

全国高等院校测绘专业规划教材

免费赠送
PPT电子课件
及习题答案

控制测量学

主 编 王 岩
副主编 刘茂华 钱如友 周保兴 杨立君

- 吸纳同类教材精华，内容全面
- 配备各类精选习题，易学易用
- 应用全新规范标准，推陈出新



清华大学出版社

全国高等院校测绘专业规划教材

控制测量学

主 编 王 岩

副主编 刘茂华 钱如友 周保兴 杨立君

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了控制测量学的基础理论与基本方法,全书共分为9章,分别从控制测量的基准、地球椭圆与坐标系统的基本知识、控制网的技术设计与实施、控制测量数据处理的方法、GNSS的基础知识等方面对控制测量工作所涉及的知识进行系统的阐述。

本书由沈阳建筑大学、滁州学院、山东交通学院、南京邮电大学、大连金源勘测技术有限公司“四校一企”联合编写,充分将理论知识与生产实践相结合,侧重于理论的应用,适合作为普通高校测绘工程专业的教材,也可作为测绘工作者的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制测量学/王岩主编. —北京:清华大学出版社,2015
(全国高等院校测绘专业规划教材)

ISBN 978-7-302-39801-1

I. ①控… II. ①王… 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(2015)第 080954 号

责任编辑:张丽娜

装帧设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:17.25

字 数:419千字

版 次:2015年8月第1版

印 次:2015年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:35.00元

前 言

控制测量是测量工作中最为重要的环节之一，它直接决定着测量成果的准确性与可靠性。控制测量是一项复杂的、系统的工作，由于采用的方法和控制网所要求的等级不同，从而使控制测量工作从外业到内业都有较大的区别。所以，从理论到实践都对测绘专业的学生或测量从业者提出了较高的要求，需要深入学习与探讨。因此，历久以来，控制测量学都是测绘工程专业的一门主干课程，在专业课程体系中具有重要的地位，发挥着重要的作用。

本书从内容上按照控制测量工作的流程分为四大部分，共9章。第一部分为第1~3章，重点阐述控制测量工作的基本内容、控制测量的基准、地球椭球与坐标系统的基本知识；第二部分为第4~6章，详细阐述平面控制网和高程控制网的技术设计、布设与实施的方法；第三部分为第7~8章，详细阐述控制测量的计算内容与方法；第四部分为第9章，重点介绍目前控制测量的主要方法，即GNSS测量的基本知识。

本书由沈阳建筑大学、滁州学院、山东交通学院、南京邮电大学、大连金源勘测技术有限公司“四校一企”联合编写，将四所高校多年来控制测量学课程教学中所遇到的问题与企业生产实践中的具体要求紧密结合，使本书更具有针对性。

本书各章编写人员如下：

第1章由沈阳建筑大学王欣老师和孙立双老师共同编写；第2章由沈阳建筑大学王岩老师和王井利老师共同编写；第3章由南京邮电大学杨立君老师编写；第4章由沈阳建筑大学刘茂华老师编写；第5章由沈阳建筑大学王岩老师编写；第6章由滁州学院钱如友老师编写；第7章由滁州学院钱如友老师和王延霞老师共同编写；第8章由山东交通学院周保兴老师编写；第9章由大连金源勘测技术有限公司于树良工程师编写。

全书由王岩负责整体组织工作，刘茂华负责统稿工作，钱如友和周保兴负责核对工作。

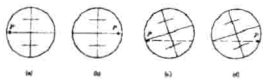
本书在编写过程中参考了已有的相关书籍、资料、规范等，已在参考文献中详细列出，但是在网络上公开的部分高校的精品课程、网络上容易查找而无准确出处的资料等没有详细列出，谨在此对所有参考资料的作者表示衷心的感谢。

