

高等学校规划教材

GAODENG XUOXIAO GUIHUA JIAOCAI

土木工程测量

金向农 汪善根 夏敬潮 曾秋 编
许国辉 主审



中国建筑工业出版社

高等学校规划教材

土木工程测量

金向农 汪善根 夏敬潮 曾秋 编
许国辉 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程测量/金向农等主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 1

高等学校规划教材

ISBN 978-7-112-23051-8

I. ①土… II. ①金… III. ①土木工程-工程测量-高等学校-教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 288968 号

本书较为全面、系统地介绍了测量学的基本理论、方法及相关的测绘仪器设备。全书共分 12 章, 第 1 章介绍了测量学的一些基本概念及测量坐标系统和高程系统的建立方法; 第 2、3、4 章主要介绍测量的三项基本工作 (水准测量、角度测量和距离测量) 内容, 包括测量方法及相关的常规测量仪器的构造和使用; 第 5 章介绍测量误差的基本知识; 第 6 章为小地区控制测量, 主要介绍导线测量方法, 三、四等水准测量和全站仪的构造及使用; 第 7 章为现代测绘技术简介, 简要介绍了 GNSS、摄影测量及遥感技术; 第 8、9 章介绍了大比例尺地形图测绘和应用的内容; 第 10、11 章分别介绍建筑施工测量和道路工程测量; 第 12 章介绍变形监测与竣工测量。附录为测量实验与实习。

本书可作为高等院校土木工程及相关专业“测量学”课程教材, 也可作为土木工程技术人员参考用书。

为便于教学, 作者特制作了与教材配套的课件, 如有需要, 可发邮件至 Cabpbeijing@126.com 索取 (注明书名和作者名)。

* * *

责任编辑: 王美玲 张莉葵

责任校对: 王 瑞

高等学校规划教材

土木工程测量

金向农 汪善根 夏敬潮 曾 秋 编
许国辉 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{3}{4}$ 字数: 430 千字

2019 年 1 月第一版 2019 年 1 月第一次印刷

定价: 48.00 元 (赠课件)

ISBN 978-7-112-23051-8

(33154)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

“测量学”课程是土木工程及相关专业一门重要的专业基础课程。当前，随着测绘科学技术的发展，新的测绘技术方法和测量新仪器设备不断涌现并应用于实践，使测绘领域发生了革命性的变化。如 GNSS 定位技术的应用、数字化测图、无人机倾斜摄影测量应用于大比例尺地形图测绘、三维激光扫描技术等，改变了传统的作业模式。2018 年 7 月 1 日起，国家全面启用 2000 国家大地坐标系，全站仪目前也已全面普及应用，成为测量的常规仪器。一些传统的测绘方法，如视距测量、经纬仪视距法测绘地形图等正逐步被淘汰。本教材是根据土木工程及相关专业测量学教学大纲的要求，并考虑当前测绘领域的现实状态，结合土木工程等非测绘类专业教学学时特点而编写的。可作为普通高等院校土木工程、给排水科学与工程、工程管理、交通工程、城乡规划、建筑学等专业的教学用书，也可作为相关专业技术人员的参考用书。

本教材在编写时参考了其他一些相关教材的成功经验，并结合了编者自己长期教学及专业实践的体会。在内容的选择上，保留传统经典的教学内容，摒弃或减少一些将要淘汰的测量仪器或方法等内容，并增加对测绘新技术、新设备的介绍。既考虑实用性，又兼顾先进性。

本教材由广州大学金向农、汪善根、夏敬潮、曾秋编，编写分工如下：汪善根编写了第 1、2、3、4、5 章和第 6 章第 1、2、3、4 节；夏敬潮编写了第 6 章第 5 节和第 7 章；金向农编写了第 8、9、10、11、12 章；曾秋编写了附录。

主审广州大学许国辉教授对全部书稿进行了认真、细致的审查，提出了宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

本教材受广州大学教材出版基金资助。

由于编者水平所限，教材中难免存在缺点和不足，恳请读者和同行专家批评指正。

编者

2018 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 测绘学与测量学	1
1.2 测量工作的基准面和基准线	3
1.3 地面点位的确定	5
1.4 水平面代替水准面的限度.....	12
1.5 测量工作概述.....	14
思考题与习题	17
第 2 章 水准测量	18
2.1 水准测量的原理.....	18
2.2 水准测量的仪器及工具.....	20
2.3 水准测量的实施.....	27
2.4 水准仪的检验与校正.....	34
2.5 水准测量误差分析及注意事项.....	37
2.6 其他水准仪简介.....	40
思考题与习题	45
第 3 章 角度测量	48
3.1 角度测量原理.....	48
3.2 经纬仪的构造.....	49
3.3 经纬仪的使用.....	52
3.4 水平角测量.....	54
3.5 竖直角测量.....	58
3.6 三角高程测量.....	63
3.7 经纬仪主要轴线及其检验与校正.....	66
3.8 角度测量的误差及注意事项.....	70
3.9 其他经纬仪简介.....	74
思考题与习题	80
第 4 章 距离测量与直线定向	83
4.1 钢尺量距.....	83
4.2 视距测量.....	87
4.3 电磁波测距.....	89
4.4 直线定向.....	93
4.5 坐标方位角的推算和坐标正、反算.....	96

