

21 世纪普通高等院校规划教材

土木工程类

GONGCHENG
CELIANGXUE

工程测量学

主编 李华东 钟赞



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

21 世纪普通高等院校规划教材——土木工程类

工 程 测 量 学

主 编	李华东	钟 赟
副主编	杨露江	蒋爱良
	李自平	李燕强

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

工程测量学 / 李华东, 钟赞主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2009.8

21 世纪普通高等院校规划教材. 土木工程类

ISBN 978-7-5643-0393-8

I. 工… II. ①李…②钟… III. 工程测量—高等学校—教材 IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 149216 号

21 世纪普通高等院校规划教材——土木工程类

工程测量学

主编 李华东 钟 赞

*

责任编辑 张 波

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 14.25

字数: 353 千字 印数: 1—3 000 册

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0393-8

定价: 25.00 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

随着我国国民经济的快速发展和科学技术的飞速进步，测绘技术也正发生着革命性的变化。这种日新月异的变化，使得目前的教材和测绘技术之间存在一定的脱节现象。针对这种情况，编者结合最新的测绘技术编写了本教材。

本教材重点介绍了工程测量学的基本理论，以便读者能掌握测量学的基本原理，能为以后的实践工作奠定基础。同时，本教材对精密水准仪、电子经纬仪、全站仪、GPS定位等先进仪器和现代化测量技术进行了详细的讲解，并对电子测量仪器在工程中的具体应用做了一定的介绍。通过对本书的学习，读者能够对现代测量理论和方法有较深层次的认识和理解，培养并提高实际操作技能和分析问题、解决问题的能力。

本书共 11 章。第 1、2、3 章由李华东、钟赟编写，第 4、5 章由钟赟、杨露江编写，第 6、7 章由钟赟、李燕强编写，第 8、9 章由钟赟、蒋爱良编写，第 10、11 章由钟赟、李自平编写，附录由钟赟编写。全书由李华东、钟赟统稿并主编。

由于编者水平有限，难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者
2009 年 6 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 工程测量学的内容及作用	1
1.2 工程测量学的发展及展望	2
1.3 地面点位的确定	4
1.4 地球曲率对测量工作的影响	10
1.5 测量工作概述	12
习 题	14
第2章 高程测量	15
2.1 高程测量概述	15
2.2 水准测量的原理	15
2.3 水准测量的仪器和工具	16
2.4 水准测量方法	22
2.5 三、四等水准测量	27
2.6 微倾式水准仪的检验和校正	30
2.7 水准测量的误差及其消减方法	34
2.8 自动安平水准仪	36
2.9 精密水准仪和电子水准仪简介	39
习 题	41
第3章 角度测量	44
3.1 角度测量原理	44
3.2 光学经纬仪	45
3.3 经纬仪的使用	47
3.4 水平角测量的方法	52
3.5 竖直角测量的方法	55
3.6 经纬仪的检验和校正	58
3.7 角度测量的误差分析	62
3.8 电子经纬仪简介	66
习 题	67
第4章 距离测量	70
4.1 钢尺量距	70
4.2 视距测量	75

4.3 电磁波测距	77
4.4 全站仪简介	82
习 题	87
第 5 章 直线方向的测量	89
5.1 直线定向	89
5.2 用罗盘仪测量直线的磁方位角	92
5.3 坐标方位角的推算	93
5.4 直角坐标与极坐标的计算	93
习 题	95
第 6 章 测量误差基本知识	97
6.1 测量误差的来源及分类	97
6.2 衡量精度的指标	100
6.3 误差传播定律及应用	102
6.4 观测值的算术平均值及其中误差	107
6.5 加权平均值及其中误差	110
习 题	111
第 7 章 控制测量	113
7.1 控制测量概述	113
7.2 导线测量	117
7.3 小三角测量	125
7.4 交会定点测量	130
7.5 高程控制测量	131
习 题	135
第 8 章 大比例尺地形测绘	138
8.1 地形图的基本知识	138
8.2 大比例尺地形图的测绘	147
8.3 全站仪数字化测图	154
8.4 地籍图测绘	158
习 题	163
第 9 章 地形图应用	165
9.1 地形图的阅读	165
9.2 地形图应用的基本内容	166
9.3 地形图上面积测定	170
9.4 场地平整中的土方计算	172
习 题	174

