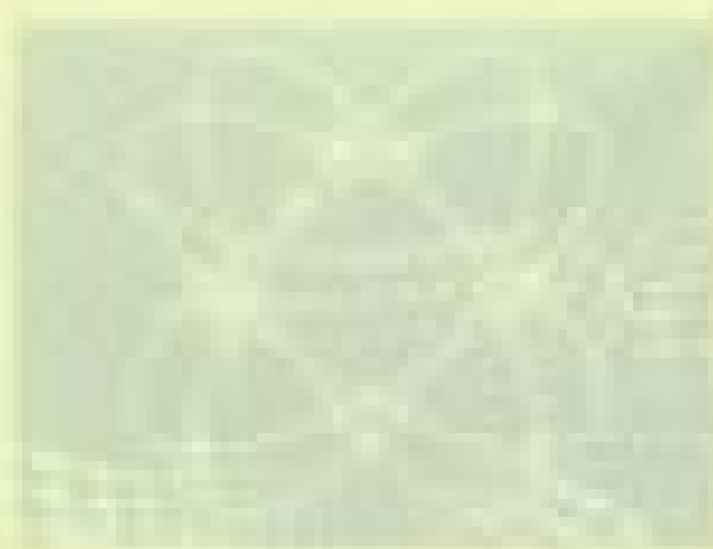


工程測量

主 編 曹 斌 趙 毅 斌
副 編 王 德 勝 曹 毅 成
參 編 王 德 勝 趙 毅 斌 李 武
審 稿 王 德 勝
主 審 曹 斌



北京理工大学出版社

前言

QIANYAN



工程测量是交通土建工程相关专业的核心专业基础课。在工程建设的勘测设计、施工、竣工、运营养护和管理等各阶段都离不开测量的严格把关和技术保障。随着科技的发展，新型测量仪器设备及新的测量方法在工程建设中不断推广运用，原有的一些传统设备逐渐退出使用。因此，需对工程测量的基本知识重新进行合理架构，以满足现在工程测量生产的实际运用需求。

本书是编者根据高等院校交通土建类相关专业对工程测量课程的要求，本着以能力培养为主线，以理论知识“必需、够用”为度，注重公式、定理、定论的实践应用，综合考虑各行业对工程测量技术人才培养要求的特殊性，引入企业测量一线技术人员的实践经验，总结团队多年教学经验的基础上编写而成。

本书具有以下特点：

1. 本书内容突出高等教育教学的特色，以培养精测量、懂施工、会管理的一线技术应用型人才为目标。
2. 考虑到高等院校学生的特点，本书在每章都注明学习目标和技能目标，各部分内容紧扣培养目标，做到理论与实践相结合，有利于学生实践能力的培养。
3. 将Excel编辑公式和计算器编程纳入工程测量基本计算方法，从而拓宽内业计算的思路和方法。
4. 利用现代二维码技术，将教学团队老师的慕课视频资源插入教材，对应各知识点内容详细讲解，方便学生在课前预习、课后复习期间随时随地自如地学习，便于巩固和加深理解。
5. 为加强知识的掌握和运用，每个模块都配有多种形式的习题。

本书由吉林交通职业技术学院魏斌、赵金云担任主编并统稿，由吉林交通职业技术学院王乐、齐琳、孟凡成担任副主编，参与编写人员有吉林交通职业技术学院王坤、宋永娟，吉林省大秦建筑安装有限公司宁武，吉林省同盈工程设计有限公司夏洪亮，长春恒远至清建设工程有限责任公司王朋。具体编写分工如下：模块1由宋永娟编写；模块2由王乐编写；模块3的3.1、3.2、3.5、3.6、3.7、3.8，模块4的4.2由魏斌编写；模块3的3.3、3.4，

模块4的4.1、4.3由齐琳编写；模块5，模块6的6.1、6.2、6.7由赵金云编写；模块6的6.3、6.4、6.5、6.6由王坤编写；模块7由孟凡成编写；宁武、夏洪亮、王朋参与本书案例和习题编写工作。

全书由吉林交通职业技术学院吉林省“长白山”技能名师陈立春教授主审。陈立春教授在教材大纲的拟订阶段及审阅本书的过程中都提出了许多宝贵的修改建议，并提供了许多实用的工程案例，在此深表谢意！

本书虽然经过全面审查和反复修改，但其中仍难免存在不足之处，诚挚希望广大读者在使用过程中给予批评指正，以便进一步补充、修改和完善。

编 者



CONTENTS

目录

模块 1 工程测量基础知识 1	2.3.1 自动安平水准仪的构造 19
1.1 工程测量研究的内容及分类..... 1	2.3.2 水准尺和尺垫 21
1.1.1 测量学及其任务 1	2.3.3 自动安平水准仪的使用 21
1.1.2 测量学的分类 1	2.4 数字水准仪的构造及其使用 23
1.1.3 工程测量的研究对象和内容 2	2.4.1 数字水准仪的构造 23
1.1.4 工程测量学的发展现状及展望 3	2.4.2 数字(条码)水准尺 24
1.2 地面点位的确定 5	2.4.3 数字水准仪的使用 24
1.2.1 测量的基准面 5	2.5 自动安平水准仪的检验与校正 26
1.2.2 地面点位的坐标系统 6	2.5.1 圆水准器的检验与校正 26
1.2.3 地面点的高程系统 11	2.5.2 十字丝的检验与校正 27
1.2.4 用水平面代替基准面的限度 11	2.5.3 视线水平度(视准轴)的 检验与校正 28
1.3 测量工作的程序与原则 13	2.5.4 补偿器的检验与校正 29
思考题与习题 15	2.6 水准测量误差分析 30
模块 2 高程控制测量 16	2.7 等外水准测量的实施 31
2.1 高程控制测量概述 16	2.7.1 水准测量施测方法 31
2.2 水准测量原理 17	2.7.2 水准测量计算检核 33
2.3 自动安平水准仪的构造及其使用 18	2.8 高程控制测量的实施 35