本书可作为普通高等院校测绘工程专业学生教材使用，也可供测量从业者阅读和参考。由于编者水平有限，本书中难免会存在错误和不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论.....	1	2.4.2 大地线的基本知识.....	26
1.1 控制测量学的基本概念.....	1	习题.....	27
1.1.1 控制测量学的定义与分类.....	1	第 3 章 坐标系统的建立与转换.....	28
1.1.2 控制测量学的任务与作用.....	1	3.1 椭球面上的坐标系.....	28
1.2 控制网的布设方法.....	3	3.1.1 椭球面上坐标系的建立.....	28
1.2.1 平面控制网的布设方法.....	3	3.1.2 坐标系之间的相互关系.....	29
1.2.2 高程控制网的布设方法.....	6	3.2 地球的运转与时间系统.....	31
1.3 控制测量学的发展概况.....	7	3.2.1 地球的运转.....	31
1.3.1 测量技术的发展.....	7	3.2.2 时间系统.....	33
1.3.2 数据计算与管理方法的发展.....	9	3.3 参考系的定义与分类.....	36
1.3.3 我国控制测量技术的发展.....	10	3.3.1 参考系的分类.....	36
习题.....	11	3.3.2 大地测量参考框架.....	36
第 2 章 地球椭球的基本知识.....	12	3.4 参心坐标系.....	37
2.1 地球椭球的概念.....	12	3.4.1 参心坐标系的建立.....	37
2.1.1 大地水准面与似大地水准面.....	12	3.4.2 椭球的定位与定向.....	37
2.1.2 地球椭球、参考椭球和总地球 椭球.....	13	3.4.3 大地原点的确定.....	39
2.1.3 大地高、正高、正常高与垂线 偏差.....	14	3.4.4 代表性的参心坐标系.....	40
2.2 地球椭球的基本参数及相互关系.....	15	3.5 地心坐标系.....	42
2.2.1 地球椭球的基本参数.....	15	3.5.1 地心坐标系的产生与分类.....	42
2.2.2 椭球参数的相互关系.....	17	3.5.2 地心坐标系的建立.....	43
2.3 椭球面上的计算.....	17	3.5.3 代表性的地心坐标系.....	43
2.3.1 子午圈曲率半径的计算.....	18	3.6 站心坐标系.....	45
2.3.2 卯酉圈曲率半径的计算.....	19	3.6.1 垂线站心直角坐标系.....	45
2.3.3 任意方向法截线的曲率半径.....	20	3.6.2 法线站心直角坐标系.....	45
2.3.4 平均曲率半径及相互关系.....	21	3.7 坐标系统的转换.....	46
2.3.5 子午线弧长的计算.....	21	3.7.1 空间直角坐标系之间的转换.....	46
2.3.6 平行圈弧长的计算.....	22	3.7.2 不同大地坐标系的转换.....	48
2.3.7 椭球面上梯形面积的计算.....	23	3.7.3 站心坐标系的转换.....	49
2.4 大地线.....	25	习题.....	51
2.4.1 相对法截线.....	25	第 4 章 控制网的技术设计.....	53
		4.1 国家平面控制网的布设方案与原则.....	53
		4.1.1 国家平面控制网的布设原则.....	53



4.1.2	国家平面控制网的布设方案	56	5.2.4	周期误差的测定	107
4.2	工程平面控制网的布设原则与方案	60	5.2.5	仪器常数的测定	110
4.2.1	工程平面控制网的布设原则	60	5.3	水平角观测	113
4.2.2	工程平面控制网的布设方案	62	5.3.1	方向观测法	114
4.2.3	工程平面控制网的布设实例	63	5.3.2	测站限差要求	115
4.3	平面控制网的技术设计	66	5.3.3	超限成果的取舍与重测	116
4.3.1	资料的收集与分析	66	5.3.4	测站平差	117
4.3.2	控制网的图上设计	66	5.3.5	分组方向观测法	117
4.3.3	控制网的优化设计	68	5.4	精密测角的误差来源与注意事项	118
4.3.4	平面控制网技术设计书的 编制	71	5.4.1	仪器误差	118
4.4	平面控制网的踏勘选点与标石埋设	72	5.4.2	外界条件的影响	119
4.4.1	踏勘选点	72	5.4.3	观测误差的影响	122
4.4.2	标石埋设	73	5.4.4	精密测角的基本原则	122
4.5	高程基准	74	5.5	精密距离测量	123
4.5.1	高程基准面	74	5.5.1	精密距离测量的基本原则	123
4.5.2	水准原点	75	5.5.2	气象改正	124
4.5.3	水准面的不平行性及其影响	76	5.5.3	仪器常数误差改正	124
4.5.4	高程系统	77	5.5.4	归算改正	125
4.6	高程控制网的布设原则与方案	79	5.6	精密测距的误差分析	127
4.6.1	国家高程控制网的布设原则与 方案	80	5.6.1	测距误差的来源	127
4.6.2	城市和工程建设高程控制网的 布设	81	5.6.2	测距精度的估算	127
4.7	高程控制网的设计、选点与埋石	83	5.7	偏心观测与归心改正	128
4.7.1	高程控制网的技术设计	83	5.7.1	测站点偏心观测及归心 改正	129
4.7.2	水准路线的选择与点位的 确定	84	5.7.2	照准点偏心观测及归心 改正	130
4.7.3	水准点标石的埋设	86	5.7.3	归心元素的测定	132
习题		87	习题		134

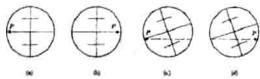
第5章 平面控制网的布设与实施 89

5.1	全站仪的基本原理	89
5.1.1	全站仪的测角原理	89
5.1.2	全站仪的测距原理	91
5.2	电子全站仪的检验	99
5.2.1	视准轴误差的检验	99
5.2.2	水平轴误差的检验	102
5.2.3	垂直轴误差的检验	105

第6章 高程控制网的布设与实施 135

6.1	精密水准仪与精密水准尺	135
6.1.1	精密水准仪的特点	135
6.1.2	精密水准尺的特点	136
6.1.3	自动安平精密水准仪	137
6.1.4	电子水准仪	139
6.2	精密水准仪与水准尺的检验	139
6.2.1	精密水准仪的检验	139
6.2.2	精密水准尺的检验	143
6.3	精密水准测量的实施	144