第 10 章 测设的基本工作	177
10.1 测设已知水平距离	177
10.2 测设已知水平角	178
10.3 测设已知高程	179
10.4 测设点的平面位置	181
10.5 已知坡度线的测设	183
习 题	184
第 11 章 测绘新技术概览	186
11.1 GPS 定位测量	186
11.2 GIS 基础知识	193
11.3 摄影测量与遥感	196
11.4 GPS、RS 与 GIS 集成	200
习 题	202
附录 1 测量记录、计算及成果处理规定	203
附录 2 实 验	205
实验一 水准仪的认识	205
实验二 普通水准测量	206
实验三 四等水准测量	207
实验四 水准仪的检验和校正	207
实验五 经纬仪的认识	208
实验六 测回法测水平角	209
实验七 方向法测水平角	210
实验八 竖直角测量	211
实验九 经纬仪的检验和校正	212
实验十 闭合导线测量	213
实验十一 视距测量	214
实验十二 按模型勾绘等高线	215
实验十三 精密水准测量	216
实验十四 光电测距仪的认识和使用	217
实验十五 地籍图数字测绘	218
参考文献	219

第1章 绪 论

1.1 工程测量学的内容及作用

1.1.1 测量学及其分类

测量学是研究地球的形状和大小,确定地球表面各种物体的形状、大小和空间位置的科学与技术。它的主要内容包括测绘和测设两个方面:测绘是将地球表面的地物地貌测绘成图;测设是将图纸上设计的点和线在实地标定出来,作为施工的依据,因此测设也称为施工放样。前者是认识自然,后者则是改造自然。根据研究的对象及应用上的不同,它又可以分为以下几个主要学科:

1. 大地测量学 (Geodesy)

它是研究和确定地球形状、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和理论的技术的学科。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. 地形测量学 (Topography)

地形测量学是研究如何将地球表面局部区域内的地物、地貌及其他相关信息测绘成地形图的理论、方法和技术的学科。按成图方式的不同,地形测图可分为模拟化测图和数字化测图。

3. 摄影测量学 (Photogrammetry)

它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信息,并用图形、图像和数字形式表达的学科。其基本任务是通过对摄影像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,本学科又分为地面摄影测量学、航空摄影测量学和航天遥感测量学等。

4. 工程测量学 (Engineering Surveying)

工程测量学是研究在工程建设的设计、施工和管理各阶段中进行测量工作的理论、方法和技术的学科。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,是综合性地应用测绘科学与技术。

5. 地图制图学 (Cartography)

它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。其基本任务是利用各种测量成果编制各类地图,内容一般包括地图投影、地图编制、地图整饰和地图制印等分支。

1.1.2 工程测量学在国家经济建设中的作用

随着科学技术的飞速发展,测量学在国家经济建设和发展的各个领域发挥着越来越重

要的作用。工程测量是直接为工程建设服务的,它的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,可列举一些如下。

(1) 城乡规划和建设离不开测量。我国城乡面貌正在发生日新月异的变化,城市和村镇的建设与发展,迫切 need 要加强规划与指导,而搞好城乡建设规划,首先要有现势性好的地图,提供城市和村镇面貌的动态信息,以促进城乡建设的协调发展。

(2) 资源勘察与开发离不开测量。地球蕴藏着丰富的自然资源,需要人们去开发。勘探人员在野外工作,离不开地图,从确定勘探地域到最后绘制地质图、地貌图、矿藏分布图等,都需要用测量技术手段。随着测量技术的发展,重力测量可以直接用于资源勘探,工程师和科学家根据测量取得的重力场数据可以分析地下是否存在重要矿藏,如石油、天然气、各种金属等。

(3) 交通运输、水利建设离不开测量。铁路、公路的建设从选线、勘测设计,到施工建设都离不开测量。大、中水利工程也是先在地形图上选定河流渠道和水库的位置,划定流域面积、流量,再测得更详细的地图(或平面图)作为河渠布设、水库及坝址选择、库容计算和工程设计的依据。如三峡工程从选址、移民,到设计大坝等,测量工作都发挥了重要作用。

(4) 国土资源调查、土地利用和土壤改良离不开测量。建设现代化的农业,首先要进行土地资源调查,摸清土地“家底”,而且还要充分认识各地区的具体条件,进而制订出切实可行的发展规划。测量为这些工作提供了一个有效的工具。地貌图,反映出了地表的各种形态特征、发育过程、发育程度等,对土地资源的开发利用具有重要的参考价值;土壤图,表示了各类土壤及其在地表的分布特征,为土地资源评价和估算、土壤改良、农业区划提供科学依据。

