

高等学校教学用书

地形测量学

汪铁生 翁丙姝 王泽良 编

石油大学出版社



P217
001

52048

P217

地形测量学

汪铁生 翁丙姝 王泽良 编

石油大学出版社

内 容 提 要

本书对测量学的基本理论、基本方法及地形测量中常规仪器的结构原理及操作方法作了较详细地阐述,对测量成果的精度要求、对各种测量误差来源作了深入地分析,并结合生产实际对地形控制及地形图的精度问题分章作了讨论,其测量作业方法和精度要求均按有关生产规范的规定加以叙述,同时较详细地介绍了近年来测量新技术和新仪器,并在附录中具体介绍了 WILD T2900 电子经纬仪的使用及在地形控制测量中使用的计算程序。

本书可作高等院校测量专业教学用书,也可供非测量专业学习测量课程及有关人员参考。

地 形 测 量 学

汪铁生 翁丙姝 王泽良 编

石油大学出版社

(山东省 东营市)

石油大学印刷厂印刷

新华书店发行

开本787×1092 1/16 26.5印张 2插页 678千字

1991年5月 第1版 1991年5月 第1次印刷

印数 1—2500册

ISBN 7-5636-0114-7/P·05

定价: 6.90元

前 言

本教材是根据测量专业要求,在多年教学实践的基础上,研究讨论后编写的。可供测量专业应用,亦可作为其他专业学习测量学的参考书。在编写过程中以少而精为原则,并考虑生产实际应用的需要,以理论联系实际,去旧纳新为指导思想,去掉旧内容,增加新技术新内容。有关测角、测距、测高的仪器则选择目前常用的仪器为例。在测量作业方法和精度要求等方面都吸取了目前生产上执行的规范要求。有关测量的计算采用适合电子计算器或便携式微机的计算公式及方法。增加的新内容有光电测距仪、自动安平水准仪、电子经纬仪、自动绘图简介等。在附录中对WILD T2000电子经纬仪的使用作了介绍,并附有地形控制测量中计算常用的程序。

本书由汪铁生同志主编。全书共分十六章,两个附录。第四、六、八、九、十一、十四章由翁丙姝同志编写。第二、三、十、十二、十三章由王泽良同志编写。第一、五、七、十五、十六章及两个附录由汪铁生同志编写,在附录二中的线形锁程序由毛锋同志提供。最后由程人和教授对书稿进行了审阅,在此表示感谢。

本书编写时除参考了在参考文献中列出的有关书籍外,还参考了总参测绘学院航测教研室编写的地形测量学教材,石油大学测量教研室编写的测量学教材,以及WILD厂编写的T2000 OPERATOR'S MANUAL和DI5S测距仪说明书。

本书在编写中力求概念确切,说理清楚,语言通俗,便于自学。但是由于我们水平有限,时间仓促,缺点和错误在所难免,欢迎批评指正。

编 者

1989年12月

目 录

第一章 测量基本知识	1
第一节 绪论	1
第二节 地球形状和大小	3
第三节 地面点位置的确定	5
第四节 用水平面代替水准面的限度	8
第五节 图 and 比例尺	10
第六节 测量工作概述	13
第二章 直线丈量与定向	16
第一节 地面点的标志	16
第二节 直接丈量所用的工具	17
第三节 直线丈量	18
第四节 钢尺的检定	20
第五节 丈量成果的整理	21
第六节 钢尺丈量的误差来源	23
第七节 直线的定向	24
第三章 经纬仪及水平角测量	28
第一节 水平角测量原理与经纬仪基本结构	28
第二节 水准器及其灵敏度	31
第三节 望远镜的构造及其性能	32
第四节 经纬仪的读数系统	36
第五节 经纬仪的安置	44
第六节 水平角观测方法	46
第七节 经纬仪的检验和校正	48
第八节 水平角观测的误差来源	54
第四章 水准测量	57
第一节 水准测量的原理	57
第二节 水准仪和水准标尺	59
第三节 水准仪和水准标尺的检验校正	60
第四节 三、四等水准测量的实施	64
第五节 水准路线的高程计算	69
第六节 水准测量的误差来源及其影响	71
第七节 断面水准测量和面水准测量	75
第八节 自动安平水准仪	79
第五章 测量误差基本知识	82
第一节 观测误差	82

