

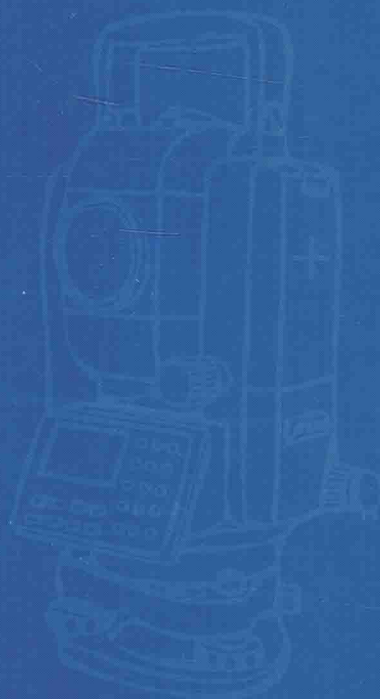


普通高等教育“十二五”规划教材

工程测量学

(第二版)

李天文 龙永清 李庚泽 编著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工程测量学

(第二版)

李天文 龙永清 李庚泽 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年从事工程测量学的教学和工程实践的经验总结。全书共9章,第1~2章主要介绍工程测量学的基本理论、基本方法和最新技术;第3~8章分别讲述建筑工程测量、道路工程测量、桥梁工程测量、地下工程测量、管线工程测量、水利工程测量的最新方法与技术;第9章介绍工程建筑物变形监测的基本理论、最新方法与技术。

本书既可作为测量学专业本科生、研究生教材,也可供地理信息科学专业研究生和相关专业师生、研究人员及测绘专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程测量学/李天文,龙永清,李庚泽编著. —2版. —北京:科学出版社,2016.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-049936-3

I. ①工… II. ①李…②龙…③李… III. ①工程测量-高等学校-教材
IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 222196 号

责任编辑:杨 红 / 责任校对:张小霞

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年9月第 二 版 印张:14 1/2

2016年9月第五次印刷 字数:344 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

自本书 2011 年出版发行以后,工程测量中所使用仪器及方法都有了一定程度的发展,加之大规模高精度的工程建设越来越多,以及人们对工程质量及灾害监测的重视,为了满足广大读者的需求,及时反映工程测量的最新成果,特对本书进行了修订,具体内容体现在以下几个方面:

- (1)结合本书出版后的使用情况,进一步对全书的内容进行了精化;
- (2)为了使学生更好地掌握所学内容,在相关章节后增加了相应的习题;
- (3)结合当前人们对自然灾害的重视,在第九章中增加了变形资料的检核及变形监测成果的整理等内容,从而为变形预测奠定了基础。

由于工程测量技术的发展日新月异,大规模高精度工程建设项目越来越多,因此,在修订本书时,依然重点介绍工程测量的基本理论、基本方法、各种工程的施工放样、变形监测及分析等内容,力图进一步启迪从事该专业人员的想象力和创造力,为工程测量学的发展作出贡献。

作 者

2016 年 7 月

第一版序

工程测量学主要研究在工程建设和自然资源开发各阶段所进行的测量工作的理论、方法和技术,也是测绘科学技术在国民经济、社会发展和国防建设中的直接应用。具体言之,就是研究工程建设和资源开发利用中的勘测设计、建设施工、竣工验收、生产运营、变形监测及灾害预报等方面的测绘理论、方法与技术,在经济社会发展中发挥着至关重要的作用。当前许多高校的测绘工程专业和其他相关专业都开设了该课程,或在测量学中扩充了工程测量学的内容。

西北大学城市与环境学院的李天文教授等在参阅了大量工程测量理论成果和丰富实践经验文献资料的基础上,根据自己多年的教学和工程实践经验,为测绘工程专业和地理信息系统专业的本科生和研究生编写了《工程测量学》一书。该书由工程测量学的基本理论、基本方法、最新技术和各种具体的专项工程测量组成,其目的在于加强学生实践动手能力的训练,培养学生分析问题和解决问题的能力,提高学生的综合素质。该书的一个显著特点就是紧密结合当前各项工程建设项目,有针对性地阐述工程测量的理论、技术和方法,这将有利于学生的学习和掌握,使学生学习之后,对工程测量学的基本理论、最新方法与技术能有一个比较清晰的认识,并能应用所学的知识去解决各种工程测量中的具体问题。

