
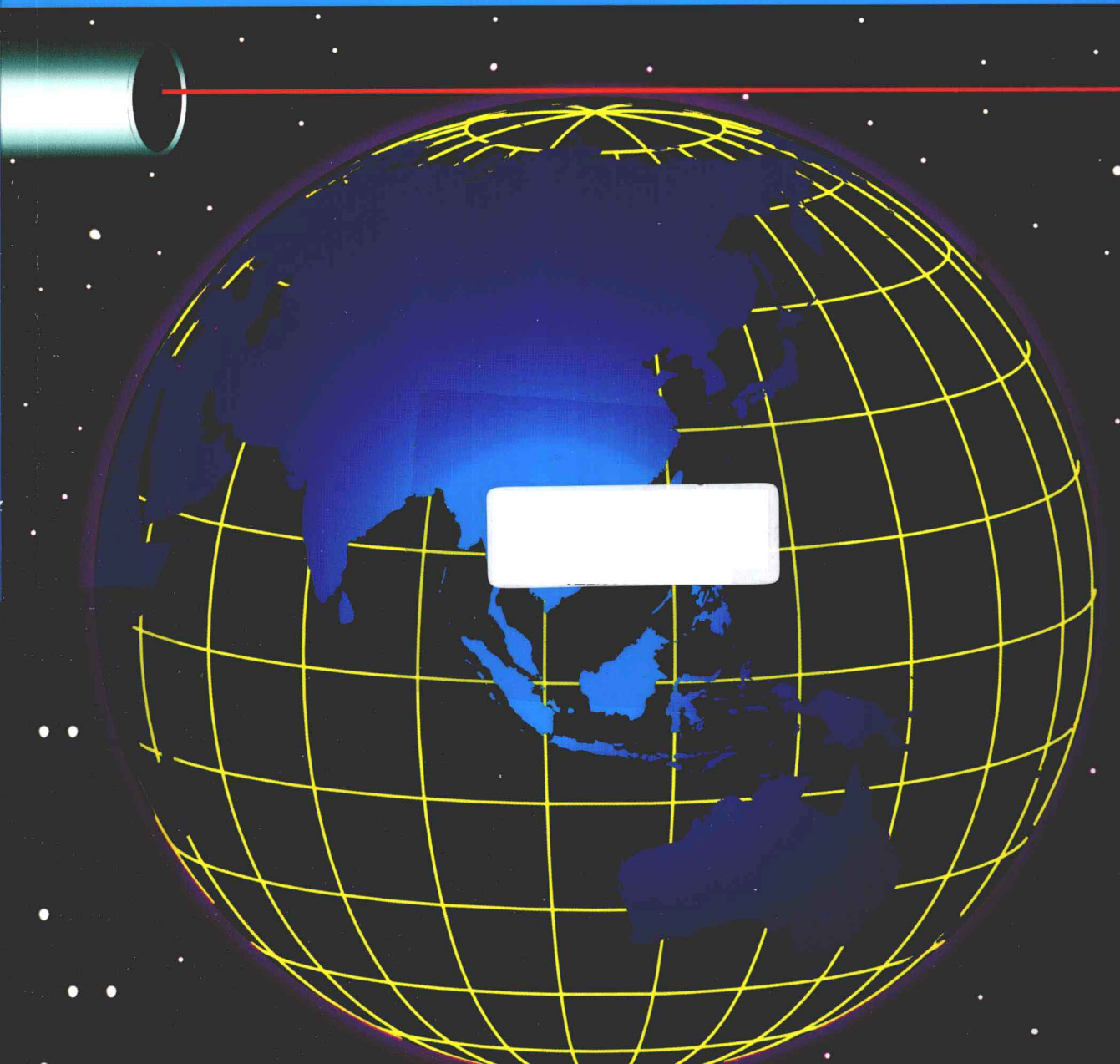


Control Surveying

控制测量学

● 李玉宝 沈学标 吴向阳 编著

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS



控制测量学

李玉宝 沈学标 吴向阳 编著



 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内容提要

本书所叙述和讨论的内容是针对测绘类高级人才培养以及相关工程技术人员必须掌握的基础性控制测量学的理论和方法。内容包括:绪论、地球椭球面上的测量计算、高斯投影及常用坐标系、精密角度测量、电磁波测距、平面控制测量、高程控制测量、GPS 定位技术等。是具有一定特色的高等教育教材,也可作为相关科技工作者的业务参考书。

图书在版编目(CIP)数据

控制测量学/李玉宝,沈学标,吴向阳编著. —南京:东南大学出版社,2013.1

ISBN 978-7-5641-4078-6

I. ①控… II. ①李…②沈…③吴… III. ①控制测量 IV. ①P221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 005915 号

控制测量学

编 著 李玉宝 沈学标 吴向阳
出版发行 东南大学出版社
地 址 南京市四牌楼 2 号 (邮编 210096)
出 版 人 江建中
责任编辑 叶 娟
网 址 <http://www.seupress.com>
电子邮箱 press@seupress.com
经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京玉河印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 21
字 数 510 千
版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-4078-6
定 价 45.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

前 言

测量是一门悠久的学科文化,在考古和历史档案中无不烙下深刻印记,它像灯塔引导和伴随着人类的文明由低级向高级发展,直到科学技术飞跃发展的今天,测量的重要地位牢固不可撼动。测量是一个大的综合概念,细分后又会衍生出许多下一级的学科。

