

高等学校测绘学科教学指导委员会“十五”高职高专规划教材

控制测量

Kongzhi Celiang

刘绍堂 主编



黄河水利出版社

高等学校测绘学科教学指导委员会“十五”高职高专规划教材

控制测量

主 编 刘绍堂

编写人员 (按姓氏笔画排序)

马玉晓 王勇智 刘绍堂

张晓东 喻艳梅

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是根据全国高等学校测绘学科教学指导委员会教材编写规划,针对高职高专工程测量技术专业而编写的。全书共分9章,内容主要包括:绪论,水平控制网的技术设计,精密经纬仪及水平角观测,高程控制测量,电磁波测距与精密导线测量,椭球面上的测量计算,高斯投影和导线测量算例,参考椭球定位和不同坐标系之间的换算,卫星定位技术在控制测量中的应用等。书末附有控制测量实验、实训指导书和控制测量技术设计示例。

本书可供高职高专工程测量技术专业教学使用,也可供工程测量与监理、摄影测量与遥感技术、大地测量与卫星定位技术、地理信息系统与地图制图技术、地籍测绘与土地管理信息技术、矿山测量等专业教学选用,还可供相关技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制测量/刘绍堂主编. —郑州:黄河水利出版社,
2007.8
高等学校测绘学科教学指导委员会“十五”高职高专
规划教材
ISBN 978-7-80734-235-9

I. 控… II. 刘… III. 控制测量-高等学校:技术
学校-教材 IV. P221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 112928 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:22.5

字数:520 千字

印数:1—4 100

版次:2007 年 8 月第 1 版

印次:2007 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-235-9/P·71

定价:36.00 元

高等学校测绘学科教学指导委员会“十五”高职高专
规划教材审定委员会

主 任 宁津生
副主任 陶本藻 王 依
委 员 赵文亮 方源敏 李晓桓

序

我国的高职高专教育经历了十余年的蓬勃发展,获得了长足的进步,如今已成为我国高等教育的重要组成部分,在国家的经济、社会和科技发展中发挥着积极的服务作用,测绘类专业的高职高专教育也是如此。为了加深高职高专教育自身的改革,并使其高质量地向前发展,教育部决定组建高职高专教育的各学科专业指导委员会。国家测绘局受教育部委托,负责组建和管理高职高专教育测绘类专业指导委员会,并将其设置为全国高等学校测绘学科教学指导委员会下的一个分委员会。第一届分委员会成立后的第一件事就是根据教育部的要求,研讨和制定了我国高职高专教育的测绘类专业设置,新设置的专业目录已上报教育部和国家测绘局。随后组织委员和有关专家按照新的专业设置制定了“十五”期间相应的教材规划。在广泛征集有关高职高专院校意见的基础上,确定了规划中各本教材的主编和参编院校及其编写者,并规定了完成日期。为了保证教材的学术水平和编写质量,教学指导分委员会还针对高职高专教材的特点制定了严格的教材编写、审查及出版的流程和规定,并将其纳入高等学校测绘学科教学指导委员会统一管理。

经过各相关院校编写教师们的努力,现在第一批规划教材正式出版发行,其他教材也将会陆续出版。这些规划教材鲜明地突出了高职高专教育中专业设置的职业性和教学内容的应用性,适应高职高专人才的职业需求,必定有别于高等教育的本科教材,希望在高职高专教育的测绘类专业教学中发挥很好的作用。

这里要特别指出,黄河水利出版社在获悉我们将出版一批规划教材后,为了支持和促进测绘类专业高职高专教育的发展,经与教学指导委员会协商,今后高职高专测绘类专业的全部规划教材都将由该社统一出版发行。这里谨向黄河水利出版社表示感谢。

由教学指导委员会按照新的专业目录,组织、规划和编写高职高专测绘类专业教材还是初次尝试,希望有测绘类专业的各高职高专院校能在教学中使用这些规划教材,并从中发现问题,提出建议,以便修改和完善。

高等学校测绘学科教学指导委员会主任
中国工程院院士



2005年7月10日于武汉

前 言

本书是在全国高等学校测绘学科教学指导委员会的统一规划和指导下,针对高职高专工程测量技术专业《控制测量》课程教学需要而编写的。

本教材的特点和编写原则如下:

(1)突出了高职高专职业技术教育的特色,理论知识按“必需、够用”的原则安排。为此,对于已过时的和不必要的三角网与边角网的相关内容进行了删简,对导线和导线网的相关内容进行了归纳。希望调整后的体系能更适合高职高专教学的要求。

