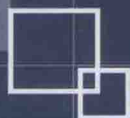




普通高等教育规划教材



工程施工监测 与数据处理

贺跃光 杜年春

吴盛才 徐卓揆

编著



人民交通出版社

China Communications Press



普通高等教育规划教材

内 容 要 点

工程施工监测 与数据处理

贺跃光 杜年春

徐卓揆

编著



人民交通出
China Communicati

内 容 提 要

本书在总结变形监测理论与技术进展的基础上,以介绍变形网平差方法、变形分析理论、变形监测的基本方法、监测资料分析与整理、变形监测预报模型作为基础,通过提炼和总结在监测领域的多年教学科研成果,分章节阐述建筑物变形监测、采空区地表高速公路监测、边坡地质灾害及监测、基坑工程监测、隧道工程监测、桥梁工程监测、大坝安全监测技术,以及以尾矿库在线监测系统为例的监测信息管理系统。本书的特点是理论联系工程实践,系统性和工程实用性较强,在引导读者掌握变形监测基础理论和工程监测技术的同时,注重强化读者解决工程监测技术问题的能力。

本书以渗透工程实例的形式反映工程施工过程中监测及工程运营中监测的技术问题及监测数据处理方法,可以作为测绘工程专业本科生教材,也可作为普通高校土木工程专业研究生及相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程施工监测与数据处理 / 贺跃光等编著. — 北京
: 人民交通出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-114-10908-9

I. ①工… II. ①贺… III. ①施工监测—数据处理
IV. ①TU712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 226631 号

书 名: 工程施工监测与数据处理

著 作 者: 贺跃光 杜年春 吴盛才 徐卓揆

责任编辑: 王 霞 温鹏飞

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20

字 数: 462 千

版 次: 2013 年 9 月 第 1 版

印 次: 2013 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10908-9

定 价: 49.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

我很高兴地阅读了贺跃光教授等著作《工程施工监测与数据处理》,该书以变形监测的基本理论与方法为基础篇,以土木建筑工程、水利工程及矿山工程监测作为实践篇,理论与实践相互渗透,遂成一部系统的工程监测理论、方法与实践的技术与学术专著。

随着国家基础设施建设的加大投入,工程安全监测领域的新理论与新技术得到快速发展,工程监测领域人员不断壮大,高校变形监测知识培养和企事业单位有关监测培训工作日益增加,受生产力发展水平和从业人员素质等因素制约,专业教材更新迫切,《工程施工监测与数据处理》一书,全面阐述最新变形监测的理论、技术及数据处理方法,紧密结合工程实践,系统介绍建(构)筑物、基坑工程、边坡工程、采空区上方高速公路建设工程、隧道工程、桥梁工程、水利水电大坝工程及尾矿坝、排土场的变形机理、监测点布设、监测内容、监测周期及监测资料分析与处理等,很有特色。该书理论紧密联系实际,深入浅出,展现工程监测理论与技术并突出应用,参考性强,是工程变形监测领域的一部力作,对工程施工与运营的安全监测具有很好的指导、借鉴作用。

我将本书推荐给从事工程变形监测设计、施工、工程管理、教学、科研等工作的人员和广大读者,相信本书的出版对我国工程、施工监测技术水平的提高,会起到积极推动作用。

中国工程院院士 刘宝琛
2013年4月17日

前 言

近几年来,国家基础设施建设的投入加大,工程安全监测领域的新理论与新技术快速发展,针对在建工程及已建成工程开展监测工作的队伍不断壮大。

工程监测是工程施工与运营的安全保障。随着工程规模的不断加大,工程结构的复杂程度也越来越高,工业与民用建(构)筑物、大型基坑工程、大型边坡工程、采空区地表高速公路及铁路建设工程、隧道工程、大型桥梁工程、大型水利水电大坝工程、大型尾矿库及排土场的安全施工与安全运营,均离不开安全监测。

为施工企业培训工程监测技术人员,以及为测绘工程专业本科生和非测绘类的相关专业研究生、工程硕士班学员授课时,很难找到一本具备变形监测的基本理论与方法、监测资料分析与整理、变形监测预报模型的理论基础,又对各类工程施工及运营监测技术作较为详细介绍的,适应各层次读者的教材。有鉴于此,作者总结多年科研和工程实践经验,并参考大量文献,在总结变形监测理论与技术进展的基础上,以介绍变形网平差方法、变形分析理论、变形监测的基本方法、监测资料分析与整理、变形监测预报模型作为基础,分章节阐述建筑物变形监测、采空区地表高速公路监测、边坡地质灾害及监测、基坑工程监测、隧道工程监测、桥梁工程监测、大坝安全监测技术,以及以尾矿库在线监测系统为例的监测信息管理系统。