中国工程院院士



2011年3月1日

第一版前言

随着计算机技术、电子技术及测绘仪器的发展,工程测量学的技术手段、方法和理论均发生了质的飞跃。为满足工程建设和教学对新技术的要求,作者在参阅大量文献的基础上,根据多年的教学和工程实践经验编写了本书,目的在于加强对学生的实践动手能力的训练,培养学生分析问题和解决问题的能力,提高学生的综合素质。

全书共9章,第1、4、5、9章由李天文执笔,第2、6章由龙永清执笔,第3、7、8章由李庚泽执笔,最终由李天文统一修改、定稿。邓鑫、邢明亮、王琳刚、程晨健、习永强为本书的完成做了大量工作。

本书的特点在于精练工程测量学的基本理论,突出工程测量实践,以章为单元介绍测绘新技术在不同行业工程测量中的应用。

本书注重理论与工程实际相结合,反映了当前工程测量发展的最新理论与技术。但由于工程测量技术发展日新月异,且作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位专家及广大读者指正。

作 者

2011年1月

目 录

第二版前言

第一版序

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程测量的概念、任务及内容	1
1.2 工程测量发展现状	2
1.3 工程测量数据处理自动化和数据库建设	4
习题	4
第 2 章 工程测量的基本工作	5
2.1 概述	5
2.2 工程控制网的优化设计	6
2.3 导线控制测量	9
2.4 高程控制测量	20
2.5 施工放样的基本方法及精度分析	27
2.6 工程建设中地形图的应用	36
习题	40
第 3 章 民用与工业建筑工程测量	41
3.1 概述	41
3.2 建筑施工控制测量	41
3.3 建筑限差及施工放样精度	43
3.4 施工轴线及方格网建立	45
3.5 民用建筑施工测量	49
3.6 工业建筑施工测量	53
习题	58
第 4 章 铁路、公路工程测量	59
4.1 概述	59
4.2 道路工程控制网	60
4.3 道路勘测、中线及断面测量	63
4.4 道路中线坐标计算	71
4.5 圆曲线放样	75
4.6 缓和曲线放样	77
4.7 复曲线放样	79
4.8 竖曲线放样	80
习题	81
第 5 章 桥梁工程测量	82
5.1 概述	82
5.2 桥梁工程控制网	83

5.3	桥梁基础施工测量	87
5.4	桥梁墩、台及高塔柱施工测量	89
5.5	桥梁架设施工测量	93
	习题	101
第6章	地下工程测量	102
6.1	概述	102
6.2	地下工程控制测量	103
6.3	地面与地下联系测量	108
6.4	控制测量精度分析	117
6.5	地下工程施工测量	121
6.6	陀螺定向测量	132
	习题	137
第7章	管线工程测量	138
7.1	概述	138
7.2	管线的初测	138
7.3	管线施工测量	140
7.4	顶管施工测量	143
7.5	架空输电线路测量	145
7.6	拉线放样	148
7.7	导线弧垂观测	151
	习题	153
第8章	水利工程测量	154
8.1	概述	154
8.2	水利工程控制网	155
8.3	渠道及提线测量	156
8.4	水下地形图测绘	159
8.5	大坝施工测量	163
8.6	水库测量	167
8.7	水闸施工测量	171
	习题	174
第9章	变形监测	175
9.1	概述	175
9.2	变形监测的方法	179
9.3	变形分析的新技术	184
9.4	高等级公路变形监测	194
9.5	大坝变形监测	200
9.6	高层建筑物变形观测	208
9.7	变形监测资料检核	213
9.8	变形监测成果整理	216
	习题	218
	主要参考文献	219

第1章 绪 论

1.1 工程测量的概念、任务及内容

1.1.1 工程测量的概念

工程测量学是研究工程建设在勘测设计、施工过程及运营管理阶段所进行的一切测量工作的学科。工程测量学是一门应用科学,它是在数学、物理学、电子电工学等相关学科的基础上应用各种测量技术、仪器和手段解决工程建设中有关测量问题的学科。随着现代科学技术的发展,激光技术、光电测距技术、工程摄影测量技术、卫星定位技术在工程测量中得到广泛应用,工程测量学服务的领域越来越广,特别是在现代大型高精度工程建设中的应用,极大地促进了工程测量学的发展。

从工程测量学的历史沿革可以看出,它经历了从简单到复杂、从手工操作到测量的自动化、从一般测量到精密测量的发展过程,当然,工程测量的发展始终与当时的科学发展水平同步,并且能够满足人们在工程建设中对测量的需求。

