

★ 服务热线: 400-615-1233
★ 配套精品教学资料包
★ www.huatengedu.com.cn

CELIANGXUE JICHU 测量学基础

策划编辑: 邹莹
责任编辑: 边丽新
助理编辑: 贺兰晚
封面设计: 于德梅



定价: 49.90元(含实训指导)

辽宁省职业教育“十四五”规划教材

测量学基础

鲁纯马驰◎主编

北京邮电大学出版社



X-B

辽宁省职业教育“十四五”规划教材

测量学基础

鲁纯马驰◎主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



辽宁省职业教育“十四五”规划教材

测量学基础

主 编 鲁 纯 马 驰

副主编 王瑞涛 谭立萍 张慧慧 孙艳崇



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书介绍了测量学的基本知识、技能和方法。全书共分 12 个项目,内容包括测量学的基础知识、水准测量、角度测量、距离测量、测量误差的基本知识、导线测量、数字化测图、工程变形测量、道路工程测量、建筑工程测量及竣工总平面图的编绘、地下工程测量、测绘新技术及其发展趋势。本书配有《测量学基础实训指导》。

本书可作为测绘地理信息类相关专业的教材,也可作为建筑、土木、交通、水利等专业的教材,还可供相关工程技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

测量学基础/鲁纯,马驰主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2015.1(2025.7 重印)

ISBN 978-7-5635-4210-9

I. ①测… II. ①鲁… ②马… III. ①测量学—高等教育—教材 IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272369 号

策划编辑:邹莹 责任编辑:边丽新 封面设计:于德梅

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt. edu. cn

经 销:各地新华书店

印 刷:三河市龙大印装有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:20

字 数:487 千字

版 次:2015 年 1 月第 1 版

印 次:2025 年 7 月第 9 次印刷

ISBN 978-7-5635-4210-9

定 价:49.90 元(含实训指导)

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

服务电话:400-615-1233

“测量学基础”是高职高专工程测量技术及其相关专业的一门专业基础课程。本书以就业为导向、以能力培养为本位、以岗位需求和职业标准为依据进行编写,并配套有《测量学基础实训指导》,精心设有 20 个实训项目,以培养学生的职业发展能力。为使本书具有较强的技能性、实用性和先进性,编者多次深入施工现场,与现场施工技术人员进行探讨,并且征求了部分测绘单位和施工单位专家的意见,力求突出高职高专教育的特点,注重理论与实践的结合,尤其强调对学生实际动手能力的培养。

本书注重测量基础的理论知识、基本测量仪器的构造及其操作方法、基本测量工作及其作业方法、地形图测绘的方法等理论知识的阐释。通过项目法来组织教学,采用集中实训方式强化能力的培养,倡导学生在项目活动中掌握测量的基本知识与技能,培养学生初步具备适应工程测量需要的基本职业能力。

本书共分 12 个项目,参考学时(推荐)见下表。

序 号	教学内容	理论学时	实训学时	总 学 时
1	测量学的基础知识	2	0	2
2	水准测量	6	10	16
3	角度测量	6	10	16
4	距离测量	2	4	6
5	测量误差的基本知识	2	0	2
6	导线测量	8	6	14
7	数字化测图	4	8	12
8	工程变形测量	2	0	2
9	道路工程测量	4	4	8
10	建筑工程测量及竣工总平面图的编绘	4	4	8
11	地下工程测量	4	4	8
12	测绘新技术及其发展趋势	2	0	2
合计		46	50	96

本书由辽宁省交通高等专科学校鲁纯、马驰任主编,辽宁省高等级公路建设局王瑞涛,辽宁省交通高等专科学校谭立萍、张慧慧、孙艳崇任副主编。具体编写分工如下:马驰编写项目1~项目3,鲁纯编写项目4和项目5,孙艳崇编写项目6,谭立萍编写项目7和项目8,张慧慧编写项目9和项目10,王瑞涛编写项目11和项目12。

本书在编写过程中参阅了大量的文献资料,在此对这些文献资料的作者表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏忽和不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

项目 1 测量学的基础知识	1
学习目标	1
1.1 测量学概述	1
1.2 地球的形状和大小	2
1.3 地面点位的确定	3
1.3.1 地面点的坐标系	3
1.3.2 地面点的高程系统	6
1.3.3 水平面代替水准面产生的影响	7
1.4 直线定向	8
1.4.1 起始方向与方位角	8
1.4.2 坐标的计算与方位角的传递	10
1.5 测量工作概述	12
1.5.1 测绘地形图	12
1.5.2 施工放样	13
1.5.3 测量工作的原则和程序	13
思考与练习	13
项目 2 水准测量	15
学习目标	15
2.1 水准测量的原理及仪器工具	15
2.1.1 水准测量的原理	15
2.1.2 水准测量的仪器和工具	16
2.2 水准仪的使用	19
2.2.1 微倾式水准仪的使用	19
2.2.2 自动安平水准仪的使用	20
2.2.3 电子水准仪的使用	20
2.3 水准测量的实施方法	24
2.3.1 水准点和水准路线的确定	24
2.3.2 等外水准测量的实施	25
2.3.3 三、四等水准测量的实施	26
2.4 水准测量的成果处理	29

- 2.5 水准仪的检验与校正 30
 - 2.5.1 水准仪的轴线及应满足的几何条件 31
 - 2.5.2 水准仪主要部件的检验与校正 31
- 2.6 水准测量误差的产生及控制 35
 - 2.6.1 观测误差 35
 - 2.6.2 仪器误差 36
 - 2.6.3 外界条件的影响 36
- 思考与练习 36

项目 3 角度测量 41

- 学习目标 41
- 3.1 角度观测的原理 41
 - 3.1.1 水平角的测量原理 41
 - 3.1.2 竖直角测量原理 42
- 3.2 经纬仪的构造及其使用 42
 - 3.2.1 经纬仪的构造 42
 - 3.2.2 经纬仪的使用方法 46
- 3.3 水平角的观测 47
 - 3.3.1 测回法 48
 - 3.3.2 方向观测法 49
- 3.4 竖直角的观测 50
 - 3.4.1 竖直角的用途 50
 - 3.4.2 垂直度盘的构造 51
 - 3.4.3 竖直角的计算与观测 52
- 3.5 经纬仪的检验与校正 54
 - 3.5.1 照准部水准管的检验与校正 55
 - 3.5.2 十字丝竖丝的检验与校正 56
 - 3.5.3 视准轴的检验与校正 57
 - 3.5.4 横轴的检验与校正 58
 - 3.5.5 竖盘指标差的检验与校正 58
 - 3.5.6 光学对中器的检验与校正 59
- 3.6 角度测量的误差来源 60
 - 3.6.1 仪器误差 60
 - 3.6.2 观测误差 60
 - 3.6.3 外界条件的影响 61
- 思考与练习 61

