



浙江省高等教育重点建设教材

测量学

■ 陈丽华 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

浙江省高等教育重点建设教材

测 量 学

陈丽华 主编

杜国标 张 豪 赵良荣 副主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

测量学/陈丽华主编. —杭州:浙江大学出版社,
2009.3
ISBN 978-7-308-06630-3

I. 测… II. 陈… III. 测量学—高等学校—教材 IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 026694 号

内容提要

本书共分十四章,第一章为测量基础知识;第二至第四章为测量的基本工作,即水准测量、角度测量、距离测量;第五章为测量误差及测量平差;第六至第七章为定向测量及小地区控制测量;第八至第十章为地形图的基本知识、地形图的测绘、地理空间信息的应用;第十一章为施工测量基本工作;第十二章为建筑工程施工测量;第十三章为线路工程施工测量;第十四章为建筑物的变形监测。

本书可作为高等学校土木、交通、规划、水利、农林、资源环境等专业的教材,也可作为注册结构工程师、注册岩土工程师基础考试的学习用书,还可供有关工程技术人员参考。

测 量 学

陈丽华 主编

责任编辑 沈国明

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 者 杭州求是图文排版有限公司

印 刷 临安市曙光印务有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 18

字 数 450 千

版 印 次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-06630-3

定 价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

本书根据高等学校测量学课程的教学大纲要求,本着培养高素质人才、提高教学质量的目的,结合新形势下高等教育的发展要求,由浙江省有关高校的测量教师在多次学术交流、教学研讨、使用修改、反复实践的基础上编写而成,并列入了浙江省高等教育重点建设教材。

本书强调了测量基本知识、基本理论和基本技能,也有测绘新技术、新仪器、新方法。全面采用了2008年最新颁布实施的中华人民共和国国家标准《工程测量规范》(GB50026—2007)、《国家基本比例尺地图图式第1部分1:500,1:1000,1:2000地形图图式》(GB/T20257.1—2007),紧密结合最新的工程测量发展方向,力求符合我国的工程实际,拓宽了专业知识面。本书专业覆盖面广,具有一定的包容性和选择性,可供各类非测量专业的测量学或工程测量课程使用。

本书由浙江大学陈丽华主编,杜国标、张豪、赵良荣副主编。参加编写的人员有:陈丽华(第一、八、十一、十二、十四章)、浙江大学赵良荣(第二、三、四章)、浙江大学汪孔政(第五、七章)、浙江科技学院杜国标(第六、十三章)、浙江工业大学张豪(第九、十章)。本书由同济大学沈云中教授、潘国荣教授主审,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,请使用本书的教师和读者提出宝贵的意见。

作 者

2009年6月

目 录

第一章 测量基础知识	(1)
第一节 测绘学概述.....	(1)
第二节 地球的形状和大小.....	(6)
第三节 测量坐标系与地面点位的确定.....	(8)
第四节 测量的基本工作与原则.....	(14)
第五节 地球曲率对测量观测量的影响.....	(17)
第二章 水准测量	(20)
第一节 水准测量原理.....	(20)
第二节 水准仪及其使用.....	(21)
第三节 水准测量方法.....	(27)
第四节 微倾式水准仪的检验与校正.....	(34)
第五节 自动安平水准仪.....	(38)
第六节 精密水准仪和电子水准仪.....	(40)
第七节 水准测量的误差来源及注意事项.....	(43)
第三章 角度测量	(47)
第一节 角度测量原理.....	(47)
第二节 光学经纬仪及其使用.....	(48)
第三节 水平角观测.....	(54)
第四节 竖直角观测.....	(57)
第五节 精密经纬仪和电子经纬仪.....	(61)
第六节 经纬仪的检验与校正.....	(65)
第七节 角度测量的误差来源及注意事项.....	(68)
第四章 距离测量	(73)
第一节 钢尺量距.....	(73)
第二节 电磁波测距.....	(77)
第三节 视距测量.....	(80)
第四节 全站仪.....	(82)
第五节 手持激光测距仪.....	(84)
第六节 测距长度的归化投影计算.....	(84)