我国的测量技术有着悠久的历史,在几千年发展中有许多关于测量的记载。例如,春秋战国时期就发明了世界上最早的指南针;东汉张衡发明了浑天仪;西晋裴秀编写了《制图体系》;在清朝康熙年间,进行了大规模的测量,并于1718年完成了世界上最早的地形图之一《皇舆全图》;新中国成立后,我国成立了国家及地方测绘机构,并建立了全国天文大地控制网,统一了国家大地坐标系和高程系统,编制了全国基本地形图。特别是现代科学技术的发展,使常规大地测量发展到卫星大地测量,由空中摄影测量发展到遥感技术的应用,从而使测量对象由地表扩展到空间,由静态发展到动态,测量仪器也趋于电子化和自动化。

1.1.2 工程测量的任务

工程测量学是一门应用科学,它是研究地球空间内具体几何实体测量和抽象几何实体测量的理论、方法与技术。主要任务是研究工业建设、城市建设、国土资源开发、道路桥梁建设、环境工程及减灾救灾等事业中地形和相关信息的采集与处理,控制网建立与施工放样、设备安装、变形监测与分析预报等领域的理论、技术及相关信息的管理和使用。若按工程进程和作业性质划分,工程测量可分为勘察设计、施工建设和运营管理阶段所进行的各种测量工作。

在勘察设计阶段,工程测量主要是测绘各种比例尺的地形图,以及为工程地质勘探、水文地质勘探等进行测量工作。在施工建设阶段,主要是进行施工放样和设备安装测量,把图上设计的各种建筑物按其设计的三维坐标放样到实地上,或把设备安装于设计的位置上。为此,要根据工程需要建立不同形式的施工控制网,作为施工放样、地形测图 and 设备安装的基础。在运营管理阶段,为了监视建筑物的安全及稳定性,验证设计的合理性与正确性,需定期对其进行位移、沉陷、倾斜及摆动观测。因此,该阶段主要是建筑物的变形监测工作。

1.1.3 工程测量的内容

工程测量研究的主要内容为:工程控制网的建立、地形图测绘、施工放样、设备安装测量、

竣工测量、变形监测等。按工程测量研究的对象可分为:建筑、水利、矿山、城市、房产、铁路、公路、桥梁及国防等工程测量,以及精密工程测量、工程摄影测量等。主要有以下内容。

1. 工业与民用建筑工程测量

工业与民用建筑工程测量是在建筑工程的勘测、设计、施工、运营与管理等阶段的测量工作。其主要内容包括地形图的测绘、建筑物的施工放样、建筑物的变形监测等。

2. 道路工程测量

道路工程测量是公路、铁路在勘测设计阶段、施工建设阶段、竣工验收阶段和运营管理阶段的测量工作。其主要内容包括:勘测设计阶段的带状地形图测绘,道路中线的初步测定,纵、横断面测量等;施工建设阶段的控制网检测,道路中线的恢复测量,路基和边坡放样测量,道路竖曲线测量等;竣工验收阶段的道路中线纵断面测量、路基和横断面测量;运营管理阶段的沉降和位移监测。

3. 桥梁工程测量

桥梁工程测量的主要内容包括:根据桥梁形式、跨径及设计精度建立施工控制网,桥梁墩台的细部放样及墩台模板放样,施工过程中的测量,竣工测量及运营中的监测。

4. 地下工程测量

地下工程测量首先要在地面上建立平面与高程控制网,随着地下工程的施工将地面上的坐标、方位及高程传递到地下,在地下进行平面与高程控制测量,然后根据地下控制点进行施工放样,指导开挖和衬砌施工。

5. 管线工程测量

油气电线路工程测量内容包括设计阶段的中线测量,纵、横断面测量,施工阶段的控制网检测和施工放样,竣工后的验收测量和运营中的监测。

6. 水利工程测量

水利工程测量的主要内容包括:为工程规划设计提供所需的地形资料、施工中的放样测量、运营管理中的变形监测。

7. 市政工程测量

市政工程测量的主要内容包括:工程建设规划、设计、施工和管理所进行的地形测量,施工过程中的放样测量,竣工测量和运营中的变形监测。

8. 变形监测

变形监测的主要内容包括基准控制网测量、变形监测点测量、变形监测数据处理、监测结果分析与预报。

1.2 工程测量发展现状

随着测绘科学技术的发展,传统的测绘技术走向数字化测绘技术,工程测量的领域不断拓宽,工程测量学与其他学科的相互渗透不断深入,工程测量学科正沿着测量数据采集和处理一体化、实时化方向发展。工程测量仪器正向精密化、自动化、信息化、智能化发展,而工程测量产品正向多样化和社会化发展。

