



面向21世纪课程教材

普通高等院校土木工程“十二五”规划教材

主编◎常允艳 谢波 董红娟 刘颖

主审◎吴全吉

土木工程测量

TUMU GONGCHENG CELIANG



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



面向 21 世纪课程教材

普通高等院校土木工程“十二五”规划教材

土木工程测量

主 编	常允艳	谢 波	董红娟	刘 颖
副主编	徐 健	杨秀伶	张衍林	
主 审	吴全吉			
编 委	戴 卿	李翔宇	徐义萍	李淋玉
	邓 晓	付文艺	王文鑫	陈 琦

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

土木工程测量 / 常允艳等主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2012.7
面向 21 世纪课程教材 普通高等院校土木工程“十二
五”规划教材
ISBN 978-7-5643-1849-9

I. ①土… II. ①常… 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 (2012) 第 176384 号

面向 21 世纪课程教材
普通高等院校土木工程“十二五”规划教材

土木工程测量

主编 常允艳 谢波 董红娟 刘颖

责任编辑	杨勇
特邀编辑	罗在伟
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都中铁二局永经堂印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	22.25
字 数	584 千字
版 次	2012 年 7 月第 1 版
印 次	2012 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1849-9
定 价	39.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

《土木工程测量》是根据现行高等教育测量教学大纲要求,按照高等教育的特点,针对 21 世纪应用型人才的培养模式和培养目标以及其特有的教学内容和课程体系,紧密结合现代测绘在工程中的应用实践而编写,力求教材具有实用性、适用性及时代性。本书在编写时根据学生学习的实际情况,在内容组织上侧重基本知识的传授和实践技能的提高,既介绍常规测量仪器的使用,又叙述全站仪、GPS 定位技术及大比例尺数字测图等内容。

本书共 20 章,第 1 章介绍了土木工程测量的发展历程和主要内容以及未来的发展前景。第 2、3、4 章,重点细致的讲述了土木工程测量的高程测量、角度测量和距离测量等基本工作。第 5 章介绍了目前使用最为广泛的全站仪工作原理及操作方法。第 6 章介绍了测量误差的基本知识,叙述了偶然误差和系统误差的特点。第 7、8、9、10 章重点讲述了控制测量与地形测图的原理及工作方法。第 11、12 章讲述了测设的基本原理和施测方法。第 13、14、15、16、17、18、19 章讲述的是土木工程测量作为工科专业基础课程的多方面应用原理及结合行业需求的测量工作方法。第 20 章介绍了遥感(RS)、地理信息系统(GIS)与全球卫星定位系统(GPS)综合的 3S 技术的基本原理和应用领域,并随着各方面技术的发展,其应用也进一步专业化、多元化。附录为扩展学生知识面,增强学生课外阅读,以 CASIO 编程计算器为例介绍了常用仪器及计算器的使用。此外,本书每章后面设有小结供学习者温习;复习思考与能力训练供学习者思考,部分问题需学习者通过网络、图书馆查阅相关资料完成。

本书由重庆水利电力职业技术学院常允艳(编写 1.1—1.2、2.1—2.3、7、12.1 等章节)、谢波(编写 4.1—4.5、6、8、17.1—17.5 等章节)、内蒙古科技大学董红娟(编写 1.3—1.7、3.1—3.5、10、20 等章节)、重庆机电职业技术学院刘颖(编写 3.6、12.2—12.3、15.1 等章节)任主编,重庆水利电力职业技术学院徐健(编写 2.4、11.1—11.2、18 等章节)、杨秀伶(编写 5、9.1—9.4、11.3、19.1—19.5 等章节)和张衍林(编写第 13 章)任副主编,参加编写的有重庆水利电力职业技术学院戴卿(编写 17.6—17.7 等章节、附录 1、附录 2)、李翔宇(编写 16.1—16.7 等章节)、徐义萍(编写第 15.2 节)、李淋玉(编写第 14 章)、邓晓(编写第 9.5 节)、付文艺(编写第 19.6 节)、王文鑫(编写第 4.6 节)和陈琦(编写第 16.8 节)。全书由重庆机电职业技术学院吴全吉主审。

本书适用于建筑工程、水利工程、城乡规划、园林、土地资源管理、道路桥梁、环境工程和水土保持等专业测量学课程教材。也可作为有关专业师生、成人教育教材及科技人员学习或参考用书。本教材附有教学课件,欢迎使用教材的老师向西南交通大学出版社索取,联系人:王蕾老师,联系电话:028-87600627,邮箱:wanglei187@sina.com。