第五章 测量误差及测量平差	(87)
第一节 测量误差概述	(87)
第二节 偶然误差的特性	(89)
第三节 衡量测量精度的指标	(91)
第四节 误差传播定律	(93)
第五节 测量平差原理	(96)
第六节 等精度观测的直接平差	(96)
第七节 非等精度观测的直接平差	(100)
第六章 定向测量	(106)
第一节 直线定向	(106)
第二节 坐标方位角的推算	(108)
第三节 坐标计算原理	(110)
第四节 罗盘仪测定磁方位角	(111)
第五节 陀螺经纬仪测定真方位角	(112)
第七章 小地区控制测量	(115)
第一节 控制测量概述	(115)
第二节 导线测量	(119)
第三节 交会定点与极坐标法定点	(128)
第四节 三角高程测量	(133)
第五节 全球定位系统(GPS)	(135)
第八章 地形图的基本知识	(142)
第一节 地形图的数学要素	(142)
第二节 地形图的地理要素	(145)
第三节 地形图的整饰要素	(152)
第四节 地形图的分幅与编号	(153)
第五节 数字地形图	(157)
第六节 数字地球	(158)
第九章 地形图的测绘	(162)
第一节 测图的准备工作	(162)
第二节 碎部点的选择	(163)
第三节 地形测量的精度要求	(164)
第四节 地形图的测绘	(166)
第五节 地籍测量	(172)
第六节 数字测图	(175)
第七节 航空摄影测量	(177)

第八节 遥感(RS)	(179)
第十章 地理空间信息的应用	(182)
第一节 地形图的判读	(182)
第二节 地形图应用的基本内容	(183)
第三节 地形图在工程建设中的应用	(185)
第四节 地形图上的面积量算	(189)
第五节 数字地图的应用	(192)
第六节 地理信息系统(GIS)	(193)
第十一章 施工测量基本工作	(197)
第一节 概述	(197)
第二节 施工放样的基本工作	(199)
第三节 平面点位的测设	(201)
第四节 设计坡度的测设	(204)
第五节 铅垂线和水平面的测设	(205)
第十二章 建筑工程施工测量	(208)
第一节 建筑施工控制测量	(208)
第二节 民用建筑施工放样	(212)
第三节 工业建筑施工放样	(219)
第四节 竣工总图的编绘	(224)
第十三章 线路工程施工测量	(226)
第一节 概 述	(226)
第二节 中线测量	(228)
第三节 纵、横断面测量	(238)
第四节 道路施工测量	(247)
第五节 管道施工测量	(254)
第六节 桥梁施工测量	(257)
第七节 隧道施工测量	(259)
第十四章 建筑物的变形监测	(267)
第一节 变形监测的基本要求	(267)
第二节 变形监测的等级划分	(268)
第三节 变形监测方法	(269)
第四节 工业与民用建筑变形监测	(276)
参考文献	(279)

第一章 测量基础知识

第一节 测绘学概述

测绘学是研究地理信息的获取、处理、描述和应用的学科,它主要研究测定、描述地球的形状、大小、重力场、地表形态以及它们的各种变化,确定自然和人造地物、人工设施的空间位置及属性,制成各种地图,建立有关信息系统。

测绘学是一门历史悠久的学科,近几十年来发展极为迅速,新的理论、方法、仪器和技术手段不断涌现。测绘领域早已从陆地扩展到海洋、空间,测绘技术已广泛走向数字化、自动化、信息化,测绘成果已从三维发展到四维、从静态发展到动态。

由于人类活动和各种自然因素的作用,作为测绘主要对象的地表部分始终处在不断变化之中,为了保证各种测绘资料的现势性,满足各方面应用测绘成果的需要,要经常对地球表面进行测绘。

一、测绘工作的作用

测绘工作是一种先行性的工作,它必须根据国家经济建设、国防建设和社会发展的需要,提前提供有关地区的测绘资料。因此,在各项建设项目勘察设计或军事行动展开之前,测量人员必须先进入测区,克服各种困难,提前完成所担负的测绘任务,成为建设和开发的“先行”和“尖兵”。

测绘工作又是一种基础性的工作,关系着各项建设的效益,必须做到一丝不苟,从严要求。测量成果中一个数字的错误,图上一点微小的偏差,都可能给经济建设造成巨大损失,给军事活动带来严重后果。

随着社会经济和科学技术的发展,测绘的重要性日益增强,应用的领域不断扩大,不仅在经济和国防建设中,而且在科研、教育、行政管理以及日常生活中,都已成为不可缺少的工具。我国的社会主义现代化建设愈是向前发展,愈需要测绘工作及时为之提供准确和有效的资料。

在国民经济和社会发展规划中,测绘信息是最重要的基础信息之一,各种规划首先要有规划区的地形图。例如,城市规划要在地形图上开展各种规划设想;农业规划要以地形图为基础,补充农业专题调查资料,编制各种专题地图。我国目前已将基础测绘纳入了国家国民经济和社会发展规划。

在各种工程建设中,测绘是一项重要的前期工作。有精确的测绘成果和地形图,才能保证工程的选址、选线正确,设计出经济合理的方案。一公里线路选线的出入,有可能对工程

的投资以及建成使用后的经济效益产生较大的影响。水库大坝坝址的选定和坝高一米的升降可使淹没面积有很大变动,以致影响若干城镇村落的搬迁。这一千米、一米之差,往往在实地踏勘时不易发现,却不难从精确的测绘成果中找到根据。不仅如此,工程建设的各个阶段都需要充分的测绘保障。在施工中,要通过放样,把已确定的设计精确地落到实地上,这对工程的质量起着相当关键的作用。竣工测绘资料则是工程在交付使用后进行妥善管理的重要依据。对于大型工程建筑,在使用期间定期进行监测,及时发现建筑物的变形和移位,以便采取措施,防止重大事故发生,更是不可忽视的环节。

