



全国高职高专**土建类**专业规划教材

Building

Engineering measurement and training

工程测量 与实训

• 主 编 徐兴彬 刘永生
副主编 欧长贵 徐猛勇 孙晓玲

- 依据国家教指委**土建类**专业教学基本要求体现综合性、实践性、区域性、时效性
- 采用行动导向、任务驱动、项目载体，**教、学、做**一体化模式编写，实现教材与真实工程实际的零距离无缝对接
- 结合最新国家、行业、企业标准及规范
- 对接国家职（执）业资格考试和“**八大员**”岗位资格认证



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



全国高职高专土建类专业规划教材

Building

Engineering measurement and training

工程测量 与实训

主 编 徐兴彬 刘永生

副主编 欧长贵 徐猛勇 孙晓玲



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

工程测量与实训/徐兴彬,刘永生主编.

—长沙:中南大学出版社,2016.3

ISBN 978-7-5487-2196-3

I.工... II.①徐...②刘... III.工程测量-高等职业教育-教材 IV.TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 061754 号

工程测量与实训

GONGCHENG CELIANG YU SHIXUN

主 编 徐兴彬 刘永生

副主编 欧长贵 徐猛勇 孙晓玲

☐责任编辑 谭 平

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙德三印刷有限公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 20.75 ☐字数 510 千字 ☐插页

☐版 次 2016 年 3 月第 1 版 ☐2016 年 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2196-3

☐定 价 45.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

本教材采用模块式编写，共分10个模块，分别是：模块1：测量工作的基本知识；模块2：水准测量；模块3：角度测量；模块4：距离测量；模块5：全站仪的实际应用；模块6：施工测量的基础工作；模块7：民用建筑施工测量；模块8：工业建筑施工测量；模块9：建筑物变形测量及竣工图测绘；模块10：GNSS原理与应用。模块之后安排有3个附录：附录1：图根控制测量实习指导书；附录2：湖南省职业院校测量操作技能考核试题；附录3：彩图插页。

本书可作为高职院校土建、交通、水电类专业教材，也可供相关专业技术人员使用。



全国高职高专土建类专业规划教材编审委员会

主 任

赵惠琳 瞿 丰

副主任

(以姓氏笔画为序)

毛桂平 邓子胜 玉小冰 刘孟良
刘 霁 张丽姝 陈安生 陈翼翔
周 晖 郑 伟 赵 冬 赵 慧
徐凯燕 彭 浪 曾 波 蔡 东

委 员

(以姓氏笔画为序)

王文杰	王保林	王潇洲	甘济平	卢士华
叶 雯	冯川萍	朱耀淮	刘庆林	刘庆潭
刘志范	刘锡军	祁大泉	杨玉衡	李元希
肖 芳	肖利才	吴 渝	何伟强	汪文萍
张红霞	张淑芬	张增宝	陈玉中	陈 列
陈 勇	陈淳慧	林小静	周一峰	周 任
胡云珍	钟利生	钟真宜	祝军权	夏健明
夏高彦	徐德慧	黄昌见	黄 琛	章鸿雁
董建民	蒋春平	蒋晓云	覃士升	傅煜明
曾澄波	鄢维峰	蔡建原	廖柳青	潘邦飞

出版说明 INSTRUCTIONS

遵照《国务院关于加快发展现代职业教育的决定》〔国发(2014)19号〕提出的“服务经济社会发展和人的全面发展,推动专业设置与产业需求对接,课程内容与职业标准对接,教学过程与生产过程对接,毕业证书与职业资格证书对接”的基本原则,为全面推进高等职业院校土建类专业教育教学改革,促进高端技术技能型人才的培养,依据国家高职高专教育土建类专业教学指导委员会高等职业教育土建类专业教学基本要求,通过充分的调研,在总结吸收国内优秀高职高专教材建设经验的基础上,我们组织编写和出版了这套高职高专土建类专业“十三五”规划教材。

高职高专教学改革不断深入,土建行业工程技术日新月异,相应国家标准、规范,行业、企业标准、规范不断更新,作为课程内容载体的教材也必然要顺应教学改革和新形式的变化,适应行业的发展变化。教材建设应该按照最新的职业教育教学改革理念构建教材体系,探索新的编写思路,编写出版一套全新的、高等职业院校普遍认同的、能引导土建专业教学改革的“十三五”规划系列教材。为此,我们成立了规划教材编审委员会。教材编审委员会由全国30多所高职院校的权威教授、专家、院长、教学负责人、专业带头人及企业专家组成。编审委员会通过推荐、遴选,聘请了一批学术水平高、教学经验丰富、工程实践能力强的骨干教师及企业专家组成编写队伍。

本套教材具有以下特色:

1. 教材依据国家高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》编写,体现科学性、创新性、应用性;体现土建类教材的综合性、实践性、区域性、时效性等特点。
2. 适应高职高专教学改革的要求,以职业能力为主线,采用行动导向、任务驱动、项目载体,教、学、做一体化模式编写,按实际岗位所需的知识能力来选取教材内容,实现教材与工程实际的零距离“无缝对接”。
3. 体现先进性特点。将土建学科的新成果、新技术、新工艺、新材料、新知识纳入教材,结合最新国家标准、行业标准、规范编写。
4. 教材内容与工程实际紧密联系。教材案例选择符合或接近真实工程实际,有利于培养学生的工程实践能力。
5. 以社会需求为基本依据,以就业为导向,融入建筑企业岗位(八大员)职业资格考试、国家职业技能鉴定标准的相关内容,实现学历教育与职业资格认证相衔接。
6. 教材体系立体化。为了方便老师教学和学生学学习,本套教材建立了多媒体教学电子课件、电子图集、标准规范、优秀专业网站、教学指导、教学大纲、题库、案例素材等教学资源支持服务平台。

全国高职高专土建类专业规划教材
编审委员会

目 录 CONTENTS

模块1 测量工作的基本知识	(1)
任务1-1 认识地球的形状和大小	(1)
任务1-2 认清地面点的坐标系	(3)
任务1-3 熟悉高斯投影及其平面直角坐标系	(6)
任务1-4 认识我国的高程系统	(10)
任务1-5 直线的方向与坐标计算	(12)
任务1-6 掌握测量误差的基本知识	(18)
练习题1	(29)
模块2 水准测量	(31)
任务2-1 水准测量的原理	(31)
任务2-2 水准测量仪器及工具	(32)
任务2-3 线路水准测量	(39)
任务2-4 三、四等水准测量	(45)
任务2-5 自动安平水准仪和激光扫描水准仪	(48)
任务2-6 水准测量的误差来源及其注意事项	(51)
任务2-7 检验与校正水准仪	(59)
练习题2	(63)
实训1 水准仪的认识及其基本操作	(66)
实训2 改变仪器高法水准测量	(67)
实训3 双面尺法水准测量	(68)
实训4 自动安平水准仪的检校	(69)
模块3 角度测量	(70)
任务3-1 角度测量的基本概念	(70)
任务3-2 经纬仪及其使用	(72)
任务3-3 水平角观测	(79)
任务3-4 竖直角观测	(82)
练习题3	(86)
实训5 全站仪的认识与仪器安置	(89)
实训6 方向法水平角测量(测回法)	(90)
实训7 方向法水平角测量(全圆方向法)	(91)
实训8 竖直角测量与计算	(92)

模块4 距离测量	(93)
任务4-1 钢尺量距	(93)
任务4-2 视距测量	(100)
任务4-3 电磁波测距	(104)
练习题4	(112)
实训9 全站仪综合测量	(114)
实训10 钢尺量距与仪器加常数测定	(115)
模块5 全站仪的实际应用	(116)
任务5-1 了解全站仪及其构造	(116)
任务5-2 做好全站仪测量前的准备工作	(120)
任务5-3 全站仪基本测量操作	(123)
任务5-4 全站仪放样测量	(134)
练习题5	(139)
实训11 全站仪角度和距离测量	(141)
实训12 全站仪坐标测量	(142)
实训13 全站仪坐标点位放样	(143)
模块6 施工测量的基础工作	(144)
任务6-1 了解施工测量的基本知识	(144)
任务6-2 熟悉施工测量的精度	(145)
任务6-3 掌握测设的几项基本工作	(149)
任务6-4 熟悉与掌握施工放样的工作方法	(152)
任务6-5 学习曲线放样测量计算	(159)
任务6-6 地形图的应用	(170)
练习题6	(187)
实训14 建筑物轴线与承台放样	(193)
实训15 水准仪大高差放样	(194)
模块7 民用建筑施工测量	(195)
任务7-1 施工测量准备工作	(195)
任务7-2 建筑物的定位和放线	(198)
任务7-3 建筑物基础施工测量	(201)
任务7-4 墙体施工测量	(203)
任务7-5 高层建筑施工测量	(205)
练习题7	(211)
模块8 工业建筑施工测量	(213)
任务8-1 概述	(213)
任务8-2 厂房(矩形)控制网的测设	(215)
任务8-3 熟练掌握厂房施工过程测量	(220)

