



普通高等教育“十二五”规划教材

# 土木工程测量

王颖 李仕东 主编  
徐娅娅 主审



TUMU GONGCHENG CELIANG



人民交通出版社  
China Communications Press

普通高等教育“十二五”规划教材

Tumu Gongcheng Celiang  
**土 木 工 程 测 量**

王 颖 李仕东 主编  
徐娅娅 主审



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。主要内容包括:绪论、水准测量、角度测量、距离测量与直线定向、全站仪与全站测量、测量误差的基本理论、控制测量、大比例尺地形图的测绘与应用、施工测量的基本工作、道路工程测量、桥梁与隧道工程测量、建筑工程施工测量和 GNSS 测量。

本书可作为本科、技术技能型本科、高层次职业教育土木工程专业教学用书,也可供行业从业人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量 / 王颖, 李仕东主编. — 北京: 人民交通出版社, 2014. 4

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-114-11165-5

I. ①土… II. ①王…②李… III. ①土木工程-工程测量-高等职业教育-教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 021244 号

普通高等教育“十二五”规划教材

书 名: 土木工程测量

著 者: 王 颖 李仕东

责任编辑: 卢仲贤 袁 方 尤晓晔

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 16.5

字 数: 420 千

版 次: 2014 年 4 月 第 1 版

印 次: 2014 年 4 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11165-5

定 价: 49.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

土木工程测量是土木工程专业的一门核心专业基础课程,旨在培养学生从事土木工程测量的职业能力。为适应高等教育改革的新形势,既要顺应向土木工程专业过渡的需要,又要适应宽口径复合型人才培养的需要,这就要求专业基础课与土木工程专业课在教学内容上更好的衔接,同时也为了适应传统测量向现代测量转变的发展趋势。本书编写的主要目标是面向工程界、面向未来,培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的具有大工程观理念的高质量各类型工程技术人才。本书适用于建筑工程、道路与桥梁工程、岩土与地下工程、工程管理专业教学用书,亦可供土木工程技术人员参考使用。

本书根据土木工程专业高级应用型人才的培养方案和目标,针对应用型本科教学大纲,在内容的选择和编写上更加注重理论与实践的紧密结合,突出介绍基本理论、基本知识、基本技能,着重论述新技术、新方法、新设备、新内容与新规范,以拓宽知识面、增强适应性。因此,本书的编写顺序由浅入深、由表及里、循序渐进地介绍测量学的系列知识,其中,第一~八章主要介绍土木工程各专业方向通用的测量学基础知识;第九~十二章主要介绍土木工程各专业方向的应用测量技术;第十三章主要介绍现代测绘技术 GNSS 的原理及应用。

本书由黑龙江工程学院王颖、鲁东大学李仕东担任主编,并负责全书统稿工作。第五、六、十三章由黑龙江工程学院王慧颖编写,第一、九、十章由王颖编写,第三、八、十一章由李仕东编写,第四、七章由黑龙江工程学院郭雷编写,第二、十二章由黑龙江工程学院吴辰龙编写。

在本书编写过程中,长安大学徐娅娅教授提出了许多宝贵的意见和建议,并对本书进行了全面仔细审核,在此表示诚挚的感谢!由于编者水平有限,书中定有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者  
2013 年 12 月

# 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第一章 绪论             | 1  |
| 第一节 测量学概述          | 1  |
| 第二节 地面点位的确定        | 2  |
| 第三节 地球曲率对测量工作的影响   | 9  |
| 思考题                | 10 |
| 第二章 水准测量           | 11 |
| 第一节 水准测量原理         | 11 |
| 第二节 水准测量的仪器及工具     | 12 |
| 第三节 水准测量的实施及成果处理   | 16 |
| 第四节 微倾式水准仪的检验和校正   | 21 |
| 第五节 水准测量的误差分析      | 24 |
| 第六节 其他类型水准仪        | 26 |
| 思考题                | 28 |
| 第三章 角度测量           | 30 |
| 第一节 角度测量原理         | 30 |
| 第二节 光学经纬仪的结构及其技术操作 | 31 |
| 第三节 水平角测量方法        | 34 |
| 第四节 竖直角测量方法        | 37 |
| 第五节 经纬仪的检验与校正      | 40 |
| 第六节 角度测量的误差分析      | 44 |
| 第七节 电子经纬仪简介        | 45 |
| 思考题                | 47 |
| 第四章 距离测量与直线定向      | 49 |
| 第一节 钢尺量距           | 49 |
| 第二节 视距测量           | 53 |
| 第三节 光电测距           | 57 |
| 第四节 直线定向           | 62 |
| 第五节 罗盘仪的构造与使用      | 63 |
| 第六节 坐标计算原理         | 64 |
| 思考题                | 66 |
| 第五章 全站仪与全站测量       | 67 |
| 第一节 概述             | 67 |
| 第二节 全站仪的使用方法       | 68 |
| 第三节 全站仪的应用         | 75 |
| 第六章 测量误差的基本理论      | 81 |