1.2.1 大比例尺工程测图数字化

大比例尺地形图和工程专用图的测绘是工程测量重要内容之一。随着建设规模及城市化规模不断扩大,对地形图、土地利用图及地籍图的应用不断深入,需要缩短成图周期,实现成图数字化。

我国的数字化成图发展迅速,测绘仪器更新换代不断加快,测绘仪器不断推出新产品。例如,苏州第一光学仪器公司、南方测绘仪器公司等推出了性价较高的全站仪、电子水准仪及GPS接收机。测图软件更加成熟,例如,南方公司的CASS测图软件,清华山维成图软件等。国内许多测绘单位也自主开发了一些测图软件,使数字化测图取代了传统的测图方法,有力地推动了我国测绘事业的数字化和信息化。

1.2.2 测量仪器的最新进展

由于施工测量的条件复杂,重复测量的工作量极大,因此,施工测量仪器的自动化、智能化是施工测量仪器发展的方向。具体表现为以下几个方面:

(1) 精密测角仪器已由传统的光学仪器发展到光电仪器。光电测角仪器不但实现了数据的自动获取、改正、传输、显示和存储,而且实现了目标自动照准,测角精度与光学仪器相当甚至更高。如T2000、T3000电子经纬仪不但采用了动态测量原理,而且其测角精度可达 $\pm 0.5''$ 。

(2) 精密距离测量仪器发展迅速,激光测距仪、光电测距仪与传统的距离丈量相比,其自动化程度与测距精度也越来越高。

(3) 全站型电子速测仪发展非常迅速,它实现了自动测角、测距、自动记录、计算及存储。全站仪极坐标测量系统是由一台高精度的测角、测距仪器构成的三维坐标测量系统(STS),如Leica公司推出的TC2003,其测角精度为 $\pm 0.5''$,测距精度为 $1\text{mm} + 10^{-6} \times D$ (D 为待测距离,单位为千米)。

(4) 数字摄影测量系统。数字摄影测量系统是利用近景摄影测量原理,通过两台高分辨率数码相机对待测物同时拍摄,从而获得物体的数字影像,并经计算机图像处理后得到精确的 X 、 Y 、 Z 坐标。目前市场上典型的数字摄影产品V-SAPS是由美国大地测量服务公司(GSI)生产的。数字摄影测量的最新进展是采用高分辨率的数码相机提高测量精度,同时可利用条码标志来实现控制点编号的自动识别,采用专用纹理投影可取代物体表面的标志设置,从而使数字摄影测量技术向着完全自动化方向发展。

(5) 全球定位系统。在GPS仪器方面,国内已有许多厂家可以生产高精度的双频GPS接收机,实时动态GPS技术的不断发展,使得GPS技术的应用领域不断拓宽。用GPS进行工程测量具有精度高,速度快,不受时间、气候条件和通视条件的限制,并可提供统一坐标系中三维坐标信息等优点,因此在工程测量中得到了广泛应用,例如,在城市控制网、工程控制网的建立与改造中GPS技术得到了普遍应用,在地形测量、地籍测量、石油勘探、高速公路及铁路建设、通信线路、隧道贯通、变形测量、滑坡监测、地壳形变监测及地震监测中也广泛使用GPS技术。

1.2.3 特种精密工程测量的发展

各种大型工程建设,需要进行特种精密工程测量。由于大型精密工程不仅施工复杂,而且对测量精度要求极高,因此需要使用精密测量和计量仪器,在超出计量的条件下,完成 10^{-6} 以上相对定位精度。例如,研究基本粒子结构和性质的高能粒子加速器工程,要求相邻两块磁铁的径间安装精度为 $\pm 0.1 \sim 0.2\text{mm}$,在粒子直线加速器中漂移管的横向精度为 $0.05 \sim 0.3\text{mm}$ 。要使工程测量达到如此高的精度,就必须采用最优的布网方案,埋设最稳的基准,研制专门的测量仪器,采用合理的测量方法和数据处理方法,以保证其测量精度。