2.8.1 三、四等水准测量的实施	36	3.5.1 导线测量外业工作	75
2.8.2 二等水准测量的实施	38	3.5.2 导线测量内业工作	77
2.9 水准测量成果整理	39	3.5.3 全站仪导线三维坐标测量	86
2.9.1 成果整理	40	3.5.4 Excel 软件进行导线坐标计算	87
2.9.2 Excel 软件计算水准路线		3.6 小三角测量	89
近似平差	41	3.6.1 小三角测量的外业工作	90
思考题与习题	42	3.6.2 小三角测量的内业工作	91
		3.6.3 Excel 软件进行三角网坐标计算	98
模块 3 平面控制测量	45	3.7 GPS 控制测量	99
3.1 平面控制测量概述	45	3.7.1 GPS 控制测量外业工作	101
3.2 平面控制网的定位和定向	48	3.7.2 GPS 控制测量内业工作	103
3.2.1 直线定向	48	3.8 交会定点	110
3.2.2 方位角	49	3.8.1 测角交会	110
3.2.3 象限角	51	3.8.2 测边交会	112
3.2.4 坐标正算与反算	52	3.8.3 Excel 软件进行交会	
3.3 全站仪与角度测量	53	定点计算	113
3.3.1 角度的概念及测量原理	53	思考题与习题	114
3.3.2 全站仪的构造和使用	53		
3.3.3 全站仪的检验与校正	60	模块 4 地形图测绘与应用	116
3.3.4 水平角观测	63	4.1 地形图的基础知识	116
3.3.5 角度测量的误差分析	66	4.1.1 地形图的比例尺	116
3.4 距离测量	68	4.1.2 地形图的分幅与编号	118
3.4.1 卷尺量距	68	4.1.3 地形图图外注记	123
3.4.2 视距测量	71	4.1.4 地物符号	126
3.4.3 电磁波测距	72	4.1.5 地貌符号	128
3.4.4 光电测距误差分析	73	4.2 数字地形图测绘	132
3.5 导线测量	74	4.2.1 数字化测图的准备工作	133

4.2.2 数字化测图的外业工作	134	模块 6 道路工程测量	164
4.2.3 数字化测图的内业工作	137	6.1 道路工程测量概述	164
4.3 地形图的应用	142	6.1.1 路线勘测设计测量	165
4.3.1 地形图的基本应用	142	6.1.2 道路施工测量	165
4.3.2 地形图在工程中的应用	144	6.2 道路两阶段勘测设计测量	166
思考题与习题	147	6.2.1 道路初测	166
模块 5 施工测量的基本工作	148	6.2.2 道路定测	167
5.1 施工测量概述	148	6.2.3 中线测量	172
5.1.1 施工测量的特点	148	6.3 圆曲线的测设	175
5.1.2 施工测量的要求	149	6.3.1 圆曲线主点的测设	176
5.1.3 施工测量的方法	149	6.3.2 圆曲线的详细测设	177
5.1.4 施工测量的流程	150	6.4 缓和曲线的测设	181
5.1.5 施工控制测量	151	6.4.1 缓和曲线公式	182
5.2 施工放样基本方法	152	6.4.2 带有缓和曲线的平曲线 主点测设	183
5.2.1 已知距离的放样	152	6.4.3 带有缓和曲线的平曲线的 详细测设	185
5.2.2 已知角度的放样	153	6.5 特殊线形测设	190
5.2.3 已知高程的放样	154	6.5.1 虚交	190
5.3 点的平面位置的测设	158	6.5.2 复曲线的测设	193
5.3.1 直角坐标法	158	6.5.3 椭圆曲线的测设	198
5.3.2 极坐标法	159	6.5.4 回头曲线的测设	201
5.3.3 自由设站法	159	6.6 路线的纵、横断面测量	203
5.3.4 方向线交会法	159	6.6.1 纵断面测量	203
5.3.5 距离交会法	160	6.6.2 横断面测量	208
5.3.6 前方交会法	160	6.7 道路工程施工测量	210
5.3.7 轴线交会法	162	6.7.1 道路施工测量的准备工作	210
思考题与习题	163		

6.7.2 控制点的复测与加密·····	211	7.2.1 桥梁墩、台中心坐标计算·····	229
6.7.3 路基施工测量·····	214	7.2.2 桥梁墩、台中心定位·····	232
6.7.4 路面施工测量·····	219	7.2.3 桥梁墩、台纵横轴线测设·····	234
6.7.5 涵洞施工测量·····	221	7.3 桥梁基础的施工放样·····	235
思考题与习题·····	222	7.3.1 明挖基础的施工放样·····	235
模块 7 桥梁工程施工测量 ·····	224	7.3.2 桩基础的施工放样·····	236
7.1 桥梁施工控制测量·····	225	7.3.3 管柱定位及倾斜测量·····	237
7.1.1 桥梁施工平面控制网·····	225	思考题与习题·····	239
7.1.2 桥梁施工高程控制网·····	227	参考文献 ·····	240
7.2 桥梁墩、台定位和轴线测设·····	229		