控制测量学是其中之一的基础性学科,相对于某一定义的坐标系统或基准,大地控制就是体现坐标系统、提供配套空间数据坐标框架的工作,而为局部区域工程服务的控制测量,则是在较高级别的控制点基础上进一步地加密点位,为后续的生产 and 科研服务。

控制测量在相关的科学研究领域中,在国民经济建设和社会发展中,在防灾、减灾、救灾、环境监测及保护中,在基础地理信息建设中,在发展空间技术及国防建设中,有着重要的地位和作用,展现了广阔的发展远景和服务领域。“控制测量学”以科技含量高、涉及范围广等为特点,进入了新的发展时期。控制测量是基础性测量工作,是测绘工程专业主干课程之一,也是其他测绘类专业教学的重要课程。随着科学技术的不断发展和进步,控制测量学的理论、仪器、应用等也经历了一个不断提高和完善的过程,同时也促进了控制测量的教学方法和内容不断充实和创新。

教材建设是学科建设的重要任务之一,是提高教学质量、培养合格的高级专业人才的重要环节。为了进一步提高教学质量,加强教材建设,根据现行本科测绘工程专业“控制测量学”教学计划和教学大纲,本次作为学校的规划教材而编写。

本着注重基础、考虑传统、强调当前、着眼未来的原则,在认真研究同类教材以及国内外有关信息的基础上,结合学生的培养目标以及长期的教学实践,本书对过于陈旧的知识点进行了删除和精简,例如,为使学生对国家控制网的建立或历史性的知识结构有一个较完整的认识,保持知识的系统性,本书对此仅做了综合介绍。同时也相应地引进了控制测量的新理论、新技术、新仪器和新方法,使得本教材更加具有现势性并与时俱进。整个教材内容的采用和编排,都紧密结合现行作业规范,理论联系实际,由浅入深,充分考虑到了知识的系统性、实用性、先进性、科学性、可读性以及测绘类高等教育知识体系结构的适宜性,符合学生的认知规律,同时也贯穿了“求是创新”的思想观念,有利于学生综合素质的培养和发展;对于土木、交通、勘察、规划、城建、土管、矿山等工程建设有关的控制测量工作,针对性更强,并具有鲜明的特色。本书可作为测绘工程专业或相关专业的教科书,也可作为工程技术人员的业务参考书。

考虑到该课程一般是在学生整个学习过程的中后期开设,前面已经学习过“测绘学概论”、“测量学基础”等专业基础课程,对专业已经有了较深的认识。所以我们将“地球椭圆面上的测量计算”及“高斯投影及常用坐标系”两章编排在书的前面部分,为后续授课内容中的有关概算、验算,技术设计等内容做了很好的铺垫,使得后面的授课内容顺理成章展开,形成系统的知识链条。

全书共分8章。第1章“绪论”,介绍了控制测量的定义、任务、内容、测量的发展等;第2章“地球椭圆面上的测量计算”;第3章“高斯投影及常用坐标系”;第4章“精密角度测量”;第5章“电磁波测距”;第6章“平面控制测量”;第7章“高程控制测量”;第8章“GPS卫星定

位技术基础”。为了加强学生对所学知识的理解、巩固及学习效果,在每章后面,都有针对重点内容的思考题和习题,并附有习题参考答案。

本书第1、5、6章由李玉宝副教授编著;第4、7章由沈学标副教授编著;第2、3、8章由吴向阳副教授编著。全书由李玉宝负责统稿。

本书由博士生导师胡伍生教授主审,他对本书提出了许多指导性意见和建议;感谢东南大学交通学院领导程建川教授对本书编著和出版给予的关心和指导;感谢东南大学教务处对本书出版给予的支持;感谢高成发教授、戚浩平副教授对本书编著给予的帮助、关心和指导;感谢沈井开、沈春、姚兵兵、许立苑工程师所提供的典型资料和建议;感谢罗钰峰、严钰、高旺同学对本书所做的计算检核整理等工作。编者在编写本书的过程中,参考了有关院校、单位和个人的某些文献资料,在参考文献中基本按照引用参考的顺序列出,但在网络上易查找和收集的、调研收集的参考资料等就没有列出。谨在此一并表示衷心的感谢!

由于业务水平所限,会有不足之处,希望能收获读者提出的宝贵意见和建议。

编 者

2012年10月于南京东南大学进香河

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制测量的任务和基本内容	1
1.2 控制测量的特点	2
1.3 控制测量的基本方法	2
1.4 控制测量的发展与展望	5
思考题与习题	7
第 2 章 地球椭球面上的测量计算	8
2.1 椭球面上的常用坐标系	8
2.2 参考椭球面的几何特征	16
2.3 地面观测值归算至椭球面	22
2.4 大地主题解算	31
2.5 椭球面上的坐标系相互关系与转换	39
思考题与习题	45
第 3 章 高斯投影及常用坐标系	46
3.1 高斯投影与国家平面直角坐标系	46
3.2 高斯投影坐标计算	55
3.3 椭球面上的方向值和长度化算至高斯平面	61
3.4 我国的测量坐标系统及其换算	68
3.5 工程控制网适用的坐标系统	78
思考题与习题	82
第 4 章 精密角度测量	84
4.1 精密经纬仪	84
4.2 角度观测误差分析	94
4.3 精密光学经纬仪的检验	107
4.4 水平角观测	112
4.5 垂直角观测	118
思考题与习题	124
第 5 章 电磁波测距	126
5.1 光电测距基本原理	126
5.2 固频相位式测距仪的基本结构及其作用	131
5.3 GTS-301D 全站仪	137
5.4 多波测距简介	141
5.5 固频相位法光电测距误差分析	143
5.6 固频相位式光电测距仪的检验	148
5.7 测距作业的基本要求和测距成果的计算	160

