

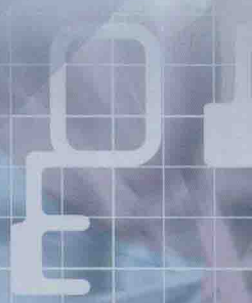


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国测绘地理信息职业教育教学指导委员会组织编写
第六届全国高等学校优秀测绘教材

控制测量学

(第3版)

杨国清 主编 吕志平 靳祥升 主审



黄河水利出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国测绘地理信息职业教育教学指导委员会组织编写
第六届高等学校优秀测绘教材

控制测量学

(第3版)

主 编 杨国清
副主编 张建军 刘仁钊
 邬 红 李捷斌
主 审 吕志平 靳祥升



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书讲述常规控制测量的理论和方法。内容包括:常规平面控制网和高程控制网的设计、选点、造标、埋石,全站仪、水准仪结构及其观测操作方法,控制测量计算理论及控制网的外业计算和控制网平差。书中内容注重了与时代的同步。

本书适用于高等院校测绘专业或测绘有关专业学生作控制测量学教材使用,也可供测绘工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制测量学/杨国清主编.—3版.—郑州:黄河水利出版社,
2016.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5509-1510-7

I. ①控… II. ①杨… III. ①控制测量-高等学校-教材
IV. ①P221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 183673 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:24

字数:581 千字

印数:1—4 000

版次:2005 年 9 月第 1 版

印次:2016 年 7 月第 1 次印刷

2010 年 7 月第 2 版

2016 年 7 月第 3 版

定价:39.00 元

全国测绘地理信息职业教育教学指导委员会 规划教材审定委员会

名誉主任 宁津生

顾问 陶本藻

主任 李赤一

副主任 赵文亮 李生平 李玉潮 易树柏 王久辉

委员 曾晨曦 张东明 张 凯 陈传胜 焦胜军

张晓东 张德栋 李 勇 李长青 郑 毅

刘军号 陈 忻 许辉熙 速云中 何沛峰

李孟山 田 文 李天和 袁建刚 李向民

全志强 魏垂场 薛雁明 邹自力 吴春笃

贺天柱 甄红锋 张 弘 赵 杰 来丽芳

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,我们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订了“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

宁津生

2005年7月10日于武汉

第3版前言

笔者主编的《控制测量学》(第2版)(黄河水利出版社,2010)出版发行之后,承蒙发行者的推介和使用者的厚爱,愿意使用该教材的各类学校和测绘工程技术人员越来越多,为此我们在第2版的基础上稍作修订改编,再次新版,以满足需要。

本教材主讲传统控制测量的理论和测量技术,与同类教材相比,本教材有自己的特色。书中完全抛弃了传统光学经纬仪的有关内容,只讲全站仪。教材的平面控制网部分,大体是以导线的布设、观测、计算为主轴展开叙述的。因为导线测量应先算三角高程,所以本教材将三角高程部分并入导线测量中叙述,以使导线测量的观测和计算的叙述更加完整和系统,从而有利于读者系统掌握。本书还简略地介绍了三角网和测边网的计算。由于建立地方和工程坐标系的需要越来越多,以及国家2000坐标系的启用和因此带来的坐标转换工作,本教材有专门介绍这方面内容的“地方坐标系和坐标转换”一章。考虑到我国已经在世界不少国家承包测绘工程任务,本次改编增加了通用墨卡托投影简介一节。

卫星定位测量是现今控制测量的主要方法,本应收入本教材,但因各校都将卫星定位测量作为一门单独的课程讲授并另配教材,本书未将卫星定位测量的内容纳入书内。

本书适用于高等院校测绘专业和相关专业学生作教材,书中带*号的内容为选学内容。本书也可作测绘工程技术人员参考之用。

本书由杨国清主编,张建军、刘仁钊、邬红、李捷斌为副主编,参加编写的还有许永朋、张予东、赵亚蓓。教材在编写的过程中,参考了兄弟院校及有关测绘单位的教科书和资料。辛少华、王军德、李明海、许云燕、孙树芳、益鹏举、张国华等对本书的编写给予了帮助,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,书中难免有缺点、错误、疏漏之处,诚请读者批评指正。