1.3 工程测量数据处理自动化和数据库建设

随着测绘技术的不断发展,工程测量仪器不断进行更新换代,一方面由于仪器精度的提高,使诸多一般性的工程测量问题变得十分简单;另一方面又因精度的提高,使得工程测量获得的信息量增大,对数据动态处理和解释的要求也不断提高,进而使最终测量结果的精度及可靠性也大大提高。特别是在大型精密工程的施工建筑和工业设备的施工、安装、校检、质量控制及施工运营中的变形监测等方面,均要求工程测量工作者不但应具有极为丰富的经验,而且还应在测量技术方案的设计、仪器方法的选择等诸多方面,与相邻学科(建筑施工、地球物理、材料化学、工程地质及水文地质)的专业技术人员密切合作;在研究开发和制定合理的数据处理方案及计算机软件等方面,均应具备丰富的相关专业知识和独立的工作能力。

随着计算机科学技术的不断发展,工程测量的数据处理正在逐步趋于自动化。主要体现在对各种工程控制网的整体平差、控制网的优化设计、控制网的数据管理及变形监测数据的处理和结果分析等方面。

由于目前工程测量的数据采集和数据处理的自动化、数字化,测量工作者使用和管理这些海量工程测量信息的最佳途径就是建立工程测量数据库,亦可与 GIS 技术结合建立各种工程信息系统,从而增强工程测量信息的共享性。现在许多工程测量部门都建立了自己的数据库和信息系统,例如,控制测量数据库、地形图数据库、道路数据库、管网数据库、营房数据库、土地资源信息系统、文物管理信息系统、城市基础地理信息系统、军事工程信息系统等,从而为管理部门进行实时信息提取、数据检索和使用管理奠定了基础。

习 题

1. 简述工程测量学的概念。
2. 简述工程测量学研究的任务及内容。
3. 简述工程测量学在国民经济建设中的作用。

第2章 工程测量的基本工作

2.1 概 述

工程测量就其对象而言,包括工业与民用建筑工程测量、道路工程测量、桥梁工程测量、地下工程测量、管线工程测量、水利工程测量、市政工程测量、变形监测等。在实际测量中,这些内容既相互独立,又相互联系。一般而言,工程测量的实施包括以下三个阶段。

2.1.1 规划设计阶段

在规划设计阶段工程测量主要是建立工程控制网,为项目规划的实施提供各种比例尺的地形图和相关的地形数据资料及属性信息,并为施工准备期进行的地质勘探及水文测验提供位置及高程等。

2.1.2 施工建设阶段

经过设计论证及勘测后,项目进入施工建设阶段。施工测量的基本任务就是利用已知点来确定未知点的位置,也就是根据施工要求在现场标定工程建筑物特征点的位置,作为实地修建的根据。为此,首先应根据工程所处位置的地形、工程性质、精度要求及施工计划等建立符合工程要求的施工控制网,作为施工放样的依据,然后结合施工进度要求,采用最佳放样方法,将图纸设计的内容放样到实地。

为了保证放样的位置准确无误,在放样中应遵循“先控制,后碎部”的基本原则。例如,道路中线放样的程序应该是先进行导线(线性锁)点的敷设与联测,然后进行中线放样。有时为了防止施工与设计的周期差而导致的控制点偏移,在放样前还应对控制网进行复测。在工程竣工验收时,还应进行竣工测量,并将其成果作为工程日后运行期间维护及管理的依据。

2.1.3 经营管理阶段

在工程建筑物运营期间,为了了解安全及稳定情况,验证其设计是否科学合理,需要定期对工程建筑物的位移、沉降、倾斜及摆动进行变形监测。

设计图纸是工程施工的依据,一般的工程结构均通过各种图纸来反映,因此,工程测量者必须善于识图和读图,才能保证施工放样测量的精度与方法的合理性。在规划测量前应了解该项目的性质及作用,总体布置特点和与周边环境的关系;在施工放样前,应了解工程的结构,掌握各部分之间的关系,熟悉施工的步骤、方法、现场环境、工程的作用和要求,从而确定工程放样方案及放样的点、线、面,找出其间的关系,推算出它们的平面与高程位置以及它们与控制点之间的关系。

为了保障工程建设的质量,测量工作者必须做到以下几点:

(1) 坚持严格求实的工作态度,为了确保测量成果的准确性,要坚持测量、计算的检核制度,对不符合技术规定的成果,一律剔除并进行返工。

(2) 必须做到与施工人员密切配合,应实时了解工程进展和工程设计的临时变更,掌握施工精度要求,保证施工顺利进行。

(3) 测量仪器是保证测量成果精度与可靠性的前提,因此必须坚持仪器的检验制度,从而

保证设备工作时的完好性,进而确保测量工作的顺利实施。

2.2 工程控制网的优化设计

工程控制网是施工放样的基础,其布网的合理性及精度都对工程施工质量起着决定性作用。

2.2.1 工程控制网优化设计的概念

工程控制网的优化设计就是在一定的人力、物力及财力情况下,设计出精度高、灵敏度高、可靠性强和费用最省的控制网布设方案。也就是说,根据具体工程情况设计出最优的网形,并结合控制网实际质量要求制定出最佳观测方案,指导测量技术人员选择适当的测绘仪器,制定科学合理的工作方案,从而大量节省外业工作时间和费用,提高工效。

现代控制网优化设计与经典控制网设计不同,在精度设计方面,它克服了经典控制网设计的盲目性,最大限度地实现预定的精度结构要求,如精度分布的均匀性或误差椭圆的特定指向等。它可同时顾及控制网的精度、可靠性及经费开支等设计指标,借助优化设计的数学方法,利用计算机科学技术,通过精准的计算在诸多设计方案中选择出最优的设计方案。

根据目前对控制网优化设计问题的分类方法,可将其分为零类优化设计、一类优化设计、二类优化设计和三类优化设计。优化设计的具体实施方法有解析法和机助模拟设计法两种。其中,解析法是根据工程实际,建立严格的最优数学模型,然后按照数学方法进行求解。机助模拟设计法则是一种人机对话方式,利用观测值对各质量准则及约束条件的敏感性逐个选择观测值,进行计算,直到设计者对观测值方案满意为止。

2.2.2 工程控制网优化设计的解析法

解析法优化设计的步骤为:根据工程实际要求,建立最优数学模型;分析数学模型,选择合适的求解方法;编写计算程序进行计算。

1. 零类优化设计

零类优化设计的实质就是在控制网形与观测条件确定的情况下,确定控制点坐标 x 与其协因素 Q_x 达到目标函数的最佳值,一般而言,零类优化的实质就是一个平差问题。根据工程实际情况和布网目的,亦可将工程控制网的零类优化分为以下几种情况:①工程本身同国家或地方坐标系有关,例如,用于城市日常测量的工程控制网、地形测量控制网及地籍测量控制网等。②对个别网点有特殊要求的专用控制网。③各网点均具有同样重要性的局部工程控制网。④变形监测控制网。

对于工程本身同国家或地方坐标系有关的情况,其测量目的是保证工程控制点处在国家或地方坐标系的指定位置,它必须以国家或地方坐标系为参考系。因此,不存在控制网基准选择问题,只需将工程控制网与国家或地方坐标系进行联测,将网中的国家或地方坐标作为起算点即可。

对于工程控制网中个别点有特殊要求的专用控制网而言,则应结合工程的实际情况来选择坐标系。例如,大坝施工控制网,由于坝体及诸多附属设施的设计均以大坝的轴线为依据,测量目的是保证这些设施与大坝轴线处于一定的相互关系中,因此,可将大坝轴线的两个端点作为控制网的参考基准。

对于一般的局部工程控制网,可以该工程控制网为基础进行施测与定位,其任意点的位置

或任意点与点之间的函数关系可表示为

$$F = f(\mathbf{X}, L_s) \quad (2-1)$$

将其线性化后为

$$dF = f\delta\mathbf{X} + f_s\delta L_s \quad (2-2)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为工程控制网点的坐标向量; L_s 为工程控制网进行施测与定位时的观测值; F 为该工程控制网进行施测与定位时任意点的位置或任意点与点之间的函数关系。

根据误差传播定律则有

$$Q_F = fQ_x f^T + f_s Q_{L_s} f_s^T \quad (2-3)$$

工程控制网设计的目的之一是使控制网的测量误差 Q_F 影响最小, 即

$$\text{tr}(fQ_x f^T) = \min \quad (2-4)$$

由于 F 是任意的, 且各点均具有同样的重要性, 所以 f 也是任意的, 不偏向任何点, 因而有

$$\text{tr}(fQ_x f^T) = \min \Leftrightarrow \text{tr}(Q_x) = \min \quad (2-5)$$

满足 $\text{tr}(Q_x) = \min$ 的参考基准为秩亏自由网平差基准。

对于变形监测控制网, 其基准选择有两种情况: 一种是布网时基准的选择, 另一种是变形控制网平差及变形分析时的基准选择。根据变形监测目标的具体情况, 在变形控制网设计时可选择秩亏自由网平差基准或拟稳平差基准。

