

覃辉 编著

随书附赠内容精彩的4.3GB DVD光盘1片,内含全书内容的电子教案与最新测量仪器录像片

土木工程测量

(高等学校土建类专业本科通用精品教材)



同济大学出版社

高等学校土建类专业本科通用精品教材

土木工程测量

章 辉 编著

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量 / 覃辉编著. —上海: 同济大学出版社, 2006. 6

高等学校土建类专业本科通用精品教材

ISBN 7-5608-3275-X

I. 土... II. 覃... III. 土木工程-工程测量-高等学校-教材 IV. TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 040947 号

土木工程测量

覃 辉 编著

责任编辑 杨宁霞 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出 版 行	同济大学出版社
	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店
照 排	南京展望文化发展有限公司
印 刷	同济大学印刷厂印刷
开 本	787 mm×1092 mm 1/16
印 张	22.5
字 数	576 千字
印 数	1—6 100
版 次	2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5608-3275-X/TU·674
定 价	42.00 元(含光盘)

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

前 言

本书按高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科培养目标 and 培养方案及课程教学大纲》^[1]编写,适合土木工程专业各方向和建筑学、城市规划、给排水、房地产经营与管理等专业作为测量学课程教材,也可作为土建工程技术人员继续教育教材。

测量学课程教学大纲要求了解航空摄影测量与地籍测量的基本原理与方法,考虑到绝大部分院校的测量学课程教学时数有限,一般很少安排时间在课堂上讲授这些内容,故本书将航空摄影测量与地籍测量的内容制作成电子版的.PDF 文件放置在光盘“附录 CD”路径下。

测量学是土建类专业必修的专业基础课,是一门实践性强,理论和实践相结合的课程。它提供学生在各类土木工程建设中需掌握的测量基本理论、基本方法和基本技能,有利于培养学生的动手、实践和创新能力,为学生从事土木工程勘测、设计、施工、管理奠定基础。

测量学课程的实践能力主要体现在应用测量的基本原理、基本方法与测量仪器进行测、算、绘作业三个方面,本书在这三个方面都引入了成熟的先进技术。测的重点是操作主流全站仪与 GPS RTK;算的重点是应用随书光盘提供的 PC 机程序与 CASIO 于 2006 年 1 月在中国市场最新推出的串列编程计算器 fx-7400G 程序进行数字化测量记录与计算;绘的重点是操作 CASS 数字测图软件进行数字测图及其数字地形图的应用;此外,建筑物与公路曲线放样的重点是我们研发的数字化放样方法。这些技术与方法均要求读者熟练掌握 Windows 与 AutoCAD 的基本操作。

为配合测量实践能力培养,随书赠送的 1 张 DVD 光盘提供了各类测、算、绘应用软件,其中计算类软件全部是经过多年测绘生产实践检验、技术成熟的正式版,并为这些软件录制了大量带同期录音的视频文件,演示其操作方法,以提高学习软件操作的效率与质量,降低学习成本。光盘上还提供了内容充实的精美电子教案和反映当今国内外最高水平的测量新型仪器和测量系统的电子教案与视频录像片,为读者了解国际先进的测量仪器与测量系统的成果与发展方向提供了丰富的多媒体资料。为保证光盘内容的先进性,我们将根据世界测量仪器与测量系统的发展形势,每年更新一次光盘内容,随书赠送 DVD 光盘的最终容量将达到 8 GB。

本书是我们充分体现以读者为本倾尽全力精心打造的一部教材。本书通过简练的文字、超过 1 500 万像素的精细线条图和丰富的多媒体资料多方位地诠释了成熟的测量新技术、新仪器在提高测量实践能力培养中的作用。我们真诚地希望广大读者在使用中提出批评意见,以便我们在修订工作中改进。敬请将使用中发现的问题和建议及时发送到 qh-506@163.com 信箱。

编 者

2006 年 5 月

DVD 光盘的使用方法

随书赠送的一张 DVD 光盘的价格已包含在图书售价中,请读者购书时向经销商免费索取。使用光盘前,请先仔细阅读下列说明:

(1) 随书赠送的一张光盘为 DVD 光盘,容量约为 4.3 GB,该光盘不能放入 CD 光驱使用,只能在 DVD 光驱才能正常使用。

(2) 光盘“\电子教案”路径下放置了包含本书全部内容的 PowerPoint 电子教案,光盘“\辅助电子教案”路径下放置了为国内外著名测量仪器厂商制作的全系列测量仪器与软件介绍电子教案,为使读者了解世界测量仪器的发展历史,还制作了“经典测量仪器回顾展教案.ppt”。通过观看这些电子教案,可以帮助读者较全面地了解测量仪器的发展历史。建议读者使用 Office2000 或以上版本打开。教师如要修改电子教案,请先将其复制到 PC 机硬盘中并取消文件的只读属性。