在本书撰写过程中,作者力图体现以下特色:

(1)基础理论、基本技术与科研工程实践经验相结合。在引导读者掌握变形监测基础理论和工程监测技术的同时,注重强化读者解决工程监测技术问题的能力,突出系统性和工程实用性。

(2)针对各类工程的监测,全面、详细,强调实用性。以变形监测的基本理论与方法为基础,结合土木建筑工程、水利工程及矿山工程监测实践,理论与实践相互渗透

(3)监测技术反映最新发展动态。如监测领域的GPS技术、三维激光扫描、InSAR监测及变形监测自动化,以及深层位移监测技术、地下水位监测技术、内力监测技术等。

全书共十三章,具体编写分工如下:第一章到第十二章由贺跃光主持撰写,第十三章由杜年春主持撰写,吴盛才,徐卓揆参加了全书撰写。

值本书出版之机,感谢中铁三局、中铁十二局、本溪钢铁集团公司、中国铝业集团公司、裕源房地产开发、新澧化工有限公司等等众多单位给予的支持;作者的研究生熊莎等参与了资料的收集与整理工作。

限于编写时间和掌握资料有限,书中疏漏之处在所难免,请各位专家和读者不吝赐教。

作者
2013.3

目 录

第1章 变形监测理论与技术进展	1
1.1 变形监测预报预计理论	1
1.2 工程变形监测技术	2
1.3 变形监测方法	5
第2章 变形网平差及变形分析	21
2.1 变形网的特点	21
2.2 变形网按经典网平差	22
2.3 变形网作为秩亏自由网平差	30
2.4 变形网的拟稳平差法	45
2.5 变形网的变形分析方法	49
2.6 变形分析中系统误差的影响与剔除	59
2.7 变形测量问题的综合处理	64
2.8 变形检验的灵敏性	65
第3章 变形监测的基本方法	68
3.1 沉降监测	68
3.2 水平位移监测	71
3.3 土体分层垂直位移监测	77
3.4 孔隙水压力监测	79
3.5 土压力监测	80
3.6 深层水平位移测量	81
3.7 挠度测量	84
3.8 倾斜测量	86
3.9 裂缝监测	90
3.10 应力监测	91
3.11 地下水位监测	94
第4章 监测资料分析与整理	97
4.1 概述	97
4.2 监测资料的收集与整理	100
4.3 监测资料的分析	108
4.4 工程实例	108
第5章 变形监测预报模型	112
5.1 回归分析法	112

5.2	Kalman 滤波模型	115
5.3	人工神经网络模型	116
5.4	时间序列预测法模型	121
5.5	灰色系统理论模型	127
5.6	小波分析模型	131
5.7	FLAC 数值模拟	132
第 6 章	建筑物变形监测	136
6.1	建筑物变形监测	136
6.2	建筑物沉降与变形	138
6.3	监测内容与方法	143
6.4	高程控制网的建立	153
6.5	平面控制网的建立	158
6.6	建筑物的保护措施	160
6.7	建筑物移位、纠偏、托换监测	163
第 7 章	采空区地表高速公路监测	167
7.1	变形对高速公路的影响	167
7.2	高速公路稳定性指标	168
7.3	采空区地表移动与变形预计	172
7.4	采空区地表高速公路监测	192
7.5	工程实例	196
第 8 章	边坡地质灾害及监测	198
8.1	概述	198
8.2	监测目的	201
8.3	监测内容	201
8.4	监测方法	202
8.5	监测频率	208
8.6	监测资料整理与预报	208
8.7	工程实例——大冶铁矿露天边坡监测及治理	210
第 9 章	基坑工程监测	213
9.1	监测意义和目的	214
9.2	基坑变形影响因素	215
9.3	基坑监测内容	216
9.4	基坑工程监测技术	217
9.5	监测频率	224
9.6	监测数据分析与资料编制	224
9.7	地铁车站深基坑监测实例	225
第 10 章	隧道工程监测	230
10.1	岩石隧道工程监测	230

