



普通高等教育“十三五”规划教材

工程测量实用教程

姜晨光 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

工程测量实用教程

姜晨光 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本教材较系统、全面地介绍了现代土木建筑工程测量的基本理论、方法和技术,涵盖了土木建筑工程测量的特点及基准体系、测量误差及处理方法、水准测量与光学水准仪、电子水准仪的构造与使用、角度测量与光学经纬仪、电子经纬仪的构造与使用、距离测量、方位测量与平面坐标计算法则、控制测量、地形图测绘、电子全站仪的构造与使用、GNSS接收机的使用、工程建设放样的基本方法、建筑工程测量、测量仪器实训、测量实习等基本教学内容和教学环节,在土木建筑工程测量基本理论的阐述上贯彻“简明扼要、深浅适中,以实用化为目的”的原则,强化了对工程应用环节的介绍。本教材完全采用我国现行的各种规范、标准,尽可能多地借鉴了科技发达国家的标准、技术和经验,大量删减整理了落伍的国内尚用的内容,彻底淘汰了过时的国内也已不用的内容,全面介绍目前国际最新的、最具普及性的知识、理论和技术,将“学以致用”原则贯穿始终,努力提高本教材的可读性和实用性。

本教材是大土木工程行业的专业基础课教材,适用于本科和高职高专的土木工程、工程管理、交通运输工程、铁道工程、水利工程、水利水电工程、矿业工程、建筑学、城市规划、环境工程等专业,也适用于网络高等教育、电视大学、夜大及高等教育自学考试,还可作为国家执业资格考试用书,也是土木建筑工程勘察、设计、施工领域人士必备的简明工具书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测量实用教程 / 姜晨光主编. -- 北京 : 中国
水利水电出版社, 2016. 11
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-4924-1

I. ①工… II. ①姜… III. ①工程测量—高等学校—
教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第284904号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 工程测量实用教程 GONGCHENG CELIANG SHIYONG JIAOCHENG
作 者	姜晨光 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23.5印张 557千字
版 次	2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《工程测量实用教程》

编撰委员会

主 编：姜晨光

副主编：（排名不分先后）

宋 艳 关秋月 张靖仪 孙晓玲

成美捷 翁林敏

参 编：张守燕 曾稀琪 王晓菲 高建水 刘 颖

牛牧华 崔清洋 方周妮 王 达 何跃平

贾绪领 叶 军 吴 玲 蒋旅萍 欧元红

陈 丽 刘进峰 蔡洋清 卢 林 刘群英

夏伟民 张惠君 王风芹

前言

土木工程测量是利用测绘科学的基本理论和基本技术为各种土木建筑活动提供空间定位保障和安全监控服务的应用科学。铁路、公路、桥梁、隧道、码头、房屋都属于土木建筑，其建设过程中的任何一个部件都有其设计的空间位置（即三维坐标），因此，土木建筑建设过程中任何一个部件的施工均需首先借助土木工程测量技术进行定位（即放样），即各种土木建设活动均围绕着测量这个指挥棒在运转，所以，测量有工程建设的“眼睛”和指南针的称谓。另外，土木建筑工程建造过程中的安全及运营安全均需要借助测量技术进行监控。土木工程测量在土木工程中的地位举足轻重。测绘科学的发展和土木工程技术的发展日新月异，如何使测绘科学更好地服务于土木工程是一个必须正视和认真对待的问题，也是作者几十年孜孜以求的目标，在长期的教学、科研、生产实践中作者逐步梳理出了土木工程测量的脉络，为更好地普及土木工程测量知识、满足土木工程测量教学要求，作者不揣浅陋编写出了这本教材。本教材是作者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一，也是作者30余年工程生涯中不断追踪科技发展脚步的部分收获，本书的撰写借鉴了当今国内外的最新研究成果和大量实际资料，吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识，也尽最大可能地包含了当今最新的科技成就，希望本书的出版能有助于土木工程测量知识的普及，对从事各类工程建设活动的人们有所帮助，对我国土木工程教育事业的健康可持续发展有所贡献。

土木工程测量的知识点较多，在教学过程中各校可根据不同专业的教学要求和装备情况有选择性地讲授（不讲的知识可作为学生专业拓展内容让学生课外阅读，以提高学生走上社会后的适应能力和生存能力）。因篇幅所限，本教材不可能涵盖所有的知识点，如需讲授本教材中未出现的知识点的学校可根据实际需要自己编印补充讲义，也可反馈给出版社，以便在再版时增补。