(3) 在光盘“\Google 地球卫星图片”路径下,我们用从 Google Earth 上获取的国内外著名城市、高山与河川的高清晰卫星图片精心制作了两个电子教案供读者欣赏。Google Earth 是一个免费的互联网软件,其安装文件 GoogleEarth_POnline.exe 也放置在该路径下,只要读者的 PC 机接上互联网,完成安装后,就可以启动软件浏览全球任意地点的卫星图片,并观看清晰的地面三维影像。

(4) 光盘“\测量仪器录像片”路径下放置了大量反映当今国际先进测量仪器与测量系统的视频录像文件,它们均为 .mpg 视频格式文件,不能在普通 DVD 机上播放,只能在 PC 机上使用各种视频播放软件播放。该路径下放置了一个最新版的“暴风影音”播放器,其安装文件为 StormCodec 5.12RC3.exe,安装方法请读者参阅该路径下的 readme.doc 文件。

(5) 在光盘“\PROG”路径下放置的程序有 PC 机程序(扩展名为 .exe)与 CASIO fx-7400G 串列编程计算器程序(扩展名为 .CAT),请读者在 PC 机的硬盘中创建一个名称为 PROG 的文件夹,将光盘“\PROG”路径下的全部文件及文件夹都复制到 PC 机硬盘的 PROG 文件夹中并取消文件的只读属性。

① PC 机.exe 程序的使用方法:PC 机程序可在任意的 Windows 下运行。方法是,先按书中介绍的程序要求,用 Windows 记事本编写一个已知数据文件并按程序要求的文件名存盘保存。在 Windows 的资源管理器下双击扩展名为 .exe 的 PC 机程序,输入已知数据文件名,按回车键,当已知数据文件名、文件格式及其内容正确无误时,将在同路径下生成一个 su 文件或 xy 与 yx 坐标数据文件。用记事本打开它们,即可查看计算成果。

② fx-7400G 程序的使用方法:7400G 程序的扩展名为 .CAT,它只能使用 FA-123 软件打开。应先在 PC 机上安装 FA-123 软件,方法是,双击光盘“\FA123COM\Setup.exe”文件,根据屏幕提示操作完成安装。由南方测绘公司经销的 fx-7400G 计算器标配一根 SB-87-w 串口数据线,可以使用该数据线连接 PC 机的 COM 口与计算器的通讯口,不需

要安装数据线驱动程序。第一次使用 FA - 123 软件时,应执行下拉菜单“Link/Communications”命令,设置好连接数据线的 COM 口号;执行下拉菜单“Tool/Mode Type/fx - 7400/CFX9850 series”命令,设置与 fx - 7400/CFX9850 series 计算器进行数据通讯。当使用三、四等水准测量记录程序 P9 - 10 - 2. CAT 与量角器配合经纬仪测图法记录程序 P9 - 10 - 1. CAT 时,通过 FA - 123 将其上传到计算器中后,应按图 7 - 20 的要求修改后才可以使用,否则将出错。

(6) 在光盘“\测量仪器说明书”路径下放置了国内外主流仪器厂商生产的绝大部分全站仪、GPS 与测量软件的 PDF 格式说明书文件,它需要先安装 PDF 阅读器才可以打开、察看及打印这些说明书文件的内容,其安装程序为光盘“\PDF 软件\foxitreaderpro. exe”文件,安装方法请读者阅读该路径下的 readme. txt 文件。

(7) CASS5.1 学习版的全部安装文件放置在光盘的“\CASS 安装文件”路径下,其用户手册和参考手册的 PDF 文档放置在光盘的“\CASS 说明书”路径下。CASS5.1 学习版与正式版的区别主要有两点:① 光盘中的 CASS5.1 删除了打印功能和块存盘命令 Wblock,使用 Qsave 命令存盘时,只能保存 90 KB 以内的图形文件;② 学习版只能在中望 CAD 下安装,其安装文件也放置在光盘“\CASS 安装文件”路径下。安装学习版 CASS5.1 的操作步骤是:先执行光盘“\CASS 安装文件”路径下的“中望 CAD 中文版(简体). exe”文件,系统自动安装中望 CAD。完成安装后,先运行一次中望 CAD,然后关闭它;再执行该路径下的“Setup. exe”命令安装 CASS5.1 学习版。全部安装过程请读者播放光盘“\教学演示片”文件夹下的“中望 CAD 中文版与 CASS5.1 学习版的安装方法 VCD 教学片. avi”视频演示文件观看。

中望 CAD 的安装不影响用户计算机中已经安装的 AutoCAD 的正常使用,且中望 CAD 中的绝大部分命令、操作界面和操作方法与 AutoCAD 完全相同。

(8) 在光盘“\全站仪通讯软件”路径下,放置了国内外主流全站仪生产厂商的全站仪通讯软件,其中,南方测绘与科力达公司的通讯软件不需要安装,直接将其复制到 PC 机的硬盘中,然后发送到 PC 机桌面上即可使用,其余通讯软件均需安装后才能使用。

