

测绘地理信息行业职业技能培训教材

测量基础

CELIANG JICHU

自然资源部职业技能鉴定指导中心 编



黄河水利出版社

测绘地理信息行业职业技能培训教材

测量基础

自然资源部职业技能鉴定指导中心 编

贵州师范学院内部使用

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以基础测量工作流程为主线,完整地体现了从零开始直至完成地形测图并最终进行验收与提交资料的全部过程。全书共分九章,包括测绘基础知识、水准仪及其使用、全站仪及其使用、平面控制测量、高程控制测量、GNSS 定位测量、大比例尺地形图测绘、误差基本理论、地形图的应用。

本书是测绘地理信息行业开展职业技能评价的指定培训教材,亦可供测绘地理信息行业技术人员、技能人员或有关院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

测量基础/自然资源部职业技能鉴定指导中心编. —郑州:黄河水利出版社,2019. 6

测绘地理信息行业职业技能培训教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 2425 - 3

I. ①测… II. ①自… III. ①测量学 - 技术培训 - 教材
IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 126473 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13.75

字数:335 千字

印数:1—10 000

版次:2019 年 6 月第 1 版

印次:2019 年 6 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

测绘地理信息行业职业技能 培训教材编委会

主任

吴卫东 自然资源部职业技能鉴定指导中心副主任
郭增长 河南测绘职业学院院长

副主任

曾晨曦 自然资源部职业技能鉴定指导中心职业技能处处长
侯方国 河南测绘职业学院教务处处长
余甫坤 黄河水利出版社总编辑

编委

周 荣	朱文军	王春祥	李宏超	柴炳阳	苏晓庆	付 璇
王 琦	曹一辛	孙 靖	朱 妍	刘 鹏	薛雁明	陈 琳
李长青	王军德	张凤录	庞尚益	谢征海	黄 洁	朱风云
汤清伟	葛中华	丁晓波	柯尊杰	杨玉忠	郭夏臣	周 靖
李 冲	朱志军	李 华	王 虹	郭宝宇	胡 炜	赵利平
冯俊娜	李晓红	母建茹				

《测量基础》编审人员

主 编 周 荣 曾晨曦
副主编 李宏超
审 稿 王军德 张凤录 杨玉忠
统 稿 侯方国

前 言

党的十九大提出,“建设知识型、技能型、创新型劳动者大军,弘扬劳模精神和工匠精神,营造劳动光荣的社会风尚和精益求精的敬业风气”。开展职业技能培训,是提升劳动者就业创业能力、扩大就业的重要举措,是中国经济迈向高质量发展的重要支撑。

测绘地理信息行业是一个技术密集型行业,行业发展极大地依赖技术方法和仪器装备的变革。改革开放以来,从最初的大平板、经纬仪、小笔尖,到资源三号测绘卫星遨游太空,航空摄影测量飞机、无人机俯瞰大地,各类移动测量系统扫描地面,探地雷达深入地下测绘;从以光学仪器为标志的传统测绘技术体系,到以航空航天遥感、卫星导航定位、地理信息系统为核心的数字化测绘技术体系,再到以数据获取实时化、数据处理自动化、数据管理智能化、信息服务网络化、信息应用社会化为特征的信息化测绘技术体系,科技进步有力地推动了测绘生产方式的重大变革,使测绘生产力水平发生质的飞跃。特别是在现代高新技术发展的大力推动下,测绘地理信息技术与移动互联网、大数据、云计算、人工智能等跨界深度融合,催生出许多新业态、新产品、新服务。新形势下,测绘地理信息人还肩负起为自然资源管理提供科学支撑和决策依据的新使命。

人才是事业发展的第一资源。技能人才是我国测绘地理信息人才队伍的重要组成部分,在加快产业优化升级、提高企业竞争力、推动技术创新和科技成果转化等方面具有不可替代的重要作用。近年来,我国测绘地理信息行业技能人才队伍不断壮大,社会需求日益旺盛。为贯彻落实党中央、国务院对“加强职业技能培训、提升职业技能”的决策部署,推动测绘地理信息技能人才队伍的建设,提升行业从业人员和相关院校师生的职业技能水平,我们组织有关单位和人员编写了本套职业技能培训教材。本套教材是测绘地理信息行业开展职业技能评价的指定培训教材,亦可供测绘地理信息行业技术人员、技能人员或有关院校师生参考使用。

本套教材涉及面广,内容翔实,结构合理,通俗易懂,统筹考虑了理论知识和生产实践的关系,注重理论与实际相联系,力求实现知识和技能相统一。本套教材与国家职业技能标准紧密结合,同时依据最新的行业技术标准和规范,引入许多生产实例,并融入许多新技术和新方法,注重实际操作能力培养,具有较强的实用性和指导性。

本套教材由自然资源部职业技能鉴定指导中心组织编审,河南测绘职业学院牵头承担本套教材的编写工作,测绘地理信息行业许多单位的资深专家应邀承担了本套教材的审稿工作,提出了许多宝贵的意见和建议。黄河水利出版社对本套教材的出版发行给予了大力支持。在此,对参与本套教材编审和出版发行的有关单位和个人一并表示衷心感谢!