第二节	偶然误差的特性	83
第三节	衡量精度的标准	85
第四节	误差传播定律	87
第五节	算术平均值及其中误差	92
第六节	同精度观测值的中误差	94
第七节	权及带权算术平均值	96
第八节	带权平均值的中误差及单位权中误差	102
第九节	等权代替法平差	105
第十节	多边形平差法	109
第六章	经纬仪导线测量	114
第一节	概述	114
第二节	导线测量的外业工作	116
第三节	导线测量的内业计算	118
第四节	一个结点的导线网平差	126
第五节	等权代替法导线网平差	136
第六节	导线测量错误的检查	143
第七章	交会点测量	145
第一节	概述	145
第二节	前方交会	146
第三节	侧方交会及单三角形	152
第四节	后方交会	154
第五节	测边交会	166
第六节	两点交会	170
第八章	小三角测量	176
第一节	概述	176
第二节	小三角测量的外业工作	177
第三节	线形锁	179
第四节	中点多边形的近似平差	194
第五节	单三角锁的近似平差	198
第六节	大地四边形近似平差计算	202
第九章	三角高程测量	206
第一节	三角高程测量	206
第二节	垂直度盘的构造与垂直角测量	209
第三节	垂直角观测精度	215
第四节	三角高程测量的应用	216
第十章	视距测量与电磁波测距	222
第一节	普通视距测量的原理	222
第二节	普通视距测量作业步骤	225
第三节	视距常数的测定	226
第四节	普通视距测量的精度	227

第五节	哈默视距仪	231
第六节	视差法测距	233
第七节	电磁波测距	235
第十一章	平板仪测量	250
第一节	平板仪测量的原理	250
第二节	大平板仪	251
第三节	平板仪的安置	252
第四节	大平板仪的检验和校正	254
第五节	小平板仪	256
第六节	平板仪交会	257
第七节	平板仪导线测量	265
第十二章	地形图	267
第一节	高斯投影的概念	267
第二节	地形图的分幅与编号	270
第三节	求图廓点坐标	275
第四节	地形图上地物的表示	278
第五节	地形图上地貌的表示	281
第十三章	地形图测绘	288
第一节	概述	288
第二节	测图前的准备工作	288
第三节	碎部测量	293
第四节	地形图的拼接、检查与整饰	300
第五节	测图自动化简介	302
第十四章	地形图的应用	305
第一节	在图上求坐标、距离及角度	305
第二节	确定地面点的高程和斜坡的坡度	306
第三节	根据规定坡度在地形图上设计最短路线	307
第四节	绘制某方向的断面图	308
第五节	填挖边界线的确定	309
第六节	图的缩放	309
第七节	面积计算	312
第十五章	地形控制测量的精度	317
第一节	概述	317
第二节	经纬仪导线的精度	319
第三节	交会点的精度	328
第四节	三角锁的精度	343
第五节	线形锁的精度	351
第六节	水准测量的精度	358
第七节	三角高程测量的精度	364

第十六章 地形图的精度	372
第一节 概述.....	372
第二节 测站点平面位置的精度.....	373
第三节 测站点高程的精度.....	383
第四节 碎部点平面位置的精度.....	386
第五节 测绘等高线的精度.....	387
附录一 电子数字经纬仪	392
附录二 计算程序	408
参考文献	415

第一章 测量基本知识

第一节 绪 论

一、测量学的任务

测量学是一门研究地球形状和大小的科学，其任务概括起来有三个方面，一是精确地测定地面点的位置，以及整个地球的形状和大小；二是将地球表面局部范围的形状和大小测绘到图纸上，使之成为与地面保持相似的图形；三是保证国民经济建设和国防建设所需要的测量工作。

测量学和其它科学一样都是随着人们生产的实践需要而产生，同时亦随生产和科学技术的发展而发展，现在这门科学主要可分以下几类：

大地测量学：它是从地球整体考虑，并顾及地球曲率影响来精确地测定地面点的位置，建立国家大地控制网，测量地球重力场的分布与变化，其测量成果用以研究地球的形状和大小，地壳的升降，大陆变迁，地震预报以及作为各种测量的依据。由于现代空间技术的发展，大地测量与空间技术相结合，而产生一门新的卫星大地测量学，借助于卫星技术来解决大地测量问题。

地形测量学：它是以前地球表面小范围区域为研究对象，不考虑地球曲率影响，视地面为平面，将地面上的物体及地表高低起伏形状测绘成地形图，供国民经济建设及国防建设各方面需要之用。

摄影测量学：它是利用摄影象片测定物体的形状、大小和空间位置的科学。过去研究的对象是地球表面，用以测绘成地形图。现在则利用象片的信息量大，内容丰富，显示客观而细致等特点，被广泛地应用到其他领域，而形成一门新的分支，称为“非地形摄影测量”。摄影测量又因为象片获取的方式不同，可以分为“地面摄影测量”、“航空摄影测量”及“航天摄影测量”。前者由于象片是在地面上摄得的，所以会受到地形条件的限制，现已不作为大规模测绘地形图的手段，但可用于某些工程建设方面的测量。航空摄影测量因为是从飞机上摄得的象片，地表面形状能充分客观地获得显示，故被作为目前测绘地形图的主要方法。航天摄影测量是从人造地球卫星或宇宙飞船上进行摄影，故可有效地研究地球、月亮和其他星体。