(2)强调了对高职高专学生实践能力和操作技能的培养。全书始终以导线测量、水准测量和卫星定位技术为主线,围绕控制测量技术设计、控制测量数据采集、控制测量数据处理三大任务和精密水准仪(含电子水准仪)、精密经纬仪(含电子经纬仪)、全站仪(含测距仪)、GPS、计算机等五大仪器设备组织内容。每章后都有小结,还附有一定数量的习题,书末附有控制测量实验、实训指导书和控制测量技术设计示例。

(3)充分考虑了本套教材的配套性,特别注意与已出版的教材《测量平差》、《全站仪测量技术》、《GPS 测量技术》等教材的衔接,避免遗漏和重复。因为全站仪和 GPS 在《全站仪测量技术》和《GPS 测量技术》中已讲过,条件平差、间接平差等平差方法在《测量平差》中也已详述,故本教材仅讲述其在控制测量中的应用或将其作为选学内容(带*者为选学内容)。

(4)本教材编写时力求做到基本概念准确,各部分内容紧扣培养目标,文字简练、通俗易懂,具有较强的实用性。

本书第一章、附录一由河南工程学院刘绍堂编写;第二章、第三章、附录二由湖南工程职业技术学院喻艳梅编写;第四章、第五章由平顶山工学院马玉晓编写;第六章、第七章由甘肃工业职业技术学院张晓东编写;第八章、第九章由河北工程技术高等专科学校王勇智编写。全书由刘绍堂任主编并统稿。

全国高等学校测绘学科教学指导委员会主任委员、中国测绘学会教育委员会主任委员、中国工程院院士、博士生导师宁津生教授亲自参加了本教材大纲的讨论和定稿并始终关心本书的编写与出版工作,在此致以诚挚的谢意。中国测绘教育委员会副主任委员王依教授任本书主审,提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。在本书编写过程中,参考了多种文献,在此一并致谢。

书中存在的问题和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 5 月

目 录

序	宁津生
前 言	
第一章 绪 论	(1)
第一节 控制测量的任务、作用和内容	(1)
第二节 控制测量技术的发展概况	(2)
第三节 控制测量的基准面和基准线	(7)
第四节 控制网的布设形式	(9)
第五节 控制测量作业流程	(13)
小 结	(14)
习 题	(15)
第二章 水平控制网的技术设计	(16)
第一节 国家水平控制网概述	(16)
第二节 工程水平控制网的布设原则和方案	(21)
第三节 工程水平控制网的技术设计	(23)
第四节 水平控制网的精度估算	(27)
第五节 水平控制网的选点、建标和埋石	(37)
小 结	(42)
习 题	(43)
第三章 精密经纬仪及水平角观测	(44)
第一节 精密光学经纬仪	(44)
第二节 精密电子经纬仪	(65)
第三节 方向观测法和测站平差	(68)
第四节 精密水平角观测的误差影响和操作的基本规则	(76)
第五节 偏心观测与归心改正	(82)
小 结	(91)
习 题	(92)
第四章 高程控制测量	(93)
第一节 国家高程基准和高程控制网的布设	(93)
第二节 精密水准仪与水准尺	(97)
第三节 精密电子水准仪	(100)
第四节 精密水准仪与水准尺的检验	(104)
第五节 精密水准测量的主要误差来源及影响	(108)
第六节 精密水准测量的实施	(111)

第七节	跨河精密水准测量	(115)
第八节	水准测量概算	(117)
第九节	垂直角观测与三角高程测量	(118)
第十节	高程控制网计算和平差	(125)
小 结		(133)
习 题		(133)
第五章	电磁波测距与精密导线测量	(134)
第一节	电磁波测距仪测距原理	(134)
第二节	光电测距仪及其应用	(140)
第三节	电磁波测距成果的改正计算	(149)
第四节	电磁波测距误差分析	(151)
第五节	电磁波测距仪的检验	(154)
第六节	精密导线测量概述	(157)
第七节	精密导线的边长与角度观测	(159)
第八节	电磁波测距高程导线	(164)
小 结		(168)
习 题		(168)
第六章	椭球面上的测量计算	(169)
第一节	地球椭球的基本概念	(169)
第二节	椭球面上的常用坐标系	(171)
第三节	椭球面上的几种曲率半径	(173)
第四节	将地面观测的方向值归算至椭球面	(177)
第五节	将地面观测的边长归算至椭球面	(180)
小 结		(181)
习 题		(182)
第七章	高斯投影和导线测量算例	(183)
第一节	高斯投影概述	(183)
第二节	正形投影的一般条件	(187)
第三节	高斯投影坐标正反算的实用公式及算例	(187)
第四节	平面子午线收敛角公式	(190)
第五节	方向改化公式	(191)
第六节	距离改化公式	(194)
第七节	高斯投影的邻带换算	(197)
第八节	工程测量投影与投影带的选择	(199)
第九节	导线测量质量检验及上交资料	(202)
第十节	导线测量计算算例	(204)
小 结		(212)
习 题		(212)