项目 4 距离测量 64

- 学习目标 64
- 4.1 钢尺量距 64
 - 4.1.1 量距工具 64
 - 4.1.2 直线定线 65

4.1.3	钢尺的检定	67
4.1.4	钢尺量距的一般方法	68
4.2	视距测量	70
4.2.1	视准轴水平的视距测量	70
4.2.2	视准轴倾斜的视距测量	72
4.3	电磁波测距仪	73
4.3.1	电磁波测距的基本原理	73
4.3.2	全站仪概述	74
4.3.3	全站仪的操作基础	75
4.3.4	全站仪的应用	78
4.4	三角高程测量	80
4.4.1	三角高程测量的基本原理	80
4.4.2	三角高程测量的实施	81
	思考与练习	82

项目 5 测量误差的基本知识 84

	学习目标	84
5.1	测量误差概述	84
5.1.1	测量误差产生的原因	84
5.1.2	测量误差的分类及处理方法	85
5.1.3	偶然误差的性质	85
5.2	评定精度的标准	88
5.2.1	中误差	88
5.2.2	相对中误差	89
5.2.3	容许误差	89
5.3	观测值的算术平均值和改正值	90
5.3.1	观测值的算术平均值	90
5.3.2	观测值的改正值	90
5.4	观测值的精度评定	91
5.5	误差传播定律	93
5.5.1	观测值的函数	93
5.5.2	一般函数的中误差	94
5.5.3	线性函数和倍函数的中误差	95
5.5.4	和差函数的中误差	96
5.6	误差传播定律的应用	97
5.6.1	钢尺量距的精度	97
5.6.2	角度测量的精度	98
5.6.3	水准测量的精度	99
5.7	加权平均值及其中误差	99
5.7.1	不等精度观测和观测值的权	99
5.7.2	加权平均值	100
5.7.3	加权平均值的中误差	101

5.7.4 单位权中误差的计算	102
思考与练习	103

项目 6 导线测量 105

学习目标	105
6.1 导线的布设形式	105
6.2 导线的外业勘测	107
6.3 导线的内业计算	108
6.3.1 导线内业计算概述	108
6.3.2 闭合导线的计算	110
6.3.3 附和导线的计算	115
6.3.4 无定向附和导线的计算	119
6.3.5 支导线的计算	122
思考与练习	122

项目 7 数字化测图 126

学习目标	126
7.1 地形图的基本知识	126
7.1.1 地形图的基本概念	126
7.1.2 地形图的比例尺	126
7.1.3 地形图图式	127
7.1.4 等高线	128
7.1.5 地形图的分幅与编号	130
7.2 野外数据的采集	134
7.2.1 数字化测图概述	134
7.2.2 野外数字化数据的采集方法	134
7.3 基于 CASS 数字化成图方法	145
7.3.1 CASS 7.0 简介	145
7.3.2 数据的传输与成图	146
7.3.3 地形图的修饰	154
思考与练习	156

项目 8 工程变形测量 159

学习目标	159
8.1 变形观测概述	159
8.1.1 变形观测的概念及分类	159
8.1.2 变形观测的特点	159
8.1.3 变形观测的内容	160
8.1.4 变形观测的精度及等级要求	161
8.2 变形观测点及观测网的布设	162
8.2.1 变形观测点的布设	162
8.2.2 变形观测网的布设	163

8.3	变形观测的方法	165
8.3.1	静态观测的方法	165
8.3.2	动态观测的方法	168
8.4	垂直位移、水平位移和倾斜观测	170
8.4.1	垂直位移观测	170
8.4.2	水平位移观测	170
8.4.3	倾斜观测	171
8.5	变形观测资料的整编与分析	171
8.5.1	变形观测资料的整编	171
8.5.2	变形观测资料的分析	171
	思考与练习	172

项目 9 道路工程测量 174

	学习目标	174
9.1	中线测量	174
9.1.1	交点的测设	174
9.1.2	路线转角的测定及里程桩的设置	175
9.1.3	圆曲线的主点测设	177
9.1.4	圆曲线的详细测设	179
9.1.5	缓和曲线的测设	182
9.2	路线纵断面测量	186
9.2.1	基平测量	186
9.2.2	中平测量	186
9.2.3	纵断面图的绘制	188
9.3	路线横断面测量	190
9.3.1	横断面方向的确定	190
9.3.2	横断面的测量方法	191
9.3.3	横断面图的测绘	192
9.4	道路施工测量	192
9.4.1	路基边桩的测设	192
9.4.2	竖曲线的测设	194
	思考与练习	196

项目 10 建筑工程测量及竣工总平面图的编绘 198

	学习目标	198
10.1	建筑场地的施工控制测量	198
10.1.1	坐标系统及坐标换算	198
10.1.2	施工场地的平面控制测量	199
10.1.3	施工场地的高程控制测量	199
10.2	民用建筑的施工测量	200
10.2.1	建筑基线与建筑方格网	200
10.2.2	建筑物基础的施工测量	203

- 10.2.3 墙体的施工测量 204
- 10.3 工业厂房的施工测量 206
 - 10.3.1 柱子基础的施工测量 206
 - 10.3.2 厂房构件的安装测量 207
- 10.4 竣工测量与竣工总平面图的编绘 211
 - 10.4.1 竣工测量 211
 - 10.4.2 竣工总平面图的编绘 211
- 思考与练习 212

项目 11 地下工程测量 214

- 学习目标 214
- 11.1 贯通误差预计 214
 - 11.1.1 贯通误差概述 214
 - 11.1.2 贯通点在水平面和高程上的误差预计 215
- 11.2 洞外控制测量 216
 - 11.2.1 洞外平面控制测量 216
 - 11.2.2 洞外高程控制测量 217
- 11.3 洞内控制测量 218
 - 11.3.1 洞内平面控制测量 218
 - 11.3.2 洞内高程控制测量 219
- 11.4 联系测量 220
 - 11.4.1 平面坐标的传递 220
 - 11.4.2 高程的传递 222
- 11.5 地下工程竣工测量 224
- 思考与练习 224

项目 12 测绘新技术及其发展趋势 226

- 学习目标 226
- 12.1 全球定位系统的基本知识 226
 - 12.1.1 全球定位系统的基本概念 226
 - 12.1.2 GPS 技术的应用 227
- 12.2 地理信息系统的基本知识 229
 - 12.2.1 地理信息系统的基本概念 229
 - 12.2.2 GIS 的应用 231
- 12.3 遥感技术的基本知识 232
 - 12.3.1 遥感技术的基本概念 232
 - 12.3.2 RS 技术的应用 233
- 思考与练习 237

参考文献 239

项目 1 测量学的基础知识

学习目标

【知识目标】 了解测量学的研究任务与作用;了解地面点的平面位置和高程的表示方法;熟悉常用坐标系统的建立及其特点;了解地球曲率对距离及高程的影响;掌握测量工作的基本原则。

【技能目标】 能够通过掌握建筑测量学的一些基本概念,对测量这门学科有初步的了解,明确今后学习的目标,为后续的学习奠定基础。

1.1 测量学概述

测量学是研究如何测定地面点的平面位置和高程,将地球表面的地形及其他信息测绘成图,以及确定地球的形状和大小等的一门学科。

1. 测量学的学科分类

(1)普通测量学。普通测量学是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,是测量学的基础。其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。其具体工作包括距离测量、角度测量、定向测量、高程测量、观测数据的处理和绘图等。