2. 一类优化设计

一类优化设计问题的实质就是设计最佳网点的位置, 也就是在观测值权阵一定的前提下, 确定与网形有关的设计矩阵。由于工程地形条件的限制和具体工程控制网的不同要求, 网中一部分点的位置已经确定, 而另一部分点的位置只能在一定范围内变动, 因此必须设计出这些点的位置, 从而获得最佳的设计方案。

1) 利用变量轮换法进行点位优化

由测量平差知, 未知数函数 f 的权倒数关系式为

$$Q_f = fQ_x f^T \quad (2-6)$$

由于矩阵中的元素是未知数 x 的函数, 所以式(2-6)又可以写为

$$Q_\phi = \phi(\mathbf{X}) = \phi(x_1, y_1; x_2, y_2; \cdots; x_i, y_i) \quad (2-7)$$

我们可以把网点分为两类点, 第一类为特殊工程需要固定的点, 或因工程地形条件、地质条件等因素限制不能移动位置的点; 第二类为可在一定范围内按优化方法确定的点。若网中包含有 P 个二类点, 各点位置的变动范围为

$$x_{ai} \leq x_i \leq x_{bi}, \quad y_{ai} \leq y_i \leq y_{bi} \quad (2-8)$$

式中, x_{ai} 、 x_{bi} 分别是 $\mathbf{X}$ 变动的下界、上界, y_{ai} 、 y_{bi} 分别是 $\mathbf{Y}$ 变动的下界、上界。由于第一类网点为固定点, 在式(2-8)中为常数, 因此, 在此建立第二类网点坐标变量的目标函数:

$$Q_\phi = \phi(x_1, y_1; x_2, y_2; \cdots; x_p, y_p) \quad (2-9)$$

在前面所限定的范围内, 找出一组 (P 个) 点的坐标, 并使目标函数式(2-9)取得最小值, 即

$$\mathbf{X}' = (x'_1, y'_1; x'_2, y'_2; \cdots; x'_p, y'_p)^T \quad (2-10)$$

$$\phi(\mathbf{X}) = \min \phi(\mathbf{X}) \quad (2-11)$$

这即为优化设计所要的最优解。求解的方法可采用一维搜索法,即变量轮换法,从而对 $2p$ 个变量沿坐标轴方向按变量轮换法探求最优位置。此种方法不需要计算目标函数的导数,对一般控制网而言,简单易行,但对于高维控制网计算时比较困难。

2) 利用梯度法进行点位优化

在此首先设目标函数,由式(2-7)同理可得

$$Z = f^T Q_x f \quad (2-12)$$

式中, f 为权函数系数的列向量,在构网允许的范围内,若第二类点 K 在 X 轴移动 ΔX_K ,则 K 点的位移量同目标函数 Z 的关系式为

$$\Delta X_K^{(K)} = f^T \Delta Q_x^{(K)} f \quad (2-13)$$

从而可以推导出目标函数 Z 相对于 X 的偏导数关系式。若网中有 P 个第二类点时,则目标函数的梯度向量 ∇Z 为

$$\nabla Z = \left[\frac{\partial Z}{\partial x_1} \frac{\partial Z}{\partial y_1} \dots \frac{\partial Z}{\partial x_P} \frac{\partial Z}{\partial y_P} \right] \quad (2-14)$$

设梯度方向的单位向量为 D ,则有

$$D = \frac{\nabla f(x)}{\|\nabla f(x)\|} = \frac{\nabla Z}{\|\nabla Z\|} \quad (2-15)$$

$$\text{式中, } \|\nabla Z\| = \left[\sum_{K=1}^p \left(\frac{\partial Z}{\partial x_K} \right)^2 + \sum_{K=1}^p \left(\frac{\partial Z}{\partial y_K} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}。$$

