

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材

工程控制测量

田林亚 岳建平 梅 红 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校测绘工程系列教材

工程控制测量

田林亚 岳建平 梅红 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程控制测量/田林亚,岳建平,梅红编著. —武汉:武汉大学出版社, 2011. 8

高等学校测绘工程系列教材

ISBN 978-7-307-08862-7

I. 工… II. ①田… ②岳… ③梅… III. 工程测量—控制测量—高等学校—教材 IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 115393 号

责任编辑:胡 艳 责任校对:刘 欣 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:316千字

版次:2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-08862-7/TB·30 定价:25.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

对于测绘工程专业的学生来说，走上工作岗位以后，可能会接触到各种各样的工程，需要针对具体工程开展控制测量工作，解决工程控制测量中出现的各种实际问题。基于这方面的考虑，编者结合多年的教学和实践经验，编写了这本直接面向工程的《工程控制测量》，希望读者通过学习该书，更进一步理解工程控制测量的基本流程，掌握工程控制测量的基本理论和方法，提高独立分析与解决工程实际问题的能力，出色地开展和完成工程控制测量工作。

本书共分 10 章，章节的编排和内容的编写是根据工程控制测量的基本流程展开的，从工程控制网的设计、观测到数据处理及结果分析，形成了比较完整的工程控制测量体系。教材内容的编写始终遵循面向工程和简便实用的路线，既介绍了仍在工程中使用的部分传统测绘仪器和技术，又重点地介绍了当前测绘新仪器、新技术及其在工程控制测量中的运用；既较系统地阐述了工程控制测量的基本理论和方法，又删繁就简，重点论述解决工程控制测量中有关问题的方法。此外，为了加深读者对教材内容的理解，本书还配以大型桥梁、水电站、堤防等实际工程的控制测量实例加以说明。

参加本书编写的人员及分工如下：

田林亚(河海大学)，编写第 1 章、第 2 章，负责全书的组织和统稿工作；

岳建平(河海大学)，编写第 6 章、第 8 章，参与全书的组织工作；

梅红(河海大学)，编写第 5 章、第 10 章，负责全书的校对工作；

黄晓时(河海大学)，编写第 3 章；

黄其欢(河海大学)，编写第 7 章；

夏开旺(安徽建筑工程学院)，编写第 4 章；

周保兴(山东交通学院)，编写第 9 章。

本书可作为测绘工程专业学生的教学用书，也可供有关生产单位的工程技术人员阅读和参考。由于编者水平有限，本书中难免存在错误之处，敬请读者批评指正。

本书的部分内容和图表参考了书后所列的文献，在此向文献的作者表示感谢。

编 者

2011 年 6 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 工程控制测量的概念	1
1.1.1 工程控制测量的任务与作用	1
1.1.2 不同工程对控制测量的要求	2
1.2 工程控制测量的发展概述	3
1.2.1 工程控制测量技术的发展	3
1.2.2 数据处理理论和方法的发展	4
第2章 工程控制网布设	6
2.1 工程控制网的布设原则	6
2.1.1 分级布网, 逐级控制	6
2.1.2 具有足够的精度	6
2.1.3 具有一定的密度	7
2.1.4 遵照相应的规范	7
2.2 工程控制网的布设形式及要求	8
2.2.1 平面控制网的布设形式及要求	8
2.2.2 高程控制网的布设形式及要求	14
2.3 工程控制测量的技术设计	16
2.3.1 资料的收集与分析	16
2.3.2 控制网的图上设计	17
2.3.3 控制网的优化设计	19
2.3.4 技术设计书的编写	24
2.4 控制点的选埋	24
2.4.1 实地选点	24
2.4.2 标志形式与埋设	25
第3章 水平角测量	29
3.1 水平角测量原理	29
3.1.1 光学经纬仪测角原理	29
3.1.2 全站仪测角原理	31
3.2 水平角观测	38
3.2.1 观测方法	38

