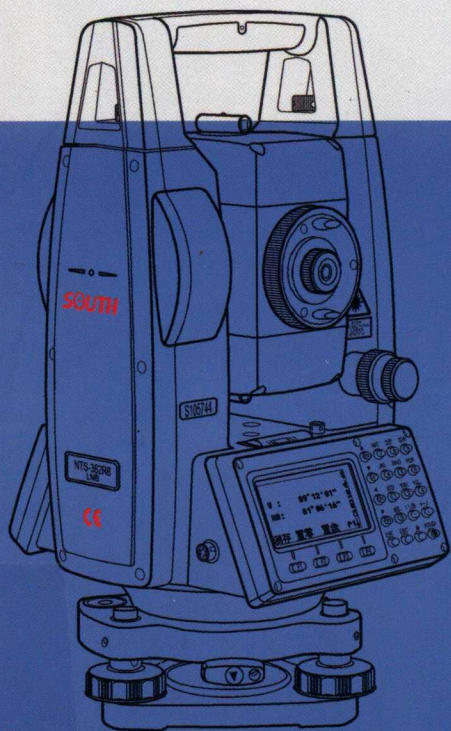


教育部精品教材，普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国大学出版社图书奖第二届优秀教材二等奖
百校土木工程专业多媒体立体化教材

土木工程测量

(第5版)

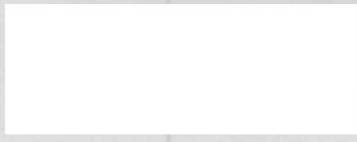
主编 覃辉 马超 朱茂栋
主审 宁津生



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

主要内容

教育部精品教材，普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国大学出版社图书奖第二届优秀教材二等奖
百校土木工程专业多媒体立体化教材



土木工程测量

(第5版)

主 编 覃 辉 马 超 朱茂栋
主 审 宁津生



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

这是一本经 16 年持续改进、内容更趋成熟的移动互联网信息化测量多媒体立体教材,使用作者与广州南方测绘科技股份有限公司合作开发的 MSMT 手机软件解决施工测量程序计算的全部内容。同济大学出版社课程网站配有制作精美的 PPT 教案,练习题答案(只对教师及工程技术人员开放),测量实验与测量实习指导书,测量方法及测绘新技术教学视频,全站仪模拟操作 CIA 课件,各类测量软、硬件设备操作手册,建筑物数字化放样及道路、桥梁、隧道施工测量案例等充实的测、算、绘能力培养教学资料。

本书按《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的要求修订,可用作土木工程专业各方向和建筑学、城市规划、给排水、工程管理、房地产经营与管理等专业的“土木工程测量”课程教材,也可用作土建工程技术人员的继续教育教材。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量 / 覃辉, 马超, 朱茂栋主编. —5 版
—上海: 同济大学出版社, 2019.1
ISBN 978-7-5608-8246-8

I. ①土… II. ①覃… ②马… ③朱… 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(2018)第 268004 号

土木工程测量(第 5 版)

Civil Engineering Surveying (5th Edition)

覃 辉 马 超 朱茂栋 主编

责任编辑 杨宁霞 李 杰 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 25.5
字 数 636 000
版 次 2019 年 1 月第 5 版 2019 年 7 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-8246-8

定 价 58.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

第5版前言

“土木工程测量”是土建类专业唯一一门介绍施工测量的重要课程。2004年1月出版了第1版《土木工程测量》教材。从撰写第1版教材至今,我们持续进行了16年的研发。今天,依托互联网信息化技术,第5版教材终于实现了移动互联网信息化测量全覆盖。学完第5版教材后,你会发现:原来施工测量还可以如此简单。

第1~4版教材专注于使用卡西欧 fx-5800P 工程机程序解决施工测量计算问题,对交通施工测量计算的原理、方法与程序持续进行了15年的研发,出版的14部专著成果在我国交通施工测量领域得到了广泛的应用。在我国移动互联网信息化技术迅速普及的背景下,继续使用 fx-5800P 工程机程序解决施工测量计算问题已不能适应工程用户的需求。

2017年,笔者与南方测绘科技股份有限公司开展战略合作,将14部专著的全部成果融入南方 MSMT 手机软件中。

众所周知,智能手机可以连接移动互联网,手机中的数据,可以通过移动互联网发送给世界各地的好友。使用南方 MSMT 手机软件,可以实现蓝牙启动数字水准仪、全站仪测量,并自动提取测量结果到记录表格,生成的测量及计算数据 Excel 文件,可以通过移动互联网发送给好友,彻底颠覆了手动记录测量数据与抄录计算结果的传统模式。