任务 8-4 熟悉了解厂房预制构件安装测量	(222)
任务 8-5 了解烟囱、水塔施工测量	(226)
任务 8-6 学习理解管道施工测量	(228)
任务 8-7 桥梁工程施工测量概述	(237)
练习题 8	(239)
模块 9 建筑物变形测量及竣工图测绘	(242)
任务 9-1 建筑物变形观测概述	(242)
任务 9-2 建筑物沉降测量	(244)
任务 9-3 建筑物倾斜观测	(247)
任务 9-4 建筑物的裂缝与位移观测	(250)
任务 9-5 竣工总平面图的绘制	(252)
练习题 9	(253)
模块 10 GNSS 原理与应用	(255)
任务 10-1 GNSS 概述	(255)
任务 10-2 GPS 定位基本知识	(257)
任务 10-3 GPS 网控制测量	(260)
任务 10-4 GPS 技术在测量中的应用与发展	(266)
任务 10-5 科力达 RTK(K9、s730)使用操作介绍	(269)
练习题 10	(280)
参考文献	(282)
附录 1 图根控制测量实习指导书	(283)
附录 2 湖南省职业院校测量操作技能考核试题	(309)
附录 3 彩图插页	(313)

模块1 测量工作的基本知识

【教学目标】认识地球上建立坐标系的过程，了解高斯投影的方法，认识高程的概念，掌握坐标正、反算，掌握测量中误差的计算原理。

【技能抽查】判断直线的象限，坐标正算、反算的训练。

任务1-1 认识地球的形状和大小

一、地球的自然表面

我们所居住的地球表面是很不规则的。它上面分布着高山峡谷、丘陵平原、沙漠戈壁、江河湖海等，呈现出高低起伏的状态，这个表面称为地球的自然表面(图1-1)。它无法用一简单的数学公式描述。因而，要在这样一个不规则的自然表面上，进行测量成果的整理、计算和绘图，将是一件不可能完成的工作。这就要求人们寻找一个与地球形状很接近、同时又规则的曲面来代替地球的自然表面。

二、大地水准面与大地体

经过长期的测量与研究，已经了解到地球上最高处为珠穆朗玛峰，中国于2005年测得其海拔高为8844.48 m。最低处在太平洋西部的马里亚纳海沟，深为11022 m。地球上这样的高低起伏，同地球的平均半径6371公里相比，是非常微不足道的。另外，地球上海洋面积约占整个表面积的71%，而陆地仅占29%。因此，可以设想用静止的海水面延伸并穿过陆地表面，形成一个闭合曲面来代替地球的自然表面。

由物理学知道，地球表面上的任何物体主要受到两种力的作用，一种是地球的万有引力 F ，另一种是地球自转的离心力 P 。这两种力的合力称为重力 g ，重力作用的方向线便是铅垂线，简称垂线(图1-1)。铅垂线是测量学中的一条很重要的基准线。测量经纬仪的对中整平，就是为了在操作仪器的过程中，使仪器中心始终与地面控制点在同一条铅垂线上。很明显，在地球上由静止水面所形成的曲面有一个特点，就是过曲面上任何一点所作的铅垂线，均在该点与曲面正交。通常，我们称这个静止水面叫做水准面。根据这一定义，我们随便在某一时刻、某一地点以及该地点的某一高度位置摆上一盆水，这就形成了一个此时、此地、此高度位置的水准面(或叫做这个水准面的一部分)。所以说，在地球上水准面的个数是无穷无尽的(随时间、地点与高度位置发生变化)。而我们定义通过平均海水面的那一个水准面为大地水准面。大地水准面包围的曲面形体称为大地体。

值得注意的是，上述的平均海水面，也并不是指整个地球上的平均海水面，整个地球的平均海水面我们是从无从知晓、无从获得的，我们往往只在某一确定的地点测定该点的平均海水面，例如我国便在青岛测定黄海的平均海水面作为我国的大地水准面，并以此作为全国的

高程基准面。

地球上静止的水面称为水准面。水准面是受地球表面重力场影响而形成的，是一个处处与重力方向垂直的连续曲面，因此它是一个重力场的等位曲面，即物体沿该曲面运动时，重力不会做功，而水在这个曲面上也是不会流动的。

然而，既然水准面是重力场的等位曲面，其形态必然受重力场分布的控制。重力场分布既受地球内部物质密度场分布(万有引力)及地球自转(离心力)的影响，同时还受地球以外因素的影响，主要是月球和太阳的引力作用。由于受月球和太阳的影响，海洋水准面会发生周期性变化，潮汐便是其显著的体现。这样就使得地面上各点受到的重力的大小与方向均不相同，由此引起各点的铅垂线方向产生不规则的变化，从而使大地水准面成为一个有微小起伏不平的不规则曲面(图 1-1)。也就是说，大地水准面虽具有实质性的物理意义，是一个物理曲面，但却不是一个数学曲面，无法用一个明确的数学公式来表达。以此推之，由大地水准面包围的大地体也是一个极不规则的曲面形体。