模块 1 工程测量基础知识

• 学习目标 •

- (1)了解测量学任务及其分类、工程测量学研究的内容；
- (2)掌握测量基准面分类及含义；
- (3)掌握地面点位的坐标系统分类及含义；
- (4)掌握地面点位高程系统的表示方式。

1.1 工程测量研究的内容及分类

1.1.1 测量学及其任务

测量学是一门研究如何确定地球表面上点的位置，如何将地球表面的地貌、地物、行政和权属界线测绘成图，如何确定地球的形状和大小，以及将规划设计的点和线在实地上定位的学科。其任务包括测绘和测设两部分。

(1)测绘是指用测量仪器和工具，通过实地测量和计算得到一系列测量信息，通过将地球表面的地形绘制成地形图或编制成数据资料，供经济建设、规划设计、科学研究和国防建设使用。

(2)测设是指将图纸上规划设计好的建筑物、构筑物的位置在地面上用特定的方式标定出来，作为施工的依据。测设又称为施工放样。

1.1.2 测量学的分类

根据不同的任务和对象，现代测量学已划分为以下几门专业性的学科。

1. 大地测量学

大地测量学是研究和确定地球形状、大小、重力场、整体与局部运动和地面点的几何位置，以及它们变化的理论和技术的学科。其基本任务是建立国家大地控制网，测定地球的形状、大小和重力场，为地形测图和各种工程测量提供基础起算数据；为空间科学、军

事科学及研究地壳变形、地震预报等提供重要资料。按照测量手段的不同，大地测量学又可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. 摄影测量与遥感学

摄影测量与遥感学是研究利用电磁波传感器获取目标物的影像数据，从中提取语义和非语义的信息，并利用图形、图像和数字形式表达目标物空间分布及相互关系的学科。现代航天技术和计算机技术的发展，在摄影测量中引入遥感技术，而且与卫星定位技术和地理信息技术相集成，成为地球空间信息的科学与技术。其基本任务是通过摄影相片或遥感图像进行处理、量测、解译，以测定物体的形状、大小和位置进而制作成图。根据获得影像的方式及遥感距离的不同，本学科又可分为地面摄影测量、航空摄影测量、水下摄影测量和航天遥感测量等。

3. 工程测量学

工程测量学是指在工程建设的规划设计、施工兴建和运营管理阶段所进行的各种测量工作的理论、方法和技术研究的学科。其主要包括工程控制网的建立、地形测绘、施工放样、设备安装、竣工测量、变形观测和维修养护等。

4. 海洋测量学

海洋测量学是以海水体和海底为测绘对象，研究测量及海图编制的理论和方法的学科。与陆地测绘相比，海洋测绘具有独有的特点，主要包括测量内容综合性强，要同时完成多种观测项目，需要多种仪器配合施测；测区条件复杂，大多为动态作业；肉眼不能通视水域底部，精确测量难度较大等。因此，海洋测绘的基本理论、技术方法和测量仪器设备有许多不同于陆地测量之处。

5. 地图制图学

地图制图学是一门研究地图制图的基础理论、设计、编绘、复制的技术方法的学科。其主要包括以下几个方面：

(1) 地图投影——依据数学原理将地球椭球面上的经、纬度线网投影在平面上的理论和方法。

(2) 地图编制——研究制作地图的理论和技术。

(3) 地图整饰——研究地图的表现形式，包括地图符号和色彩设计、地貌立体表示、出版原图绘制及地图集装帧设计等。

(4) 地图制印——研究地图复制的理论和技术，包括地图复照、翻版、分涂、制版、打样、印刷、装帧等工艺技术。

随着计算机技术引入地图制图中，出现了计算机地图制图技术。此时，地图是以数字的形式存储在计算机中，称为数字地图；将数字地图在屏幕上按需要的各种方式显示，称为电子地图。计算机地图制图的实现，改变了地图的传统生产方式，节约了人力，缩短了成图周期，提高了生产效率和地图制作质量，并方便了对地图的使用。

1.1.3 工程测量的研究对象和内容

1. 研究对象

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。其主要研究在工程、

工业和城市建设及资源开发各个阶段所进行的地形与有关信息的采集和处理, 施工放样、设备安装、变形监测分析和预报等的理论、方法和技术, 以及研究与测量和工程有关的信息进行管理与使用的学科。其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。

2. 研究内容

按照工程建设的进行程序, 工程测量可以分为规划设计阶段的测量、施工兴建阶段的测量和竣工后运营管理阶段的测量。

(1) 规划设计阶段的测量主要工作内容是提供地形资料。取得地形资料的方法是在所建立的控制测量基础上进行地面测图或航空摄影测量。

(2) 施工兴建阶段的测量主要工作内容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。

(3) 竣工后运营管理阶段测量的主要工作内容是竣工测量, 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。

1.1.4 工程测量学的发展现状及展望

1. 工程测量仪器的发展

工程测量仪器可分为通用仪器和专用仪器。

(1) 通用仪器的发展。通用仪器中常规的光学经纬仪、光学水准仪和电磁波测距仪逐渐被全站仪、电子水准仪所替代。计算机型全站仪配合丰富的软件, 向全能型和智能化方向发展。