工程测量学：它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科学。其主要任务有三个方面，一是将地面上地形地物测绘到图纸上；二是将图纸上设计的建筑物测设到实地，亦即在地面上标定出位置；三是对建筑物在施工过程中和竣工后会产生变化而进行的变形观测。

制图学：它是研究利用测量所得的资料，如何投影编绘成地图，以及地图制作的理论、工艺技术和应用等方面的科学。一般包括地图投影、编制、整饰和制印等内容。现代制图学还利用空间遥感技术获取地球、月球、火星等的信息编制各种地图和天体图。

二、测量学在社会主义建设中的作用

在建设和保卫社会主义祖国的事业中，测量工作是一个不可缺少的组成部分，并且起着很重要的作用。

在国民经济建设和科学研究中测量学都得到广泛的应用。无论是城市建设，铁路和公路的勘察和施工，桥梁的架设，机场的修建，港口码头的建设，还有地质勘探，石油、煤炭资源的探测与开采，森林资源的调查，农田水利的兴修，土地规划，水库水坝的修建，输油管线和输电线路的敷设，工矿企业兴建和机器设备的安装，以及卫星的发射、跟踪和收回等等诸方面都离不开应用地形图和测量工作。而且许多建设事业总是以测量工作为先导，所以人们称测量工作是社会主义建设的“尖兵”。

在现代化的国防建设中，测量工作更有其显著重要的作用，它不仅为军事指挥员提供研究地形，拟定作战计划，部署战斗及指挥作战所不可缺少的资料和地形图。同时在各种国防工程的设计、施工中都需要测量工作的保证。尤其是在现代化战争中，从制定和指挥各军种、兵种联合作战到各种火炮，导弹的发射和飞机、军舰的导航，都需要各种类型的地形图和进行各种测量工作。因此测量工作在军队中被看作是“指挥员的眼睛”。

由此可见，测量学在祖国的社会主义经济建设和国防建设事业中有着非常重大的意义。

三、测量学发展概况

测量学起源很早，远在上古时代，我国夏禹治理黄河水患，埃及人整理尼罗河洪水泛滥后的农田边界等，都要一定的测量知识和进行简易的测量工作。

在测量学发展历史中，古希腊人作出了重要的贡献，早在公元前大约6世纪，毕达哥拉斯（Pythagoras）就提出了地球的圆球的学说，到公元前大约220年时埃拉托宅尼（Eratosthenes）在埃及测量了一段子午线弧长，并计算出地球的周长，在公元120年海伦（Heron）发明用规孔视准器进行测量。此后又有人应用天文方法测量纬度，到7世纪我国指南针传到欧洲，从而为方向测定作出了重要的贡献。在16世纪荷兰人墨卡托（Mercator）创造了著名的地图制图法，被世人称为墨卡托投影，这不仅对测量事业就是对航海事业亦起到很重要的作用。在这个世纪末，已经能使用罗盘仪和线尺进行测量。17世纪初望远镜的出现，使测量仪器获得重大的革新，从而又促使测量学向前发展一大步，三角测量就始于这个时期。1683年法国进行了弧度测量，又证实了地球是两极稍扁的扁球体，18世纪产生了水准测量方法。此后测量学的发展，无论在理论、方法及仪器等方面都有不少的创造与发明，如德国著名的数学、天文学和测量学家高斯（Gauss）于1794年创立最小二乘法，后又提出横圆柱投影学说，为测量学发展作出卓越的贡献。在第一次世界大战时，为迅速测制军事用图，又产生了航空摄影测量，从而使测绘地形图工作可以部分地由野外转到室内，不仅可以减轻野外劳动，而且又有利于机械化和自动化。在第二次世界大战后，世界科学技术飞速发展，亦推动了测量学在各个方面都有重大的发展。许多电子化、自动化的测量仪器相继问世，如电磁波测距仪，自动安平水准仪，电子经纬仪的应用，使野外测量工作大大简化，不仅减轻了劳动强度，还提高测量精度。新的测量方法和理论亦研究成功，如卫星大地测量，惯性测量等，这些测量都可以不受天气影响，能进行全天候观测，而且速度快，精度高，还能解决洲际之间，岛屿之间及岛屿与大陆之间的联测问题。摄影测量在现代科学技术发展的推动下，亦发展到一个崭新的阶段，利用卫星遥感技术不仅可以测制地面的地形图，还可以进行星际测量。电子化摄影测量仪器的出现，使测绘工作更趋于自动化和数字化。近景摄影测量的产生又使摄影测量技术更广泛地应用于许多其他学科领域，如研究建筑物的变形，古文物