本书按《高等学校土木工程本科指导性专业规范》^[1]的要求修订,按培养土木工程专业学生的测、算、绘应用技能为主线编写。其中,“测”是操作全站仪、数字水准仪、GNSS RTK 采集或放样点位的坐标;“算”是应用南方 MSMT 手机软件处理程序计算问题,应用工程编程机 fx-5800P 验算原理公式;“绘”是应用 Auto CAD 与数字测图软件 CASS 展示与编辑点位的坐标。

与第4版教材比较,第5版教材的测、算、绘三项技能培养全部使用南方 MSMT 手机软件实现,重点改进了下列章节的内容:

(1) 开发了 MSMT 抵偿高程面高斯投影模块。高斯投影是测绘工程专业的课程教学内容,但因高铁与高速公路设计图纸频繁地使用分带投影的抵偿坐标系,如果不掌握抵偿高程面的高斯投影计算方法,就无法从事交通施工测量。

(2) 与南方常州瑞德仪器有限公司合作,为新开发的 DL-2003A 数字水准仪新增蓝牙测量命令,使 MSMT 水准测量模块能通过蓝牙启动水准仪测量、自动记录测量结果和进行单一水准路线的近似平差计算。

(3) 用全站仪取代光学经纬仪撰写角度测量章节的内容,这是国内第一本彻底删除了光学经纬仪内容的测量教材。为了满足全站仪与 MSMT 手机软件通过蓝牙传输数据的需要,与南方北京三鼎光电仪器有限公司合作完成了 NTS-362LNB 新款蓝牙全站仪机载软件的研发工作,开发了 MSMT 水平角、竖直角观测模块,实现了角度测量的信息化。

(4) 用南方导航银河 6 GNSS RTK 替换 S86 GNSS RTK,银河 6 可以同时接收 GPS、GLONASS、北斗和 Galileo 四种卫星信号。

(5) 开发了 MSMT 导线平差模块,能对所有类型的单一导线进行近似平差计算,坐标计算

结果可以通过蓝牙发送给全站仪。

(6) 开发了 MSMT 地形图测绘模块,使模拟测图与数字测图均实现了移动互联网信息化测量。

(7) 开发了 MSMT 坐标传输模块,将南方 CASS 采集的建筑物放样点坐标文件传输到坐标传输模块,就可以方便地通过蓝牙传输到全站仪内存文件。

(8) 开发了 MSMT 交点法程序 Q2X8 与线元法程序 Q2X9,两个程序均具有三维坐标正、反算,桥梁墩台桩基与涵洞坐标计算、隧道超欠挖测量计算功能。三维坐标正反算能处理高速公路和市政公路两种类型的路基横断面。对于市政道路路基,允许中分带加宽、主道加宽、侧分带加宽与辅道加宽,行车道、人行道允许设置 5 个结构层,边坡允许设置 4 个结构层,且每个结构层均允许不同的松铺系数。桥梁墩台桩基与涵洞坐标计算使用斜交坐标系,便于用户在 MS-Excel 中累加桩基或涵洞碎部点的斜交坐标。

2011 年 5 月,笔者在文献[19]中首先提出了使用轮廓线主点数据法,解决任意对称断面的隧道超欠挖测量的计算问题,用轮廓线主点数据法编写的各类程序已经在交通施工企业得到广泛的应用。使用轮廓线主点数据法编程,如果仅仅计算测点的超欠挖值并不复杂,但要精确地计算各种疑难断面图形测点的水平与垂直移距就非常复杂,这个问题一直都没有得到很好的解决。笔者在 2017 年用了整 3 个月时间研究算法,并用 25 种疑难断面图形测试,终于彻底解决了这一问题。MSMT 隧道超欠挖测量程序根据笔者的最新研究成果编写。

虽然本书用南方 MSMT 手机软件全面替代了卡西欧 fx-5800P 程序,但 fx-5800P 编程机的复数计算功能,在培养学生和工程技术人员手动计算、更好地理解公式原理方面,仍然具有重要的应用价值。

土木工程测量中最复杂的计算内容是路线施工测量。受课程教学时数的限制,本书只在第 12 章简要介绍了部分路线施工测量内容,如需掌握更全面的路线施工测量技术,请参考文献[25]。

王贵满、林培效、李飞三位教师详细审阅了书稿的所有章节,核算了全部章节的练习题答案,在此一并表示感谢。

南方 MSMT 手机软件为收费软件,广州南方高速铁路测量技术有限公司为使用本教材的在校师生制定了特殊的优惠政策,详情请登录公司网站(<http://www.esurveycloud.com>)咨询。

同济大学出版社课程网站(<http://press.tongji.edu.cn/download/show/159>)配有本书全部内容的精美 PPT 教案文件和练习题答案,也可扫描封底二维码登录。PPT 教案文件是作者耗时 16 年,潜心研究、精心创作并持之以恒开发完善的电子教学资料成果。练习题答案是 PDF 加密文件,只对教师与工程技术人员开放,不对在校学生开放,请符合条件的读者将证件扫描后存为 JPG 图像文件发送到邮箱 qh-506@163.com 获取密码。