编 者

2006 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 测量学简介	1
§ 1.2 地球的形状和大小	2
§ 1.3 测量坐标系与地面点位的确定	3
§ 1.3.1 确定点的球面位置的坐标系	3
§ 1.3.2 确定点的高程系	8
§ 1.3.3 WGS-84 坐标系	9
§ 1.4 地球曲率对测量工作的影响	9
§ 1.5 测量工作概述	11
§ 1.6 测量常用计量单位与换算	12
思考题与练习题	13
第 2 章 水准测量	14
§ 2.1 水准测量原理	14
§ 2.2 水准测量的仪器与工具	15
§ 2.3 水准测量的方法与成果处理	20
§ 2.4 微倾式水准仪的检验与校正	27
§ 2.5 水准测量的误差及其削减方法	30
§ 2.6 自动安平水准仪	31
§ 2.7 精密水准仪和精密水准尺	32
§ 2.8 电子水准仪和条码水准尺	34
思考题与练习题	37
第 3 章 角度测量	38
§ 3.1 角度测量原理	38
§ 3.2 光学经纬仪的结构及其度盘读数	39
§ 3.3 经纬仪的安置与水平角观测	44
§ 3.4 水平角测量方法	46
§ 3.5 竖直角测量方法	50
§ 3.6 经纬仪的检验和校正	54
§ 3.7 水平角测量的误差分析	57
§ 3.8 激光经纬仪	60
§ 3.9 电子经纬仪	61

思考题与练习题	65
第 4 章 距离测量与直线定向	67
§ 4.1 钢尺量距	67
§ 4.2 视距测量	71
§ 4.3 电磁波测距	74
§ 4.3.1 光电测距仪的基本原理	74
§ 4.3.2 ND3000 红外测距仪简介	78
§ 4.3.3 手持激光测距仪简介	79
§ 4.3.4 光电测距的误差分析	81
§ 4.4 直线定向	83
§ 4.5 陀螺经纬仪与直线真子午线方位角的测定	85
思考题与练习题	88
第 5 章 全站仪及其使用	90
§ 5.1 全站仪概述	90
§ 5.2 南方测绘 NTS-305R 无棱镜测距全站仪概况	91
§ 5.3 NTS-305R 全站仪的基本操作与设置	93
§ 5.4 NTS-305R 全站仪的菜单操作	95
§ 5.5 高端全站仪简介	104
§ 5.5.1 拓扑康 GPT-3000L 长测程(1 200 m)无棱镜测距 全站仪	104
§ 5.5.2 拓扑康 GPT-7000i 智能脉冲无棱镜测距(250 m)图像 全站仪	107
§ 5.5.3 徕卡 TPS1200 无棱镜测距(500 m)全站仪	109
§ 5.5.4 南方测绘 NTS-660 系列智能全站仪	111
§ 5.6 索佳超站仪 SET3110MV 简介	112
思考题与练习题	114
第 6 章 测量误差的基本知识	115
§ 6.1 测量误差的概念	115
§ 6.2 偶然误差的特性	116
§ 6.3 评定真误差精度的指标	118
§ 6.4 误差传播定律及其应用	120
§ 6.5 等精度独立观测量的最可靠值与精度评定	123
§ 6.6 不等精度独立观测量的最可靠值与精度评定	126
§ 6.6.1 权	126
§ 6.6.2 加权平均值及其中误差	127
§ 6.6.3 单位权中误差的计算	128

思考题与练习题	130
第 7 章 控制测量	131
§ 7.1 控制测量概述	131
§ 7.2 平面控制网的定向、定位与坐标正反算	136
§ 7.3 导线测量	138
§ 7.4 交会定点的计算	148
§ 7.5 三、四等水准测量	150
§ 7.6 三角高程测量	154
思考题与练习题	156
第 8 章 GPS 测量的原理与方法	159
§ 8.1 GPS 概述	159
§ 8.2 GPS 的组成	160
§ 8.2.1 地面监控系统	160
§ 8.2.2 用户设备	161
§ 8.3 GPS 定位的基本原理	161
§ 8.3.1 卫星信号	161
§ 8.3.2 伪距定位	163
§ 8.3.3 载波相位定位	163
§ 8.3.4 实时差分定位	166
§ 8.4 GPS 测量的实施	167
§ 8.5 南方测绘灵锐 S82 双频 GPS RTK 操作简介	169
思考题与练习题	176
第 9 章 大比例尺地形图的测绘	177
§ 9.1 地形图的比例尺	177
§ 9.2 大比例尺地形图图式	181
§ 9.3 地貌的表示方法	181
§ 9.4 1:500~1:2 000 大比例尺地形图的分幅与编号	187
§ 9.5 测图前的准备工作	187
§ 9.6 大比例尺地形图的解析测绘方法	189
§ 9.6.1 量角器配合经纬仪测图法	189
§ 9.6.2 经纬仪联合光电测距仪测图法	192
§ 9.6.3 地形图的绘制	192
§ 9.6.4 地形图测绘的基本要求	193
§ 9.6.5 地形图的拼接、检查和提交的资料	194
思考题与练习题	195