6.3.1	二等水准测量	145	7.4.1	高斯投影概述	180
6.3.2	二等水准测量的精度评定	148	7.4.2	高斯投影的分带	181
6.4	精密水准测量的误差来源与 注意事项	149	7.4.3	高斯平面直角坐标系的 建立	182
6.4.1	仪器误差	150	7.4.4	高斯投影计算内容	183
6.4.2	自然条件的影响	152	7.4.5	高斯投影正反算与邻带 换算	184
6.4.3	观测误差	154	7.5	将椭球面元素归算至高斯平面	192
6.5	精密三角高程测量	155	7.5.1	子午线收敛角	192
6.5.1	三角高程测量概述	155	7.5.2	方向改化	194
6.5.2	垂直角的观测与指标差的 计算	155	7.5.3	距离改化	197
6.5.3	球气差的影响与测定	156	7.6	工程控制网常用的坐标系	199
6.5.4	精密三角高程测量的精度 分析	157	7.6.1	长度综合变形	200
6.6	跨河高程测量	158	7.6.2	国家统一坐标系统的 局限性	201
6.6.1	跨河水准测量	158	7.6.3	工程测量平面控制网平差 基准的选择方法	201
6.6.2	GNSS 跨河高程测量	165	7.6.4	工程控制网中坐标系统的 选择	203
6.7	水准测量概算	166	习题		206
6.7.1	水准标尺尺长误差及改正数的 计算	168	第 8 章 工程控制网的数据处理		207
6.7.2	水准面的不平行性及改正数的 计算	168	8.1	控制测量概算	207
6.7.3	水准路线闭合差的计算	168	8.1.1	概算的准备工作	207
6.7.4	高差改正数的计算	169	8.1.2	观测成果化至标石中心	208
习题		169	8.1.3	观测值化至椭球面	209
第 7 章 将地面观测成果归算至 高斯平面		170	8.1.4	椭球面上的观测值化至高斯 平面的计算	212
7.1	将地面观测值归算至参考椭球面	170	8.1.5	控制网几何条件检查	212
7.1.1	水平方向观测值的归算	170	8.1.6	资用坐标计算	214
7.1.2	距离观测值的归算	172	8.2	工程控制网的条件平差	214
7.2	地图投影的基本知识	173	8.2.1	条件平差的基本数学模型	214
7.2.1	地图投影的实质	174	8.2.2	平面控制网的条件方程式	215
7.2.2	地图投影的变形	174	8.2.3	高控制网的条件方程式	222
7.2.3	地图投影的分类	175	8.2.4	水准网条件平差算例	223
7.3	椭球面到平面的正形投影	176	8.3	工程控制网的间接平差	226
7.3.1	正形投影的特点	176	8.3.1	间接平差的数学模型	226
7.3.2	正形投影的一般条件	176	8.3.2	高程控制网的间接平差	227
7.4	高斯投影	179	8.3.3	平面控制网参数平差	228



习题.....	241	9.4.2 与信号传播有关的误差.....	253
第9章 全球导航卫星系统(GNSS)的 基本知识.....	242	9.4.3 与接收机有关的误差.....	255
9.1 概述.....	242	9.5 GNSS 测量的实施.....	256
9.2 GNSS 的构成.....	243	9.5.1 GNSS 级别划分与测量精度 ...	256
9.3 GNSS 卫星定位原理.....	245	9.5.2 网形设计与选择.....	257
9.3.1 伪距法定位.....	245	9.5.3 GNSS 网的踏勘、选点与 埋石.....	259
9.3.2 载波相位法定位.....	246	9.5.4 GNSS 外业观测.....	261
9.3.3 绝对定位.....	247	9.6 GNSS 的数据处理.....	263
9.3.4 相对定位.....	248	9.6.1 数据的预处理.....	263
9.3.5 差分定位.....	250	9.6.2 GNSS 测量的重测和补测.....	264
9.3.6 载波相位实时动态差分 定位(RTK).....	251	9.6.3 基线向量解算.....	265
9.3.7 连续运行卫星定位服务综合 系统(CORS).....	251	9.6.4 基线向量网的平差.....	266
9.4 GNSS 测量的误差来源与解决方案.....	252	9.6.5 坐标系统的转换.....	267
9.4.1 与卫星有关的误差.....	252	习题.....	267
		参考文献.....	268

第1章 绪 论

控制测量是科学研究、工程建设的基础性工作，其精度的高低直接决定着国家基准、工程项目的准确与否。控制测量工作在不同的阶段有着不同的工作内容与要求，应该根据国家控制网的等级、工程建设的进度，选择合适的方法。