(2)大地测量学。大地测量学是研究在广大地面上建立国家大地控制网,测定地球的形状、大小和地球重力场的理论、技术与方法的学科。随着人造卫星的发射技术和空间技术的发展,大地测量学又有常规大地测量学、卫星大地测量学及空间大地测量学之分。

(3)摄影测量学。摄影测量学是利用摄影相片来研究和测定物体的形状、大小和位置的学科。因获得相片的方法不同,摄影测量学又可分为地面摄影测量学、航空摄影测量学和航天摄影测量学等。

(4)工程测量学。工程测量学是研究工程建设在勘测设计、施工和管理阶段所进行的各种测量工作的学科。其主要内容包括工程控制网的建立、地形测绘、施工放样、设备安装测量、竣工测量、变形测量、变形观测,以及维修养护测量的理论、技术与方法。

2. 测量学的发展和应用

随着人类社会需求的不断增加和近代科学技术的发展,测量技术已由常规的大地测量发展到人造卫星大地测量,由航空摄影发展到航天遥感技术的应用;测量对象也由地球表面扩展到空间星球,由静态发展到动态;测量仪器也已广泛趋向电子化和自动化。

在工程建设中,测量技术的应用比较广泛。例如,在建造铁路、公路及高铁之前,为了确定一条最经济、最合理的路线,必须进行该地带的测量工作,由测量成果绘制带状地形图,在

地形图上进行线路设计,然后将设计路线的位置标定在地面上,以便进行施工。又如,在路线跨越河流时,必须建造桥梁,在造桥之前,要绘制河流两岸的地形图,以及测定河流的水位、流速、流量和桥梁轴线长度等,为桥梁设计者提供必要的资料,最后将设计的桥台、桥墩的位置用测量的方法在实地标定出来。再如,当路线穿过山地时需要开挖隧道,在开挖之前,也必须在地形图上确定隧道的位置,并根据测量数据计算出隧道的长度和方向,在隧道施工期间,通常是从隧道两端开挖,这就需要根据测量的成果指示开挖的方向,使之符合设计的要求。

3. 学习测量学基础课程的目的

专业设置工程测量技术“测量学基础”课程的主要目的是学习和掌握下列内容。

(1)地形图的测绘。运用测量学的理论、方法和工具,将小范围内地面上的地物和地貌测绘成地形图及地籍图等,这项任务称为地形图的测绘,简称为测量。

(2)地形图的应用。为了对工程建设进行规划设计,需从地形图中获取所需要的资料,如点的坐标和高程、两点间的距离、地块的面积、地面的坡度、地形的断面,以及对地形进行分析等,这项任务称为地形图的应用。

(3)施工放样。把图纸上设计的工程构造物的位置在实地进行标定,作为施工的依据,这项任务称为测设或放样。

1.2 地球的形状和大小

由于测量工作是在地球表面的较大范围内进行的,因此地球的形状和大小直接与测量工作有关。地球的自然表面有高山、丘陵、平原、海洋等起伏形态,是一个不规则的曲面。2005年10月9日,国家测绘局关于启用珠穆朗玛峰高程新数据的公告是:珠穆朗玛峰峰顶岩石面的海拔高程为8 844.43 m。而地球的最低点马里亚纳海沟低于海水面11 022 m。就整个地球而言,海洋的面积约占71%,陆地的面积约占29%。假设某一个静止不动的水面延伸并穿过陆地,包围整个地球,形成一个闭合曲面,该闭合曲面称为水准面。水准面是液态的水受地球重力影响而形成的重力等势面,它的主要特点是其面上任意一点的铅垂线都垂直于该点上曲面的切面。水面可高可低,符合这个特点的水准面有无数个,其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面,它可以近似地代表地球的形体。地球自转产生的离心力使地球的形状在赤道处较为突出,在两极处较为扁平。

由于地球内部质量分布不均匀,使水准面上各点受到的重力影响也不同,致使大地水准面成为一个不规则的、复杂的曲面。如果将地球表面上的点位图形投影到这样一个不均匀变化的曲面上,在计算上将是十分困难的,为了解决这个问题,可选用一个非常接近于大地水准面并可用数学公式表示的几何形体来建立一个投影面。这个几何形体是以地球自转轴为短轴,以赤道直径为长轴的椭球绕自转轴旋转而成的椭圆体。由于椭圆长轴旋转形成的平面与地球赤道平面重合,因此该椭圆体又被称为参考椭圆体。参考椭圆体的表面被称为旋转椭圆面,它与大地水准面虽不能完全重合,但是最为接近。

参考椭圆体的大小由长半径 a 和短半径 b 或者由一个半径和扁率 α 来决定。 a 、 b 、 α 称为参考椭圆体元素。

历史上,许多测量学者分别测算出参考椭圆体的元素值。新中国成立后,我国采用了苏联克拉索夫斯基计算的元素值,即 $a=6\,378\,245\text{ m}$ 、 $b=6\,356\,863\text{ m}$ 、 $\alpha=1/298.3$ 。1980 年,我国的国家大地坐标系采用了“1975 国际椭球”,该椭球的基本元素是 $a=6\,378\,140\text{ m}$ 、 $b=6\,356\,755.3\text{ m}$ 、 $\alpha=1/298.257$ 。

由于参考椭圆体的扁率很小,因此在地形测量的计算中,可把地球当作圆球对待,取其 3 个半轴的平均值作为地球的半径,即 $R=(a+a+b)/3=6\,371\,011.8\text{ m}$ 。实际上,近似地取 $R=6\,371\text{ km}$,其精度足以满足一般地形测量的要求。

1.3 地面点位的确定

测量工作的根本任务是确定地面点位。要确定某地面点位,通常要求出该点相对于某基准面和基准线的三维坐标或二维坐标。下面介绍几种用以确定地面点位的坐标系。

1.3.1 地面点的坐标系

1. 地理坐标系

地理坐标系属于球面坐标系,根据不同的投影面,又分为天文地理坐标系和大地地理坐标系。

1) 天文地理坐标系

天文地理坐标又称天文坐标,用天文经度 λ 和天文纬度 φ 来表示地面点投影在大地水准面上的位置,如图 1-1 所示。

研究大范围的地面形状和大小,是将投影面看成球面。在图 1-1 中,视地球为一个球体(实际上是一个椭圆柱),N 和 S 是地球的北极和南极,连接两极且通过地心 O 的线称为地轴。过地轴的平面称为子午面,过地心 O 且垂直于地轴的平面称为赤道面,它与球面的交线称为赤道。通过英国格林尼治天文台(用 G 点表示)的子午线称为起始子午线(首子午线),而包括该子午线的子午面称为首子午面。地面上任一点 A 的地理坐标是以该点的经度来表示的。经度是过该点的子午线与首子午面的夹角,以 λ 表示。从首子午线起向东 $0^\circ\sim 180^\circ$ 称为东经,向西 $0^\circ\sim 180^\circ$ 称为西经。A 点的纬度就是该点的法线与赤道面的交角,以 φ 表示,从赤道向北 $0^\circ\sim 90^\circ$ 称为北纬,向南 $0^\circ\sim 90^\circ$ 称为南纬,如北京的地理坐标为东经 $116^\circ 28'$,北纬 $39^\circ 54'$ 。经度和纬度是用天文测量方法测定的。