第 10 章 地形图的应用	197
§ 10.1 地形图的识读	197
§ 10.2 地形图应用的基本内容	203
§ 10.3 图形面积的量算	205
§ 10.4 工程建设中的地形图应用	209
思考题与练习题	213
第 11 章 大比例尺数字地形图的测绘与应用	214
§ 11.1 使用 CASS 进行数字测图的方法	214
§ 11.2 图解地形图的数字化	225
§ 11.3 数字地形图应用简介	226
§ 11.3.1 查询计算与结果注记	227
§ 11.3.2 土方量的计算	228
§ 11.3.3 坐标数据文件的输出	230
§ 11.4 数字地形图与 GIS 的数据交换	230
思考题与练习题	232
第 12 章 建筑施工测量	233
§ 12.1 施工控制测量	233
§ 12.2 工业与民用建筑施工放样的基本要求	233
§ 12.3 施工放样的基本工作	235
§ 12.4 点的平面位置的测设	238
§ 12.5 建筑施工测量	242
§ 12.5.1 轴线的测设	242
§ 12.5.2 基础施工测量	242
§ 12.5.3 工业厂房构件安装测量	245
§ 12.5.4 高层建筑的轴线投测和高程传递	247
§ 12.5.5 激光墨线仪	250
§ 12.6 管道工程测量	251
§ 12.7 建筑变形测量	254
§ 12.7.1 建筑变形测量的一般规定	254
§ 12.7.2 沉降观测	256
§ 12.7.3 位移观测	259
§ 12.8 竣工总平面图的编绘	264
思考题与练习题	265
第 13 章 路线、隧道与桥梁测量	266
§ 13.1 路线测量概述	266

§ 13.2	路线中线测量	266
§ 13.3	圆曲线及其测设	270
§ 13.4	基本型平面线形及其测设	279
§ 13.5	路线纵横断面测量	284
§ 13.6	路线施工测量	291
§ 13.7	隧道测量	298
§ 13.7.1	隧道测量概述	298
§ 13.7.2	洞外控制测量	299
§ 13.7.3	隧道施工测量	301
§ 13.7.4	洞内控制测量	303
§ 13.7.5	竖井联系测量	304
§ 13.8	桥梁施工测量	306
§ 13.8.1	桥位控制测量	306
§ 13.8.2	桥墩的测设	308
思考题与练习题		309
附录 A CASIO fx-7400G 串列编程计算器的使用		311
附录 B 测量实验		324
测量实验须知		324
实验 1 水准测量		326
实验 2 水准仪的检验与校正		327
实验 3 DJ6 级光学经纬仪的认识和使用		329
实验 4 测回法测量水平角		331
实验 5 方向法观测水平角		332
实验 6 竖直角与视距三角高程测量		334
实验 7 经纬仪的检验和校正		335
实验 8 钢尺量距与罗盘仪的使用		338
实验 9 量角器配合经纬仪法测图		339
实验 10 草图法数字测图		341
实验 11 使用 NTS-305R 全站仪放样建筑物轴线交点的平面位置		342
实验 12 使用 NTS-305R 全站仪放样圆曲线中边桩点的平面位置		344
参考文献		346

第 1 章 绪 论

§ 1.1 测量学简介

测量学(surveying)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。测量学将地表物体分为地物和地貌。

地物(feature):地面上天然或人工形成的物体,它包括湖泊、河流、海洋、房屋、道路和桥梁等。

地貌(geomorphy):地表高低起伏的形态,它包括山地、丘陵和平原等。

地物和地貌总称为地形(landform),测量学的主要任务是测定和测设。

测定(location):使用测量仪器和工具,通过测量和计算将地物及地貌的位置按一定比例尺、规定的符号缩小并绘制成地形图(topographic map),供科学研究和工程建设规划设计使用。

测设(setting-out):将在地形图上设计出的建筑物和构筑物的位置在实地标定出来,作为施工的依据。

在城市规划、给水排水、煤气管道、工业厂房和民用建筑建设中的测量工作是:在设计阶段,测绘各种比例尺的地形图,供建、构筑物的平面及竖向设计使用;在施工阶段,将设计建、构筑物的平面位置和高程在实地标定出来,作为施工的依据;工程完工后,测绘竣工图,供日后扩建、改建、维修和城市管理应用,对某些重要的建、构筑物,在建设中和建成以后还应进行变形观测,以保证建筑物的安全。