* 第八章 参考椭球定位和不同坐标系之间的换算	(214)
第一节 椭球定位和定向概念.....	(214)
第二节 坐标系统的类型.....	(217)
第三节 地球地心坐标系.....	(219)
第四节 地球参心坐标系与地方独立坐标系.....	(220)
第五节 站心坐标系.....	(220)
第六节 国家大地坐标系与世界大地坐标系.....	(222)
第七节 不同坐标系之间的坐标换算.....	(223)
小 结.....	(227)
习 题.....	(227)
* 第九章 卫星定位技术在控制测量中的应用	(228)
第一节 卫星定位技术概述.....	(228)
第二节 卫星定位原理.....	(232)
第三节 GPS 控制测量技术设计与实施	(236)
第四节 GPS 控制测量数据处理	(245)
第五节 GPS 高程测量	(248)
第六节 GPS 网络 RTK 技术在控制测量中的应用	(250)
小 结.....	(253)
习 题.....	(253)
附录一 控制测量实验、实训指导书	(255)
附录二 控制测量技术设计示例.....	(334)
参考文献.....	(347)

第一章 绪 论

控制测量的目的是测定空间点的位置,控制测量也是各种工程测量的基础工作之一。本章概括了控制测量的定义,控制测量的任务和作用,控制测量新技术的发展概况,控制测量的基准面、基准线,控制网的布设形式等,目的是让学生了解控制测量的整体概念。

第一节 控制测量的任务、作用和内容

1 控制测量的基本任务和作用

控制测量是研究精确测定和描绘地面控制点空间位置及其变化的学科。它是在大地测量学基本理论基础上以工程建设测量为主要服务对象而发展和形成的,为人类社会活动提供有用的空间信息。因此,从本质上说,它属于地球空间信息学科,是地球科学和测绘学中的一个重要分支,是工程建设测量中的基础学科,也是应用学科。在工程测量技术专业人才培养中占有重要的地位。

控制测量是研究控制测量的理论、方法和观测成果处理的一门科学。控制测量主要是在某一特定区域内建立控制网,确定地面点在某一参考坐标系中的精确位置,为地形图测绘和工程测量建立具有必要精度的控制网。

控制测量的服务对象主要是各种工程建设、城镇建设和土地规划与管理等工作。这就决定了它的测量范围比大地测量要小,并且在观测手段和数据处理方法上还具有多样化的特点。

作为控制测量服务对象的工程建设工作,在建设过程中,大体上可分为设计、施工和运营 3 个阶段。每个阶段都对控制测量提出不同的要求,其基本任务分述如下。

1.1 在设计阶段建立用于测绘大比例尺地形图的测图控制网

在这一阶段,设计人员要在大比例尺地形图上进行建筑物的设计或区域规划,以求得设计所依据的各项数据。因此,控制测量的任务是布设作为图根控制依据的测图控制网,以保证地形图的精度和各幅地形图之间的准确拼接。

1.2 在施工阶段建立施工控制网

在这一阶段,施工测量的主要任务是将图纸上设计的建筑物放样到实地上去。对于不同的工程来说,施工测量的具体任务也不同。例如,隧道施工测量的主要任务是保证对向开挖的隧道能按照规定的精度贯通,并使各建筑物按照设计的位置修建,放样过程中,仪器所标出的方向、距离都是依据控制网和图纸上设计的建筑物计算出来的,因而在施工放样之前,需建立具有必要精度的施工控制网。

1.3 在工程竣工后的运营阶段,建立以监测建筑物变形为目的的变形观测专用控制网

由于在工程施工阶段改变了地面的原有状态,加之建筑物本身的重量会引起地基及

其周围地层的不均匀变化。此外,建筑物本身及其基础也会由于地基的变化而产生变形。这种变形,如果超过了某一限度,就会影响建筑物的正常使用,严重的还会危及建筑物的安全。在一些大城市(如我国的上海、天津),由于地下水的过量开采,也会引起市区大范围的地面沉降,从而造成危害。因此,在运营阶段,需对这种可能存在变形的建筑物或城区进行变形监测。为此,需布设变形观测控制网。由于这种变形的数值一般都很小,为了能够精确地进行测量,要求变形观测控制网具有较高的精度。