三、参考椭球体

大地水准面是如此的一个不规则曲面，以至于我们不可能用一个简单的数学公式来表达，更加不可能在这个曲面上建立一个统一的坐标系来确定地面点的位置。但是，我们可以选用一个与大地水准面相接近的规则几何形体来代替它。这个规则的几何形体就是一个绕椭圆短轴旋转而成的地球**椭圆柱体**(又称**椭球体**)。椭球体的表面称为**椭球面**。椭球面上任一点与椭圆柱体面垂直的线叫做**法线**(图 1-1)。

地球椭圆柱体的精确形状和大小，只有在整个地球上进行统一的天文大地测量和重力测量之后才能确定。各个国家为了进行本国范围内的测量成果处理，往往根据局部地区所进行的天文大地测量和重力测量资料(近代又加上卫星大地测量资料)，来确定适合本国领土范围内的椭圆柱体形状和大小，一般称这样的椭圆柱体为**参考椭圆柱体**，或叫**参考椭球体**。

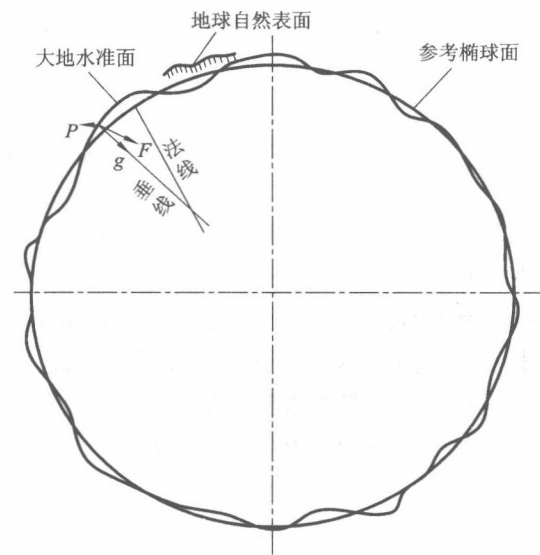


图 1-1 三个面的相互关系

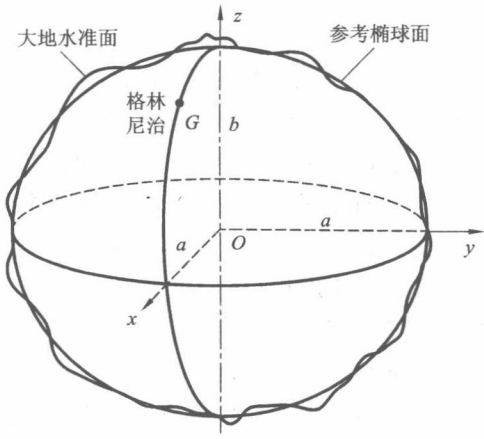


图 1-2 参考椭圆柱体的几何模型

如图1-2所示,可以将参考椭圆柱体用一个简单的数学公式来表达:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

式中, a 、 b 分别为参考椭圆柱体的长半轴、短半轴。定义参考椭圆柱体的扁率 $\alpha = (a - b)/a$ 。 a 、 b 、 α 均称为参考椭圆柱体的元素(参数)。

任务1-2 认清地面点的坐标系

一、坐标系统的分类

确定了地球的大致形状与大小,或者参考椭球体的元素之后,就可以在其上面建立各种各样的统一坐标系,有了统一的坐标系,便可以确定地面点的坐标位置。根据地面点坐标的表现形式不同,我们可以把地球上的各种坐标系划分为球心坐标系、球面坐标系和平面坐标系三种。

1. 球心坐标系

球心坐标系就是将坐标原点设置在地球的中心(参心或质心),按一定方式建立三条互相垂直的坐标轴 X 、 Y 、 Z , 以此来确定地面点的位置。可见,球心坐标可以准确标定出地球体内部或外部任何一点的空间唯一位置(无须再引入高程的概念)。即球心坐标中已经包含高程的大小。球心坐标根据原点位置不同分参心坐标与质心坐标。“参心”指参考椭球体的中心,“质心”是地球的质量中心,质心坐标亦即地心坐标。

2. 球面坐标系

球面坐标系用球面上的经度和纬度来表示地面点的具体位置。也就是地面空间点按某种方式投影到球面上,得到的投影点的经纬度。显然它不包含上面所说的“高程”含义。根据空间点投影到球面上的方式不同,球面坐标分大地坐标与地理坐标,前者以参考椭圆柱体为原型,用大地经度、大地纬度表示,后者用天文仪器实测得到(见图1-4),称地理经度、纬度,二者一般会有微小差别。球面坐标的应用很广,例如,在地球仪上可以很方便地用大地球面坐标(经纬度)来确定地球上各个国家、地区之间的相互位置关系。用地理经纬度来测量和标定远洋船舶的航行位置,是航海运输业数百年来一贯的方法。人类发明飞机之后的航空运输业,也需要在天空实时地测量出飞机的地理位置,来对飞机进行导航。