在铁路、公路建设中的测量工作是:为了确定一条经济合理的路线,应预先测绘路线附近的地形图,在地形图上进行路线设计,然后将设计路线的位置标定在地面上以指导施工;当路线跨越河流时,应建造桥梁,建桥前,应测绘河流两岸的地形图,测定河流的水位、流速、流量和河床地形图以及桥梁轴线长度等,为桥梁设计提供必要的资料,最后将设计桥台、桥墩的位置标定到实地;当路线穿过山岭需要开挖隧道时,开挖前,应在地形图上确定隧道的位置,根据测量数据计算隧道的长度和方向;隧道施工通常是从隧道两端相向开挖,这就需要根据测量成果指示开挖方向,保证其正确贯通。

对土建类专业的学生,通过本课程的学习,应掌握下列有关测定和测设的基本内容:

① 地形图测绘。运用各种测量仪器、软件和工具,通过实地测量与计算,把小范围内地面上的地物、地貌按一定的比例尺测绘成图。

② 地形图应用。在工程设计中,从地形图上获取设计所需要的资料,例如点的坐标和高程、两点间的水平距离、地块的面积、土方量、地面的坡度、地形的断面和进行地形分析等。

③ 施工放样。将图上设计的建、构筑物标定在实地上,作为施工的依据。

④ 变形观测。监测建、构筑物的水平位移和垂直沉降,以便采取措施,保证建筑物的安全。

⑤ 竣工测量。测绘竣工图。

§ 1.2 地球的形状和大小

地球(earth)是一个南北极稍扁,赤道稍长,平均半径约为 6 371 km 的椭球体。测量工作在地球表面上进行。地球的自然表面有高山、丘陵、平原、盆地、湖泊、河流和海洋等高低起伏的形态,其中海洋面积约占 71%,陆地面积约占 29%。在地面进行测量工作应掌握重力、铅垂线、水准面、大地水准面、参考椭球面和法线的概念及关系。

如图 1-1(a)所示,由于地球的自转,其表面的质点 P 除受万有引力的作用外,还受到离心力的影响。 P 点所受的万有引力与离心力的合力称为重力(gravity),重力的方向称为铅垂线(plumb line)方向。

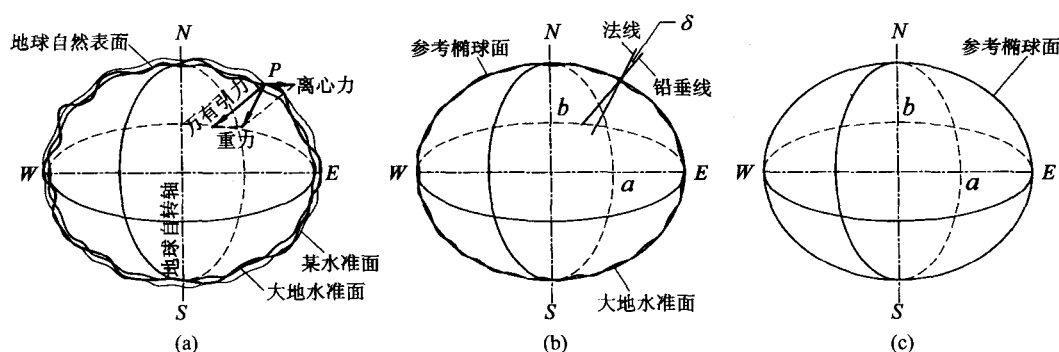


图 1-1 地球自然表面、水准面、大地水准面、参考椭球面、铅垂线、法线间的关系

假想静止不动的水面延伸穿过陆地,包围整个地球,形成一个封闭曲面,这个封闭曲面称为水准面(level surface)。水准面是受地球重力影响形成的,是重力等位面,物体沿该面运动时,重力不做功(如水在这个面上不会流动),其特点是曲面上任意一点的铅垂线垂直于该点的曲面。根据这个特点,水准面也可以定义为:处处与铅垂线垂直的连续封闭曲面。由于水准面的高度可变,因此,符合该定义的水准面有无数个,其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面(geoid)。大地水准面是唯一的。

由于地球内部物质的密度分布不均匀,造成地球各处万有引力的大小不同,致使重力方向产生变化,所以,大地水准面是有微小起伏的、不规则的、很难用数学方程表示的复杂曲面。如果将地球表面上的物体投影到这个复杂曲面上,计算起来将非常困难。为了解决投影计算问题,通常是选择一个与大地水准面非常接近的、能用数学方程表示的椭球面作为投影的基准面,这个椭球面是由长半轴为 a 、短半轴为 b 的椭圆 $NESW$ 绕其短轴 NS 旋转而成的旋转椭球面(图 1-1(c))。旋转椭球又称为参考椭球(reference ellipsoid),其表面称为参考椭球面。