在国防建设中,军事测量和军用地图的作用尤为明显。特别是现代大规模的诸兵种协同作战,精确的测绘成果更是不可缺少的重要保障。至于远程导弹、空间武器、人造卫星或航天飞行器的发射,要保证它精确入轨,随时校正轨道和命中目标,除了应测算出发射点和目标点的精确坐标、方位、距离外,还必须掌握地球形状、大小的精确数据和有关地球的重力场资料。国家陆海边界和其他管辖区的精确测绘,对巩固国防和保卫国家领土主权完整有重要意义,也与接壤国家友好相处有密切关系。

在国家的各级管理工作中,从工农业生产建设的计划组织和指挥,土地和地籍管理,交通、邮电、商业、文教卫生和各种公用设施的管理,直到社会治安等各个方面,测量和地图资料已成为不可缺少的重要工具。

在发展地球科学和空间科学等现代科学技术方面,测绘工作也起着重要作用。通过对地表形态和地面重力的变化进行分析研究,可以探索地球内部的构造及其变化,通过对地表形态变迁的分析研究,可以追溯各个历史时期地球大气圈、生物圈各种因素的变化。

在提高人们的科学文化水平方面,各种地图和测量成果也很有帮助。在人民日常生活和社会活动中,一图在手往往会带来很大方便。

二、我国测绘学发展概况

中国是世界文明古国,测绘方法出现很早,测绘学的历史可以追溯到 4000 年以前。

《史记·夏本纪》讲到夏禹治水时“左准绳,右规矩,载四时,以开九州,通九道,陂九泽,度九山”,这是见于文字记载的最早的测绘工作,说明在公元前 21 世纪已经使用简单的测量工具了。《周礼·地官司徒》载:“大司徒之职,掌建邦之土地之图……以天下土地之图,周知九州之地域广轮之数,辨其山林川泽丘陵坟衍原隰之名物。”这说明周代就有了地图和掌管地图的官职。春秋战国时期,测绘有了新的发展,从《周髀算经》、《九章算术》、《管子·地图篇》、《孙子兵法》、《孙臬兵法》等书的有关论述中可以看出,那时测量、计算技术以及军事地形图的内容和表现力已经达到了相当高的水平。在长沙马王堆出土的西汉长沙国的地形图、驻军图、城邑图,是迄今发现的最古老最详实的地图,这 3 幅帛图,内容详细、方位精确、设计合理、符号形象、绘制精美,显示了中国当时测绘技术所达到的高水平。魏晋时,刘徽撰《海岛算经》,阐述了求海岛高度和距离的各种测量方法。西晋的裴秀主持编制了《地形方丈图》和《禹贡地域图》,前者是中国全国大地图,后者是反映晋十六州的郡国县邑、山川原泽、境界和地名沿革的大型地图集,并通过实践,总结和提出了分率、准望、道里、高下、方斜、迂直的“制图六体”,奠定了中国古代制图的理论基础。公元 400 年前后,我国发明了记里鼓车,用以测量距离。唐代高僧一行主持进行了世界上最早的子午线测量,在河南平原南北伸展约 200 千米,近似位于同一子午线上的 4 个点上,测量冬至、夏至、春分、秋分中午的日影

长度和北极星高,又用步弓实地丈量了4点间的3段距离,推算北极星高度每差 1° 相应的地面距离。唐朝贾耽制成了高三丈三尺、宽三丈、一寸折地百里(相当于1:150万比例尺)的巨幅《海内华夷图》,图内刻有方格,并用朱、墨两色表示古今地名。现存陕西西安碑林的《华夷图》和《禹迹图》是南宋时石刻,前者是按唐朝贾耽的《海内华夷图》缩制,后者着重水系表示,图上刻有方格,每方折百里,为中国现存最早的“计里画方”地图。北宋沈括编绘了“二寸折一百里”的《天下州县图》,并首次把全部相邻州县间的方位和距离,以数据文字形式记录编制成册,用来精确地恢复原图;他还发明和发展了许多精密易行的测量技术,如用分级筑堰静水水位方法测量汴渠四百多公里沿河段的高差,用水平望尺、千尺和罗盘测量地形,并在世界上最早发现了磁针偏角。四川省荣县发现的北宋石刻《九域宋令图》是中国传世地名最多,且时间最早的政区地图。现存苏州的南宋石刻《平江图》是中国现存最早的最完整的城市规划图。元朝郭守敬创制了多种天文仪器,主持进行了大规模的天文测量,用球面三角解算天文问题;并在长期修渠治水实践中,总结了一套水准测量的经验;且首次以海洋平面为基准,比较不同地点的地势高低,提出了海拔高程的概念。明代郑和七使西洋首次绘制了航海图。明朝罗洪先绘制《广舆图》,首创中国地图大量采用符号表示地貌、地物要素。清康熙年间,开展了大规模的经纬度测量和地形测量,历时10年,测绘范围超过1000万平方公里,于1718年编成著名的《皇舆全览图》,为编制该图,规定了统一的测量尺度,推算出当时有争论的牛顿“地球扁圆说”,在该图上第一次测绘了世界最高峰,注为珠穆朗玛山。清乾隆年间编制的《乾隆内府地图》,在《皇舆全览图》基础上,增加了新疆、西藏两地的测绘资料,最终完成了我国实测地图,而且图幅所及,北至北冰洋、南抵印度洋、西至波罗的海、地中海和红海,它是一幅当时世界上最完全的亚洲大陆全图。

