

## 序

精密工程测量是随着科学技术的发展而发展起来的，其“高精度”与“可靠性”，代表了工程测量的最新发展和先进技术，也是传统工程测量的发展和延伸。精密工程测量服务对象规模大、结构复杂、构件多，精度要求高，测量困难多、难度大，而且应用范围广。在使用仪器和工程建设方面，经常会涉及电子学、物理学、机械学、建筑学、地质学、地震学、气象学、计算机技术、通信技术和自动测控技术等，具有交叉学科和边缘学科的性能，并正逐步向邻近学科渗透，具有大力发展的趋势。

该书是作者多年的技术跟踪和实践经验的总结。首先以合理的深度介绍了精密工程测量的理论和方法，然后介绍了应用高精度的仪器设备和技术来进行精密测角、测距、测高、定向、定位，精密设备、部件的安装定位和微型变量的监测与数据处理。全书内容丰富、结构严谨、重点突出、思路清晰、深度恰当、逻辑性较强，易于学生接受和掌握。

该书作为“精密工程测量”课程的教材，适应当前科学技术的发展和高等教育改革的需要，具有明显的时代特点，它对测绘工程专业工程测量类课程改革作了较好的探索和尝试。我相信这本教材具有一定的推广应用价值。



2009年4月



# 前 言

精密工程测量是工程测量的分支，是测绘科学在大型工程、高新技术工程和特种工程等精密工程中的应用。精密工程测量主要研究精密工程测量的理论和方法，与其他测量相比，突出了其“高精度”和“可靠性”，代表了工程测量的最新发展和先进的技术，在探讨精密工程理论的基础上，应用了先进的仪器设备和先进技术，进行精密测角、测距、测高、定向、定位，从而获得各点的三维坐标或进行施工放样、设备安装和求得微量的位移量等一系列测绘信息。精密工程测量精度一般为毫米、亚毫米级，相对精度高于 $10^{-6}$ ，甚至更高。

精密工程测量是随着科学技术的发展及其在国防、科研、航空等领域中应用的需要而发展起来的。20世纪80年代以来，科学研究不断向宏观宇宙空间和微观粒子研究领域延伸。由于这些前沿科学研究和现代化建设的需要，必须要建设许多科学实验和复杂的大型工程。这些工程规模大、构件多、结构复杂、精度要求高，为了保证工程的正常运营和高度稳定，不但要求定位精度高，而且在运营期间还要监测其微型变形。显然，这些工程对测量精度要求很高，传统的测量方法已不适应时代发展的需要，这推动了精密工程测量的发展。

全书共分11章，第1章绪论；第2章精密工程控制网；第3章精密角度测量；第4章精密距离测量；第5章精密水准测量和高程传递；第6章精密定向测量；第7章精密定位测量；第8章精密准直测量；第9章精密设备安装和检校测量；第10章变形监测技术与数据处理；第11章精密工程测量数据处理。全书由赵吉先、刘荣、郑加柱、丁克良、聂运菊等撰写，由赵吉先教授负责全书的统稿工作。

本教材在编写过程中得到全国高等学校测绘教学指导委员会主任宁津生院士的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。同时感谢东华理工大学副校长、著名的测量专家陈晓勇教授的关心和支持。本书得到江西省“大地测量学与测量工程”省级重点学科的资助，在此表示感谢。

在本书完成之际，特别感谢本书所列参考文献的作者，是他们的研究成果给予笔者极大的启迪和帮助。同时感谢校友李信、田养权、章土来等提供的许多资料。由于作者水平有限，书中错误和不妥之处难免，恳请读者批评指正。

作 者

2009年4月于江西抚州



# 目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 精密工程测量的特点和测量内容	2
1.3 精密工程测量的精度	3
1.4 精密工程测量的发展	4
习题与思考题	5
第 2 章 精密工程控制网	6
2.1 概述	6
2.2 精密工程控制网优化设计的基础	7
2.2.1 控制网优化设计的分类	7
2.2.2 精密工程控制网优化设计的质量标准	8
2.3 精密工程控制网的布设原则	14
2.4 精密工程控制点的测量标志	14
2.4.1 观测点标志	14
2.4.2 照准点标志	15
2.5 几种典型的精密工程测量控制网	16
2.5.1 核电精密工程控制网	16
2.5.2 对撞机环形段平面控制网	18
习题与思考题	19
第 3 章 精密角度测量	20
3.1 概述	20
3.2 角度测量误差	20
3.2.1 仪器误差	20
3.2.2 观测误差	25
3.2.3 环境条件的影响	27
3.3 精密测角方法和提高精度的措施	28
3.3.1 精密测角方法	28
3.3.2 提高精度的措施	28