|             |                      |     |
|-------------|----------------------|-----|
| 第一节         | 测量误差与精度              | 81  |
| 第二节         | 等精度观测的最可靠值及其中误差      | 87  |
| 第三节         | 误差传播定律及其应用           | 89  |
| 第四节         | 非等精度直接观测的最可靠值及其中误差   | 92  |
|             | 思考题                  | 94  |
| <b>第七章</b>  | <b>控制测量</b>          | 95  |
| 第一节         | 概述                   | 95  |
| 第二节         | 平面控制测量               | 96  |
| 第三节         | 高程控制测量               | 113 |
|             | 思考题                  | 118 |
| <b>第八章</b>  | <b>大比例尺地形图的测绘与应用</b> | 120 |
| 第一节         | 地形图的基本知识             | 120 |
| 第二节         | 大比例尺地形图测绘            | 128 |
| 第三节         | 数字测图的基本知识            | 132 |
| 第四节         | 地形图的应用               | 136 |
|             | 思考题                  | 141 |
| <b>第九章</b>  | <b>施工测量的基本工作</b>     | 144 |
| 第一节         | 概述                   | 144 |
| 第二节         | 测设的基本工作              | 144 |
|             | 思考题                  | 149 |
| <b>第十章</b>  | <b>道路工程测量</b>        | 150 |
| 第一节         | 道路中线测量               | 150 |
| 第二节         | 道路纵、横断面测量            | 174 |
| 第三节         | 道路施工测量               | 183 |
|             | 思考题                  | 187 |
| <b>第十一章</b> | <b>桥梁与隧道工程测量</b>     | 189 |
| 第一节         | 概述                   | 189 |
| 第二节         | 施工控制网测量              | 190 |
| 第三节         | 桥梁轴线和墩台中心定位测量        | 201 |
| 第四节         | 隧道施工测量               | 208 |
|             | 思考题                  | 212 |
| <b>第十二章</b> | <b>建筑工程施工测量</b>      | 213 |
| 第一节         | 建筑施工控制测量             | 213 |
| 第二节         | 民用建筑施工测量             | 218 |
| 第三节         | 工业建筑施工测量             | 228 |
| 第四节         | 变形测量                 | 236 |
|             | 思考题                  | 248 |
| <b>第十三章</b> | <b>GNSS 测量</b>       | 249 |
| 第一节         | 概述                   | 249 |
| 第二节         | GPS 测量               | 250 |
|             | 思考题                  | 256 |
|             | <b>参考文献</b>          | 257 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 测量学概述

测量学是研究整个地球及其表面上局部地区的形状和大小以及各种物体大小形状位置变化规律的一门应用科学。测量学将地表物体分为地物和地貌。

地物是地面上天然或人工形成的物体,包括湖泊、河流、海洋、房屋、道路、桥梁等。地貌是地表高低起伏的形态,包括山地、丘陵和平原等。地物和地貌总称为地形。

### 一、测量学的任务

测量学的任务是对地形的测定和测设。

测定是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,或在图纸上按照一定比例尺、规定的符号缩绘成地形图、断面图等,供科学研究、经济建设和国防建设规划设计使用。测设是把图纸上规划设计好的建筑物轴线和特征点的位置,在地面上标定出来,作为施工的依据。

根据测量学研究的对象和应用范围不同,可以分成以下六类:

#### 1. 大地测量学

大地测量学是研究较大的区域甚至整个地球的形状和大小,建立国家大地控制网和研究地球重力场的理论、技术和方法(在计算与绘图中要考虑地球的曲率。近年来大地测量学又分为常规大地测量学和卫星大地测量学。

#### 2. 普通测量学

普通测量学的研究对象是小区域地球表面的形状和大小,不考虑地球曲率,用平面代替地球曲面,根据需要测绘各种比例尺的地形图。

#### 3. 摄影测量学

摄影测量学是利用摄影相片来研究地球表面的形状和大小的测绘科学。根据摄影手法的不同,又分为地面摄影测量学、水下摄影测量学和航天摄影测量学。

#### 4. 工程测量学

工程测量学是研究工程建设中所进行规划、设计、施工、管理各阶段的测量工作。由于研究的对象不同,可分为公路工程测量、建筑工程测量、矿山测量和水利工程测量。

#### 5. 海洋测量学

海洋测量学是以研究海洋和陆地水域为对象所进行的测量和海图编绘工作,属于海洋测绘学的范畴。

#### 6. 制图学

制图学是研究将地球表面的点、线经过投影变换后绘制成满足各种不同要求的地图、海图的科学。

本教材主要介绍基于普通测量学的部分工程测量学。

## 二、测量学的应用

在工程建设中,测量工作起着十分重要的作用。如果没有测量工作为工程建设提供图纸和数据,并及时与之配合和指导,任何工程建设都将无法实施。测量学是从人类生产实践中发展起来的一门历史悠久的科学,随着社会的发展和科学技术的进步,测绘科学也分支了若干学科,其间既相对独立又存在着必然联系。

测量工作在经济建设、国防建设和其他许多方面都发挥着重要的作用,并应该走在现代化建设的前面。在经济建设方面,如地质勘探、农田水利基本建设、城市规划、工业与民用建筑、公路与铁路设计与施工、桥梁的架设等工程都离不开测量工作。在国防建设中,战略的部署、战役的指挥和各种国防工程建设等,都是以测量工作所获得的各种图面资料和测量数据为依据,进行设计与施工。另外,在地震预测、灾情监视和科学考察等方面也都离不开测量工作。由此可见,测绘工作是实现四个现代化必不可少的一项基础工作,只有掌握测量学的理论和技能,才能更好地在土木工程乃至社会主义建设中更好的服务。

在规划设计阶段,对设计的工程综合进行经济调查和技术调查,目的在于收集设计所需要的技术经济资料。应用地形图及实地勘测数据综合设计、建筑物单项设计,并提出工程的概预算等。设计是一项涉及面广、技术复杂的整体工作。在此阶段先后要完成方案研究、初测与初步设计、定测与施工设计等工作。

在施工建设阶段,测量工作是按照设计的要求,将设计图上的建筑物、构筑物标定于地面,以指导施工,其主要任务是保证各种建筑物能按设计位置正确修建。施工前,设计单位应向施工单位进行设计交桩。设计交桩主要包括:与施工有关的初测资料和定测资料,并现场指认测量控制点。施工单位接收后,应立即对其进行复测,对复测合格的成果予以确认,不合格的成果,应仔细研究并会同设计人员共同解决。施工中,进行施工放样,即根据施工测量控制点并结合施工场地的地形情况,将图纸上设计的线路和各种建筑物按设计要求标定于地面,供施工使用。施工放样是一项经常性的工作,贯穿于整个施工过程。工程竣工后,要进行竣工测量,并编制竣工文件。竣工测量是对工程进行全面的测量,以检查其平面位置、高程位置及外形尺寸与设计相符的程度,其结果将成为竣工验收的一个依据。