中国古代测绘技术的成就,是中国古代文化科学技术成就的重要组成部分,也是中华民族值得自豪的。我国用现代测绘方法进行测绘,开始于20世纪初。在半殖民地半封建的旧中国,从20世纪初即开始建立了政府的测绘机构,也培养了一些专业测绘人员,开展了一些测绘业务,但由于连年战乱,业务时断时续,没有长远打算和完整的实施方案,也没有全国统一的测量基准与技术标准,测区零散,成图成果大都质量粗劣,培训的测绘专业人员也大多改作他业。

新中国成立以后,测绘事业在极为薄弱的基础上起步,在曲折的道路上前进,取得了很大的成就。主要成就有:建立和统一了全国坐标系统和高程系统,如1954年建立了由前苏联普尔柯沃坐标系联测延伸的1954年北京坐标系,1980年进行全国天文大地网整体平差时,建立了大地原点位于陕西省泾阳县永乐镇的1980年国家大地坐标系,2008年又建立启用了2000年国家大地坐标系;建立了北斗卫星导航定位系统;1956年建立了以青岛验潮站1950—1956年的验潮资料计算确定的平均海面作为高程基准的1956年黄海高程系统,1987年颁布命名了以青岛验潮站1952—1979年验潮资料计算确定的平均海面作为高程基准的1985国家高程基准;建立了遍及全国的国家水平控制网、国家水准网、基本重力网和卫星多普勒网;完成了国家天文大地网的整体平差及国家水准网的整体平差;完成了国家基本图的测制工作,并不断更新,有些地区已测了第二代图、第三代图;完成了南极长城站、中山站的地理位置和高程的测量;于1975年、2005年两次精确测定了珠峰的高程,2005年测量的误差仅为 ± 0.21 米;开展了与邻国的国界勘测工作,树立了界桩,测绘了边界地形图;制订了各种测量技术标准、规范,统一了技术规格和精度要求;出版发行了数万种地图及地图

册;在全国城镇地区及部分农村居民区开展了不动产地籍测绘;在资源勘察和区域规划中进行了大量测绘工作,如土地资源调查、林业资源调查规划、地质区域调查、矿产普查、地质勘探、石油勘探、煤田地质勘探、金属地质勘探、江河流域规划、城市与乡镇规划、海岸带测绘等;在工程建设中更是进行了大量的测绘工作,在工厂建设、矿山建设、铁路建设、公路建设、水利建设、城市建设等方面,测量工作发挥了巨大作用。特别是近几年,我国测绘科技发展更快,广泛应用了“3S”技术(即GPS——全球定位系统、GIS——地理信息系统、RS——遥感),并开展了数字地球、数字测量等工作,使测绘工作向信息化测绘方向发展,使测绘手段与应用领域更为广阔。

三、测绘学的分支学科

测绘也就是测量与地图制图的统称。按研究的对象和目的的不同,测绘学通常可分为以下几种专业分支学科:

1. 大地测量学

研究地球形状、大小和重力场及其变化,通过建立区域和全球三维控制网、重力网及利用卫星测量、甚长基线干涉测量等方法测定地球各种动态的理论和技术的学科叫大地测量学。

大地测量的任务是:为测制地形图和保证工程建设提供基本的平面控制和高程控制;为空间科学技术和军事活动提供精确的地面点坐标、距离、方位及重力值;为研究和测量地球形状、大小和重力场以及为研究地壳形变、地震预报等科学问题提供资料。

大地测量主要通过三角测量、三边测量、导线测量、水准测量、天文测量、重力测量、卫星大地测量、惯性测量、射电干涉测量、椭球面大地测量和测量平差计算等手段,建立国家和地区大地控制网,精确测定地面上各控制点的平面坐标、高程和重力。