思考题与习题	165
第 6 章 平面控制测量	167
6.1 国家平面控制网的布设原则和方案	167
6.2 工程平面控制网的布设原则和方案	170
6.3 设计工程平面控制网的精度估算	171
6.4 工程平面控制网优化设计	176
6.5 导线测量技术设计	182
6.6 导线测量的精度估算和分析	194
6.7 导线测量的外业工作	204
6.8 导线测量概算和外业验算	211
思考题与习题	221
第 7 章 高程控制测量	223
7.1 国家水准网的布设	223
7.2 精密水准仪与精密水准标尺	227
7.3 精密水准仪和精密水准标尺的检验	240
7.4 精密水准测量的误差分析	251
7.5 精密水准测量的实施	259
7.6 高程系统和水准原点	270
7.7 水准测量概算	277
7.8 光电测距高程导线测量	282
思考题与习题	287
第 8 章 GPS 卫星定位技术基础	289
8.1 GPS 系统和卫星信号	289
8.2 GPS 卫星定位的基本原理	294
8.3 GPS 定位误差分析	301
8.4 卫星定位网的布测	307
8.5 卫星定位数据处理过程	317
思考题与习题	323
习题参考答案	324
参考文献	327

第1章 绪论

1.1 控制测量的任务和基本内容

控制测量学是研究精确测定地面点空间位置的学科。它是介于大地测量学、卫星大地测量学、测量平差等学科之间的交叉学科,在测绘科学技术中占有重要的地位。控制测量是直接为国家经济建设服务的基础性测量工作。

1.1.1 控制测量的任务

在工程建设区域内,以必要的精度测定一系列控制点的水平位置和高程,建立起工程控制网,作为地形测量和工程测量的依据,这项测量工作称为控制测量。

根据不同的目的和用途,工程控制网可分为测图控制网、施工控制网和变形观测控制网。对于后两种用于专门用途的工程控制网,有时也称为专用控制网。

工程控制网分为平面控制网和高程控制网两部分,前者是测定控制点的平面直角坐标,后者则是测定控制点的高程。

控制测量的服务对象主要是地形测量、各种工程建设、建立地理信息系统等。

控制测量在工程建设3个阶段中的具体任务是:在工程建设勘测设计阶段建立测图控制网,作为各种大比例尺测图的依据;在工程建设施工阶段建立施工专用控制网,作为施工放样测量的依据;在工程建设竣工后的运营阶段建立变形观测专用控制网,作为工程建筑物变形观测的依据。

控制测量在建立地理信息系统方面的具体任务是:为数据采集、数据处理、系统的运行管理和变更提供统一坐标系中的基础控制数据,并保证系统内各要素必要的精度。

控制测量对测绘地形图的控制作用如下:当在测区内建立了统一的平面控制网、精密地测定网中各控制点的高斯平面直角坐标后,就可以在实地上准确地确定各个图幅的具体位置。因而当分幅独立测图时,各相邻图幅之间就不会出现漏洞、重叠和扭曲。在控制测量的基础上再进行图根控制测量后,就可根据需要在不同的时间和地点安排测图工作。同时,因测定的控制点能保证一定的点位精度,故各幅地形图平面位置的测量误差,将受到控制点的限制,不会积累得很大,从而保证各幅图的平面位置具有相同的测图精度。因此,各相邻地形图的平面位置,可以在测图精度之内互相拼接和利用。

同样的道理,如果在测区内建立了统一的高程控制网,精密地测定网中各控制点的高程,则分幅独立测图时,各相邻图幅的同名等高线,可以在测图精度之内互相接合。

1.1.2 控制测量的基本内容

控制测量作为一项工程同样也分为3个阶段:即在控制网的设计阶段,其主要的内容是可行性论证,确定网的等级、性质、网形,估计网的技术和经济指标,编写技术设计等;在施测阶段,主要是根据技术设计进行选点、造标、埋石、观测、数据处理等;在使用阶段,主要是对控制点的成果进行有效的管理,以便能够迅速、准确地为各项工程建设提供必需的资料,另

外还包括对控制网点的保管、维护和补测等。

1.2 控制测量的特点

控制测量与大地测量关系极为密切,一般来讲控制测量是依附于大地测量的,从布网原理、技术要求、观测方法,到数据处理的基本思想都大体一致。因此,对于读者在学习本课程时,有必要先了解一些有关大地测量方面的知识。

1.2.1 大地测量及其任务

建立国家或地区大地控制网,所进行的精密控制测量工作,称为大地测量。它所测定的控制点,称为大地控制点,简称大地点。

国家大地控制网由国家水平控制网和国家高程控制网两部分组成,前者是测定网中各大地点的大地坐标(大地经度 L 和大地纬度 B)或高斯平面直角坐标(纵坐标 x 和横坐标 y),后者是测定高程控制网中各高程控制点相应于一定高程系统的高程。

