带号。6°带的最大变形在赤道与投影带最外一条经线的交点上，长度变形为 0.14%，面积变形为 0.27%。

3°投影带是在 6°带的基础上划分的。每 3°为一带，共 120 带，其中中央子午线在奇数带时与 6°带中央子午线重合，每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_3 = 3^\circ n' \quad (0-3)$$

式中： n' 为 3°带的带号。3°带的边缘最大变形现缩小为长度 0.04%，面积 0.14%。

我国领土位于东经 $72^{\circ} \sim 136^{\circ}$ ，共包括了 11 个 6° 投影带，即 13 ~ 23 带；22 个 3° 投影带，即 24 ~ 45 带。成都位于 6° 带的第 18 带，中央子午线经度为 105° 。

通过高斯投影，将中央子午线的投影作为纵坐标轴，用 x 表示，将赤道的投影作为横坐标轴，用 y 表示，两轴的交点作为坐标原点，由此构成的平面直角坐标系称为高斯平面直角坐标系，如图 0-10 所示。对应于每一个投影带，就有一个独立的高斯平面直角坐标系，区分各带坐标系则利用相应投影带的带号。

在每一投影带内， y 坐标值有正有负，这对计算和使用均不方便，为了使 y 坐标都为正值，故将纵坐标轴向西平移 500 km（半个投影带的最大宽度不超过 500 km），并在 y 坐标前加上投影带的带号。如图 0-10 中的 A 点位于 18 投影带，其自然坐标为 $x=3\ 395\ 451\text{ m}$ ， $y=-82\ 261\text{ m}$ ，它在 18 带中的高斯通用坐标则为 $X=3\ 395\ 451\text{ m}$ ， $Y=18\ 417\ 739\text{ m}$ 。

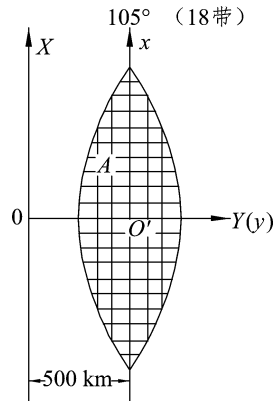


图 0-10 高斯平面直角坐标

3. 地心坐标系

卫星大地测量是利用空中卫星的位置来确定地面点的位置的。由于卫星围绕地球质心运动，所以卫星大地测量中需采用地心坐标系。该系统一般有两种表达式，如图 0-11 所示。

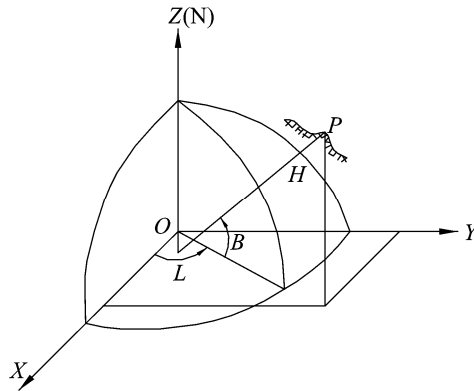


图 0-11 空间直角坐标系

地心空间直角坐标系：坐标系原点 O 与地球质心重合， Z 轴指向地球北极， X 轴指向格林尼治子午面与地球赤道的交点 E ， Y 轴垂直于 XOZ 平面构成右手坐标系。

地心大地坐标系：椭球体中心与地球质心重合，椭球短轴与地球自转轴相合，大地经度 L

为过地面点的椭球子午面与格林尼治平子午面的夹角，大地纬度 B 为过地面点的法线与椭球赤道面的夹角，大地高 H 为地面点沿法线至椭球面的距离。

于是，任一地面点 P 在地心坐标系中的坐标，可表示为 (X, Y, Z) 或 (L, B, H) 。二者之间有一定的换算关系。美国的全球定位系统 (GPS) 用的 WGS-84 坐标以及我国的 2000 国家大地坐标系就属这类坐标。

4. 高程

(1) 地面点高程表示。

① 绝对高程 (海拔)

一般的测量工作都以大地水准面作为高程起算的基准面。因此，地面任一点沿铅垂线方向到大地水准面的距离就称为该点的绝对高程或海拔，简称高程，用 H 表示。如图 0-12 所示，图中的 H_A 、 H_B 分别表示地面上 A 、 B 两点的高程。

② 相对高程 (假定高程)

当测区附近暂没有国家高程点可联测时，也可临时假定一个水准面作为该区的高程起算面。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或假定高程。如图 0-12 中的 H'_A 、 H'_B 分别为地面上 A 、 B 两点的假定高程。

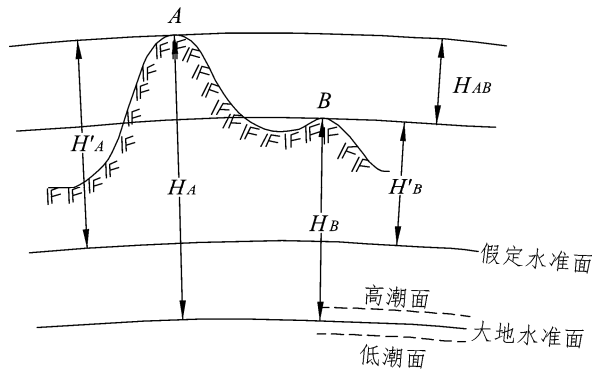


图 0-12 地面点的高程

(2) 高程基准。

① 1956 黄海高程系统

我国规定以 1950—1956 年青岛验潮站多年记录的黄海平均海水面作为我国的大地水准面，由此建立的高程系统称为“1956 黄海高程系”。其水准原点的高程为 72.289 m。

1985 黄海高程系统。

新的国家高程基准面是根据青岛验潮站 1952—1979 年的验潮资料计算确定的，依此基准面建立的高程系统称为“1985 国家高程基准”，于 1987 年开始启用。其水准原点的高程为 72.260 m。

地面上两点之间的高程之差称为高差，用 h 表示，例如， A 点至 B 点的高差可写为：

$$h = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (0-4)$$

由上式可知，高差有正、有负，并用下标注明其方向。在土木建筑工程中，又将绝对高程和相对高程统称为标高。