教材改版是一项永远在路上的艰巨工作。社会在发展,时代在进步,逆水行舟,不进则退,我们会继续努力研发新技术来改进教材,使测量课程的教学内容适应新技术发展的需要,惠及使用本教材的莘莘学子。希望能继续得到读者的批评意见,以改进我们的工作。敬请读者将使用中发现的问题和建议及时发送到邮箱:qh-506@163.com。

编者

2018 年 9 月

目 录

第5版前言

第1章 绪论	1
1.1 测量学简介	1
1.2 地球的形状和大小	3
1.3 测量坐标系与地面点位的确定	5
1.3.1 确定点的球面位置的坐标系	6
1.3.2 确定点的高程系	15
1.3.3 地心坐标系	17
1.4 测量工作概述	17
1.5 测量常用计量单位与换算	19
思考题与练习题	20
第2章 水准测量	23
2.1 水准测量原理	23
2.2 水准测量的仪器与工具	25
2.3 水准点与水准路线	32
2.4 三、四等水准测量方法	34
2.4.1 三、四等水准测量的技术要求	34
2.4.2 三、四等水准的观测方法	35
2.4.3 南方 MSMT 手机软件水准测量程序	37
2.5 单一水准路线近似平差	39
2.6 微倾式水准仪的检验与校正	42
2.7 水准测量的误差及其削减方法	45
2.8 自动安平水准仪	46
2.9 精密水准仪与因瓦水准尺	47
2.10 南方测绘 DL-2003A 精密数字水准仪	49
思考题与练习题	63
第3章 全站仪角度测量	65
3.1 角度测量原理	65
3.2 全站仪电子测角原理	66
3.3 全站仪的望远镜与补偿器	68

3.4	全站仪的结构与安置	70
3.5	角度模式	76
3.6	水平角测量方法	79
3.7	竖直角测量方法	88
3.8	全站仪的检验和物理校正	94
3.9	全站仪的电子校正	98
3.10	水平角测量的误差分析	101
	思考题与练习题	104
第4章 全站仪距离和坐标测量		107
4.1	相位式光电测距原理	107
4.2	距离模式	111
4.3	直线定向	115
4.4	平面坐标计算原理	119
4.5	坐标模式	123
4.6	菜单模式总图	132
4.7	数据采集	134
4.8	存储管理	137
4.9	程序	143
	思考题与练习题	150
第5章 测量误差的基本知识		152
5.1	测量误差概述	152
5.2	偶然误差的特性	153
5.3	评定真误差精度的指标	155
5.4	误差传播定律及其应用	157
5.5	等精度独立观测量的最可靠值与精度评定	161
5.6	不等精度独立观测量的最可靠值与精度评定	164
	思考题与练习题	168
第6章 控制测量		169
6.1	控制测量概述	169
6.2	导线测量	171
6.3	交会定点测量	182
6.4	三角高程测量	190
	思考题与练习题	193
第7章 GNSS 测量的原理与方法		197
7.1	GPS 概述	198

7.2	GPS 的组成	199
7.3	GPS 定位的基本原理	200
7.3.1	卫星信号	200
7.3.2	伪距定位	202
7.3.3	载波相位定位	202
7.3.4	实时动态差分定位	205
7.4	GNSS 控制测量方法	206
7.5	南方银河 6 双频四星 GNSS RTK 操作简介	208
7.6	南方银河 6 GNSS RTK 的测量方法	212
7.7	连续运行参考站系统 CORS	227
	思考题与练习题	231
第 8 章	大比例尺地形图的测绘	232
8.1	地形图的比例尺	232
8.2	大比例尺地形图图式	235
8.3	地貌的表示方法	240
8.4	1:500、1:1 000、1:2 000 地形图的矩形分幅与编号	244
8.5	测图前的准备工作	245
8.6	大比例尺地形图的模拟测绘方法	246
	思考题与练习题	254
第 9 章	地形图的应用	255
9.1	地形图的识读	255
9.2	地形图应用的基本内容	263
9.3	图形面积的量算	266
9.4	工程建设中地形图的应用	267
	思考题与练习题	268
第 10 章	大比例尺数字地形图的测绘与应用	270
10.1	CASS9.1 操作方法简介	270
10.2	草图法数字测图	273
10.3	绘制等高线与添加图框	279
10.4	数字地形图的应用	287
10.5	数字地形图与 GIS 的数据交换	290
	思考题与练习题	292
第 11 章	建筑施工测量	293
11.1	施工控制测量	293
11.2	工业与民用建筑施工放样的基本要求	294