习题与思考题 .....	29
<b>第 4 章 精密距离测量 .....</b>	<b>30</b>
4.1 概述 .....	30
4.2 现代精密量距的设备 .....	30
4.3 干涉法测距 .....	33
4.3.1 相对干涉测距仪 .....	33
4.3.2 双频激光干涉测距仪 .....	34
4.4 电磁波测距 .....	35
4.4.1 ME5000 测距仪 .....	36
4.4.2 TC2003 全站仪 .....	38
习题与思考题 .....	42
<b>第 5 章 精密水准测量和高程传递 .....</b>	<b>44</b>
5.1 概述 .....	44
5.2 精密水准测量仪器 .....	45
5.2.1 数字水准仪原理 .....	45
5.2.2 流体静力水准仪原理 .....	49
5.3 精密水准仪的误差源及检定 .....	51
5.3.1 数字水准仪的误差源 .....	51
5.4 数字水准仪的检定 .....	54
5.4.1 数字水准仪 $i$ 角的检定与校正 .....	54
5.4.2 数字水准仪 CCD 传感器正确性的检定 .....	56
5.4.3 流体静力水准测量主要误差来源 .....	57
5.5 精密水准测量的实施 .....	59
5.5.1 前期准备工作 .....	59
5.5.2 精密水准测量的实施 .....	60
5.6 跨越障碍物的高程传递 .....	61
5.6.1 跨江跨海的高程传递 .....	61
5.6.2 高层或地下工程的高程传递 .....	69
习题与思考题 .....	72
<b>第 6 章 精密定向测量 .....</b>	<b>73</b>
6.1 概述 .....	73
6.2 直线定向 .....	73
6.3 激光定向 .....	75
6.4 陀螺经纬仪定向 .....	80
6.5 自动导向技术 .....	83

---

习题与思考题 .....	87
<b>第 7 章 精密定位测量 .....</b>	<b>88</b>
7.1 概述 .....	88
7.2 点的平面定位 .....	89
7.2.1 极坐标法 .....	89
7.2.2 角度交会法 .....	90
7.2.3 全站仪坐标法定位 .....	92
7.3 GPS 精密定位 .....	93
7.3.1 载波相位测量原理 .....	94
7.3.2 载波相位测量的相对定位 .....	95
7.3.3 GPS 定位测量的实施 .....	97
7.4 GPS 定位测量的主要误差 .....	100
7.4.1 与卫星有关的误差 .....	100
7.4.2 信号传播误差 .....	101
7.4.3 接收机误差 .....	102
7.4.4 观测误差 .....	103
习题与思考题 .....	103
<b>第 8 章 精密准直测量 .....</b>	<b>104</b>
8.1 概述 .....	104
8.2 水平精密准直测量 .....	104
8.2.1 小角法测量 .....	105
8.2.2 活动觇牌法测量 .....	105
8.2.3 机械法测量 .....	106
8.2.4 分段视准线法测量 .....	107
8.2.5 激光准直测量 .....	108
8.3 垂直精密准直测量 .....	111
8.3.1 机械法原理与应用 .....	111
8.3.2 激光铅垂仪的原理与应用 .....	113
习题与思考题 .....	115
<b>第 9 章 精密设备安装和检校测量 .....</b>	<b>116</b>
9.1 概述 .....	116
9.2 精密设备安装测量的基准和控制网 .....	116
9.2.1 主轴线和十字中心线 .....	117
9.2.2 环形控制网 .....	118
9.2.3 微形控制网 .....	120