1.1 控制测量学的基本概念

1.1.1 控制测量学的定义与分类

“从整体到局部，先控制后碎部”是测量工作的基本原则，其中，“控制”指的就是控制测量。控制测量是测绘工作中最为重要的环节之一，在测绘工作，乃至整个工程中都发挥着重要的作用。所谓控制测量，是指在一定区域内，按测量任务所要求的精度，测定一系列地面标志点(控制点)的水平位置或高程，建立平面控制网或高程控制网的测量工作。

在进行控制测量工作时，需要以数学、测量学、测量平差、大地测量学等学科为基础，共同为建立控制网、测定地面点位而服务，由此形成控制测量学。

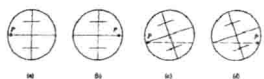
控制测量学是研究精确测定和描绘地面控制点空间位置及其变化的学科。控制测量学是在大地测量学基本理论基础上，以工程建设和社会发展与安全保证的测量工作为主要服务对象而发展和形成的，为人类社会活动提供有用的空间信息。因此，从本质上说，它是地球工程信息学科，是地球科学和测绘学中的一个重要分支，是工程建设测量中的基础学科，也是应用学科。在测量工程专业人才培养中占有重要的地位。

控制测量按照工作用途分类可以分为大地控制测量和工程控制测量两类：在一个或几个国家及至全球范围内布设足够的大地控制点，将这些大地控制点以一定的关系连接构成大地控制网，按照统一的规程、规范所进行的控制测量，称为大地控制测量；为了某项工程的设计、施工、运营管理等需要，在较小区域内布设足够的控制点，将控制点以一定的关系连接构成工程控制网，按照国家或部门颁布的规程、规范所进行的控制测量，称为工程控制测量。

控制测量按照工作内容分类可以分为平面控制测量和高程控制测量两类：测定控制点平面位置 (x,y) 的工作称为平面控制测量；测定控制点高程 (H) 的工作称为高程控制测量。

1.1.2 控制测量学的任务与作用

从广义上来讲，控制测量学要研究地球(或其他星体)的形状与大小提供基准与起算数据，而从狭义上来说，控制测量主要为工程建设而服务，根据工程施工的不同阶段，发挥着不同的作用。



一般的,一项工程从设计到竣工,可以分为勘察设计、工程施工和运营管理三个阶段,在不同阶段具有不同的特点,因此,在不同的阶段,工程控制测量有着不同的工作任务。

1. 勘察设计阶段

在工程的勘察设计阶段,设计人员需要获得施工区域及周边的大比例尺地形图,并以地形图为基础,进行工程所需要的地质勘察、区域规划和建筑物设计,并从地形图上获取设计所需要的各项数据。作为此阶段重要数据来源的大比例尺地形图,在测绘之前为了满足测图精度的要求,需要根据测区大小、地理位置、地物地貌的特点及地形图的比例尺建立相对应的图根控制网,以确保图中任意碎部点的点位精度都符合要求以及各图幅之间能够准确拼接。

2. 工程施工阶段

这一阶段的主要任务是将图纸上设计的建筑物、道路、设施、管线等放样到实地中去。放样,即测设,是根据控制点数据和设计数据反算得到的方向、距离、高差等放样元素,在实地标记出建筑物的平面位置和高程,放样包括平面位置放样和高程放样。由于工程建筑物形式多样,区域建筑物的设计位置和放样要求也不尽相同,例如,桥梁施工要确保桥轴线方向的精度高于其他方向、地下工程的纵向精度要高于横向精度、超高层建筑要使建筑物的主要轴线位置十分精确等,因此,为了保证施工放样的精度和整体性,需要建立满足施工要求,特别是关键部位施工要求的具有必要精度的施工控制网。

3. 运营管理阶段

在工程施工过程中,工程建设破坏了地面和地下土体的原有状态,地面荷载急剧增大,改变了地基的土力学性质,地基及其周围地层可能发生不均匀变化,进而引发建筑物的沉降、水平位移、倾斜等变形,如果变形值超过一定的限度或变形速率过快,就可能导致地基和建筑物失稳,影响工程的施工安全。当工程竣工后,在运营管理阶段,由于建筑物内部荷载变化以及环境变化等诸多因素的影响,地基及其周围地层也会发生一定的变化,加之建筑结构和材料的老化,工程建筑物也会发生一定的变形,如果变形超过一定的量值,将影响工程的运营安全。因此,对于大型工程,应该定期地进行变形监测。由于工程变形监测的项目较多,监测点分布于建筑物各个位置上,依靠一个或少数几个控制点难以完成全部监测工作,监测数据的准确性也难以保证,而且建筑物的变形量都十分微小。因此,需要建立能够满足各项变形监测工作要求的高精度变形监测控制网,并需要对控制网进行定期的复测,以确保变形监测结果的准确性。

控制测量学不仅仅是各类工程建设中不可替代的一个环节,在其他方面,控制测量学也发挥着重要的作用。首先,地形图是一切经济建设和城市规划发展所必需的基础性资料,为了测制地形图需要布设全国范围内或局域性的大地测量控制网,因此,必须建立合理的大地测量坐标系以及确定地球的形状、大小及重力场等参数。其次,控制测量学在防灾、减灾、救灾及环境监测、评价与保护中发挥着特殊的作用。近年来,地震、洪水、泥石流、海啸等自然灾害频繁发生,给人们的生命财产造成了巨大损失。各类自然灾害表面看来具有突发性和不确定性,但是,如果能够对自然灾害高发区或有隐患的区域进行长期不间断的监测,便