杨国清
2016年7月

第2版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是根据《国务院关于大力发展职业教育的决定》、教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,以及教育部对普通高等教育“十一五”国家级规划教材建设的具体要求组织编写的。

本书是在笔者主编的《控制测量学》(黄河水利出版社,2005)的基础上改编的。与同类教材相比,本书有自己的特色。本书完全抛弃了传统光学经纬仪的有关内容,只讲全站仪。本书的平面控制网部分,大体是以导线的布设、观测、计算为主轴展开叙述的。因为导线测量应先算三角高程,所以本书将三角高程部分并入导线测量中叙述,以使导线测量的观测和计算的叙述更加完整与系统,从而有利于读者系统掌握。本书还简略地介绍了三角网和测边网的计算。由于建立地方坐标系的需要越来越多,以及国家2000坐标系的启用和因此带来的坐标转换工作,本书增加了“地方坐标系和坐标转换”一章。除结构改动外,编写时还对内容作了较大修改、更新和补充,以使教材内容与时代同步。

卫星定位测量是现今控制测量的主要方法,本应收入本教材,但因各校都将卫星定位测量作为一门单独的课程安排,并另配教材,本书为适应此种情况,未将卫星定位测量的内容纳入书内。

本书适用于高等院校测绘专业和相关专业学生作教材,书中带*号的内容为选学内容。本书也可作测绘工程技术人员参考之用。

本书由杨国清主编,参加编写的还有张建军、刘仁钊、邬红、周建郑、王成余、许永朋、张予东。吕志平、靳祥升教授审阅了全书。本书在编写的过程中,参考了兄弟院校及有关测绘单位的教科书和资料。辛少华、王军德、李明海、许云燕、孙树芳、张国华等对本书的编写给予了帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点、错误、疏漏之处,诚请读者批评指正。

杨国清
2010年5月

第 1 版前言

本教材是在沈桂荣老师主编的《控制测量学》(测绘出版社,1995)的基础上改编的。书中增加的“电磁波测距仪和距离测量”一章则主要改编自李骏元老师所编《电磁波测距》(校内教材,1996)。此次改编幅度较大,将原书平面控制测量部分的以三角测量为主改成以导线测量为主。教材的平面控制网部分,大体是以导线的布设、观测、计算为主轴展开叙述的。因为导线测量应先算三角高程,因而,本教材将三角高程部分并入导线测量中叙述,以使导线测量的观测和计算的叙述更加完整和系统,从而有利于读者系统掌握。除此之外,本书还简略地介绍了三角网和测边网的计算;增加了“电磁波测距仪和距离测量”一章。除结构改动之外,编写时还对内容作了较大修改、更新和补充,以使教材内容与时代同步。

本书适用于职业学校(院)测绘专业学生作教材,书中带*号的内容为选学内容。本书也可作测绘工程技术人员参考之用。

本教材主要由杨国清主编,李明海参加了部分章节的编写。教材在编写的过程中,参考了兄弟院校及有关测绘单位的教科书和资料。李骏元审阅了全书,杨晓明、王军德、常万春等对本书的编写给予了帮助,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有缺点、错误、疏漏,诚请读者批评指正。

杨国清
2005 年 9 月

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第一章 绪 论	(1)
第一节 控制测量的任务和作用	(1)
第二节 建立控制网的基本方法	(3)
第二章 平面控制网的布设	(7)
第一节 国家平面控制网的布设原则和布设方案	(7)
第二节 工程平面控制网的布设原则和布设方案	(18)
第三节 平面控制网的技术设计	(19)
第四节 平面控制网的精度估算	(23)
第五节 平面控制网的选点、造标和埋石	(29)
第三章 电子全站仪	(37)
第一节 概 述	(37)
第二节 全站仪测角原理	(41)
第三节 全站仪的几项常规性调校	(47)
第四节 全站仪的三轴误差、指标差及补偿	(52)
第五节 电磁波测距原理	(60)
第六节 电磁波测距的测站改正计算	(68)
第七节 电磁波测距的误差分析和精度表达式	(72)
第八节 拓普康 GTS-332N 全站仪的使用	(77)
第九节 全站仪的检验校正	(88)
第四章 平面控制网外业观测	(103)
第一节 水平角观测的主要误差和操作的基本规则	(103)
第二节 方向观测法	(111)
第三节 垂直角观测	(119)
第四节 导线的边长观测和角度观测	(121)
第五节 归心改正和归心元素的测定	(126)
第五章 控制测量计算理论和导线测量概算	(134)
第一节 地球的形体和大地测量坐标系	(134)
第二节 椭球的一些计算用符号和曲率半径	(142)
第三节 三角高程测量计算公式	(149)
第四节 三角高程测量的计算	(154)
第五节 地面观测值归算至椭球面	(159)