带电动机驱动和程序控制的全站仪结合激光、通信及 CCD 技术, 可以实现测量的全自动化, 被称为测量机器人。测量机器人可自动寻找并精确照准目标, 在 1 s 内完成一目标点的观测, 像机器人一样对成百上千个目标做持续和重复观测, 可广泛用于变形观测和施工测量。

GPS 接收机已逐渐成为一种通用的定位仪器, 并在工程测量中得到广泛应用。将 GPS 接收机与电子全站仪或测量机器人连接在一起, 称为超全站仪或超测量机器人。它将 GPS 的实时动态定位技术与全站仪灵活的三维极坐标测量技术完美结合, 可以实现无控制网的各种工程测量。

(2) 专用仪器的发展。专用仪器是工程测量学仪器中发展最活跃的, 主要应用在精密工程测量领域。其包括机械式、光电式及光机电(子)结合式的仪器或测量系统。其主要特点是高精度、自动化、遥测和持续观测。

用于建立水平的或竖直的基准线或基准面, 测量目标点相对于基准线(或基准面)的偏距(垂距), 称为基准线测量或准直测量。这方面的仪器有正、倒锤与垂线观测仪, 金属丝引张线, 各种激光准直仪、铅直仪(向下、向上)、自准直仪, 以及尼龙丝或金属丝准直测量系统等。

在距离测量方面包括中长距离(数十米至数千米)、短距离(数米至数十米)和微距离(毫米至数米)及其变化量的精密测量。以 ME5000 为代表的精密激光测距仪和 TERRAMETER LDM2 双频激光测距仪, 中长距离测量精度可达亚毫米级; 许多短距离、微距离测量都实现了测量数据采集的自动化, 其中最典型的代表是钢瓦线尺测距仪 DISTINVAR、应

变仪 DISTERMETER ISETH、石英伸缩仪、各种光学应变计、位移与振动激光快速遥测仪等。采用多普勒效应的双频激光干涉仪，能在数十米范围内达到 $0.01 \mu\text{m}$ 的计量精度，成为重要的长度检校和精密测量设备。采用 CCD 线列传感器测量微距离可达到百分之几微米的精度，它们使距离测量精度从毫米、微米级进入纳米级世界。

高程测量方面，最显著的发展应是液体静力水准测量系统。这种系统通过各种类型的传感器测量容器的液面高度，可同时获取数十个乃至数百个监测点的高程，具有高精度、遥测、自动化、可移动和持续测量等特点。两容器之间的距离可达数十千米，如用于跨河与跨海峡的水准测量；通过一种压力传感器，允许两容器之间的高差从过去的数厘米达到数米。

与高程测量有关的是倾斜测量(又称挠度曲线测量)，即确定被测对象(如桥、塔)在竖直平面内相对于水平或铅直基准线的挠度曲线。各种机械式测斜(倾)仪、电子测倾仪都向着数字显示、自动记录和灵活移动等方向发展，其精度达微米级。

具有多种功能的混合测量系统是工程测量专用仪器发展的显著特点，采用多传感器的高速铁路轨道测量系统，用测量机器人自动跟踪沿铁路轨道前进的测量车，测量车上装有棱镜、倾斜传感器、长度传感器和微机，可用于测量轨道的三维坐标、轨道的宽度和倾角。液体静力水准测量与金属丝准直集成的混合测量系统在数百米长的基准线上可精确测量测点的高程和偏距。

综上所述，工程测量专用仪器具有高精度(亚毫米、微米乃至纳米)、快速、遥测、无接触、可移动、连续、自动记录、微机控制等特点，可做精密定位和准直测量，可测量倾斜度、厚度、表面粗糙度和平直度，还可测振动频率及物体的动态行为。

2. 工程测量学的发展展望

展望 21 世纪，工程测量学在以下几个方面将得到显著发展：

(1)测量机器人将作为多传感器集成系统在人工智能方面得到进一步发展，其应用范围将进一步扩大，影像、图形和数据处理方面的能力将进一步增强。

(2)在变形观测数据处理和大型工程建设中，将发展基于知识的信息系统，并进一步与大地测量、地球物理、工程与水文地质及土木建筑等学科相结合，解决工程建设中与运行期间的安全监测、灾害防治和环境保护的各种问题。

(3)工程测量将从土木工程测量、三维工业测量扩展到人体科学测量，如人体各器官或部位的显微测量和显微图像处理。

(4)多传感器的混合测量系统将得到迅速发展和广泛应用，如 GPS 接收机与电子全站仪或测量机器人集成，可在大区域乃至国家范围内进行无控制网的各种测量工作。

(5)GPS、GIS 技术将紧密结合工程项目，在勘测、设计、施工管理一体化方面发挥重要的作用。

(6)大型和复杂结构建筑、设备的三维测量、几何重构及质量控制将是工程测量学发展的一个特点。

(7)数据处理中数学物理模型的建立、分析和辨识将成为工程测量学专业教育的重要内容。

综上所述，工程测量学的发展主要表现在从一维、二维到三维、四维，从点信息到面信息获取，从静态到动态，从后处理到实时处理，从人眼观测操作到机器人自动寻标观测，从大型特种工程到人体测量工程，从高空到地面、地下及水下，从人工量测到无接触遥测，