全教材由江南大学姜晨光主笔完成，广州大学张靖仪，无锡太湖学院崔清洋、刘颖、牛牧华、方周妮、关秋月，青岛黄海学院张守燕、曾稀琪、宋艳，江阴职业技术学院孙晓玲，平度市职教中心王晓菲，济南市园林绿化工程质量监督站高建水，无锡市规划局成美捷，无锡市住房和城乡建设局王达、贾绪领、何跃平、翁林敏，江南大学叶军、吴玲、蒋旅萍、欧元红、陈丽、刘进峰、蔡洋清、卢林、刘群英、夏伟民、张惠君、王凤芹等（排名不分先后）参与了相关章节的撰写工作。

限于水平、学识和时间关系，书中内容难免粗陋，谬误与欠妥之处敬请读者批评指正。

姜晨光

2016年5月于江南大学

目 录

前言

第 1 章 土木建筑工程测量的特点及基准体系	1
1.1 土木建筑工程测量的学科特点	1
1.2 土木建筑工程测量的基准体系	4
思考题与习题	12
第 2 章 土木建筑工程测量误差及处理方法	14
2.1 测量误差的特点	14
2.2 测量精度的衡量方法	16
2.3 测量误差的累积规律	16
2.4 等精度观测的数据处理原则	17
2.5 不等精度观测的数据处理原则	17
思考题与习题	19
第 3 章 水准测量与光学水准仪	20
3.1 水准仪的测量原理	20
3.2 低端微倾式光学水准仪的构造特征	21
3.3 低端微倾式光学水准仪的配套附件	23
3.4 低端微倾式光学水准仪的使用方法	26
3.5 自动安平式光学水准仪	31
3.6 精密光学水准仪	32
3.7 特种水准仪	33
3.8 光学水准仪的检验与校正方法	34
3.9 水准测量作业规程	37
思考题与习题	42
第 4 章 电子水准仪的构造与使用	44
4.1 电子水准仪的特点及基本构造	44
4.2 电子水准仪的测量方法	59
4.3 电子水准仪的放样方法	67
4.4 电子水准仪的线路平差	69

4.5 电子水准仪的数据管理	70
4.6 电子水准仪的校正	76
4.7 电子水准仪使用的注意事项	79
思考题与习题	82
第5章 角度测量与光学经纬仪	83
5.1 光学经纬仪的构造及测角原理	83
5.2 光学经纬仪的使用	87
5.3 经纬仪的安置方法	92
5.4 经纬仪水平角测量	96
5.5 竖直角测量的工程意义	100
5.6 经纬仪竖直角测量	102
5.7 经纬仪的检验校正方法	103
5.8 角度测量注意事项	106
5.9 激光经纬仪与激光铅垂仪	106
思考题与习题	107
第6章 电子经纬仪的构造与使用	109
6.1 电子经纬仪的特点及基本构造	109
6.2 电子经纬仪的测量准备工作	116
6.3 电子经纬仪的基本测量方法	118
6.4 电子经纬仪的内存功能	122
6.5 电子经纬仪的其他功能	123
6.6 电子经纬仪的检验与校正	123
6.7 电子经纬仪使用的注意事项	127
思考题与习题	128
第7章 距离测量	129
7.1 钢尺量距	129
7.2 激光测距	131
7.3 视距测量	133
思考题与习题	134
第8章 方位测量与平面坐标计算法则	135
8.1 直线定向	135
8.2 测量平面直角坐标计算的基本法则	139
8.3 计算器在测量计算中的应用	140
思考题与习题	144
第9章 控制测量	146
9.1 控制测量的作用与国家大地网	146

9.2 导线测量	149
9.3 小三角测量	158
9.4 交会定点	161
9.5 三、四等水准测量	164
思考题与习题	167
第 10 章 地形图测绘	168
10.1 地图的特点	168
10.2 地形图的测绘方法	179
10.3 地形图的阅读与应用	191
10.4 地理信息系统	196
思考题与习题	197
第 11 章 电子全站仪的构造与使用	198
11.1 电子全站仪的特点及基本构造	198
11.2 电子全站仪测量的准备工作	209
11.3 电子全站仪的常规测量模式	214
11.4 电子全站仪的程序测量模式	223
11.5 电子全站仪的参数设置模式	227
11.6 电子全站仪的检验和校正	229
11.7 电子全站仪棱镜/无棱镜常数的设置	237
11.8 电子全站仪的改正	238
11.9 电子全站仪的相关附件与维护	239
11.10 电子全站仪作业中的注意事项	243
思考题与习题	250
第 12 章 GNSS 接收机的使用	251
12.1 GNSS 接收机的发展现状	251
12.2 GNSS 接收机的基本特点及使用要求	253
12.3 现行主流 GNSS 接收机的构造及安装方法	258
12.4 现行主流 GNSS 接收机的作业方法	267
12.5 现行主流 GNSS 接收机与电脑的连接方法	272
12.6 超站仪的构造与使用	276
思考题与习题	281
第 13 章 工程建设放样的基本方法	282
13.1 点位放样	282
13.2 高程放样	282
13.3 坡度放样	284
13.4 曲线放样	285
思考题与习题	285