3.2.2	测站限差要求	39
3.2.3	超限成果的取舍与重测	40
3.2.4	偏心观测与归心改正	41
3.3	角度测量误差来源	43
3.3.1	仪器误差的影响	43
3.3.2	观测误差的影响	47
3.3.3	外界条件的影响	47
3.4	外业成果整理与分析	48
3.4.1	资料的检查与分析	48
3.4.2	测站平差	50
3.4.3	控制网测角精度评定	51
3.4.4	水平方向值归算	51
第4章	距离测量	53
4.1	测距仪器的分类	53
4.2	相位法测距	54
4.2.1	相位法测距原理	54
4.2.2	Mekometer ME 5000 测距仪测距	56
4.2.3	Leica 全站仪测距	58
4.3	距离测量的误差来源	64
4.3.1	测距误差分析	64
4.3.2	测距精度估算	65
4.3.3	加常数和乘常数的测定	66
4.3.4	周期误差的测定	69
4.4	距离测量与归算	72
4.4.1	测距的实施	72
4.4.2	距离的归算	73
第5章	精密水准测量	76
5.1	精密水准仪及其使用	76
5.1.1	光学水准仪及其使用	76
5.1.2	数字水准仪及其使用	80
5.2	精密水准仪和水准标尺的检验	91
5.2.1	水准仪检验	92
5.2.2	水准标尺检验	96
5.3	水准路线测量	98
5.3.1	水准路线测量的实施	98
5.3.2	作业规定与测站限差要求	100
5.3.3	外业成果整理与分析	102

5.4	精密水准测量误差分析	104
5.4.1	水准仪和水准标尺的误差	104
5.4.2	观测误差	106
5.4.3	外界环境的影响	106
5.5	大坝垂直位移监测网测量	108
5.5.1	垂直位移监测网概况	108
5.5.2	外业观测	109
5.5.3	观测成果整理	109
第6章	跨河水准测量与三角高程测量	112
6.1	跨河水准布设与观测要求	112
6.1.1	场地布设要求	112
6.1.2	观测技术要求	114
6.2	跨河水准测量方法	115
6.2.1	光学测微法	115
6.2.2	倾斜螺旋法	116
6.2.3	经纬仪倾角法	118
6.2.4	测距三角高程法	121
6.2.5	GPS测量法	122
6.3	测距三角高程测量	124
6.3.1	基本原理	124
6.3.2	垂直角观测	125
6.3.3	大气折光影响及改正	126
6.4	工程实例	128
6.4.1	苏通大桥跨江水准测量	128
6.4.2	润扬大桥高程系统传递	130
第7章	GPS卫星定位	132
7.1	GPS系统与卫星信号	132
7.1.1	GPS系统的组成	132
7.1.2	GPS卫星信号	133
7.1.3	GPS接收机	134
7.2	载波相位相对定位	135
7.2.1	载波相位观测值	135
7.2.2	载波相位差分观测值	137
7.2.3	差分观测方程与解算	138
7.3	GPS测量误差来源	139
7.3.1	与卫星有关的误差	139
7.3.2	与信号传输有关的误差	140

7.3.3	与接收机有关的误差	141
7.4	工程 GPS 网布设与观测	142
7.4.1	GPS 网的布设方式	142
7.4.2	GPS 网的观测	143
7.4.3	GPS 偏心观测与归心改正	145
7.4.4	苏通大桥 GPS 网布测	146
7.5	GPS 测量数据处理	148
7.5.1	基线解算及质量检验	148
7.5.2	GPS 网平差	150
第 8 章	控制测量数据粗差检验	153
8.1	粗差检验概述	153
8.2	粗差检验常用方法	154
8.2.1	极限误差检验	154
8.2.2	数据探测法	154
8.2.3	稳健估计法	155
8.2.4	平面控制网粗差检验实例	156
8.2.5	高程控制网粗差检验实例	159
8.3	GPS 测量数据的粗差处理	160
8.3.1	周跳的探测与修复	160
8.3.2	基于基线解算的粗差处理	161
8.3.3	电离层延迟误差修正模型	163
8.3.4	对流层延迟误差改正模型	164
第 9 章	工程控制网平差	166
9.1	平面控制测量概算	166
9.1.1	概算目的与流程	166
9.1.2	概算的主要内容与方法	166
9.1.3	资用坐标的计算	169
9.2	水准测量概算	170
9.2.1	概算目的与流程	170
9.2.2	概算的主要内容与方法	170
9.2.3	资用高程的计算	171
9.3	坐标系统的选择	171
9.3.1	概述	171
9.3.2	投影面和投影带的选择	172
9.3.3	坐标的邻带换算	175
9.4	控制网间接平差	176
9.4.1	边角网间接平差	176