1.2 工程测量学的发展及展望

工程测量学是一门历史悠久的学科,是从人类生产实践中逐渐发展起来的。早在几千年前,由于社会生产发展的需要,中国、埃及等国家的人们就开始创造与运用测量工具进行测量。战国时期,李冰父子修建的都江堰水利枢纽工程,曾用一个石头人来标定水位,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与现代水位测量的原理完全一样。北宋时期,我国就发明了指南针,后又创制了浑天仪等测量工具,并绘制了相对精确的全国地图。直到今天,指南针仍然是利用地球磁场测定方位的简便工具。

工程测量学的发展也受到了战争的促进。战国时期修筑的午道、公元前 210 年秦始皇修建的“堑山堙谷,千八百里”的直道、古罗马构筑的兵道,以及公元前 218 年欧洲修建的通向意大利的“汉尼拔通道”等,都是著名的军用道路。修建中应用了测量工具进行地形勘测、定线测量和隧道定向开挖测量。唐代李筌指出“以水佐攻者强,……,先设水平测其高下,可以漂城,灌军,浸营,败将也”,说明了测量地势高低对军事成败的作用。万里长城修建于秦汉时期,这一规模巨大的防御工程,从整体布局到修筑,都进行了详细的勘察测量和施工放样工作。

17 世纪望远镜的发明,将测量科学推进了一大步。19 世纪末,随着航空摄影测量技术的发展,又使测量学增添了新内容。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水准仪、电子经纬仪、全站仪和自动绘图仪。人造卫星的成功发射,使其很快被应用于大地测量,建立利用卫星无线电导航原理的全球定位系统。用卫星遥感技术可以获得丰富的地面信息,为自动化制图提供了大面积的、全球性的资料。

从工程测量学的发展历史可以看出,它的发展经历了一条从简单到复杂、从手工操作到测量自动化、从常规测量到精密测量的发展道路,它的发展始终与当时的生产力水平相同步,并且能够满足大型特种精密工程中对测量所提出的越来越高的需求。举世瞩目的三峡水利枢纽工程;长达 30 多 km 的杭州湾大桥和东海大桥工程;已竣工的秦岭隧道(18.4 km),山西省引黄工程南干线 5#隧洞(长 26.5 km)、7#隧洞(长 42.6 km),以及辽宁省大伙房引水工程隧道(长达 85.3 km);上海磁悬浮铁路;北京国家大剧院等大型精密特种工程:都堪称世界之最。

随着技术的发展,工程测量的发展趋势和特点可概括为:测量内外业作业的一体化;数据获取及处理的自动化;测量过程控制和系统行为的智能化;测量成果和产品的数字化;测量信息管理的可视化;信息共享和传播的网络化。现代工程测量发展的特点可概括为:精确、可靠、快速、简便、连续、动态、遥测、实时。

测量内外业作业的一体化系指测量内业和外业工作已无明确的界限,过去只能在内业完成的事现在在外业可以很方便地完成。测图时可在野外编辑修改图形,控制测量时可在测站上平差和得到坐标,施工放样数据可在放样过程中随时计算。

数据获取及处理的自动化主要指数据的自动化流程。电子全站仪、电子水准仪、GPS 接收机都是自动化地进行数据获取,大比例尺测图系统、水下地形测量系统、大坝变形监测系统等都可实现或都已实现数据获取及处理的自动化。用测量机器人还可实现了无人观测,即测量过程的自动化。

测量过程控制和系统行为的智能化主要指通过程序实现对自动化观测仪器的智能化控制;测量成果和产品的数字化是指成果的形式和提交方式,只有数字化才能实现计算机处理和管理;测量信息管理的可视化包含图形可视化、三维可视化和虚拟现实等;信息共享和传播的网络化是在数字化基础上锦上添花,包括在局域网和因特网上实现。

从整个学科的发展来看,精密工程测量的理论与方法、工程的形变监测分析与灾害预报、工程信息系统的建立与应用是工程测量学研究的 3 个主要方向。

展望未来,工程测量学在以下方面将得到显著发展:

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。

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、工程与水文地质以及土木建筑等学科相结合,解决工程建设中以及运行期间的安全监测、灾害防治和环境保护的各种问题。

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。

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。

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大作用。

大型和复杂结构建筑、设备的三维测量、几何重构以及质量控制将是工程测量学发展的

一个热点, 固定式、移动式、车载、机载三维激光扫描仪将成为快速获取被测物体乃至地面建筑物、构筑物及地形信息的重要仪器。

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、二维到三维乃至四维, 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、地下以及水下, 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。一方面, 随着人类文明的进步, 对工程测量学的要求越来越高, 服务范围不断扩大; 另一方面, 现代科技新成就, 为工程测量学提供了新的工具和手段, 从而推动了工程测量学的不断发展。而工程测量学的发展又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作用。