9.2.4	高程控制网	122
9.3	点位精密放样	122
9.3.1	角边交会法	122
9.3.2	全站坐标法	123
9.3.3	铅垂线放样法	124
9.4	精密定线的方法	124
9.4.1	外插定线	124
9.4.2	内插定线	125
9.5	三维工业测量	126
9.6	核电站建设设备安装测量的实践	127
9.6.1	环形吊车的安装测量	128
9.6.2	压力容器的安装测量	129
9.6.3	主泵、蒸发器的安装测量	130
9.6.4	装卸料机的安装测量	130
9.6.5	反应堆穹顶吊装施工测量	131
	习题与思考题	134
<b>第 10 章</b>	<b>变形监测技术与数据处理</b>	<b>135</b>
10.1	概述	135
10.2	常规变形测量方法	136
10.3	摄影测量方法	137
10.4	GPS 变形监测及自动化系统	139
10.5	测量机器人在变形监测中的应用	141
10.6	传感器自动变形监测技术	143
10.7	变形监测数据处理	149
10.7.1	变形监测网的数据处理	150
10.7.2	变形监测点的数据处理	156
	习题与思考题	168
<b>第 11 章</b>	<b>精密工程测量数据处理</b>	<b>170</b>
11.1	概述	170
11.1.1	误差来源	170
11.1.2	误差类型	172
11.2	粗差判别与剔除	174
11.2.1	莱因达 (3S) 准则	174
11.2.2	格拉布斯 (Grubbs) 准则	176
11.2.3	狄克逊 (Dixon) 准则	178

---

11.3 稳健估计法.....	180
11.3.1 稳健估计.....	180
11.3.2 一次范数最小平差方法 .....	182
习题与思考题.....	185
参考文献.....	186



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

精密工程测量是工程测量的分支，是测绘科学在大型工程、高新技术工程和特种工程等精密工程建设中的应用。工程测量学是研究各种工程建设中测量理论和方法的学科。主要研究工程和城市建设及资源开发等各阶段进行的地形和有关信息采集、处理、施工放样、变形监测、分析与预报的理论和技術，以及与研究对象有关的信息管理和使用。精密工程测量主要研究精密工程测量的理论和方法，突出其“高精度”与“可靠性”，代表了工程测量的最新发展和先进技术。精密工程测量是传统工程测量的发展和延伸，应用先进的高精度的仪器、设备进行测角、测距、测高、定向、定位，从而获得各点的三维坐标或进行施工放样、设备安装和求取位移量值等一系列测量信息。精密工程测量精度一般为  $1\sim 2\text{mm}$ ，甚至亚毫米级，相对精度高于  $10^{-6}$ 。

精密工程测量是随着科学技术的发展及其在国防、工业、科研、航空和其他领域中应用的需要而发展起来的。20 世纪 80 年代以来，科学研究不断向宏观宇宙和微观粒子研究领域延伸。由于这些前沿科学研究和现代化建設需要，必须要建设许多科学试验工程和复杂的大型工程。例如，高能物理研究中的粒子加速器，卫星和导弹发射轨道，各种大型原子能反应堆，以及核电站和几百米高的电视塔、几十千米长的跨江跨海隧道、桥梁等。这类工程规模大、结构复杂、构件多，为了保证它们的正常运营和高度稳定，不仅要求以高精度安装定位，而且在运营期间还要监测其微型变形，并将其校正到正确位置，因此，对测量工作的精度要求很高。在天体研究中，需要采用各种射电望远镜和天线，在安装它们抛物面的反射镜时，其相对精度高达  $10^{-8}$ 。在现代化工业生产中，由于生产过程的自动化和产品质量检测的标准化，对其构件的安装定位和检测精度要求都很高。例如航空工业，船舶、汽车等机械制造和核电站建设、卫星发射等，其定位和检测精度都达到  $0.1\text{mm}$  以上。这类工程的测量工作称为精密工程测量，它是介于测量学与计量学之间的一门科学，也就是说用测量学的原理和方法达到计量级的精度指标，而它们的作业环境和范围又超出了计量工作的界线。因此，有人把精密工程测量又称为“微型大地测量学”或“大型计量学”。

精密工程测量主要为工程建设服务，其工作程序与普通工程测量相似，从属

于工程勘察设计、施工放样、竣工后的变形监测等。精密工程测量的方法受到工程特征和施工方案的影响，测量精度也取决于工程的精度需要。

## 1.2 精密工程测量的特点和测量内容

精密工程测量与普通工程测量相比，在服务范围、精度要求、采用的仪器设备、测量方法等方面都存在一定的差别，概括起来，精密工程测量有以下特点：

(1) 精密工程测量的“精密”主要体现在测量精度要求高，一般为  $1\sim 2\text{mm}$ ，甚至亚毫米级，相对精度高于  $10^{-6}$ 。

(2) 服务对象规模大、结构复杂、构件多、测量困难多、难度大。

(3) 应用最新的仪器设备，而且仪器性能好、稳定性强、自动化程度高，有时还能遥控作业或自动跟踪测量。

(4) 精密工程测量服务领域宽，应用范围广。在使用的仪器和工程建设方面，经常会涉及电子学、物理学、机械学、建筑学、地质学、地震学、气象学、计算机技术、通信技术和自动测控技术等。具有交叉学科和边缘学科的性能，并正逐步向邻近学科渗透，而且有大力发展的趋势。