9.4.2	水准网间接平差	179
9.5	工程控制网测量与平差实例	180
9.5.1	润扬大桥平面控制网测量与平差	180
9.5.2	淮河入海水道变形监测网测量与平差	186
9.5.3	苏通大桥 GPS 网平差	188
第 10 章	参心坐标系及坐标换算	190
10.1	参心坐标系的建立	190
10.1.1	参心坐标系的建立原理	190
10.1.2	1954 年北京坐标系	192
10.1.3	1980 年国家大地坐标系	193
10.2	相同参心坐标系下的坐标换算	194
10.2.1	常用的参心坐标系	194
10.2.2	大地坐标与空间直角坐标的换算	195
10.2.3	大地坐标与高斯平面直角坐标的换算	196
10.3	不同参心坐标系下的坐标换算	197
10.3.1	空间直角坐标之间的换算	197
10.3.2	大地坐标之间的换算	199
10.3.3	高斯平面直角坐标之间的换算	200
参考文献		201

第1章 绪 论

1.1 工程控制测量的概念

1.1.1 工程控制测量的任务与作用

随着国民经济的快速发展,我国建设工程的种类不断增多、数量和规模不断扩大,同时在施工材料、工艺、精度等方面也呈现出许多新的特点和要求,例如,在工业和民用建筑工程(工业厂房、公共设施、民用住宅等)建设方面,大型工业建筑和高层商业、民用建筑的建设蓬勃发展,特别是一些体育馆、展览馆、候机厅、候车厅等场馆和社会公共设施的建设,其结构设计、施工工艺、建设规模等更是前所未见;在交通运输工程(公路、铁路、桥梁、隧道等)建设方面,各等级公路、国家和地方铁路的建设速度明显加快,特别是一些高速公路、高速铁路、跨江/跨海大桥和地下通道的建设,其设计、施工等都有新的突破,其成功建设开创了我国交通工程建设史上的新篇章;在水利水电工程(大坝、水库、电站、堤防等)建设方面,大型和特大型水库、水电站纷纷涌现,特别是一些具有跨世纪意义的特大型工程的建设,标志着我国水利水电工程已经取得了伟大的建设成就,必将在防洪、发电、航运等方面发挥重要的作用。可以预期,在今后相当长一段时间内,伴随国民经济的持续发展和综合国力的稳步提高,各行各业将有更多的工程投入建设,各种类型的工程建筑物将不断地涌现。对于许多已建工程,测绘人员在工程建设的每一个阶段都发挥了重要的作用;许多在建或将要建设的工程,同样离不开测绘人员的技术支持;对于重要的大型工程,测绘人员仍将在其长期的运营和管理中扮演着必不可少的角色。

通过“测绘学概论”、“测量学”、“大地测量学基础”、“测量平差基础”等专业基础课程的学习,我们已经知道,在全国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,按照国家统一颁布的规程、规范所进行的控制测量,称为大地控制测量。类似地,为了某项工程的设计、施工、运营管理的需要,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。工程控制测量包括平面控制测量和高程控制测量,相应地,控制点分别称为平面控制点和高程控制点,控制网分别称为平面控制网和高程控制网。控制测量的目的就是通过精确测量和计算,获得每个控制点的坐标和高程,为工程建设和运营管理提供满足精度要求的平面和高程控制基准。工程控制测量的服务对象是各种工程,其任务主要是建立各种工程控制网,因为工程建设从整体上可分为设计、施工、运营三个阶段,所以工程控制测量的任务和作用也主要体现在这三个阶段。

1. 建立用于地形图测绘的测图控制网

在工程设计阶段,设计人员需要在在大比例尺地形图上进行区域规划和建筑物设计,并依据地形图获得有关设计数据,因此需要测绘工程所在区域的大比例尺地形图。为了保证每一幅地形图达到应有的测图精度,保证地形图不同图幅之间能够很好地衔接,应该根据测区的大小及地物地貌等具体情况,建立满足测图要求的测图控制网。