第六节	高斯投影概述	(165)
第七节	椭球面元素化算到高斯平面	(169)
第八节	导线测量质量检验及上交资料	(178)
第九节	导线测量外业计算步骤及算例	(184)
*第六章	三角网三边网外业计算简介	(199)
第一节	三角网外业计算简介	(199)
第二节	三边网外业计算简介	(206)
第七章	地方坐标系和坐标转换	(211)
第一节	高斯投影换带计算	(211)
第二节	地方独立坐标系的建立	(212)
第三节	控制网坐标转换	(223)
第四节	平面控制网四参数坐标转换的实用做法	(227)
第八章	水准测量	(234)
第一节	高程基准面和高程系统	(234)
第二节	水准网的布设	(238)
第三节	水准仪和水准标尺的结构及要求	(244)
第四节	精密水准仪	(249)
第五节	电子数字水准仪	(257)
第六节	精密水准仪的检验与校正	(262)
第七节	精密水准标尺的检验与校正	(268)
第八节	水准测量误差及减弱其影响的措施	(274)
第九节	水准观测	(280)
第十节	水准测量外业计算	(290)
*第十一节	跨河水准测量	(301)
第十二节	电磁波测距高程导线测量	(312)
*第九章	控制网平差计算	(314)
第一节	测量平差基本数学模型和公式	(314)
第二节	高程网条件平差及算例	(321)
第三节	导线网条件平差及算例	(326)
第四节	高程网参数平差及算例	(336)
第五节	平面控制网参数平差——坐标平差	(340)
第六节	边角网(导线网)按方向坐标平差算例	(349)
第七节	带有约束条件的参数平差及算例	(357)
参考文献		(367)

第一章 绪 论

第一节 控制测量的任务和作用

在一定的区域内,按测量任务所要求的精度,测定一系列地面标志点(控制点)的水平位置和高程,建立起控制网,这种测量工作称为控制测量。测定控制点水平位置的工作叫平面控制测量。测定控制点高程的工作叫高程控制测量。所以,控制测量是由平面控制测量和高程控制测量组成的。

广义的控制测量包括大地控制测量和工程控制测量。在全国广大的区域内,按照国家统一颁发的法式、规范进行的控制测量称为大地控制测量,这样建立起的控制网叫国家大地控制网。大地控制网中的点,叫大地控制点。为了某项工程建设或施测局部大比例尺地形图的需要,在较小的地区范围内,在大地控制网的基础上独立建立的控制网,叫工程控制网,这种控制测量称为工程控制测量。狭义的控制测量即指工程控制测量。

研究建立国家大地控制网的理论、方法的科学称为大地测量学。研究建立工程控制网的理论、方法的科学称为控制测量学。

一、大地测量的任务和作用

大地测量直接、基本的任务是在广大区域上精密测定一系列地面标志点的位置(点的水平坐标和高程),建立精密的大地控制网。精密的大地控制网可以为地形测图提供控制基础,为研究地球形状和大小提供资料。一般认为,前者是它的主要技术任务,后者是它的主要科学任务。

(一)为地形测图和大型工程测量提供基本控制

大地控制网从以下三个方面体现控制地形测图:

第一,控制测图误差,保证地形测图的精度。测图中每描绘一条方向线、量一段距离,都会产生误差。这种误差在大面积测图中将逐渐传递积累,使地形、地物在图上的位置产生大的误差,并使相邻图幅不能接合。如果以大地控制点控制测图,可以把误差限制在各大地控制点和图根点之间,这就保证了地形、地物在地图上的位置足够精确(即保证了地图的精度),并且相邻图幅自然可以接合。

第二,把地球表面(球面)上的地形、地物测绘成平面图,并控制由此产生的误差。地球接近于旋转椭球体,其表面是不可展曲面。若硬性展平就会出现变形和裂口等现象,即用一般方法不能把球面上的地形测绘在平面图上。但是,大地控制点在一定旋转椭球面上的位置(坐标)是可以精密确定的,并且可以按一定的数学方法把它换算为投影平面上的点位,而后就可以把地球表面地形测绘在平面图上并控制测图误差,使地图能够拼接而不产生明显的变形和裂口。

第三,使各地的测图工作可以同时开展,并保证所测各图幅可以互相拼接。由于大地控

制点的坐标系统是全国统一的,这样,不管在任何地区同时或先后开展测图工作,都不会出现相互重叠或不能拼接的现象。

(二)为研究地球形状、大小和其他科学问题提供资料

地球形体接近于旋转椭球,因此研究地球的形状、大小,就是要确定旋转椭球的长半径 a 和短半径 b ,或长半径 a 与扁率 $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。要确定 a 、 α ,必须综合利用大地测量、天文测量和重力测量的资料才能实现。所以,为研究地球形状、大小提供资料是大地测量的主要科学任务。应该指出的是,大地测量为确定地球的 a 、 α 提供资料,而 a 、 α 又反过来作为大地测量成果计算的必要数据,这是个相辅相成的问题。此外,地震预报、研究地壳变形、各个海水面的高差和地极周期性运动等科学问题,也要求大地测量提供资料。

(三)为空间科学技术和军事需要提供保障

大地测量可以提供精确的点位坐标、点间距离与方位、地球重力场资料或确定基本控制点相对于地球质量中心的空间坐标,以便为人造天体、远程武器的发射及其轨道的确定提供必要的资料。

二、工程控制测量的任务和作用

工程控制测量的服务对象是各种工程建设、城镇建设和土地规划与管理工作的,另外还有各种变形监测工作。工程控制测量的任务和作用主要表现在以下三个方面。

(一)建立用于测绘大比例尺地形图的测图控制网

城镇建设、土地规划与管理等需要有大比例尺的地形图、地籍图。另外,在工程建设的设计阶段,工程人员也需要在大比例尺地形图上进行区域规划和建筑物的设计,并在地形图上获得设计所依据的各项数据。为此需要先建立工程所涉及区域的区域控制网,以保证大比例尺地形、地籍测图的需要。

(二)建立服务于施工放样的施工控制网

在工程建筑施工时,工程人员要将图纸上设计的建筑物,例如水库大坝、隧道桥梁、房屋建筑等放样到实地上去。放样过程中,仪器所安置的方向、距离都是依据控制网计算出来的,因而在施工放样之前,需要建立必要精度的施工控制网。

(三)建立服务于变形监测的变形控制网

大型水库、桥梁、高大建筑物在建成之后,由于各种应力的变化可能引发地层基础和建筑物本身的变形、倾斜等变化。若这种变形变化过大,会影响工程建筑物的正常运转使用,甚至危及建筑物和人民生命财产的安全。因此,一些重要工程建筑物竣工后需布设变形控制网,用以长期监测工程建筑物及其地基地层的变形。另外,大城市的地面沉降、地质断层的位移都需布设变形控制网进行监测。变形监测网一般需具有较高的精度。

以上所述的施工控制网和变形监测网统称为专用控制网。

控制测量学的主要内容是研究建立控制网的理论和方法。它和大地测量学的主要区别是:控制测量学研究的对象是工程控制网,而大地测量学研究的对象为国家控制网。工程控制网与国家控制网又有相同和不可分割的地方,如国家控制网中的三、四等控制点,它本身就是为工程建设及测量地形图服务的;控制测量中的二、三、四等控制测量又基本上是按大地测量的理论、方法和精度施测的。因此,控制测量学和大地测量学所讨论的内容在很多方