广大读者在使用过程中如发现问题,可及时向自然资源部职业技能鉴定指导中心反映,以便今后修订完善。

测绘地理信息行业职业技能培训教材编委会

2019年6月

编写说明

本书是根据中华人民共和国人力资源和社会保障部、中华人民共和国自然资源部 2019 年共同颁布的测绘地理信息行业系列国家职业技能标准编写的测绘地理信息行业职业技能培训教材,是全套教材的基础册,与其他各册配合,可供相应职业培训使用。本书可供测绘地理信息行业技术人员、技能人员作为工具书参考,亦可供相关院校测绘地理信息类专业及相关专业师生作为教材使用。

本书在原国家测绘局人事司、国家测绘局职业技能鉴定指导中心编写的鉴定教材《测量基础》的基础上进行改编,根据测绘科学技术的发展和仪器装备的进步,将原教材文稿中相对陈旧的知识、技术和方法进行了调整和删减,将新知识、新技术、新方法引入教材。本书以基础测量工作流程为主线,完整地体现了从零开始直至完成地形测图并最终进行验收与提交资料的全部过程。全书共分九章。通过学习可以使学习者掌握基础测量工作的基本理论知识及基本技能,培养其分析问题和解决问题的能力,形成良好的学习方法,具备优良的职业素养,为今后深层次学习、解决实际生产问题及职业生涯的可持续发展奠定良好基础。

本书的内容按照职业技能标准对测绘类地理信息各职业应知应会的基础知识要求组织编写。技术标准主要依据《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)、《三、四等水准测量规范》(GB/T 12898—2009)、《1:500 1:1 000 1:2 000 外业数字测图技术规程》(GB/T 14912—2017)、《国家基本比例尺地图图式 第 1 部分:1:500 1:1 000 1:2 000 地形图图式》(GB/T 2025.7—2017)等。

本书由周荣、曾晨曦任主编,李宏超任副主编,陈刚、王大伟、黄静静、付璇参与编写,全书由侯方国统稿。在编写过程中,参阅了有关教材和资料,听取了许多专家和老师的意见,得到了测绘地理信息行业职业技能培训教材编委会的诸多指导,福建经纬测绘信息有限公司王军德、北京市测绘设计研究院张凤录、天津市测绘院杨玉忠等三位专家进行了认真细致的审稿,提出了许多宝贵意见。在此,对给予指导的专家、审稿人表示衷心的感谢!对黄河水利出版社为本教材顺利出版给予的大力支持表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免会有错漏和不足之处,恳请广大读者提出宝贵的意见和建议,以便今后加以修订和完善。

编者
2019 年 6 月

目 录

前 言

编写说明

第一章 测量基础知识	(1)
第一节 测绘学任务和作用	(1)
第二节 地球的形状和大小	(4)
第三节 参考椭球体	(6)
第四节 测量坐标系的概念	(8)
第五节 高斯投影	(14)
第六节 地形图的分幅与编号	(17)
第七节 地形图的认识	(26)
第八节 地形测量作业概述	(33)
第九节 测绘仪器的使用、保养及资料保密	(34)
第二章 水准仪及其使用	(41)
第一节 高程测量概述	(41)
第二节 水准测量基本原理	(42)
第三节 水准测量仪器	(44)
第四节 水准仪的使用	(49)
第五节 水准仪的检验与校正	(51)
第六节 自动安平水准仪及电子水准仪	(55)
第三章 全站仪及其使用	(60)
第一节 角度测量概述	(60)
第二节 全站仪使用	(61)
第三节 水平角测量	(65)
第四节 垂直角测量	(72)
第五节 距离测量	(74)
第六节 全站仪检验与校正	(78)
第七节 角度观测误差来源	(82)
第四章 平面控制测量	(86)
第一节 平面控制测量概述	(86)
第二节 导线测量	(89)
第三节 坐标计算的基本原理	(92)
第四节 导线测量内业计算	(97)

第五节	导线测量错误检查	(106)
第五章	高程控制测量	(108)
第一节	水准路线测量	(108)
第二节	水准测量高程计算	(118)
第三节	水准测量的误差来源	(121)
第四节	三角高程测量	(126)
第六章	GNSS 定位测量	(132)
第一节	GNSS 简介	(132)
第二节	GNSS 定位方法	(139)
第三节	GNSS 定位误差	(149)
第七章	大比例尺地形图测绘	(153)
第一节	数字测图作业概述	(153)
第二节	大比例尺测图技术设计	(155)
第三节	地物的测绘	(157)
第四节	地貌的测绘	(162)
第五节	地形图测绘综合取舍的一般原则	(170)
第六节	地形测图的精度	(171)
第七节	地形测图的收尾工作	(173)
第八节	大比例尺数字地形图质量控制	(175)
第八章	误差基本理论	(179)
第一节	测量误差	(179)
第二节	评定精度的指标	(184)
第三节	误差传播定律及其应用	(186)
第四节	不等精度观测	(194)
第九章	地形图的应用	(200)
第一节	地形图常见几何要素量测	(200)
第二节	地形图在工程建设中的应用	(202)
第三节	电子地图的应用	(207)
参考文献	(210)