2. 建立用于施工放样的施工控制网

在工程施工阶段,测量人员要进行施工放样,即将图纸上设计的各种建筑物放样到实地上去。施工放样包括平面位置放样和高程放样,也就是在控制点上或者某个合适的位置上安置仪器,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,在实地放样出建筑物的平面位置和高程。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,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的施工控制网。

3. 建立用于变形监测的变形监测网

在工程施工阶段,工程建设破坏了地面和地下土体的原有状态,加之荷载等因素的影响,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,进而引发工程建筑物的水平位移、垂直位移和倾斜等变形,如果变形量过大或变形速率过快,就可能导致地基和建筑物失稳,影响工程的施工安全。在工程运营阶段,由于荷载以及环境变化等诸多因素的影响,地基及其周围地层会发生一定的变化,加之建筑物和材料的老化,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,对于大型重要的工程,特别是位于软土地区的工程,应该定期地进行变形监测。由于工程的变形监测点较多,且布设在多个不同的位置,在一个控制点上很难完成全部监测工作,也很难达到较高的监测质量,因此需要建立满足精度等要求的变形监测控制网。

1.1.2 不同工程对控制测量的要求

以上简单介绍了工业和民用建筑、交通运输、水利水电等方面的工程建设情况,其实,在资源开发和利用(石油、天然气、煤炭、金属矿藏等)、工业生产(各种大型工厂、矿山等)、农业发展(农村规划、土地开发、土地管理等)、市政建设(城市规划、城市地上地下交通等)、海洋开发(港口、滩涂、岛礁等)、生态环境保护(森林、滑坡、区域沉降等)以及军工产品制造等许多行业,其工程建设也取得了巨大的成就,并呈现出蓬勃发展的态势。不同行业中的工程有不同的特点,同一行业中不同类型的工程也有各自的特点,甚至同一类型的工程在不同阶段、不同部位、不同方向上也都会有不同的要求,因此工程控制测量应该针对具体的工程及其要求展开。

我们已经知道,工程控制测量的主要任务就是根据工程的需要建立工程控制网。目前,由于全站仪、水准仪、GPS等仪器的普遍使用,使得工程控制网的布设形式趋于多样化。对于平面控制网,布设形式主要有边角网、导线网、GPS网等,边角网、导线网的观测元素为方向和边长,要求点间通视,GPS网的观测元素为卫星载波信号,不要求点间通视,但要求对天空开阔。对于高程控制网,布设形式主要有水准网、三角高程网、GPS网等,水准网不要求点间通视,但连续水准测量的工作量较大,三角高程网要求点间通视,但可以大大地减少测量工作量,GPS网可以在获得控制点坐标的同时获得高程,但通常要

有水准测量相配合才能获得较高的精度。工程控制网采用何种布设形式，完全根据工程实际情况和要求进行选择。例如，对于大面积的地形测图平面控制网，可选择边角网、GPS网，对于带状的地形测图平面控制网，可选择导线网、GPS网；在大型桥梁施工阶段，平面控制网可选择边角网、GPS网，高程控制网可选择水准网或水准与三角高程的混合网；在高速铁路施工阶段，平面控制网可选择GPS网、导线网，高程控制网可选择水准网或三角高程网；在大坝变形监测中，平面控制网可选择边角网、GPS网，而高程控制网通常选择水准网。

施工控制网和变形控制网是为工程的施工放样或变形监测而专门建立的，因此称为专用控制网，由于它用途明确，因此应根据特定工程的特点和要求进行技术设计。例如，对于大型工厂的施工控制网，应该将主要建筑物的主轴线纳入到控制网中，以便今后以主轴线为基准线进行施工放样，以提高金属结构、机器设备、仪器仪表等的安装精度；对于桥梁施工控制网，应尽量将桥梁的主轴线纳入到控制网中，或者沿桥梁主轴线两侧布网，为了提高桥墩施工放样的精度，控制网设计时，要使桥轴线方向的精度高于其他方向；对地下、水下的开挖与贯通工程（铁路隧道、城市地铁、跨江跨海水下通道等），应沿着贯通方向布网，并设法减小对横向贯通误差的影响；对于工程建筑物变形监测，变形监测网设计不仅要考虑控制点的稳定性、使用方便和所能达到的监测精度，有时还要考虑在某一特定方向上所能达到的监测精度。实际工作中，可能会遇到各种各样的工程，应根据具体对象和要求进行分析，合理地选择控制网的布设形式，并进行控制网的优化设计。