10.2 盾构隧道施工监测..... 244

第 11 章 桥梁工程监测 252

11.1 变形机理与监测内容..... 252

11.2 监测方法..... 255

11.3 监测点埋设..... 258

11.4 监测精度与周期..... 260

11.5 桥梁结构的健康诊断..... 261

11.6 工程实例..... 265

第 12 章 大坝安全监测技术 269

12.1 大坝安全监测的目的与意义..... 269

12.2 大坝安全监测内容..... 270

12.3 大坝安全监测方法..... 272

12.4 监测精度与频率..... 283

12.5 大坝安全监测系统及自动化..... 284

12.6 满拉大坝安全监测..... 286

第 13 章 监测信息管理系统——以尾矿库在线监测系统为例 290

13.1 系统设计要求..... 290

13.2 工程实例..... 295

第 1 章 变形监测理论与技术进展

工程建筑物从施工开始到竣工运行,大都需要监测其变形。通常,对工程施工状况或运行性状进行实时监视测量的过程,一般需要持续一段时间,以获得数据或参数的历时变化过程。

由于受各种因素影响,工程建筑物及其设备在其建设及运行过程中都会产生变形。变形在一定限度之内,可以认为是正常现象,如果变形超过规定限度,就会影响工程建筑物的建设与使用,严重时还会危及安全,造成生命、财产的巨大损失。可能产生变形的各种自然或人工建(构)筑物,统称为变形体。对变形体在运动的空间和时间域内进行周期性的重复观测,称为变形观测。如对基坑工程、边坡工程、桥梁工程、大坝、建筑物、隧道工程的施工监测;对由于地应力的长期累积而可能导致地壳形变的监测;对山体不稳可能导致滑坡所进行的坡体监测;对由于采矿、采油和抽取地下水而导致地面沉陷的监测;对拦河大坝的安全稳定性监测等等,都是变形监测的具体实例。

近年来,以监测数据处理和监测预报为代表的变形测量理论迅速发展,变形监测技术也已发展到依托现代测绘工程技术与传感测试技术的点、线、面立体交叉阶段。在变形体上布置变形观测点,在变形区影响范围之外的稳定地点设置固定观测站,用高精度测量仪器定期监测变形区内网点的三维(x 、 y 、 z 方向)位移变化,是获取变形体变形特征的行之有效的外部监测方法。这些方法主要泛指高精度地面监测、摄影测量、三维激光扫描及 GPS 监测等手段。

1.1 变形监测预报预计理论

对变形体的研究既有客观上的不确定性,也有主观上的非确定性。客观上的不确定性包括随机性、模糊性、信息的不完备性和信息处理的不确定性。由于综合客观因素的影响和对变形机理的认识不足,导致了理论分析和模拟的非确定性。针对岩土工程中的非确定性,许多问题都要做出全局性、综合性的系统分析,因而,系统分析方法已显示出广阔的应用前景。同时,包括灰色系统理论、时间序列分析、分数维理论、混沌理论、随机介质理论以及人工神经网络理论等在内的许多新理论、新方法也被应用到变形监测中来。

变形监测预报预计理论主要有如下三个方面:理论预计模型;基于实测数据的预计理论;基于软件的数值模拟。

1.1.1 理论预计模型

1969 年 Peck 研究隧道实测资料时系统地提出了地层损失概念,即地层损失是指隧道施工中实际开挖的土体体积与竣工隧道体积之差,竣工隧道体积还包括隧道周边包裹的压入浆

体体积。Peck 假定,隧道地层损失均匀分布,施工引起的地表沉降横向曲线近似正态分布,在不排水情况下,形成的地表沉降槽体积,理论上等于地层损失体积,地表沉降分布的预计公式如下:

$$S(x) = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1-1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_i}{2.5i} \quad (1-2)$$

式中: $S(x)$ ——隧道中心轴线距离 x 处地表沉降量;

V_i ——隧道单位长度地层损失;

i ——沉降槽宽度系数;