由于编者的水平、经验及时间所限,书中难免有欠妥之处,敬请专家和广大读者批评指正。

编 者

2012 年 4 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 土木工程测量概述	1
1.2 地球的形状、大小以及地面点位的确定	2
1.3 地球表面曲率对测量的影响	9
1.4 测量工作概述	10
1.5 测量中的有效数字	11
1.6 角度的计量单位和相互换算	13
1.7 土木工程测量常用仪器介绍	14
本章小结	15
复习思考与能力训练	16
第2章 水准测量	17
2.1 水准测量原理	17
2.2 水准测量的仪器和工具	19
2.3 水准测量及成果整理	29
2.4 水准测量的误差来源及其影响	42
本章小结	44
复习思考与能力训练	44
第3章 角度测量	47
3.1 角度测量原理	47
3.2 经纬仪	48
3.3 水平角观测	56
3.4 竖直角观测	59
3.5 DJ ₆ 型光学经纬仪的检验与校正	62
3.6 角度测量的误差	66
本章小结	69
复习思考与能力训练	70
第4章 距离测量与直线定向	71
4.1 钢尺量距	71
4.2 视距测量	78
4.3 电磁波测距	82
4.4 全站仪测距	85
4.5 直线定向	87
4.6 坐标正反算	89
本章小结	91
复习思考与能力训练	91
第5章 全站仪及其使用	92
5.1 概 述	92

5.2 全站仪的测量操作	94
5.3 全站仪使用注意事项	101
本章小结	102
复习思考与能力训练	102
第 6 章 测量误差基本知识	104
6.1 测量误差概述	104
6.2 偶然误差的特性	105
6.3 衡量精度的标准	108
6.4 误差传播定律	110
6.5 等精度直接观测平差	113
本章小结	116
复习思考与能力训练	117
第 7 章 小区域控制测量	118
7.1 概 述	118
7.2 导线测量	122
7.3 小三角测量	131
7.4 高程控制测量	132
本章小结	140
复习思考与能力训练	141
第 8 章 交会法和小三角测量	142
8.1 交会法	142
8.2 小三角测量	145
本章小结	150
复习思考与能力训练	150
第 9 章 地形图的基本知识及其应用	151
9.1 地形图的基本知识	151
9.2 地物地貌的表示方法	153
9.3 地形图的分幅和编号	161
9.4 地形图的识读与应用	164
9.5 地形图在工程建设中的应用	166
本章小结	170
复习思考与能力训练	171
第 10 章 大比例尺地形图测绘	172
10.1 概 述	172
10.2 测图前准备工作	172
10.3 碎部点的测绘原理及方法	173
10.4 经纬仪测绘法	175
10.5 数字化测图技术	177
10.6 基于 CASS 7.0 数字化测图	180
10.7 基于 CASS 7.0 的电子平板法数字测图	185
本章小结	192
复习思考与能力训练	192

第 11 章 施工测量基本工作	193
11.1 施工测量概述	193
11.2 测设的基本工作	194
11.3 点的平面位置的测设方法	197
本章小结	201
复习思考与能力训练	202
第 12 章 曲线测设	204
12.1 圆曲线测设	204
12.2 困难地段的曲线测设	208
12.3 圆曲线测设实例	213
本章小结	215
复习思考与能力训练	215
第 13 章 民用与工业建筑施工测量	216
13.1 民用建筑施工测量	216
13.2 工业建筑施工测量	225
本章小结	230
复习思考与能力训练	231
第 14 章 道路与桥梁测量	232
14.1 铁路工程测量	232
14.2 公路线路测量	245
14.3 桥梁测量	247
本章小结	251
复习思考与能力训练	251
第 15 章 渠道测量与水库测量	253
15.1 渠道测量	253
15.2 水库测量	260
本章小结	264
复习思考与能力训练	265
第 16 章 水工建筑物的施工测量	266
16.1 概 述	266
16.2 水闸的施工放样	267
16.3 土坝的施工放样	268
16.4 混凝土坝体放样线的测设	272
16.5 安装测量的基本工作	273
16.6 平面闸门的安装测量	274
16.7 弧形闸门的安装测量	275
16.8 人字闸门的安装测量	277
本章小结	278
复习思考与能力训练	278

第 17 章 建筑物的变形观测和竣工测量	279
17.1 建筑物的变形观测概述	279
17.2 建筑物的沉降观测	280
17.3 水平位移观测	281
17.4 倾斜观测	283
17.5 挠度观测和裂缝观测	284
17.6 变形观测的成果表达	285
17.7 竣工测量	287
本章小结	287
复习思考与能力训练	288
第 18 章 架空送电线路测量	289
18.1 架空输电线路的基本知识	289
18.2 路径方案的选择	291
18.3 定线测量	292
18.4 平断面测量	294
18.5 杆塔定位测量	296
18.6 线路施工测量	296
本章小结	302
复习思考与能力训练	302
第 19 章 地下工程施工测量	303
19.1 概 述	303
19.2 地下工程的地面控制测量	304
19.3 地下控制测量	306
19.4 联系测量	308
19.5 陀螺经纬仪及定向测量	309
19.6 隧道施工与竣工测量	311
本章小结	311
复习思考与能力训练	312
第 20 章 3S 技术	313
20.1 GPS 介绍	313
20.2 RS 介绍	319
20.3 GIS 介绍	321
20.4 3S 技术集成	325
20.5 3S 技术集成的典型应用领域	326
本章小结	329
复习思考与能力训练	329
附录 1 自动全站仪在工程使用中的简明操作	330
附录 2 CASIO 编程计算器 fx-5800P 简明使用方法	339
参考文献	348