2. 普通测量学

测绘学的研究对象主要为地球表面,因为地球表面是个曲面,全球或大区域的测量必须考虑地球曲率的影响。由于地球是个很大的球体,而在较小区域内,可以把曲面近似地当作平面看待,地球曲率的影响较小而不考虑,这种研究地球表面较小区域内测绘工作的基本理论、技术、方法和应用的学科叫普通测量学。普通测量学是测绘学的基础,主要研究内容有图根控制网的建立、地形图的测绘及一般工程的施工测量,具体工作有距离测量、角度测量、高程测量、定向测量、观测数据的处理和绘图等。

3. 摄影测量与遥感学

研究利用电磁波传感器获取目标物的几何和物理信息,用以测定目标物的形状、大小、空间位置,判释其性质及相互关系,并用图形、图象和数字形式表达的理论和技术的学科叫摄影测量与遥感学。

摄影测量是利用摄影像片来测定物体的形状、大小和空间位置、性质和相互关系的。由于摄影像片具有信息容量大、显示客观而细致等特点,摄影测量不仅能用于测绘地形图,而且广泛应用于其他领域。根据像片获得方式的不同,摄影测量可分为地面摄影测量、航空摄影测量、水下摄影测量、航天摄影测量等。

遥感是不接触物体本身,用传感器收集目标物的电磁波信息,经数据处理、分析后,识别目标物、揭示目标物的几何形状和相互关系及其变化规律。根据传感器工作波长的不同,分

微波遥感、红外遥感和可见光遥感等；依照运载工具的不同，分为航空遥感和航天遥感。

4. 地图制图学

研究地图的信息传输、空间认知、投影原理、制图综合和地图的设计、编制、复制以及建立地图数据库等的理论和技术的学科叫地图制图学。

地图制图是利用大地测量、摄影测量、遥感以及其他测量的成果，或根据其他制图资料和文献，通过编辑设计、编绘、清（刻）绘、制版、印刷或复制等一系列工序，从而制作成地图。

5. 海洋测绘学

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、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和技术的学科叫海洋测绘学。

海洋测绘是以海洋水体和海底为对象所进行的测量，主要包括海洋大地测量、水深测量、海底地形测量、海洋重力测量、海岸地形测量、海道测量、海洋专题测量和海图测绘等。通过海洋测量所搜集的各种资料编制的各种海图和书、表，为海上航行安全、海洋资源开发和科学研究提供资料，对国家经济建设和国防建设都具有重要的作用。海洋测绘一般可按区域划分为沿岸测绘、近海测绘和远海测绘。

6. 工程测量学

研究工程建设和自然资源开发中各个阶段进行的控制测量、地形测绘、施工放样、变形监测及建立相应信息系统的理论和技术的学科叫工程测量学。

工程测量包括为各种资源勘测、区域性规划和工程建设的勘测设计、施工、营运、管理各阶段以及其他特殊需要所进行的各种测量工作。按其性质可划分为：规划、勘测设计阶段的控制测量和地形测量，施工阶段的施工测量和设备安装测量，营运、管理阶段的变形观测和维修养护测量。按工程建设的对象分为：建筑、水利、铁路、公路、桥梁、隧道、矿山、城市和国防等工程测量。工程测量贯穿于工程建设的全过程，对保证工程质量和实现工程的预期经济效益有着重要作用。工程测量已广泛应用电子计算机、电磁波测距、激光、摄影测量与遥感、卫星全球定位系统、地理信息系统等新技术。

本教材介绍的测量学主要涉及普通测量学及部分工程测量学的内容。

四、测量学的任务

1. 地形图测绘

使用测量仪器，按一定的程序和方法，根据地形图图式规定的符号，将地物、地貌测绘在图纸上，供规划设计使用，简称测图。

2. 地形图应用

在工程规划、设计、施工和使用管理中，从地形图上获取所需要的相关信息。

3. 施工测量

各种工程在施工阶段所进行的测量工作称为施工测量，施工测量最基本的工作是放样。放样是把图纸上设计好的各种建（构）筑物的平面位置和高程标定在实地上，也叫测设。

4. 变形观测

测定建筑物及其地基在建筑物荷重和外力作用下随时间而发生的变形，目的是监测建筑物的安全性。

第二节 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,地球表面是不规则的,如位于我国西藏与尼泊尔交界处的世界最高峰珠穆朗玛峰高出平均海面 8 844.43 米,而位于太平洋西部马里亚纳海沟的斐查兹海渊比平均海面低 11 034 米,为已知的世界海洋最深点。尽管有这样大的高低起伏,但相对于地球庞大的体积来说仍可忽略不计。