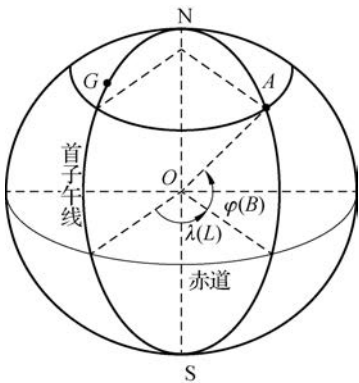


图 1-1 地理坐标系

2) 大地地理坐标系

大地地理坐标系用大地经度 L 和大地纬度 B 表示地面点投影在地球椭球面上的位置。确定球面坐标 (L, B) 所依据的基本线为椭球面的法线,基本面包含法线及南北极的大地子午面。如图 1-1 所示,A 点的大地经度 L 是 A 点的大地子午面与首子午面所夹的两面

角, A 点的大地纬度 B 是过 A 点的椭球面法线与赤道平面的交角。大地经纬度是根据一个起始的大地点(称为大地原点, 该点的大地经纬度与天文经纬度一致)的大地坐标, 按大地测量所得数据推算而得的。我国以设立在陕西省泾阳县的大地原点为大地坐标的起算点, 由此建立的坐标系称为“1980 年国家大地坐标系”。

2. 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。由于人造卫星围绕地球运动, 因此地心坐标系取地球质心(地球的质量中心)为坐标系原点, x 轴和 y 轴在地球赤道平面内, 首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 1-2 所示。地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 (x_A, y_A, z_A) 表示。

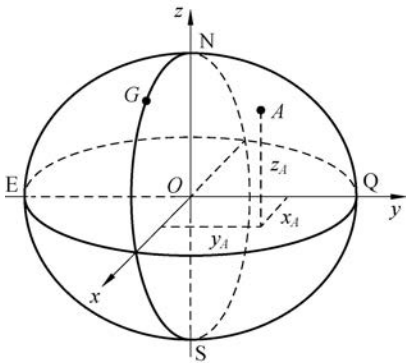


图 1-2 地心坐标系

地心坐标系、大地坐标系和大地地理坐标系可以通过一定的数学公式相互换算。

3. 平面直角坐标系

采用地心坐标系或地理坐标系确定地面点位时, 一般适用于少数高级控制点或作为初始的计算, 但当需要确定大量的地面点位时, 则是不直观和不方便的, 此时测量的计算和绘图最好是在平面上进行。但是地球表面是一个不可展平的曲面, 将球面上的点位换算到平面上的过程, 称为地图投影。我国普遍采用高斯投影的方法。

1) 高斯平面直角坐标

如图 1-3 所示, 高斯投影就是设想将截面为椭圆的一个圆柱面横套在旋转椭球外面, 并与旋转椭球面上的某一条子午线相切, 同时使圆柱的轴位于赤道面内, 并通过椭球中心, 相切的子午线称为中央子午线。然后将中央子午线附近的旋转椭球面上的点、线投影到横圆柱面上, 再顺着过极点的母线将圆柱面剪开, 并展开为平面, 这个平面称为高斯投影平面。

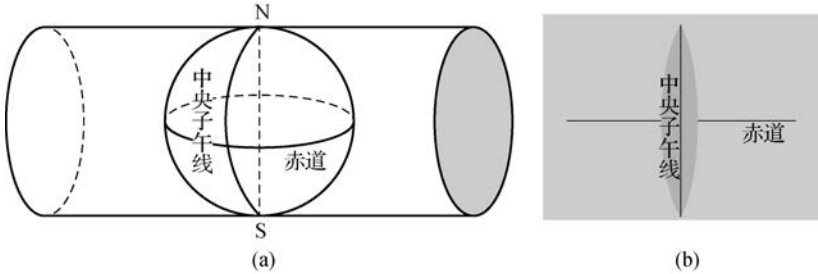


图 1-3 高斯投影

高斯投影平面上的中央子午线投影为直线且长度不变,其余的子午线均为凹向中央子午线的曲线,其长度大于投影前的长度,离中央子午线越远,长度变形越大,如图 1-4 所示。为了将长度变形限制在测量精度允许的范围内,因此就有了投影带的划分,一般都采用 6°分带法,即从格林尼治零子午线起每隔经差 6°为第一带。第一带的中央子午线的经度为 3°,任意带的中央子午线的经度 L_0 可按式(1-1)计算。

$$L_0=6n-3 \tag{1-1}$$

式中, n 为投影带的号数。每一投影带采用各自独立的高斯平面直角坐标系。

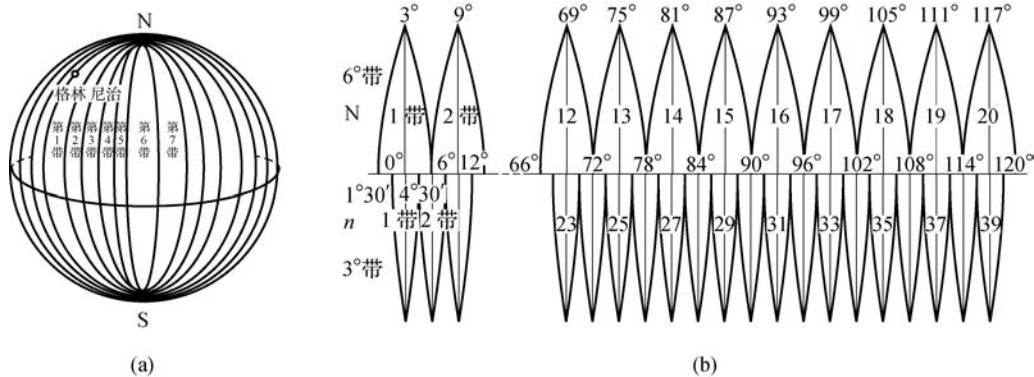


图 1-4 高斯投影的分带

实践证明,6°带投影后,其边缘部分的变形能满足 1 : 25 000 或更小比例尺测图的精度。当进行 1 : 10 000 或更大比例尺测图时,要求投影变形更小,可用 3°分带法或 1.5°分带法。高斯投影是保角投影,能使球面上的角度与投影平面上的角度保持不变。

在高斯投影平面的基础上,以每一带的中央子午线的投影为直角坐标系的纵轴 x ,向北为正,向南为负;以赤道的投影为直角坐标系的横轴 y ,向东为正,向西为负;两轴交点 O 为坐标系原点,建立平面直角坐标系。由于我国领土全部位于赤道以北,因此 x 值均为正值,而 y 值则有正有负,如图 1-5(a)所示, $y_A=+148\,680.00\text{ m}$, $y_B=-134\,240.69\text{ m}$ 。为了避免横坐标出现负值,以及标明坐标系所处的带号,规定将坐标系中所有点的横坐标值加上 500 km(相当于各带的坐标原点向西平移 500 km),并在横坐标前冠以带号,如图 1-5(b)中所标注的横坐标为 $y_A=20\,648\,680.54\text{ m}$, $y_B=20\,365\,759.31\text{ m}$ 。这就是高斯平面直角坐标的通用值,最前两位数“20”表示带号,不加 500 km 和带号的横坐标值称为自然值。