第1章 绪论

1.1 土木工程测量概述

1.1.1 土木工程测量的概念及内容

测量学是研究实体（包括整个地球、表面以及外层空间各种自然和人造物体）与地理空间分布有关的各种几何、物理、人文及其随时间变化的信息的采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。

测量学按照研究对象及采用技术的不同，又分为多个学科，如：

大地测量学——研究地球的大小、形状和重力场及其变化，解决大范围地区的控制测量和地球重力场问题。随着空间技术的发展，大地测量正在向空间大地测量和卫星大地测量方向发展。

摄影测量学——研究利用摄影或遥感技术获取被测物体的信息，以确定物体的形状、大小和空间位置的理论和技術。按获取影像的方式不同，摄影测量又分为航空摄影测量、水下摄影测量、地面摄影测量和遥感等。

海洋测量学——研究海洋定位，测定海洋大地水准面、海底和海面地形、海洋重力、海洋磁力及编制各种海图的理论和技術。

工程测量学——研究工程建设和自然资源开发中，在规划设计、施工放样、竣工验收和运营管理等各个阶段进行的控制测量、地形测绘、变形监测及建立相应信息系统的理论和技術。

地图制图学——研究各种地图的制作理论、原理、工艺技术和应用的一门学科。研究内容主要包括地图编制、地图投影原理、地图整饰、印刷及建立地图数据库等。现代地图制图学向着制图自动化、电子地图制作及地理信息系统方向发展。

土木工程测量就是土木工程在勘测设计、施工和运营管理等各个阶段所进行的一系列测绘工作。它属于工程测量学范畴，主要内容有测图、用图、放样和变形观测等。在工程建设的勘察阶段，主要的测量工作是提供各种比例尺的地形图。在工程建设的施工建造阶段，主要的测量工作是施工放样和设备安装测量，即将图纸上设计好的各种建筑物、构筑物按其设计的三维坐标测设到实地上去，并把设备安装到设计的位置上。为此，要根据工地的地形、工程的性质以及施工的组织与计划等，建立不同形式的施工控制网，作为施工放样与设备安装的基础，然后再按照施工的需要进行点位放样。在工程建设的运营管理阶段，为了监控建筑物的安全和稳定的情况以验证设计是否合理、正确，需要定期对其变形进行观测。

总之，测量工作将贯穿于土木工程建设的整个过程。从事土木工程的技术人员必须掌握土木工程测量的基本知识和技能。土木工程测量是土木工程建设技术人员的一门必修的技术基础课。

1.1.2 土木工程测量的发展及应用

土木工程测量的历史源远流长。早在公元前 27 世纪建造的埃及大金字塔,其形状与方向都很准确,这就说明当时已有放样的工具和方法。公元前 14 世纪,在幼发拉底河与尼罗河流域,曾进行过土地边界的测定。我国早在夏商时代为了治水就已开始了实际的工程测量工作。对此,伟大的史学家司马迁在《史记》中对夏禹治水有这样的叙述:陆行乘车,水行乘船,泥行乘橇,山行乘犂,左准绳、右规矩,载四时,以开九州,通九道,陂九泽,度九山。其中,“准”是古代用的水准器;“绳”是一种测量距离、引画直线和定平用的工具,是最早的长度度量及定平工具之一;“规”是校正圆形的工具;“矩”是古代画方形的工具,也就是曲尺。在山东嘉祥县汉代武梁祠石室造像中,就有拿“矩”的伏羲和拿“规”的女娲的图像,说明我国在西汉以前“规”和“矩”是用得很普遍的测量仪器。秦代李冰父子开凿的都江堰水利枢纽工程,是用一个石头人来标定水位的,当水位超过石头人的肩时,下游将受到洪水的威胁;当水位低于石头人的脚背时,下游将出现干旱。这种标定水位的办法,虽不如水尺那样精确,但却是我国水利工程测量发展的标志。

17 世纪望远镜发明之后,人们开始利用光学仪器进行测量,使测绘科学前进了一大步。20 世纪 60 年代以来,由于电子计算技术的飞速发展,出现了自动化程度很高的电子经纬仪、全站仪和自动绘图仪。1964 年,国际测量师联合会(FIG)为了促进和繁荣工程测量,成立了工程测量委员会(第六委员会),从此,工程测量学在国际上成为一门独立的学科。20 世纪末,现代科学技术有了飞速的发展,人类科学技术不断地向着宏观宇宙和微观粒子世界延伸,测量对象不再局限于地面,而是深入地下、水域、空间和宇宙。自 20 世纪 80 年代末以来,发展了一种利用卫星定位的新技术——全球定位系统 GPS(Global Positioning System)。

目前,国际公认的、引领 21 世纪科技发展的三大技术之一——空间信息技术,正在使传统测绘向天地(地表、地层、天体)一体化、信息化、实时化、数字化、自动化、智能化迈进,使工程测量产品向多样化、网络化、社会化方向发展。