可以对大多数的自然灾害进行预报或预警,大大减少灾害发生时人员伤亡和财产损失。无论何种监测手段与技术,都需要以高精度的控制网为基础,才能展开相应的监测工作。另一方面,在灾害发生后,灾情的评估、灾区的救援以及灾后的重建都需要以控制网为基础获取相应的数据。最后,控制测量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,都将发挥着越来越重要的作用。

1.2 控制网的布设方法

1.2.1 平面控制网的布设方法

平面控制网由于受到测区范围、精度要求、通视条件、植被状况等多种因素的影响,有多种布网方法可供选择,目前,平面控制网常用的布网方法主要有三角测量、导线测量、GNSS测量等。

1. 三角测量

1) 网形

如图 1-1 所示,在地面上选埋一系列点 A 、 B ……尽量保持相邻点之间通视,将它们按基本图形即三角形的形式连接起来,构成三角网。图中实线表示对向观测,虚线表示单向观测,单线代表未知边,双线代表已知边。如果观测元素仅为水平角(或方向),该网称为测角网;如果观测元素仅为边长,该网称为测边网;如果观测元素既有水平角(或方向)又有边长,该网称为边角网。边角网的观测元素可为全部角度(或方向)和全部边长、全部角度(或方向)和部分边长、全部边长和部分角度(或方向)、部分角度(或方向)和部分边长。

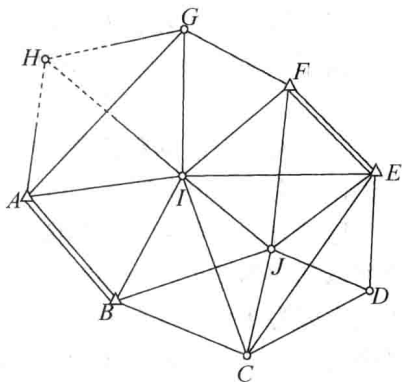


图 1-1 三角网

2) 坐标计算原理

以图 1-1 为例,在 $\triangle ABI$ 中,已知 A 点的平面坐标 (x_A, y_A) 、点 A 至点 B 的边长 S_{AB} 、坐标方位角 α_{AB} , 先根据角度观测值推算三角形各边的坐标方位角, 然后根据正弦定理计算 AI 的边长:

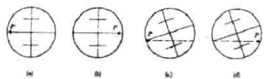
$$S_{AI} = S_{AB} \frac{\sin B}{\sin I} \quad (1-1)$$

最后,根据 A 点坐标、 AI 边的边长和坐标方位角求解 I 点坐标:

$$\left. \begin{aligned} x_I &= x_A + S_{AI} \cos \alpha_{AI} \\ y_I &= y_A + S_{AI} \sin \alpha_{AI} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

3) 起算数据和推算元素

为了得到所有三角点的坐标,必须已知三角网中某一点的起算坐标 (x_A, y_A) 、某一起算边



长 S_{AB} 和某一边的坐标方位角 α_{AB} ，它们统称为三角测量的起算数据或起算元素。在三角点上观测的水平角(或方向)是三角测量的观测元素。由起算元素和观测元素的平差值推算出的三角形边长、坐标方位角和三角点的坐标统称为三角测量的推算元素。

对于控制网的起算数据一般可通过以下方法获得。

(1) 起算坐标。若测区附近有高等级控制点，则可联测已有的控制点传递坐标；若测区附近没有可利用的控制网点，则可在一个三角点上用天文测量方法测定其经纬度，再换算成高斯平面直角坐标作为起算坐标。对于小测区或保密工程，可假定其中一个控制点的坐标，即采用任意坐标系。

(2) 起算边长。当测区内有高等级控制网点时，若其精度满足项目的要求，则可利用已有网的边长作为起算边长；若已有网的边长精度不能满足测量要求或无已知边长可利用，则可采用高精度电磁波测距仪按照精密测距的方法直接测量控制网中的一条边或几条边边长作为起算边长。

(3) 起算方位角。当测区附近有高等级控制网点时，可由已有网点传递坐标方位角。若无已有成果可利用，可用天文测量方法测定网中某一条边的天文方位角，再换算为坐标方位角，特殊情况下也可用陀螺经纬仪测定陀螺方位角，再换算为起算坐标方位角。

如果三角网中只有必要的一套起算元素(如一个点的坐标、一条边长、一个坐标方位角)，则该网称为独立网；如果三角形网中有多于必要的一套起算元素，则该网称为非独立网。当三角形网中有多套起算元素时，应对已知点的相容性作适当的检查。

