

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材



(第二版)

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



2016-1-072

工程控制测量

(第二版)

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.—2版.—武汉:武汉大学出版社,2018.5

高等学校测绘工程系列教材

ISBN 978-7-307-20144-6

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(2018)第075273号

责任编辑:胡艳

责任校对:汪欣怡

版式设计:韩闻锦

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:武汉中科兴业印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:384千字

版次:2011年8月第1版 2018年5月第2版

· 2018年5月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-20144-6

定价:35.00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。

再版前言

截至 2017 年 8 月,《工程控制测量》已经出版发行了 6 年,这段时间里,本书被多所本科和大专院校作为测绘工程专业的教学用书,也于 2016 年获得了“十三五”江苏省高等学校重点教材的修订立项。6 年来,编者一直将本书用于测绘工程专业的教学,对教材的内容及编排等有了新的认识和体会,也从有关院校授课老师中得到了一些有益的意见和建议,认为有必要对原版进行修订再版。

《工程控制测量》第 2 版仍沿用第 1 版的结构和体系,对第 1 版主要做了以下几个方面的修订工作:更正了书中某些不够准确的语言表达和个别公式、表格中的错误,增加了一些图、表和计算公式;修改了书中部分章节的名称及其内容,对部分内容的编排进行了微调;补充了国家大地测量控制网的基本知识和工程控制测量常用的标志及其埋设方法;增加了几种国产的先进的全站仪、光学水准仪和数字水准仪,并详细介绍了仪器的使用方法;增加了与现代卫星定位测量有关的 CORS 系统和 BDS 系统,介绍了系统的特点及其应用;增加了地铁、高铁、水电站等工程的控制测量案例,对应介绍了控制网的布设、测量及数据处理方法;针对各章节的内容增加了相应的思考题,便于读者对所述内容的理解和领会。

由于编者水平有限,《工程控制测量》第 2 版中仍可能存在错误之处,敬请读者批评指正。第 2 版中的部分内容和图表也参考了有关的文献,在此向文献的作者表示感谢。

编者
2017 年 9 月

第1版前言

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(安徽建筑大学)，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
思考题	6
第 2 章 工程控制网布设	7
2.1 国家大地测量控制网简介	7
2.1.1 国家平面控制网简介	7
2.1.2 国家高程控制网简介	10
2.2 工程控制网的布设原则	11
2.2.1 分级布网, 逐级控制	12
2.2.2 具有足够的精度	12
2.2.3 具有一定的密度	13
2.2.4 遵照相应的规范	13
2.3 工程控制网的布设形式及要求	13
2.3.1 平面控制网的布设形式及要求	13
2.3.2 高程控制网的布设形式及要求	19
2.4 工程控制测量的技术设计	21
2.4.1 资料的收集与分析	21
2.4.2 控制网的图上设计	22
2.4.3 控制网的优化设计	24
2.4.4 技术设计书的编写	29
2.5 控制点的选埋	29
2.5.1 实地选点	29
2.5.2 标志形式与埋设	30
2.6 地铁和高铁控制网布设简介	35
2.6.1 南京地铁 S8 号线区间平面控制网布设	35
2.6.2 石武高铁邢台段 CPⅢ控制网的布设	36
思考题	40

第3章 水平角测量	41
3.1 水平角测量原理	41
3.1.1 光学经纬仪测角原理	41
3.1.2 全站仪测角原理	43
3.1.3 国产全站仪简介	50
3.2 水平角观测	55
3.2.1 观测方法	55
3.2.2 测站限差要求	56
3.2.3 超限成果的取舍与重测	57
3.2.4 偏心观测与归心改正	57
3.3 角度测量误差来源	60
3.3.1 仪器误差的影响	60
3.3.2 观测误差的影响	63
3.3.3 外界条件的影响	64
3.4 外业成果整理与分析	65
3.4.1 资料的检查与分析	65
3.4.2 测站平差	67
3.4.3 控制网测角精度评定	67
3.4.4 水平方向值归算	68
思考题	69
第4章 距离测量	70
4.1 测距仪器的分类	70
4.2 相位法测距	71
4.2.1 相位法测距原理	71
4.2.2 Mekometer ME 5000 测距仪测距	73
4.2.3 Leica 全站仪测距	75
4.2.4 苏-光 RTS010 全站仪测距	80
4.3 距离测量的误差来源	82
4.3.1 测距误差分析	82
4.3.2 测距精度估算	84
4.3.3 加常数和乘常数的测定	85
4.3.4 周期误差的测定	87
4.4 距离测量与归算	90
4.4.1 测距的实施	90
4.4.2 距离的归算	92
思考题	94
第5章 精密水准测量	95
5.1 精密水准仪及其使用	95