1.2 地球的形状、大小以及地面点位的确定

1.2.1 测量工作的基准面与基准线

测量工作大多是在地球表面进行的。地球表面很不平坦也很不规则,有高山、平原、深谷、丘陵和海洋等。地球上最高的珠穆朗玛峰,高出平均海水面 8 844.43 m(2005 年 10 月 9 日公布),最低的马里亚纳海沟低于平均海水面 8 000 m,最深处达 11 034 m。这些高低起伏与巨大的地球半径(平均为 6 371 km)相比,可以忽略不计。同时由于地球表面海洋占 71%,陆地仅占 29%,可以认为地球是被静止的海水面所包围的球体。

由于地球的自转运动,地球上任一点都受到地球引力和离心力双重作用,这两个力的合力称为重力。重力的方向线称为铅垂线,铅垂线是测量工作的基准线,如图 1.1 所示。人们设想以一个静止不动的海水面延伸穿越陆地,形成一个闭合的曲面包围了整个地球,这个闭合曲面

称为水准面。水准面的特点是水准面上任一点的铅垂线都垂直于该点的曲面。与水准面相切的平面称为水平面。由于水面可高可低，因此水准面有无穷多个，其中与平均海水面重合并向陆地延伸所形成的封闭曲面，成为大地水准面。大地水准面与地球自然表面相比可称为一个光滑的曲面，代表了地球的自然形状和大小，因此大地水准面是测量工作的基准面，如图 1.2 所示。

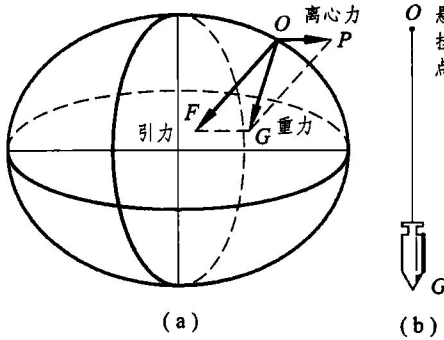


图 1.1 测量的基准线

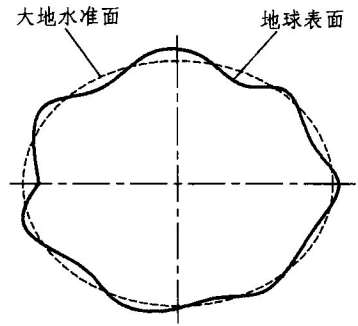


图 1.2 大地水准面

1.2.2 地球的形状和大小

大地水准面虽然非常接近于地球的物理表面，但是由于地球内部质量分布的不均匀性，使得铅垂线的方向产生不规则的变化，结果大地水准面就变成了一个有微小起伏变化的、不规则的复杂曲面，如图 1.3 所示。由于大地水准面的起伏变化无法用数学方法加以描述和表达，所以为了计算和测绘方便，通常选择一个非常接近于大地水准面并可用数学形式表示的几何面来代替地球的形状，该面称为旋转椭球体面或地球椭球体面。

旋转椭球体面所包围的球体称为旋转椭球，也叫参考椭球。若对参考椭球面的数学式加入地球重力异常变化参数的改正，便可得到大地水准面较为近似的数学式。这样，从严格意义上讲，测绘工作是提取参考椭球面为测量的基准面，但在实际工作中仍取大地水准面作为测量的基准面。当对测量成果的要求不十分严格时，不必改正到参考椭球面上。另一方面，实际工作中又可以十分容易地得到水准面的铅垂线，所以用大地水准面作为测量的基准面便大大简化了操作和计算工作，因而水准面和铅垂线便成为实际测绘工作的基准面和基准线。

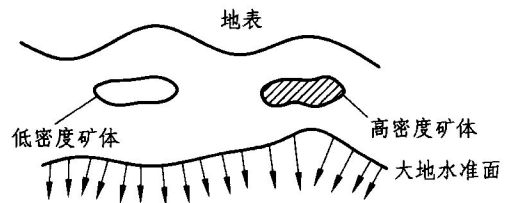


图 1.3 大地水准面的不规则变化

如图 1.4 所示，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 和扁率 α ，其关系式为

$$\alpha = \frac{a-b}{a} \quad (1.1)$$

地球的形状确定后，还应进一步确定大地水准面与椭球面的相对关系，才能将观测成果换算到椭球面上。如图 1.5 所示，在一个国家的适当地点选择一点 P ，设想椭球体与大地体相切，切点 P' 位于 P 点的铅垂线上。这时，椭球面上 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，且椭球面与这个国家范围内的大地水准面差距尽量地小，于是椭球与大地水准面的相对位置便确定下来。这就是参考椭球的定位工作。 P 点称为大地原点。