11.3	施工放样的基本工作	295
11.4	建筑物数字化放样设计点位平面坐标的采集	301
11.5	建筑施工测量	308
11.6	喜利得 PML32-R 线投影激光水平仪	315
	思考题与练习题	319
第 12 章	路线施工测量	320
12.1	路线控制测量概述	320
12.2	路线三维设计图纸	322
12.3	路线测量的基本知识	324
12.4	交点法单圆平曲线计算原理	329
12.5	交点法非对称基本型平曲线计算原理	335
12.6	断链计算	351
12.7	竖曲线计算原理	356
12.8	路基超高与边桩设计高程计算	360
12.9	桥梁墩台桩基坐标验算	369
12.10	隧道超欠挖测量计算	374
	思考题与练习题	386
参考文献		400

第1章 绪论

本章导读

● **基本要求** 理解重力、铅垂线、水准面、大地水准面、参考椭球面、法线的概念及其相互关系;掌握高斯平面坐标系的原理,熟悉南方 MSMT 手机软件抵偿高程面高斯投影计算方法;了解参心坐标系——“1954 北京坐标系”与“1980 西安坐标系”的定义和大地原点的意义;了解地心坐标系 WGS-84 世界坐标系与 2000 国家大地坐标系的定义。了解我国高程系——“1956 年黄海高程系”与“1985 国家高程基准”的定义和水准原点的意义。

● **重点** 测量的两个任务——测定与测设,其原理是测量并计算空间点位的三维坐标。测定与测设都应在已知坐标点上安置仪器进行,已知点的坐标通过控制测量的方法获得。

● **难点** 大地水准面与参考椭球面的关系,高斯平面坐标系与数学笛卡儿坐标系的关系与区别,我国对高斯平面坐标系 y 坐标的处理规则。

1.1 测量学简介

测量学(surveying)是研究地球表面局部地区内测绘工作的基本原理、技术、方法和应用的学科。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,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,包括山地、丘陵和平原等。

地物和地貌总称为地形,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,通过测量与计算将地物和地貌的位置按一定比例尺和规定的符号缩小绘制成地形图,供科学研究和工程规划、设计、建设使用。

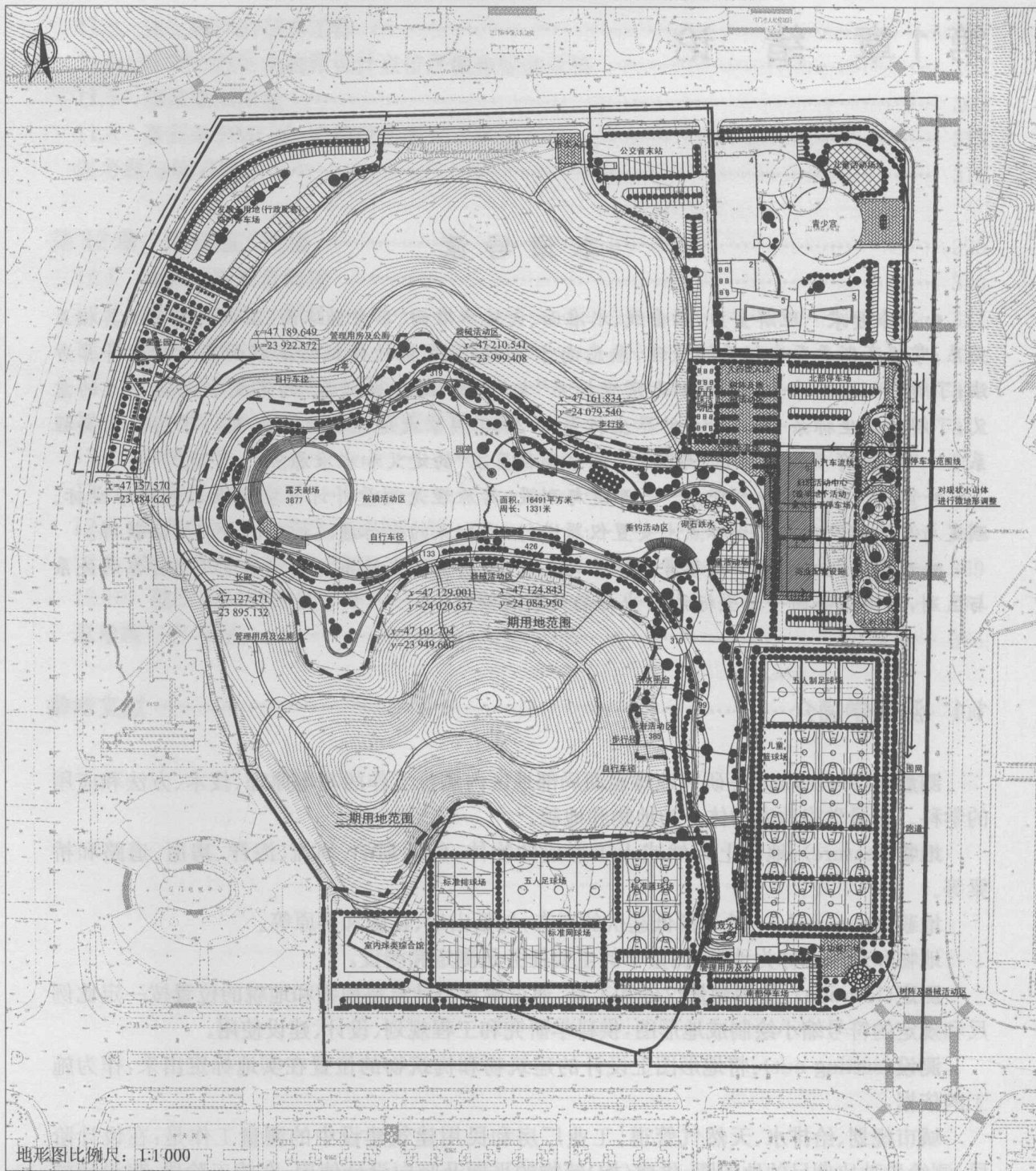
测设(setting-out):将地形图上设计的建筑物和构筑物的位置在实地标定出来,作为施工的依据。