4) 三边网和边角网

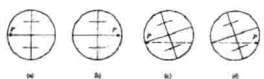
三边网的网形结构与三角网相同，只是观测量不是角度而是边长，三角形各内角是通过三角形余弦定理计算而得到的。而边角网是指在三角网只测角的基础上加测部分或全部边长。

三角网、三边网和边角网中，三角网早在 17 世纪即被采用。随后经过前人不断研究与改进，无论从理论上还是实践上都逐步形成一套较完善的控制测量方法，称为“三角测量”。由于这种方法主要使用经纬仪完成大量的野外观测工作，所以在电磁波测距仪问世之前，三角网以其图形简单、网的精度较高、有较多的检核条件、易于发现观测中的粗差、便于计算等优点成为布设各级控制网的主要形式。然而，三角网也存在着一定的缺点，例如在平原地区或隐蔽地区易受障碍物的影响，布网困难大，有时不得不建造较高的觇标，布网效率低，平差计算工作量较大等，这些缺点在一定程度上制约着三角网的发展和应用。

随着电磁波测距仪的不断完善和普及，边角网逐渐得到广泛的应用。由于完成一个测站上的边长观测通常要比方向观测容易，因而在仪器设备和测区通视条件都允许的情况下，也可布设完全的测边网。在精度要求较高的情况下，例如精密的变形监视测量，可布设部分测边、部分测角的控制网或者边、角全测的控制网。

2. 导线测量

如图 1-2 所示，将测区内相邻控制点连成直线而构成的折线称为导线，导线测量就是依次测定各导线边的边长和转折角值，再根据起算数据，推算各导线点的坐标。导线包括单一导线和具有一个或多个节点的导线网。导线网中的观测值是角度(或方向)和边长。若已知导线网的起算元素，即至少一个点的平面坐标 (x, y) 、与该点相连的一条边的边长和方位角，



GNSS 测量具有精度高、速度快、全天候、操作简单等优点,而且 GNSS 网布网较为简单,灵活性较大,控制点间无须通视,对控制网的网形也没有过多的要求,目前已成为建立平面控制网最常用的方法。但是,GNSS 测量也存在一定的弊端,如在树木茂密、城市街区、厂房内部等高空遮挡严重的地区,观测效果较差或者无法观测。而且 GNSS 观测精度受到高电压、强磁场、大面积水域等诸多因素的影响,并不能时时处处都发挥着高精度的优势,需要在实际工作中加以注意,尽量避开不利地区,同时可以加强相关理论的研究与改进。

1.2.2 高程控制网的布设方法

高程控制网按照精度由高到低可以分为一、二、三、四等四个等级,每个等级有其对应的应用范围。高程控制网主要有水准网、测距三角高程网、GNSS 高程网三种形式。

1. 水准网

水准网是目前高程控制网中最常用的一种布设形式,包括单一水准路线和具有一个或多个节点的水准网,水准网具有精度高、图形设计灵活、易于选点等优点,可以用于各个等级的高程控制网。

水准网中的高程起算点通常采用已知的高等级高程控制点,如果是小测区且与已知高程控制点联测有困难时,视情况可采用假定高程。如果水准网中只有一个已知高程点,则该网为独立水准网;如果水准网中的已知高程点多于一个,则该网为非独立水准网。在实际工作中,为了确保成果的准确性,一般均要求采用非独立水准网,水准网中的已知高程点个数一般不少于 2~3 个。当水准网中有多个已知高程点时,应对已知高程点的准确性和稳定性作适当的检查。

2. 测距三角高程网

测距三角高程是指通过观测测站点至照准点的竖直角,再用电磁波测距仪测取此两点间的距离,根据平面三角公式计算此两点间的高差,进而推求待定点高程的方法。按照此方法布设的高程控制网称为测距三角高程网。

根据控制网的用途和精度要求,测距三角高程网主要用于高差较大、水域较多等水准测量实施难度大的测区。测距三角高程网可以单独布设,但通常在平面控制网的基础上布设,或在导线网的基础上布设成测距三维导线网。为了提高观测精度,测距三角高程网中的点间高差应采用对向观测,当垂直角和水平距离的直视测量完成后,应即刻迁站进行反视测量。当仅布设高程导线时,也可采用全站仪中点法测量高差。

随着精密电磁波测距仪的出现与发展,测距精度越来越高,测距三角高程测量的精度也逐步提高,使得测距三角高程网替代三、四等水准测量成为可能。当其替代四等水准时,测距三角高程导线应起算于不低于三等水准的高程点;当其替代三等水准时,测距三角高程导线应起算于不低于二等水准的高程点。而在上述两种情况下,测距边长都不应大于 1km,高程导线的路线长度不应超过相应等级水准路线的长度限值。目前,随着技术的发展和仪器的进步,人们正在研究如何利用精密测距三角高程测量替代二等水准测量。