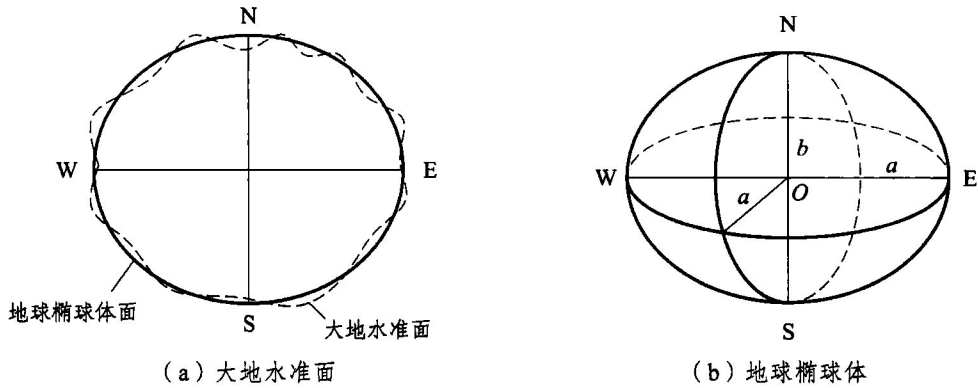


图 1.4 大地水准面与地球椭球体

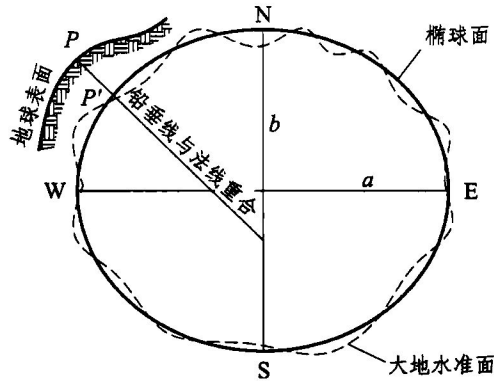


图 1.5 参考椭球定位

几种著名的参考椭球见表 1.1。在新中国成立前采用海福特椭球；在新中国成立后曾一度采用苏联的克拉索夫斯基椭球参数作为测量计算的依据，建立了“1954 年北京坐标系”；后又以 1975 年国际大地测量与地球物理联合会推荐的 IUGG-75 椭球参数作为测量计算的依据，建立了“1980 国家大地坐标系”，也称“1980 西安坐标系”；而 GPS 定位采用的是 WGS-84 参考椭球，相应地称为 WGS-84 坐标系。

表 1.1 几种著名的参考椭球

参考椭球	长半轴 a (m)	短半轴 b (m)	扁率 α	推算年代和国家 (协会)
德兰布尔	6 375 653	6 356 564	1 : 334	1800 法国
白塞尔	6 377 397	6 356 079	1 : 299.2	1841 德国
克拉克	6 378 249	6 356 515	1 : 293.5	1880 英国
海福特	6 378 388	6 356 912	1 : 297.0	1909 美国
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1 : 298.3	1940 苏联
IUGG-75	6 378 140	6 356 755.3	1 : 298.257	1975 国际大地测量与地球物理联合会
WGS-84	6 378 137		1 : 298.257 223 563	1984 美国

由于地球椭球体的扁率很小，当测量的区域不大时，可将地球看做半径为 6 371 km 的圆球。

1.2.3 地面点位置的确定方法

由于地球表面的高低起伏，一般用地面某点投影到参考曲面上的位置和该点到大地水准面间的铅垂距离来表示该点在地球上的空间位置。为此，将空间坐标系分解成确定点的球面位置坐标系（二维）和高程系（一维）。确定点的球面位置关系包括地理坐标系和平面直角坐标系。

1. 地理坐标系

对于大区域，通常用经度和纬度来表示地面点在球面上的位置，称为地理坐标，如图 1.6 所示。地理坐标又因采用的基准面、基准线的不同而分为天文地理坐标和大地地理坐标。

过地面上任一点的铅垂线与地轴组成的平面称为子午面，子午面与球面的交线称为子午线或经线。过英国格林尼治天文台的子午面称为首子午面，相应的子午线称为首子午线或本初子午线。经度是过某点的子午面与首子午面所成的二面角，通常用符号 λ 表示；自首子午面向东或向西计算，取值范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。在首子午面以东为东经，在首子午面以西为西经，同一子午面线上各点的经度相同。

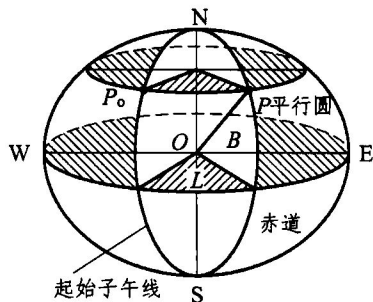


图 1.6 地理坐标系

垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为纬线，垂直于地轴并通过地心 O 与地球表面相交的纬线称为赤道。纬度是以某点的铅垂线与赤道平面之间的夹角，通常用符号 φ 来表示；自赤道起向南或北计算，取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

我国位于东半球和北半球，所以地理坐标都是东经和北纬。例如，北京某点的地理坐标为东经 $116^\circ 50' 20''$ 、北纬 $39^\circ 34' 26''$ 。

上述地球表面某点的经纬度，称为天文经纬度，它是以过某点的铅垂线为依据的。若以椭球面的法线为依据，则点 P 的经纬度称为大地经纬度，并分别以 L 表示大地经度，以 B 表示大地纬度。由于所依据的基准线不同，所以两者稍有差异，但差异很小，在地形测量中可不予考虑。