1.2 工程控制测量的发展概述

1.2.1 工程控制测量技术的发展

工程控制测量技术包括测量仪器和测量方法等，其中，测量仪器的发展对测量方法的发展起到了巨大的推动作用。

1922年，玻璃度盘经纬仪出现；1925年，瑞士Wild公司制造了T2和T3经纬仪；20世纪50年代，经纬仪的发展主要体现在对垂直度盘指标自动归零补偿器和光学对中器的改进，取消了指标水准器，并使对中精度由3mm提高到0.5~1mm；20世纪50年代末，随着电子学的发展，经纬仪由光学玻璃度盘向光栅度盘或编码度盘发展，光学经纬仪发展到电子经纬仪，如瑞士Kern公司的E2和Wild公司的T2000，其标称精度已达到0.5"，目前已进一步发展到具有自动目标识别的功能，使得角度测量的速度有较大幅度的提高。20世纪20年代以后的近30年，工程平面控制测量主要采用测角网的布设形式。

1948年，采用普通光源的电磁波测距仪开始出现；20世纪60年代及以后，采用砷化镓发光管发射的红外光代替普通光源，制造了红外测距仪，采用激光代替普通光源，制造了激光测距仪，测距仪的精度、测程、性能都得到了提高，如Wild公司生产的红外测距仪DI5，其标称精度达 $\pm(3\text{mm}+2\text{mm}\times 10^{-6}\times D)$ （ D 以km为单位），最大测程达3~5km，Kern公司生产的ME5000，其标称精度达 $\pm(0.2\text{mm}+0.2\text{mm}\times 10^{-6}\times D)$ ，最大测程达8km。随着各种测距仪器的研制和生产，工程平面控制网的布设形式由单一的测角网向导线网、边角网、测边网发展。

1968年, Opton公司生产了第一台全站仪 Elta-14, 该仪器由四个基本部分组成, 即电子经纬仪、电磁波测距仪、数据记录仪、反射镜和电源, 是现代全站仪的雏形。根据早期全站仪的结构, 可将全站仪分为整体式和组合式两类, 前者如 Elta2, 后者如 T2000+DI5。经过几十年的发展, 全站仪已从体积大、笨重、精度低发展到体积小、重量轻、精度高, 如 Leica公司生产的系列全站仪, 其中 TC2003的标称精度已达 $\pm(0.5", 1\text{mm}+1\text{mm}\times 10^{-6}\times D)$ 。Leica公司于1990年率先研制和生产了被称为测量机器人的自动全站仪 TCA2003, 采用伺服电机驱动和 CCD摄影机等其他光电技术, 实现了目标的自动寻找、识别、照准、读数和记录, 极大地提高了测量的效率。随着高精度全站仪的出现, 单一的电子经纬仪和测距仪的作用已经大部分被全站仪取代, 目前, 导线网、边角网在工程平面控制测量中已得到广泛的应用。

19世纪下半叶, 定镜水准仪和微倾水准仪出现, 1908年开始, 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, 如 Zeiss Ni004和 Wild N3; Opton公司于1950年生产了第一台自动安平水准仪 Ni1; Zeiss公司生产了自动安平水准仪 Ni007和 Ni002; 1990年 Wild公司研制和生产了新型电子水准仪 NA2000, 可以做到水准测量的读数、记录、处理的自动化, 有效提高了水准测量的速度和精度。目前, 精密光学水准仪已经相当普遍, 许多单位也拥有了 NA2000和 Trimble Di-ni03等电子水准仪, 水准网仍然是高精度高程控制网采用的主要布设形式。高精度全站仪出现以后, 测距三角高程测量也成了工程高程控制测量的一种方法, 通过较好的方案设计和现场实施, 测距三角高程测量的精度可以达到三、四等水准测量的精度, 但是, 如何减弱或消除测距三角高程测量中的大气折光影响, 仍是有待解决的关键问题, 如果能有效解决大气折光对三角高程测量的影响问题, 测距三角高程测量将会得到更多的应用。