以上 2、3 阶段布设的两种控制网统称为专用控制网。

控制测量在许多方面发挥着重要作用。可以说,地形图是一切经济建设规划和发展必需的基础性资料。为测绘地形图,首先要布设全国范围内及局域性的大地测量控制网。为取得大地点的精确坐标,必须要建立合理的大地测量坐标系以及确定地球的形状、大小及重力场参数。因此,控制测量在国民经济建设和社会发展中发挥着决定性的基础保障作用。

此外,控制测量在防灾、减灾、救灾及环境监测、评价与保护中,在发展空间技术和国防建设中,在丰富和发展当代地球科学的有关研究中,以及在发展测绘工程事业中都发挥着重要作用。

2 控制测量的主要研究内容

控制测量的基本研究内容如下:

(1)研究建立和维持高科技水平的工程水平控制网和精密水准网的原理及方法,以满足国民经济和国防建设的需要。

(2)研究获得高精度测量成果的精密仪器及其科学的使用方法。

(3)研究地球表面测量成果向椭球面或平面的数学投影变换及有关问题的测量计算方法。

(4)研究高精度和多类别的地面网、空间网及其联合网的数学处理理论与方法,控制测量数据库的建立及应用等。

以上概述了一般意义下的控制测量的基本任务和主要内容。本书依据这些基本体系 and 内容,结合高职高专职业技术教育的特点,按照理论知识“必需、够用”的原则,介绍了控制测量的基本理论、技术和方法,以便为学生学习后续课程及从事测绘事业打下坚实的基础。

第二节 控制测量技术的发展概况

过去控制测量采用的主要方法是传统的三角测量和几何水准测量。近 30 年来,电子学、激光技术、电子计算机和空间技术的迅速发展,使得控制测量在理论和技术上都产生了重大变革。以下仅对这些新方法作一简略的介绍。

1 精密测角仪器的发展概况

20 世纪 50 年代,精密测角仪器的主要改进是采用了垂直度盘指标自动归零补偿器

和光学对中器,从而取消了指标水准器并使对中精度由 3 mm 提高到了 0.5 mm。精密测角仪器的重大发展是从 60 年代以来实现读数的数字化开始的,由于采用光栅度盘或编码度盘代替了光学玻璃度盘,测量数据可直接从屏幕上显示出来或自动记录在磁带上。进而同微型计算机相结合,实现了角度观测过程中观测值的获取、传输、处理的自动化,这种经纬仪称为电子经纬仪。电子经纬仪的构造,使其能够较好地消除仪器本身的许多误差(如度盘刻划误差等),因此其精度可以达到甚至超过精密光学经纬仪的精度。例如,瑞士 Kern 公司的 E2 电子经纬仪,方向观测的标称精度为 $\pm 0.3'' \sim \pm 0.6''$ 。

为了消除大气折光误差对角度观测值(特别是垂直角(也称竖直角))的影响,人们仿照电磁波测距中为削弱这类误差而采用双频载波测距的方法,也采用双频电磁波测角。

2 电磁波测距仪发展概况

早在 20 多年前,电磁波测距仪已经成为了正规的精密测距仪器,并应用于生产实践。以后,由于激光、半导体、微电子技术的发展,促进了电磁波测距仪向着体积小、重量轻、精度高和自动化方向产生飞跃。

第一代电磁波测距仪用普通光源,它只能在夜间观测。后来,用激光光源代替普通光源,出现了激光测距仪。这种测距仪既缩小了仪器的尺寸、减轻了仪器的重量,又能昼夜进行测距,最长可测至 30 km。激光测距仪的最新发展有两种类型:一是短程高精度测距仪,如 Kern 公司的 ME-5000 测距仪,在 8 km 的测距范围内误差小于 2 mm;另一种是采用双频激光的测距仪,它可用两种不同载波频率的激光测距,以便自动改正气象的影响,它的最大测程约 30 km,每千米精度可达 0.2 mm。

20 世纪 60 年代初,采用砷化镓发光管发射的红外光代替普通光,出现了所谓红外测距仪,如瑞士 Wild 公司的 DI-5 红外测距仪。这类测距仪小巧精致并能自动显示距离,精度为 $(3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$,用于精密测边测角的专用控制网或导线网中最为合适。这类仪器的最大测程为 3~5 km。瑞典 AGA 公司的 AGA 14 型红外测距仪测程为 10 km 左右,从而改变了红外测距仪只能进行短程测距的状况。