城市规划、给排水、天然气管道、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,将设计的建(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,在施工中和建成以后还应进行变形观测,以保证建(构)筑物的安全。图 1-1 所示为利用公园地形图和规划设计图进行公园设计的案例。

公路、铁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

广东省江门市北新区体育公园规划方案

测量单位：江门市勘测院，设计单位：江门市规划勘察设计院



地形图比例尺：1:1 000

- (1) 体育公园用地指标：
规划建设用地面积：一期 94 000 m²；二期 27 000 m²
- (2) 体育公园一期主要项目：
五人足球场：3 个
标准篮球场：15 个
儿童篮球场：1 个
跑道：500 m
步行径：1 800 m (不含登山径)

- 自行车径：1 600 m (不含山地自行车径)
- 商业配套设施：2 700 m²
- 地面小汽车停车位：320 个
- 地下停车场面积：13 800 m²
- 星光园二期建设用地面积：4 300 m²
- 妇联活动中心建设用地面积：10 029 m²
- 建筑面积：10 200 m² (含半地下活动室 3 375 m²)
- 公交首末站建设用地面积：2 057 m²

图 1-1 广东省江门市北新区体育公园地形图与规划设计图

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、河床地形图和桥梁轴线长度等,为桥梁设计提供必要的资料,在施工阶段,需要将设计桥台、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及其断面形状,保证隧道准确贯通。图 1-2 所示为在数字地形图上设计道路、桥梁、隧道的案例。

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:应用测量仪器、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,点的平面坐标和高程,两点间的水平距离,地块的面积,土方量,地面的坡度,指定方向的纵、横断面,以及进行地形分析等。