面是相同的。当然,二者又是有区别的,大地测量学重点研究一、二等控制问题,控制测量学着重研究专用控制网和工程控制网的建立问题。

第二节 建立控制网的基本方法

控制测量是由平面控制测量和高程控制测量组成的。平面控制测量是通过建立平面控制网,以确定地面点在地球椭球面上或某一投影平面上的位置;高程控制测量是通过建立高程控制网,以确定地面点的高程——地面点至某一基准面的距离。控制测量的方法可以归纳为两类:常规地面测量和卫星定位测量。

一、建立平面控制网的常规地面测量方法

(一)三角测量

在地面上,按一定的要求选定一系列的点(三角点),以三角形的图形把它们连接起来,构成地面上的三角网或锁。每一个点设置测量标志,精确地观测所有三角形的内角,并至少测定三角网或锁中一条边的长度和天文方位角,用一定的投影计算公式,将这些观测成果化算到某一投影面上,使地面上的三角锁或网转化为投影平面上的三角锁或网,如图 1-1 所示。以化算后的平面边长 D 为起始边,用平面三角形的正弦定理,依次解算各个三角形,算出所有的边长 D_{ij} ;以化算后的平面坐标方位角 T_{AB} 为起始坐标方位角,用化算后的平面角,依次推算出各边的平面坐标方位角 T_{ij} 。

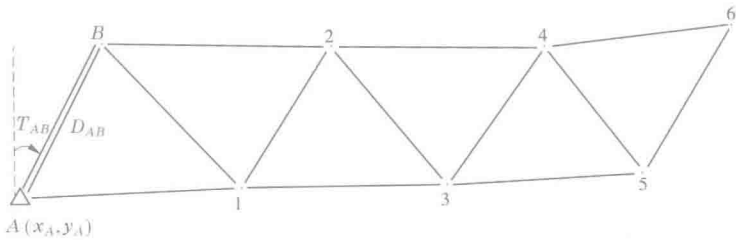


图 1-1 三角测量示意图

利用公式

$$\begin{cases} \Delta x_{ij} = D_{ij} \cos T_{ij} \\ \Delta y_{ij} = D_{ij} \sin T_{ij} \end{cases} \quad (1-1)$$

算出各相邻点间的坐标增量 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 。以已知点 A 的平面直角坐标 x_A 、 y_A 和坐标增量 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} ,逐点算出各点的平面直角坐标 x_i 、 y_i 。以上是三角测量的基本原理。

在电磁波测距仪和卫星定位测量方法被广泛使用以前,三角测量是主要的平面控制网建网方法。我国 1984 年完成平差的国家天文大地网的主体形式就是三角锁或网。但三角网由于需多方向通视,并常常需建立高标,且耗时、费力,成本高,现已基本不再采用三角测量法布设新网,代之的是卫星定位网和导线网。

(二)导线测量

在地面上,按一定的要求,选定一系列的点(导线点),以折线的形式将它们连接起来,构成导线。每个点都设置测量标志,用测距仪器测量各个导线边的长度,用经纬仪在各导线点上测量相邻导线边的水平夹角,并至少在导线一端测定出一条导线边的天文方位角(或

已知其平面直角坐标方位角)。然后按一定的投影公式,将地面观测结果化归到投影平面上,使地面上的导线转化成投影平面上的导线。如图 1-2 所示。

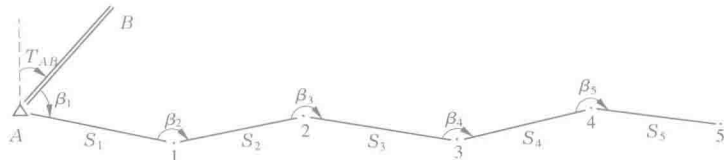


图 1-2 导线测量示意图

以已知的 AB 边的平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角,用化归后的各转折角的平面角值依次推算出各导线边的平面坐标方位角 T_{ij} ,用化归后的导线平面边长 D_{ij} 和算得的平面坐标方位角 T_{ij} ,依式(1-1)算出各相邻导线点间的坐标增量 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} ,然后根据起始点 A 的已知平面坐标 x_A 、 y_A 和坐标增量 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 逐一推算出各个导线点的平面直角坐标 x_i 、 y_i 。以上是导线测量的基本原理。