精密工程测量的特点决定了其对测量人员和测量工作的要求。要深入研究和探讨精密工程测量的新理论、新方法、新的仪器设备，并能排除各种干扰；要不断总结经验，提高测量精度、可靠性和工作效率，确保精密工程测量达到令人满意的效果。为实现精密工程测量的上述目标，其主要工作内容包括以下几个方面：

(1) 建立精密工程测量控制网。精密工程测量控制网是为工程建设服务的，其网形结构和点位选择都要求满足工程的需要，而且要求精度高、可靠性强。通常先在图上设计，再放样到实地，建立高标准的测量标志，采用精密测角、测距、定位等方法建立工程控制网或“微型网”，并制定建立控制网的基本原则和观测与检验方法等。

(2) 根据工程的特点和精度要求，选用最合适的仪器和先进的测量方法。距离测量一般采用高精度的测距仪、全站仪或干涉测距等，并研究各种误差的影响和改正措施。角度测量采用高精度的光学经纬仪或电子经纬仪。水准测量通常采用高精度的光学水准仪、电子水准仪和液体静力水准仪。定向可采用几何定向和物理定向，物理定向可采用高精度的陀螺仪和激光指向仪等。定位可采用精密测角、测距定位，主要采用 GPS 定位。变形监测可采用上述的精密测角、测距、测高、定向、定位或传感器、机器人等测量微型位移量等。

(3) 计量仪器的使用。根据国家有关规定，在测量工作进行之前，必须用计

量仪器和设备对各种精密测量仪器进行检定，并测定其系统误差改正系数。

(4) 测量仪器多属于电子类仪器，在观测过程中要防止强磁场、强电子辐射和大气折光的影响，测量观测点位置和观测时间都要认真、科学地选择，防止各种外界因素的干扰和影响，确保测量精度。

(5) 测量仪器和测量方法要围绕对中、照准、测角、测距、测高、定向、定位及数据采集、记录、传递、处理等工作的自动化进行研究和探讨。

### 1.3 精密工程测量的精度

精密工程测量的精度目前还没有统一的标准。从理论上讲，应以工程限差要求来推算各种测量阶段的测量精度。例如，大型隧道贯通的中、腰线放样，要根据贯通隧道的长度、作业方式和相遇点的限差来推算确定中、腰线放样的精度和检查措施。又如根据核电站反应堆内设备安装定位的精度，来确定反应堆内部“微网”的布设方式和测量的必要精度。但在多数情况下，由于工程限差无法精确地确定，而且在推算过程中许多参数也是未知数，所以理论推算也无法进行。而且各种工程建设各有特点，有些工程在我国刚刚开始或建设数量很少，更缺乏实际经验，对它们的精度要求，现行规范也可能无明确的规定，往往需要工程的设计人员、施工人员和测量人员共同协商探讨，确认精度要求。仅靠单方面确定精度，有时会产生要求过严。这种过高的精度要求，很可能造成测量工作不必要的人力、财力和时间的浪费，同时可能会造成测量工作的困难。

对于高新技术工程或规范中没有明确界线的构筑物精度要求的工程，在测量设计阶段确定精度指标时，应从以下几方面进行考虑：

(1) 确保工程建设的需要和安全运营，并结合目前先进的仪器和技术能实现的程度采用多种模拟计算和综合技术确定精度。例如直线加速器的磁铁定位，根据理论分析，最大允许误差不超过 $\pm 10\text{mm}$ ，同时考虑最终误差可能是由安装误差、磁铁变形、地基沉降、热温膨胀、振动等综合影响的结果，所以界定磁铁定位误差为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 。

(2) 确保工程建设的质量要求。许多大型工程中，为了实现其目标，有各阶段的多项测量工作，而且这些测量工作相互联系并对测量结果都有影响。要根据测量单位的仪器设备与技术，进行科学分配。例如铁路、矿山两井间的大型隧道贯通工程，其贯通横向误差主要由地面控制测量，两井联系测量，地下控制测量和中、腰线放样四个部分组成。考虑到两井联系测量、地下控制测量受到环境和条件的影响，提高精度有一定的难度，应根据现有条件和技术测量所能达到的精度，剩下部分由地面控制网完成。地面观测条件好、所用仪器精度高、布网灵