在管理阶段,随着时间的推移,在各种因素的影响下,房屋、公路、桥梁、隧道等工程建筑物可能会产生变形,如位移、沉陷和倾斜等。因此,在工程建筑物的运营期间,对其进行变形观测是十分必要的。

测量学贯穿着整个工程建设的始末,是土木工程专业非常重要的专业基础学科。其综合性极强,要求学生在掌握基本理论及其分析方法的基础上,具备动手熟练操作各种测量仪器的技能;掌握大比例尺地形图测图原理和方法;对数字测图过程有所了解;在工程规划、设计、施工中,能正确应用地形图和测量信息;熟悉处理测量数据和评定测量结果精度的方法。

## 第二节 地面点位的确定

### 一、地球的形状和大小

测量学研究的对象是地球表面,首先应该对地球的形状和大小有所了解。地球自西向东



自转,同时又围绕太阳公转。地球自转与公转运动的结合使其产生了地球上的昼夜交替和四季变化(地球自转和公转的速度是不均匀的)。同时,由于受到太阳、月球和附近行星的引力作用以及地球大气、海洋和地球内部物质等各种因素的影响,地球自转轴在空间和地球本体内的方向都要产生变化。地球自转产生的惯性离心力使得球形的地球由两极向赤道逐渐膨胀,成为目前略扁的旋转椭球体,极半径比赤道半径短约 21km,平均半径为 6371km。地球自然表面很不规则,有高山、丘陵、平原和海洋。其中最高的珠穆朗玛峰高出海面达 8848.43m(2005 年国家测绘局公布),最低的马里亚纳海沟低于海面达 10923m(2012 年我国蛟龙号测)。但这样的高低起伏,相对于地球半径来说是很小的。地球表面 71%的面积是海洋,其余 29%的面积是陆地,因此,人们把海面所包围的地球形状看作地球的形状。

由于地球的自转运动,地球上任一点都受到离心力和地球引力的双重作用,这两个力的合力称为重力,重力的方向线称为铅垂线。铅垂线是测量工作的基准线。静止的水面称为水准面,水准面是受地球重力影响而形成的,是一个处处与重力方向垂直的连续曲面,并且是一个重力场的等位面。与水准面相切的平面称为水平面。水面可高可低,因此符合上述特点的水准面有无数多个,其中与平均海面吻合并向大陆、岛屿内延伸而形成的闭合曲面,称为大地水准面。如图 1-1 所示。大地水准面是测量工作的基准面。由大地水准面所包围的地球形体,称为大地体。

用大地体表示地球形体是恰当的,但由于地球内部质量分布不均匀,引起铅垂线的方向产生不规则的变化,致使大地水准面成为一个表面稍有起伏的复杂曲面,在这曲面上进行测量数据处理非常困难。为了使用方便,通常用一个接近大地水准面,并可用数学式表示的几何形体(即地球椭圆)来代替地球的形状,作为测量计算的基准面。地球椭球是一个围绕其短轴旋转而成的形体,故地球椭球又称旋转椭球。如图 1-2 所示,旋转椭球体由半径  $a$ (或短半径  $b$ )和扁率  $f$ ( $f = \frac{a-b}{a}$ )所决定。我国目前采用的元素值为:长半轴  $a = 6378140\text{m}$ ,短半轴  $b = 6356755.3\text{m}$ ,扁率  $f = 1/298.257$ 。

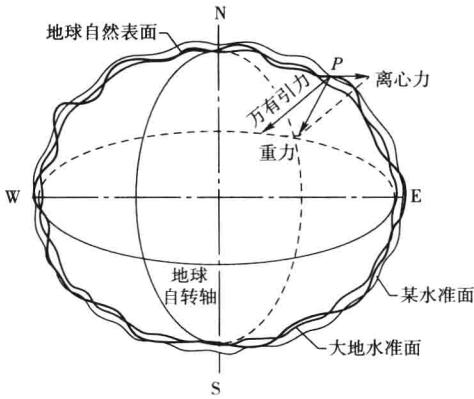


图 1-1 大地水准面

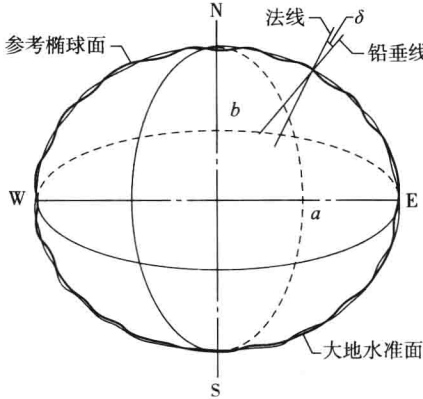


图 1-2 参考椭球面

根据一定条件,确定参考椭球与大地水准面的相对位置所做的测量工作,称为参考椭球体的定位。具体方法如图 1-3 所示,在适当地面上选定一点  $P$ ( $P$  点称为大地原点),令  $P$  点的铅垂线与椭球面上相应  $P'$  点的法线重合,并使该点的椭球面与大地水准面相切,而且使本国范围内的椭球面与大地水准面尽量接近,这就是参考椭球体的定位。