(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(构)筑物的安全。

(5) 竣工测量:测绘竣工图。

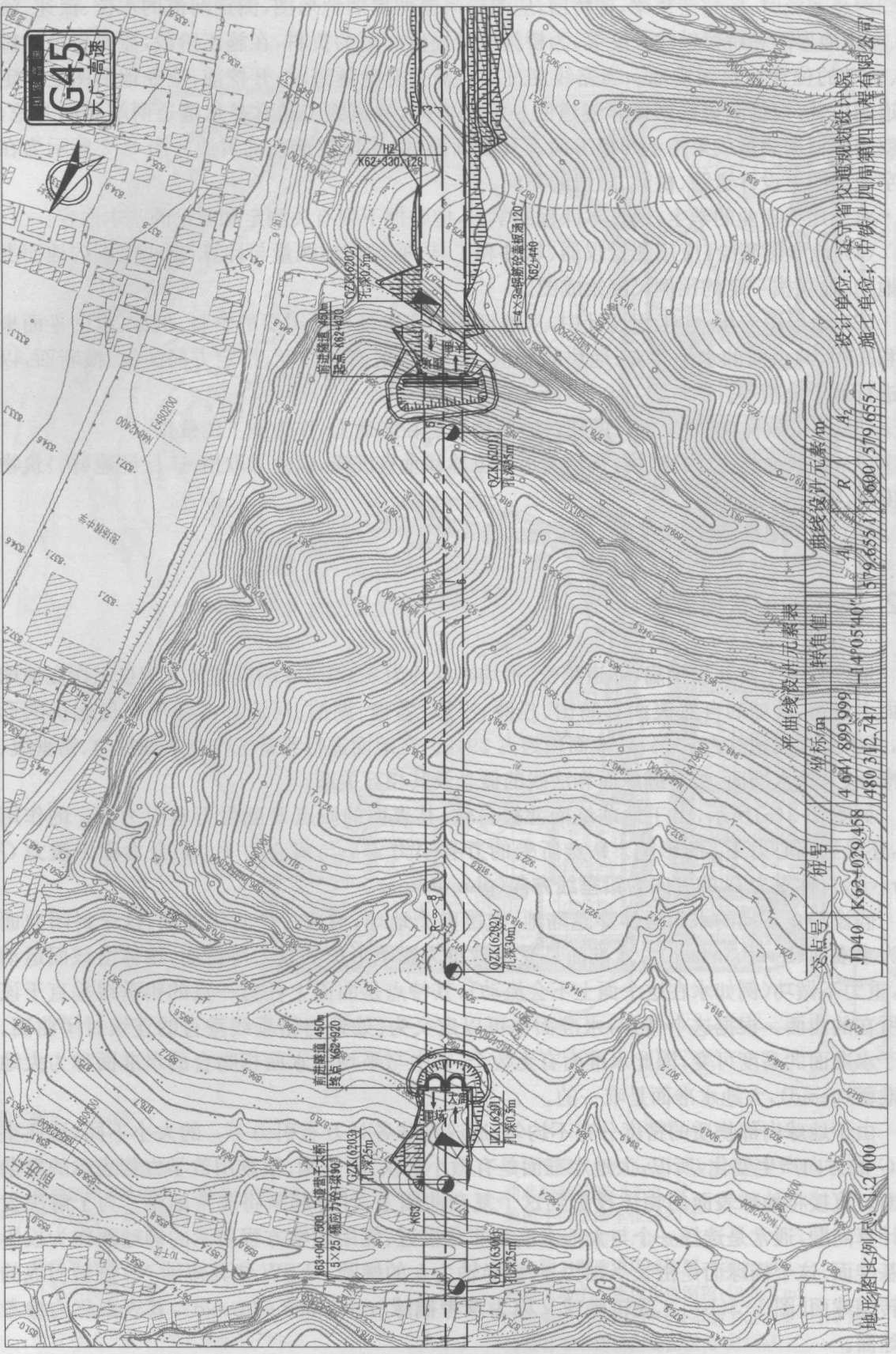
1.2 地球的形状和大小

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其相互关系。

如图 1-3(a)所示,由于地球绕南北极自转,其表面的质点 P 除受万有引力 $F_{\text{万}}$ 的作用外,还受到离心力 $F_{\text{离}}$ 的影响。P 点所受的万有引力 $F_{\text{万}}$ 与离心力 $F_{\text{离}}$ 的合力称为重力 G (gravity),称重力 G 的方向为铅垂线方向(plumb line)。

假设静止不动的水面延伸穿越陆地,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重力等位面,物体沿该面运动时,重力不做功(例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所在的曲面。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 $F_{\text{万}}$ 的大小不同,致使重力 G 的方向产生变化,所以,大地水准面是有微小起伏、不规则、很难用数学方程表示的复杂曲面。直接将地球表面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、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 1-3(b)]。旋转椭球又称为参考椭球(reference ellipsoid),其表面称为参考椭球面。



设计单位：广东省交通规划设计院
 施工单位：中铁十四局第四工程有限公司

图 1-2 大(庆)广(州)高速公路(G45)河北省茅荆坝(蒙冀界)至承德段第 19 标段前进隧道带状地形图与设计图

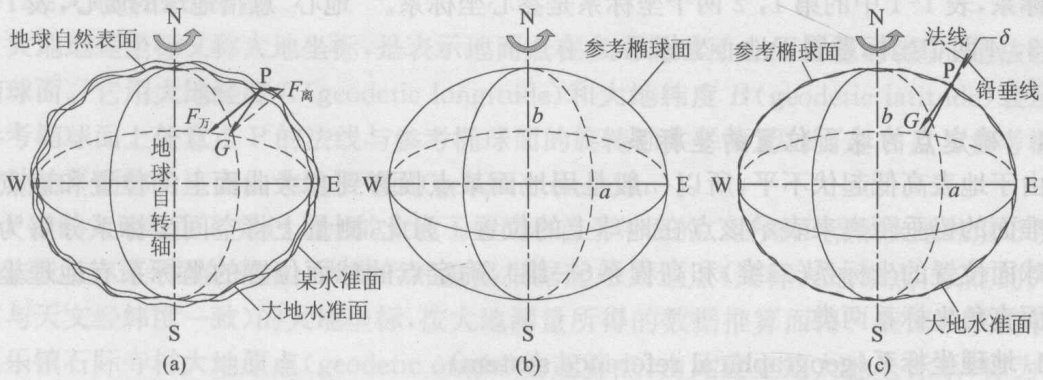


图 1-3 地球自然表面、水准面、大地水准面、参考椭球面、铅垂线、法线之间的关系

如图 1-3(c)所示,由地表任一点向参考椭球面所作的垂线称为法线(normal line),地面点 P 的铅垂线与其法线一般不重合,二者之间的夹角 δ 称为垂线偏差(deflection of the vertical)。