导线测量的优点是:呈单线布设,坐标传递迅速;只需前后两个相邻导线点通视,易于越过地形、地物障碍,布设灵活;各导线边均直接测定,精度均匀;导线纵向误差较小。缺点是:控制面积小,检核观测成果质量的几何条件少,横向误差较大。因此,在不易进行三角测量的地区和隐蔽地区,一般用导线测量方法建立平面控制网。我国的传统天文大地网就是以三角测量为主、以导线测量为辅的方法建立的。

随着电磁波测距仪的普及应用,导线测量已成为常规地面测量建网的主要方法。

(三)三边测量法

三边测量与三角测量的不同之处,仅在于三角测量需要观测所有三角形的各个内角;而三边测量法需要测定所有三角形的全部边长,根据三角学的原理由测定的三角形边长计算出各个三角形的三个内角,其他与三角测量法完全相同。

三边测量的缺点,也是要求多方向同时通视,而且检核条件太少,例如一个中点多边形只有一个检核条件。由于这些原因,纯三边网在实践中应用不多。

(四)边角同测法

在三角网或锁中,除按三角测量的方法用经纬仪观测所有三角形的全部内角外,还用测距仪器测定网或锁中的全部三角形的边长,用以计算出各个三角点的坐标,这种布设控制网的方法称为边角同测法。

边角同测法一般应用于高精度专用控制网,例如高精度变形监测网。

二、建立高程控制网的常规地面测量方法

(一)几何水准测量

几何水准测量是建立国家高程控制网的主要方法。它的基本原理是:利用水准仪的水平视线读取竖直放置在水准仪前后两地面点上的水准标尺之分划线,求得两地面点间的高差,进而逐点推算出地面点的高程。

几何水准测量的优点是精度较高,如一等水准测量的每千米偶然中误差不超出 ± 0.45 mm;测得的高程以大地水准面(严格地说是似大地水准面)为基准面,具有物理意义,能够较好地为建设服务。因此,几何水准测量被广泛采用。

(二)三角高程测量

三角高程测量的基本原理是:测定地面上两点间的距离和垂直角,依三角公式计算出两点间的高差,进而求得地面点的高程。三角高程测量作业简单,布设灵活,不受地形条件的限制。其缺点是:由于大气垂直折光的影响,垂直角观测值含有较大的误差,使得测定的高差或高程精度较低。因此,三角高程测量虽然在高程控制中得到大量应用,但必须有足够数量的直接高程点(即用几何水准测量法测定其高程的点)作为其高程起算点,以满足测绘国家基本比例尺地形图对高程控制的精度要求。

近年来,随着电磁波测距仪的完善与普及,电磁波测距三角高程测量和电磁波测距高程导线已经引起测量界的重视,并得到了应用。电磁波测距三角高程导线的精度可以达到四等水准的精度。

国家水平大地控制网和高程控制网虽是各自单独建立的,建立方法也不相同,但它们之间存在密切的联系。首先,对于决定地面点的位置来说,两控制网缺一不可,在计划布设平面控制网的同时,就要考虑布设高程控制网问题。其次,水准网虽是单独建立的,但在平原地区,一些平面控制点则直接与水准点重合。三角高程网则直接与平面控制网重叠在一起,而且它需要平面控制网的边长数据。

三、卫星定位测量

卫星定位测量是利用卫星定位接收机接收定位卫星发射的无线电信号,并通过一定的数据处理而获得测站位置的测量方法。目前,正在运行的卫星定位系统有美国的 GPS 定位系统和俄罗斯的 GLONASS 定位系统。下面以应用广泛的 GPS 系统为例简介卫星定位方法。