当沿负梯度方向搜索时,则有

$$X^{n-1} = X^n - \lambda D^{(n)}, \quad \lambda \geq 0 \quad (2-16)$$

式中, n 为迭代次数; λ 为步长。

具体的求解方法为:首先设定初始值 $X^{(0)}$,求梯度向量 $D^{(0)}$,然后再按负梯度方向进行搜索,得到 $X^{(1)}$,由此计算 $D^{(1)}$ 的位置,并将其作进一步搜索直到满足精度要求。计算出的 $X^{(1)}$ 就是该条件下最佳图形结构的网点。

3. 二类优化设计

当工程控制网的点位设计确定之后,接下来就是确定这些控制点之间应进行哪些观测和如何观测,也就是在已知控制网的设计矩阵的情况下,怎样找出观测值的权阵,即控制网二类优化设计。为此,必须根据现有仪器设备从控制网的精度、可靠性、灵敏度及经济指标等方面出发,制订合理的观测方案。

4. 三类优化设计

此类优化设计就是按优化设计的原则对一个现有的工程控制网通过测量新点和新的观测元素来改善现有加密网,也就是对现有控制网进行改造。因此,此类优化设计涉及两个问题,首先是如何选择最佳点位,其次是观测计划和观测精度的变化及两者的相互影响。因此,其实质是一、二类设计的综合应用,即控制网的动态设计,其数学模型比较复杂,在此不作介绍。

三类优化设计一般是采用序贯优化方法来实现的。而序贯优化可分为两种形式,即控制网逐次构造法和控制网逐次缩减法。

控制网逐次构造法就是从一个仅有必要观测的“最小”图形出发,逐步扩展观测设计,使每一步所增加的观测值都能为目标函数产生最大的增益,一旦目标函数达到预定要求,且费用不超出给定的上界时,则优化过程完成。

控制网逐次缩减法的实质是采取相反的过程,它是从一切可能观测的图形开始,逐步剔除

那些对目标函数影响较小的观测量,此时控制网的精度和可靠性也将逐步降低,一旦达到规定的下限,且经费达到一个合理的标准时,则优化过程完成。

这两种方法的关键就是每一步均应计算全网的方差-协方差,对全网方差求逆。为了提高计算速度,减少求逆次数,通常采用分组最小二乘平差。在此基础上进行外业经费的优化,然后再对精度和可靠性指标进行调整优化,从而形成一个迭代过程。

2.3 导线控制测量

在进行导线测量中,若用导线作首级控制网时,则应布设成导线网,其他情况下,导线宜布设成附合导线。当导线交叉时,则应设置结点,且导线点与结点,以及结点之间的分段长度均不得大于单附合导线规定长度的0.7倍。导线点间的长度不得超过单附合导线规定长度的1.5倍。

二、三、四等电磁波测距导线的主要技术要求见表2-1。

2.3.1 导线形式

导线形式通常分为闭合导线、支导线和附合导线,如图2-1、图2-2所示。

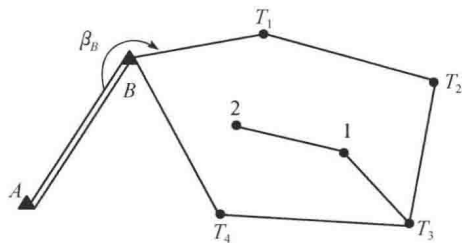


图 2-1 闭合导线、支导线

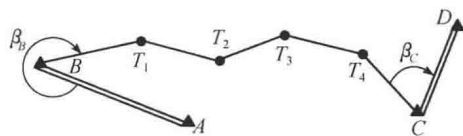


图 2-2 附合导线

2.3.2 导线测量外业工作

导线测量的外业工作包括:踏勘选点埋设标志、角度测量、边长测量及导线定向。

1. 选点埋设

在导线外业踏勘选点之前应了解测区的范围、地形起伏及已有控制点的情况,收集相关比例尺的地形图资料,并结合已知点的分布、工程具体要求和测区情况,在测区已有地形图上拟定导线布设方案,然后再到野外进行踏勘、核对、修改并最终选定导线点位。如果测区没有地形图,则应详细踏勘现场,根据地形和工程需求合理地确定导线点的位置。在选点时应注意以下几点:

- (1) 导线点应选在土质坚硬、交通便利、便于安置仪器和长期保存标志的地方。
- (2) 相邻导线点必须通视,且应便于进行角度和边长测量。
- (3) 导线点应选在地势较高、视野开阔、远离高压线、便于工程应用的地方。
- (4) 导线点一般应均匀的布设在测区内,且边长大致相等,避免前后边长相差太大。

导线点的形式如图2-3、图2-4所示。