自1972年起, 美国国防部就开始研制全球性的授时测距定位导航系统 NAVSTAR GPS, 简称 GPS, 1995年建成并投入使用; 同一时期, 前苏联也研制了相似的全局卫星导航系统 GLONASS, 于1996年1月18日实现了24星的满星座运行, 后来有些卫星撤出服务, 目前正常运行的卫星约有15颗; 欧盟15国2002年3月决定建设伽利略全球卫星导航系统 GNSS, 完全从民用出发, 由30颗卫星组成, 对地面实行全覆盖, 并与 GPS/GLONASS有机兼容; 我国已经成功发射了8颗北斗导航卫星, 已经初步建立了北斗卫星导航系统。GPS接收机也向高自动、高适应性、高精度方向发展, 价格不断降低, 既能接收 GPS信号又能接收 GLONASS信号的所谓“双星接收机”已经面世。随着卫星大地测量特别是全球定位系统 GPS的出现, 工程控制测量方法发生了显著的变化, 由于 GPS测量具有全天候和无需点间通视等优点, 加之仪器和数据处理软件的不断完善, 目前许多工程的平面控制测量采用静态 GPS测量方法, 其精度可以达到厘米级乃至毫米级, 随着 GPS数据处理和大地水准面模型等理论和方法的深入研究, GPS控制网也有望成为工程高程控制网的形式之一。

1.2.2 数据处理理论和方法的发展

控制网优化设计是测量界研究的热点问题之一。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

设计并没得到进一步的发展。20 世纪 70 年代以后，随着最优化理论进入测绘领域以及电子计算机的广泛应用，测量控制网优化设计得到迅速的发展，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。研究的范围包括控制网的基准设计、图形设计、权的设计等，优化设计的质量标准包括精度标准、可靠性标准、灵敏度标准、费用标准等，优化设计的方法包括解析法、人机对话的模拟法、建立在概率抽样原理基础上的蒙特-卡洛法等。随着 GPS 技术的发展，一些人开始对 GPS 控制网优化设计方法和优化设计系统进行了研究，包括网络分析、小波分析、星历预报等方法的应用研究。由于高精度全站仪和 GPS 的使用，基准的位置和精度、观测量的选择、观测量自身的质量、观测量的数据处理等已经成为工程控制网优化设计考虑的主要问题。

控制网平差和数据可靠性检验的理论和方法一直是测量界研究的重点问题。1794 年，C. F. Gauss 创立了经典最小二乘理论，A. A. Markov 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，而事实上，观测数据中粗差出现的概率为 5%~10%，粗差的存在可能导致参数的估值出现较大偏差，因此，近代测量学和统计学学者将测量误差理论的研究从偶然误差扩展到了粗差，伴随着数学理论、测量理论与技术、计算机技术的发展，测量平差从经典平差发展到近代平差。

1968 年，W. Baarda 发表了《用于大地网的检验过程》，提出了用于粗差检验的数据探测法，奠定了粗差检验理论研究的基础。目前，平差模型基本上分为两类，即函数模型和随机模型，相应地，粗差被归入函数模型误差和随机模型误差，对函数模型的研究，已扩展到粗差的探测和系统误差的补偿。对于粗差，可在函数模型中采用数据探测法予以识别和剔除，为此引入了可靠性理论和度量平差系统可靠性指标；或者把粗差纳入随机模型，采用比最小二乘法抗干扰性更强的稳健估计法。对于系统误差，在平差的函数模型中引入系统参数予以补偿，但需要考虑系统参数的优选并加以统计检验，以防止和克服可能出现的过度参数化问题。对随机模型，研究了其验后特性的估计方法，其中包括方差分量估计法，这对不同类观测值权的选取和确定尤为重要。人们还从概率统计以及向量空间投影几何原理等多种渠道研究和完善线性模型参数估计方法，如最大似然估计法、最佳无偏估计法、基于向量空间投影原理的最小二乘法等，使参数估计原理和方法得以深化。从对随机变量的处理，发展到一并处理随机变量和具有各态历经性的平稳随机函数的问题，研究了最小二乘滤波、推估和配置的数学模型，系统地解决了满秩平差的各类问题。另外，一些非满秩平差问题，如秩亏自由网平差、拟稳平差以及具有奇异权、零权、无限大权的线性模型的参数估计方法等，也得到研究。