一、地球的形状

1. 大地水准面

水在静止时的表面叫水准面,它是在地球重力场中处处与重力方向正交的曲面,在此曲面上各点的重力位相等,故水准面又称“重力等位面”。因为水面可以处在不同的高度,所以水准面有无数多个,两水准面间的重力位差 $\Delta W = -gh$ 是常数,但水准面上各点的重力加速度 g 随纬度和物质分布不同而变化,使高差 h 不等,因而两水准面不相平行。由于地球是很大的球体,地面上两水准面虽然不平行,但相差也不是太大,故在普通测量学中通常认为两水准面是平行的。测量中绝大部分仪器的整置均以水准气泡为依据,所以水准面是测量中的工作面。

我们把一个与假想的无波浪、潮汐、海流和大气压变化引起扰动的处于流体静平衡状态的海洋面相重合并延伸到大陆的重力等位面叫作大地水准面,通常用大地水准面的形状来表示整个地球的形状,由大地水准面所包围的形体叫大地体。

大地水准面为一个没有皱纹和棱角的、连续的封闭曲面,是一个与平均海水面相吻合的水准面。大地水准面上的重力位处处相等,并与其上的重力方向处处保持着正交。地球上任何一点都要受到地球引力和地球自转的离心力的作用,这两个力的合力称为重力,重力的方向线称为铅垂线,所以水准面处处与铅垂线正交。

铅垂线是测量工作的基准线,大地水准面是测量工作的基准面。

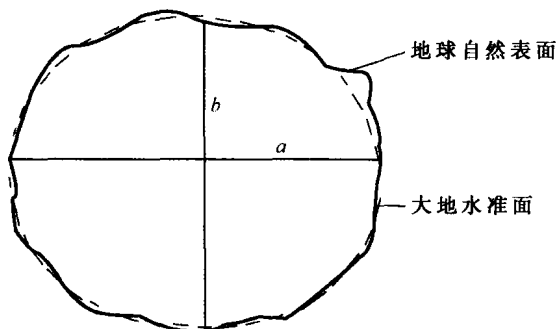


图 1-1

2. 参考椭球面

由于地球内部物质分布不均匀,从而使地面上各处的铅垂线方向产生不规则变化,即地球重力场是不规则的,所以大地水准面是不规则的,是一个复杂的曲面,如图 1-1 所示。虽

然大地水准面的形状接近于一个旋转椭球面,但它不能用一个简单的几何形体和数学公式来表达,因而在大地水准面上进行测量数据处理就非常困难。

一个国家或地区为处理测量成果而采用的一种与地球大小、形状最接近并具有一定参数的地球椭球叫做参考椭球,也叫参考椭球体,参考椭球的表面称为参考椭球面,大地测量在极复杂的地球表面进行,而处理大地测量结果均以参考椭球面作为基准面。

参考椭球是一个旋转椭球体,它是由椭圆 NESW 绕其短轴 NS 旋转而成的,其旋转轴与地球自转轴重合,如图 1-2 所示。

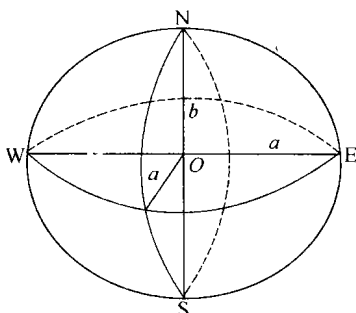


图 1-2

参考椭球体的形状和大小通常用长半径 a 和扁率 f 来表示,长半径(赤道半径)、扁率以及短半径 b (极半径)之间的关系式为:

$$f = \frac{a - b}{a} \tag{1-1}$$

如以参考椭球体的中心为坐标系的原点,旋转轴为 z 轴,参考椭球面的数学表达式为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \tag{1-2}$$

二、地球的大小

几个世纪以来,有许多学者曾经对地球参考椭球体的参数进行了测算,随着科学技术的发展,椭球体参数的测定将越来越精确。表 1-1 为几个有代表性的参考椭球体的参数。

表 1-1

椭球名称	年代	长半径 a (米)	扁率 f	备注
德兰布尔	1800	6 375 653	1 : 334.0	法国
白塞尔	1841	6 377 397	1 : 299.153	德国
克拉克	1880	6 378 249	1 : 293.459	英国
海福特	1909	6 378 388	1 : 297.0	美国
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	1 : 298.3	前苏联
IUGG-75	1975	6 378 140	1 : 298.257	IUGG
WGS-84	1984	6 378 137	1 : 298.257 223 563	美国

注:IUGG——国际大地测量和地球物理联合会(International Union of Geodesy and Geophysics)

WGS——世界大地坐标系(World Geodetic System)