大地测量的任务是:为测绘基本地形图和大型工程测量提供基本控制;为空间科学技术和军事用途提供有关数据;为研究地球形状、大小的确定以及其他有关地球物理科学方面问题的研究提供重要资料。

1.2.2 控制测量的特点

大地测量具有全局性、基础性的特点;而控制测量相对于大地测量来说,则具有局部性和对于某项(些)工程的服务针对性较强的特点。

由于控制测量服务对象的多样化、测量仪器科技含量的加大、布网技术的提高以及数据处理学术气氛不断活跃等因素,使得所布测的工程控制网的形式和数据处理的方法也不拘于一种形式,而比较灵活。

除较小面积(一般小于 25 km^2)的控制测量外,控制测量和大地测量,在建立水平控制网中,都必须考虑地球曲率的影响。为此,要选择一个合适的参考椭球面,作为处理地面观测成果和进行测量计算的基准面。也就是说,在地面上观测得到的水平方向观测值和边长观测值,须归化到这个基准面上,然后在该面上依据相应的起始数据计算出大地点或控制点的大地坐标。如果需要确定这些点相应的高斯平面直角坐标,则可进行两种坐标之间的转换计算,或将参考椭球面上的观测成果投影归算到高斯平面上,然后再在该面上把它们计算出来。这是控制测量和大地测量又一相同之处。

控制测量建立工程控制网的原理和方法,与大地测量建立国家大地控制网的原理和方法基本相同,并且工程控制网有时需与国家高等大地点相联系。因此在后续课程中的学习中了解建立国家大地控制网的基本方法,也是控制测量学要研究的重要内容之一。

1.3 控制测量的基本方法

1.3.1 水平控制网的布设方法

1.3.1.1 三角测量法

三角测量的方法和基本原理是:在地面上按一定的要求选定一系列的点,每一个点都设置测量标志,并以三角形的图形把它们连接成地面上的三角网。精确地观测所有三角形的

内角以及至少一条三角边的长度,用一定的数学模型,把这些地面观测成果最终归算到高斯投影平面上,使地面上的三角网转化为高斯平面上的三角网,见图 1-1。

依据归算后的平面边长 D_{AB} 为起始边,应用平面三角学的正弦定理依次解算各个三角形,算出各平面边长 D_{ij} 。以已知的 AB 边平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角,用归算后的水平角依次算出各边的平面坐标方位角 T_{ij} 。利用三角学公式算出各相邻点间的坐标增量 ΔX_{ij} 和 ΔY_{ij} :

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_{ij} &= D_{ij} \cdot \cos T_{ij} \\ \Delta Y_{ij} &= D_{ij} \cdot \sin T_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

最后,以已知起始点 A 的平面直角坐标 (X_A, Y_A) 和各坐标增量 ΔX_{ij} 、 ΔY_{ij} , 逐个推算出各点的平面直角坐标。

三角测量的优点是:布设的图形毗连呈网形,控制面积大;测角精度高,几何条件数多;相邻点的相对点位误差较小。缺点是:除起始边和起始方位角外,其余各边及其方位角都是用水平角推算出来的,由于测角误差的传播,各边长及其方位角的精度不均匀,并且距起始边和起始方位角越远,它们的精度就越低。另外,三角测量在布测过程中难度较大,效率也较低。

因此,在过去一般用三角测量方法建立国家水平控制网,现在已很少使用。

1.3.1.2 导线测量法

导线测量的方法和基本原理是:在地面上按一定的要求选定一系列的点,每一个点都设置测量标志,将相邻点连接后构成地面上的导线。精密地测量各导线边的长度和各导线点的转折角,再将这地面观测成果最终归算到高斯平面上,见图 1-2。

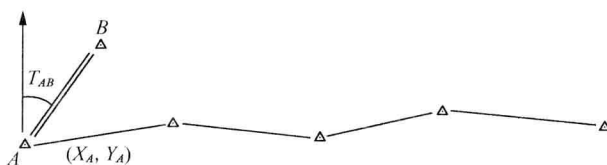


图 1-2 导线测量基本原理图

以已知的 AB 边平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角,用归算后的折角依次推算出各导线边的坐标方位角。根据起始点 A 的已知平面直角坐标 (X_A, Y_A) 和平面导线上各导线边的长度及坐标方位角,逐个推算出各导线点的平面直角坐标。

导线测量的优点是:布设的图形呈单折线,除节点外,每个点只需前后两个相邻点通视,故布设比较灵活,容易越过地形和地物障碍;各导线边长均直接测定,精度高而均匀,导线的纵向误差小。缺点是:控制面积狭窄,几何条件数少,导线的横向误差大。

因此,在隐蔽和特殊困难的地区,一般宜用导线测量方法建立水平控制网。

另外,还有三边测量法和边角同测法,它们虽然有时用来建立工程控制网,但不宜用于建立国家水平控制网。

以上几种方法也称为常规方法或经典方法。

1.3.1.3 天文定位测量方法

天文定位测量方法是在地面测站上,用天文测量仪器观测天体的瞬时位置,并记录相应的时刻,然后依一定的计算公式,算出测站点的天文经度 λ 、天文纬度 φ 以及测站点至某一照准点方向的天文方位角 α 。测定了天文经、纬度的地面点,称为天文点;测定了天文经、纬度和至某一照准点方向天文方位角的大地点,称为拉普拉斯点。