电磁波测距仪的发展,必然走向与电子经纬仪相结合的途径,从而形成既能测距又能测角的全能仪器,通常称其为全站型电子速测仪。这种仪器具有测距、测角、记录、计算甚至平差等多种功能。在一个测站上就可以得到所需的全部测量数据(甚至包括坐标、方位角等推算数据),故简称为全站仪。

第一台全站仪是 Opton 公司于 1968 年生产的 Elta-14。它的体积虽然较大且比较笨重,但却具备了现代全站仪的雏形。该仪器包括 4 个基本组成部分:电子经纬仪,电磁波测距仪,数据记录仪,反射镜和电源。从仪器结构上来看,全站仪可分为两类。一类是整体式结构,即上述 4 个部分,除反射镜外均装在同一个机壳内。如 Opton 公司的 Elta2。其测程小于 5 km,测距精度为 $\pm (5 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$,测角精度约为 $\pm 0.85''$ 。另一类是组合式结构,即电子经纬仪和电磁波测距仪从外部组合在一起,后者可以取下,或用同一公司生产的其他类型的测距仪替换使用。数据记录器也可单独用于电子经纬仪或测距仪。这种类型的仪器具有很大的灵活性,例如 Wild 公司的 T2000S 加测距仪即属此类。该仪器的测角精度约为 $\pm 0.7''$,可配套使用的测距仪有该公司生产的 DI1000、DI4、DI5 等

多种。

1990 年 Geotronics 公司和 Leica 公司率先研制成功各自的测量机器人并投放市场。这意味着在野外用地面测量仪器采集信息的工作已全部实现了自动化。

所谓测量机器人,是在前述普通全站仪的基础上,采用伺服电动机驱动和其他光电技术,进一步实现了寻找和照准给定目标自动化的测量系统。Geotronics 公司测量机器人 Geodimeter 4400 由全站仪主机和遥控定位器(RPU)两部分组成,后者包括反射镜在内。两者都装有遥测通信线路,以实现信息的相互转换和通信,作用半径可达 1 600 m。在测量员手持反射镜选定观测目标的同时,可通过 RPU 与测站上的仪器通信,并控制其完成全部观测任务。当系统工作时,全站仪可根据反射镜反射的测距信号确认和改进它对反射镜的照准,甚至具有跟踪活动反射镜的功能。于是,使用这种仪器只需一个人便可完成普通全站仪至少要两个人才能完成的工作,因而该公司称其为“单人全站仪”。

Leica 公司的测量机器人系统简称为 APS(Automated Polar System),主要硬件设备为自动经纬仪 TM 3000V 和测距仪,此外还有反射镜、外部微机和控制器。TM 3000V 后面的字母 V 表示仪器望远镜上带有目镜 CCD 摄影机,其功能是实现自动识别目标并使其影像聚焦。测距仪用字母 D 表示,因此 TM 3000V/D 表示经纬仪上既有 CCD 摄影机,也有测距仪。该系统的观测程序完全由外部微机中的软件(名为 APS win)控制运行。运行中,仪器以内存中参考文件的数据为根据自动搜寻目标。为了形成这种参考文件,在测站上安置好仪器开始观测前,需由观测员亲手进行概略的预观测。这时,由于仪器上没有通常的制动、微动螺旋,测量员只能使用外部微机上的键盘或用控制器通过操纵箱控制其运行,由此形成初步参考文件。此后,则由微机控制仪器自动进行观测并逐步形成有效的参考文件,然后才能开始正式观测。

测量机器人的应用范围较普通全站仪更加广泛。在过去那种测量员使用普通全站仪难以进行工作的环境下,现在都可用测量机器人代替。因此,对于控制测量和工程测量的各个领域,其应用前景是极其广阔的。

测量机器人正朝着全自动、多功能、开放型、智能型、标准化方向发展。它将在控制测量、地形测量、工程测量、工业测量、建筑施工测量和变形观测等领域中发挥越来越重要的作用。

3 精密水准仪的发展

20 世纪以来,水准仪的发展可分为 4 个阶段。第一阶段是以 1908 年威特(H. Wild)在德国 Zeiss 公司改进的一系列水准仪为标志,其特点是采用了平板玻璃测微器。例如 Wild N 3 和 Zeiss Ni004 就是属于这种类型的仪器。第二阶段是以 Opton 公司于 1950 年开始发展的自动安平水准仪为代表的仪器。我国引进的 Zeiss 公司的 Ni007 以及 Opton 公司的 Ni1 都是精密自动安平水准仪。第三阶段为“摩托化”水准测量,是德国德累斯顿工业大学研究成功的,即用汽车运载仪器、标尺和作业人员以提高作业效率,减轻劳动强度。用于“摩托化”水准测量的水准仪有 Zeiss 公司研制的 Ni007 自动安平水准仪。它采用悬挂式摆镜,可以旋转 180°,并从两个位置上读数,视线绝对水平。仪器的目镜可旋转,观测者在固定座位上可进行前后视读数。此外,脚架和标尺都作了改变,以适应“摩托