第一章 测量基础知识

第一节 测绘学任务和作用

一、测绘学的内容和任务

测绘是指对自然地理要素或者地表人工设施的形状、大小、空间位置及其属性等进行测定、采集、表述以及对获取的数据、信息、成果进行处理和应用的活动的。

测绘学是研究测定和推算地面点的几何位置,地球的形状、大小及地球重力场,据此测量地球表面自然形态和人工设施的几何分布,并结合某些社会信息和自然信息的地球分布,编制全球和局部地区各种比例尺的地图及专题地图的理论与技术的学科,是地球科学的重要组成部分,现代测绘学的技术已部分应用于其他行星和月球上。

测绘学按照研究的范围、研究对象及采用技术手段的不同,分为以下几个分支学科:大地测量学、摄影测量学、地图制图学、工程测量学、海洋测绘学。

(一)大地测量学

大地测量学是研究地球表面及外层空间点位的精密测定,确定地球的形状、大小、重力场、整体与局部运动和地表面点的几何位置以及它们的变化理论与技术的学科。大地测量学是测绘学各分支学科的理论基础,基本任务是建立地面控制网、重力网,精确测定控制点的空间位置,为地形测图提供控制基础,为各类工程测量提供依据,为研究地球形状、大小、重力场及其变化,地壳形状及地震预报提供信息。现代大地测量学包括三个基本分支:几何大地测量学、物理大地测量学和空间大地测量学。

(二)摄影测量学

摄影测量学是研究摄影影像与被摄物体之间内在集合和物理关系,进行分析、处理和解释,以确定被摄物体的形状、大小和空间位置,并判定其性质的一门学科。

从不同角度对摄影测量学进行如下分类:按距离远近分有航空摄影测量、航天摄影测量、地面摄影测量、近景摄影测量和显微摄影测量;按用途分有地形摄影测量和非地形摄影测量;按技术处理方法分,则有模拟法摄影测量、解析法摄影测量和数字摄影测量。

(三)地图制图学

地图制图学是研究模拟和数字地图的基础理论、设计、编绘、复制的技术方法以及应用的学科。

地图制图学由理论部分、制图方法和地图应用三部分组成。地图是测绘工作的重要产品形式。学科发展促使地图产品从模拟地图向数字地图转变,从二维静态向三维立体、四维动态转变,利用遥感技术获得的信息进行遥感图像制图,利用虚拟现实技术实现对现实环境的模拟,借助特殊装备,可使用户有身临其境的感觉。计算机制图技术和地图数据库的发展,促使地理信息系统(GIS)产生,数字地图的发展及广泛的应用领域为地图学的发展和地

图的应用展现出光辉的前景,使数字地图成为 21 世纪测绘工作的基础和支柱。

(四) 工程测量学

工程测量学是研究工程建设和自然资源开发中,在规划、勘探设计、施工和运营管理各个阶段进行的控制测量、大比例尺地形图测绘、地籍测绘、施工放样、设备安装、变形监测及分析与预报等的理论和技术的学科。

工程测量学是一门应用学科,按其研究的对象可分为:建筑工程测量、水利工程测量、矿山测量、铁路工程测量、公路工程测量、输电线路与输油管道测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、港口工程测量、军事工程测量、城市建设测量以及三维工业测量、精密工程测量、工程摄影测量等。

(五) 海洋测绘学

海洋测绘学是以海洋水体和海底为对象,研究海洋定位、测定海洋大地水准面和平均海面、海底和海面地形、海洋重力、海洋磁力、海洋环境等自然和社会信息的地理分布及编制各种海图的理论与技术的学科。内容包括海洋大地测量、海道测量、海底地形测量和海图编制。

二、测绘科学的发展

20 世纪 80 年代前,数据采集多采用常规光学仪器,随着计算机软硬件、电子测绘仪器的迅速发展,大比例尺地形图测绘技术由传统的白纸测图向自动化、数字化方向发展。现在,地面数字测图技术已广泛应用于大比例尺地形图和地籍图、房产图的测绘中,完全取代了传统的白纸测图方法,使测量学的内容得到了发展和更新。20 世纪末,以全球定位系统(global navigation satellite system,简称 GNSS)、遥感(remote sensing,简称 RS)和地理信息系统(geographical information system,简称 GIS)——3S 技术为代表的现代测绘技术得到很快的发展并已普遍应用于测绘生产中。