第2章 工程控制网布设

2.1 工程控制网的布设原则

测量控制网按其用途可分为国家基本控制网和工程控制网，工程控制网又可分为测图控制网、施工控制网和变形监测控制网。建立测图控制网主要是为测绘工程设计所需的大比例尺地形图，建立施工控制网主要是为工程的施工放样，建立变形监测控制网主要是为工程建筑物的变形监测。虽然建网的目的和用途有所不同，但总体上应遵守下列几项布设原则：

2.1.1 分级布网，逐级控制

工程控制网是分等级进行设计和测量的，首级控制网一般设计为二等及以下，特殊要求下设计为一等。对于测图控制网，根据测区面积的大小和测图的需要，先布设精度最高的首级控制网，由于首级控制点的数量较少，通常不能满足测图的需要，因此还需要加密若干级较低精度的控制点。对于施工控制网，通常分两级布设，第一级作总体控制，第二级直接为建筑物放样服务，根据工程建设的范围和建筑物放样精度的需要，先布设精度最高的首级控制网，当首级控制点距离放样点较远时，再加密低一级精度的控制点。对于变形监测控制网，根据变形监测的范围和变形监测的需要，通常采用一次性布网，特殊情况下可加密少量的二级点。

控制网的加密可以采用插网或者插点的方式，随着精密全站仪、水准仪、GPS的广泛应用，前方交会法、后方交会法、极坐标法、导线测量、GPS测量已成为平面控制点的主要加密方法，水准测量、测距三角高程测量已成为高程控制点的主要加密方法。应该指出的是，控制点也可以根据工程实际情况和需要进行越级加密。

在工程施工过程中，有时需要对局部区域的金属结构和机电设备等安装放样和安装检测，由于放样和检测通常以安装工程的主轴线作为标准，且精度要求高，因此最好将安装工程主轴线纳入到首级控制网中，且应该一次性布设完成，必要时，可以布设以安装工程主轴线为准的高精度独立控制网。

2.1.2 具有足够的精度

首级控制网采用何种等级，取决于工程的实际需要，一旦确定了控制网的等级，就相当于确定了控制网的精度及相应的观测纲要。工程平面控制网的精度通常用最弱边边长相对中误差、最弱点点位中误差等来表示，例如，二等、三等、四等三角网的最弱边边长相对中误差应分别不大于 $1/120000$ 、 $1/70000$ 和 $1/40000$ 。

对于地形测图平面控制网，一般要求首级图根点相对于首级控制点以及所测地面点的点位误差不超过 $\pm 0.1M\text{mm}$ (M 为测图比例尺分母)，由于图根点点位误差是其加密误差和控制点起始误差共同影响的结果，因此从 $\pm 0.1M\text{mm}$ 中除去图根点的加密测量误差后，就应该是首级控制点应该达到的最低精度。地形测图首级平面控制网的等级一般设计为三等及以下。

对于施工平面控制网，如果在首级控制点上进行施工放样，放样的点位误差是其放样误差和控制点起始误差共同影响的结果，如果要求施工放样的点位误差不超过 $\pm 50\text{mm}$ ，那么从 $\pm 50\text{mm}$ 中除去放样误差后，就是首级控制点应该达到的最低精度，如果施工放样只能在加密控制点上进行，那么放样的点位误差是其放样误差、首级控制点起始误差、加密控制点误差共同影响的结果，对首级控制点的精度要求将更高。施工测量首级平面控制网的等级一般为二等及以下。