化”的要求。汽车上备有数据记录装置,用以记录观测数据,一段水准路线完成后,立即获得高差。1990年 Wild 公司研制出新型水准仪 NA2000,这标志着水准仪的研究进入了一个新的阶段——数字化阶段(第四阶段)。这种仪器做到了水准测量的读数、记录、处理全部自动化,从而基本结束了水准仪的落后状态,达到可与电子经纬仪相媲美的程度。

4 电子计算机在测量上的应用

电子计算机的应用使人类生活的各个领域,其中包括控制测量的计算工作,都发生了巨大的变革。以往,测量的计算工作采用手摇计算机进行,因此在内业工作上花费了大量的人力和时间。如今这些工作几乎全部为电子计算机所代替,由此产生的高效率是空前的。例如过去用手算几十个线性方程式已是一项繁重的工作,现在用电子计算机可进行数万个线性方程式的解算。我国天文大地网的平差计算就是利用大型电子计算机完成的。全网由一、二、三等三角网(锁)和导线网组成,总共约有 5 万个控制点和 30 余万个观测方程式,平差工作历时 6 年多。如果不是使用大型电子计算机,要完成规模如此巨大的控制网整体平差是难以设想的。

电子计算技术不仅应用于控制测量的数据处理,而且普遍用于现代化的数据采集设备(全站仪、数字水准仪、测距仪以及卫星定位系统、惯性系统等)本身的计算、控制和管理。此外,计算机除具有数值计算的功能外,还具备信息处理的功能。

随着计算机技术的迅速发展和日益完善,其应用受到了社会的普遍重视,各种数据库应运而生,并在此基础上形成了大型的信息系统如 GIS(地理信息系统)等,成为各种领域中信息管理、分析、决策的重要工具。

在测绘领域,“全国测绘资料档案管理系统”已研制成功,并已开始运行。“全国大地测量资料管理信息系统”是其中的一个子系统,其任务是实现大地(控制)测量资料的管理、检索计算机化,为用户提供规范化的成果,对测绘事业给以有力的专业信息支持。这是电子计算机应用的又一个领域。

5 卫星定位系统(GNSS)和 ISS 系统

5.1 卫星定位系统

卫星定位系统是指利用人造卫星和地面接收设备进行定位的方法。利用卫星定位系统技术进行控制测量显著优点是:第一,它不要求通视,这样避免了常规控制测量点位选取的局限条件;第二,没有常规三角网(锁)布设时要求近似等边及精度估算偏低时应加测对角线或增设起始边等烦琐要求,只要使用的 GPS 仪器精度与控制测量精度相匹配,控制点位的选取符合 GPS 点位选取要求,那么所布设的 GPS 网精度就完全能够满足要求。

卫星定位系统主要有美国的全球定位系统(GPS)、苏联的全球导航系统(GLO-NASS)、在建的欧盟伽利略全球导航定位系统(GALILEO)和中国的双星导航定位系统(北斗一号)等。

目前,卫星定位技术发展很快,网络 RTK 技术已经进入了实际应用阶段。国际上最大的 GPS 厂商 TRIMBLE 公司,已经开发出商用的网络 RTK 系统软件——VRS 系统。随着城市和地区网络 RTK 系统的建立,未来的控制测量和其他测绘工作将变得更加

容易。

根据德国 GFZ 计算的三个 IGS 站高程方向精度,15 d 的重复性结果显示,高程方向的精度优于 2 cm。GPS 定位中,水平方向的定位精度优于高程方向,所以完全可以肯定,PPP(单点精密定位)技术完全可以达到厘米级的定位精度。

美国俄亥俄州立大学应用 PPP 技术进行了快速静态定位和实时动态定位试验。试验的结果显示,进行快速静态定位时,采用 40 min 的数据段,采样率为 30 s,与已知值比较,绝对定位的平均误差为 18 cm,标准偏差为 2 cm。据他们分析,18 cm 的平均误差为系统偏差,是对流层延时和残余的固体潮改正引起的。进行实时动态定位,采样率为 1 s,与精密的 RTK 结果比较,实时的绝对定位精度优于 40 cm。由于每秒钟的卫星钟差是由 30 s 的卫星钟差内插而得,影响了绝对定位的精度;如果能够实时得到更精密的卫星钟差,未来的绝对定位精度可望进一步提高。