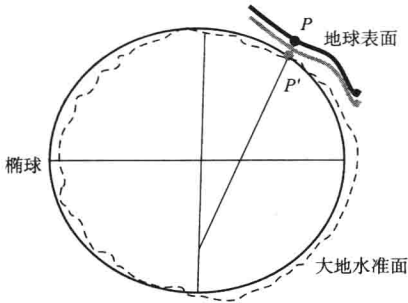
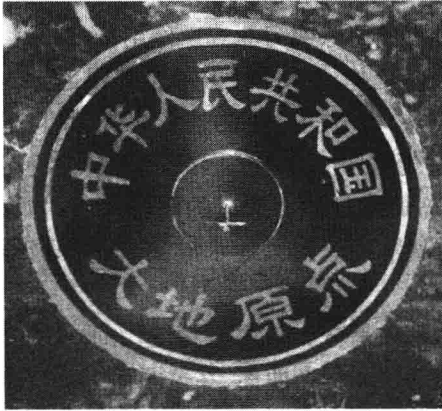
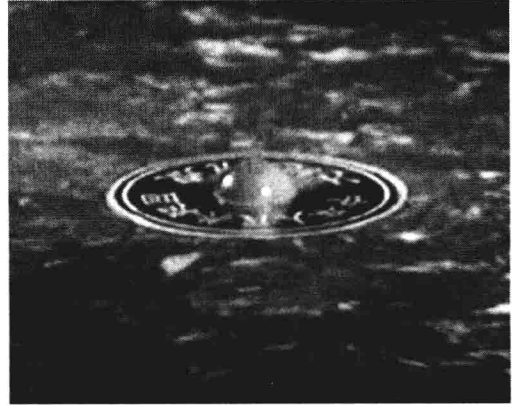


图 1-3 参考椭球体的定位

这里  $P$  点称为大地原点。我国大地原点位于陕西泾阳永乐镇石际寺村境内,南距西安市区约 36km,具体位置在:北纬  $34^{\circ}32'27.00''$ ,东经  $108^{\circ}55'25.00''$ 。中华人民共和国大地原点是国家坐标系(1980 西安坐标系)的基准点。在大地原点上进行了精密天文测量和精密水准测量,获得了大地原点的平面起算数据。这些数据在我国经济建设、国防建设和社会发展等方面发挥着重要作用。如图 1-4 所示。



a)



b)

图 1-4 中华人民共和国大地原点

## 二、测量坐标系地面点位的确定

无论测定还是测设,都需要通过确定地面的空间位置来实现。确定三维空间的点,便需要空间坐标系的三个参数,确定地面点位的实质就是确定其在某个空间坐标系中的三维坐标。测量中,将空间坐标系分为参心坐标和地心坐标系。“参心”是参考椭球的中心,由于参考椭球中心一般与地球质心不重合,所以它属于非地心坐标系。参心坐标系的坐标原点设在参考椭球的中心。我国建立的 1954 北京坐标系和 1980 国家大地坐标系,都属于参心坐标系。地心坐标系的坐标原点设在地球的质心。我国近来启用的 2000 国家大地坐标系、GPS 所采用的 WGS—84 坐标系都属于地心坐标系。工程测量为简化计算,通常采用参心坐标系。

### 1. 确定球面点位的坐标系

#### (1) 地理坐标系

在大区域内地面点的位置,以球面坐标系来表示。用经度、纬度表示地面点在球面上的位置,称为地理坐标。适用于在地球椭球面上确定点位。地理坐标又因采用的基准面、基准线及测量计算坐标方法的不同而分为天文地理坐标和大地地理坐标两种。

①天文地理坐标。是表示地面点在大地水准面上的位置,通过天文测量直接测定的,其依据是大地水准面和铅垂线。用天文经度  $\lambda$  和天文纬度  $\phi$  表示。

如图 1-5 所示,地面点  $P$  所在的天文子午面与首子午面(英国格林尼治天文台所在的起始子午面)所夹的二面角为经度  $\lambda$ ,取值范围为  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,从首子午面起,东经向东为正,西经向西为负。过该地面点  $M$  的铅垂线与赤道的夹角为纬度  $\phi$ ,取值范围为  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ,从赤道面算

起,北纬向北为正,南纬向南为负。点  $M$  的天文地理坐标表示为  $(\lambda, \varphi)$ 。如图 1-5a) 所示。

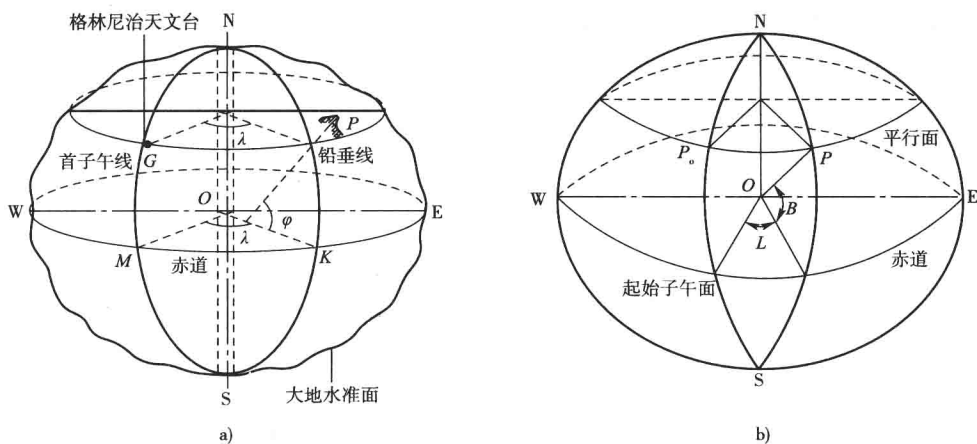


图 1-5 地理坐标系

②大地地理坐标。是表示地面点在参考椭球体上的位置,根据按大地测量所得的数据推算而得的,其依据是参考椭球面和法线。用大地经度  $L$  和大地纬度  $B$  表示。

地面点  $P$  所在的子午面与起始子午面所夹的二面角为经度  $L$ ,过该地面点  $P$  的法线(与旋转椭球面相垂直的线)与赤道的夹角为纬度  $B$ 。点  $P$  的大地地理坐标为  $(L, B)$ 。如图 1-5b) 所示。