从周期观测到持续测量。测量精度从毫米级到微米乃至纳米级。工程测量学的上述发展将直接对改善人们的生活环境、提高人们的生活质量起重要的作用。

1.2 地面点位的确定

1.2.1 测量的基准面

1. 大地水准面

尽管地球的表面高低不平，很不规则，甚至高低相差很大，如最高的珠穆朗玛峰高出海平面达 8 844.43 m，最低的太平洋西部的马里亚纳海沟低于海平面达 11 022 m。但是这样的高低起伏，相对于半径近似为 6 371 km 的地球来说还是很小的。又由于海洋面积约占整个地球表面的 71%，陆地面积只占 29%，因此，可以将海水面延伸至陆地所包围的地球形体看作地球的形状。设想有一个静止的海水面，向陆地延伸而形成一闭合曲面，这个曲面称为水准面。水准面作为流体的水面是受地球重力影响而形成的重力等势面，也是一个处处与重力方向垂直的连续曲面。由于海水有潮汐，海水面时高时低，因此，水准面有无数个，将其中一个与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面，如图 1-2-1(a)所示，其是高程的起算面。大地水准面所包围的地球形体称为大地体。



测量基准面

由于海水面是个动态的曲面，平均静止的海水面是不存在的。为此，我国在青岛设立验潮站，长期观察和记录黄海海水面的高低变化，取其平均值作为我国的大地水准面的位置(其高程为零)，并在青岛建立了水准原点。

2. 地球椭球面

由于地球内部质量分布不均匀，引起局部重力异常，导致铅垂线的方向产生不规则的变化，使得大地水准面上也有微小的起伏，成为一个复杂的曲面，如图 1-2-1(a)所示。因此，无法在这一复杂的曲面上进行测量数据的处理。为了测量计算工作的方便，通常用一个非常接近大地水准面，并可用数学式表示的几何形体来建立一个投影基准面。这一几何形体是以地球自转轴 NS 为短轴，以赤道直径 WE 为长轴的椭圆绕 NS 旋转而成的椭球体，作为地球的理论形体，称为旋转椭球体[图 1-2-1(b)]。这样，测量工作的基准面为大地水准面，而测量计算工作的基准面为旋转椭球面。

地球椭球体形状和大小的参数取决于椭球的长半轴 a 和短半轴 b ，以及另一个参数——扁率 f ：

$$f = \frac{a-b}{a}$$

随着科学技术的进步，可以越来越精确地确定这些参数。到目前为止，已知其精确值为长半轴： $a = 6\,378.137\text{ km}$ ；短半轴： $b = 6\,356.752\text{ km}$ ；扁率： $f = \frac{a-b}{a} \approx \frac{1}{298.257}$ 。

由于旋转椭球的扁率很小，因此当测区范围不大时，可近似地将旋转椭球作为圆球，其半径近似值为

$$R = \frac{1}{3}(2a + b) \approx 6371 \text{ km}$$

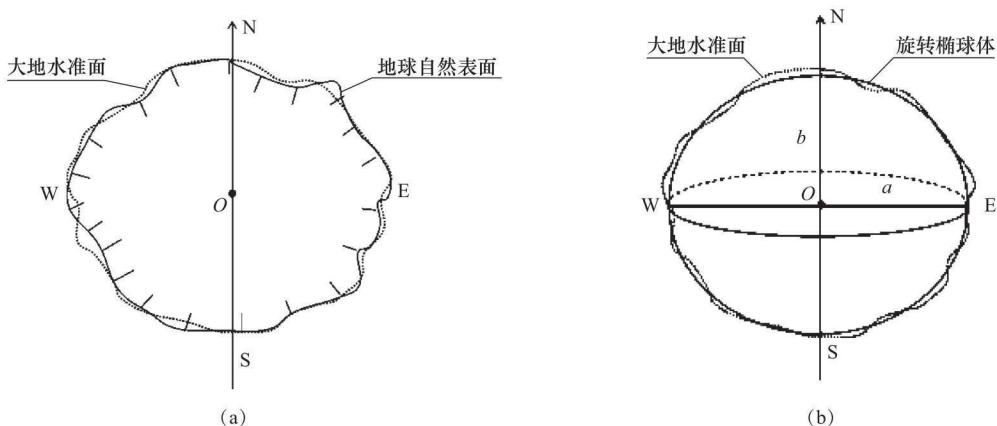


图 1-2-1 地球的自然表面、大地水准面和旋转椭球体
(a)大地水准面；(b)旋转椭球体

1.2.2 地面点位的坐标系

1. 空间三维直角坐标系

取旋转椭球体中心为坐标原点 O ， X 、 Y 轴在地球赤道平面内，首子午面与赤道平面的交线为 X 轴， Z 轴与地球自转轴相重合，如图 1-2-2 所示。地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 X_A 、 Y_A 和 Z_A 表示。