1.3 地面点位的确定

1.3.1 地球的形状和大小

测绘工作大多是在地球表面上进行的, 测量基准的确定、测量成果的计算及处理都与地球的形状和大小有关。

地球的自然表面是很不规则的, 有高山、深谷、丘陵、平原、江湖、海洋等, 最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8 844.43 m, 最深的太平洋马里亚纳海沟低于海平面 11 034 m, 其高差不足 20 km, 与地球的平均半径 6 371 km 相比, 是微不足道的。就整个地球表面而言, 陆地面积仅占 29%, 而海洋面积占了 71%。

假设某一个静止不动的海洋面扩展延伸, 使其穿过大陆和岛屿, 形成一个封闭的曲面, 如图 1.1 所示, 这个静止的海水面称作水准面。由于海水受潮汐、风浪等影响而时高时低, 故水准面有无穷多个, 其中与平均海面相吻合的水准面称为大地水准面。由大地水准面所包围的形体称为大地体。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

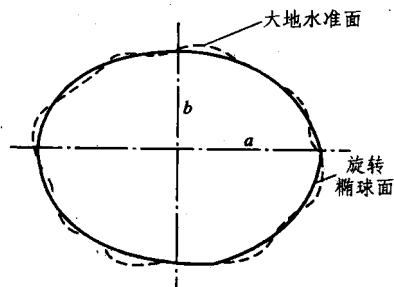


图 1.1 地球自然表面

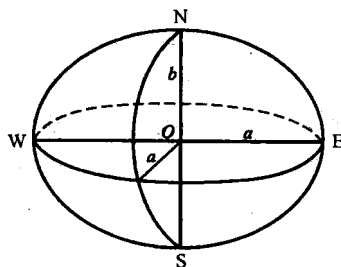


图 1.2 旋转椭球体

水准面的特性是处处与铅垂线相垂直。同一水准面上各点的重力位相等, 故又将水准面称为重力等势面, 它具有几何意义及物理意义。水准面和铅垂线就是实际测量工作所依据的面和线。

由于地球内部质量分布不均匀, 致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化, 所以,

大地水准面是一个不规则的无法用数学式表述的曲面,在这样的面上是无法进行测量数据的计算及处理的。因此人们进一步设想,用一个与大地体非常接近的又能用数学式表述的规则球体即旋转椭球体来代表地球的形状。如图 1.2 所示,它是由椭圆 NESW 绕短轴 NS 旋转而成。旋转椭球体的形状和大小由椭球基本元素确定,即长半轴 a 、短半轴 b 和扁率 $\alpha=(a-b)/a$ 。

某一国家或地区为处理测量成果而采用与大地体的形状大小最接近,又适合本国或本地区要求的旋转椭球,这样的椭球体称为参考椭球体。确定参考椭球体与大地体之间的相对位置关系,称为椭球体定位。参考椭球体面只具有几何意义而无物理意义,它是严格意义上的测量计算基准面。

几个世纪以来,许多学者分别测算出了许多椭球体元素值,表 1.1 列出了几个著名的椭球体。我国的 1954 年北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球,1980 年国家大地坐标系采用的是 1975 国际椭球,而全球定位系统(GPS)采用的是 WGS-84 椭球。

表 1.1 不同的椭球体

椭球名称	长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	计算年代和国家	备 注
贝塞尔	6 377 397	6 356 079	1 : 299.152	1841 年, 德国	
海福特	6 378 388	6 356 912	1 : 297.0	1910 年, 美国	1942 年国际 第一个推荐值
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1 : 298.3	1940 年, 苏联	中国 1954 年 北京坐标系采用
1975 国际	6 378 140	6 356 755	1 : 298.257	1975 年, 国际 第三个推荐值	中国 1980 年国家 大地坐标系采用
WGS-84	6 378 137	6 356 752	1 : 298.257	1979 年, 国际 第四个推荐值	美国 GPS 采用