的复制,工业产品的试制,弹道研究,海浪的研究以及在生物和医学上的应用等。总之,从测量学发展历史进程中可以看到,它是一门有悠久历史的科学,是随着人类文明和科学技术进步不断地充实与发展的,因此也一定会在当前与今后的科学技术飞跃发展时代获得更大的发展。

我国是世界上的文明古国,我国人民对测量科学的发展也有着不少卓越的贡献,公元前4世纪我国就发明了世界上最早的指南工具“司南”,管仲著的《管子》一书中就有地图27幅,并谈到地图的作用。在公元前3世纪秦代,在兴修郑国渠和都江堰等水利工程中,就进行过不少测量工作。到公元前130年西汉时,长沙国地形图,驻军图和城邑图于1973年在长沙马王堆汉墓中发现,这是迄今发现最古老的翔实地图。公元2世纪初东汉时的张衡,制造了浑天仪,为天文测量作出贡献。公元3世纪西晋时裴秀主编了晋十六州大型地图集“禹贡地域图十六篇”,并制定编制小比例尺地图法规“制图六体”,这是世界上最早的制图理论。在公元3至4世纪魏晋时代,刘徽著的“重差术”,是世界上最早的地形测量规范。到公元724年唐代,僧一行主持了我国最早的子午线测量。以后宋代沈括(1031~1095),编制了比例尺相当于1:90万的“天下州县图”,还发明用分级筑堰法测量了汴渠400多公里沿河段的高差,用水平尺和罗盘测量地形,并最早发现磁偏角。在1231~1316年元代郭守敬拟定全国纬度测量计划,实测了27个点,在明代永乐年间(1405~1433)郑和七次出使西洋,首次绘制了航海图,万历年间实测了一些城市的纬度。清康熙时,即公元18世纪初,我国进行了大地测量,并在此基础上展开全国测图,绘制成“皇舆全图”,在1842年魏源编纂了“海国图志”,是我国编的第一部世界地图集。自此以后,在日趋腐败的清封建王朝,北洋军阀和国民党统治下,虽然也作了一些测绘工作,如成立了测量局,测绘了全国三分之一地区的1:5万比例尺的地形图,培养了为数极少的测绘人员,但是对我国测绘科学的发展推动很小。只是在解放后,在党的领导下我国的测绘科学才真正获得新生。

自新中国成立以来,我国测绘科学进入了一个新的发展时期,五十年代初,解放军总参谋部设立测绘局,又于1956年成立国家测绘总局,并相继创办测绘学院和测绘科学研究机构,三十多年来我国测绘事业发展很快,做了许多工作,建成了全国大地控制网,完成了大量不同比例尺地形图测量,培养了大批测绘人才,在测绘理论和方法方面也作了大量的研究工作,尤其在测绘仪器方面,从无到有,现在不仅能制造许多常规的一般精度的测绘仪器,而且能生产新型精度较高的仪器,如电磁波测距仪、自动安平水准仪、精密经纬仪和水准仪,以及航摄机、立体测图仪、解析测图仪等。新的测绘方法如卫星大地测量、惯性测量、航天遥感以及测图、制图自动化数字化的试验、应用。总之,在党的领导下,祖国的测绘科学在短短的四十年中获得了巨大的发展。可以预计,在不远的将来我国测绘科学的发展,会取得更大更新的成就,并赶上或超过世界先进水平。

第二节 地球形状和大小

地球自然表面是高低起伏极不规则的,而且也是极其复杂的,它有高山、丘陵、平原、河流、湖泊和海洋。因此,很难从某个局部的自然表面看出地球整体形状,所以古代人们对地球的形体有各种各样的认识,在我国古代就有“天圆地方”说。但是通过人类的长期实践和认识的不断深化,而逐渐认识到地球是一个球体。而且通过人们大量的测量与调查,发现地球表面上海洋的面积占地球总面积的71%,陆地面积只占29%。地球上最高的珠穆朗玛峰

高出海面为8848.13m，这和地球的半径的概值6371km相比约为1/600，显得起伏是很微小的。因此人们就把地球总的形状看成是被海面所包围的球体，即设想一个无波浪和无潮汐的静止海面，向陆地延伸包围地球，而形成一个封闭曲面来代表地球的形状，这个静止的海水面称为水准面。实际上，海水是有波浪和潮汐的，海面忽高忽低，所以水准面就有无穷多个。其中通过平均海面的水准面称为大地水准面，它所包围的球体称为大地体。平均海面是由人们在海滨设立验潮站，长期测量海面的高低，经过若干年后取一个中数求得。