3S 技术大大促进了数据获取方式的转变,地面数据获取从传统的光学仪器(经纬仪、水准仪、平板仪等)采集过渡到以全站仪、GNSS RTK(real time kinematic)采集、连续运行基准站网(continuously operating reference stations)。

数字测绘产品主要包括数字线划图 DLG(digital line graph)、数字高程模型 DEM(digital elevation model)、数字栅格图 DRG(digital raster graphic)、数字正射影像图 DOM(digital orthophoto map)。这四项数字产品常简称为“4D”产品。

(1) 数字线划图 DLG 是与现有线划基本一致的各地图要素的矢量数据集,且保存各要素间的空间关系和相关的属性信息。在数字测图中,最为常见的产品就是 DLG,外业测绘最终成果一般就是 DLG。DLG 的技术特征为:地图地理内容、分幅、投影、精度、坐标系统与同比例尺地形图一致。图形输出为矢量格式,任意缩放均不变形。

(2) 数字高程模型 DEM 是一定范围内规则格网点的平面坐标(X, Y)及其高程(Z)的数据集,它主要是描述区域地貌形态的空间分布,是通过等高线或相似立体模型进行数据采集(包括采样和量测),然后进行数据内插而形成的。DEM 是对地貌形态的虚拟表示,可派生出等高线、坡度图等信息,也可与 DOM 或其他专题数据叠加,用于与地形相关的分析应用,同时它本身还是制作 DOM 的基础数据。

(3) 数字栅格图 DRG 是根据现有纸质、胶片等地形图经扫描和几何纠正及色彩校正

后,形成在内容、几何精度和色彩上与地形图保持一致的栅格数据集。

(4)数字正射影像图 DOM 是对航空(或航天)像片进行数字微分纠正和镶嵌,按一定图幅范围裁剪生成的数字正射影像集。它是同时具有地图几何精度和影像特征的图像。

随着计算机技术的迅猛发展,以及电子全站仪、GPS-RTK 技术等先进测量仪器和技术的广泛应用,地形测量已由过去传统的作业方式向自动化和数字化方向迅猛发展,由此应运而生出数字化测图技术。数字化测图实质上是一种全解析机助测图方法,这种方法主要表现在以下几方面:图解法测图的最终成果是地形图,图纸是地形信息的唯一载体;数字化测图地形信息的载体是计算机的存储介质(磁盘或光盘),其提交的成果是可供计算机处理、远距离传输、多方共享的数字地形图数据文件,通过数控绘图仪可输出地形图。另外,利用数字地形图可生成电子地图和数字地面模型(DTM)。更具深远意义的是,数字地形信息作为地理空间数据的基本信息之一,成为地理信息系统(GIS)的重要组成部分。数字化测图是地形测量发展过程中的一次根本性的技术变革,是地形测量的必然发展趋势,越来越受到生产单位的重视和用户的青睐。

三、测绘科学技术的地位和作用

测绘科学技术的应用范围非常广阔,测绘科学技术在国民经济建设、国防建设以及科学研究等领域,都占有重要的地位,测绘工作者常被称为国民经济建设的“尖兵”,不论是国民经济建设还是国防建设,其勘测、设计、施工、竣工及运营等阶段都需要测绘工作,而且都要求测绘工作“先行”。

(1)在国民经济建设方面,测绘信息是国民经济和社会发展规划中最重要的基础信息之一。例如,农田水利建设、国土资源管理、地质矿藏的勘探与开发、交通运输的设计、工矿企业和城乡建设的规划、海洋资源的开发、江河的治理、大型工程建设、土地利用、土壤改良、地籍管理、环境保护、旅游开发等,都必须首先进行测绘,并提供地形图与数据等资料,才能保证规划设计与施工的顺利进行。因此,测绘工作者常被誉为国民经济建设的先锋。在其他领域,如地震灾害的预报、航天、考古、探险,甚至人口调查等工作中,也都需要测绘工作的配合。

(2)在国防建设方面,测绘工作为打赢现代化战争提供测绘保障。如各种军事工程的设计与施工、远程导弹、人造卫星或航天器的发射及精确入轨、战役及战斗部署、各军兵种军事行动的协同等,都离不开地图和测绘工作的保障。所以,人们形象地称地形图是“指挥员的眼睛”。

(3)在科学研究方面,诸如航天技术、地壳形变、地震预报、气象预报、滑坡监测、灾害预测和防治、环境保护、资源调查以及其他科学研究中,都要应用测绘科学技术,需要测绘工作的配合。地理信息系统(GIS)、数字城市、数字中国、数字地球的建设,都需要现代测绘科学技术提供基础数据信息。