由于参考椭球的扁率很小,在小区段的普通测量中可将地(椭)球看作圆球,其半径 $R=(a+b)/2=6\,371\text{ km}$ 。

1.3.2 确定地面点位的方法

地面点的位置需用坐标和高程来确定:坐标表示地面点投影到基准面上的位置;高程表示地面点沿投影方向到基准面的距离。确定地面点的坐标和高程是测量工作的主要任务之一。

1.3.2.1 坐 标

1. 地理坐标系

当研究和测定整个地球的形状或进行大区域的测绘工作时,可用地理坐标来确定地面点的位置。地理坐标系属于球面坐标系,根据不同的投影面分为天文坐标系和大地坐标系。

(1) 天文坐标系。

以大地水准面为基准面,地面点沿铅垂线投影在该基准面上的位置,称为该点的天文坐标。该坐标用天文经度和天文纬度表示。如图 1.3 所示,将大地体看作地球,NS 即为地球的自转轴,N 为北极,S 为南极,O 为地球体中心。包含地面点 P 的铅垂线且平行于地球自转

轴的平面称为 P 点的天文子午面。天文子午面与地球表面的交线称为天文子午线，也称经线。而将通过英国格林尼治天文台埃里中星仪的子午面称为本初子午面，相应的子午线称为本初子午线或零子午线，并作为经度计量的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的两面角就称为 P 点的天文经度，用 λ 表示，其值为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，在本初子午线以东的叫东经，以西的叫西经。

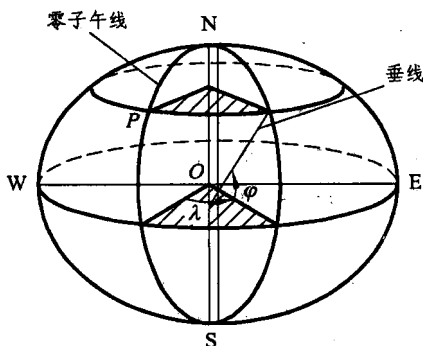


图 1.3 天文坐标

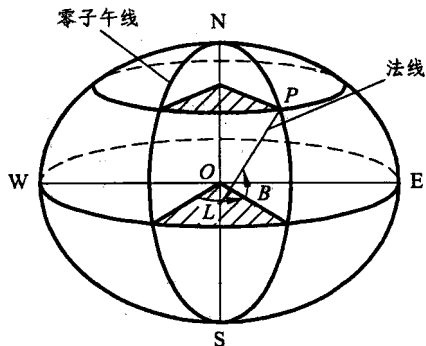


图 1.4 大地坐标

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为赤道面。它是纬度计量的起始面。赤道面与地球表面的交线称为赤道。其他垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为纬线。过点 P 的铅垂线与赤道面之间所夹的线面角就称为 P 点的天文纬度，用 φ 表示，其值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，在赤道以北的叫北纬，以南的叫南纬。

天文坐标 (λ, φ) 是用天文测量的方法实测得到的。

(2) 大地坐标系。

以参考椭球面为基准面，地面点沿椭球面的法线投影在该基准面上的位置，称为该点的大地坐标。该坐标用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。如图 1.4 所示，包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 点的大地子午面。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的两面角就称为 P 点的大地经度 L ，其值分为东经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和西经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。过点 P 的法线与椭球赤道面所夹的线面角就称为 P 点的大地纬度 B ，其值分为北纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。我国 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系就是分别依据两个不同的椭球建立的大地坐标系。

大地坐标 (L, B) 因所依据的椭球面不具有物理意义而不能直接测得，只可通过计算得到。

2. 平面直角坐标系

在实际测量工作中，若用以角度为度量单位的球面坐标来表示地面点的位置是不方便的，通常是采用平面直角坐标。测量工作中所用的平面直角坐标与数学上的直角坐标基本相同，只是测量工作以 x 轴为纵轴，一般表示南北方向，以 y 轴为横轴，一般表示东西方向，象限为顺时针编号，直线的方向都是从纵轴北端按顺时针方向度量的，如图 1.5 所示。数学中的三

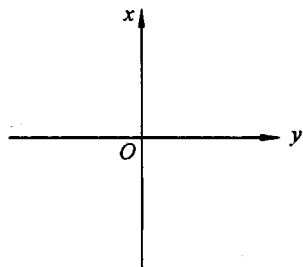


图 1.5 测量平面直角坐标系

角公式在测量坐标系中完全适用。

(1) 独立平面直角坐标系。

当测区的范围较小，能够忽略该区地球曲率的影响而将其当作平面看待时，可在此平面上建立独立的直角坐标系。一般选定子午线方向为纵轴，即 x 轴，原点设在测区的西南角，以避免坐标出现负值。测区内任一地面点用坐标 (x, y) 来表示，它们与本地区统一坐标系没有必然的联系而为独立的平面直角坐标系。如有必要可通过与国家坐标系联测而纳入统一坐标系。经过估算，在面积为 300 km^2 的多边形范围内，可以忽略地球曲率影响而建立独立的平面直角坐标系，当测量精度要求较低时，这个范围还可以扩大数倍。