水准面有一个特性，就是处处与铅垂线相垂直。由物理学中知道，铅垂线方向与地球的旋转及地球内部的质量有关。地球是不停旋转的，因此地球上每一个点都产生一个离心力 P ，如图1-1。此外，地球自身又具有非常巨大的质量，对地球上每一个点又存在吸引力 F 。因此，这两个力的合力就是某一地面点的重力 G 。重力的作用线 OG 又称铅垂线。

但是由于地球内部物质密度极不均匀，从而使地面各点所受的引力大小不等，因此导致地球上各点的铅垂线方向产生不规则的变化，这样就使得大地水准面不是一个规则的曲面，而是有微弱起伏变化缓慢的不规则曲面。若将地面各点投影到这样复杂的曲面上，将很难进行测量计算工作。为使测量的计算工作能够进行，可以采用一个能以数学公式表达的曲面来代替，而这个数学的规则曲面又很接近大地水准面。通过大量的测量实践，人们逐渐地认识

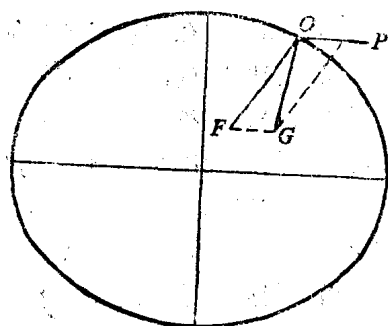


图 1-1

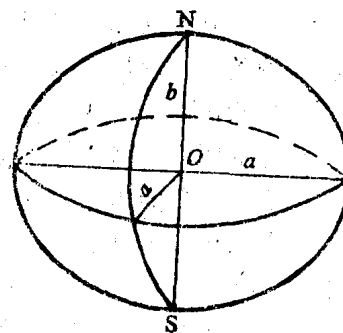


图 1-2

了大地水准面的整个形状是南北两极稍扁的近似椭球体。现在通过卫星大地测量进而发现它是北极稍凸，南极稍凹类似于梨形，其横切面接近一个圆，纵切面接近一个椭圆，很象是一椭圆绕其短半径旋转成的旋转椭球体，如图1-2所示。因此用这个旋转椭球体近似地代替大地水准面，并以此作为测量计算的基准面。

地球形状确定后，还须解决旋转椭球体对大地水准面的定位问题，也就是旋转椭球体相对于大地水准面如何放置的问题。当两者相对位置关系确定好之后，就可以将测量成果化算到旋转椭球面上。旋转椭球体定位就是在国家范围内，选一个合适的地点，使旋转椭球面与大地水准面相切，如图1-3，也即在这个切点处旋转椭球面的法线与大地水准面的铅垂线一致，而且使旋转椭球体的短半径与地球的自转轴平行。这时，这个旋转椭球体称为参考椭球体，而表示参考椭球体的形状和大小的基本元素为长半径 a ，短半径 b （见图1-2）和扁率 α

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

参考椭球体的数学表达式可写为

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

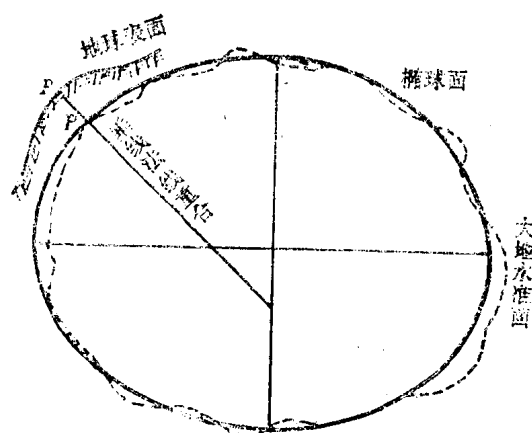


图 1-3

关于参考椭球的元素值自古以来许多测量工作者进行多次测量，在表 1-1 中列出的是 1800 年以来几次重要的测量结果。

表 1-1

名 称	长半径 a (m)	短半径 b (m)	扁率 α	年 代
德兰布尔	6 376 653	6 356 564	1 : 334	1800 法国
埃弗莱斯特	6 377 276	6 356 075	1 : 300.8	1830 英国
白塞尔	6 377 397	6 356 079	1 : 299.2	1841 德国
克拉克	6 378 249	6 356 515	1 : 297.6	1880 英国
海福特	6 378 388	6 356 912	1 : 297.0	1909 美国
克拉索夫斯基	6 378 246	6 356 863	1 : 298.3	1940 苏联
拉普	6 378 167	6 356 772	1 : 298.25	1967 美国
1972 年世界大地坐标系	6 378 135	6 356 750.5	1 : 298.26	1972 美国
1980 年大地坐标系	6 378 137	6 356 752.3	1 : 298.257	1979 年国际大地测量与地球物理联合会推荐