第 14 章 建筑工程测量	286
14.1 土木建筑工程的特点	286
14.2 建筑工程测量的特点及宏观要求	289
14.3 建筑施工平面控制测量的特点及基本要求	291
14.4 建筑施工高程控制测量的特点及基本要求	298
14.5 土方施工测量和基础施工测量	301
14.6 基坑施工监测	303
14.7 民用建筑施工测量	306
14.8 工业建筑施工测量	311
14.9 建筑装饰施工测量与设备安装施工测量	312
14.10 建筑小区市政工程施工测量	314
14.11 建筑施工变形监测	317
14.12 竣工测量与竣工图的编绘	324
思考题与习题	326
第 15 章 测量仪器实训	328
15.1 测量仪器实训的基本要求	328
15.2 水准仪与水准测量实训	330
15.3 经纬仪与角度测量实训	332
15.4 电子全站仪测量实训	334
15.5 GNSS 测量实训	335
思考题与习题	336
第 16 章 测量实习	337
16.1 测量实习的基本要求	337
16.2 测量实习过程	340
16.3 土木建筑工程测量放样实习	347
16.4 测量实习的相关技术要求	351
思考题与习题	359
参考文献	360

第 1 章 土木建筑工程测量的特点 及基准体系

1.1 土木建筑工程测量的学科特点

在我国，土木建筑工程测量是测绘科学的 3 级学科，也是工程测量科学的 2 级学科。在世界各个发达国家，土木建筑工程测量与材料工程学、岩土工程学、结构工程学、建筑施工学、交通工程学、水利工程学、环境工程学共同构建起了土木工程的科学体系，是土木工程科学的 8 大二级学科之一，其地位的重要性不言而喻。常被人们称呼为“测量”的“测绘科学”，是研究与量度地球或其他天体表面高低起伏的自然形态及其四维变化规律的科学。测绘科学的研究对象是地球或其他天体的固体表面，因此属于地球科学（简称地学）的研究范畴。地球或其他天体固体表面以下的部分（内部）是地质科学的研究范畴，地球或其他天体固体表面与液体表面之间的区域是水科学的研究范畴，环绕地球或其他天体的气体空间是大气科学的研究范畴，地球与其他天体之间的关系问题是天文科学的研究范畴，从巨（宏）观领域对地球、天体各种问题进行综合集成化分析与研究是地理科学的工作范畴，因此，测绘科学与地质科学、地理科学、水科学、大气科学、天文科学共同组成了地学大家族，是地学领域的六朵金花之一。大家知道，地质科学、地理科学、水科学、大气科学、天文科学每个学科自身都是多学科集成的综合性大学科，各自都有自己的分支学科（即所谓的 2 级学科）和独特的科学体系，作为地学领域的六朵金花之一的测绘科学本身也是一个多学科集成的综合性大学科并有着自己的分支学科和独特科学体系，测绘科学的主要分支学科有地形测量、大地测量、测绘遥感（航空摄影测量与遥感）、地图制图、工程测量、海洋测绘、地籍测绘、测绘仪器八大学科。

地形测量学是研究地形测绘理论、方法和技术的科学，其成果是各种各样的地形图，这些地形图就是各种建设项目（涵盖工业、农业、国防等各行各业）规划、设计的基础图件，也是各类地图编制的基础图件，与该领域有关的国际性科学组织是国际测绘联合会（International Union of Surveying and Mapping, IUSM）。大地测量学是研究大区域（指地理区域）或全球地壳形态及其变化和重力场特征的科学，大地测量的成果是地球空间信息的基础，是地球科学其他五大学科关键性的、不可或缺的基础平台，在西方国家，大地测量与数学、化学学科等并称为构成自然科学体系的 16 大自然科学学科，与该领域有关的国际性科学组织是国际大地测量学协会（International Association of Geodesy, IAG），IAG 是国际大地测量学与地球物理学联合会（International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG）的创始者和主要成员之一，也是世界上成立最早的国际性学术团体之一。测绘遥感（摄影测量与遥感）学是研究利用遥感的手段获取地表形态信息的科学，与