3. 平面坐标系

是按一定投影方式,将地球局部范围投影变换成一个整块平面,建立相应的平面坐标系,以此来确定该平面内的各点坐标位置。显然,如果要确定一个小区域范围内的各点坐标相对位置,用平面坐标系进行描述会显得比较直观明确。平面坐标系是球面坐标系的引申。

二、地面点的球心坐标

根据所选取的坐标原点位置的不同,球心坐标系可分为参心坐标系和质心坐标系,而这两种坐标系又各包含有空间直角坐标系和大地(球面)坐标系两种形式。其中前者与数学上的空间直角坐标系含义相同,后者则与通常意义上的大地坐标系含义类似,只不过球心坐标系中的参心纬度或地心纬度是地面点与各自坐标系原点的连线与赤道平面的夹角,而大地纬

度则是地面点的法线与赤道平面的夹角。

1. 参心坐标系

参心坐标系的建立是以参考椭球体的中心 O 为原点, 以椭球体的旋转轴为 Z 轴, X 轴指向初始子午线和赤道的交点, Y 轴与 Z 轴、 X 轴垂直并构成右手坐标系, 如图 1-2 所示。

参心坐标系有两种表现形式: **参心空间直角坐标系**和**参心大地坐标系**。使用不同的椭球元素便形成不同的参心坐标系, 我国的 1954 年北京坐标系、1980 年西安坐标系、新 1954 年北京坐标系以及高斯-克吕格平面直角坐标系, 均是由参心大地坐标系转化而来。我国的天文大地控制网构建成为我国的参心坐标框架。

2. 质心坐标系

质心坐标系又称**地心坐标系**。是以地球的质心(包括海洋、大气的整个地球质量的中心)为原点, 也以参考椭球面为基准面的坐标系, 椭球中心与地球质心重合, 且椭球定位与全球大地水准面最为密合。地心坐标系也有两种表现形式: **地心大地坐标系**与**地心空间直角坐标系**。

目前所用的 WGS-84 坐标系和 2000 国家大地坐标系均属于地心坐标系。我国的 GNSS 连续运行站构建成为我国的地心坐标框架。

三、地面点的球面坐标

地面点的球面坐标分为两种, 一种为**大地坐标**, 另一种为**地理坐标(或天文坐标)**。其中, 大地坐标是建立在地球参考椭球体基准面上的, 而地理坐标(天文坐标)是以大地水准面(铅垂线)为依据的。

1. 大地坐标系

大地控制测量所获得的坐标均是大地坐标。新中国成立后采用的大地坐标系有 1954 年北京坐标系、1980 年西安坐标系和 2000 年国家大地坐标系。其中 1954 年北京坐标系是采用前苏联克拉索夫斯基参考椭球体元素建立的, 由于其不符合我国国情, 我国于 1978 年开始建立 1980 年西安坐标系, 西安坐标系采用 1975 年国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)推荐的地球椭球, 大地原点设在西安附近的泾阳县永乐镇。而 2000 年国家大地坐标系实质上是球心坐标系, 其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心, 是全球地心坐标系在我国的具体体现, 自 2008 年 7 月 1 日起, 我国开始全面启用 2000 年国家大地坐标系。

参考椭球体是大地坐标系的基础。如图 1-2、图 1-3 所示, 椭球体的短轴为地球的自转轴称**地轴**。地轴与椭球体面相交, 获得两个极点, 北面的极点称为**北极 N** , 南面为**南极 S** 。短轴的中点 O 称为**地心或球心**。

通过地轴的平面称为**子午面**。子午面与椭球体面的交线称为**子午线(子午圈)**或**经线**, 而所有的子午圈都是长、短半径相同的椭圆。国际上公认通过英国格林尼治天文台某点(图中 G 点)的子午面为**起始子午面**, 子午线 $NGDS$ 相应地称为**起始子午线**, 又叫**本初子午线**。起始子午面将地球分为东、西两个半球。起始子午面天文台以东者称为东半球, 以西为西半球。

垂直于地轴的平面与椭球体面的交线称为**纬圈或纬线**。所有的纬圈都互相平行, 也称作平行圈, 它们都是半径不相同的圆圈, 其中最大的一条圆圈 $WDCEW$ 就是**赤道**。赤道的半径便是这个参考椭圆体的长半径 a , **赤道平面**也将地球分成两个半球, 在北面的称北半球, 在南面的称南半球。