思考题与习题	99
第 5 章 测量误差的基本知识	102
5.1 测量误差概述	102
5.2 衡量精度的标准	104
5.3 误差传播定律	107
5.4 算术平均值及其中误差	110
5.5 加权平均值及其中误差	112
思考题与习题	114
第 6 章 小地区控制测量	116
6.1 控制测量概述	116
6.2 导线测量	121
6.3 交会测量	133
6.4 三、四等水准测量	136
6.5 全站仪测量	139
思考题与习题	146
第 7 章 现代测绘技术简介	150
7.1 全球卫星定位导航技术	150
7.2 摄影测量	158
7.3 遥感科学与技术	163
思考题与习题	169
第 8 章 地形图测绘	171
8.1 地形图基本知识	171
8.2 大比例尺地形图的测绘	180
8.3 数字化测图基本知识	187
思考题与习题	190
第 9 章 地形图的应用	192
9.1 地形图的识读	192
9.2 地形图应用的基本内容	192
9.3 地形图上面积的量算	194
9.4 地形图在工程建设中的应用	196
思考题与习题	200
第 10 章 建筑施工测量	202
10.1 建筑施工测量概述	202
10.2 施工测设的基本工作	202
10.3 建筑场地施工控制测量	207
10.4 工业与民用建筑施工测量	210
思考题与习题	217
第 11 章 道路工程测量	219
11.1 概述	219

11.2	道路中线的组成	220
11.3	道路中线测量	221
11.4	圆曲线测设	224
11.5	缓和曲线测设	229
11.6	线路逐桩坐标的计算与全站仪极坐标法测设中线	233
11.7	线路纵、横断面测量	235
11.8	道路施工测量	241
	思考题与习题	243
第 12 章	变形监测与竣工测量	245
12.1	变形监测概述	245
12.2	变形监测方法	247
12.3	竣工测量及竣工总图的编绘	253
	思考题与习题	254
附录	测量实验与实习	255
	参考文献	276

第1章 绪论

1.1 测绘学与测量学

测绘学是测量学与制图学的统称。它研究的对象是地球整体及其表面和外层空间中的各种自然物体、人造物体的有关空间信息。它的研究任务是对这些与地理空间有关的信息进行采集、处理、管理、更新和利用。测量学是研究如何测定地面点的点位，将地球表面的各种地物、地貌及其他信息测绘成图，以及确定地球的形状和大小的一门学科。制图学是结合社会和自然信息的地理分布，研究绘制全球和局部地区各种比例尺的地形图和专题地图的理论和技术的学科。由此可见，测量学与制图学是测绘学的两个组成部分，其中测量学是它的重要组成部分。

1.1.1 测量学研究的范围和内容

传统的测量学研究的对象是地球及其表面，传统测量主要是采用光学仪器的全手工测量。随着科学技术的发展，现代测量学已扩展到地球的外层空间，观测和研究的对象已由静态发展到动态。同时，所获得的观测量，既有宏观量如航摄像片，也有微观量如单点坐标，使用的手段和设备，也已转向自动化、遥测、遥感和数字化。现代测量主要包括全站仪测量、GNSS测量（Global Navigation Satellite System，全球导航卫星系统）、遥感测量，与传统测量相比，现代测量大大缩短了测量时间，提高了测量精度。

测量学研究的内容分测定和测设两部分。测定（测图）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，将地球表面的地形缩绘成地形图，供经济建设、国防建设、规划设计及科学研究使用。测设（放样）是指用一定的测量方法，按要求的精度，把设计图纸上规划设计好的建（构）筑物的平面位置和高程标定在实地上，作为施工的依据。测定和测设互为逆过程，但所用的测量方法和仪器工具是一样的。

1.1.2 测绘学科的组成

测绘学科的组成并无统一规定，按照研究对象和范围的不同，测绘学科主要分为以下几个分支学科：

(1) 大地测量学

大地测量学是从地球整体考虑，并顾及地球曲率影响，精确地测定地面点的位置，建立国家大地控制网，测量地球重力场的分布与变化，其测量成果用以研究地球的形状和大小、地壳的升降、大陆的变迁、地震预报以及作为各种测量的依据。按照测量手段的不同，大地测量学又分为常规大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学等。

(2) 地形测量学

地形测量学是以地球表面小区域范围为研究对象，不考虑地球曲率影响，把测量基准面当做平面，将地面上的物体以及地球表面高低起伏的形态测绘成图，供国民经济建设及国防建设各方面需要之用，亦称为普通测量学。

(3) 摄影测量学

摄影测量学是通过对摄影像片经量测、解译等图像处理，测定物体的形状、大小和空间位置的科学。摄影测量根据像片获取的方式不同，可以分为“地面摄影测量”、“航空摄影测量”及“航天摄影测量”。地面摄影测量由于会受到地形条件的限制，主要用于某些工程建设方面的测量；航空摄影测量利用从飞机上摄得的地面像片成图，是目前测绘地形图的主要方法之一；航天摄影测量是从人造地球卫星或宇宙飞船上进行摄影，故可有效地研究地球及其他星体。