该领域有关的国际性科学组织是国际摄影测量与遥感学会 (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)。地图制图学是研究地图绘制理论与技术的科学, 与该领域有关的国际性科学组织是国际地图学协会 (International Cartographic Association, ICA)。工程测量学是利用测绘科学综合理论与技术为各类工程建设提供测绘保障服务的应用科学 (也可称为应用测绘学), 与该领域有关的国际性科学组织是国际测量师联合会 (Federation Internationale des Geometres, FIG)。海洋测绘学是研究海底地形及其四维变化规律的科学, 主要为海洋运输、海洋科学考察、航道开拓、航道疏浚、海洋军事活动、海下资源开发、海洋救助等提供测绘保障, 为海洋科学研究 (如潮汐、洋流、海温变化、海平面升降等) 提供基础地理信息, 是海洋科学研究的关键支持平台, 与该领域有关的国际性科学组织是国际海道测量组织 (International Hydrography Organization, IHO)。地籍测绘学是研究地籍管理中地籍图测量与绘制理论和技术的科学, 国外地籍测绘是一种具有法律效力的公共服务活动 (它既服务于政府也服务于民众)。测绘仪器学是研究测绘仪器制造理论与技术的科学, 测绘仪器属于精密仪器, 现代测绘仪器是集光 (光学)、机 (机械)、电 (电子)、算 (计算机) 于一体的高技术含量设备, 其涉及领域非常广泛且需多学科的密切协同, 当代测绘仪器的制作水平代表着一个国家的综合科技势力。另外, 还有房产测绘学, 即研究房产管理中房产面积界定以及房产图测量与绘制理论和技术的科学, 也是一种具有法律效力的公共服务活动。我国主管测绘工作的政府机构是国家测绘地理信息局。

国际大地测量学与地球物理学联合会 (IUGG) 隶属于国际科学联盟理事会 (International Council of Scientific Unions, ICSU), 1999 年时 IUGG 由 7 个协会组成, 即国际大地测量协会 (International Association of Geodesy, IAG)、国际地震和地球内部物理协会 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, IASPEI)、国际火山和地球内部化学协会 (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, IAVCEI)、国际地磁和高空物理协会 (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA)、国际气象和大气科学协会 (IAMAS)、国际水文科学协会 (International Association of Hydrological Science, IAHS)、国际海洋物理科学协会 (International Association of Physical Sciences of the Ocean, IAPSO)。曾经是 IUGG 成员的国际学术机构有国际气象学和大气物理学协会 (International Association of Meteorology and Atmospheric Physics, IAMAP)、国际动力学联盟间委员会 (Inter-union Commission Geodynamics, ICG) (也隶属于国际地质科学联合会 International Union of Geological Sciences, IUGS)、国际极地气象学委员会 (International Commission Polar Meteorology, ICPM)。与 IUGG 关系密切的其他重要国际学术组织还有国际地理学联合会 (International Geographical Union, IGU), 隶属于国际科联理事会、国际天文学联合会 (International Astronomical Union, IAU, 隶属于国际科联理事会)、国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO)、国际气象组织 (International Meteorological Organization, IMO, 1951 年改为 World Meteorological Organization, WMO)、联合国教育 (育) 科 (学) 和文 (化) 组织 (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)。

测绘科学是人类各种活动及各类工程建设的“眼睛”和“指南针”，各类工程项目的设计（或规划）空间位置均必须借助测绘仪器（或测绘技术）进行定位，测绘科学成果之一的地图（比如智能手机上的百度地图、谷歌地图）是人类出行的伴侣和依靠。总而言之，人类的任何活动和任何工程建设都离不开测绘科学，测绘科学是人类活动和各种工程建设不可或缺的重要技术保障。测绘仪器是测绘人员的武器，也是贵重、精密仪器，一定要按规定小心使用、精心呵护，并应做好五方面的防护工作（即防振、防摔、防水、防潮、防高温）。