我国除了天文大地网平差采用椭球面上的大地坐标外,其他各级控制网均在高斯平面直角坐标系上进行平差计算。为此,一般应先将椭球面上的方向、角度、长度等观测元素经方向改正和距离改正,归化为相应的平面观测值后,再在平面上进行计算,这样比较方便。

2) 平面直角坐标

当测量的范围较小时,可以把该测区的球面作为平面看待,直接将地面点沿铅垂线投影到水平面上,用平面直角坐标来表示它的投影位置。将坐标原点选在测区西南角,使测区全部在第一象限内,并以该地的子午线为 x 轴,向北为正, y 轴向东为正,如图 1-6 所示。象限按顺时针方向编号,这与数学上(见图 1-7)的规定不同。测量上取南北线为标准方向,主要是为了定向方便,而象限以顺时针方向编号,其目的是将数学上的三角和解析几何的公式直接应用到测量计算中,而不必做任何的改变,如地面上某点 P 的位置可用该点到横、纵坐标

轴的垂直距离 x_P 、 y_P 来表示。

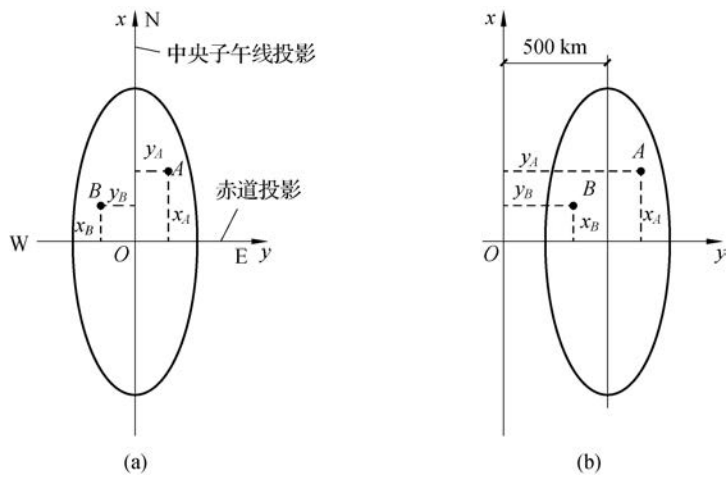


图 1-5 高斯平面直角坐标系

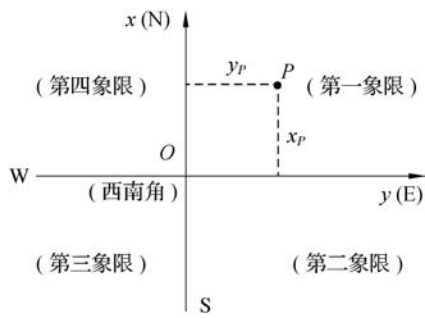


图 1-6 测量平面直角坐标系

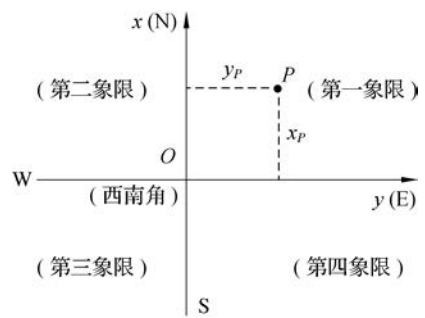


图 1-7 数学笛卡尔坐标系

1.3.2 地面点的高程系统

地面点到大地水准面的铅垂距离,称为绝对高程,又称海拔。如图 1-8 所示,A、B 两点的绝对高程分别为 H_A 、 H_B 。海水面由于受潮汐、风浪等影响,是个动态的曲面,它的高低时刻在变化。我国通常是在海边设立验潮站,进行长期观测,取海水面的平均高度作为高程零点。通过该点的大地水准面称为高程基准面(高程起算面)。我国在青岛设立验潮站,取黄海平均海水面作为高程基准面,建立“1956 年黄海高程系”并在青岛市观象山上建立水准原点,其高程为 72.289 m。由于验潮资料不足等原因,我国自 1987 年启用“1985 国家高程基准”。它是采用青岛验潮站 1956—1979 年的验潮资料计算确定的。依此推算的青岛国家水准原点高程为 72.260 m。为了统一我国的高程系统,目前都应以新的原点高程为准。

在局部地区,也可以假设一个水准面作为高程起算面,地面点到假设水准面的铅垂距离,称为假设高程或相对高程。如图 1-8 所示,A、B 点的相对高程分别为 H'_A 、 H'_B ,地面两点高程之差以 h 表示,则 A、B 两点的高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A$$

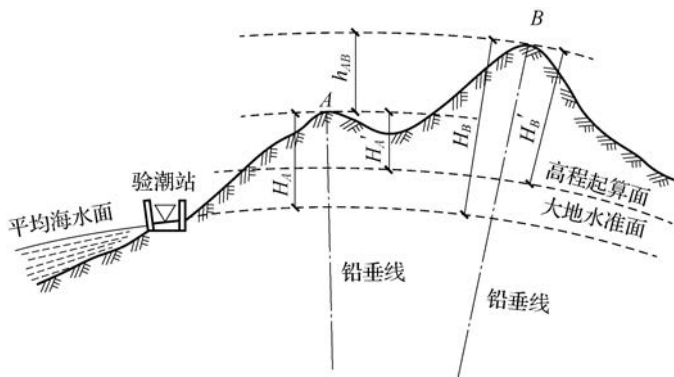


图 1-8 高程和高差的表示

1.3.3 水平面代替水准面产生的影响

由上述可知,水准面是一个曲面,若曲线上的图形不破裂、不起皱,则水准面是不能展为平面的。

如果把地球表面的图形绘制在地球仪上,但因地球半径为 6 371 km,即使将其缩小到百万分之一,直径还有 6.371 m,这对工程建设用图极为不便。因此,为了方便使用,应将地面上的图形按比例缩小描绘在平面上。

从理论上讲,将极小部分的水准面当作平面也是要产生变形的,由于测量和制图都含有不可避免的误差,因此将一块水准面当作平面来看待时,如果其产生的误差不超过测量和制图的误差,则这样做是可以的,而且是合理的。下面来讨论一下以水平面代替水准面对距离和高程产生的影响,以便限制水平面代替水准面的范围。

1. 对距离的影响

如图 1-9 所示,设球面 P 与水平面 P' 在 A 点相切, A 、 B 两点在球面上的弧长为 D , 在水平面上的距离为 D' , 则 $D = R\beta$, $D' = R\tan \beta$ 。以水平长度 D' 代替球面上弧长 D 所产生的误差为 $\Delta D = D' - D = R\tan \beta - R\beta = R(\tan \beta - \beta)$ 。将 $\tan \beta$ 按级数展开,并略去高次项得

$$\tan \beta = \beta + \frac{1}{3}\beta^3 + \dots$$

因而

$$\Delta D = R \left[\left(\beta + \frac{1}{3}\beta^3 + \dots \right) - \beta \right] = \frac{1}{3}\beta^3 R$$