由地表任一点向参考椭球面所作的垂线称法线(normal line),地表点的铅垂线与法线一般不重合,其夹角 δ 称为垂线偏差(deflection of the vertical),如图 1-1(b)所示。

决定参考椭球面形状和大小的元素是椭圆的长半轴 a (major radius)、短半轴 b (secondary radius),如图 1-1(c)所示。此外,根据 a 和 b 还定义了扁率 f (flattening)、第一

偏心率 e (first eccentricity) 和第二偏心率 e' (secondary eccentricity):

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

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \tag{1-2}$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \tag{1-3}$$

我国采用过的两个参考椭球元素值及 GPS 测量使用的参考椭球元素值列于表 1-1。

表 1-1 参考椭球元素值

序号	坐标系名称	a (m)	f	e^2	e'^2
1	1954 北京坐标系	6 378 245	1 : 298. 3	0. 006 693 421 622 966	0. 006 738 525 414 683
2	1980 西安坐标系	6 378 140	1 : 298. 257	0. 006 694 384 999 59	0. 006 739 501 819 47
3	WGS-84 坐标系 (GPS 用)	6 378 137	1 : 298. 257 223 563	0. 006 694 379 990 13	0. 006 739 496 742 23

表 1-1 中, 序号 1 的参考椭球称为克拉索夫斯基椭球(Krasovsky ellipsoid), 序号 2 的参考椭球是 1975 年 16 届“国际大地测量与地球物理联合会”(International Union of Geodesy and Geophysics)通过并推荐的椭球, 简称 IUGG1975 椭球, 序号 3 的参考椭球是 1979 年 17 届“国际大地测量与地球物理联合会”通过并推荐的椭球, 简称 IUGG1979 椭球。

由于参考椭球的扁率很小, 当测区范围不大时, 可以将参考椭球近似看作半径为 6 371 km 的圆球。

§ 1.3 测量坐标系与地面点位的确定

无论是测定还是测设, 都需要通过确定地面点的空间位置来实现。空间是三维的, 所以, 表示地面点在某个空间坐标系中的位置需要三个参数, 确定地面点位的实质就是确定其在某个空间坐标系中的三维坐标。测量中, 将空间坐标系分为参心坐标系和地心坐标系。“参心”意指参考椭球的中心, 由于参考椭球的中心一般不与地球质心重合, 所以它属于非地心坐标系, 表 1-1 中的前两个坐标系是参心坐标系。“地心”意指地球的质心, 表 1-1 中 GPS 使用的 WGS-84 属于地心坐标系。工程测量通常使用参心坐标系。

§ 1.3.1 确定点的球面位置的坐标系

由于地表高低起伏不平, 所以一般是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位置。为此, 测量上将空间坐标系分解成确定点的球面位置的坐标系(二维)和高程系(一维)。确定点的球面位置的坐标系有地理坐标系和平面直角坐标系两类。

(1) 地理坐标系

按坐标系所依据的基本线和基本面的不同以及求坐标方法的不同, 地理坐标系

(geographical reference system)又可分为天文地理坐标系和大地地理坐标系两种。

1) 天文地理坐标系

天文地理坐标又称天文坐标,表示地面点在大地水准面上的位置,其基准是铅垂线 and 大地水准面,它用天文经度 λ (astronomical longitude) 和天文纬度 φ (astronomical latitude) 来表示地面点在球面上的位置。

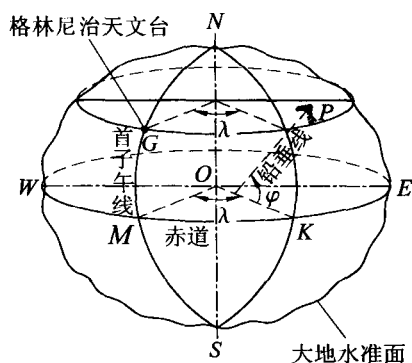


图 1-2 天文地理坐标

如图 1-2 所示,过地表任一点 P 的铅垂线与地球旋转轴 NS 所组成的平面称为该点的天文子午面 (astronomical meridian), 天文子午面与大地水准面的交线称为天文子午线,也称经线。设 G 点为英国格林尼治 (Greenwich) 天文台的位置,称过 G 点的天文子午面为首子午面 (International meridian plane)。 P 点天文经度 λ 的定义是: 过 P 点的天文子午面 $NPKS$ 与首子午面 $NGMS$ 的两面角,从首子午面向东或向西计算,取值范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$; 在首子午线以东为东经,以西为西经。同一子午线上各点的经度相同。过 P 点垂直于地球旋转轴的平面与地球表面的交线称为 P 点的纬线 (woof), 过球心 O 的纬线称为