(2) 高斯平面直角坐标系。

当测区范围较大时，要建立平面坐标系，就不能忽略地球曲率的影响，为了解决球面与平面这对矛盾，则必须采用地图投影的方法将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标。目前我国采用的是高斯投影。从几何意义上看，就是假设一个椭圆柱横套在地球椭球体外并与椭球面上的某一条子午线相切，这条相切的子午线称为中央子午线。假想在椭球体中心放置一个光源，通过光线将椭球面上一定范围内的物像映射到椭圆柱的内表面上，然后将椭圆柱面沿一条母线剪开并展成平面，即获得投影后的平面图形，如图 1.6 所示。

该投影的经纬线图形有以下特点：

- ① 投影后的中央子午线为直线，无长度变化。其余的经线投影为凹向中央子午线的对称曲线，长度较球面上的相应经线略长。
- ② 赤道的投影也为一直线，并与中央子午线正交。其余的纬线投影为凸向赤道的对称曲线。
- ③ 经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系，说明投影后的角度无变形。

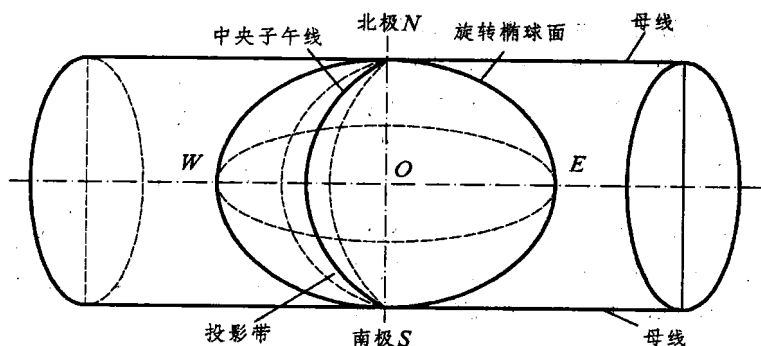


图 1.6 高斯投影

高斯投影没有角度变形，但有长度变形和面积变形，离中央子午线越远，变形就越大。为了对变形加以控制，测量中采用限制投影区域的办法，即将投影区域限制在中央子午线两侧一定的范围，这就是所谓的分带投影，如图 1.7 所示。投影带一般分为 6° 带和 3° 带两种，如图 1.8 所示。

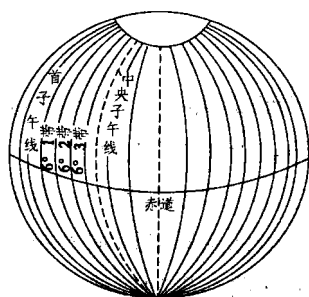


图 1.7 分带投影

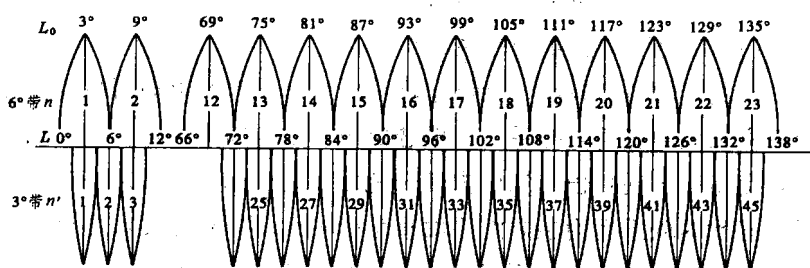


图 1.8 6°带和 3°带投影

6°带投影是从英国格林尼治起始子午线开始, 自西向东, 每隔经差 6°分为一带, 将地球分成 60 个带, 其编号分别为 1, 2, ..., 60。每带的中央子午线经度可用下式计算

$$L_6 = (6n - 3)^\circ \quad (1.1)$$

式中, n 为 6°带的带号。6°带的最大变形在赤道与投影带最外一条经线的交点上, 长度变形为 0.14%, 面积变形为 0.27%。

3°投影带是在 6°带的基础上划分的。每 3°为一带, 共 120 带, 其中央子午线在奇数带时与 6°带中央子午线重合, 每带的中央子午线经度可用下式计算

$$L_3 = 3^\circ n' \quad (1.2)$$

式中, n' 为 3°带的带号。

我国领土位于东经 72°~136°之间, 共包括了 11 个 6°投影带, 即 13~23 带; 22 个 3°投影带, 即 24~45 带。成都位于 6°带的第 18 带, 中央子午线经度为 105°。