中华人民共和国成立近 70 年来,我国测绘工作的主要成就有:①在全国范围内(除台湾外),建立了高精度的大地控制网,统一了坐标系统与高程系统;②完成了国家基本比例尺地形图的测绘,测图比例尺随着我国经济建设发展的需要逐步增大,测图方法从以平板仪地形测量和模拟立体摄影测量为主,发展到以内外业一体化地面数字测图和全数字摄影测量为主;③编制和出版各种地图、专题图及其地图集,制图逐渐实现从手工编绘向数字化、自

动化过渡;④制定了各种测绘技术规范和法规,统一了技术规格和精度指标;⑤建立了从中等测绘职业教育到高等测绘教育的完整教育体系,培养和造就了大量测绘技术人才;⑥测绘技术步入世界先进行列,向着数字化、自动化和智能化方向发展,近十年来,研制出了大量具有世界先进水平的测绘软件,如全数字摄影测量系统——VirtuoZo,面向对象的地理信息系统——GeoStar(吉奥之星),地理信息系统软件平台——MapGIS,数字测图系统——北京山维的EPS地理信息工作站、南方测绘的CASS等;⑦测绘仪器的制造从无到有,不仅能生产各种不同等级的光学经纬仪、水准仪、平板仪等,还能批量生产电子经纬仪、电磁波测距仪、自动安平水准仪、全站仪、GNSS接收机、解析测图仪等。

测绘工作是一项精细而严谨的工作。测绘成果、成图质量的好坏对各项建设有着重大的影响。我国幅员辽阔,物产丰富,建设事业蓬勃发展,测绘任务十分繁重。为了适应时代的发展和现代化测绘技术的需要,我们必须努力学习专业知识,勇于实践,培养刻苦钻研的良好学风;要树立同心协力,不避艰辛,对人民高度负责任的思想作风;要发扬测绘技术人员真实、准确、细致、及时完成任务的优良传统,担负起艰辛而光荣的测绘使命,为祖国的现代化建设贡献力量。

第二节 地球的形状和大小

测量工作研究的主要对象是地球的自然表面(地球在长期的自然变化过程中形成的表面),即岩石圈的表面。它是一个形状极其复杂而又不规则的曲面。地面上有高山、丘陵、平原、江河、湖泊、海洋等。例如,我国西藏与尼泊尔交界处的珠穆朗玛峰高达8 844.43 m,而在太平洋西部的马里亚纳海沟深达11 034 m。不过,从整体来看,地面的起伏与地球的平均半径(约6 371 000 m)相比是微不足道的。就像月亮上的环形山一样,虽然高达数千米,但我们从地球上看,月亮仍然是一个光滑而滚圆的球体。因此,仅从某一局部地区来推断,很难确定出地球的整体形状和大小。正所谓“横看成岭侧成峰,远近高低各不同。不识庐山真面目,只缘身在此山中”。

通过长期的测绘工作和科学调查,人们了解到地球表面上的海洋面积约占71%,陆地面积约占29%。我们可以把地球总的形状看成是一个被海水包围的形体,也就是设想一个静止的海水面(没有波浪、无潮汐的海水面)向大陆内部延伸、最后包围起来的闭合形体。我们将海水在静止时的表面叫作水准面(水在静止时的表面)。水准面有无穷多个,其中一个与平均海面重合并延伸到大陆内部,且包围整个地球的特定重力等位面叫作大地水准面。它是一个没有皱纹和棱角的、连续的封闭曲面。大地水准面是决定地面点高程的起算面。由大地水准面所包围的形体叫作大地体,通常认为大地体可以代表整个地球的形状。

水准面是一个曲面,通过水准面上某一点而与水准面相切的平面称为过该点的水平面。水准面的物理特征包括:水准面处处都与其铅垂线方向相垂直。铅垂线方向又称为重力方向。重力是地球引力和离心力的合力,地球表面离心力与引力之比约为1:300,所以重力方向主要取决于引力方向。由于地球内部物质分布不均匀,就使得地面各点铅垂线方向发生不规则的变化,因此大地水准面实际上是个略有起伏而不规则的光滑曲面,如图1-1所示。显然,要在这样的曲面上进行各种测量数据的计算和成果、成图的处理是相当困难的,甚至是不可能的。然而,人们经过长期的精密测量,发现大地体是一个十分接近于一个两极稍扁

的旋转椭球体,所以称这个与大地体形状和大小十分接近的旋转椭球体为地球椭球体。它是一个数学曲面(能够用数学公式表达的规则曲面),用 a 表示地球椭球体的长半径, b 表示其短半径,则地球椭球体的扁率 f 为