2. 高斯平面直角坐标系

我们知道，当测绘地形图的范围较小时，可以把球面当做平面看待，将所测的地面图形用相似的方法缩绘在图纸上。但是，如果测区范围较大，就不能再将地球表面当做平面看待，因为球面是一个“不可展曲面”，它像橘子皮一样，如果将它剥开并压成平面，必然会产生一些裂口和重叠。但人们在规划、设计和施工中又习惯使用平面图来反映地面形态，而且在平面上进行计算和绘图要比在球面上方便得多。这样就产生了如何将球面上的物体转换到平面上的投影变换问题。

地图投影的种类很多，但是任何一种投影方法都无法同时消除各种变形。这些变形概括起来，有长度变形、角度变形和面积变形 3 种。对于不同变形，可以根据需要采用不同的投影方法加以控制，使全部变形减小到某一适当程度，或是长度变形也要尽可能小，只有采用正形投影才能满足上述要求。我国采用的是高斯-克吕格正形投影，简称高斯投影。

设想将截面为椭圆的一个圆柱面横套在旋转椭球外面，并与旋转椭球面上某一条子午线相

切，同时使圆柱的轴位于赤道面内，且通过椭球中心，相切的子午线称为高斯投影面上的中央子午线。用数学的方法，在保持等角的条件下将中央子午线及其临近的元素投影到横圆柱面上，然后将圆柱面沿通过极点的母线切开，展位平面，就得到投影平面上的元素，如图 1.7 所示。该投影是高斯于 1816—1820 年首先推得其计算公式，1912 年由克吕格加以研究补充而成，故成为高斯-克吕格投影，又称横轴椭圆柱等角投影。

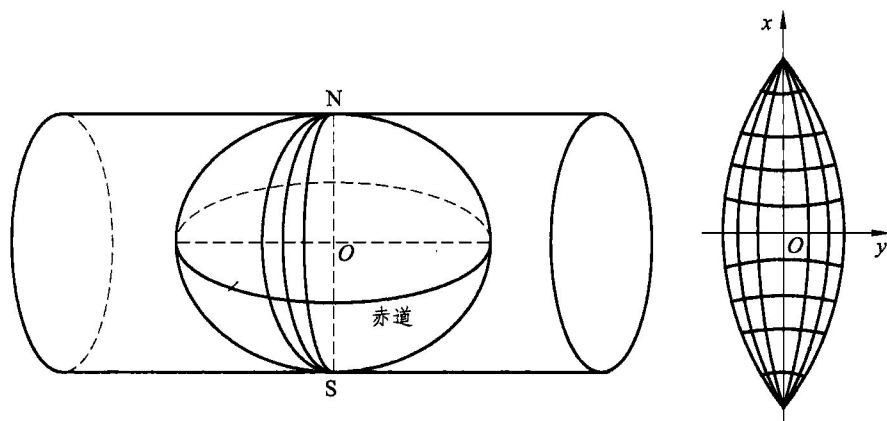


图 1.7 高斯投影

高斯投影具有如下规律：

- (1) 中央子午线投影为一条直线，且投影之后的长度无变形；其余子午线的投影均为凹向中央子午线的曲线，且以中央子午线为对称轴，离对称轴越远，其长度变形也就越大；
- (2) 赤道的投影为直线，其余纬线的投影为凸向赤道的曲线，并以赤道为对称轴；
- (3) 经纬线投影后仍保持相互正交的关系，即投影后无角度变形；
- (4) 中央子午线和赤道的投影相互垂直。

高斯投影虽然能保证角度不变形，但不能使长度不变形，且离中央子午线越远，长度变形越大。为了限制长度变形，通常采用分带投影，使每一个投影带内只包括中央子午线及其两侧的邻近部分。