天文测量的优点是:各点均独立测定,组织工作简单,受地形条件影响小。缺点是:测定点的精度不高。如目前野外测量天文经、纬度的中误差为 $\pm 0.2'' \sim \pm 0.4''$,表现在地面上的点位误差约为 $\pm 6 \sim \pm 12 \text{ m}$;另外一般在夜间测量,工作难度大、不方便。

因此,这种方法不能大规模地用来建立国家水平控制网。但是,它在建立国家水平控制网中有着一定的重要作用。具体地说,确定大地原点(又称大地基准点)的起始数据、控制水平角观测误差的积累、对地球的形状和大小等方面的研究等,都必须有天文定位测量以及与重力测量相配合的工作。

1.3.1.4 GPS定位测量

现代大地测量方法有卫星大地测量、甚长基线干涉测量和惯性测量等,其中用卫星定位测量建立控制网、以测定地面测站点位置的方法应用得最为广泛。

现在卫星定位测量普遍采用GPS全球定位系统,用该法建立的控制网,也称为GPS控制网。其中载波相位测量方法的静态相对定位精度可达 $(5+1\text{ppm} \times D_{\text{km}})\text{mm}$ 或更高。在建立或加强国家水平控制网中,它可取代常规的大地测量方法。由于GPS定位具有方便、经济、快速、准确以及科技含量高的优势,目前已得到了广泛的普及。同时它也标志着大地测量或控制测量已进入了一个全新的时代。

1.3.2 建立国家高程控制网的方法

1.3.2.1 几何水准测量方法

几何水准测量的方法和基本原理是:在地面上按一定的要求,选定一系列的水准点并设置标志,然后把它们连接成水准路线,进而构成水准网。在水准路线上连续设站,利用水准仪提供的水平视线,在垂直立于地面点的水准标尺上读取前、后两转点的分划数,根据路线的情况连续设站测量,以求得相邻水准点间的高差。根据水准网中一个起算点的已知高程,依次推算出各水准点的高程。

几何水准测量的优点是:测定的高程精度高,例如用精密水准测量,可将水准原点的高程传递到 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ km}$ 远的水准点上,它的高程中误差将不超过 $\pm 1 \text{ m}$;国家高程网采用的高程基准面是很接近于大地水准面的似大地水准面,测得的高程基本上具有物理意义,能很好地为生产服务。因此,几何水准测量是建立国家高程控制网和工程高程控制网的主要方法。

1.3.2.2 三角高程测量方法

三角高程测量的方法和基本原理是:在水平控制网上,用测量仪器测量相邻两点间的垂直角,根据它和两点间的已知水平距离,利用三角学公式算出相邻两点间的高差。以网中一个已知高程点作为起算点,逐个推算出各控制点的高程。

三角高程测量的优点是:作业简单,布设灵活,不受地形条件的限制。缺点是:因大气垂直折光影响,使得垂直角观测误差较大,测定的高差和高程精度较低;测得的高程以参考椭球面为基准面,没有明显的物理意义。因此三角高程测量是建立国家高程控制网和工程高

程控制网的辅助方法。

1.3.2.3 光电测距高程导线测量方法

光电测距高程导线测量的基本原理与三角高程测量相类似。它是在布设的高程导线上,用测量仪器测量相邻两点间的垂直角,用电磁波测距仪测量相邻两点间的倾斜距离,根据三角学公式算出两点间的高差,加入一些必要的改正后,进而推算出各高程导线点的高程。光电测距高程导线测量的精度,可以代替国家一定等级的水准测量。

1.3.2.4 GPS 高程测量方法

GPS 相对定位可以高精度地测定两点间的大地高高差。GPS 向量网经三维无约束平差后可求得各点的大地高平差值。如网中联测了一定数量的已知正常高高程的点位,则可求出与这些点相应的高程异常值,利用现代大地数据处理的方法、以高程异常值和点的大地经纬度为统计量、重力场模型参量、DEM 参数等进行所谓“似大地水准面的精化处理”,求出一拟合多项式中的待定系数。在这个基础上,可依据任一点的大地经纬度为变量,以点的高程异常值为函数求解,然后将该点的大地高减去相应的高程异常值后,则可得出相应点位的正常高高程。

用该方法确定的 GPS 点的高程,其精度在比较理想的情况下可达到普通几何水准测量的精度。当进行与其精度相匹配的点位高程测量和困难地区的高程联测时,这种方法具有明显的实用价值和经济效益。GPS 高程测量的精度,与 GPS 测量本身的精度有关,还与须联合的重力测量等方面的数据的分辨率及选用适配的数据处理方法有关系。这方面的课题也是目前正在进一步研究和完善中的前瞻性的课题。

综上所述,目前建立国家高程控制网或工程高程控制网,主要采用几何水准测量的方法,而三角高程测量方法、光电测距高程导线测量以及 GPS 高程测量的方法,都作为辅助和补充的方法。当 GPS 高程测量方面“似大地水准面的精化处理”获得进一步成功并加以推广,则相当于普通几何水准精度的高程测量工作的效率将大大提高。