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (1-1)$$

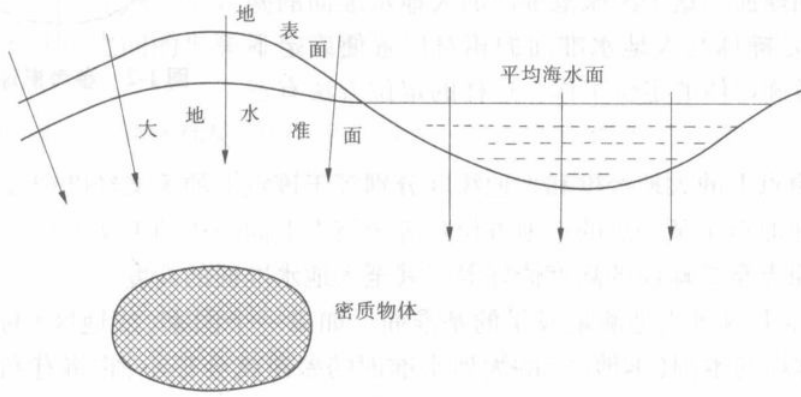


图 1-1 大地水准面示意图

所以地球椭球的几何参数用 a, f 表示即可。其值以前是用弧度测量和重力测量的方法测定,现代结合卫星大地测量资料可以得出更精确的结果。世界各国推导和采用的地球椭球几何参数很多,现摘录几种典型的地球椭球几何参数以作参考(见表 1-1)。

表 1-1 地球椭球几何参数

椭球	长半轴 a (m)	扁率 f	备注
克拉索夫斯基	6 378 245	1:298.3	苏联;1954 年北京坐标系采用
1975 国际椭球	6 378 140	1:298.257	IUGG 第 16 届大会推荐值;1980 西安坐标系采用
WGS84 椭球	6 378 137	1:298.257 223 563	美国国防部制图局(DMA)
CGCS2000	6 378 137	1:298.257 222 101	中国;CGCS2000 国家大地坐标系采用

注:IUGG 为国际大地测量与地球物理联合会(international union of geodesy and geophysics)。

由于参考椭球体的扁率很小,当测区面积不大时,在普通测量中可把地球近似地看作圆球体,其半径为

$$R = \frac{a + a + b}{3} \approx 6\,371(\text{km}) \quad (1-2)$$

一个国家为了处理自己的大地测量成果,首先要在地面上适当的位置选择一点作为大地原点(推算地面点大地坐标的起算点),用于归算地球椭球定位结果,并作为观测元素归算和大地坐标计算的起算点;进而采用与地球大小和形状接近的并确定了与大地原点关系

的地球椭球体,称为参考椭球体,其表面称为参考椭球面。

如图1-2所示,在地面上适当地方选择一点 P ,设想把椭球与大地体相切,切点 P' 位于 P 点的铅垂线方向上。这时,椭球面上的 P' 点的法线与大地水准面的铅垂线相重合,使椭球的短轴与地轴保持平行,其赤道面与地球赤道面平行,且椭球面与这个国家范围内的大地水准面的差距尽量小。于是椭球与大地水准面的相对位置便确定下来,这就是参考椭球体的定位工作。这样的定位方法有三点要求:

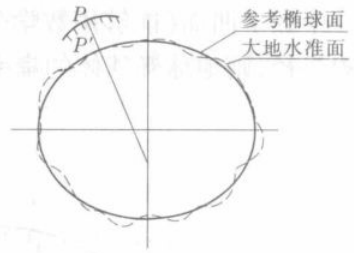


图1-2 参考椭球定位示意图

- (1)大地原点上的大地经度和大地纬度分别等于该点上的天文经度和天文纬度。
- (2)由大地原点至某一点的大地方位角等于该点上同一边的天文方位角。
- (3)大地原点至椭球面的高度恰好等于其至大地水准面的高度。

参考椭球面是处理大地测量成果的基准面。如果一个国家(或地区)的参考椭球选定适当,参考椭球面与本国(本地区)的大地水准面的差距就会很小,它将有利于测量成果的处理。

我国所采用的参考椭球几经变化。中华人民共和国成立前,曾采用海福特椭球;中华人民共和国成立后,采用的是克拉索夫斯基椭球。由于克拉索夫斯基椭球参数与1975 IUGG推荐椭球相比,其长半轴差105 m,而1978年我国根据自己掌握的测量资料推算出的地球椭球为 $a=6\,378\,140\text{ m}$, $f=1:298\,257$,这个数值与1975 IUGG推荐椭球十分接近,因此我国决定自1980年采用1975 IUGG推荐椭球(见表1-1)作为参考椭球,它将更适合我国大地水准面的情况,从而使测量成果的归算更准确。

第三节 参考椭球体

当参考椭球确定以后,地面上点的位置可以用它在参考椭球面上的投影和该点的高程来表示。参考椭球体上有些点、曲线或平面有特殊意义(见图1-3),为了更好地理解参考椭球面,我们首先介绍这些重要的点、线、面。