(4) 工程测量学

工程测量学是研究各项工程建设在勘测设计、施工建设和管理运营各阶段所进行的各种测量工作的科学。各项工程包括：工业建设、铁路、公路、桥梁、隧道、水利工程、地下工程、管线（输电线、输油管）工程、矿山和城市建设等。工程测量学主要任务有三个，一是将地面上的地形、地物测绘到图纸上；二是将图纸上设计的建筑物测设到实地，亦即在地面上标定出所测设点的位置；三是对建筑物在施工过程中和竣工后会产生变化而进行的变形观测。

(5) 地图制图学

地图制图学是研究地图的基础理论、设计、编绘、复制的技术、方法以及应用的科学。它的基本任务是利用各种测量成果编制各类地图，其内容一般包括地图投影、地图编制、地图整饰和地图印制等分支。现代地图制图学多利用空间遥感技术获取信息编制各种地图。

本书主要介绍土木建筑工程中测绘工作的内容，它属于工程测量学的范畴，也与其他测量学科有着密切的联系。

1.1.3 测绘学的发展及作用

测绘学是一门历史悠久的科学，早在几千年前，由于当时社会生产发展的需要，中国、古埃及、古希腊等国家的劳动人民就开始创造与运用测量工具进行测量。我国在古代就发明了指南针、浑天仪等测量仪器，为天文、航海及测绘地图作出了重要的贡献。随着人类社会需求和近代科学技术的发展，测绘技术已由常规的大地测量发展到空间卫星大地测量，由航空摄影测量发展到航天遥感技术的应用；测量对象由地球表面扩展到空间星球，由静态发展到动态；测量仪器已广泛趋向精密化、电子化和自动化。从20世纪50年代起，我国的测绘事业进一步得到了蓬勃发展，在天文大地测量、人造卫星大地测量、航空摄影与遥感、精密工程测量、近代平差计算、测量仪器研制以及测绘人才培养等方面，都取得了令人鼓舞的成就。我国的测绘科学技术已居世界先进行列。

测绘技术是了解自然、改造自然的重要手段，也是国民经济建设中一项基础性、前期性工作，应用广泛。它能为城镇规划、市政工程、土地与房地产开发、农业、防灾、科研等方面提供各种比例尺的现状地形图或专用图和测绘资料；同时，按照规划设计部门的要求，进行道路规划定线和坡地测量，以及市政工程、工业与民用建筑工程等土木建筑工程

的放样测量，直接为建设工程项目的设计与施工服务；在工程施工过程和运营管理阶段，对高层、大型建（构）筑物进行沉降、位移、倾斜等变形观测，以确保建（构）筑物的安全，并为建（构）筑物结构和地基基础的研究提供各种可靠的测量数据。所以，测绘工作将直接关系到工程的质量和预期效益的实现，是我国现代化建设不可缺少的一项重要工作。随着测绘科技的发展以及新技术的研究开发与应用，必将为各个行业及时提供更多更好的信息服务与准确、适用的测绘成果。

综合上述，测量工作贯穿于工程建设的全过程。参与工程建设的技术人员必须具备工程测量的基本技能，测量学是工程建设技术人员的一门必修基础课。

1.1.4 学习要求

本教材的主要目的是让土木工程及其他工程建设相关专业的人员学习和掌握下列内容：

(1) 地形图测绘。用测量学的理论、方法和仪器工具，将小范围内地面上的地物和地貌按一定比例尺测绘成地形图等，这项任务简称为测图。

(2) 地形图的应用。工程建设的规划设计，从地形图中获取所需要的资料，例如点的坐标和高程、两点间的水平距离、地块的面积、地面的坡度、地形的断面和进行地形分析等，这项任务简称为图的应用。

(3) 施工测设。把图上设计好的建筑物、设计物的位置标定在实地上，作为施工的依据，这项任务简称为测设或放样。

测量工作的实质是确定点的空间位置，即确定点的平面位置和高程，学习时一定要抓住这个基本点，去理解测量理论和方法，同时要重视测量实际操作，使理论和实践紧密结合起来。

1.2 测量工作的基准面和基准线

1.2.1 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，但地球表面形状十分复杂。通过长期的测绘工作和科学调查，人们了解到地球表面上海洋面积约占 71%，陆地面积约占 29%，世界第一高峰珠穆朗玛峰高出海平面 8844m，而位于太平洋西部的马里亚纳海沟低于海平面 11022m。尽管有如此大的高低起伏，但相对于地球平均半径 6371km 来说仍可忽略不计。因此，地球总的形体可视为由海洋面包围着的球体。

1.2.2 铅垂线、水平线、水平面和水准面

由于地球的自转运动，地球上任意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（图 1-1）。铅垂线是测量工作的基准线。处处与重力方向垂直的连续曲面称为水准面。同一水准面上各点的重力加速度值（ g ）相等，故又将水准面称为重力等位面。任何自由静止的水面都是水准面。与水准面相切的平面称为水平面。水准面、水平面是测量工作的基准面。铅垂线是地面任意点向水准面或水