1.4 控制测量的发展与展望

随着科学技术的发展,测绘科学技术也经历了一个从低级到高级、不断深化、不断创新和不断完善的发展过程,从而导致了测绘学科内容进一步丰富和新学科的形成。

控制测量的起源可以追溯到两千多年以前。因为受到当时社会条件以及科技水平等因素的限制,只是为适应当时人们生活和生产的需要而进行一些简单的测量工作,测量仪器和测量方法都比较原始、落后,测量的精度也很低。

直到 18 世纪,由于大工业的出现,生产和技术水平得到提高,使得测量仪器和测量方法也不断地改进。法国等一些国家先后开展了弧度测量,第一次在近代地球形状理论基础上导出了地球椭球模型,并取其子午圈弧长的四千万分之一作为长度单位,即国际长度单位(metre)记为 1 m,这是世界上通用米制的起源。从 18 世纪末开始,英、德、法、俄、美、印度和一些北非国家,先后完成了大量的三角测量工作,并进行了许多联测。

19 世纪和 20 世纪,是测绘理论和技术空前发展的时期。

1806 年法国学者勒让德(Legendre)提出了最小二乘法理论后,德国学者高斯(Gauss)应用这一原理处理天文大地测量成果,并由此产生了测量平差法,一直应用至今。1882 年高斯还提出了由椭球面上的测量元素投影到平面上去的正形投影法,该方法目前仍在广

泛应用,具有很强的实用性。1846年德国创建了卡尔·蔡司(Carl Zeiss)光学仪器厂,逐步开始了光学经纬仪、水准仪等测量仪器的生产。1897年法国国际度量衡局用膨胀系数极小的镍铁钴合金制成因瓦基线尺,使得丈量距离的精度和速度大为提高。1920年威特(Wild)等人研制了第一台以精密机械结构为特色的光学经纬仪;1936年威特又发明了对径重合读数法,开始生产现今仍在精密角度测量中还经常使用的精密光学经纬仪。第二次世界大战结束后,瑞典物理学家贝尔格斯特川(E. Bergstrand)与该国的AGA公司合作,于1948年首次制造出大地测距仪(Geodimeter),从根本上改变了精密距离测量的方法,开创了电磁波测距的先河。

我国近代控制测量工作实际上是从新中国成立后才系统地开始的。1956年我国成立国家测绘总局,随即颁发了大地测量法式和相应的规范细则。在全国范围内布测了总长度近8万km包括120多个锁环的一等三角锁。在锁环中间布测了二等全面三角网,青藏高原布测电磁波测距导线。1982年我国完成了一、二等锁网及部分三等网的整体平差,建立了1980西安坐标系(又称1980年国家大地坐标系),网中共48433个大地控制点,共约30万个观测值参与平差。

此外,93360km的一等水准网、2万多个水准点;二等水准网136368km、33000多个水准点,在1991年8月通过了新测、复测或重测后的整体平差的数据处理工作,建立了1985国家高程基准。

目前可提供应用服务的国家各等级平面控制点包括三角点、导线点,共154348个;1985国家高程基准系统的水准点成果114041个。

进入20世纪50年代以来,控制测量的手段和技术日新月异,主要表现在以下几个方面。

随着电磁波技术、电子测角技术、计算机技术的迅速发展,常规的测量技术正在向自动化、智能化、一体化、数字化、网络化、可视化的方向发展和完善。其测量成果的精度越来越高,功能越来越强,适用性越来越广。

GPS全球定位系统以其特有的自动化、全天候、高效益的优势,广泛地应用于控制测量以及其他的测量工作;集卫星定位、计算机、数字通讯、互联网等高新技术为一体的CORS多基站连续运行的GPSRTK系统,已在我国许多地区开启,使常规的测量工作产生了根本性的变革。自20世纪80年代我国引进GPS技术以来,陆续建成了国家高精度GPS A、B级网,全国GPS一、二级网,全国GPS地壳运动监测网和中国地壳运动观测网,取得了大量宝贵的观测资料。国家测绘局、总参测绘局和中国地震局自2000年开始,联合进行“全国天文大地网与2000国家GPS大地控制网联合平差”,建成了统一的、覆盖比较均匀的、高精度的国家GPS大地控制网。获得了我国48919个天文大地网点高精度的地心坐标和各项精度评定,平均点位精度达到 ± 0.11 m,解决了现阶段空间技术发展对地心坐标的迫切需求,对我国基础测绘具有重要意义。

我国正在研制和构建的北斗导航系统,计划到2020年全部建成由5颗空间定点卫星和30颗在轨运动卫星和多类型用户终端组成的,定位、导航以及时间等多功能的科研和其他应用服务的系统。该系统将在世界高科技领域发挥重要的作用。

另外为了空间技术和经济建设的实际需要,国家业已完成了可靠程度更大、实用性更强、精度更高、理论更加严密的“2000国家大地坐标系”的定义和框架构建工作,进一步奠定了测绘生产以及地球科学研究的基础。

在工程控制测量和其他的测量方面,测量新仪器、新技术的应用也愈加完善和普及。无论从精度方面,还是从经济方面,都收到了很好的效果。

测绘事业的明天会更加辉煌和精彩。

思考题与习题

- 1S·1. 试述控制测量的任务和内容。
- 1S·2. 工程控制网分为哪几种?
- 1S·3. 为什么控制测量能够控制测绘地形图?
- 1S·4. 控制测量在工程建设 3 个阶段的具体任务是什么?
- 1S·5. 控制测量和图根控制测量有什么区别?
- 1S·6. 大地测量的任务是什么?
- 1S·7. 大地测量和控制测量的特点是什么?
- 1S·8. 简述建立水平控制网的基本方法。
- 1S·9. 简述建立高程控制网的基本方法。
- 1S·10. GPS 定位和高程测量有哪些特点和优势?
- 1S·11. “似大地水准面的精化处理”解决什么问题?
- 1S·12. 试述控制测量的发展概况。
- 1S·13. 简述我国在测量学科方面的主要成就。
- 1X·1. 控制网分为哪两部分?
- 1X·2. 目前主流的平面控制测量的方法是什么?
- 1X·3. 建立国家高程控制网的主要方法是什么?