测绘科学的起源可追溯到原始社会，是人们最早创造的科学体系之一。测绘科学的发展时刻与人类的文明史同步，随着人类文明的历史进程一直发展到了今天，对人类社会的发展作出了不可磨灭的重大贡献，成为人类各种活动不可或缺的重要依靠和技术手段。在“穴居巢处”的人类蛮荒文明时代，人类“逐水而居”开始了治水、用水并驯化野生动植物，于是就有了原始农业、畜牧业，因而也就有了地籍测量和最古老的土木建筑工程测量——水利测量，人们懂得了利用铅垂线进行各种建造活动，在建造活动中又领悟了“两铅垂线之间距离最短的直线为水平线”的道理（即所谓的“揆平”），因此，使土木建筑的质量和水平不断提高。火使人类从蛮荒文明进入古代文明，火改变了人类的饮食习惯，人类也用火来改造自然物，于是就有了简陋的司南、磁勺、准绳、规矩之类的土木建筑测量工具。电使人类从古代文明进入近代文明，电为人类提供了动力，使人类改造自然的能力得到了飞跃性的提升，于是人们造出了照相机、望远镜（奠定了近代测绘的物质基础，可以说是引领了测绘科学的第一次革命）、飞机（奠定了航空摄影测量的基础，引发了测绘科学的第二次革命）。网络信息技术使人类从近代文明进入现代文明，网络信息技术使人类探索未知世界的能力得到了极大的提升，1945年第一台电子计算机（美国）的出现引发了测绘科学的第三次革命（电子计算机不仅将测绘从繁重的计算工作中解脱了出来，大大提高了计算速度，而且为现代测绘技术、测绘仪器、测绘方法的改变奠定了重要的技术基础），1957年10月4日，世界第一颗人造地球卫星的发射（苏联）引发了测绘科学的第四次革命（诞生了卫星大地测量学这一测绘新学科），1960年世界上第一台红宝石激光器的诞生（瑞典）引发了测绘科学的第五次革命（使得距离测量摆脱了对尺子的依赖，测绘进入了激光测量的时代），20世纪70年代GPS技术（全球定位系统）的出现引发了测绘科学的第六次革命（带来了空间测量技术的普及化和高精度），随之而来的是人类创造的各个领域的新技术的交叉与融合对测绘科学的改造与拉动，测绘科学迎来了一个更加充满朝气的新时代，现代测绘技术的手段更加先进，现代测绘科学的理论更加进步并不断完善，ETS（电子全站仪）、GNSS（卫星定位系统）、RS（遥感技术）、GIS（地理信息系统）以及它们四者之间的集成已经成为当今测绘的主旋律，它们与惯性测量系统（INS——根据惯性原理设计的测定地面点大地元素的系统）、甚长基线干涉测量技术（VLBI——独立站射电干涉测量技术）、激光测月技术（LLR）、激光测卫技术（SLR）、卫星轨道跟踪和定位技术（DORIS）、通信技术、自动化技术、信息技术、物联网技术等各种技术一起构建起了测绘科学的绚丽大花园，为人类文明的发展、为人类社会的进步、为各类工程建设源源不断地发挥着独特的、不可替代的重要作用。智能化自动电子全站仪、智能化电子水准仪、GNSS接收机、智能化激光铅垂仪、智能化激光扫平仪、手持

式激光测距仪、智能化自动陀螺经纬仪、全站扫描仪、超站仪等已成为现代土木建筑工程不可或缺的设备,这些现代测量仪器确保了各种超高、超大、超宽、超深土木建筑结构能够顺利、高质量建造与运营。

1.2 土木建筑工程测量的基准体系

铁路、公路、桥梁、隧道、码头、房屋都属于土木建筑,其建设过程中的任何一个部件都有其设计的空间位置(即三维坐标),因此,土木建筑建设过程中任何一个部件的施工均需首先借助土木建筑工程测量技术进行定位(即放样),即各种土木建设活动均围绕着测量这个指挥棒在运转,所以,测量有工程建设的“眼睛”和指南针的称谓。建筑构件空间位置的设计必须依据相应的三维坐标系,这个三维坐标系就是土木建筑工程测量的基准体系。小型的土木建筑活动可以建立独立的基准体系并依此进行设计和施工放样,铁路、公路、机场、码头等大型土木建筑则必须建立基于地球的全球性基准体系或国家基准体系,并依此进行设计和施工放样。另外,信息化引导下的现代人类的活动范围已遍布全球且已进入太空,各种工程建设活动以全球性基准体系为基准进行建设已成为人类的迫切需要,为此,现代各种工程建设活动都在以全球性基准体系或国家基准体系为基准进行规划、设计、施工、运营。这样,掌握全球性基准体系或国家基准体系的基本知识就成了对土木建筑工程测量工作人员的最基本要求。

1.2.1 地球的外观形态及理论模拟

全球性基准体系或国家基准体系都是以地球为基础模型构建的,因此,基准体系构建时必须最合理地考虑地球的形状特征与体量大小。地球的自然形状是一个表面起伏不平的类似鸭蛋状的球体,地球的这种自然形状无法数学化,因此,为构建全球性基准体系或国家基准体系就必须对地球形状进行合理简化,人们对地球形状进行的第一次简化是利用物理学原理得到的地球形体(大地体),大地体的表面(大地水准面)是衡量地壳起伏度的基准面。地球内部密度的不均匀导致了大地水准面的不光滑,于是,人们又用数学方法对大地体进行了简化,获得了地球的数学形体(总地球椭球)。