新中国成立以后所建立的 1954 年北京坐标系用的是前苏联的克拉索夫斯基椭球。1980 年国家大地坐标系(1980 年西安坐标系),所用的椭球参数为国际大地测量和地球物理联合会 1975 年推荐的参数。全球定位系统(GPS)所采用的是 WGS-84 椭球。我国 2008 年 7 月 1 日起启用的 2000 国家大地坐标系采用的地球椭球参数为:长半轴 $a=6\,378\,137$ 米,扁率 $f=1/298.257\,222\,101$ 。

由于地球扁率很小,在测量精度要求不高及测区面积不大时,可把地球近似地当作圆球看待,则地球的平均半径为 $R=6\,371$ 千米。

第三节 测量坐标系与地面点位的确定

确定地面点的位置是测量工作的基本任务。要确定地面点的空间位置,要用点的三维坐标来表示。

一、地球空间直角坐标系

坐标系是确定地面点或空间目标位置所采用的参考系。根据不同的使用场合和使用目的,测量坐标系有很多种,有三维的、二维的、一维的。根据测量坐标系原点的不同位置,地球空间坐标系主要有参心坐标系、地心坐标系等。

1. 参心坐标系

参考椭球的中心与地球的质心是不重合的。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 年北京坐标系和 1980 年西安坐标系,都属于参心坐标系。参心空间直角坐标系的原点位于地球参心 O , Z 轴为地球椭球体的旋转轴,指向北极方向, X 轴为起始子午线与赤道面的交线, Y 轴垂直于 X 、 Z 轴, X 、 Y 、 Z 轴构成右手系,如图 1-3 所示。

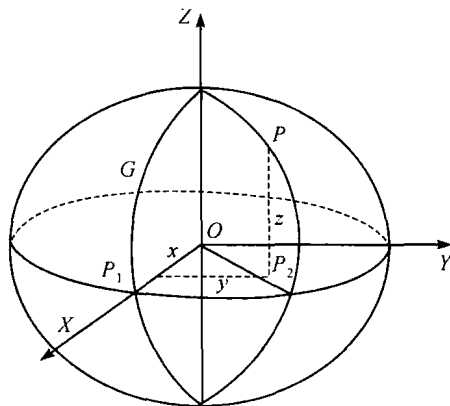


图 1-3

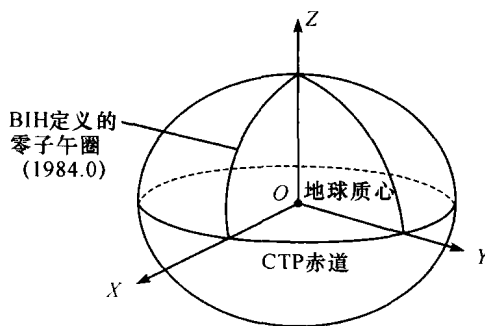


图 1-4

2. 地心坐标系

地心坐标系的坐标原点设在地球的质心。我国 2000 国家大地坐标系是原点位于地球质心的三维国家大地坐标系。全球定位系统(GPS)所采用的 WGS-84 坐标系也属于地心空间直角坐标系,它的原点位于地球质心 O , Z 轴指向国际时间局 BIH1984.0 定义的协议地球极方向(CTP), X 轴指向 BIH1984.0 的零子午圈与 CTP 赤道的交点, Y 轴垂直于 X 、 Z

轴, X 、 Y 、 Z 轴构成右手系, 如图 1-4 所示。

过去工程测量通常使用参心坐标系, 2008 年 7 月 1 日开始我国统一使用地心坐标, 并用 8~10 年过渡。2000 国家大地坐标系、WGS-84 地心坐标系坐标与 1954 年北京坐标系和 1980 年西安坐标系等参心坐标系坐标可以相互换算。换算方法通常是: 在同一测区内, 利用至少 3 个已知两个坐标系坐标的公共点, 列出相互变换方程, 采用最小二乘法原理解算出变换方程的 7 个变换参数 (3 个平移参数、3 个旋转参数和 1 个尺度参数), 从而得到变换方程。

二、点的球面或平面坐标系

在测量工作中, 通常将空间坐标系分解为确定点的球面位置 (或投影到水平面上的平面位置) 的坐标系 (二维) 以及该点到高程基准面的铅垂距离的高程系 (一维), 也就是用点的地理坐标 (或平面直角坐标) 及高程来表示。

地面点的坐标, 可用地理坐标或平面直角坐标表示。

工程测量中所讲的点的坐标, 通常都是指点的平面直角坐标。

1. 地理坐标系

地理坐标是用经纬度表示地面点位置的球面坐标, 可分为大地坐标及天文坐标。

(1) 大地坐标系

如图 1-5 所示, NS 为参考椭球的旋转轴, N 为北极, S 为南极, 通过椭球旋转轴的平面称为子午面, 而其中通过英国原格林尼治天文台的子午面称为起始子午面。子午面与椭球的交线称为子午圈, 也叫子午线。通过椭球中心且与椭球旋转轴正交的平面称为赤道面, 赤道面与椭球面的交线为赤道。其他与赤道面平行的面同椭球面的交线称为平行圈, 也叫纬圈。起始子午面和赤道面, 是在椭球面上确定某一点投影位置的两个基本平面。