活，比较容易达到精度要求。

(3) 借助于同类工程执行结果，已被证实能确保工程质量的精度指标。核电站反应堆内压力器等主要部件定位精度要达到 0.01mm，而反应堆内微型控制网的最弱点位中误差 0.2mm 就可以满足要求，新建核电站就可以参照此标准执行。

## 1.4 精密工程测量的发展

精密工程测量是随着社会的进步和科学技术的发展，伴随着航空、航天、国防、工业、科研等特大工程和高科技工程的发展而发展起来的，而且不断深入地下、水域和宇宙空间。20 世纪 40 年代以来，人类先后建立了许多特种工程、巨型工程和高科技工程，如导弹、卫星发射架、高耸入云的电视塔、大型水电站和核电站、周边 27km 的正负电子对撞机、长达 53km 的海底“欧洲隧道”等。这些工程建设中测量工程难度大、精度要求高，许多工程要求达到亚毫米级甚至更高，传统的测量方法和仪器已远远不够使用。为此人类研究和开发了许多新的仪器和相应的测量方法，同时也推动了精密工程测量的飞速发展。

我国建国半个多世纪以来，随着社会主义现代化建设的发展，同样促进了精密工程测量的蓬勃发展。正在建设的北京、上海、广州的地铁，上海、武汉的跨江隧道，刘家峡、葛洲坝、三峡水利枢纽和发电厂，各种大型炼钢转炉，大型造船业，大亚湾、秦山、杨江核电站，以及高能物理加速器、正负电子对撞机等，大大促进了精密工程测量的发展。

精密工程测量的发展已基本形成了一个体系或一个学科，随着现代化建设步伐的加快和科学技术的发展，其发展也将更加迅猛。用目前的观点和认识论来看，精密工程的发展必须加强以下几个方面的深入研究：

### 1) 新理论、新方法的研究

精密工程测量最基本的特点就是精度要求高，工作难度大。它的工作对象都是高科技工程和尖端科学工程。传统的测量理论和方法，如三角网、导线网、线形锁和钢尺量边导线等，已不能满足精密工程测量的需要，要进行新理论、新方法的研究。例如，对全球定位系统 (GPS)、雷达干涉测量 (INSAR)、传感器和测量机器人等的进一步的研究与开发，更好地发挥它们在精密工程测量中的应用。更重要的一方面，随着科学技术的进步和精密工程测量的需要，研究开发像纳米技术和一些人类目前还未知的新材料、新技术在测量中的应用，使测量精度可达到纳米或微米，而且测量方法大大改善，这是所有测量人员的愿望和发展的方向。

### 2) 减少环境等外界各因素影响的研究

测量工作都在大气中进行，受温度、气压等影响比较大，各类测量仪器在测

角、测距、测高、定向、定位和放样中都受到大气折光的影响。气象影响除了折射率公式误差外，还有温度、气压的测定误差。人们曾采取飞机、气球等各种措施测定测线上的气象元素，但没有根本解决问题。气象误差仍是精密工程测量的主要误差源之一。被测物体受热胀冷缩的影响，也会影响测量结果。同时，受地形、地物和大面积水面的影响也不可忽视。

另一方面，现在所用的测量仪器多数是电子类仪器，电磁波在传输过程中除了受大气影响外，还受到强磁场的影响，如电磁波，微波发射台、站，高压线，变电站等。这些环境中的外界因素对测量的影响规律和应采取相应的改正措施的研究，也是精密工程测量研究的重要方向。

### 3) 现代测绘信息处理方法的研究

现代测绘信息不仅仅是点、线、面等三维坐标，而是多维信息，包括时间、色彩、亮度以及地球、太阳运动状态等。测量误差不完全服从正态分布，传统的最小二乘原理并非最优。此外，在精密工程测量和微型变形监测中，传统的统计模型和分析方法也并非最佳。同时，现代测绘信息处理并不是单一的平差，还包括图形、图像、色彩及时间等处理，是多维、多项的综合处理。

现代测绘信息处理要随着精度要求的提高和观测方法的更新，研究新的信息处理模型。如确定性模型、混合模型、动态性模型和不确定性模型等。在处理方法上可采用灰关联法、模糊评判法、神经网络法等，更需要研究一些前人没有用过的信息处理方法，即创新。