(1) 地球的物理形状。

地球的物理形状是大地体,大地体的表面是大地水准面,大地水准面是水准面中的一个。水准面是重力等位面(即面上各点的重力势能相同),可理解为自由静止的水面,水准面有无数多个。与平均海面(地球的自然形体)吻合程度最高的水准面称为大地水准面,大地水准面所包围的形体称为大地体,大地水准面只有一个(可理解为自由静止的等密度海水在恒温、恒压、无潮汐、无波浪情况下向陆地内部延伸后所形成的封闭海水面)。大地水准面是不可能准确建立的(只能随着各方面条件的改善逐步趋近),只能建立一个接近于它的替代品,这个替代品就是国家水准面。所谓国家水准面就是符合国家基本地理特征和需求的水准面,具有国家唯一性,国家水准面是一个国家统一的高程起算面。我国的国家水准面是青岛验潮站求出的黄海平均海面,以青岛验潮站1950—1956年的潮汐资料推求的平均海面作为我国的高程基准面(国家水准面)的系统称为“1956黄海高程系统”,根据1952—1979年的验潮站资料确定的平均海面作为我国新的高程基准面

(国家水准面)的系统称为“1985 国家高程基准”，水准原点(图 1.1)在“1956 黄海高程系统”中的高程为 72.289m，在“1985 国家高程基准”中的高程为 72.260m。目前，“1956 黄海高程系统”已废止。在利用高程数据时一定要弄清其归属的“高程系统”，“高程系统”不同时应根据“水准原点”高程差换算为同一个系统，换算方法为 1985 高程 - 1956 高程 = 1985 原点高程 - 1956 原点高程”。实际上，由于地球内部物质密度具有各向异性特征(即切向分布不均匀，径向分布不均匀)，故地球上的引力线不是直线而是曲线，各个水准面之间是不平行的且表面不是很光滑，因此，对地球物理形状构建数学模型极其困难，为建立球面基准体系必须对其再次进行近似。

(2) 地球的数学形状。

人们对地球物理形状进行再次近似的结果是构建地球的数学形体。地球的数学形体是总地球椭球，总地球椭球是参考椭球中的一个。参考椭球是指体量与地球大致相当的椭圆绕短轴旋转 180°所形成的封闭球体，球的表面称为参考椭球面，球的实体称为参考椭球体，参考椭球的大小和形状决定于其长半径 a 和短半径 b ，因此，参考椭球的长半径 a 、短半径 b 和扁率 α 就构成了参考椭球的最重要的几何要素， $\alpha = (a - b)/a$ 。人们将与大地体吻合程度最高的参考椭球作为地球的数学形状并称之为总地球椭球，总地球椭球具有唯一性且同样是不可能准确建立的，只能随着各方面条件的改善逐步趋近。精确的总地球椭球无法建立，只能建立一个接近于它的替代品，这个替代品就是国家椭球。所谓国家椭球就是符合国家基本地理特征和需求的参考椭球，具有国家唯一性，国家椭球是一个国家统一坐标系统的基础框架(即经纬度的衡量基准)。1949 年 10 月 1 日中华人民共和国成立后采用的第一个国家椭球是克拉索夫斯基椭球($a = 6378245\text{m}$ 、 $\alpha = 1/298.3$)，建立的大地

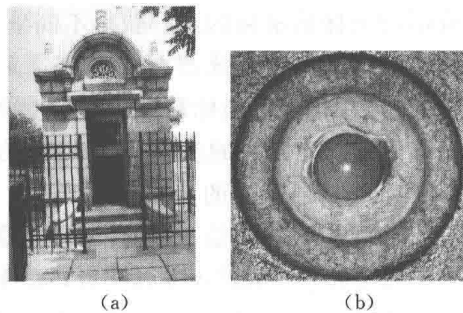


图 1.1 中国国家水准原点
(a) 水准原点室；(b) 水准原点标志

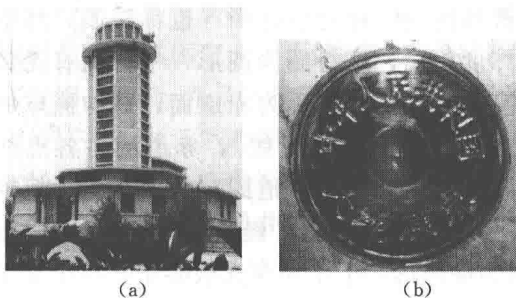


图 1.2 中国国家大地原点
(a) 大地原点室；(b) 大地原点标志

地坐标系统称为“1954 年北京坐标系”，1980 年我国采用的第二个国家椭球是 IAG-1975 椭球($a = 6378140\text{m}$ 、 $\alpha = 1/298.257$)、大地原点在陕西省泾阳县永乐镇(图 1.2)、建立的大地坐标系统称为“1980 年西安坐标系或 1980 国家大地坐标系”，2008 年 7 月 1 日起我国采用的第三个国家椭球是 WGS84 椭球(即 GPS 采用的参考椭球， $a = 6378137\text{m}$ 、 $\alpha = 1/298.257223563$)、大地原点仍为西安坐标