对变形监测平面控制网，变形监测点的点位误差是其监测误差和控制点起始误差共同影响的结果，控制点精度的确定类似于施工控制网。变形监测首级平面控制网的等级一般为二等及以下，特殊要求下可设计为一等。因为工程建筑物变形监测的精度通常要求较高，所以变形监测网一般比测图控制网、施工控制网的精度要求高。

对于首级地形测图高程控制网、施工高程控制网、变形监测高程控制网的精度，可以采用与上述相类似的方法进行分析和确定。

2.1.3 具有一定的密度

不论是地形测图还是施工放样或变形监测，都要求测区内的控制点具有一定的数量，即满足一定的密度要求。控制点的密度通常用边长来衡量，《工程测量规范(GB50026—2007)》对于平面控制网中平均边长的规定如表 2-1 所示，由于不同工程的测区范围有显著区别，因此当测区范围较小时，表 2-1 中的平均边长可作适当缩短。对于高程控制网，控制点的密度通常用相邻高程控制点之间的水准路线长度来衡量，高程控制网的等级不同，水准路线长度的要求也不同。在许多工程控制测量中，平面控制点和高程控制点经常是共点布设的，因此高程控制点的密度易于满足规范的要求。

表 2-1 平面控制网平均边长 (单位: km)

等级	三角网	三边网	导线网	GPS 网
二等	9.0	9.0	—	9.0
三等	4.5	4.5	3.0	4.5
四等	2.0	2.0	1.5	2.0
一级	1	1	0.5	1
二级	0.5	0.5	0.25	0.5

2.1.4 遵照相应的规范

测量规范是国家或部门为开展测量工作而制定的测量法规，通常包括布网方案、作业

方法、观测仪器、各种精度指标等内容，测量作业时，必须以此为技术依据而遵照执行。现有的测量规范中，有的规范是根据工程的普遍性而编写的，如《全球定位系统(GPS)测量规范》、《工程测量规范》、《城市测量规范》等；有的规范是根据行业工程的特点而编写的，如《水利水电工程施工测量规范》、《公路勘测规范》、《建筑变形测量规范》、《混凝土大坝安全监测技术规范》等，可以根据工程的特点进行选用。

2.2 工程控制网的布设形式及要求

2.2.1 平面控制网的布设形式及要求

1. 三角形网

如图 2-1 所示，在地面上选埋一系列点 1, 2, …, 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，构成三角形网。图中，实线表示对向观测，虚线表示单向观测。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和全部边长、全部角度和部分边长、全部边长和部分角度、部分角度和部分边长。

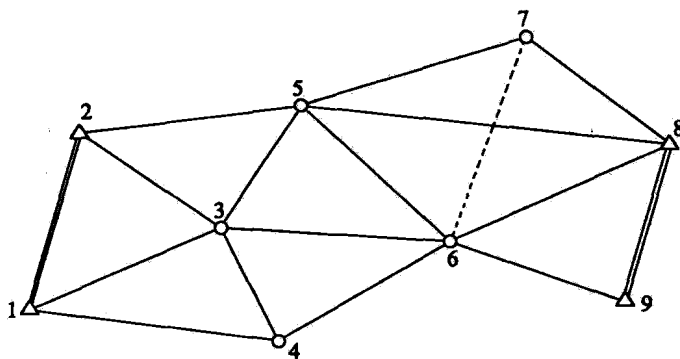


图 2-1 三角形网示意图

在完成观测元素的测量后，若已知点 1 的平面坐标 (x_1, y_1) 、点 1 至点 2 的平面边长 s_{12} 和坐标方位角 α_{12} ，即已知网的起算元素 (x_1, y_1) 、 s_{12} 、 α_{12} ，便可对起算元素和观测元素进行平差计算，获得网的推算元素的值，即各边的边长、坐标方位角和各点的平面坐标，并可对控制网进行测量精度的评定。对于控制网的起算元素，一般可通过下列方法获得：

(1) 起算坐标

若测区附近有国家或地方施测的控制网点，则可联测已有的控制网点传递坐标；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，这种方法目前已经很少采用。对于小测区或保密工程，可假定其中一个控制点的坐标，即采用任意坐标系统。