大地原点的天文地理坐标和大地地理坐标相同。地面上其他点的大地坐标按大地原点坐标推算,由此建立的大地坐标系,称为“1980 西安坐标系”,简称“西安系”。另外,我国曾使用的“1954 北京坐标系”,简称“54 北京系”,是通过前苏联 1942 年普尔科沃坐标系联测,经过我国东北传算过来的坐标,其大地原点位于前苏联列宁格勒天文台中央。

### (2) 空间直角坐标系

以椭球体中心为原点,起始子午面与赤道面交线为  $x$  轴,赤道面上与  $x$  轴正交的方向为  $y$  轴,椭球体的旋转轴为  $z$  轴,指向符合右手法则,如图 1-6 所示。

### (3) 平面直角坐标系

① 独立平面直角坐标系。适用于测区范围较小(面积小于  $100\text{km}^2$ ),可将测区曲面当作平面看待。测量工作中采用的平面直角坐标规定:南北方向为纵轴  $x$ ,向北为正;以东西方向为横轴  $y$ ,向东方向为正。可以依据工作的方便性假设原点坐标,原点一般选在测区的西南角,使测区内各点的坐标均为正值,象限按顺时针方向编号,如图 1-7 所示。

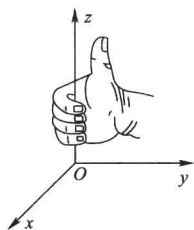


图 1-6 右手法则示意图

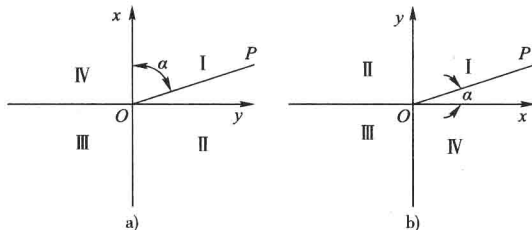


图 1-7 测量学坐标系与数学坐标系

②高斯平面直角坐标系。在大地测量工作中,应考虑地球曲率对测量数据的影响。如在赤道上  $1''$  的经度差或纬度差对应的地面距离约为  $30\text{m}$ 。但地理坐标对局部测量工作来说计算

是非常不方便的,为了方便工程的规划、设计与施工,解决的方法是采用一定的投影方法将曲面问题转化为平面问题,使得测量计算和绘图更加方便。我国采用高斯投影(高斯-克吕格投影,即横切椭圆柱投影),所建立的坐标系即为高斯平面直角坐标。它是由德国数学家高斯在 1820~1830 年间,为解决德国汉诺威地区大地测量投影问题而提出的,后来由德国学者克吕格自 1912 年起加以整理、改进的一种分带投影方法。高斯投影的实质是椭球面上微小区域的图形投影到平面上后仍然与原图形相似,即不改变原图形的形状。

### a. 投影原理。

如图 1-8 所示把地球看作一个椭球,设想把一个平面卷成一个横圆柱,把它套在椭球外面,使横圆柱的中心轴线通过椭球的中心,把椭球面上一根子午线与横圆柱相切,即这条子午线与横圆柱重合。如图 1-8a)所示,以此子午线为中心将其左右一定带宽范围内的球面用正形投影(即高斯投影)的方法投影至圆柱面上。

中央子午线和赤道面投影至横圆柱面上都是一条直线,且互相垂直,它们构成了平面直角坐标系的纵横轴,即  $x$  轴和  $y$  轴,因此经过这种投影后,其坐标既是平面直角坐标,又与大地坐标的经纬度发生联系,对大范围的测量工作也就适用了。如图 1-8b)所示。

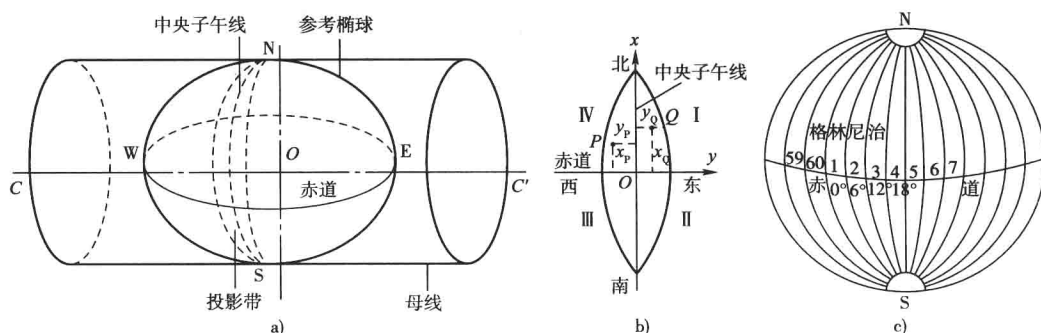


图 1-8 高斯平面坐标系投影原理图

### b. 高斯投影坐标分带方法。

为限制高斯投影离中央子午线越远,长度变形越大的缺点,从经度  $0^\circ$  开始,将地球按经线划分为带,称为投影带。如图 1-8c)所示。投影是从首子午线开始的,国际上有  $6^\circ$  带和  $3^\circ$  带两种方法。经度每隔  $6^\circ$  划分一带的称为  $6^\circ$  带,经度每隔  $3^\circ$  划分一带的称为  $3^\circ$  带。我国领土位于东经  $72^\circ \sim 136^\circ$  之间,共包括了 11 个  $6^\circ$  带,即 13~23 带;22 个  $3^\circ$  投影带,即 24~45 带。

#### I. $6^\circ$ 带投影

从经度  $0^\circ$  开始,将整个地球分成 60 个带,由首子午线起自西向东每隔经差  $6^\circ$  为一带。如图 1-9 所示,带号从首子午线开始,用阿拉伯数字表示。第一个带的中央子午线经度为  $3^\circ$ ,任意带的中央子午线经度  $L_0$  与投影带号  $N$  的关系为