系原点、建立的大地坐标系统称为“2000 中国大地坐标系”。“2000 中国大地坐标系”与现行国家大地坐标系转换、衔接的过渡期为 8~10 年。在利用坐标数据时一定要弄清其归属的“坐标系统”，“坐标系统”不同时应先根据测区内均布的 3 个以上的公共点(即同时

具有不同坐标系坐标的点) 获得不同坐标系的转换参数, 然后再以转换参数为依据将坐标数据转换为同一个系统。

“2000 中国大地坐标系”(CGCS2000) 的原点位于地球质心, Z 轴指向国际地球自转服务组织(IERS) 定义的参考极(IRP) 方向, X 轴为 IERS 定义的参考子午面(IRM) 与通过原点且同 Z 轴正交的赤道面的交线; Y 轴与 Z 、 X 轴构成右手直角坐标系。在定义上, CGCS2000 与 WGS84 是一致的, 其坐标系原点、尺度、定向及定向演变的定义都是相同的。两个坐标系的参考椭球也非常接近, 扁率有微小差异: $f_{\text{WGS84}} = 1/298.257223563$, $f_{\text{CGCS2000}} = 1/298.257222101$ 。CGCS2000 通过 2000 国家 GPS 大地网的点在历元 2000.0 的坐标和速度具体体现。WGS84 的初始参考框架于 1987 年建立, 随后又分别于 1994 年、1996 年、2002 年先后 3 次实现, 依次叫做 WGS84 (G730)、WGS84 (G873)、WGS84 (G1150)。最新框架 WGS84 (G1150) 由 17 个 GPS 监测站在历元 2001.0 的坐标和速度来体现。通过比较坐标系的定义和实现, 可以认为 CGCS2000 和 WGS84 (G1150) 是相容的, 在坐标系的实现精度范围内, CGCS2000 坐标和 WGS84 (G1150) 坐标是一致的。

参考椭球体是测量成果换算的依据。在要求精度不高的测量中, 为了计算方便, 也可把地球近似当作圆球看待, 其平均半径 R 取 6371km。当测区范围较小时又常把球面视为平面看待。 R 的计算公式是 $R = (a + a + b)/3$ 。

1.2.2 地球物体的空间关系表达

要表达地面上一点(或土木建筑构件) 的位置必须采用三维形式, 地面点位表达的常用方式是大地坐标+高程、地理坐标+高程、高斯平面直角坐标+高程、独立平面直角坐标+高程、三维地心坐标。

(1) 大地坐标。

大地坐标是以参考椭球和法线为依据构建的, 大地坐标用大地经度和大地纬度表示。如图 1.3 所示, 参考椭球短轴(NS) 为过地球几何中心且平行于地球自转轴的线段, 短轴的中点(O) 称为球心。垂直于短轴的平面称为平行面, 面与椭球的交线称为平行圈(也称纬圈、纬线), 平行圈上各点纬度相同, 平行圈为圆形, 平行圈有无数多个, 过球心垂直于短轴的平面称为赤道面, 面与椭球的交线称为赤道圈(也称赤道、赤道线), 赤道圈上各点纬度为 0° , 赤道圈是平行圈中的一个(是参考椭球上最大的圆), 赤道圈只有 1 个。过短轴的平面称为子午面, 子午面与椭球的交线称为子午圈(也称经圈、经线、子午线), 以短轴为界线的半个子午圈上各点经度相同, 子午圈为椭圆形, 子午圈有无数多个, 每个子午圈的大小均相等。过英国伦敦原格林尼治天文台星仪中心的子午面称为起始子午面(也称本初子午面), 该面与椭球的交线称为起始子午线(也称本初子午线), 以短轴为界线星仪中心所在的半个子午圈上各点经度均为 0° , 另半个子午圈上各点经度均为 180° , 本初子午线是子午圈中的一个, 本初子午线只有 1 个。参考椭球上一点 P 的大地坐标用大地经度(L) 和大地纬度(B) 表示。过 P 点的子午面称 P 子午面, 该面与起始子午面间的二面角 L 称为 P 点的大地经度(大地经度的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 分东经和西经, 从 0° 经线向东