起始子午面和赤道平面即是组成大地坐标系统的两个基准平面。

如图1-3,过地面上任一点 P 的子午面与起始子午面所夹的两面角 L_P ,叫做 P 点的**大地经度**。大地经度以起始子午面为 0° 度起算,向东量算称东经,向西量算称西经,数值范围均为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。东经 180° 与西经 180° 相会于同一条“半子午线”,而且正好位于起始子午面上。椭球体面上任一“半子午线”上各点经度均相同。我国领土均位于东半球,其经度范围约为东经 $73^\circ \sim 135^\circ$ 。

过地面点 P 的法线(在该点与椭圆体面垂直的线)与赤道平面的交角,叫做 P 点的**大地纬度**,以 B_P 表示。大地纬度是以赤道为 0° ,向北量测称北纬,向南称南纬,数值各从 0° 变化。椭球体同一纬线上各点的纬度相同。我国疆域的纬度大约在北纬 $3^\circ \sim 53^\circ$ 之间。

由此可见,地球上一点 P 的大地坐标(大地经度 L_P 、大地纬度 B_P),是由参考椭球体(参数 a 、 b 、 e),起始子午面、 P 点子午线、赤道平面、 P 点法线这些因素确定的。这种以参考椭球体、子午线、法线为依据确定的大地经度 L 和大地纬度 B ,测量上统称为地面点的大地坐标。

2. 地理坐标系

实质上,上述大地坐标 L 、 B 也只是人们设计出来的,因为某点的子午线位置和法线方向我们通常是无法直接测定的。实际测量工作中,在地面点安置测量仪器,用天文测量方法测定该点的天文经度 λ 与天文纬度 φ 。而安置仪器是以仪器的竖轴与铅垂线相重合,即以大地水准面(与该点的铅垂线正交)为基础的。这样,在处理天文测量数据时,便以大地水准面和铅垂线为依据,由此建立的坐标系,称为**天文坐标系或地理坐标系**。图1-4是测量地理纬度的简单原理图,图中 $\varphi_1 = \varphi_2$ 即为 A 点处的地理纬度。而地理经度则可用测量时差等方法来确定。

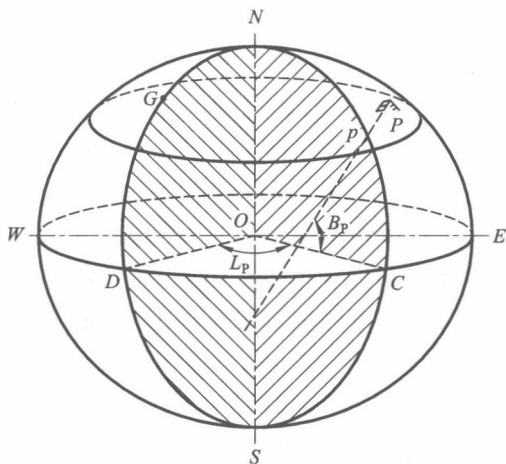


图1-3 球面坐标系中的大地坐标 L 、 B

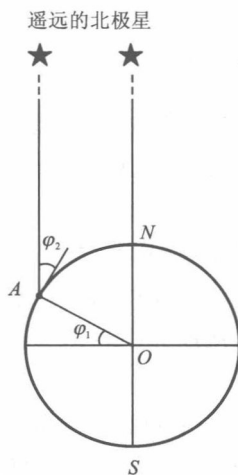


图1-4 地理纬度的简易测定

由于地球物质分布不均匀,各地的铅垂线和法线方向不一致,所以地面各点的天文坐标(λ 、 φ)和大地坐标(L 、 B)存在微小的差异。通常,我们称铅垂线偏离法线的角度为**垂线偏差**。在用传统大地测量技术建立国家精密平面控制网(又称天文大地网)时,就是先利用大量

的野外测量数据,计算出各大地点相对于参考椭球体的垂线偏差(偏差分量 ξ 、 η),进而将这些以铅垂线为依据的测量数据成果归算到参考椭球体面上,最后计算出参考椭球体面上的大地坐标 L 、 B ,以供后续的地图、地形图制作。

在一般的测量工作中,则无须考虑上述垂线偏差的影响。

四、地面点的平面坐标

上面所说的无论是大地坐标还是地理坐标,它们表示的都是地面点的球面坐标。球面坐标只有表达在球面体(地球仪)上才会比较清晰直观,但在世界范围内的政治、军事、经济、贸易往来活动中,在国家的科研、军事、行政管理中,以及人们在城乡规划设计、工程建设施工等各项工作中,仅仅靠标注有经纬度的球面地图是远远不够的。这样,人们就越来越需要具有一定精度、较好准确性、适用于各种用途的平面地图、地形图。也就是说,需要建立一定的测量平面坐标系,来确定一定区域范围内的各点平面坐标位置。