将 $\beta = \frac{D}{R}$ 代入上式,得

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \text{ 或 } \frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^3 \quad (1-2)$$

取 $R = 6\,371\text{ km}$, 并以不同的 D 值代入式 (1-2), 则可得出距离误差 ΔD 和相对误差 $\Delta D/D$, 见表 1-1。

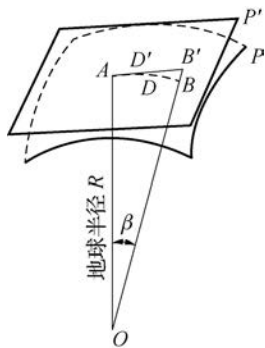


图 1-9 水平面代替水准面的影响

表 1-1 水平面代替水准面的距离误差和相对误差

距离 D/km	距离误差 $\Delta D/\text{cm}$	相对误差 $\Delta D : D$
10	0.8	1 : 1 250 000
25	12.8	1 : 200 000
50	102.6	1 : 49 000
100	821.2	1 : 12 000

由表 1-1 可知,当距离为 10 km 时,以平面代替曲面所产生的距离相对误差为 1 : 1 250 000,这样小的误差就是在地面上进行最精密的距离测量也不会产生影响。因此,在半径为 10 km 的范围内,即面积约为 320 km² 的范围内,以水平面代替水准面所产生的距离误差可忽略不计。当精度要求较低时,还可以将测量范围的半径扩大到 25 km,即面积约为 20 000 km²。

2. 对高程的影响

在图 1-9 中,A、B 两点在同一水准面上的高程应相等。B 点投影到水平面上得 B' 点,则 BB' 即为水平面代替水准面所产生的高程误差,或称为地球曲率的影响。

设 $BB' = \Delta h$, 则

$$\begin{aligned}(R + \Delta h)^2 &= R^2 + D'^2 \\ 2R\Delta h + \Delta h^2 &= D'^2 \\ \Delta h &= \frac{D'^2}{2R + \Delta h}\end{aligned}$$

上式中,用 D 代替 D' , 同时 Δh 与 $2R$ 相比可略而不计, 则

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R} \tag{1-3}$$

以不同的距离 D 代入式(1-3), 得到的相应高程误差 Δh 见表 1-2。

表 1-2 水平面代替水准面的高程误差

D/km	0.1	0.5	1	2	3	4	5	10
$\Delta h/\text{cm}$	0.08	2	8	31	71	125	196	785

由表 1-2 可知,以水平面代替水准面时,在 1 km 距离内的高程误差就有 8 cm。因此,当进行高程测量时,即使距离很短也必须顾及地球曲率的影响。

1.4 直线定向

确定一条直线的方向称为直线定向。而这个方向应该是相对于起始方向的位置。起始方向有真子午线方向、磁子午线方向和纵坐标轴。

1.4.1 起始方向与方位角

1. 三种不同的起始方向及其方位角

1) 真子午线与真方位角

通过地面上一点指向地球南北极的方向线称为该点的真子午线方向。自真子午线北端

顺时针量至该直线的水平角度称为真方位角 A , 如图 1-10(a) 所示。它是用天文观测方法或用陀螺经纬仪测定的, 在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的范围内变化。

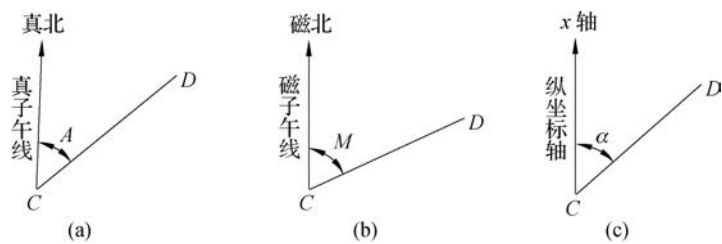


图 1-10 三种不同起始方向的方位角

陀螺经纬仪由陀螺仪(见图 1-11)、与其相连的供照准和读数的经纬仪、电源箱和三脚架组成。在陀螺仪内, 有一个质量几乎全部集中在外缘的匀质转子, 此转子在高速旋转时(每分钟 2 万次以上), 其旋转轴力求在空间保持恒定的位置(定轴性)。如果旋转轴保持水平位置, 在地球自转的影响下, 因外力矩作用于高速运转的转子, 而使旋转轴产生一定规律的运动, 这种运动称为陀螺的进动。于是, 旋转轴沿真子午线方向做往复摆动, 并逐渐稳定下来, 即轴的一端指向真北方向, 利用这种原理制造了陀螺经纬仪, 如图 1-12 所示。目前我国生产的陀螺经纬仪, 其定向精度为 $20''$, 国际上有的精密陀螺经纬仪的精度仅为几秒。

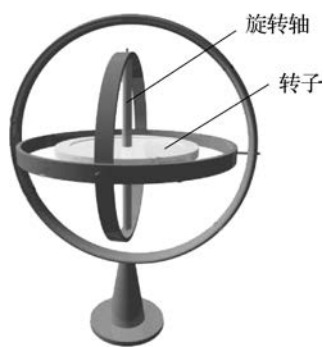


图 1-11 陀螺仪

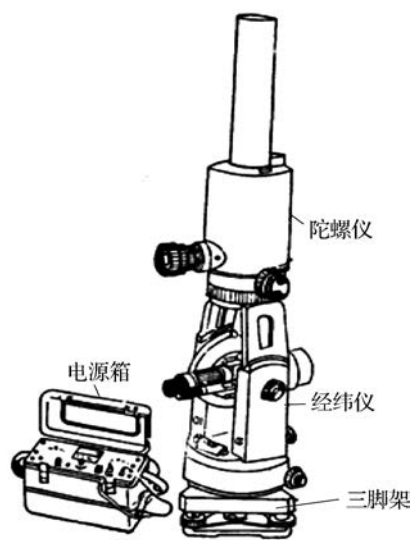


图 1-12 陀螺经纬仪

2) 磁子午线方向与磁方位角

地面上一点, 当磁针静止时所指的方向称为该点的磁子午线方向。自磁子午线北端顺时针量至该直线的水平角度称为磁方位角 M , 如图 1-10(b) 所示。 M 在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的范围内变化。

罗盘仪可用来测定直线的磁方位角, 它主要由磁针、刻度盘和瞄准设备等组成。磁针支在刻度盘中心的顶针上, 可自由转动, 当磁针静止时, 指向为磁北方向。刻度盘目前多采用方位式, 一般刻有 $1'$ 或 $30'$ 的分划。由于施测时度盘随照准设备转动, 而磁针是静止不动的,

因此方位式度盘从 0° 起逆时针方向注记直至 360° 。

用罗盘仪测量磁方位角时,将罗盘仪安置在直线的一个点上,对中、整平后,放松磁针,用望远镜照准直线另一端点的标志,待磁针静止后所指的方向即为磁子午线方向。磁针指北一端在刻度盘上的读数即为该直线的磁方位角。这种罗盘仪测定方向的精度较差,一般为 1° 。