赤道 (equator)。 P 点天文纬度 φ 的定义是: P 的铅垂线与赤道平面的夹角,自赤道起向南或向北计算,取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 在赤道以北为北纬,以南为南纬。

可以应用天文测量方法测定地面点的天文经度 λ 和天文纬度 φ 。例如广州地区的概略天文地理坐标为东经 $113^\circ 18'$, 北纬 $23^\circ 07'$ 。

2) 大地地理坐标系

大地地理坐标又称大地坐标,是表示地面点在参考椭球面上的位置,它的基准是法线和参考椭球面,它用大地经度 L (geodetic longitude) 和大地纬度 B (geodetic latitude) 表示。 P 点的大地经度 L 是过 P 点的大地子午面 (geodetic meridian plane) 和首子午面所夹的两面角, P 点的大地纬度 B 是过 P 点的法线与赤道面的夹角。大地经、纬度是根据起始大地点 (又称大地原点,该点的大地经纬度与天文经纬度一致) 的大地坐标,按大地测量所得的数据推算而得。我国以陕西省泾阳县永乐镇北洪流村大地原点 (geodetic origin) 为起算点,由此建立的大地坐标系,称为“1980 西安坐标系” (Xi'an geodetic coordinate system 1980), 简称 80 西安系; 通过与前苏联 1942 年普尔科沃坐标系联测, 经我国东北传算过来的坐标系称“1954 北京坐标系” (Beijing geodetic coordinate system 1954), 简称 54 北京系, 其大地原点位于前苏联列宁格勒天文台中央。

(2) 平面直角坐标系

1) 高斯平面坐标系

地理坐标对局部测量工作来说是非常不方便的。例如,在赤道上, $1''$ 的经度差或纬度差对应的地面距离约为 30 m。测量计算最好在平面上进行,但地球是一个不可展的曲面,应通过投影的方法将地球表面上的点位化算到平面上。地图投影有多种方法,我国采用的是高斯-克吕格正形投影 (Gauss-Kruger conformal projection), 简称高斯投影 (Gauss projection)。高斯投影的实质是椭球面上微小区域的图形投影到平面上后仍然与原图形相

似,即不改变原图形的形状。例如,椭球面上一个三角形投影到平面上后,其三个内角保持不变。

高斯投影是高斯在 1820~1830 年间为解决德国汉诺威地区大地测量投影问题而提出的一种投影方法。1912 年起,德国学者克吕格(Kruger)将高斯投影公式加以整理和扩充并推导出了实用计算公式。以后,保加利亚学者赫里斯托夫(W. K. Hristow)等对高斯投影作了进一步的更新和扩充。使用高斯投影的国家主要有德国、中国与前苏联。

从几何意义上讲,高斯投影是一种横椭圆柱正形投影。如图 1-3(a)所示。设想用一个横椭圆柱套在参考椭球外面,并与某一子午线相切,称该子午线为中央子午线(central meridian),横椭圆柱的中心轴 CC' 通过参考椭球中心 O 并与地轴 NS 垂直。将中央子午线东西各一定经差范围内的地区投影到横椭圆柱面上,再将该横椭圆柱面沿过南、北极点的母线切开展平,便构成了高斯平面坐标系(Gauss plane coordinate system),见图 1-3(b)所示。

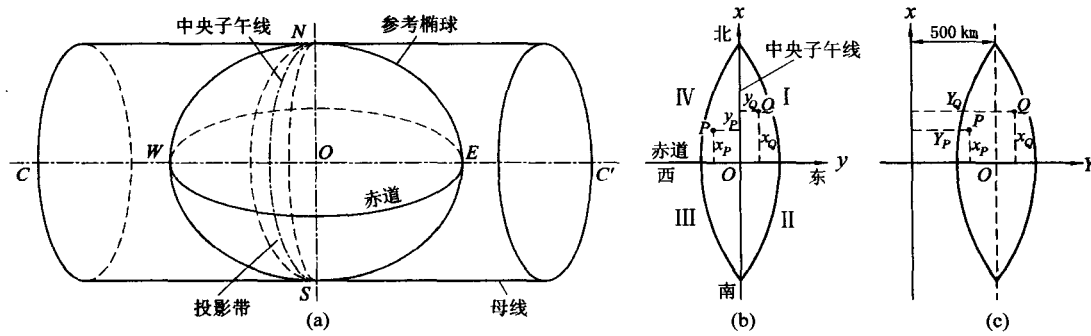


图 1-3 高斯平面坐标系的投影图

高斯投影是将地球按经线划分成若干带分带投影,带宽用投影带两边缘子午线的经度差表示,常用带宽为 6° , 3° 和 1.5° , 分别简称为 6° , 3° 和 1.5° 带投影。国际上对 6° 和 3° 带投影的中央子午线经度有统一规定,满足这一规定的投影称为统一 6° 带投影和统一 3° 带投影。