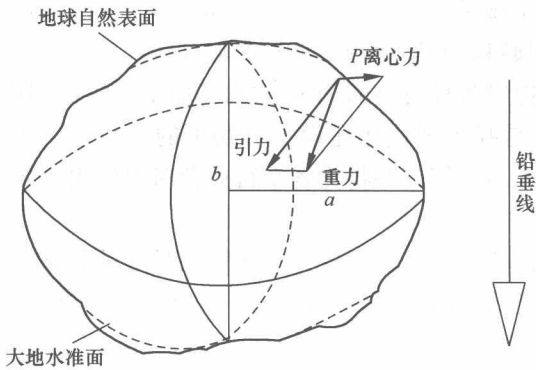


图 1-1 地球铅垂线

平面投影的基准线。小范围的水准面可近似用其中心的切平面即水平面来代替。水平面内任意一条直线，称为水平线。水平线和与其相交的铅垂线相互垂直。

1.2.3 大地水准面和参考椭球面

水准面因其高度不同而有无数个，其中与平均海洋面相重合并延伸向大陆且包围整个地球的闭合曲面称为大地水准面。由大地水准面包围的地球形体，称为大地体。在宇宙空间中客观存在的实际地球形体，称为自然球体。

从宏观上看，大地体最接近自然球体，大地水准面最接近自然地球表面。因此，将大地水准面作为最基本的测量基准面。

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，致使大地水准面是一个复杂的曲面（图 1-2），无法在这个曲面上进行测量数据处理。为了使用方便，通常用一个非常接近大地水准面的规则的几何表面，即地球椭球体的表面来代替大地水准面作为测量计算工作的基准面，如图 1-3 所示。

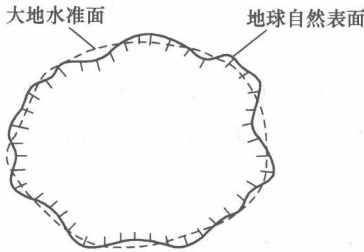


图 1-2 地球自然表面与大地水准面

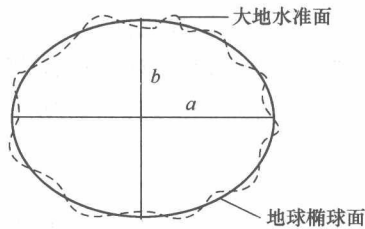


图 1-3 大地水准面与地球椭球面

如图 1-4 所示，地球椭球体是由椭圆 NWSE 绕其短轴 NS 旋转而成的，又称为旋转椭球体，其表面称为地球椭球面或旋转椭球面。

某一国家或地区为了更好地处理测量成果，通常采用既与大地体的形状和大小接近，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，其表面称为参考椭球面。确定参考椭球体与大地体之间的相对位置关系，称为椭球定位。在椭球定位时，为了使椭球面与大地水准面在一定地区范围内尽可能密合，通常使椭球面与大地水准面在该地区的中心处内切，其切点称为大地原点。经过椭球面上的一点且垂直于该点切平面的直线，称为椭球面的法线。法线是地面任意点向椭球面投影的基准线。

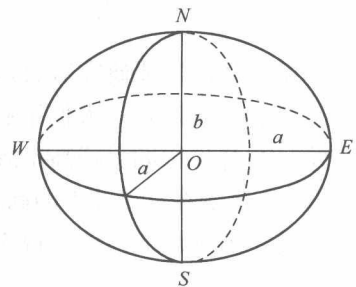


图 1-4 地球椭球体

决定地球椭球体形状和大小的参数为椭圆的长半轴 a 、短半轴 b 、扁率 $\alpha (\alpha = \frac{a-b}{a})$ 。

我国目前采用的地球椭球体的参数值为：

$$a = 6378137\text{m}, \alpha = 1/298.257$$

由于地球椭球体的扁率 α 很小，当测量的区域不大时，可将地球椭球体看作半径为 $\frac{1}{3}(2a + b)$ 即 6371km 的圆球。

综合上述，大地水准面作为测量工作的基准面，由于其不规则性，实用上采取如下近似处理方式：在小范围内（如小于 25km^2 ）进行测量工作时，可用其中心处的切平面即水平面代替；超过一定范围，可用参考椭球面代替，并进一步将椭球面采用地图投影的方式近似转换为平面（即高斯投影平面，参见 1.3.3）。目的是使测量基准面由曲面变为简单的平面，一方面简化了测量数据处理，另一方面也实现了将地球曲面上的地物、地貌尽可能相似地表示在平面图纸上。

1.3 地面点位的确定

测量工作的根本任务是确定地面点的位置。地面点的空间位置采用向测量基准面投影的方式确定，从而获得三个基本分量：其中两个量是地面点沿投影线在投影面上的二维坐标，第三个量是地面点沿投影线到投影面的距离（称为高程）。投影线为铅垂线或法线，投影面为大地水准面或其近似面（水平面、参考椭球面、高斯投影平面）。地面点在投影线、投影面基础上，其空间位置可以用一个统一的三维坐标系来表示，也可用一个二维坐标系与一个一维高程系的组合来表示，实际测量工作中采用后者，通常所谓的坐标是指二维坐标。不同的坐标系所依据的投影线和投影面不同，如表 1-1 所示。