使用罗盘仪前应先检查磁针的灵敏度,测量时要避开高压线及铁器,使用完后应将磁针固定。

3) 纵坐标轴与坐标方位角

当测区范围较大时,应用高斯投影带的中央子午线作为纵轴 x 。当测区范围较小时,将球面视为平面,组成平面直角坐标系,取南北方向线为纵轴 x 。自纵坐标北端顺时针量至该直线的角度称为坐标方位角 α ,如图 1-10(c) 所示,取值范围是 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。坐标纵轴彼此平行,在测量学中用的最普遍的就是坐标方位角。

2. 三种不同起始方向之间的关系

因地球磁场的南北极与地球自转轴的南北极不一致,故任一点的磁北方向与真北方向不重合。过某点的真子午线与磁子午线方向间的夹角称为磁偏角,用 δ 表示。磁子午线在真子午线以东称为东偏, δ 取正号;磁子午线在真子午线以西称为西偏, δ 取负号。

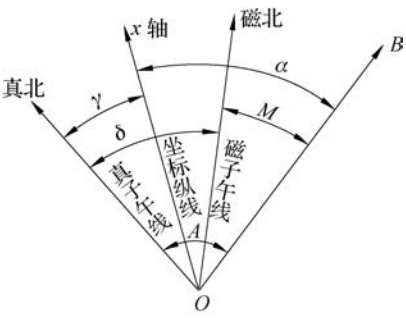


图 1-13 三种方位角间的关系

地球上各点的真子午线也互不平行。在高斯投影中,中央子午线投影后为一条直线,其余为曲线。过某点的坐标纵线(中央子午线)与真子午线方向的夹角称为子午线收敛角,用 γ 表示。当坐标纵线偏于真子午线方向以东时,称为东偏, γ 取正号;西偏时取负号。

设直线 OB 的真方位角为 A ,磁方位角为 M ,坐标方位角为 α ,则有图 1-13 所示的关系。

1.4.2 坐标的计算与方位角的传递

在测绘地形图或将建筑物在实地放样所进行的测量计算工作中,必须要解决坐标的正、反算与坐标方位角的传递问题。

1. 坐标的正、反算

1) 坐标的正算

在图 1-14 中,若已知点 A 的坐标 (x_A, y_A) ,直线 AB 的水平距离 S_{AB} 及坐标方位角 α_{AB} ,欲求直线另一端点 B 的坐标 (x_B, y_B) ,这就是坐标正算问题。

由图 1-14 可知

$$\left. \begin{aligned} x_B &= x_A + (x_B - x_A) = x_A + \Delta x_{AB} \\ y_B &= y_A + (y_B - y_A) = y_A + \Delta y_{AB} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

直线 AB 两端点坐标的差称为坐标增量,即 Δx_{AB} 、 Δy_{AB} 是

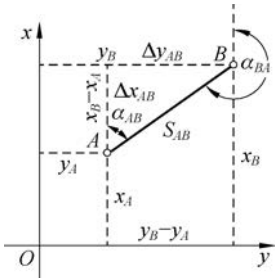


图 1-14 坐标增量

纵、横坐标增量。由图 1-14 可以看出,直线 AB 的坐标增量可由该直线的长度 S_{AB} 及其坐标方位角 α_{AB} 计算,即

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{AB} &= S_{AB} \cos \alpha_{AB} \\ \Delta y_{AB} &= S_{AB} \sin \alpha_{AB} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

坐标增量的符号取决于坐标方位角的正弦值与余弦值,或者说取决于该直线的方向,其关系见表 1-3。

表 1-3 坐标增量的符号取值

坐标方位角	坐标增量符号	
	Δx	Δy
$0^\circ \sim 90^\circ$	+	+
$90^\circ \sim 180^\circ$	-	+
$180^\circ \sim 270^\circ$	+	-
$270^\circ \sim 360^\circ$	-	-

注:用电子计算器计算 Δx 、 Δy 时可直接显示“+”“-”号。

由式(1-4)和式(1-5)得

$$\left. \begin{aligned} x_B &= x_A + S_{AB} \cos \alpha_{AB} \\ y_B &= y_A + S_{AB} \sin \alpha_{AB} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

2) 坐标的反算

在图 1-14 中,若已知直线 AB 两端点的坐标 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) ,则可计算该直线的水平距离及其坐标方位角,这就是坐标反算问题。

因为 $\Delta x_{AB} = x_B - x_A$, $\Delta y_{AB} = y_B - y_A$,故

$$\begin{aligned} \tan \alpha_{AB} &= \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \\ \alpha_{AB} &= \arctan \left| \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right| \end{aligned} \quad (1-7)$$

这里应注意坐标差(坐标增量)的符号,也即 A 点至 B 点的方向,应用端点 B 的坐标 (x_B, y_B) 减去起点 A 的坐标 (x_A, y_A) 。反之,直线则是由 B 点至 A 点,则式(1-7)应为

$$\tan \alpha_{BA} = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}$$

由式(1-5)可得计算 S_{AB} 的两个公式为

$$\begin{aligned} S_{AB} &= \frac{\Delta x_{AB}}{\cos \alpha_{AB}} = \frac{x_B - x_A}{\cos \alpha_{AB}} \\ S_{AB} &= \frac{\Delta y_{AB}}{\sin \alpha_{AB}} = \frac{y_B - y_A}{\sin \alpha_{AB}} \end{aligned}$$

同样,也可先用两个端点的坐标来计算其间的水平距离 S_{AB} ,然后再计算坐标方位角 α_{AB} ,以资校核。计算公式为

$$\begin{aligned} S_{AB} &= \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \\ \sin \alpha_{AB} &= \frac{y_B - y_A}{S_{AB}}, \cos \alpha_{AB} = \frac{x_B - x_A}{S_{AB}} \end{aligned}$$

2. 坐标方位角的传递

为了解决正算问题,也即由一点坐标计算其他点的坐标时,需要知道各边的坐标方位角。虽然可用罗盘仪或陀螺经纬仪测定各直线的磁方位角或真方位角,但前者精度较差,后者需要专门的设备且计算复杂。因此,通常采用如下方法,即已知某起始边的坐标方位角和观测直线间的水平角,然后依次推算出各边的坐标方位角。

如图 1-15 所示,设已知直线 AB 的坐标方位角为 α_{AB} ,在 B 点、1 点观测了转折角 β_1 、 β_2 ,则可计算出直线 B1、12 的坐标方位角 α_{B1} 、 α_{12} 。 β_1 、 β_2 在线路前进方向的右边,故称为右角;若位于线路前进方向的左边,则称为左角。由图 1-15 可以直接得出

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{B1} &= \alpha_{AB} + 180^\circ - \beta_1 \\ \alpha_{12} &= \alpha_{B1} + 180^\circ - \beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