全球定位系统(GPS)是美国军方开发的全球性、全天候、连续的无线电卫星导航定位系统,原为美国军方服务,后部分功能向民用用户开放。经过多年的研究开发,GPS 应用于民用定位测量的技术不断发展完善。在控制测量方面,GPS 定位测量因其具有精度高、速度快、成本低的显著优点,已经迅速成为控制测量,特别是平面控制测量的主要方法。而相应地,传统控制测量方法则主要在 GPS 无法施展的地方和领域,以及作为 GPS 网的进一步加密,发挥着不可替代的作用。

GPS 定位系统由空间卫星星座、地面监控系统和用户接收设备三部分构成。

根据原设计,GPS 定位系统的空间卫星星座由 24 颗卫星组成,其中包括 3 颗备用卫星。卫星高度约为 20 200 km。24 颗卫星分布在 6 个等间隔的轨道面上,轨道面相对赤道面的夹角为 55° ,每个轨道面上有 4 颗卫星,相邻轨道面的邻近卫星的相位相差 30° 。卫星轨道为近圆形,运行周期约 11 h 58 min。卫星分布如图 1-3 所示。这样的卫星分布,除个别地区的不长时间外,可以保证全球任何地区、任何时刻都有不少于 4 颗卫星可供观测。这就提供了在时间上连续的全球导航能力。

前期的 GPS 卫星发播两个频率的载波无线电信号, $L_1 = 1\,575.42\text{ MHz}$, $L_2 = 1\,227.6\text{ MHz}$ 。在 L_1 载波上调制有 1.023 MHz 的伪随机噪声码(称粗捕获码,或称 C/A 码)和 10.23 MHz 的伪随机噪声码(称精码,或称 P 码),以及每秒 50 bit 的导航电文。在 L_2 载波上只调制有精码和导航电文。粗捕获码可用于低精度测距过渡到捕获精码。精码用于精密测距。

经过多年的发展,现在实际在轨运行的卫星已超过 30 颗,后来发射的卫星在 L_2 载波上增加了 C 码,并增加了新的 L_5 载波($f = 1\,176.45\text{ MHz}$),用于民航安全。地面监控部分包括 5 个监控站、3 个注入站和 1 个主控站。监控站的主要任务是取得卫星观测数据并将这些数

据传送至主控站。主控站的主要任务是收集监控站对 GPS 卫星的全部观测数据,利用这些数据计算每颗 GPS 卫星的轨道和卫星钟改正值,依此外推 1 天以上的卫星星历及钟差,并按一定格式转化为导航电文,以便由注入站注入卫星的存储器。注入站的主要任务是,在每颗卫星运行至上空时把这类导航数据及主控站的指令注入卫星。

用户接收机的主要功能是接收卫星发播的信号,并利用本机产生的伪随机噪声码取得距离观测量和导航电文;根据导航电文提供的卫星位置和钟差改正信息,就可计算接收机的位置,即测站点坐标。

GPS 卫星定位测量的几何原理是距离交会。观测时刻的卫星坐标可通过导航信息获得,即卫星相当于已知坐标点,因而接收机观测到至少 3 颗卫星的距离 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 (见图 1-4),就可以用距离交会法获得测站点的坐标。当然,实际测量时考虑到接收机时钟有偏差,要同时观测 4 颗以上卫星,以便解出测站的三维直角坐标 x 、 y 、 z 和接收机钟差 δt 四个未知数。