测量坐标系

2. 大地坐标系

用大地经度 L 和大地纬度 B 表示地面点投影到旋转椭球面上位置的坐标，称为大地坐标系，也称为大地地理坐标系。该坐标系以参考椭球面和法线作为基准面和基准线。

如图 1-2-3 所示，地面点 A 沿法线投影到旋转椭球体表面上，投影点为 A' ，这段法线距离 AA' 称为大地高 H 。

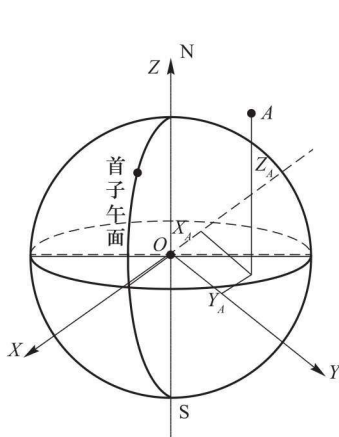


图 1-2-2 空间三维直角坐标

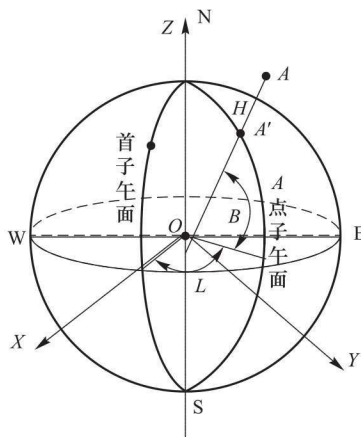


图 1-2-3 大地地理坐标

过点 A 与地轴 NS 所组成的平面称为该点的子午面。子午面与球面的交线称为子午线或经线。国际公认通过英国格林尼治(Greenwich)天文台的子午面,称为首子午面,其是计算经度的起算面。过 A 点的子午面与首子午面所组成的两面角,称为 A 点的大地经度 L 。大地经度自首子午线 0° 起,分别向东或向西算至 180° 。在首子午线以东者称为东经,可写成 $0^\circ\sim 180^\circ\text{E}$;以西者为西经,可写成 $0^\circ\sim 180^\circ\text{W}$ 。

垂直于地轴 NS 的平面与地球球面的交线称为纬线;通过球心 O 并垂直于地轴的平面,称为赤道平面。赤道平面与球面相交的纬线称为赤道。过 A 点的法线(与旋转椭球垂直的线)与赤道平面的夹角,称为 A 点的大地纬度 B 。在赤道以北者为北纬,可写成 $0^\circ\sim 90^\circ\text{N}$;在赤道以南者为南纬,可写成 $0^\circ\sim 90^\circ\text{S}$ 。

例如,我国首都北京位于北纬 40° 、东经 116° ,也可以写成 $B=40^\circ\text{N}$ 、 $L=116^\circ\text{E}$ 。

用大地坐标表示的地面点,统称为大地点。一般来说,大地坐标是由大地经度 L 、大地纬度 B 和大地高 H 三个量组成的,用以表示地面点的空间位置。

中华人民共和国成立初期,我国采用大地坐标系为“1954年北京坐标系”,也称“北京—54坐标系”(简称 P_{54}),如图 1-2-4 所示。该坐标系采用了苏联的克拉索夫斯基椭球体,其参数是:长半轴 $a=6\,378.245\text{ km}$,扁率 $\alpha=1/298.3$;大地原点位于苏联的普尔科沃;椭球中心 o 与地心 O 不重合;定向不明确。坐标系为参心坐标系。

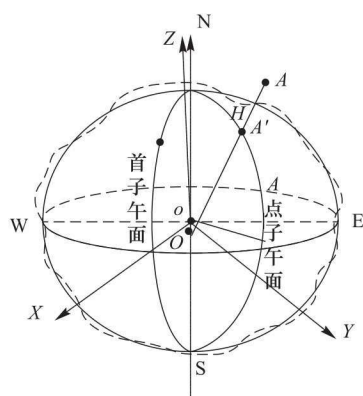


图 1-2-4 北京—54 坐标系

我国也曾采用“1980年国家大地坐标系”,也称“西安—80坐标系”(简称 C_{80}),如图 1-2-5 所示。椭球参数采用 1975 年国际大地测量与地球物理联合会推荐值:椭球长半轴 $a=6\,378.140\text{ km}$,扁率 $\alpha=1/298.257$;椭球中心 o 与地心 O 不重合; Z 轴与地球的旋转轴平行。大地原点设置在我国中西部的陕西省泾阳县永乐镇。椭球面与我国大地水准面密切配合。坐标系为参心坐标系。

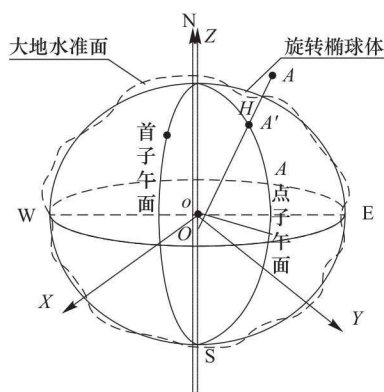


图 1-2-5 西安—80 坐标系

由于全球卫星定位系统(特别是美国 GPS 系统)在全球测量定位中的广泛应用,常规大地测量技术正在被卫星大地测量技术所取代。现在利用全球卫星定位系统进行的测量定位、航天、航空、航海、地面导航,客观上都需要以地心坐标系为参照系。我国于 2008 年 7 月 1

日正式启用 2000 国家大地坐标系。该坐标系为地心坐标系,英文名称是 China Geodetic Coordinate System,简称 CGCS2000,如图 1-2-6 所示。其椭球长半轴 $a=6\,378.137\text{ km}$;原点是包括海洋和大气的整个地球的质量中心 O ; Z 轴为国际地球旋转局参考极方向; X 轴为参考子午面与赤道面的交线。椭球体的体积与大地体的体积相等,椭球面与大地水准面之间的偏离值(大地水准面差距)的平方和为最小,所以这个椭球是国际椭球。