3. GNSS 高程网

GNSS 高程网一般用于四等或等外的高程控制测量。GNSS 高程网宜在平面控制网的基础上布设,与平面控制点共用一个测量标志。GNSS 高程网应与三等及以上的水准点联测,对联测的水准点应进行可靠性检验,联测的 GNSS 高程点应覆盖整个测区。联测点数应大于高程拟合计算模型中未知参数个数的 1.5 倍,高差较大的测区应适当增加联测点数。GNSS 高程测量应遵循 GNSS 测量的技术要求。

GNSS 高程拟合应充分利用当地的重力大地水准面模型及资料,GNSS 高程拟合模型应进行优化,拟合点不应超过拟合模型所覆盖的范围。对 GNSS 高程拟合点应进行检测,检测点数一般不少于全部高程点的 10%且不少于 3 个点,高差检测可采用相应等级的水准测量或测距三角高程测量,高差较差不应大于 $30\sqrt{D}$ mm,其中, D 为检测路线的长度,单位为 km。

1.3 控制测量学的发展概况

控制测量学作为测绘领域中的基础学科之一,与各门学科、各项技术的发展均密切相关,相关领域的任何一项进步与革新均会给控制测量学带来变革。控制测量学的发展主要体现在测绘新仪器、新技术的发展及数据计算与管理方法的发展等方面。

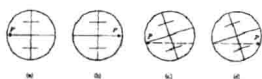
1.3.1 测量技术的发展

控制测量学离不开测量仪器,无论是图根控制网,还是施工控制网,或者是变形监测控制网,在控制网的布设过程中均需要有先进而精密的测量仪器作为观测工具,因此,从古至今,测量仪器的发展带动了控制测量技术的变革。

1. 精密测角仪器的发展

控制测量学中角度的测量离不开经纬仪,而且在过去距离测量主要依靠钢尺的情况下,难以获得高精度的测距结果,控制网主要是依靠经纬仪测量角度来完成布设。

经纬仪最初的发明与航海有着密切的关系。在 15—16 世纪,英国、法国等一些发达国家,因为航海和战争的原因,需要绘制各种地图、海图,以此为动机便发明了经纬仪。第一台经纬仪是由英国机械师西森(Sisson)约于 1730 年首先研制的。后经改进成型,正式用于英国大地测量中。直至 1922 年,玻璃度盘的经纬仪出现后,现代经纬仪才开始投入广泛应用。1921 年,瑞士 Wild 公司研制了全球第一台光学经纬仪 T2,为测绘仪器指明了新的发展方向。20 世纪 50 年代,经纬仪出现了竖直度盘指标自动归零补偿器,用以替代竖直度盘指标水准管,大大提高了竖直角观测的精度,并减弱了人为原因对竖直角观测精度的影响。同一时期,光学对中器的出现大大提高了对中的精度,使对中精度由 3mm 提高至 0.5~1mm。20 世纪 50 年代末,随着电子技术的发展,出现了电子光栅度盘和电子编码度盘,电子经纬仪也应运而生,极大地提高了测角精度。由于经纬仪的不断发展,测角精度的不断提高,在整个 20 世纪,控制网的布设一直以三角网为主。



2. 精密测距仪器的发展

距离测量是人类最古老的测量内容之一，建立高精度的水平控制网，需要精密测定控制网的边长。长期以来，距离测量都是以钢尺类仪器作为测量工具，工作效率低，精度不高。若需要进行精密测距，一般采用因瓦尺进行测量，虽然因瓦尺量距可以达到很高的精度，但是测距工作受到地形条件的限制较大，速度慢，效率低，工作量大。

1947年，瑞典AGA公司初步研制成功世界上第一台电磁波测距仪，命名为“大地测距仪”，它以白炽灯作为载波源，以10MHz高频调制波作为测距信号。基于该测距仪，该公司于1953年研制成功第一台远程光速测距仪NASM-1，并于1955年改进为NASM-2A型光速测距仪，它由测距装置和光学装置两大部件构成，测距时，两大部件组成一个重达94kg的整机，还需要用几十公斤重的发电机供电，操作十分不便。NASM-2A型测距仪采用高频测相方案，由可变光路和电延迟期共同提供距离观测值。测量时，在测线一端架设仪器，在测线的另一端安置反射棱镜阵列即可直接测出该测线的距离。它的测程可达到30余公里。

1960年美国人梅曼研制成功了世界上第一台红宝石激光器，第二年就产生了世界上第一台激光测距仪；1969年，瑞士Wild公司采用砷化镓发光管发射的红外光代替普通光源，推出了世界上第一台红外测距仪DI10；1968年，德国OPTON公司和瑞典的AGA公司，在光电测距和电子测角的基础上，研制生产出世界上第一台全站仪，该全站仪由电子经纬仪、电磁波测距仪、数据记录仪、反射镜和电源等部分组成，是现代全站仪的雏形。随后，电子全站仪进入了飞速发展阶段，特别是20世纪90年代中后期和进入21世纪以来，全站仪的测角、测距精度逐步提高。目前，全站仪的测距精度可以达到 $\pm 0.6\text{mm} + 1\text{ppm}$ ，测角精度可达 $\pm 0.5''$ 。在精度不断提高的同时，全站仪也向一体化、自动化、综合化等方向发展，自动化测量、与GNSS相结合的超站仪也已投入实际应用。