确定地面点位的坐标系

表 1-1

投影线、面 坐标系	投影线	投影面	坐标分量
天文坐标系	铅垂线	大地水准面	天文经度 λ 、天文纬度 φ 、绝对高程 H
大地坐标系	法线	参考椭球面	大地经度 L 、大地纬度 B 、大地高程 H'
独立平面直角坐标系	铅垂线	水平面	独立纵坐标 x 、独立横坐标 y
高斯平面直角坐标系	高斯投影	高斯投影平面	高斯纵坐标 X 、高斯横坐标 Y

在表 1-1 中，各投影面的关系是：大地水准面是最基本的测量基准面，它是自然地球表面的近似面；水平面、参考椭球面、高斯投影平面都是大地水准面的近似面。水平面是大地水准面的平面化、离散化；参考椭球面是大地水准面的规则化；高斯投影平面是参考椭球面的平面化、离散化。不同的投影面及相应的坐标系适用于不同范围大小的测区。

实际测量工作中，采用表 1-1 中绝对高程 H 、独立平面坐标 (x, y) 或高斯平面坐标 (X, Y) 表示地面点的空间位置。究其原因，一方面，由于水准面较椭球面容易直接确定，故采用水准面高程即绝对高程或假定高程；另一方面，由于平面坐标较曲面坐标更便于计算和应用，故采用平面直角坐标形式。

下面分别介绍上述坐标系表示地面点位置的方法。

1.3.1 天文坐标系

天文坐标系的基准是铅垂线和大地水准面，它用天文经度 λ 、天文纬度 φ 和绝对高程 H 来表示地面点的位置。经纬度通常称为地理坐标。天文坐标系可看成由一个二维的天文地理坐标系与一个一维的绝对高程系组合而成。

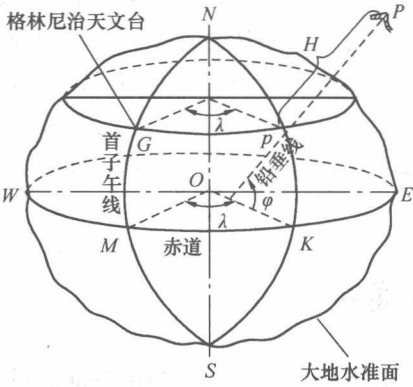


图 1-5 地面点的天文坐标

如图 1-5 所示， N 、 S 分别是地球的北极和南极， NS 称为地轴。过地面上任一点 P 的铅垂线与地球旋转轴 NS 所组成的平面称为该点的天文子午面。天文子午面与大地水准面的交线称为天文子午线，也称经线。通过原格林尼治天文台的子午面称为首子午面。过地面上任意一点 P 的天文子午面与首子午面的夹角 λ 称为 P 点的经度。由首子午面向东量称为东经，向西量称为西经，其取值范围均为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。通过地心且垂直于地轴的平面称为赤道平面。过 P 点的铅垂线与赤道平面的夹角 φ 称为 P 点的纬度。由赤道平面向北量称为北纬，向南量称为南纬，其取值范围均为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。我国位于东半球和北半球，所以各地的地理坐标都是东经和北纬。自任一点 P 沿铅垂线到大地水准面的距离 H ，称为 P 点绝对高程。

1.3.2 大地坐标系

大地坐标系的基准是法线和参考椭球面，用大地经度 L 、大地纬度 B 和大地高程 H' 来表示地面点的位置。大地经纬度又称为大地地理坐标。大地坐标系是一个统一的三维坐标系，它有大地地理坐标和大地空间直角坐标两种形式。

如图 1-6 所示，包含地面上任一点 P 的法线且通过椭球旋转轴 NS 的平面称为 P 的大地子午面。地面点 P 的大地经度 L 是 P 的大地子午面和首子午面的夹角，其值分为东经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和西经 $0^\circ \sim 180^\circ$ ； P 点的大地纬度 B 是过 P 点的法线与赤道面的夹角，其值分为北纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。自 P 点沿法线到椭球面的距离 H' ，称为 P 点大地高程。

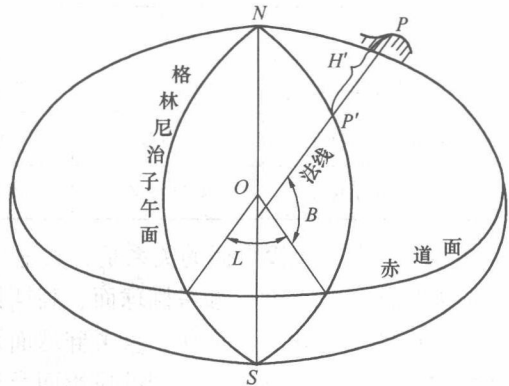


图 1-6 地面点的大地坐标

依据参考椭球，还可以建立一个空间直角坐标系，如图 1-7 所示。地面任一点 P 的坐标表示为 (X, Y, Z) ，坐标原点在参考椭球中心， Z 轴与椭球旋转轴相重合，指向椭球北极点 N ， X 轴指向椭球旋转轴与原格林尼治天文台所决定的子午面与赤道面的交点 G ，而 Y 轴与 XOZ 平面垂直，且与 X 轴、 Z 轴构成右手坐标系。任一点 P 的大地空间直角坐标 (X, Y, Z) 与大地地理坐标 (L, B, H') 可