① 统一 6° 带投影

从首子午线起,每隔经度 6° 划分为一带,如图 1-4 所示,自西向东将整个地球划分为 60 个投影带,带号从首子午线开始,用阿拉伯数字表示。第一个 6° 带的中央子午线的经度为 3° ,任意带的中央子午线经度 L_0 与投影带号 N 的关系为

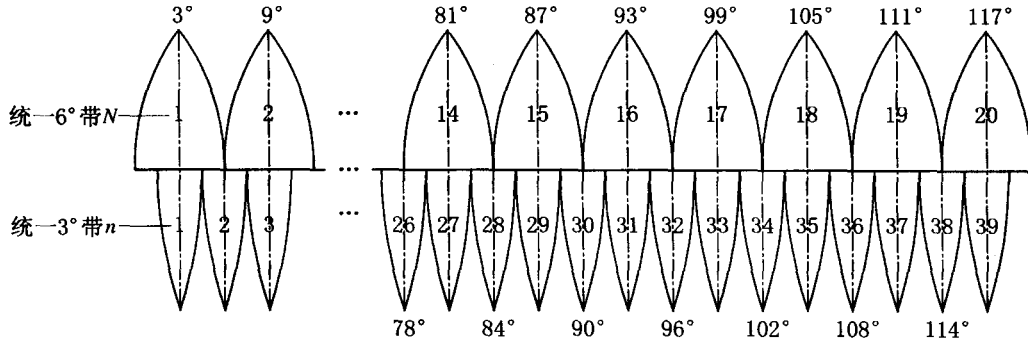


图 1-4 统一 6° 带投影与统一 3° 带投影高斯平面坐标系的关系

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1-4)$$

反之,已知地面任一点的经度 L ,要计算该点所在的统一 6° 带编号的公式为

$$N = \text{Int}\left(\frac{L+3}{6} + 0.5\right) \quad (1-5)$$

式中,Int 为取整函数。

投影后的中央子午线和赤道均为直线并保持相互垂直。以中央子午线为坐标纵轴(x 轴),向北为正;以赤道为坐标横轴(y 轴),向东为正,中央子午线与赤道的交点为坐标原点 O 。

与数学上的笛卡儿坐标系比较,在高斯平面坐标系中,为了定向的方便,定义纵轴为 x 轴,横轴为 y 轴, x 轴与 y 轴互换了位置,象限则按顺时针方向编号(图 1-3(b)),这样就可以将数学上定义的各类三角函数在高斯平面坐标系中直接应用,不需做任何变更。

我国位于北半球, x 坐标值恒为正值, y 坐标值则有正有负,当测点位于中央子午线以东时为正,以西时为负。例如图 1-3(b)中的 P 点位于中央子午线以西,其 y 坐标值为负。对于 6° 带高斯平面坐标系, y 坐标的最大负值约为 -334 km。为了避免 y 坐标出现负值,我国统一规定将每带的坐标原点西移 500 km,也即给每个点的 y 坐标值加上 500 km,使之恒为正,见图 1-3(c)所示。

为了能够根据横坐标值确定某点位于哪一个 6° 带内,还应在 y 坐标值前冠以带号。将经过加 500 km 和冠以带号处理后的横坐标用 Y 表示。例如,图 1-3(c)中的 P 点位于第 19 带内,其横坐标为 $y_P = -265\,214$ m,则有 $Y_P = 19\,234\,786$ m。

高斯投影属于正形投影的一种,它保证了球面图形的角度与投影后平面图形的角度不变,但球面上任意两点间的距离经投影后会产生变形,其规律是:除了中央子午线没有距离变形以外,其余位置的距离均存在变形。

② 统一 3° 带投影

统一 3° 带投影的中央子午线经度 L'_0 与投影带号 n 的关系为

$$L'_0 = 3n \quad (1-6)$$

反之,已知地面任一点的经度 L ,要计算该点所在的统一 3° 带编号的公式为

$$n = \text{Int}\left(\frac{L}{3} + 0.5\right) \quad (1-7)$$

统一 6° 带投影与统一 3° 带投影的关系见图 1-4 所示。

我国领土所处的概略经度范围为东经 $73^\circ27'$ —东经 $135^\circ09'$,根据式(1-5)和式(1-7)求得的统一 6° 带投影与统一 3° 带投影的带号范围分别为 $13\sim23, 24\sim45$ 。可见,在我国领土范围内,统一 6° 带与统一 3° 带的投影带号不重叠,其中统一 6° 带投影的分布情况见图 1-5 所示。

③ 1.5° 带投影

1.5° 带投影的中央子午线经度与带号的关系,国际上没有统一规定,通常是使 1.5° 带投影的中央子午线与统一 3° 带投影的中央子午线或边缘子午线重合。

④ 任意带投影