美国 GPS 定位系统采用的 WGS-84 坐标系,如图 1-2-7 所示。其椭球长半轴 $a=6\,378.137\text{ km}$;原点是地球的质量中心 O , Z 轴指向 BIH1984 年定义的协议地球极; X 轴

指向 BIH1984 年定义 的零子午面。

所以，同一个点，在不同的坐标系里有不同的椭球投影面，就有不同的坐标值。坐标值转换参数的计算可由软件来完成。

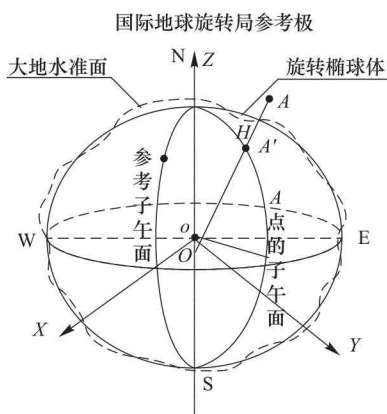


图 1-2-6 CGCS2000 坐标系

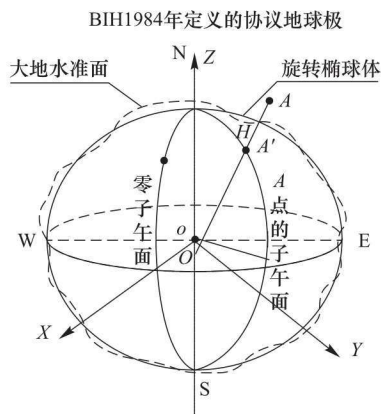


图 1-2-7 WGS-84 坐标系

3. 高斯平面直角坐标系

大地坐标系和空间三维直角坐标系一般适用于少数高级控制点的定位，或作为点位的初始观测值，而对于地形图测绘和工程测量中确定大量地面点位来说，是不直观和不方便的。这就需要采用地图投影的方法，将空间坐标变换为球面坐标，再将球面坐标变换为平面坐标，或直接在平面坐标系中进行测量。由椭球面变换为平面的地图投影方法一般采用高斯—克吕格投影，简称高斯(Gauss)投影。

高斯投影法是将地球划分成 6° 带或 3° 带，然后将每带投影到平面上。如图 1-2-8 所示， 6° 带是从首子午线起，自西向东按 6° 经差进行划分，将整个地球划分成 60 带，依次编号为 1、2、3、...、60。

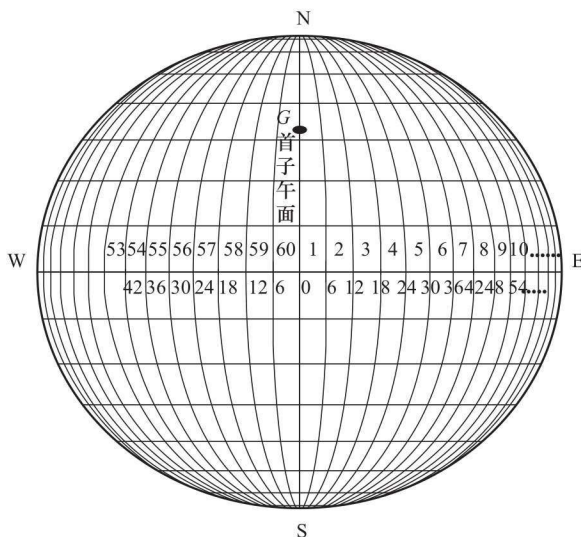


图 1-2-8 高斯投影分带

位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线，也称为轴子午线。任意带的中央子午线经度 L_0 均可按下式计算：

$$L_0 = 6n - 3 \quad (1-2-1)$$

式中 n ——投影带的带号。

按上述方法划分投影带后，即可进行高斯投影，如图 1-2-9 所示。设想将一个椭圆柱表面横着套在旋转椭球外面，使椭圆柱的中心轴线位于赤道面内并通过球心，且使旋转椭球上某 6° 带的中央子午线与椭圆柱面相切。在椭球面上的图形与椭球柱面上的图形保持等角的情况下，将整个 6° 带投影到椭球柱面上，然后将椭球柱沿着通过南北极的母线切开并展成平面，便得到 6° 带在平面上的影像。