我国在解放前是采用 1909 年海福特的元素，解放后采用的是 1940 年苏联克拉索夫斯基元素。目前我国正在根据人造卫星测量和大地测量成果来计算适合我国实际的参考椭球体元素。从实际测量结果可以看出，参考椭球体的长短半径相差很小，因此在普通测量中可以近似视为圆球，其平均半径为

$$R = \frac{1}{3} (a + a + b) = 6\,371\,118\text{m}$$

依公里计其近似值为 6371km。

第三节 地面点位置的确定

研究和确定地球形状和大小都需要测定地面点的位置，而地面点位置是以三维空间坐标

来表示。由于地面是地球表面，故它不是平面而应是球面，因而应采用能表示球面上点位置的坐标，测量上通常采用地理坐标和高程这类全球统一的坐标系统。若要在平面上表示地面点的位置，则用平面直角坐标和高程这样的坐标系统。那么这些坐标系统是怎样建立和确定的呢？现分别介绍如下：

一、地理坐标

确定地面点在基准面上投影位置的坐标称为地理坐标。地理坐标包括经度和纬度，由于所选定的基准线、基准面及测量方法不同，经纬度又可分为天文经纬度和大地经纬度两种。

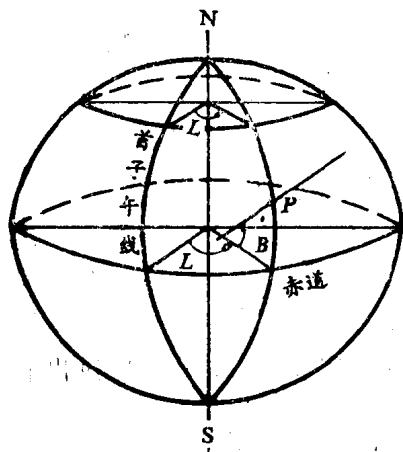


图 1-4

赤道平面与首子午面就构成了确定地面点在椭球面上投影位置的两个基本平面。在测量工作中，点在椭球面上的位置用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。所谓某点的大地经度是通过该点（如图1-4中的 P 点）的子午面与首子午面间的二面角，经度是从首子午面起算，向东为东经，向西为西经，各为 0° 至 180° 。 P 点的大地纬度就是通过 P 点作椭球面的法线，其与赤道平面的交角 B 称为该点的大地纬度。纬度由赤道算起，自赤道向北称北纬，自赤道向南为南纬，各为 0° 至 90° 。由此可见，大地经度与大地纬度是以参考椭球面和法线为基准面和基准线的。大地经度和大地纬度系用大地测量方法，根据一定的起算数据，在参考椭球面上推算而得。

2. 天文经纬度

天文经度 λ 和天文纬度 φ 是用天文测量的方法测定的。测定某点的天文经纬度，通常是将仪器安置在该点上，通过授时和观测天体等天文测量的方法测定的。这时仪器的竖轴必然与铅垂线相重合，即仪器的竖轴与该处的大地水准面相垂直。因此，天文经纬度是以大地水准面和铅垂线为基准面和基准线。具体关系如图1-5所示。

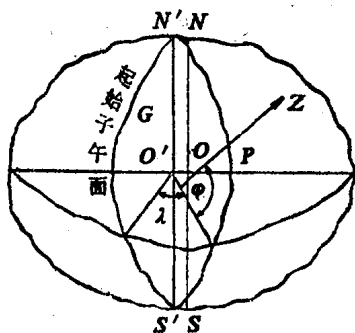


图 1-5

PZ 为通过 P 点的铅垂线，由于地球内部质量分布不均匀，引起地面上各点的铅垂线方向产生不规则的变化，故地面上任一点的铅垂线一般不可能和地球旋转轴 NS 相交。包含大地体表面上某点的铅垂线，且平行于地球旋转轴的平面称为该点的天文子午面。过地球质心 O 并与地球旋转轴 NS 垂直的平面称为地球赤道面，过格林尼治天文台的天文子午面称为首子午面。 P 点的天文子午面 $N'PS'$ 与首子午面所构成的二面角 λ ，叫做 P 点的天文经度。同样有东经西经之分，且各为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。 P 点的铅垂线与地球赤道面的夹角

φ , 叫做 P 点的天文纬度, 同样也有南纬和北纬之分, 且各为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