PPP 技术在控制测量中已经得到了应用。美国 JPL 的 GIPSY 软件、瑞士的 BERNESE 软件、德国的 EPOS 软件都包括了 PPP 功能。JPL 每日提供的全球 IGS 站的对流层延时,就是采用 PPP 技术计算的结果。IGS 已经决定,各数据分析中心今后提交的对流层延时信息,统一使用 PPP 技术,替代原有的网解成果。这些都是后处理结果。

武汉大学 GPS 研究中心的科研人员也进行了 PPP 技术的研究工作。他们使用 IGS 提供的精密星历和自己计算的精密卫星钟差,对位于夏威夷的 IGS 站的 KOKB 站的数据进行了分析。KOKB 站的坐标已知,试验中采用了平滑伪距和非差相位两种观测值,分别计算了每个单历元的定位结果,类似于动态测量数据处理模式。采用平滑伪距可以达到米级的定位精度;采用非差相位,经过约 15 min 的初始化后,单历元的定位结果趋于稳定,定位结果与已知坐标在 X、Y、Z 方向上的最大差值分别为 0.158 m、0.174 m 和 0.167 m。通过残差分析,绝大多数的中误差小于 15 cm。

PPP 技术的实时应用,取决于实时的卫星轨道和卫星钟差改正信息。目前,IGS 能够提供 10 cm 级的 12 h 预报卫星星历,未来的 1~2 年内,IGS 能够提供厘米级的 3 h 预报星历。如果卫星处于正常运行状态,这种精度的卫星轨道已经完全能够满足实时厘米级的定位要求。但是,卫星的钟差改正信息,目前不能实时得到。IGS 提供的精度为 0.05 ns 量级的精密钟差,时延为 10~12 d,0.1 ns 量级的快速钟差,时延为 3~5 d。但是,随着 IGS 实时化进程的加快,以及其他研究和商业机构的介入,卫星钟差的实时解算与外推变得容易和可能,因此可以预见 PPP 技术进入实时应用阶段已为期不远。

不管是后处理还是实时应用,PPP 技术在控制测量和其他测量领域中的应用大有作为。同 RTK 比较,PPP 技术的实时应用主要借助于移动通信技术和互联网技术,数据链不受空间的限制,也不必事先建立一个固定的基准站。所以,任意地区都可以利用 PPP 技术建立控制网。同时,PPP 技术真正实现了测量个性化,在测区不需要高等级的测量控制点,不需要架设基准站,单人单机即可完成测绘任务。

5.2 ISS 系统

ISS 系统全名为 Inertial Surveying System,即惯性测量系统。它是根据惯性导航原理制成的一种自动提供地面点坐标的装置。该装置用汽车或直升飞机运载,从一个已知点出发向待定点前进。从起程开始该装置连续不断地测定自身在固定的空间坐标系中沿三

个坐标轴方向的加速度,通过系统中的计算机将它们对时间进行两次数值积分,求出相对已知点的三维坐标,进而求得其自身在任一时刻的空间坐标。这就是惯性测量系统作业的概略过程。

惯性系统包括惯性平台、加速度计、计算机 3 个主要部分。惯性平台的作用主要是建立一个能自动跟踪起始点地理坐标系的三维固定坐标系。为此,采用两台旋转轴互相垂直的陀螺仪再加上能使平台纵摇、横摇和方位旋转的 3 个电动机来实现。加速度计安置在与惯性平台的 x 、 y 、 z 轴平行的方向上,各有一个,以便时刻测定系统本身运动的加速度在 3 个轴上的分量。计算机的用途是实现多功能的实时控制:对加速度进行两次数值积分以求得相对起始已知点的坐标差和系统的瞬时坐标;控制 3 个电动机的旋转,使惯性平台始终跟踪起始点的地理坐标;控制整个系统的工作状态和对观测结果的数据处理。

惯性系统适合于用导线的形式加密控制点。为了提高观测的精度,在作业过程中宜每隔 3~5 min 停止一次,以纠正各项误差。

惯性系统是美国陆军于 1966 年开始研制的。目前美国和英国都生产了这种仪器,其空间定位精度小于 1 m。总的来说这种系统尚处在初始阶段,估计今后精度可提高至 10 cm,价格也会降低,因而可在一定程度上代替传统的地面测量方法。

第三节 控制测量的基准面和基准线

1 铅垂线与大地水准面

地球上的任意一点,都同时受到两个力的作用:地球自转的离心力和地心引力,它们的合力称为重力,重力的方向即为铅垂线方向(见图 1-1)。

处于静止状态的水面,例如平静的湖泊水面,即表示一个水准面。水准面必然处处与重力方向(即铅垂线方向)垂直,否则水就要流动,处于运动状态。在地球引力起作用的空间范围内,通过任何高度的点都有一个水准面。