### 4) 专用精密测量仪器的研究

常用测量仪器，如全站仪、电子水准仪、激光仪器和 GPS 等，在测绘工作中发挥着巨大作用。但随着科学技术进步和测绘学科的发展，常规测量仪器的精度和自动化、智能化程度还不能完全满足精密工程测量的需要。需要研究专用精密测量仪器，以提高测量的自动化、数字化、智能化和测量精度及其减少外界环境影响的能力，从而能减少测量人员的劳动强度。例如，研究新型的 GPS、全站仪、水准仪、绘图仪、自动传感或遥控类仪器，以及测量机器人、超站仪等最新的测量仪器。还要深入研究目前人类未知的应用纳米技术、网络技术和特殊技术类的测量仪器，以提高测量的精度、效益及其自动化、智能化程度。

## 习题与思考题

1. 什么叫精密工程测量？
2. 精密工程测量有何特点？
3. 精密工程测量的内容是什么？精度有什么要求？
4. 试述精密工程测量的发展。

## 第 2 章 精密工程控制网

### 2.1 概 述

精密工程控制网是为精密工程服务的，应在工程勘探设计阶段完成。精密工程控制网与常规的控制网相比，具有以下基本特点：

(1) 控制网的大小、形状、点位分布与工程的大小、形状相适应，边长不要相等或接近，而根据工程需要进行设计，点位布设要考虑工程施工放样和监测的方便。

(2) 投影面的选择应满足“控制点坐标反算的两点间长度与实地两点间长度之差应尽可能小”。如隧道施工控制网应投影到隧道贯通平面上，核电站施工控制网应投影到平均高程面上。

(3) 坐标系应采用独立的建筑坐标系，其坐标线应平行或垂直于精密工程的主轴线。主轴线通常由工艺流程方向、运输干线或主厂房的轴线所决定。

(4) 不要求控制网的精度绝对均匀，但要保证某一方向、某几个点的相对精度较高。例如，强聚焦粒子加速器建设过程中，为了使高速飞行的粒子束不致因在真空管壁陷落或磁撞，要求磁铁安装的相对误差不得超过  $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 。隧道施工控制网的精度要保证隧道横向贯通的准确性。

精密工程控制网不但为施工放样服务，还为某些工程设计提供大比例尺地形图服务，有时还可能为工程施工和运行过程变形监测服务。控制网设计时应考虑一网多用，避免重复建网，必要时可对控制网进行复测。

精密工程控制网的布设方法和步骤与一般控制网一样。首先是收集资料，了解工程和测区环境的具体情况。这项工作进行的好坏，直接影响到网形选择、点位确定、观测方案以及控制网的实用性和可靠性。需要收集的资料很多，应首先收集工程设计图和各项精度指标，以及工程所在地的大比例尺地形图资料。

对所收集的资料进行初步研究之后，为了进一步判定已有资料的正确性和实用性，必须对工程现场进行详细的踏勘，主要了解工程所在地的地形、地物、水文、地质、道路、交通和居民地等情况。接着，结合现场踏勘和工程要求，初步进行选点和确定控制方案。控制网可根据现场的地形、地物、工程大小和精度要求，以及现有的仪器设备，在确保质量的前提下，选择最优方案。

综上所述，精密工程控制测量的基本任务，就是根据工程的特点和要求，布

设一定形状和点位适当的控制网，并精密测定其位置，以保证工程的需要。其目的除了为大比例尺地形图测绘服务外，重点是保障工程的精密定位放样、设备安装和变形监测。控制网的作用是控制全局，限制测量误差的传递和积累，保证测量工作的必要精度。

## 2.2 精密工程控制网优化设计的基础

精密工程控制网的优化设计是应用现代测绘理论和技术，针对工程特点、施工方法和精度要求，设计出最佳的控制网方案。也就是在现有的人力、物力和财力的条件下，使控制达到最高的精度、灵敏度和可靠性，同时使控制网成本最低。本节主要介绍控制网优化设计的分类和质量标准。

### 2.2.1 控制网优化设计的分类

控制网优化设计除了考虑基准选择外，还考虑网形设计、权设计和加密等。这类设计可由固定参数和自由参数表示，如表 2-1 所示。具体有以下四类：

表 2-1 设计分类

设计类型	固定参数	自由参数
零类	$A, P$	$X, Q_X$
I 类	$P, Q_X$	$A$
II 类	$A, Q_X$	$P$
III 类	$Q_X$	部分 $A, P$