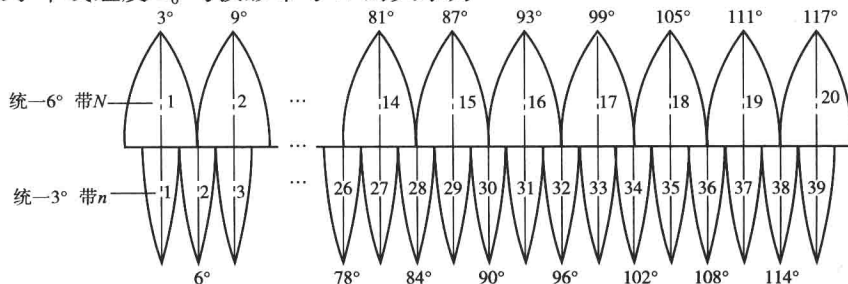


图 1-9  $6^\circ$  带和  $3^\circ$  带投影高斯平面坐标系关系图

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

反之,已知地面上任意一点的经度  $L$ ,要计算该点所在的  $6^\circ$ 带带号的公式为

$$N = \text{INT}\left(\frac{L+3}{6} + 0.5\right) = \text{INT}\left(\frac{L}{6} + 1\right) \quad (1-2)$$

式中:INT——取整函数。

例如:北京中心的经度为  $116^\circ 24'$ ,求其所在高斯投影  $6^\circ$ 带的带号  $N$  及该带的中央子午线经度  $L_0$ 。

$$N = \text{INT}(116^\circ 24' / 6 + 1) = 20 \text{ 带}$$

$$L_0 = 6 \times 20 - 3 = 117^\circ$$

因此,北京中心位于 20 带,该带中央子午线的经度为  $117^\circ$ 。

### II. $3^\circ$ 带投影

从经度  $0^\circ$ 开始,将整个地球分成 120 个带,自东经  $1.5^\circ$ 子午线起自西向东每隔经差  $3^\circ$ 为一带。如图 1-9 所示,带号从首子午线开始,用阿拉伯数字表示。第一个带的中央子午线经度为  $3^\circ$ ,任意带的中央子午线经度  $L'_0$ 与投影带号  $n$ 的关系为

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

反之,已知地面上任意一点的经度  $L$ ,要计算该点所在的  $3^\circ$ 带带号的公式为

$$n = \text{INT}\left(\frac{L}{3} + 0.5\right) \quad (1-4)$$

③国家统一坐标。由于我国位于北半球,在高斯平面直角坐标系内, $x$ 坐标均为正值,而  $y$ 坐标有正有负。为避免  $y$ 坐标出现负值时带来计算的烦琐,我国规定将  $x$ 轴向西平移  $500\text{km}$ ,即所有点的  $y$ 坐标均加上  $500\text{km}$ 。如图 1-10 所示。此外为了区别某点位于哪个投影带内,要求在新的横坐标  $y$ 之前标以 2 位数的带号。这种坐标称为国家统一坐标。

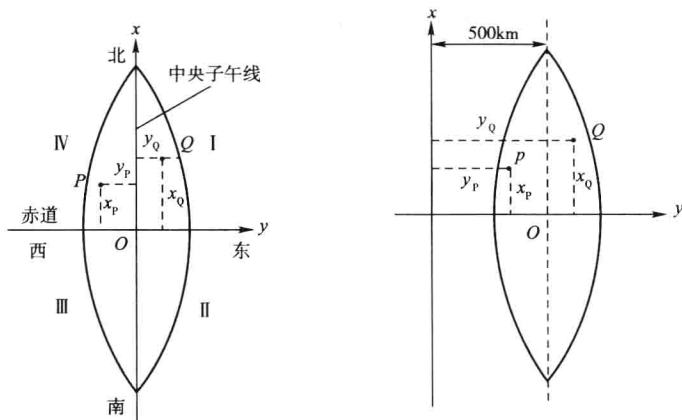


图 1-10 国家统一坐标转换图

例如:某点国家投影坐标为  $(51000, 20637680)$ ,则其所在的带号为多少?该点所在坐标系为几度分带方法?在带号内的自然坐标为多少?

带号为:20 带;分带法为: $6^\circ$ 带法。

该点自然坐标为  $(51000, 137680)$ 。

### 2. 高程系统

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或海拔,简称高程,通常以  $H$  表示。地面点沿铅垂线方向至某一假定水准面的距离称为该点的相对高程,亦称相对高程,

以  $H'$  表示。地面两点间的绝对高程或相对高程之差称为高差,通常用  $h$  表示。

高程是一维坐标系,它的基准面是大地水准面。由于海水受潮汐、风浪等影响,它的高低时刻在变化。通常是在海边设立观潮站,进行长期观测,求得海水面的平均高度作为高程零点,以通过该点的水准面作为高程基准面,也即大地水准面。其面上的高程恒为零。

我国的绝对高程是以青岛港验潮站历年纪录的黄海平均海面为基准面,1954 年在青岛市内观象山建立水准原点。如图 1-11 所示。通过水准测量将验潮站确定的高程零点引测到水准原点,求出水准原点的高程。

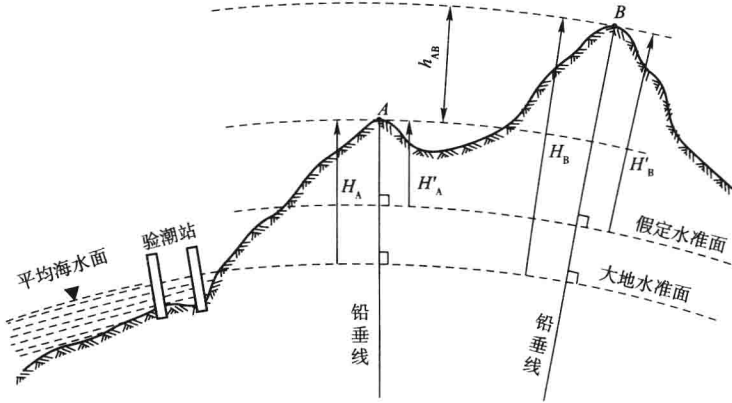


图 1-11 高程与高差相互关系图

1956 年我国采用青岛大港一号码头验潮站于 1950 ~ 1956 年间观测的验潮资料计算确定的大地水准面为基准,引测其高程为 72.289m。该大地水准面为高程基准建立的高程系统,称为“1956 黄海高程系统”,简称“56 黄海系统”。