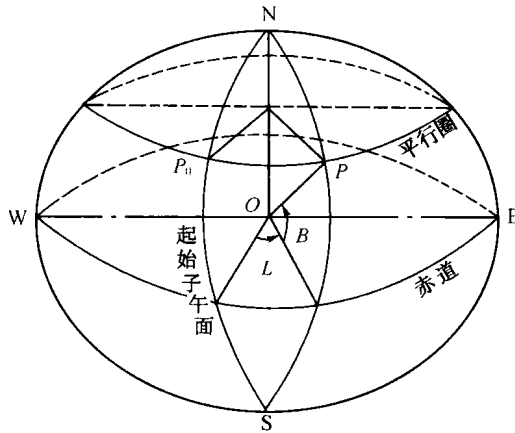


图 1-5

点的大地坐标, 用点的大地经度 L 及大地纬度 B 表示。大地经度是通过该点的子午面与起始子午面的夹角, 在起始子午面以东的点从起始子午面向东计, 由 0° 到 180° 称为东经, 在起始子午面以西的点则从起始子午面向西计, 由 0° 到 180° 称为西经。我国地处东半球, 各地的经度都是东经。

过 P 点作子午线的法线,该法线与赤道面的交角 B 即为 P 点的大地纬度,在赤道以北的点由赤道向北计,由 0° 到 90° 称为北纬,在赤道以南的点由赤道向南计,由 0° 到 90° 称为南纬。我国地处北半球,各地的纬度都是北纬。

由上可见,大地坐标是以法线为依据,以参考椭球面作为基准面。

点的大地经度 L 及大地纬度 B 再加上大地高 H (地面点沿法线到参考椭球面的距离) 就构成了空间的大地坐标系。根据参考椭球参数,大地坐标系坐标与参心坐标系坐标可以相互换算。

(2) 天文坐标系

要测得地面点在球面上的位置,通常用天文测量方法,在地面点上安置测量仪器,这时仪器的竖轴与铅垂线重合,这种用天文测量求得的以铅垂线为基准的地理坐标称为天文坐标。天文坐标用点的天文经度 λ 及天文纬度 φ 表示。

因为地面点上的铅垂线与法线不重合,所以 $L \neq \lambda, B \neq \varphi$,铅垂线与法线之间的夹角称为垂线偏差,垂线偏差的变化是不规则的,根据垂线偏差,可将地面上某点的天文坐标换算成大地坐标。

2. 平面直角坐标系

平面直角坐标是用平面上的长度值表示地面点位置的直角坐标。在平面上进行数据处理要比在椭球面上方便得多,所以当采用某种地图投影或在小范围内将地球表面当作平面看待时,常建立相应的平面直角坐标,以表示地面点的位置。

测量上的平面直角坐标系以南北方向的纵轴为 x 轴,自原点向北为正,向南为负(如图 1-6 所示);以东西方向的横轴为 y 轴,自原点向东为正,向西为负;象限按顺时针方向编号。

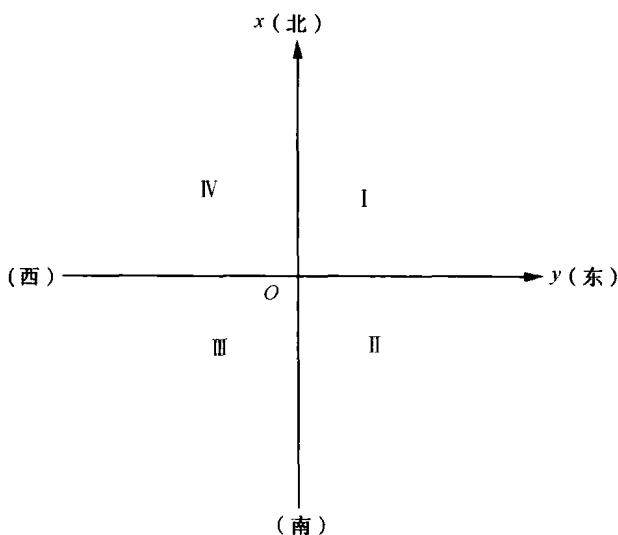


图 1-6

由图 1-6 可以看出,测量上的平面直角坐标与数学中的平面直角坐标是有所不同的,由于测量工作中以极坐标表示点位时,其角度值是以北方向为准按顺时针方向计算的,而数学中则是以横轴为准按逆时针方向计算的,把 x 轴与 y 轴纵横互换后,数学中的全部三角公式都同样能在测量中直接应用,不需作任何变更。