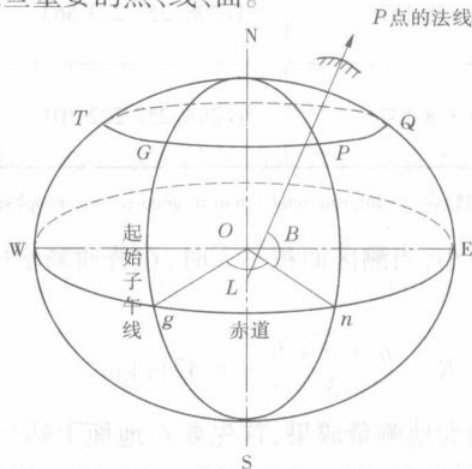


图1-3 参考椭球体的主要点、线、面

一、参考椭球面上主要的点、线、面

参考椭球旋转时所绕的短轴 NS 称为旋转轴,又称为地轴。它通过椭球中心 O 。旋转轴与参考椭球面的交点称为极点。在北端的极点 N 称为北极;在南端的极点 S 称为南极。

包含旋转轴 NS 的任一平面称为一个子午面。子午面有无数多个。子午面与参考椭球的交线(椭圆)称为子午圈。旋转椭球面上所有子午圈的形状都相同。通过参考椭球面上一点 P 的子午圈两极之间的半椭圆 NPS 称为过 P 点的子午线,或经线。各经线均通过南北两极。

国际上公认通过英国格林尼治(Greenwich)天文台的子午面,称为首子午面或起始子午面;通过格林尼治天文台的子午线称为首子午线,或称起始子午线、起始经线,亦称本初子午线。

垂直于旋转轴 NS 的任一平面与参考椭球面的交线称为纬线或称纬圈,如图 1-3 中圆 TPQ ,所有纬线都是相互平行的同轴圆,所以纬线又称平行圈。

过参考椭球中心且垂直于旋转轴 NS 的平面(见图 1-3 中的 $WgnE$ 平面),称为赤道面;赤道面与参考椭球面的交线称为赤道。赤道是所有平行圈中半径最大的圆。

过参考椭球面上任一点 P 而垂直于该点切平面的直线称为过 P 点的法线。椭球面上只有在赤道上的点和极点的法线才通过椭球中心;其他点的法线都与短轴相交但却不通过椭球中心。

通过参考椭球面上任一点 P 的法线且与子午面垂直的平面称为 P 点的卯酉平面。卯酉平面与椭球面的交线称为 P 点的卯酉圈。卯酉圈的形状是椭圆,不同点的卯酉圈形状一般不相同。在参考椭球面上任一点,子午圈与卯酉圈正交(垂直相交)。可以认为,该点子午线的方向为正北正南方向(真子午方向),卯酉圈的方向为正东正西方向。

在参考椭球面上任一点(非极点)处,子午圈、卯酉圈及纬圈的关系是:纬圈、卯酉圈相切,而且都垂直于子午圈,图 1-3 中椭圆 EPW 为 P 点的卯酉圈。

曲面上两点长度最短的曲线,叫作短程线。在球面上,过两点的所有曲线中长度最短的是过这两点的大圆弧(劣弧),其长度就是球面上两点之间的距离(弧长)。椭球面上的短程线一般来说不是平面曲面,也不能用一个简单的方程表示出来。

二、大地线

在平面上,“距离”的概念很简单,这便是平面上两点之间最短连线(直线段)的长度;在球面上,两点之间的大圆弧(劣弧)的长度就是这两点之间的距离。但是,地球的自然表面是一个不规则的曲面,即使用参考椭球面来代替它,也不容易简单说清楚两点之间的“距离”问题。

我们可以想象,通过地面上两点,在地球的自然表面上可以画出很多条曲线。这些曲线的长度不尽相同,把其中最短的一条曲线的长度作为地面上这两点之间的“距离”似乎是很自然的。不过,这样定义的“距离”很难通过测量手段来得到。

当我们把地面(自然表面)上的点投影到参考椭球面(数学曲面)上后,参考椭球面上相应投影点之间最短连线,称为大地线,也就是上面提到的短程线。参考椭球面上两点之间的大地线(短程线)的长度就是这两点之间的距离。

三、平均曲率半径、密切球面

由于椭球面上短程线不是平面曲线,也不能用一个简单的方程表示出来,实际应用中往往在一点 P 附近的一定范围内,用一个球面来代替椭球面,如图 1-4 所示。所选的球面中心不是在旋转椭球的几何中心或地球的质心,而是在旋转椭球面的“曲率中心” Q (在椭球面的法线与旋转轴的交点),其半径等于旋转椭球面的平均曲率半径