如何在地球这样庞大的椭球面上建立恰当的平面坐标系,来绘制出适应各种目的与用途的平面地图、地形图,是一项非常复杂和烦琐的工作,也经历了非常艰难曲折的道路。自公元2世纪“世界地图之父”希腊的托勒密阐述编制地图的方法,提出将地球曲面表示为平面,绘制“托勒密地图”之后,历经一千多年,直到1569年才由荷兰科学家墨卡托创建出比较成熟的地图投影法,从而取代托勒密传统的制图观念并流传至今。之后的三百多年各种地图投影方法如雨后春笋般涌现出来,如兰伯特投影、高斯投影、高斯-克吕格投影等,至今仍流行世界。

任务1-3 熟悉高斯投影及其平面直角坐标系

一、正形投影概念

地图投影是指建立地球表面(或其他星球表面)上的点与投影平面(即地图平面)上的点之间的对应关系。也就是利用一定的数学法则,将地球表面上的任意点投影转换到地图平面上的理论和方法。亦即确立球面与平面之间的各种数学转换公式。在地球的参考椭球面这个曲面上建立平面坐标系,就是要研究如何将椭球面上的点位转换到平面上来。而地图投影的方法多种多样,最简单的一种是“几何透视法”。该方法设想用一个投影面和地球的参考椭球面相切,然后从球体中心用一个点光源将椭球面上的一切图形映射到投影面上,从而实现由椭球面到平面的变换。

椭球面是一个曲面,在几何上称为不可展面。要将曲面强制展开成平面,就如同将一小块橘子皮,硬要将它压平,想使它没有皱纹、没有裂缝,这实际上是不可能的。这种现象称为投影变形。投影变形有长度变形、角度变形和面积变形三种。对于这些变形,任何投影方法都无法使它们全部消除,而只能使其中一种变形为零,将其余变形控制在一定范围以内。控制这些变形的投影方法相应地有等长投影、等角投影和等面积投影。在测量学中,保持角度不变尤其重要,这样可以使图形在一定范围内投影后,图形仍具有相似性。这种保持角度不变的投影又称为正形投影。

二、高斯投影及其平面直角坐标

在我国现今八种基本比例尺(1:100万、1:50万、1:25万、1:10万、1:5万、1:2.5万、1:1万、1:5000)地形图中,除了1:100万小比例尺地形图是采用兰伯特正轴等角圆锥投影外,其余各种比例尺地形图均采用高斯横椭圆柱正形投影。该投影首先由德国数学家高斯提出和建立,后经克吕格导出严密的投影公式加以补充,故又称为高斯—克吕格投影,简称高斯投影。

1. 高斯投影的几何概念

如图1-5所示,高斯投影的几何概念可以叙述如下。

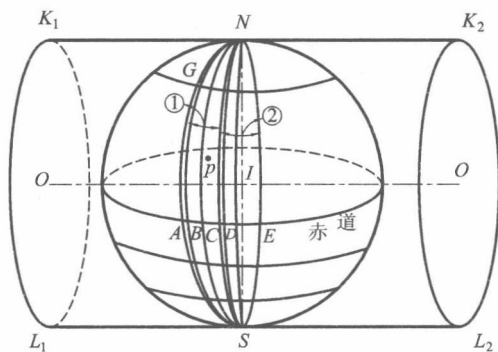


图1-5 高斯横椭圆柱投影

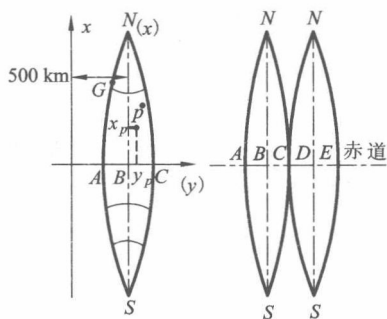


图1-6 高斯投影平面

设想一个空心的横椭圆柱体套在参考椭球面上。横椭圆柱体的椭圆与参考椭球体的椭圆完全一致(两椭圆参数相同)。椭圆柱体刚好与椭球面上某一子午线 NBS 相切(紧密重合),该子午线称为轴子午线或中央子午线, NAS 与 NCS 为边缘子午线并构成一个投影带。 A 、 B 、 C 为三条子午线与赤道的交点, AB 、 BC 弧长相等。此时,椭圆柱体的中心轴 OO' 位于赤道中心平面内,并与椭球体的旋转轴 NS 相交于椭球体中心 I 点。假定 I 点是一个点光源,光线照射使椭球面上的投影带及其图形投影到椭圆柱体面上,然后将椭圆柱面沿过南、北两极的母线 L_1L_2 、 K_1K_2 剪开、展平,得到 $NSABC$ 所在的投影平面(如图1-6),该投影平面称为高斯投影平面,简称高斯平面,以此建立的坐标系称高斯平面坐标系。