在中、小比例尺测图中，一般采用 6°分带法，从首子午线开始，按经差 6°为一带，将地球分成 60 个投影带，编号 1~60，如图 1.8 所示。

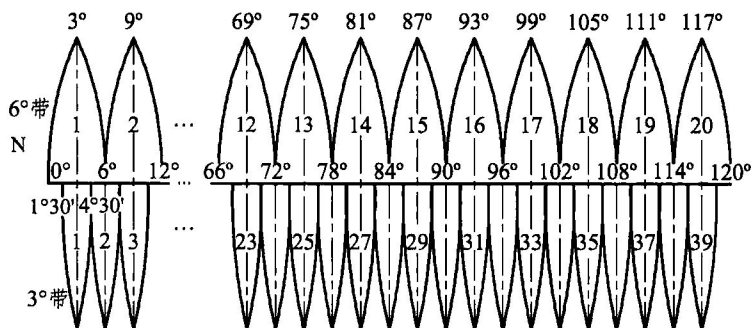


图 1.8 高斯投影分带

如果将地球依次转动 6°，投影后展为平面，可得各投影带在平面上的图形，6°带的带号 N 与中央子午线的经度 L_0 存在如下关系

$$L_0 = 6^\circ N - 3^\circ \quad (1.2)$$

反之, 如果已知地面任一点的经度 L , 则该点所在的统一 6° 带号 N 为

$$N = \text{int} \left(\frac{L+3}{6} + 0.5 \right) \quad (1.3)$$

对于 1:10 000 大比例尺测图, 因采用 6° 分带法不能满足测图的精度要求, 故又采用 3° 分带法或 1.5° 分带法。 3° 投影带的划分是从经度 1.5° 的子午线开始, 按经差 3° 为一带, 把地球分成 120 个带, 如图 1.8 所示。实际上 3° 带是在 6° 带的基础上划分的, 所以 3° 带的中央子午线有一半同 6° 带的中央子午线重合, 另一半则和 6° 带的分带子午线重合, 这样便于 3° 带和 6° 带的换算。 3° 带的带号 n 与其中央子午线经度 L_0 有下列关系

$$L_0 = 3^\circ N \quad (1.4)$$

分带投影后, 各带的中央子午线都与赤道垂直, 以中央子午线作为纵坐标轴 x , 赤道为横坐标轴 y , 其交点 O 为坐标原点。这样, 在每个投影带内, 便构成了一个既与地理坐标有直接关系又各自独立的平面直角坐标系, 称为高斯-克吕格平面直角坐标系, 简称高斯平面直角坐标系, 如图 1.9 所示。

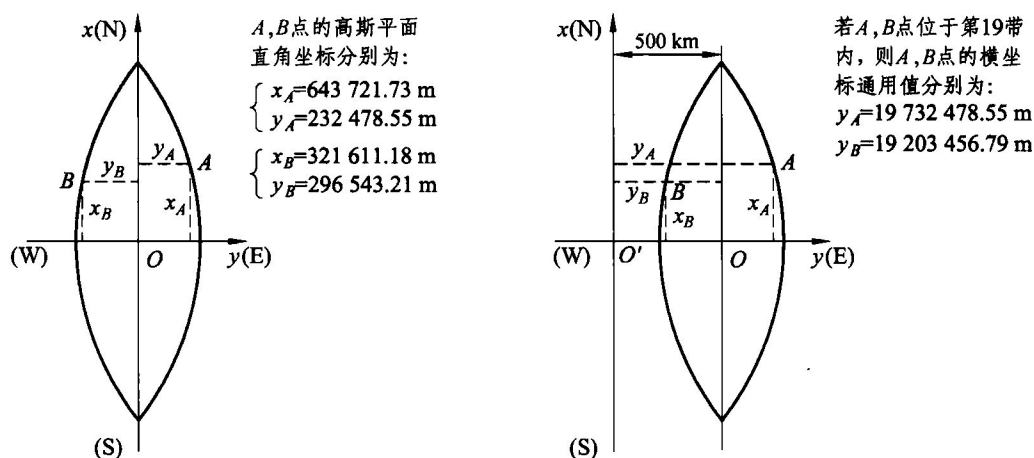


图 1.9 横坐标的自然值与通用值

在高斯平面直角坐标系中, 纵坐标 x 从赤道向北为正, 向南为负; 横坐标 y 由中央子午线向东为正, 向西为负; 我国位于北半球, x 坐标均为正值, 但每个投影带内的横坐标 y 值有正有负。为使横坐标不出现负值, 无论 3° 带还是 6° 带, 每带的纵坐标轴都西移 500 km。即每带的横坐标都加上 500 km。加 500 km 后, 中央子午线以东的横坐标大于 500 km, 以西的横坐标小于 500 km, 且都为 6 位数。

为了指明该点位于哪一个投影带, 还规定在横坐标值之前加上带号。未加 500 km 和带号的横坐标值称为自然值; 加上 500 km 和带号的横坐标值称为通用值。

与数学上的笛卡儿坐标系相比, 在高斯平面直角坐标系中, 为了定向的方便, 定义纵轴为 x 轴, 横轴为 y 轴, 象限按顺时针方向编号, 如图 1.10 所示。目的是使数学上定义的各类三角函数可以在高斯平面坐标系中直接使用, 不需做任何变更。

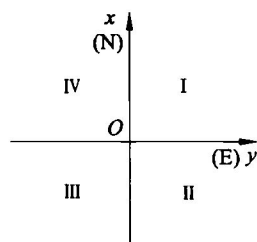


图 1.10 平面直角坐标系

3. 独立平面直角坐标

大地水准面虽是曲面，但当测区范围较小时，可以将大地水准面当做平面看待，并在平面上建立独立平面直角坐标系，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。

如图 1.11 所示，一般将独立平面直角坐标系的原点选在测区西南角，以使测区内任意点的坐标均为正值。坐标系原点可以是假定坐标值。规定 x 轴向北为正， y 轴向东为正，坐标象限按顺时针编号，如图 1.10 所示。