20 世纪 80 年代中期,我国再一次应用 1953 ~ 1979 年验潮资料,重新计算确定的大地水准面为基准,引测出水准原点的高程为 72.260m。全国布置的国家高程控制点,都是以这个水准原点为基准测算出来的,这就是我国大地法规定的“1985 国家高程基准”,简称“85 高程基准”。

地面两点间的绝对高程或相对高程之差称为高差。通常用  $h$  表示。图 1-11 中,  $H_A$ 、 $H_B$  为 A、B 点的绝对高程,  $H'_A$ 、 $H'_B$  为相对高程,  $h_{AB}$  为 AB 两点高差,即

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

### 3. WGS—84 坐标系

WGS 的英文全称是 World Geogetic System(世界大地坐标系),它是美国国防部为 GPS 导

航定位系统,于 1984 年建立的地心坐标系,1985 年开始投入使用。GPS 广播星历是以 WGS—84 坐标系为根据的。WGS—84 坐标系的几何意义是:坐标系的原点位于地球质心,  $z$  轴指向 BIH(国际时间)1984.0 定义的协议地球极(CTP)方向,  $x$  轴指向 BIH1984.0 的零度子午线和 CTP 赤道的交点,  $y$  通过  $x$ 、 $y$ 、 $z$  符合右手法则,如图 1-12 所示。

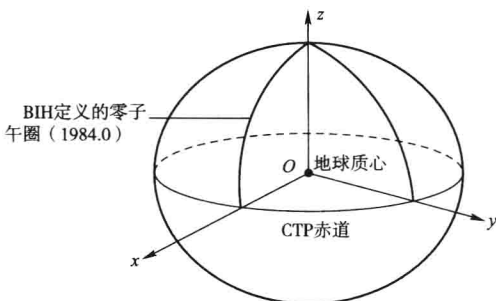


图 1-12 WGS—84 坐标系

WGS—84 地心坐标系与“1954 北京坐标系”或“1980 西安坐标系”等参心坐标系可以相互转换。

### 三、地面点定位的元素及原则

#### 1. 地面点定位的元素

欲确定地面点的位置,必须求得它在椭球面或投影在平面上的坐标和高程,无论采用何种坐标系,都需要测出地面点间的距离  $D$ 、相关角度  $\beta$  和高程  $H$ ,则  $D$ 、 $\beta$  和  $H$  称为地面点的定位元素。高程测量、水平角测量和距离测量是测量学的基本内容,测角、测距、测高程是测量的基本工作,也称为确定地面点位的三要素。观测、计算和绘图是测量工作的基本技能。

#### 2. 测量工作的原则

确定地面点位时会不可避免地产生误差,甚至发生错误。测量过程中如果不加以检查和控制,势必造成由于误差传播导致点位误差逐渐增大,最后达到不可容许的程度。为了限制误差的传播和累积,测量工作必须遵循一定的原则,即布局上“从整体到局部”、在精度上“由高级到低级”、在次序上“先控制后碎部”的测量原则。并且要求步步工作有校核,在上一步工作未进行校核之前,不可进行下一步工作。

### 第三节 地球曲率对测量工作的影响

当测区较小时可以把投影面看作平面,即用水平面代替水准面,但是这种代替水准面是有一定限度的。

#### 一、水准面的曲率对水平距离的影响

水准面的曲率对水平距离的影响如图 1-13 所示。水准面代替水平面的距离误差见表 1-1。

水准面代替水平面的距离误差

表 1-1

| 距离 $D$ (km) | 距离误差 $\Delta D$ (cm) | 距离相对误差 $\Delta D/D$ |
|-------------|----------------------|---------------------|
| 10          | 0.8                  | 1/1200000           |
| 25          | 12.8                 | 1/200000            |
| 50          | 102.7                | 1/49000             |
| 100         | 821.2                | 1/12000             |

由上述计算可知,当水平距离为 10km 时,以水平面代替水准面所产生的距离误差为距离的 1/1217700,现在最精密距离丈量时的容许误差为其长度的 1/1000000。因此可得出结论:在半径为 10km 的圆面积内进行长度的测量工作时,可以不必考虑地球曲率;也就是说可以把水准面当作水平面看待,即实际沿圆弧丈量所得距离作为水平距离,其误差可忽略不计。

#### 二、水准面的曲率对水平角度的影响

测量工作中实测的是球面面积,绘制成图时则绘成平面图形的面积。根据球面三角学原理可知,球面上多边形内角之和与平面上多边形内角之和要大一个角超值  $\epsilon''$ 。其值可按式计算

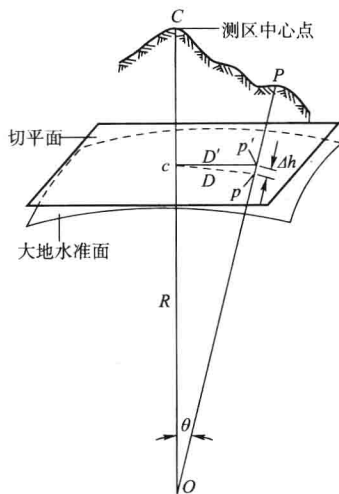


图 1-13 水准面的曲率对水平距离的影响



$$\varepsilon'' = \rho'' \frac{P}{R^2} \quad (1-6)$$

式中： $P$ ——球面多边形面积；

$R$ ——地球半径。

水准面的曲率对水平角度的影响见表 1-2。

水准面的曲率对水平角度的影响

表 1-2

| 面积 $P(\text{km}^2)$ | 角度误差 $\varepsilon('')$ | 面积 $P(\text{km}^2)$ | 角度误差 $\varepsilon('')$ |
|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| 10                  | 0.05                   | 400                 | 2.03                   |
| 100                 | 0.51                   | 2500                | 12.70                  |