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) 和短半轴 b (secondary radius) 或扁率 f (flattening), 其关系为

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

《城市测量规范》^[2]给出了我国采用的三个参考椭球元素值及 GPS 测量使用的参考椭球元素值,如表 1-1 所列。

表 1-1 参考椭球元素值

序号	坐标系名称	类型	椭球名	长半轴 a/m	扁率 f
1	1954 北京坐标系	参心坐标系	克拉索夫斯基椭球	6 378 245	1 : 298.3
2	1980 西安坐标系	参心坐标系	IUGG1975 椭球	6 378 140	1 : 298.257
3	2000 国家大地坐标系	地心坐标系		6 378 137	1 : 298.257 222 101
4	WGS-84 坐标系(GNSS)	地心坐标系	IUGG1979 椭球	6 378 137	1 : 298.257 223 563

表 1-1 中的 IUGG 为国际大地测量与地球物理联合会(International Union of Geodesy and Geophysics)的英文缩写,序号 4 的参考椭球,其长半轴 a 与 IUGG1979 椭球相同,扁率 f 与序号 3 的 IUGG1979 椭球有微小的差异。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。几何空间是三维的,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与地球质心一般不重合,所以它属于非地

心坐标系,表 1-1 中的第 1, 2 两个坐标系是参心坐标系。“地心”意指地球的质心,表 1-1 中的第 3, 4 两个坐标系属于地心坐标系。

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为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(geographical reference system)

地理坐标系是用经纬度表示点在地球表面的位置。1884 年,在美国华盛顿召开的国际经度会议上,正式将经过格林尼治天文台的经线确定为 0° 经线,纬度以赤道为 0° ,分别向南、北半球推算。明朝末年,意大利传教士利玛窦(Matteo Ricci, 1522—1610)最早将西方经纬度概念引入中国,但当时并未引起中国人的重视,直到清朝初年,通晓天文地理的康熙皇帝(1654—1722)才决定使用经纬度等制图方法,重新绘制中国地图,他聘请了十多位各有特长的法国传教士,专门负责清朝的地图测绘工作。

按坐标系所依据的基本线和基本面的不同以及求解坐标方法的不同,地理坐标系又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,其基准是铅垂线和大地水准面,它用天文经度 λ (astronomical longitude) 和天文纬度 φ (astronomical latitude) 来表示点在球面的位置。

如图 1-4 所示,过地表任一点 P 的铅垂线与地球旋转轴 NS 平行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。P 点天文经度 λ 的定义是:P 点天文子午面与首子午面的二面角,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 NS 的平面与大地水准面的交线称为 P 点的纬线(woof),过地球质心 O 的纬线称为赤道(equator)。P 点天文纬度 φ 的定义是:P 点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。

可以用天文测量方法测定地面点的天文纬度 φ 和天文经度 λ 。例如广州地区的概略天文地理坐标为 $N23^\circ 07'$, $E113^\circ 18'$,在谷歌地球上输入“ $N23^\circ 07'$, $E113^\circ 18'$ ”,即可搜索到该点的位置,注意其中的逗号应为西文逗号。

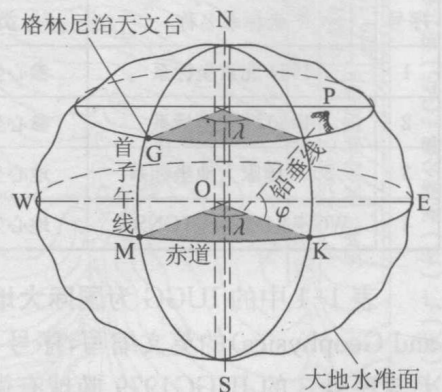


图 1-4 天文地理坐标

(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,其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。由于参考椭球面上任意点 P 的法线与参考椭球面的旋转轴共平面,因此,过 P 点与参考椭球面旋转轴的平面称为该点的**大地子午面**(geodetic meridian)。

P 点的大地经度 L 是过 P 点的大地子午面和首子午面的二面角, P 点的大地纬度 B 是过 P 点的法线与赤道平面的夹角。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石际寺村**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);通过与苏联 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为“**1954 北京坐标系**”(Beijing Geodetic Coordinate System 1954),其大地原点位于俄罗斯圣彼得堡市普尔科沃天文台圆形大厅中心。