第2章 地球椭球面上的测量计算

控制测量的外业工作是在复杂的非数学曲面——地球自然表面上进行的,在这样的表面上进行测量数据的处理是困难的。为了测量计算的需要,选取近似于地球表面的规则数学曲面——椭球面作为测量计算的基准面。为此,首先要了解椭球的基本情况,掌握椭球面上诸要素(点、线、面等)的几何特征及其数学表示方式,它们是研究椭球面上一切测量计算问题的基础。

另外,由于椭球面的数学性质比平面要复杂得多,所以椭球面上的大地坐标计算比平面上的坐标计算也复杂得多。所以首先要了解和认识地球椭球本身有关的知识,然后再研究地面观测元素换算至椭球面的有关原理和方法,以及椭球面上的三角形解算和大地坐标计算方面的问题。

本章的具体内容包括:椭球面上的常用坐标系、参考椭球面的几何特征、地面观测值归算至椭球面、大地主题解算、椭球面上的坐标系相互关系与转换等。

2.1 椭球面上的常用坐标系

为了表示椭球面上的位置,必须建立相应的坐标系。下面将要介绍几种常用的坐标系,它们在实际的应用以及理论研究中具有重要的意义。

2.1.1 大地测量参考系统与参考框架

(1) 大地测量参考系统

大地测量参考系统包括坐标系、高程系统、重力系统和深度基准。坐标的参考系统分为天球坐标系和地球坐标系。

天球坐标系是指在空间固定不动或做匀速直线运动的坐标系,也称为惯性坐标系。用于研究天体、人造卫星以及太空飞行器的定位与运动。

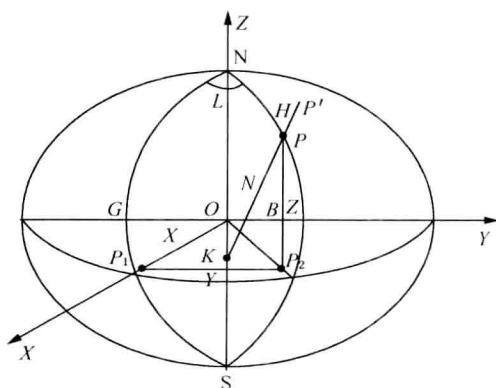


图 2-1 地球坐标系

地球坐标系是指在与地球固连在一起,也称为地固坐标系。是以旋转椭球为参照体而建立的坐标系,分为大地坐标系和空间直角坐标系,用于研究地球上物体的定位与运动。在控制测量学中只研究和应用地球坐标系。如图 2-1 所示, P 点的子午面 NPS 与起始子午面 NGS 所构成的二面角 L , 叫做 P 点的大地经度, 由起始子午面起算, 向东为正 ($0^\circ \sim 180^\circ$), 称为东经, 向西为负 ($0^\circ \sim 180^\circ$), 称为西经; P 点的法线 PK 与赤道面的夹角 B , 称为 P 点的大地纬度, 由赤道面起算, 向北为正 ($0^\circ \sim 90^\circ$), 称为北纬, 向南为负 ($0^\circ \sim 90^\circ$), 称为南纬。在该坐标系中, 当 P

点在椭球面上时, P 点的位置用 (L, B) 表示; 当 P' 点不在椭球面上时, P' 点的位置用 (L, B, H) 表示, H 为 P' 点沿法线 $P'K$ 到椭球面的距离。

空间直角坐标系也如图 2-1 所示, P 点的坐标用 (X, Y, Z) 表示。空间任意点的坐标也有三维数据与其相对应。这种坐标的实际应用意义不大, 一般都要将其转换成别的坐标系的坐标。

(2) 大地测量参考框架

大地测量参考框架是大地测量参考系统的具体实现, 是通过大地测量手段确定的固定在地面上的控制网(点)所构建的, 分为坐标参考框架、高程参考框架、重力参考框架。国家平面控制网是全国进行测量工作的平面位置参考框架, 分为一、二、三、四等网即四个等级。国家高程控制网是全国进行测量工作的高程参考框架, 也分为一、二、三、四等网即四个等级。为适应精确处理大地测量数据、地球科学研究、空间技术等需要, 国家也建立了重力基本网的参考框架。

(3) 惯性坐标系

惯性坐标系是指在空间固定不动或做匀速直线运动的坐标系。这种理想的坐标系在实际应用中是难以建立的, 通常根据统一的约定建立近似的惯性坐标系, 称为协议惯性坐标系。通常约定某一时刻 t_0 作为参考历元, 定义坐标轴的指向以及坐标系的原点等。