由此表明：对于面积在  $100\text{km}^2$  以内的多边形，地球曲率对水平角度的影响只有在最精密的测量中才需要考虑，一般的测量工作是不必考虑的。

### 三、地球曲率对高差的影响

由图 1-14 得知  $(R + \Delta h)^2 = R^2 + t^2$ ，则有

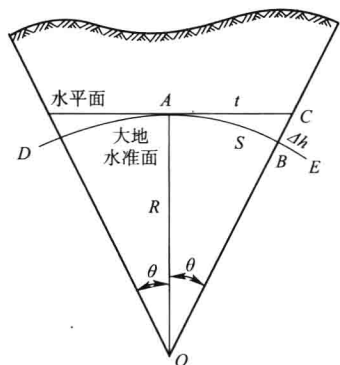


图 1-14 水平面代替水准面对高程影响

$$2R \times \Delta h + \Delta h^2 = t^2$$

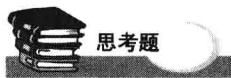
即

$$\Delta h = \frac{t^2}{2R + \Delta h}$$

因  $S \approx t$ ， $\Delta h$  相对于  $R$  可忽略不计，则：

$$\Delta h = \frac{S^2}{2R}$$

若分别取  $S$  为  $0.1\text{km}$ 、 $0.2\text{km}$ 、 $0.5\text{km}$ 、 $1.0\text{km}$ ，相应的  $\Delta h$  分别为  $0.8\text{mm}$ 、 $3.1\text{mm}$ 、 $19.6\text{mm}$ 、 $78.5\text{mm}$ 。由此可见，地球曲率的影响对高差而言，即使在很短的距离内也必须加以考虑。



#### 思考题

1. 测量学的研究对象和基本任务是什么？
2. 测量工作的基准面和基准线分别是什么？
3. 表示地面点位的坐标系有哪些？
4. 测量学中的平面直角坐标系与数学中的平面直角坐标系有什么不同？
5. 天文坐标系与大地地理坐标系有何不同？
6. 测量工作的基本原则是什么？
7. 用水平面代替水准面，对距离、水平角、高程各有何影响？
8. 确定地面点位的三要素是什么？
9. 广东省行政区域所在的概略经度范围是东经  $109^{\circ}39'$  ~ 东经  $117^{\circ}11'$ ，分别求其在  $6^{\circ}$  投影带和  $3^{\circ}$  投影带中的代号范围。
10. 我国某点  $A$  的高斯平面国家统一坐标为： $x_A = 2455012.45\text{m}$ ， $y_A = 22712542.50\text{m}$ 。试求该点  $A$  的自然坐标、所处  $6^{\circ}$  带带号、所在带的中央子午线经度。



## 第二章 水准测量

确定地面点的空间位置即需要确定其平面位置和高程。测定地球表面上点的高程的工作,称为高程测量。高程测量可采用水准测量、三角高程测量和气压高程测量等方法实施,水准测量是精度较高、使用最广的一种方法。

### 第一节 水准测量原理

水准测量原理是:利用水准仪所提供的水平视线测定地面两点之间的高差,然后利用已知点高程推算未知点的高程。

如图 2-1 所示,已知地面  $A$  点的高程为  $H_A$ ,欲测出  $B$  点的高程  $H_B$ ,可在  $A$ 、 $B$  两点之间安置一台能提供水平视线的仪器——水准仪,而在  $A$ 、 $B$  两点上分别竖立标尺——水准尺,由水准仪提供的水平视线读出  $A$  点尺上的读数  $a$  及  $B$  点尺上的读数  $b$ ,由图 2-1 可知  $A$ 、 $B$  两点的高差为

$$h_{AB} = a - b \quad (2-1)$$

测量前进的方向是从已知点  $A$  向未知点  $B$  方向前进的,与其高差  $h_{AB}$  的下标  $AB$  的方向是一致的,称为  $A$  点到  $B$  点的高差。因此, $A$  点为后视点, $a$  为后视读数; $B$  点为前视点, $b$  为前视读数。高差总是等于后视读数减去前视读数,因此,若  $a > b$ ,即后视读数大于前视读数,表明  $B$  点高于  $A$  点或上坡,此时  $h_{AB} > 0$ ;反之则  $B$  点低于  $A$  点或下坡,此时  $h_{AB} < 0$ 。所以应该注意:高差有正负之分。

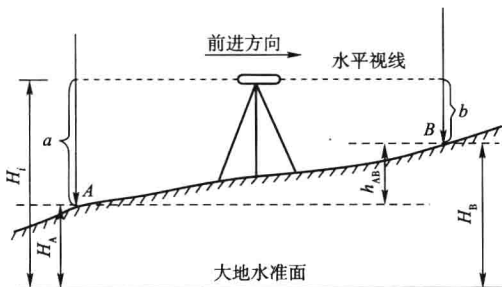


图 2-1 水准测量原理

高程计算的方法有以下两种:

(1) 高差法。直接由高差计算高程,即

$$H_B = H_A + h_{AB} \quad (2-2)$$

此方法一般在水准路线的高程测量中应用较多。

(2) 视线高法。由仪器的视线高程计算高程。由图 2-1 可知, $A$  点的高程加后视读数即得仪器的水平视线的高程,用  $H_i$  表示,即

$$H_i = H_A + a \quad (2-3)$$

由此得  $B$  点的高程为

$$H_B = H_i - b = H_A + a - b \quad (2-4)$$

在工程测量中当要求安置一次仪器求若干点高程时,此方法应用较广。