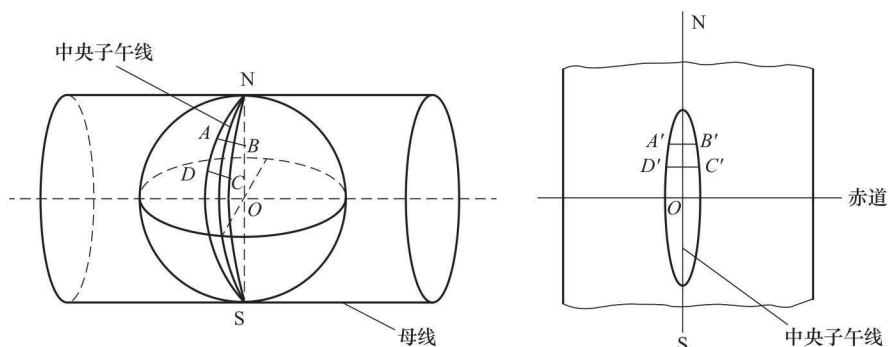


图 1-2-9 高斯投影

将投影后的 6° 带一个个拼接起来，便得到图 1-2-10 所示的图形。

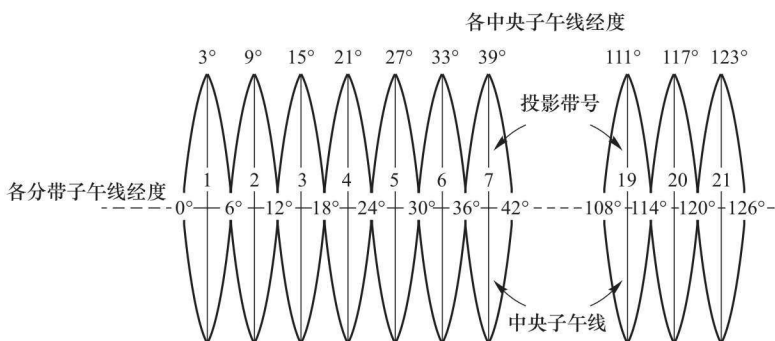


图 1-2-10 6° 带投影

各带的中央子午线和赤道经投影展开后是直线，中央子午线指向南北，以此直线作为纵轴 X 轴，向北为正；赤道与中央子午线相垂直，指向东西，将它作为横轴 Y 轴，向东为正；两直线的交点作为坐标原点，则组成了一个高斯投影平面直角坐标系。

我国位于北半球，所有点的 X 坐标均为正值，而 Y 坐标有正有负。为避免横坐标 Y 出现负值，我国规定将各带坐标纵轴向西平移 500 km，如图 1-2-11(b) 所示。为了表明该点位于哪一个 6° 带内，还规定在横坐标值前冠以带号。

例如， B 点的自然坐标为 $-274\ 240$ m，则

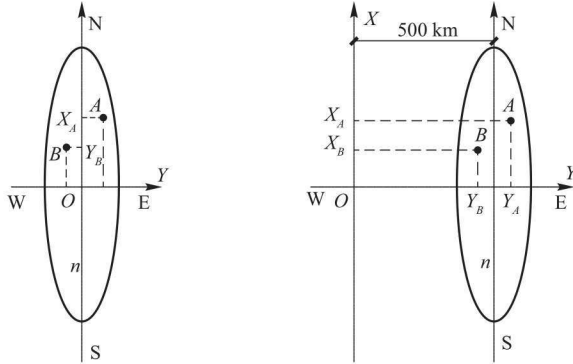


图 1-2-11 高斯平面直角坐标系

$$Y_B = 500\,000\text{ m} + (-274\,240\text{ m}) = 20\,225\,760\text{ m} \quad (1-2-2)$$

表示 B 点位于第 20 带内，其常用坐标为 225 760 m。

在高斯投影中，距离中央子午线近的部分变形小，距离中央子午线越远变形越大。当测绘大比例尺图要求投影变形更小时，可采用 3°分带投影法。它是从东经 1°30′起，自西向东每隔经差 3°划分一带，将整个地球划分为 120 个带，每带中央子午线的经度 L'_0 可按下式计算：

$$L'_0 = 3 \times n' \quad (1-2-3)$$

式中 n' ——3°带的带号。

4. 独立平面直角坐标系

大地水准面虽然是曲面，但当测量区域较小(如半径不大于 10 km 的范围)时，可以用测区中心点 A 的切平面来代替曲面，如图 1-2-12 所示。地面点在切平面上的投影位置就可以用平面直角坐标系来确定。在测量工作中，采用的平面直角坐标系如图 1-2-13 所示，以两条互相垂直的直线为坐标轴，两轴的垂点为坐标原点，规定南北方向为纵轴，并记为 x 轴， x 轴向北为正，向南为负；以东西为横轴，并记为 y 轴， y 轴向东为正，向西为负。地面上某点 P 的位置可以用 x_P 和 y_P 表示。

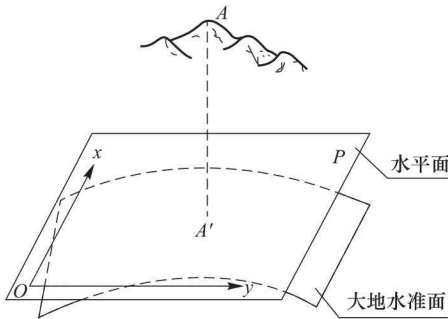


图 1-2-12 以切平面代替曲面

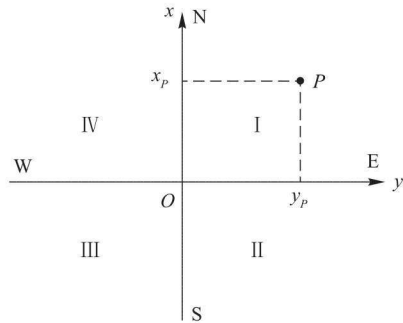


图 1-2-13 独立平面直角坐标系

在平面直角坐标系中象限按顺时针方向编号。 x 轴与 y 轴和数学上规定的坐标轴互换，其目的是定向方便(测量上以北方向为角度—坐标方位角起始方向)，且将数学上的公式直接照