5.1.1	光学水准仪及其使用	95
5.1.2	数字水准仪及其使用	98
5.1.3	国产数字水准仪简介	111
5.2	精密水准仪和水准标尺的检验	116
5.2.1	水准仪检验	116
5.2.2	水准标尺检验	121
5.3	水准路线测量	122
5.3.1	水准路线测量的实施	122
5.3.2	作业规定与测站限差要求	124
5.3.3	外业成果整理与分析	126
5.4	精密水准测量误差分析	128
5.4.1	水准仪和水准标尺的误差	128
5.4.2	观测误差	130
5.4.3	外界环境的影响	130
5.5	大坝垂直位移监测网布测	132
5.5.1	新安江水电站大坝监测网布测	132
5.5.2	仙居抽水蓄能电站大坝监测网布测	135
	思考题	138
第 6 章	跨河水准测量与三角高程测量	140
6.1	跨河水准布设与观测要求	140
6.1.1	场地布设要求	140
6.1.2	观测技术要求	142
6.2	跨河水准测量方法	144
6.2.1	光学测微法	144
6.2.2	倾斜螺旋法	145
6.2.3	经纬仪倾角法	147
6.2.4	测距三角高程法	149
6.2.5	GPS 测量法	150
6.3	测距三角高程测量	152
6.3.1	基本原理	152
6.3.2	观测方法与要求	154
6.3.3	大气折光影响及改正	154
6.4	工程实例	156
6.4.1	苏通大桥跨江水准测量	156
6.4.2	润扬大桥高程系统传递	159
	思考题	160
第 7 章	卫星定位测量	162
7.1	GPS 系统	162

7.1.1	GPS 系统的组成	162
7.1.2	GPS 卫星信号	163
7.1.3	GPS 接收机	164
7.2	载波相位相对定位	165
7.2.1	载波相位观测值	165
7.2.2	载波相位差分观测值	167
7.2.3	差分观测方程与解算	168
7.3	GPS 测量误差来源	169
7.3.1	与卫星有关的误差	169
7.3.2	与信号传输有关的误差	170
7.3.3	与接收机有关的误差	171
7.4	工程 GPS 网布设与观测	172
7.4.1	GPS 网布设方式	172
7.4.2	GPS 网外业观测	173
7.4.3	GPS 偏心观测与归心改正	174
7.4.4	苏通大桥 GPS 网布测	176
7.5	GPS 测量数据处理	178
7.5.1	基线解算及质量检验	178
7.5.2	GPS 网平差	180
7.6	连续运行参考站系统和北斗卫星导航系统简介	182
7.6.1	连续运行参考站系统	182
7.6.2	北斗卫星导航系统	184
	思考题	187
第 8 章 测量数据粗差检验		188
8.1	粗差检验概述	188
8.2	粗差检验基本方法	189
8.2.1	极限误差法	189
8.2.2	数据探测法	189
8.2.3	稳健估计法	190
8.3	GPS 测量数据的粗差处理	191
8.3.1	周跳的探测与修复	191
8.3.2	基于基线解算的粗差处理	192
8.3.3	电离层延迟误差修正模型	194
8.3.4	对流层延迟误差改正模型	195
8.4	粗差检验实例	196
8.4.1	平面控制网粗差检验	196
8.4.2	高程控制网粗差检验	199

思考题	200
第 9 章 工程控制网平差	201
9.1 平面控制测量概算	201
9.1.1 概算目的与流程	201
9.1.2 概算的主要内容与方法	201
9.1.3 资用坐标的计算	204
9.2 水准测量概算	205
9.2.1 概算目的与流程	205
9.2.2 概算的主要内容与方法	205
9.2.3 资用高程的计算	206
9.3 坐标系统的选择	206
9.3.1 概述	206
9.3.2 投影面和投影带的选择	207
9.3.3 坐标的邻带换算	210
9.4 控制网间接平差	211
9.4.1 边角网间接平差	211
9.4.2 水准网间接平差	214
9.5 工程控制网平差实例	215
9.5.1 润扬大桥平面控制网测量与平差	215
9.5.2 淮河入海水道变形监测网测量与平差	220
9.5.3 苏通大桥 GPS 网平差	223
思考题	224
第 10 章 参心坐标系及坐标换算	225
10.1 参心坐标系的建立	225
10.1.1 参心坐标系的建立原理	225
10.1.2 1954 年北京坐标系	227
10.1.3 1980 年国家大地坐标系	228
10.2 相同参心坐标系下的坐标换算	229
10.2.1 常用的参心坐标系	229
10.2.2 大地坐标与空间直角坐标的换算	230
10.2.3 大地坐标与高斯平面直角坐标的换算	231
10.3 不同参心坐标系下的坐标换算	232
10.3.1 空间直角坐标之间的换算	232
10.3.2 大地坐标之间的换算	234
10.3.3 平面直角坐标之间的换算	235
思考题	235
参考文献	236

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、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,在设计、施工等方面都有新的突破,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、形状及地物地貌等具体情况，建立满足大比例尺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，根据控制点数据和工程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，需要建立满足施工放样要求的施工控制网。

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(水域、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特点和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，布设形式主要有三角形网、导线网、GPS网等，三角形网、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