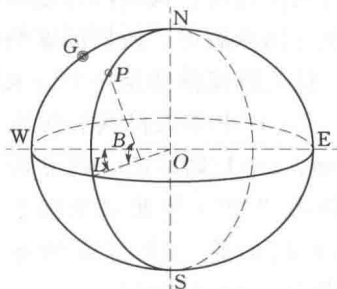


图 1.3 大地坐标

为 0° , 赤道圈是平行圈中的一个(是参考椭球上最大的圆), 赤道圈只有 1 个。过短轴的平面称为子午面, 子午面与椭球的交线称为子午圈(也称经圈、经线、子午线), 以短轴为界线的半个子午圈上各点经度相同, 子午圈为椭圆形, 子午圈有无数多个, 每个子午圈的大小均相等。过英国伦敦原格林尼治天文台星仪中心的子午面称为起始子午面(也称本初子午面), 该面与椭球的交线称为起始子午线(也称本初子午线), 以短轴为界线星仪中心所在的半个子午圈上各点经度均为 0° , 另半个子午圈上各点经度均为 180° , 本初子午线是子午圈中的一个, 本初子午线只有 1 个。参考椭球上一点 P 的大地坐标用大地经度(L) 和大地纬度(B) 表示。过 P 点的子午面称 P 子午面, 该面与起始子午面间的二面角 L 称为 P 点的大地经度(大地经度的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 分东经和西经, 从 0° 经线向东

称东经,向西称西经)。过 P 作参考椭球的法线(该线一定位于 P 子午面内但不通过球心,因为参考椭球是椭球而不是圆球),该线与赤道面的夹角 B 称为 P 点的大地纬度(大地纬度的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 、分南纬和北纬,从赤道面向北称北纬,向南称南纬)。

(2) 地理坐标。

地理坐标是以大地体和垂线(铅垂线)为依据构建起来的,地理坐标用地理经度和地理纬度表示。如图 1.4 所示,大地体的短轴($N'S'$)为地球的平自转轴, O' 为大地体的重心。垂直于短轴的平面称为地理平行面,地理平行面与大地体的交线称为地理平行圈(也称地理纬圈、地理纬线),地理平行圈上各点纬度相同,地理平行圈有无数多个。过重心垂直于短轴的平面称为地理赤道面,面与大地体的交线称为地理赤道圈(也称地理赤道、地理赤道线),地理赤道圈上各点纬度为 0° ,地理赤道圈只有 1 个。过短轴的平面称为地理子午面,面与大地体的交线称为地理子午圈(也称地理经圈、地理经线、地理子午线),以短轴为界线的半个地理子午圈上各点经度相同,地理子午圈有无数多个。过英国伦敦原格林尼治天文台星仪中心的地理子午面称为起始地理子午面(也称本初地理子午面),该面与大地体的交线称为起始地理子午线(也称本初地理子午线),以短轴为界线星仪中心所在的半个子午圈上各点经度均为 0° ,另半个子午圈上各点经度均为 180° ,本初地理子午线只有 1 个。大地体上一点 P 的地理坐标用地理经度(λ)和地理纬度(φ)表示。过 P 点的地理子午面称 P 地理子午面,该面与起始地理子午面间的二面角 λ 称为 P 点的地理经度,地理经度的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,分东经和西经,从 0° 经线向东称东经,向西称西经。过 P 作大地体的垂线(该线一定位于 P 地理子午面内并通过重心 O'),该线与地理赤道面的夹角 φ 称为 P 点的地理纬度,地理纬度的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,分南纬和北纬,从地理赤道面向北称北纬,向南称南纬。

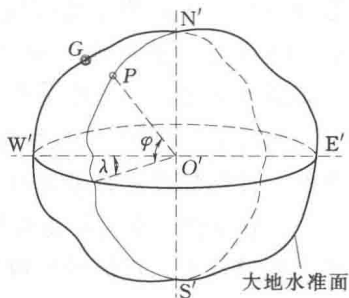


图 1.4 地理坐标

(3) 高斯平面直角坐标。

高斯平面直角坐标是以高斯-克吕格投影为基础建立的平面直角坐标系,高斯-克吕格投影是将椭球面变成平面的一种地图投影方式,属于数学函数投影(正形投影)而不是几何投影,高斯-克吕格投影反映的是球面上一点与高斯平面上一点的对应函数关系(是应用最广的一种正形地图投影)。

1) 高斯-克吕格投影的形象描述。当时,高斯将地球假想为圆球并把其缩小到篮球大小,在球上画出赤道线并从 180° 经线开始由西经到东经每隔 3° 画出经线,假设画出的赤道线和经线均是透光的,然后在球心位置放置一个光源,再将一个涂有感光膜的胶片卷成一个直径与篮球相同的圆筒包住篮球,转动圆筒使圆筒与篮球的切线位于一条经线上(这条经线称为中央子午线),将球心光源打亮,透光的赤道线和经线会在圆筒感光膜上曝光并留下线条,将圆筒胶片取下显影处理后展平即得如图 1.5 所示的照片,紧邻中央子午线的两条子午线分别称为“左边子午线”和“右边子午线”。图 1.5 中,保留中央子午线、左边子午线、右边子午线、赤道线,去掉其余子午线后即得如图 1.6 所示的图形。图 1.6 中,以赤道线作为 Y' 轴、中央子午线作为 X' 轴、赤道线与中央子午线交点作为坐标原点