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。高斯投影的特征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(1777—1855)在 1820—1830 年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,德国学者克吕格将高斯投影公式加以整理和扩充并推导了实用计算公式。之后,保加利亚学者赫里斯托夫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、中国和俄罗斯等。

如图 1-5(a)所示,高斯投影是一种横圆柱正形投影。设想用一个横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)或**轴子午线**,横圆柱的中心轴 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圆柱面上,再将该横圆柱面沿过南、北极点的母线切开展开平,便构成了**高斯平面坐标系**(Gauss plane coordinate system),如图 1-5(b)所示。

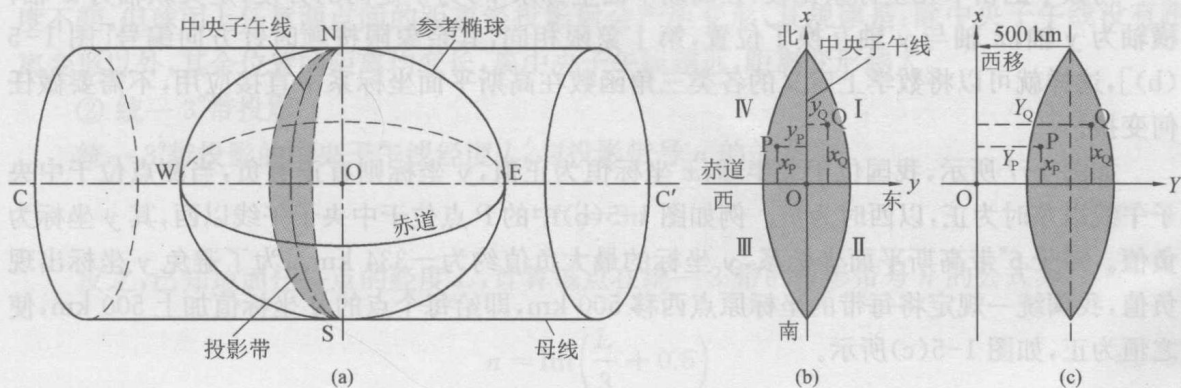


图 1-5 高斯平面坐标系投影图

高斯投影是将地球按经线划分为若干带进行分带投影,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° 带, 3° 带和 1.5° 带投影。国际上对 6° 带和 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 1-6 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° 带的中央子午线经度为 $E3^\circ$,任意带的中央子午线经度 L_0 与投影带号 N 的关系为

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1-2)$$

反之,已知地面任一点的经度 L ,计算该点在统一 6° 带的投影带号 N 的公式为

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

式中,Int 为取整函数。在 fx-5800P 编程计算器中,按 FUNCTION $\boxed{1}$ \blacktriangledown $\boxed{2}$ 键输入取整函数“Int”。

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 。

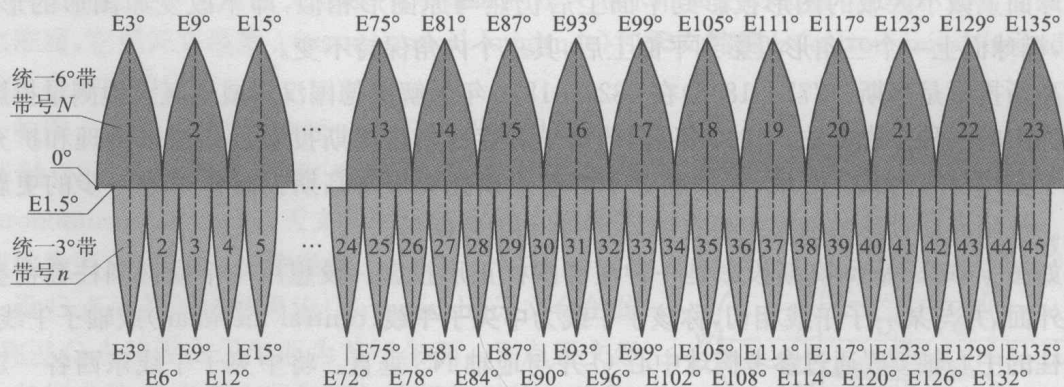


图 1-6 统一 6° 带投影与统一 3° 带投影高斯平面坐标系的关系

与数学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,第 I 象限相同,其余象限按顺时针方向编号[图 1-5 (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,不需要做任何变换。

如图 1-7 所示,我国位于北半球, x 坐标恒为正值, y 坐标则有正有负,当测点位于中央子午线以东时为正,以西时为负。例如图 1-5 (b) 中的 P 点位于中央子午线以西,其 y 坐标为负值。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,即给每个点的 y 坐标值加上 500 km,使之恒为正,如图 1-5 (c) 所示。