#### 1) 零类设计（或称基准设计问题）

此类设计是对一个已知图形结构和观测方案的自由网，为控制网点的坐标及其方差阵选择一个最优的坐标系。实际就是在已知设计矩阵  $A$  和观测值的权阵  $P$  的条件下，确定其网点的坐标向量  $X$  和其协因数阵  $Q_{XX}$ ，使  $X$  的某个目标函数达到极值。

#### 2) I 类设计（或称网形设计问题）

此类设计是在已知观测值的权阵  $P$  及其协因数阵  $Q_{XX}$  的条件下，确定设计矩阵  $A$ 。这类设计是寻求点位的最佳位置和最合理的观测值数目。

#### 3) II 类设计（或称观测值权的分配问题）

此类设计是已知设计矩阵  $A$  及其协因数阵  $Q_{XX}$  的条件下，确定观测值的权阵  $P$ ，寻求某些元素达到预定的精度或最高精度，同时包括仪器设备的最佳利用

以及各种观测手段的最佳组合。

#### 4) III类设计 (或称网的改造或加密方案的设计问题)

此类设计是已知协因数阵  $Q_{XX}$ , 其中设计矩阵  $A$  和观测值权阵  $P$  的部分为已知, 求待定部分。此类设计是对原有控制网的改造和补充, 即加密优化和原网的改进优化, 使改造方案达到最佳效果。

### 2.2.2 精密工程控制网优化设计的质量标准

质量标准是控制网优化设计的核心, 没有质量的控制网是无效的, 更谈不上优化。因此, 质量标准的确定是控制网设计的重要内容。质量标准又称质量指标或质量准则, 下面作简要的介绍。

#### 1. 精度标准

精度标准是描述误差分布离散程度的一种度量。当把协方差阵  $Q_{XX}$  作为已知参数时,  $Q_{XX}$  又称为标准矩阵。也就是在控制网优化设计中使得到的未知数协方差阵  $Q'_{XX}$  与预先给出的  $Q_{XX}$  尽可能相等。因此, 标准矩阵就是预先给出的理想的协方差阵  $Q_{XX}$ , 用  $Q_{XX}$  对控制网设计提出全面的精度要求。通常情况下, 对精密工程控制网的精度要求仅限于标准矩阵中的一些主要因素, 所以又称纯量精度标准。纯量精度标准主要有以下几种表达方式:

A 最优  $\text{Tr}(Q_{XX}) = \min$  (即协方差阵  $Q_{XX}$  的迹最小)

D 最优  $\det(Q_{XX}) = \min$  (即协方差阵  $Q_{XX}$  的行列式值最小)

E 最优  $\lambda_{\max}(Q_{XX}) = \min$  (即协方差阵  $Q_{XX}$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  最小)

S 最优  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = \min$  (即最大特征值与最小特征值之差最小)

上述的标准不包含控制网的全部内容, 如某一条边长、某一个方向和某一个点位等精度。比较典型的是隧道工程控制设计中要求其贯通横向误差的影响最小, 不属于上述的任何一个优化标准。这类问题属于局部精度, 可用未知数函数式来表示。设有线性化后的函数式矩阵

$$F(X) = fx$$

式中,  $f$  为系数矩阵。根据协方差传播定律,  $F(X)$  的权逆阵  $Q_F$  为

$$Q_F = f\theta f^T$$

取  $Q_F$  的迹作为最优标准, 命名为  $F$  标准

$$\varphi(Q) = \text{tr}(Q_F) = \text{tr}(f\theta f^T)$$

当  $\varphi(Q) = \min$  时, 可称为  $F$  最优。

#### 2. 可靠性标准

控制网的可靠性是指控制网探测观测值粗差和抵抗残存粗差对平差结果的影

响能力。为了保证精密工程控制网的设计方案具有较好的可靠性，在设计中必须引入可靠性标准。这里主要讨论控制网的内部可靠性和外部可靠性及其标准。

### 1) 控制网的内部可靠性

控制网通过平差统计检验发现粗差的能力可用两种方法衡量：首先是发现粗差的大小；其次是某一固定大小的粗差被发现的可能性的。这里主要指发现粗差最小值（或下限值）和发现粗差的概率。很显然，一个控制网发现的粗差越小或某一固定大小的粗差被发现的可能性越大，则说明网的可靠性越好。下面简要介绍控制网可能发现的最小粗差。由误差理论可得观测值方程为