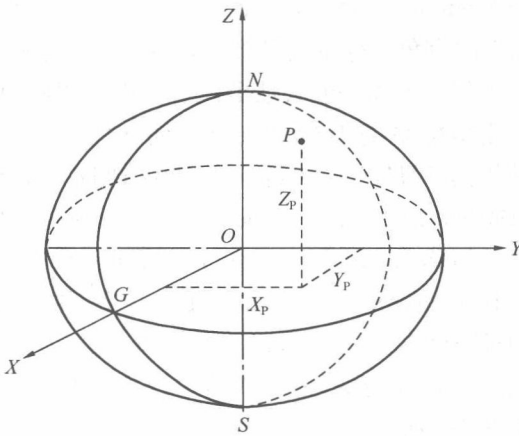


图 1-7 地面点的空间直角坐标

以通过一定的数学公式相互换算。

在参考椭球定位时，若使椭球中心与地球质心（地球的质量中心）重合，则相应建立的大地坐标系或空间直角坐标系属于地心坐标系；若椭球中心与地球质心不重合，则相应建立的坐标系属于参心坐标系。由于地心的唯一性，地心坐标系适合作为全球统一的坐标系，如全球卫星定位系统的坐标系。

大地坐标系常用于大地问题解算、地球形状和大小的研究、编制大面积地图、火箭与卫星发射、战略防御和指挥等方面，对一个国家或地区的经济建设和国防

建设意义重大。我国先后采用的大地坐标系统有如下三种。

(1) 1954 年北京坐标系

20 世纪 50 年代，我国通过联测苏联的平面坐标系统，建立了 1954 年北京坐标系。1954 年北京坐标系属于参心坐标系，它采用的是克拉索夫斯基椭球元素值，大地原点在苏联普尔科沃天文台。由于大地原点离我国甚远，在我国范围内该参考椭球面与大地水准面存在着明显的差距，最大处达 69m 之多，因此对我国绝大多数地区而言，它不是最佳的参心坐标系。

(2) 1980 年西安坐标系

自 1980 年起，我国采用 1975 年国际大地测量协会推荐的参考椭球参数，将大地原点定在陕西省泾阳县永乐镇，建立了新的大地坐标系统——1980 年西安坐标系。1980 年西安坐标系属于参心坐标系，在椭球定位时，实现了在我国范围内，椭球面与大地水准面之差的平方和为最小，达到最佳吻合，因此它是当时真正适合我国的参心坐标系。

(3) 2000 国家大地坐标系

为了适应社会发展的新要求，我国自 2008 年 7 月 1 日起，全面启用 2000 国家大地坐标系。该坐标系是我国当前最新的国家大地坐标系，将日益广泛应用于我国经济建设、国防建设和科学研究，同时作为我国北斗卫星导航系统的全球统一坐标系。

2000 国家大地坐标系是全球地心坐标系在我国的具体体现，其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心，定义参照 WGS-84 坐标系，有地理坐标系和空间直角坐标系两种形式。2000 国家大地坐标系采用的地球椭球体参数如下：

长半轴	$a=6378137\text{m}$
扁率	$\alpha=1/298.257$
地心引力常数	$GM=3.986 \times 10^{14} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$
自转角速度	$\omega=7.292 \times 10^{-5} \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

此外，在实际卫星定位测量工作中，常用到 WGS-84 坐标系。WGS-84 坐标系是美国为 GPS (Global Positioning System, 全球定位系统) 使用而建立的坐标系统，它是全球包括我国在内 GPS 定位的基准。

WGS-84 坐标系的全称是 World Geodetic System-84 (世界大地坐标系-84), 它是一个全球统一的地心坐标系, 有地理坐标系和空间直角坐标系两种形式, 其表示坐标的方法类似于上述一般大地坐标系。

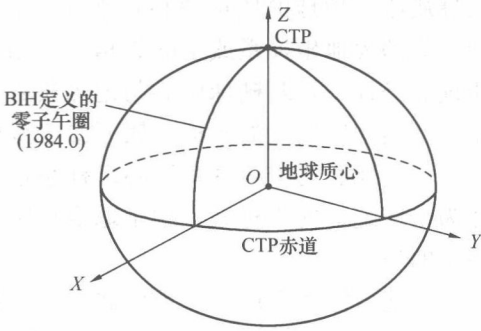


图 1-8 WGS-84 空间直角坐标系

WGS-84 空间直角坐标系的坐标原点位于地球的质心, Z 轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极方向 (Bureau International de l'Heure 即国际时间局, 简称 BIH; Conventional Terrestrial Pole 即协议地球极, 简称 CTP), X 轴指向 BIH1984.0 定义的起始子午面和 CTP 赤道的交点, Y 轴与 X 轴、Z 轴构成右手坐标系, 如图 1-8 所示。