若计算得到的 α_{B1} 和 α_{12} 超过 360° ,则应减去 360° ,式(1-8)中的 $\alpha_{AB} + 180^\circ$ 实际上是直线 BA 的坐标方位角 α_{BA} (直线 AB 的反坐标方位角)。若观测的不是左角,而是右角,则式(1-8)中应减去右角。因此可以得出以下结论:后一边的坐标方位角等于前一边的坐标方位角加 180° ,再加(减)这条两直线间的左(右)角,求得各边的坐标方位角后,就可以按式(1-4)和式(1-5)计算各点坐标和各边的坐标增量。若不知道直线 AB 的坐标方位角,而已知 A、B 两点的坐标,则可按式(1-7)计算出直线 AB 的坐标方位角 α_{AB} 。

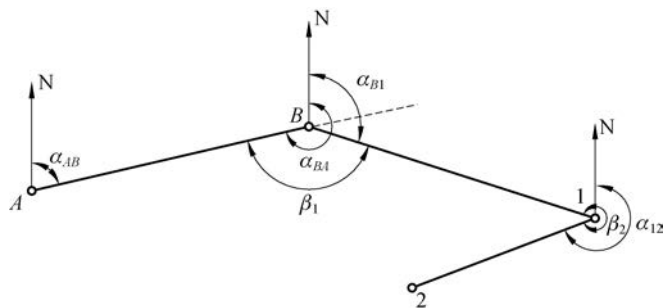


图 1-15 坐标方位角的传递

1.5 测量工作概述

1.5.1 测绘地形图

要在某一点上测绘该地区所有的地物和地貌是不可能的。如图 1-16 所示,在 A 点只能测绘该点附近的房屋、道路等的平面位置与高程,对于山后面的或较远的地物就观测不到了,因此,必须逐站施测。在测量过程中应遵循先控制后碎部(先进行控制测量,后进行碎部测量)的原则。

控制测量包括平面控制测量和高程控制测量。平面控制测量分为导线测量和三角测量。图 1-16(a)所示的 A—B—C—D—E—F—A 连成的折线称为导线,这些点称为导线点。

高程控制测量分为水准测量和三角高程测量。它们都是直接或间接求得各点间的高差,然后再根据起始点的高程求得各点的高程。碎部测量就是测定地物和地貌的特征点。

例如,先在导线点 A 测出房屋的拐点、道路中心线和河岸线的转折点,以及山脊线、山谷线的起点、终点、方向变化点和倾斜变化点等,然后对照实地以相应的符号在图上进行描绘,最后得到用等高线表示的地形图,如图 1-16 (b)所示。

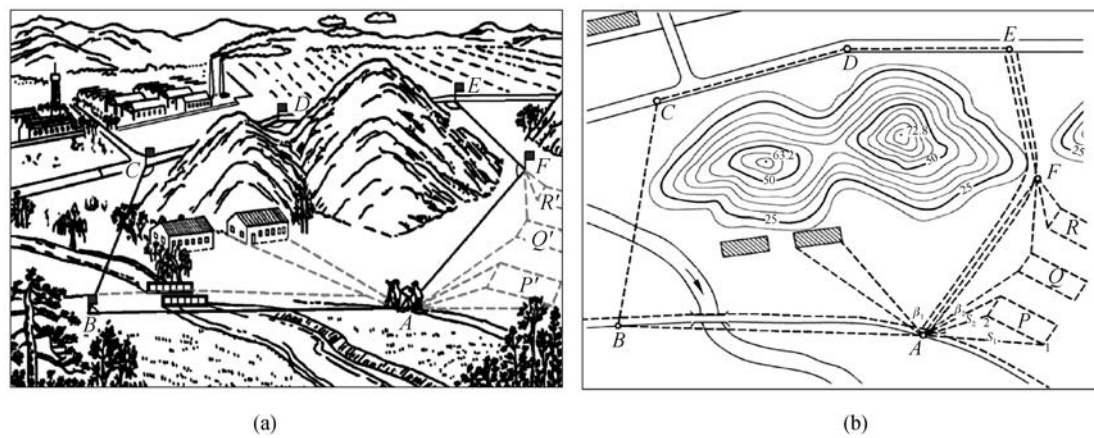


图 1-16 地形和地形图

1.5.2 施工放样

施工放样是把图纸上设计好的工程建筑物的位置测设到地面上,作为施工的依据。例如,要将地形图上已经设计好的建筑物 P、Q、R〔见图 1-16(b)〕的位置正确地测设到实地,就要在导线点 A、E 上测设水平角 $\beta_1, \beta_2 \dots$,并沿这些方向测设水平距离 $S_1, S_2 \dots$,再实地定出点 1,2 $\dots$,这就是设计建筑物的实地位置,如图 1-16(a)中的 P'、Q'、R'。只有进行了正确的放样,才能保证施工顺利完成。

1.5.3 测量工作的原则和程序

测量工作一部分是在野外进行的,称为外业;一部分是在室内进行的,称为内业。外业工作主要是获得必要的数据,如点与点之间的距离(水平距离),边与边之间的夹角在水平面上的投影(水平角)等。内业工作主要是计算与绘图。无论哪种工作都必须小心仔细地进行。对一切测量工作都必须随时检查,杜绝错误。没有完成对前阶段工作的检查,就不能进行下一阶段的工作,这是进行测量工作时所必须坚持的原则之一。为了不使误差积累,必须遵循在布局上“由整体到局部”,在精度上“由高级到低级”,在程序上“先控制后碎部”的原则。

思考与练习

一、名词解释

水准面	大地水准面	高斯平面直角坐标系	绝对高程	相对高程
水平面	参考椭球面	坐标正算	方位角	直线定向

二、选择题

- 任意高度的平静水面()水准面。
A. 都不是 B. 都是 C. 有的是 D. 是大地
- 不论处于何种位置的静止液体表面()水准面。
A. 并不都是 B. 都称为 C. 都不是 D. 是大地
- 地球曲率对()的测量值影响最大。
A. 距离 B. 高程 C. 水平角 D. 竖起角
- 在小范围内的一个平静湖面上有 A 、 B 两点,则 B 点相对于 A 点的高差()。
A. >0 B. <0 C. $=0$ D. 无法计算
- 大地水准面()参考椭球面。
A. 亦称为 B. 不同于
C. 特定情况下可以称为 D. 所包围的地球形体称为
- 平均海面()参考椭球面。
A. 是 B. 不是
C. 近似于 D. 所包围的地球形体称为

三、简答与计算题

- 测量工作的基本原则是什么?
- 已知某点所在高斯平面直角坐标系中的坐标为 $x=4\,345\,000\text{ m}$, $y=19\,483\,000\text{ m}$ 。问该点位于高斯 6° 分带投影的第几带? 该带中央子午线的经度是多少? 该点位于中央子午线的东侧还是西侧?
- 表示地面点的坐标系有哪些?
- 测量坐标系与数学坐标系的区别是什么?
- 某地的大地经度是 $109^\circ 20'$, 试计算其在 6° 带的带号及中央子午线的经度。
- 已知点 $M(528\,265.189, 47\,354\,287.354)$ 和点 $N(5\,328\,271.546, 47\,354\,886.752)$ 的坐标,求 α_{MN} 和 α_{NM} 的值。