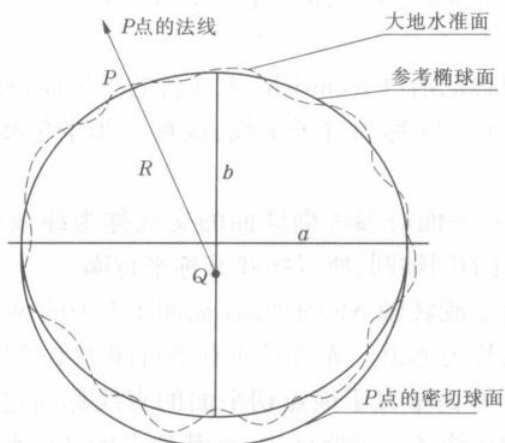


图 1-4 在一定范围内以球面代替参考椭球面

$$R = \sqrt{MN} = \frac{a \sqrt{1 - e^2}}{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \quad (1-3)$$

式中, φ 为 P 点的纬度; a 为参考椭球的长半径; e 为子午圈(椭圆)的离心率; M 为 P 点的子午曲率半径; N 为 P 点的卯酉曲率半径,分别为

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3}} \quad (1-4)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (1-5)$$

这样的球面称为旋转椭球面在 P 点的密切球面,它的球心在椭球面的曲率中心 Q ,半径等于椭球面上 P 点的平均曲率半径 R ,法线与椭球面的法线重合,如图 1-4 所示。

对于我国当前采用的 1975 IUGG 推荐椭球

$$a = 6\,378\,140 \text{ m}, e^2 = 0.006\,694\,384$$

在中纬度($\varphi = 40^\circ$)地区

$$M_{40^\circ} = 6\,361\,819 \text{ m}, N_{40^\circ} = 6\,386\,979 \text{ m}, R_{40^\circ} = 6\,374\,387 \text{ m}$$

由于地球的扁率很小,密切球面在 P 点相当大的范围内可以很好的拟合参考椭球面或大地水准面(见图 1-4)。

第四节 测量坐标系的概念

测量工作的根本任务是确定地面点的位置。要确定地面点的空间位置,通常是求出该

点相对于某基准面和基准线的三维坐标或二维坐标。由于地球自然表面高低起伏变化较大,要确定地面点的空间位置,就必须要有一个统一的坐标系。

一、地理坐标系

地理坐标系属球面坐标系,根据不同的基准面,又分为天文地理坐标系和大地地理坐标系。

(一)天文地理坐标系

天文地理坐标系又称天文坐标系,用天文经度 λ 和天文纬度 φ 来表示地面点投影在大地水准面上的位置,如图 1-5 所示。

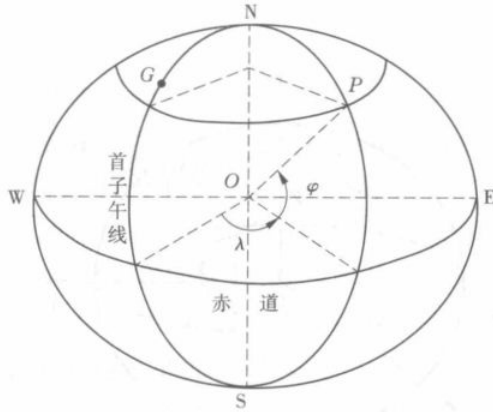


图 1-5 地理坐标系

图中短轴 NS 称为旋转轴,它通过椭球中心 O 。旋转轴与参考椭球面的交点称为极点。在北端的极点 N 称为北极;在南端的极点 S 称为南极。包含旋转轴 NS 的任一平面称为子午面。子午面与参考椭球面的交线(椭圆)称为子午线,或经线。通过英国格林尼治天文台的子午面,称为首子午面或起始子午面;通过格林尼治天文台的子午线称为首子午线,或称起始子午线、起始经线,亦称本初子午线。垂直于旋转轴 NS 的任一平面与参考椭球面的交线称为纬线。

确定球面坐标 (λ, φ) 所依据的基本线为铅垂线,基本面为包含铅垂线的子午面。 P 点的经度 λ 是 P 点的子午面与首子午面所组成的两面角。其计算方法为自首子午线向东或者向西计算,数值在 $0^\circ \sim 180^\circ$,向东为东经,向西为西经。 P 点的纬度 φ 是通过 P 点的铅垂线与赤道平面的交角,其计算方法为自赤道起向北或向南计算,数值在 $0^\circ \sim 90^\circ$,在赤道以北为北纬,在赤道以南为南纬。天文地理坐标可以在地面点上用天文测量的方法测定。

(二)大地地理坐标系

大地地理坐标系用大地经度 L 和大地纬度 B 表示地面点投影在地球椭球面上的位置。地面上一点的空间位置可以用 (L, B, H) 表示。过参考椭球面上任一点 P 的子午面与首子午面的夹角 L ,称为该点的大地经度,简称经度。经度由首子午面向东为正,从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为东经;向西为负,从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为西经。在同一子午线上的各点,其经度相同,地面上任意两点的经度之差称为经差,用 ΔL 表示。过参考椭球面上任一点 P 的法线与赤道面的夹角 B ,称为该点的大地纬度,简称纬度。纬度由赤道面向北为正,从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为北纬;向南