观测水平角时,置平经纬仪就是使仪器的纵轴位于铅垂线方向,从而使水平度盘位于通过度盘中心的水准面的切平面上。因此,所测的水平角实际上就是视准线在水准面上的投影线之间的夹角。此外,用水准测量所求出的两点间的高差,就是过这两点的水准面间的垂直距离。对于边长的观测值,也存在化算到哪个高程水准面上的问题。

上述 3 类地面观测值,除水平角外,都同水准面的选取有关,特别是水准测量的结果,更是直接取决于水准面的选择。于是,为了使不同测量部门所得出的观测结果能够互相比、互相统一、互相利用,有必要选择一个最有代表性的水准面作为外业成果的统一基准。

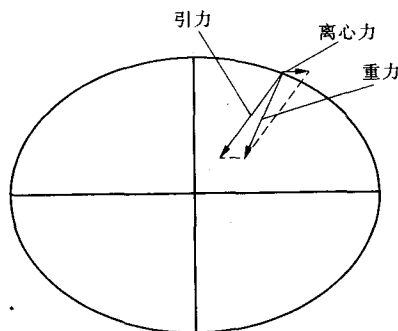


图 1-1 铅垂线方向

我们知道,海洋面积约占地球总面积的 71%,从总体上来说,海水面是地球上最广大的天然水准面。设想把平均海水面扩展,延伸到大陆下面,形成一个包围整个地球的曲面,则称这个水准面为大地水准面,它所包围的形体称为大地体。由于大地水准面的形状和大地体的大小均接近地球自然表面的形状和大小,并且它的位置是比较稳定的,因此我们选取大地水准面作为外业测量的基准面,而与其相垂直的铅垂线则是外业测量的基准线。

2 参考椭球与总地球椭球

如上所述,虽然大地水准面最适合于作为测量外业的基准面,但是控制测量的最终目的是精确确定控制点在地球表面上的位置,为此必须确知所依据的基准面的形状。也就是说,基准面的形状要能用数学公式准确地表达出来。大地水准面是否能满足这一要求呢?研究表明,大地水准面是略有起伏的不规则的表面,无法用数学公式把它精确地表达出来,因而也就不确知其形状。这是由于地表起伏以及地层内部密度的变化造成质量分布不均匀的缘故。例如图 1-2 中,高山的右侧是一片谷地,且山体下部有重金属矿体,因而造成左、右两侧局部质量分布的较大差异,以致左侧引力增加,铅垂线向左偏斜,大地水准面稍微隆起,如虚线所示,呈现出不规则的变化。

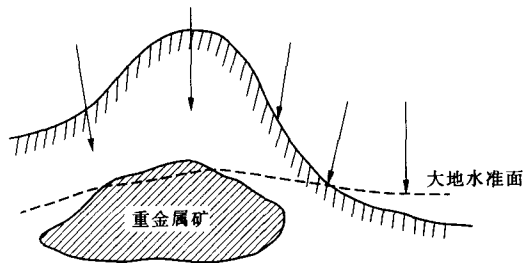


图 1-2 大地水准面的形状

随着科学技术的发展,人类逐渐认识到地球的形状极近于一个两极略扁的旋转椭球(一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体)。对于这个椭球的表面,可用简单的数学公式将它准确地表达出来,因而世界各国通常都采用旋转椭球代表地球。它的形状和大小与椭球的长短半径 a 、 b 有关,也可用和这两个量有关的其他量来表示。

选好一定形状和大小的椭球后,还不能直接在它上面计算点位坐标,这是因为我们的测量成果不是以这个表面为根据的,而应该首先将以大地水准面为基准的野外观测成果化算到这个表面上。要做到这一点只选定椭球面的形状和大小是不够的,还必须将它与大地水准面的位置关系确定下来,这个工作称为椭球定位。

综合以上所述,把形状和大小与大地体相近并且两者之间的相对位置确定的旋转椭球称为参考椭球。参考椭球面是测量计算的基准面。世界各国都根据本国的地面测量成果选择一种适合本国要求的参考椭球,因而参考椭球有许多个。这样确定的参考椭球在一般情况下和各国领域内的局部大地水准面最为接近,对该国的常规测绘工作较为方便。然而当我们将各国的测量成果联系起来进行国际间的合作时,则参考椭球的不同又带来了不便。因此,从全球着眼,必须寻求一个和整个大地体最为接近的参考椭球,称为总地