如 1980 年西安坐标系的参心坐标可以与 2000 国家大地坐标系的地心坐标相互转换, 方法是: 在测区内, 利用至少 3 个以上公共点的两套坐标列出坐标变换方程, 采用最小二乘原理解算出 7 个转换参数 (3 个平移参数、3 个旋转参数和 1 个尺度参数), 进而推算其他点的转换坐标。实际工作中, 坐标转换可由相应的应用软件快速完成。

上述四种坐标系的坐标可以相互换算。

1.3.3 高斯平面直角坐标系

如前所述, 地面点沿线法投影至参考椭球面上的位置, 用大地经纬度表示。经纬度是球面坐标, 若直接用于工程建设规划、设计、施工, 会带来很多计算和测量的不便。测量计算最好在平面上进行, 但椭球面是一个不可展的曲面, 需将球面坐标按一定的数学法则归算到平面上, 即测量中所称的地图投影。我国采用的是高斯-克吕格正形投影, 简称高斯投影。

在高斯投影中, 椭球面上图形投影至平面后, 其角度在投影前后保持不变, 但任意两点间的长度却被拉长, 即投影在平面上的长度大于椭球面上长度, 且被投影的区域越大, 长度变形越大。长度变形直接导致位置误差。由于曲面与平面的几何本质不同, 完全避免变形是不可能的, 但可采用适当的方法限制变形。

为了限制长度变形, 需将被投影的区域限制在一定范围内, 使长度变形引起的投影前后位置误差相对工程实际需要可以忽略不计。为此对椭球面不是采用整体投影, 而是采用分带投影的方法, 使椭球面上的图形投影到平面上尽可能与原图形保持相似。

如图 1-9 (a) 所示, 设想将一个横椭圆柱套在参考椭球外面, 并与椭球面上某一子午

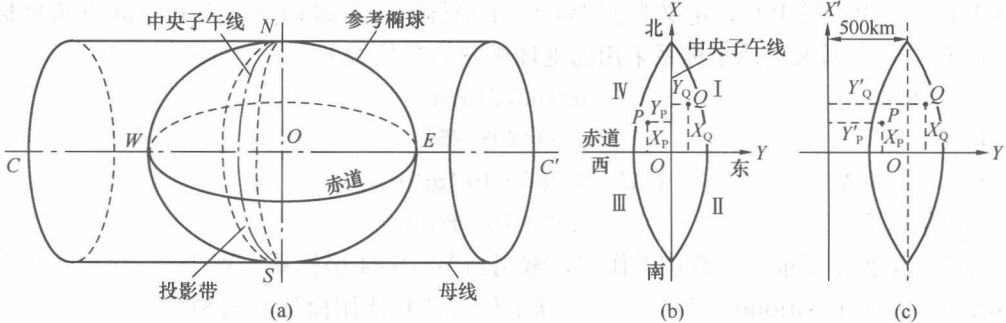


图 1-9 高斯平面坐标系投影图

线相切，称该子午线为中央子午线；使横圆柱的轴心 CC' 通过椭球的中心 O 并与椭球旋转轴 NS 垂直，然后将中央子午线东西对称在一定经差范围内的点、线投影到横椭圆柱面上；再分别沿着该横椭圆柱面过南、北极 S 、 N 的母线将圆柱面剪开，并展开为平面，这个平面称为高斯投影平面；在高斯投影平面上，中央子午线和赤道的投影是两条相互垂直的直线，见图 1-9 (b)，其他子午线和纬线的投影均为曲线。取中央子午线为坐标纵轴，即 X 轴，取赤道为坐标横轴，即 Y 轴，两轴的交点为坐标原点 O ，建立高斯平面直角坐标系；规定 X 轴向北为正， Y 轴向东为正，坐标象限按顺时针编号。

如上所述，为了限制变形，将椭球按经线划分成若干带进行分带高斯投影。带宽用投影带两边缘子午线的经度差表示，常用带宽为 6° 、 3° 和 1.5° ，分别简称 6° 带、 3° 带和 1.5° 带投影。国际上对 6° 和 3° 带投影的中央子午线经度有统一规定，满足这一规定的投影称为统一 6° 带投影和统一 3° 带投影。

(1) 统一 6° 带投影

按 6° 的经度差将椭球分成 60 个带，从首子午线开始自西向东编号，东经 $0^\circ \sim 6^\circ$ 为第 1 带， $6^\circ \sim 12^\circ$ 为第 2 带，依此类推，如图 1-10 所示。