测距仪和全站仪的产生与发展，进一步促进了测量向自动化、数字化方向发展，同时，由于测距工作变得越来越容易而且精度越来越高，使得测边网、边角网、导线网成为20世纪末期和21世纪初期控制网布设的主要方法。

3. 精密高程测量仪器的发展

高程测量是测量工作中的重要环节，高程测量中最主要的方法是水准测量，所以，水准仪的发展对高程测量的精度起着决定性的作用。

水准仪的雏形出现得较早，早在17世纪，望远镜和水准器发明之后便出现了最早的水准仪。19世纪末20世纪初，在制作出内调焦望远镜和符合水准器的基础上生产出了微倾式水准仪。从1908年开始，瑞士Wild公司和德国Zeiss公司生产了一系列带有平行玻璃板测微器的精密水准仪和配套的钢瓦水准标尺，大大提高了水准测量的精度。20世纪50年代初期，德国的OPTON公司和Zeiss公司相继推出了自动安平水准仪，降低了水准测量的劳动强度，极大地提高了测量的效率。

随着电子技术的发展，1990年，瑞士Wild公司推出了全球第一台数字水准仪NA2000，它集电子光学、图像处理、计算机技术于一身，具有测量速度快、精度高、使用方便、劳动强度低、实现内外业一体化等特点，可以实现水准测量的读数、记录与数据处理的自动化，有效提高了水准测量的速度和精度。从此之后，数字水准仪进入了飞速发展阶段，Trimble、

Zeiss 等公司也相继研发了数字水准仪。数字水准仪的诞生给水准测量带来了巨大的变革,使高精度、高速度、高效率完成水准测量工作成为可能。

另外,随着全站仪精度的不断提高,电磁波测距三角高程测量在高程测量中也日益发挥着重大的作用,经过严密的计算与改正,电磁波测距三角高程测量已经达到了三、四等水准测量的精度,在条件较好的区域甚至于能达到二等水准测量的精度要求。

4. 空间技术的发展对控制测量学的影响

20 世纪 70 年代,美国国防部开始研制全球性的授时测距定位导航系统(GPS),几乎同一时期,苏联也开始研制相似的全球卫星导航系统(GLONASS)。1995 年,美国的 GPS 建成并投入使用,1996 年,GLONASS 满星座运行,但随着卫星寿命达到设计年限而后续卫星没有及时补充,GLONASS 并没有大面积的实际应用。进入 21 世纪之后,欧盟决定开始建设伽利略全球卫星导航系统(Galileo),以摆脱美国 GPS 的控制。随后,中国也加入到卫星定位系统的行列,开始建设北斗卫星导航定位系统(COMPASS),目前在亚太地区,“北斗”已经具备导航、定位等功能,并预计于 2020 年覆盖全球。

GPS、GLONASS、Galileo、COMPASS 四套卫星定位系统统称为全球导航卫星系统(GNSS),GNSS 的出现给控制测量学带来了巨大的变革,它以全天候、高精度、高效率、多功能、操作简便等特点迅速得到了广泛的应用,使传统的三角网、边角网受到了极大的冲击。目前,大部分的平面控制网均采用 GNSS 方法布设,工作效率大大提高,极大地降低了控制测量工作的劳动强度。

1.3.2 数据计算与管理方法的发展

控制网的优化设计是传统控制测量工作中的重要环节,优化设计的结果直接关系到最终控制网的精度与质量,控制网的优化设计计算量大、方法复杂,一直以来都是学者重点研究与改进的领域。

1968 年, F.R.Helmert 发表了《合理测量之研究》, E.Grafarend 等人在这方面进行了较为深入的研究,尽管观测权的最佳分配和交会图形的最佳选择等问题得到研究,但由于科学技术和计算工具等条件的限制,优化设计并没有得到进一步的发展。20 世纪 70 年代之后,由于电子计算机在测量中的广泛应用和最优化理论进入测量领域的研究,测量控制网优化设计才得到迅速的发展。其理论和方法也从一般工程控制网扩展到精密工程控制网、变形监测网等专用测量控制网,主要的研究范围包括控制网的基准设计、图形设计、权设计、原网改进设计等方面。控制网优化设计往往同观测数据的数学处理结合在一起进行。其方法是在统一的多功能的软件包上,既可进行控制网的优化设计,也可实现观测数据的相应处理。

除了控制网的优化设计之外,控制网的平差和数据可靠性的检验一直是测量界理论研究的另一大方面。1794 年,高斯(C.F.Gauss)创立了经典最小二乘理论,马尔科夫(A.A.Markov)于 1912 年提出了高斯-马尔科夫模型,确立了最小二乘经典平差的基本方法。建立在高斯-马尔科夫模型基础上的经典平差与数据处理理论,将测量误差视为服从正态分布规律的偶然误差。