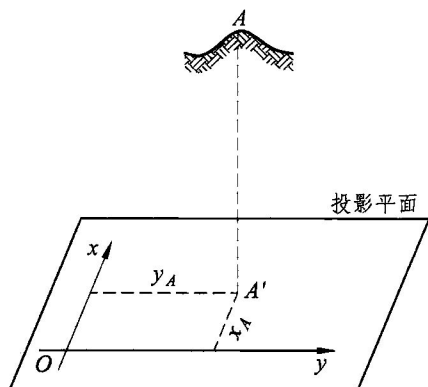


图 1.11 独立平面直角坐标系

4. 高程

(1) 绝对高程。

地面点到大地水准面的铅垂距离称为该点的绝对高程，也称海拔或标高，用 H 表示。如图 1.12 所示，地面点 A 、 B 的高程分别为 H_A 、 H_B 。高程值有正有负，在基准面以上的点其高程位为正，反之为负。两点间的高程差称为高差，用 h 表示。

高程的基准是大地水准面，由于海水面受潮汐、风浪等影响，它的高低时刻在变化。通常是在海边设立验潮站，进行长期观测，求得海水面的平均高度作为高程零点，以通过该点的大地水准面为高程基准面，亦即大地水准面上的高程恒为零。

新中国成立后在青岛建立了验潮站，根据 1950—1956 年的验潮资料推算的黄海平均海水面作为我国的高程起算面，由此推求的青岛国家水准原点高程为 72.289 m，该系统简称“1956 年黄海高程系”。20 世纪 80 年代初，我国根据 1952—1979 年的验潮资料重新推算黄海平均海水面，获得国家水准原点的高程为 72.260 m，该系统称为“1985 年国家高程基准”，于 1985 年 1 月 1 日开始执行。“1985 年国家高程基准”的高程值等于“1956 年黄海高程系”的高程值减去 0.029 m。

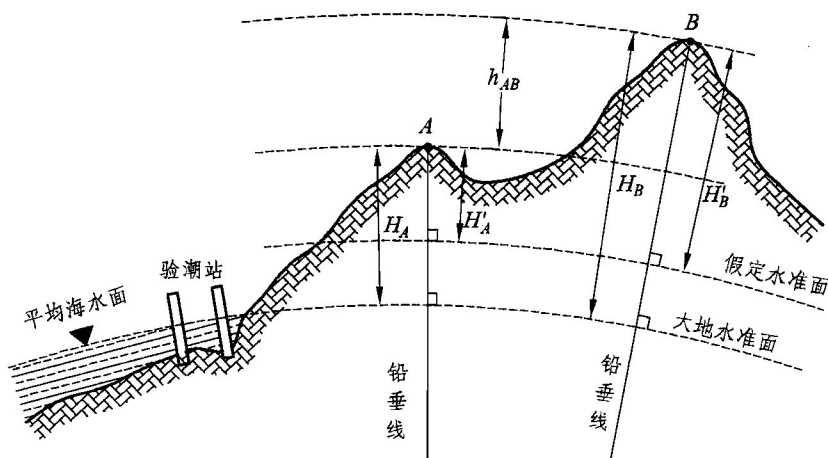


图 1.12 高程与高差的定义及其相互关系

(2) 假定高程。

在局部地区或某项工程建设中，当引测绝对高程有困难时，可以任意假定一个水准面为高程起算面。从某点到假定水准面的垂直距离称为该点的假定高程或相对高程。图 1-12 中， A 、

B 两点的假定高程分别 H'_A 和 H'_B 。采用假定高程时, 应先在测区内选定一个高程基准点并确定其假定高程值, 再以它为基准推算其他各点的假定高程。采用假定高程同样可得任意两点间的高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1.5)$$

为了保证基准的统一、避免混淆, 一个特定区域只能选择一个假定的水准面。

1.3 地球表面曲率对测量的影响

当测区范围小, 用水平面代替水准面所产生的误差不超过测量误差的容许范围时, 可以用水平面代替水准面。但是在多大面积范围才容许这种代替, 有必要加以讨论。为讨论方便, 假定大地水准面为圆球面。

1.3.1 对高差的影响

如图 1.13 所示, 以大地水准面为基准的 B 点绝对高程 $H_B = Bb$, 用水平面代替大地水准面时, B 点的高程 $H'_B = Bb'$, 两者之差 Δh 就是绝对高程的影响, 也成为地球曲率的影响。在 $\triangle Oab'$ 中, 有

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R} \quad (1.6)$$

对于不同 D 值, 产生的高程影响见表 1.2。

表 1.2 水平面代替大地水准面的高程误差

D (km)	0.05	0.1	0.2	1	10
Δh (mm)	0.2	0.8	3.1	78.5	7 850

可见用水平面代替水准面, 地球曲率对高程的影响较大。进行高程测量时, 即使距离很短, 也应考虑地球曲率对高程的影响。

1.3.2 对水平距离的影响

在图 1.13 中, 设地面上 A, B, C 三个点在大地水准面上的投影点是 a, b, c 。用过 a 点的切平面代替大地水准面, 则地面点在水平面上的投影点是 a, b', c' 。设 ab 的弧长为 D , ab' 的长度为 D' , 球面半径为 R , D 所对的圆心角为 θ , 则用水平长度 D' 代替弧长 D 所产生的误差为

$$\Delta D = D' - D \quad (1.7)$$