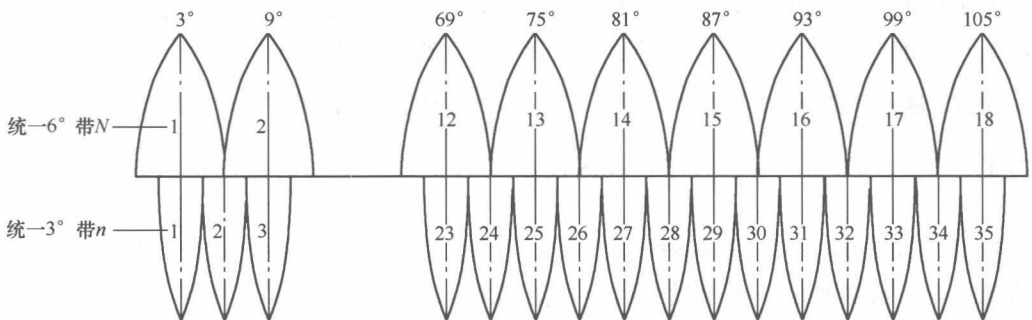


图 1-10 统一 6° 带投影与统一 3° 带投影高斯平面坐标系的关系

位于每一带中央的子午线称为中央子午线，第 1 带中央子午线的经度为 3° ，各带中央子午线的经度 L_0 与带号 N 的关系为：

$$L_0 = 6N - 3 \tag{1-1}$$

反之，已知地面任一点的经度 L ，要计算该点所在的统一 6° 带编号的公式为：

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

式中， L 以度为单位， Int 为取整函数。

我国位于北半球， X 坐标值恒为正，横坐标值 Y 则有正有负：中央子午线以东为正，以西为负。如图 1-9(b) 中的 P 点位于中央子午线以西，其 Y 坐标为负值 $Y_P = -271976\text{m}$ ， Q 点位于中央子午线以东， $Y_Q = +137168\text{m}$ 。对于 6° 带投影， Y 坐标的最大负值量约为 -334km 。这种以中央子午线为纵轴的坐标值，称为自然坐标值。为了避免 Y 坐标出现负值，我国统一规定将每带的坐标纵轴向西平移 500km ，使之恒为正值。如图 1-9(c) 所示，纵轴西移后， $Y'_P = 500000 - 271976 = 228024\text{m}$ ， $Y'_Q = 500000 + 137168 = 637168\text{m}$ 。

为了确定某点所在的带号，规定在横坐标之前均冠以带号。为方便起见，将经过加 500km 和冠以带号处理后的横坐标仍用 Y 表示，设 Q 、 P 点均位于 18 带，则 $Y_Q =$

18637168m, $Y_p=18228024m$ 。这种由带号、500km 和自然坐标值三部分组成的横坐标值 Y 称为统一值或通用值,它是国家控制点坐标成果的标准形式,其中纵坐标仍为自然值。我国任意点的 6° 带横坐标的通用值有一个特点:去带号后的数字总是六位数(以米为单位)。根据这一特点,可将任意点的横坐标通用值化为自然值。

(2) 统一 3° 带投影

在高斯投影中,离中央子午线越远,长度变形越大,当要求投影变形更小时,可采用 3° 带投影。

如图 1-10 所示, 3° 带是从东经 $1^\circ 30'$ 开始,按经度差 3° 划分一个带,全球共分为 120 带。

每带中央子午线经度 L'_0 与带号 n 的关系为:

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

反之,已知地面任一点的经度 L ,要计算该点所在的统一 3° 带编号的公式为:

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

为避免 Y 坐标出现负值,类似于 6° 带做法,将 3° 带的坐标纵轴向西移动 500km,但加在 Y 坐标前的带号应是 3° 带的带号。例如, C 点所在的中央子午线经度为 108° , $Y'_c=607639m$ 。该点所在 3° 带的带号为 $n = \frac{108^\circ}{3} = 36$,则该点加上带号及 500km 后的 Y 坐标值为 $Y_c=36607639m$ 。不难看出,我国任意点的 3° 带横坐标的通用值去带号后也是六位数。

我国大陆所处的经度范围是东经 $73^\circ 27' \sim$ 东经 $135^\circ 09'$,根据式 (1-2) 和式 (1-4) 求得统一 6° 带投影和统一 3° 带投影的带号范围为 $13 \sim 23$, $24 \sim 45$ 。可见,在我国领土范围内,统一 6° 带和统一 3° 带投影带号不重叠。

(3) 1.5° 带投影

1.5° 带投影变形进一步减小。 1.5° 带投影的中央子午线经度与带号的关系,国际上没有统一规定,通常是使 1.5° 带投影的中央子午线与统一 3° 带投影的中央子午线或边缘子午线重合。

(4) 任意带投影

任意带投影常用于建立城市独立坐标系。例如,可以选择过城市中心某点的子午线为中央子午线进行投影,这样可以使整个城市范围内的距离投影变形都较小。

1.3.4 独立平面直角坐标系

按《城市测量规范》CJJ/T 8—2011 规定,当测区面积小于 $25km^2$ 的城镇,可以将相应的大地水准面当做水平面看待,这样地面点在大地水准面上的投影位置就可以用平面直角坐标来确定。由于该类坐标系未与国家统一坐标系相联系,故称为任意坐标系或独立坐标系。

如图 1-11 所示,将测区中心点 C 沿铅垂线投影到大地水准面上的 c 点,用过 c 点的切平面即水平面来代替水准面,在水平面上建立的测区平面直角坐标系 xoy 即为独立平面直角坐标系,其坐标原点选在测区西南角某点上,使测区内坐标值均为正值。将测区内任一点 P 沿铅垂线投影到切平面上得 p 点,通过测量,计算出的 P 点坐标 (x_p, y_p) 就