通过高斯投影, 将中央子午线的投影作为纵坐标轴, 用 x 表示, 将赤道的投影作为横坐标轴, 用 y 表示, 两轴的交点作为坐标原点, 由此构成的平面直角坐标系称为高斯平面直角坐标系, 如图 1.9 所示。对应于每一个投影带, 就有一个独立的高斯平面直角坐标系, 区分各带坐标系则利用相应投影带的带号。

在每一投影带内, y 坐标值有正有负, 这对计算和使用均不方便, 为了使 y 坐标都为正值, 故将纵坐标轴向西平移 500 km (半个投影带的最大宽度不超过 500 km), 并在 y 坐标前加上投影带的带号。如图 1.9 中的 A 点位于 18 投影带, 其自然坐标为 $x_A = 3\,395\,451\text{ m}$, $y_A = -82\,261\text{ m}$, 它在 18 带中的高斯通用坐标则为 $X_A = 3\,395\,451\text{ m}$, $Y_A = 18\,417\,739\text{ m}$ 。

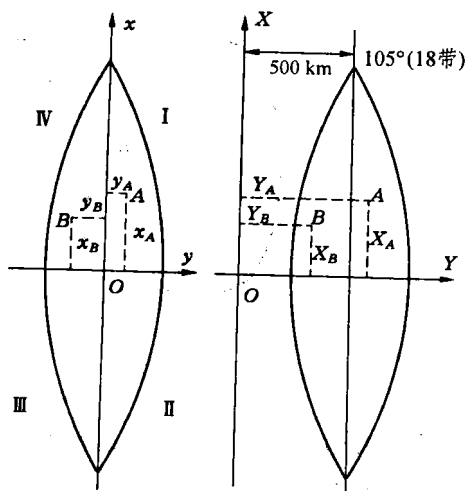


图 1.9 高斯平面直角坐标系

3. 地心坐标系

地心坐标系属于空间三维直角坐标系, 用于卫星大地测量。由于卫星围绕地球质心运动,

所以卫星大地测量中需采用地心坐标系。该系统一般采用质心为坐标系原点， x 、 y 轴在地球赤道平面内，零子午面与赤道平面的交线为 x 轴， z 轴与地球自转轴重合，如图 1.10 所示。地面点 P 的空间位置用三维直角坐标 (x_P, y_P, z_P) 表示。

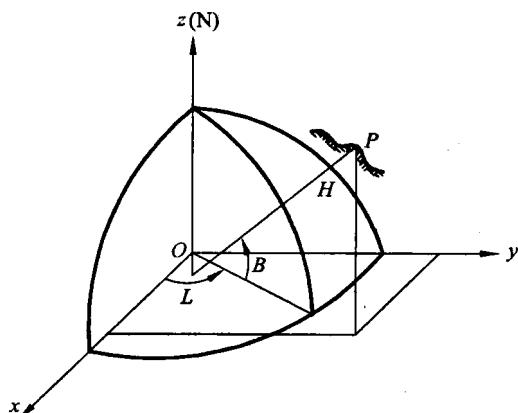


图 1.10 空间直角坐标系

1.3.2.2 高 程

在一般的测量工作中都以大地水准面作为高程起算基准面。因此，地面任一点沿铅垂线方向到大地水准面的距离就称为该点的绝对高程或海拔，简称高程，用 H 表示。如图 1.11 所示，图中的 H_A 、 H_B 分别表示地面上 A 、 B 两点的高程。我国规定以 1950—1956 年间青岛验潮站多年记录的黄海平均海水面作为我国的大地水准面，由此建立的高程系统称为“1956 年黄海高程系”，其青岛水准原点的高程为 72.289 m。新的国家高程基准面是根据青岛验潮站 1952—1979 年间的验潮资料计算确定的，依此基准面建立的高程系统称为“1985 国家高程基准”，并于 1987 年开始启用，水准原点的高程也调整为 72.260 m。