(4) 地固坐标系

地固坐标系也称为地球坐标系, 是固定在地球上与地球同步运动(自转和公转)的坐标系。如果忽略地球潮汐和板块运动, 地面上点的坐标值在地固坐标系中是固定不变的; 对于天球坐标系, 地面上点的坐标值受地球自转的影响一直处于变化运动之中。用地固坐标系描述地球表面点的空间位置更为方便, 而天球坐标系主要是用于描述卫星和地球的运行位置和状态。

(5) 参心坐标系

参心坐标系即是以参考椭球的几何中心作为空间直角坐标系的原点的坐标系。建立地球参心坐标系, 需进行如下几个方面的工作:

- ① 选择或求定椭球的几何参数;
- ② 确定椭球中心的位置(椭球定位);
- ③ 确定椭球短轴的指向(椭球定向);
- ④ 建立大地原点。

对于经典的参心大地坐标系的建立而言, 参考椭球的定位和定向是通过大地原点的大地起算数据来实现的, 而确定起算数据又是椭球定位和定向的结果。不论采取何种定位和定向的方法来建立国家大地坐标系, 总得有一个而且只能有一个大地原点, 否则定位和定向的结果就会产生多值性, 从而无法明确地将其表示出来。

(6) 地心坐标系

地心大地坐标系的定义是: 地球椭球的中心与地球的质心(包括海洋和大气的整个地球的质量中心)重合, 椭球面与大地水准面在全球范围内最佳符合, 椭球的短轴与地球自转轴重合(过地球质心并指向北极), 大地纬度为过地面点的椭球法线与椭球赤道面的夹角, 大地经度为过地面点的椭球子午面与格林尼治的初始大地子午面之间的夹角, 大地高为地面点沿椭球面的法线至椭球面的距离。地球北极是地心坐标系的基准指向点, 它的变动将引起坐标轴方向的变化。通常由国际组织(国际大地测量联合会 IAG、国际天文联合会 IAU、国际大地测量与地球物理联合会 IUGG、国际时间局 BIH 等)协商确定, 故称为国际协议原点 CIO。

地心空间直角坐标系的定义是:原点与地球质心重合, Z 轴指向地球北极, X 轴指向格林尼治平均子午面与地球赤道的交点, Y 轴与 XOZ 平面构成右手坐标系。

2.1.2 椭球体的选择

测量工作主要是在地球自然表面进行的,但其表面不是一个规则的曲面,无法实施统一的数学计算。这就需要寻求一个大小和形状最接近于地球形体的椭球体,在其表面上来完成有关的测量计算。用椭球取代地球必须解决两个问题:一是椭球参数的选择;二是将椭球与地球的相关位置确定下来,即椭球的定位。

由于接近地球真正形状的地球椭球参数的推算所采用的数据不同,以及由于应用目的不同而对地球椭球提出不同的要求等原因,从而导致出现多种不同定义的地球椭球。

(1) 旋转椭球

它是由一个椭圆绕其短轴旋转而成的几何形体,地球的形状最接近于一个旋转椭球体。它的表面称为“旋转椭球面”。以后所讲的地球椭球,一般都是指旋转椭球。

(2) 参考椭球

一个国家为处理其大地测量成果而采用与地球大小形状接近的地球椭球,并确定它和大地原点的关系,所有有关的地面测量成果都依法线归化到这个椭球面上,我们把这样的椭球叫做参考椭球。其表面称为参考椭球面,处理大地测量结果均以参考椭球面作为基准面。由于各自国家或地区在测量方面的情况不一样,因此适合于不同国家或地区的参考椭球的大小、定位定向也都不一样,每个参考椭球都有自己的参数和参考系。所以在世界范围内,可出现多个参考椭球。

(3) 正常椭球

表面的重力位等于常数的旋转椭球,用于代表地球的理想形体。正常椭球面是大地水准面的规则形状,所以也称为水准椭球。因此,在一般情况下,对这两个名词不加以区别,有的文献中把它们统称为等位椭球。在物理大地测量中需要引进所谓的正常椭球,将其真正的地球重力位分成正常重力位和扰动位两部分,实际的重力分成了正常重力和重力异常两部分,以便于实际工作的应用和研究。

由斯托克斯(Stokes)定理可知,如果已知1个水准面的形状 S 和它内部所包含的物质总质量 M ,以及整个物体绕固定轴旋转的角速度 ω ,则这个水准面上所有的点和其外部空间中任一点的重力位与重力都可以唯一地确定。因此,当我们选定这个正常椭球时,既要考虑确定椭球正常重力位所必须的物理参数使用方便,又要顾及几何大地测量中采用旋转椭球所需的几何参数的实际情况,所以当其所代表的参数确定后,则椭球上任一点位或已知高度空间处的正常重力值即可按一定的公式求出。

(4) 总地球椭球

为了全球性的问题,要求椭球面与全球的大地水准面(大地体)最为密合的总的地球椭球(简称总地球椭球)。总地球椭球按几何大地测量定义:总地球椭球中心和地球的质心重合,总地球椭球的短轴与地球的短轴重合,起始大地子午面和起始子午面重合,同时还要求总地球椭球和大地体最为密合,也就是说,在确定参数时,要满足全球范围的大地水准面差距的平方和最小。

如果从几何和物理两个方面来研究全球性的问题,我们可把总地球椭球定义为最密合于大地体的正常椭球。正常椭球参数是根据天文、重力以及人卫观测资料一起处理得到的,并由国际组织发布。