2. 高斯投影的特点

根据上述投影概念,高斯正形投影具有以下几个特点(参阅图1-5、图1-6)。

- 1) 中央子午线投影后为直线,长度不变。其余子午线投影后凹向中央子午线,关于中央子午线对称,离开中央子午线的距离越远,长度变形越大。
- 2) 赤道投影后为直线。其余纬线投影后凸向赤道,关于赤道对称。
- 3) 经线与纬线投影后,仍然保持互相正交。

3. 高斯投影带的划分

根据高斯投影的上述第一个特点,距离中央子午线比较远的地方投影长度变形较大,由此引起的面积变形也较显著。为了使长度和面积的变形满足测量制图的要求,投影带必须限制在中央子午线两侧一定范围内。为此,将整个参考椭球体面自本初子午线开始,用子午经

线均匀地分成各等分，每一等分代表一个投影带(如图 1-5，第①带，第②带，…)。投影时就类似放幻灯片一样，自东向西慢慢旋转椭球体，将椭球体上各投影带的中央子午线分别与圆柱面紧密重合，依次将各投影带的图形投影到圆柱体面上并剪开、展平，直到将所有投影带投影完成。

如何划分投影带，国际上通行有两种方法，一种是按经度差 6°带划分，从本初子午线开始，自西向东每隔 6°为一投影带，依次用阿拉伯数字 1~60 进行编号，全球共分为 60 个投影带(如图 1-7)。另一种是按经差 3°带划分，划分时将第 1 号 3°带的中央子午线与第 1 号 6°带的中央子午线相同，然后按每隔 3°为一投影带，全球共分为 120 个投影带。而当按 6°带划分时，根据地球赤道周长，可以简单计算出沿赤道线位置，每个 6°带的两条边界子午线之间最大弧长约为 667 公里，即每个投影带中距离中央子午线最远处不超过 334 公里。经投影后此处的线段会产生约 1/700 长度变形。对于大比例尺测绘地形图，以及要求较高精度的工程测量(测距误差要求 1/2000~1/1000)来说，如此大的投影长度变形是不能允许的。因此还要采用 3°带，甚至 1.5°带来划分，并以此建立高斯平面直角坐标系。

图 1-8 展示了 6°带与 3°带的具体划分以及将它们展开之后的相互位置关系。根据该图，在东半球内的 6°带与 3°带的带号，与其相应的中央子午线的经度有如下关系：

$$\begin{cases} L_6 = 6N - 3 \\ L_3 = 3n \end{cases} \quad (1-1)$$

式中， L_6 为 6°带的中央子午线经度， N 为 6°带的带号； L_3 为 3°带的中央子午线经度； n 为 3°带的带号。

反之，如果知道某点经度 L ，则可求算出该点所在 6°带带号 N 或 3°带的带号 n ，计算公式如下：

$$\begin{cases} N = INT\left(\frac{L}{6}\right) + 1 \\ n = INT\left(\frac{L}{3} + 0.5\right) \end{cases} \quad (1-2)$$

我国领土范围约为东经 73°40' ~ 135°05'。因此，按高斯投影所涉及的 6°带带号为 13 ~ 23，全国共 11 个投影带。而 3°带涉及的带号为 25 ~ 45，共 21 个投影带(图 1-8 所示)。

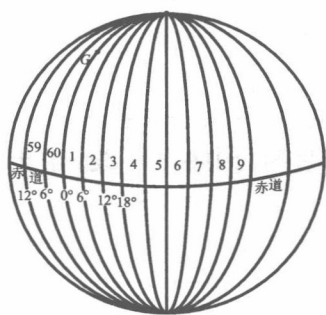


图 1-7 6°带投影分带

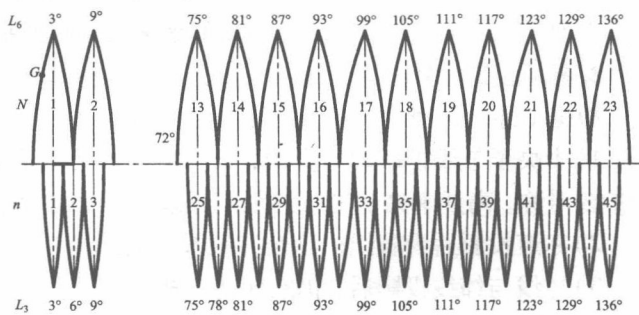


图 1-8 6°带与 3°带的关系及我国投影带范围