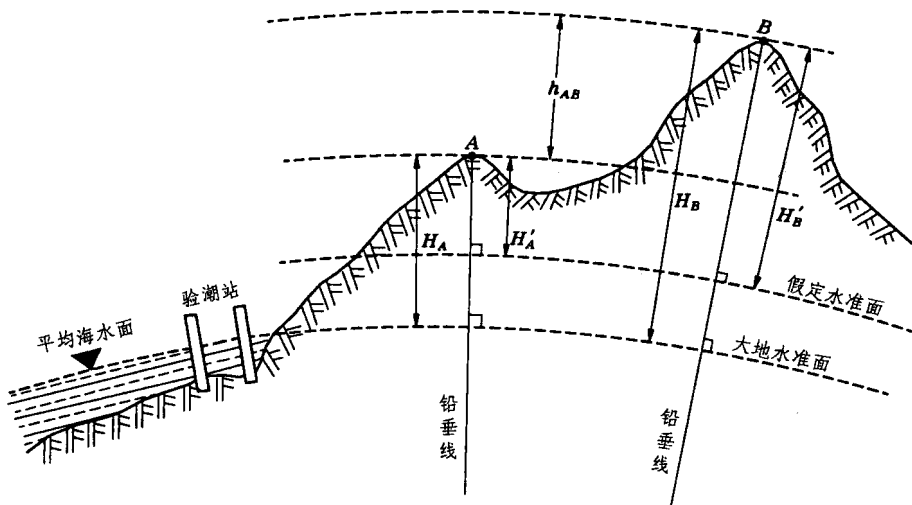


图 1.11 地面点的高程

当测区附近暂没有国家高程点可联测时，也可临时假定一个水准面作为该区的高程起算

面。地面点沿铅垂线至假定水准面的距离,称为该点的相对高程或假定高程。如图 1.11 中的 H'_A 、 H'_B 分别为地面上 A 、 B 两点的假定高程。地面上两点之间的高程之差称为高差,用 h 表示,例如, A 点至 B 点的高差可写为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1.3)$$

由上式可知,高差有正、有负,并用下标注明其方向,即使是正号也不能省。在土木工程中,又将绝对高程和相对高程统称为标高。

1.4 地球曲率对测量工作的影响

当进行大区域测量工作时,应当把地球表面看作球面,地形测量时应采用高斯平面直角坐标系。但当测区范围较小时,可将大地水准面近似为水平面。本节讨论用水平面代替水准面后对水平距离和高程的影响,并给出用水平面代替水准面的限度。

1.4.1 地球曲率对水平距离的影响

如图 1.12 所示为地表上某一个小区域, A 、 B 为地面上两点,它们在大地上水准面上投影为 a 、 b ,如果用切于 a 点的水平面代替水准面,且地面点在其上的投影为 a 、 b' 。设 S 和 S' 分别为 A 、 B 在水准面和水平面上的距离, θ 为 S 所对的圆心角, R 为地球平均曲率半径。若以水平面上的直线距离 S' 代替圆弧长 S ,则在距离上将产生距离误差 ΔS ,有

$$\Delta S = S' - S = R \tan \theta - R\theta = R(\tan \theta - \theta) \quad (1.4)$$

将 $\tan \theta$ 按级数展开,得

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{5}{12}\theta^5 + \dots \quad (1.5)$$

因为 θ 值很小,故取至第 2 项,并以 $\theta = S/R$ 代入式 (1.4),得

$$\Delta S = \frac{1}{3} \frac{S^3}{R^2} \quad (1.6)$$

两端同时除以 S , 得相对误差为

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{3} \frac{S^2}{R^2} \quad (1.7)$$

取地球半径 $R = 6\,371\text{ km}$ 以及不同的距离 S 代入式 (1.6) 和式 (1.7), 便可得距离误差 ΔS 和相对误差 $\Delta S/S$, 如表 1.2 所示。

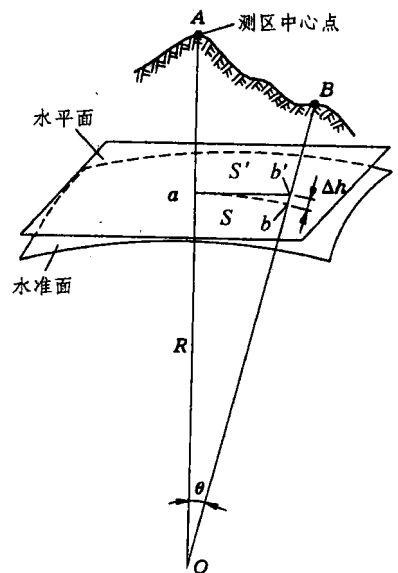


图 1.12 地面点