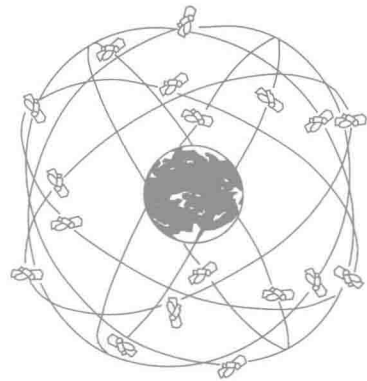


图 1-3 GPS 卫星分布示意图

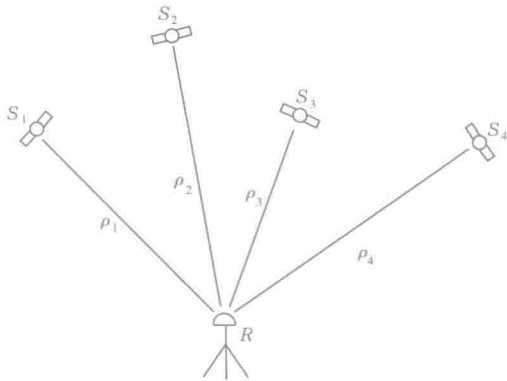


图 1-4 GPS 定位的几何原理

用户接收机还可进行载波相位观测。利用两个测站同步观测的相位观测值进行相对定位,即求测站间的空间坐标差 Δx 、 Δy 、 Δz ,以达到几厘米的水平定位精度。

这里再简单介绍一下我国的北斗全球卫星导航定位系统(BDS)。按照设计,北斗卫星系统有 35 颗卫星,其中 5 颗地球静止轨道卫星(GEO),3 颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO),27 颗中圆轨道卫星(Non - GEO)。北斗卫星导航系统主要具有快速定位(导航)、短报文通信和定时授时三大功能,短报文通信是 GPS 系统所不具有的。BDS 系统提供两种服务方式:开放服务和授权服务。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为 10 米,授时精度为 50 纳秒,测速精度为 0.2 米/秒。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。北斗系统 2012 年正式向亚太大部分地区提供服务,已产生广泛的经济和社会效益。2015 年 3 月 30 日,已发射了用于全球组网的新一代卫星,将于 2020 年实现全球覆盖,提供全球导航定位服务。

顺便指出,本书的目的旨在讲述传统控制测量的理论和方法,卫星定位测量的有关内容不在本书讲述的范围之内。

第二章 平面控制网的布设

本章讲述平面控制网的布设,至于高程控制网的布设则在第八章叙述。本章内容涉及平面控制网的布设原则、布设方案;平面控制网的技术设计、精度估算;平面控制网的选点、造标埋石。鉴于高等级的平面控制已被卫星定位测量代替,三角网已基本不再布设,本章的实用平面控制网布设部分,主要讲述导线网的布设。导线网的观测、计算则在以后的章节讲述。

第一节 国家平面控制网的布设原则和布设方案

如前所述,平面控制网分为国家平面控制网和工程平面控制网。本节先介绍国家平面控制网的布设原则和布设方案。

一、国家平面控制网布设原则

在一个国家范围内,按照国家统一颁布的国家标准、规范建立的统一坐标系统的平面控制网称为国家平面控制网。我国现有的国家平面控制网包括新型的国家卫星大地测量网和传统的用三角测量、导线测量及天文测量法建立的国家天文大地网,简称国家三角网。现时正是国家传统平面控制网向卫星大地测量网逐步过渡转换的时期。

建立我国的国家平面控制网必须全面考虑我国的实际情况,充分应用已有技术、装备、理论和实际经验,正确处理质量、数量、时间和经费之间的辩证关系,拟定具体的原则。根据建立国家平面控制网的目的任务,考虑上述因素,建立国家平面控制网应遵循下面一些主要指导原则。

(一) 分级布设,逐级控制

我国领土广阔,建立国家大地控制网只能采用从高级到低级分级布设的方法,就是先在全国范围内布设精度高而密度较稀的首级控制网,作为统一的控制骨架;再根据各个地区建设的需要,分期分批逐次加密控制网,密度逐级增大,精度逐级降低。这种布设方法是在统一的坐标系和高程系中,按不同地区有先有后布设其余各级控制网的,这样既能满足精度需要,又能达到快速、节约的目的。

1. 新的国家大地控制网

我国 2008 年颁布的《国家大地测量基本技术规定》中规定,我国大地控制网按照精度和用途分为一、二、三、四等大地控制网。大地控制网以卫星大地测量的方法建立。

国家一等大地控制网由卫星定位 GNSS 连续运行基准站构成,它是国家大地基准的骨干和主要支撑,以实现和维持我国三维、动态地心坐标系统,保证大地控制网点位三维地心坐标的精度和现势性。国家一等大地控制网站间距按 150 ~ 200 km 布设。

国家二等大地控制网在国家一等大地控制网的基础上加密布设。平均站间距,中东部地区按约 50 km 布设,西部地区按约 80 km 布设。二等大地控制网为三、四等大地控制网和