程网一般要求点间通视，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，可选择三角形网、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，平面控制网可选择三角形网、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，平面控制网可选择三角形网、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特定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、仪器仪表等的放样和安装精度；对于公路、铁路、管线等带状工程的施工控制网，应沿线路的一侧或两侧成对布设控制点，控制点离开线路中心线的距离应控制在一定的范围内；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，要尽量减小桥梁附近控制点的纵向误差和横向误差，以提高桥墩中心等关键位置的放样精度；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，同时，在地上、地下联系测量的井口或通道附近应布设控制点；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，并适当地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 $\pm(3\text{mm}+2\times 10^{-6}\times D)$ （ 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 $\pm(0.2\text{mm}+0.2\times 10^{-6}\times D)$, 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边角网、测边网、导线网发展。

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, 全站仪在体积、重量、精度等方面发生了较大的变化, 如 Leica 公司生产的系列全站仪, 其中 TC2003 的标称精度已达 $\pm(0.5'', 1\text{mm}+1\times 10^{-6}\times D)$ 。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 Wild N3 和 Zeiss Ni004; 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。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 Dini03 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, 简称全球定位系统 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球卫星导航系统 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, 该系统目前已经正常运行; 欧盟 15 国 2002 年 3 月决定建设伽利略卫星导航系统 Galileo, 计划由 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 23 颗北斗导航卫星, 已经初步建立了北斗卫星导航系统 BDS, 初步实现了对全球部分地区的覆盖。随着全球定位系统 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。随着我国北斗卫星导航系统 BDS 的不完善, BDS 将在工程控制测量中得到深入的研究和广泛的应用。

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，也得到了较深入的研究和应用。

思考题

1. 怎样理解测绘人员在工程建设中的作用?
2. 怎样理解几门先开课程与本课程的关系?
3. 工程控制测量的目的是什么?
4. 工程控制测量的主要任务和作用是什么?
5. 怎样理解工程控制测量应该针对具体的工程及其要求展开?
6. 什么控制网称为工程专用控制网? 举例说明。
7. 为什么要考虑将建筑物的主轴线纳入到施工控制网中?
8. 随着测量仪器的发展, 工程控制网的建立方法发生了哪些改变?
9. 怎样理解传统测量技术与现代卫星定位技术在工程控制测量中的作用?
10. 控制测量数据处理理论与方法有哪些新的研究及应用?

第2章 工程控制网布设

2.1 国家大地测量控制网简介

大地测量学的基本任务之一就是建立大范围、高精度的大地测量控制网。新中国成立以来,我国采用传统的天文测量和三角测量等方法完成了国家平面控制网的测量,以地球参考椭球面为基准面,先后建立了“1954年北京坐标系”和“1980年国家大地坐标系”;采用传统的水准测量方法完成了国家高程控制网的测量,以大地水准面为基准面,先后建立了“1956年黄海高程系”和“1985年国家高程基准”;采用现代GPS技术完成了GPS A、B级网, GPS一、二级网以及中国地壳运动观测网络的测量,联合其他有关部门建立的GPS控制点,建立了地心坐标系“2000国家大地坐标系”。针对国家大地测量控制网在工程控制测量中的应用现状,以下只对国家平面控制网和高程控制网的基本知识进行简单介绍,详细的理论和知识可参考大地测量学有关文献资料。

2.1.1 国家平面控制网简介

我国幅员辽阔,地形复杂,不可能采用一次性、高精度、高密度布网的方式建立全国性的平面控制网,只能根据分级布网、逐级控制的原则,先建立高精度、低密度的首级控制网,再逐级加密低精度网,同时提高控制点的密度。我国在建立平面控制网时,先在经纬线纵横交叉处布设控制点,以三角形作为基本图形进行构网,建立布满全国的高精度的一等三角锁,再在一等锁环内逐级布设二、三、四等三角网。可见,随着三角网等级的降低,三角形的边长逐渐缩短,控制点的密度逐渐增大。

如图2-1所示,一等三角锁是国家平面控制网的骨干,沿经纬线方向构成纵横交叉的锁状,两个相邻交叉点之间的三角锁称为锁段,锁段长度一般为200km。一等三角锁主要由三角形构成,局部形成大地四边形或中点多边形,三角形的平均边长为20~25km,三角形的任一内角不小于 40° ,大地四边形或中点多边形的传距角不小于 30° 。为了获得建立平面坐标系所需的起算数据,采用天文测量方法,在一等三角锁起始边的两端精密测定了天文经纬度和天文方位角,在锁段中央处测定了天文经纬度,测定天文经纬度主要是为计算垂线偏差提供资料,测定天文方位角主要是为控制水平角观测误差的累积对推算大地方位角的影响。为控制锁段中边长推算误差的累积,在一等三角锁的交叉处,采用基线丈量法测定起始边的边长,即先丈量一条短基线,再由基线网进行推算,随着电磁波测距技术的发展,少量边采用了电磁波测距的方法测定。

二等三角网的布设形式有两种:1958年以前,采用两级布设二等三角网,即先在一等锁环内首先布设纵横交叉的二等基本锁,将一等锁分为四个部分,然后再在每个部分中布设二等补充网,二等基本锁的平均边长为15~20km,二等补充网的平均边长约13km;