测定了天文经纬度的点叫做天文点, 它是天文大地网中的基本点, 将天文经纬度改化成大地经纬度后, 可以作为计算中的起算或检核数据。

二、平面直角坐标

地理坐标在大地测量和制图中经常用到, 而在地形测量中经常用的是以平面直角坐标来表示点的位置。

测量工作中所用的平面直角坐标与解析几何中所介绍的基本相同, 只是坐标轴互易。如图1-6所示。 x 轴为纵坐标轴, 一般用它表示南北方向。 y 轴为横坐标轴, 表示东西方向。纵横坐标轴的交点 o 称为坐标原点。坐标轴将平面分为四个象限, 象限的编号按顺时针排列, 这是因为在测量工作中规定所有直线的方向都是以纵坐标轴北端顺时针方向量度的, 而三角学中三角函数的角度则是从横轴按逆时针方向量取的。这样, 把 x 轴与 y 轴纵横互换后, 全部三角公式都可在测量计算中应用。

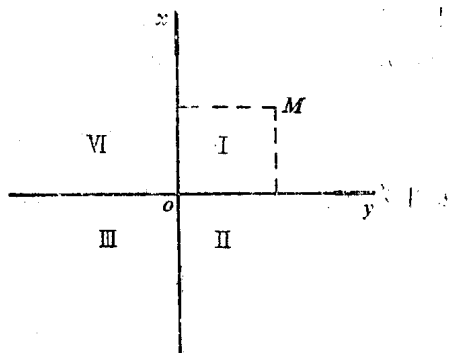


图 1-6

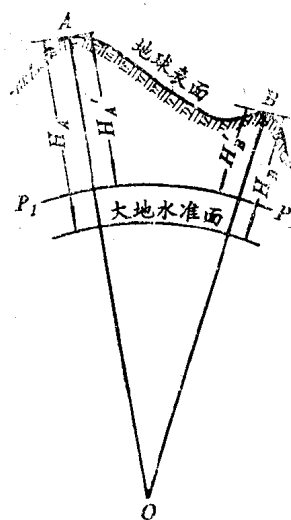


图 1-7

三、高程

为了确定地面点的空间位置, 除了点的坐标外, 还需要测定点的高程。

高程是以大地水准面为起算面, 地面上一点至大地水准面的垂直距离称为该点的绝对高程或海拔。

我国的绝对高程是以青岛验潮站1950年~1956年验潮结果求得黄海平均海水面, 作为全国高程的基准面, 高程为零, 故称“1956年黄海高程系”。

为了稳固的表示高程起算面的位置, 还需建立与大地水准面相联系的水准点, 作为全国高程的统一起算点, 这个水准点叫做“水准原点”。我国的水准原点设在青岛市内的一个山洞里, 用精密水准测量与验潮站确定的黄海平均海水面的水位标志线进行联测, 从而求出该原点高出黄海平均海水面72.289m。

有了高程起算面就可以确定地面点的高程, 如图1-7所示。地面点 A , B 的高程就是沿铅垂线从大地水准面量到 A , B 的距离, 分别以 H_A 和 H_B 表示。地面上两点高程之差称为高差, 高差是相对的, 高差前面要有正, 负号。如果测量方向是由 A 到 B , 若 $h_{AB} = H_B - H_A$ 为负, 则表示 B 比 A 低。若测量方向是从 B 到 A , 而 h_{BA} 为正, 则表示 A 比 B 高。

有些局部地区,无法与国家水准网联接,我们可以选定测区内某个固定点并假设其高程,该测区内各点的高程均以这个固定点为准,即所测得的各点高程都是以同一任意水准面为起算的假定高程,也称相对高程。如图1-7中, P_1P_1 为任一假定高程的水准面,从一点到假定高程的水准面的垂直距离,称为该点的假定高程。地面点 A, B 的假定高程为 H'_A, H'_B 。将来如果需要,只需与国家高程控制点联测,再换算为绝对高程。

第四节 用水平面代替水准面的限度

在实际测量工作中,在一定的测量精度要求和测区面积不大的情况下,是可以采用水平面来代替水准面的,就是把地面点投影到水平面上来决定其位置。

用水平面代替水准面时,通常有距离误差、角度误差和高程误差三种。下面分别讨论这些误差的性质、大小和限度。

一、距离误差

如图1-8所示,设球心为 O , 半径为 R 的水准面为 P_1AP_1 。 AB_1 为水准面上的一段圆弧, 设长度为 D , 所对之圆心角为 α , 自 A 点作水准面的切平面, 该切平面即为水平面。水平面与 OB_1 延长线的交点为 B , 设 AB 长度为 t 。如果将切于 A 点的水平面代替水准面, 即以相应的切线 AB 代替弧线 AB_1 , 则在距离上将产生误差 ΔD , 由图知:

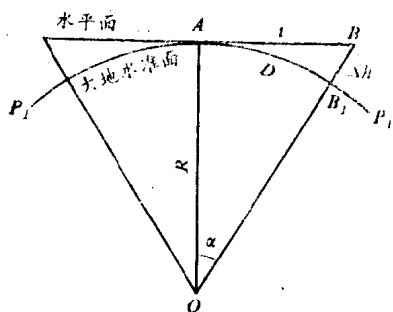


图 1-8

$$\Delta D = t - D = R \cdot \tan \alpha - R\alpha = R(\tan \alpha - \alpha)$$

将 $\tan \alpha$ 展开为级数, 因为 α 值一般很小, 故取其前二项得

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

将其代入上式, 得

$$\Delta D = \frac{R\alpha^3}{3}$$

再以 $\alpha = \frac{D}{R}$ 代入, 得

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

上式是用水平面代替水准面时所引起的距离误差计算公式, R 为地球半径, 通常取 $R = 6371\text{km}$, 以不同的 D 值代入 (1-2) 式, 算得表 1-2

表 1-2

距离 D (km)	10	20	50
距离误差 ΔD (cm)	1	65	102
相对误差 $\Delta D/D$	1/1 000 000	1/304 400	1/50 000

由上述计算可知, 当水平距离为 10km 时, 以水平面代替水准面所产生的距离误差为 1cm, 相对误差约为 1/1 000 000。当地面距离为 50km 时, 相对误差为 1/50 000。而实际测量

距离时, 现在最精密距离丈量的相对误差约为 $1/1\,000\,000$, 而普通钢尺量距的相对误差为 $1/1\,000 \sim 1/10\,000$ 。因此, 在地面上半径为 10km 的范围内, 可以不考虑地球曲率的影响, 一般可将水平面代替水准面, 即以实际沿圆弧丈量的距离作为水平距离, 其误差可以忽略不计。

二、角度误差

由球面三角学知道, 同一个空间多边形在球面上投影的各内角之和比在平面上投影的内角之和要大。例如球面上三角形 ABC , 将 ABC 沿铅垂线方向投影在测区的水平面上的图形为 $A'B'C'$ 。我们知道平面三角形 $A'B'C'$ 内角和为 180° , 而球面三角形 ABC 内角和大于 180° , 而为 $180^\circ + \varepsilon$ 。 ε 称为球面角超, 球面角超实际上就是用水平面代替水准面的角度误差, 其计算公式为:

$$\varepsilon'' = \frac{P}{R^2} \rho'' \quad (1-3)$$

式中: ρ'' 为一弧度的秒值 ($\rho = 57^\circ 17' 45'' = 3438' = 206\,265''$); P 为球面三角形 ABC 的面积; R 为地球半径。

一般认为每一个角度产生的误差大小是相同的, 故每个角的角度误差为:

$$\Delta\beta = \frac{\varepsilon}{3} = \frac{P}{3R^2} \rho'' \quad (1-4)$$

现以不同的 P 值代入 (1-4) 式, 可以算得相应的 $\Delta\beta$, 其具体影响见表 1-3

面积 P (km^2)	10	100	2 500	10 000
角度误差 $\Delta\beta''$	0.02	0.17	4.25	16.91

由表 1-3 中可以看出, 当面积为 100km^2 时, 用水平面代替水准面所引起的角度误差为 $0.17''$, 而实际测量角度时, 一般地形测量的测角仪器的精度为 $6''$ 。这样, 测量仪器的误差远远大于因平面代替球面所产生的角度误差。因此, 在一般的地形测量中, 对于面积在 100km^2 以内, 一般不考虑这种角度误差的影响, 只有在精密的大地测量中才要考虑。

三、高程误差

我们知道, 高程的起算是大地水准面。但由于用水平面代替水准面去进行高程测量时, 所得的高程, 必然含有因地球曲率而产生的高程误差的影响。如图 1-8 所示, A 和 B_1 在同一水准面上的两点, 其高程相等, 当以水平面 AB 代替水准面 AB_1 , 由 B_1 点投影到水平面为 B 点, B_1 与 B 之间的垂直距离 BB_1 就是水平面代替水准面所产生的高程误差, 以 Δh 表示 BB_1 , 由图得知:

$$\begin{aligned} (R + \Delta h)^2 &= R^2 + t^2 \\ R^2 + 2R \cdot \Delta h + \Delta h^2 &= R^2 + t^2 \\ \Delta h &= \frac{t^2}{2R + \Delta h} \end{aligned} \quad (1-5)$$

前已证明, 两点间投影的水平距离和水准面上的弧长相差很小, 可用 D 代替 t , 同时,