$$L+V=AX \quad (2-1)$$

式中， $L$  为观测值向量； $V$  为观测值改正数； $A$  为网形的设计矩阵或称为误差方程系数阵； $X$  是未知数。

由上式可推导出改正数  $V$  的协因数阵

$$Q_V=Q_L-A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (2-2)$$

根据 Baarda 的粗差探测理论，单个观测的粗差估计为

$$\delta=\frac{v_i}{\gamma_i} \quad (2-3)$$

相应的方差为

$$\sigma_\delta^2=\frac{\sigma_i^2}{\gamma_i} \quad (2-4)$$

式中， $\delta$  表示粗差估计； $v_i$  为第  $i$  个观测值改正数； $\sigma_\delta^2$  表示粗差估计的方差； $\sigma_i^2$  表示观测值观测方差； $\gamma_i$  为矩阵  $Q_V$  主对角线中的第  $i$  个元素。对于观测值相互独立的情形，则有

$$\gamma_i=Q_{V_i} p_i \quad (2-5)$$

式中， $Q_{V_i}$  为  $Q_V$  的对角元素。由式 (2-3) 和式 (2-4)，可构成粗差探测统计量

$$T_i=\frac{\delta}{\sigma_\delta}=\frac{v_i}{\sqrt{\gamma_i} \sigma_i}=\infty N(0, 1) \quad (2-6)$$

对统计量  $T_i$  进行假设检验。原假设  $H_0$  为  $L_i$  中不含粗差，备选假设  $H_1$  为  $L_i$  中存在粗差。利用上式所能发现或探测的最小粗差也称为发现粗差的最小临界值为

$$\delta_{i\min}=\sigma_i \frac{\delta_0}{\sqrt{\gamma_i}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2-7)$$

为了比较不同精度的观测值之间发现粗差能力的差别，将上式中的观测值精度  $\sigma_i$  去掉，由此可得一个单纯反映观测值发现粗差能力的无量纲指标

$$\delta_i=\frac{\delta_0}{\sqrt{\gamma_i}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2-8)$$

式中,  $\delta_0$  为原假设与备选假设之间可区分的最小距离, 它的大小由检验的置信水平  $(1-\alpha)$  和检验功效  $(1-\beta)$  确定, 显然, 对于一个控制网, 如果  $\delta_{\min}$  越小, 说明该网发现粗差的能力越强, 可靠性越好。

由式 (2-8) 可以看出控制网的内部可靠性主要取决于相应的多余观测分量  $\gamma_i$ 。它实际上反映了控制网内部可靠性的大小, 因而作为评价内部可靠性的标准。

### 2) 控制网的外部可靠性

可能发现的最小粗差而实际上是不可发现的最大粗差, 因此未发现的最大粗差保留在观测数据中, 对平差结果的影响为

$$\hat{\delta}_{0i} = \delta_0 \delta_i \sqrt{\frac{1-\gamma_i}{\gamma_i}} \quad (2-9)$$

上式中的  $\hat{\delta}_{0i}$  可作为观测值可靠性标准。若令

$$\bar{\delta}_{0i} = \delta_0 \sqrt{\frac{1-\gamma_i}{\gamma_i}} \quad (2-10)$$

则式 (2-9) 为

$$\hat{\delta}_{0i} = \bar{\delta}_{0i} \delta_i \quad (2-11)$$

上式中的  $\bar{\delta}_{0i}$  反映了不可发现的粗差对平差未知数的影响, 相当于观测误差的倍数。所以  $\bar{\delta}_{0i}$  也可以作为观测值外部可靠性标准。同时由上式可明显看出外部可靠性也取决于多余观测分量  $\gamma_i$ ,  $\gamma_i$  越大网的外部可靠性越大, 反之则越差。

综合上述讨论, 控制网的内、外部可靠性都取决于多余观测分量, 这一特性对精密工程控制网的优化设计理论特别重要, 可根据多余观测分量建立可靠性标准。因此, 也可用多余观测平均值作为控制网的整体可靠性指标

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma (Q_v P)}{n} = \frac{\gamma}{n} \quad (2-12)$$

在控制设计阶段, 根据网的类型, 能对观测值起良好控制的网其多余观测分量应满足下式:

$$\gamma_i \rightarrow \bar{\gamma} = \frac{\gamma}{n} \geq 0.2 \sim 0.5 \quad (2-13)$$

### 3. 灵敏度标准

灵敏度是用来衡量变形监测控制网质量的特殊标准, 它反映变形监测网发现变形、区分变形的能力。精密工程控制网根据工程的需要, 也可作为变形监测网, 所以精密工程控制网设计时, 也应考虑网的灵敏度。根据实际要求和背景的