$S_{\max}$ ——隧道中心轴线地表最大沉降值。

此外,还有随机介质理论预计边坡工程、基坑工程、隧道工程、矿山工程等地表移动与变形,地层变形时空统一预计理论,以及基于神经网络的地表移动参数反分析等方法。

1.1.2 基于实测数据的预计理论

根据实测数据建模,预测变形发展趋势。预计方法有统计分析法、时间序列分析法、灰色系统理论预测法、模糊数据预测预报分析法、人工智能遗传算法、蚁群算法和模拟退火算法及不断发展的预计模型组合分析法,如小波—神经网络预测分析法、灰色—神经网络预计法等。

1.1.3 数值分析软件模拟

预计理论及基于实测数据的模型理论方法均未全面反馈移动与变形状况,且变形体高度非线性、复杂性,难以定量求解。基于有限元法、离散元法、边界元法及各种耦合算法等的软件程序有效解决了此问题,促进了工程的发展。目前使用的主要商业软件有:FLAC, ANSYS, 同济曙光, ADINA, ABAQUS, MARL, 3D-SIGMA, 2D-SIGMA, GIS 等。

1.2 工程变形监测技术

1.2.1 边坡工程监测

对于设计边坡而言,关键在于给出与临界位移、应变值相对应的边坡角值;对于生产边坡而言,关键在于给定移动与变形区间,以便采取对策。

矿山边坡是一种临时性或半永久性边坡,矿山边坡允许的变形,通常要比其他工程边坡变形要大。而公路、铁路、水利水电等工程边坡则是一种永久性边坡,边坡失稳将产生严重的经济和社会后果。

由于难以按变形准则设计边坡,于是就产生了这样的矛盾:人们并不能在使用过程中观测下滑力和抗滑力的真实值是否与预测结果一致,反之在生产上却只能以位移的实际发展对边坡实行管理。

既然边坡位移和变形难以利用现有的力学计算加以预测,而管理边坡又必须考虑实际发生的位移,对实际边坡发生的位移和变形进行监测,用测得的结果来说明边坡的现状,并推断边坡变形发展趋势就显得十分重要。

露天矿边坡监测的任务,是提供全矿区边坡恶性发展的报警,以保证作业人员及设备的安全,反之在变形趋稳时解除警报,以便组织生产。提供可靠的监测资料以识别不稳定边坡变形和潜在破坏机制及其影响范围,制订防灾、减灾措施;提供信息以便矿山调整采、掘计划,甚至修改设计;参与提出处理潜在滑体方案,为方案的实施提供安全监测,并对处理效果提出评价。对可能发生滑坡的危险边坡进行观测,查明滑动性质、滑体规模、准确预报滑坡等,以确保生产安全,避免灾难性事故的发生。

边坡监测的内容包括:边坡面上移动值的大小和分布,移动的过程、规律;滑动面位置、形状,滑体的大小、滑动方向;边坡移动对坡顶及其附近各种建筑物的危害程度;加固措施的效果。

对边坡的变形监测,是科学管理边坡和正确处理潜在问题的重要依据,而监测系统的布置则取决于边坡岩体的性质以及对边坡的认识程度。例如,对重要边坡,在移动范围外埋设控制点,在开挖边界附近埋设若干监测点组成监测网(有的还在测点上安置固定反射觇标),使用全站仪,采用常规大地测量的方法,可达到变形监测目的。

随着技术的发展,边坡高度及坡度越来越大,边坡稳定性分析要求实时进行。利用测量机器人本身所具有的伺服电机和自动照准功能,通过蓝牙通信,可由计算机程序控制仪器完成自动测量、自动数据处理、自动发送数据、数据预警等操作,实现自动化与智能化的完美结合。测量机器人是高精度、高智能型全站仪,能自动搜索、识别、精确照准和跟踪目标,获取目标的角度、距离、坐标等数据,并自动将测量数据记录。测量机器人还支持计算机远程控制,相当于一个传感器,其基本原理是由计算机上的控制软件通过串口或者蓝牙通信的方式向机器人发送指令,机器人响应指令并将响应结果返回给计算机。全球导航卫星系统(GNSS, Global Navigation Satellite System),包含 GPS、GLONASS、Galileo 系统、中国的 Compass(北斗),不断向民用开放,并可通过远程遥控,实现自动化监测。三维激光扫描技术以及 InSAR 技术也可进行大范围、高精度监测,越来越多的在边坡监测领域应用。

此外,监测方法还包括:采用锚索或锚杆进行加固的边坡,可埋设传感器监测其受力状况;通过监测抗滑桩中钢筋受力情况,可反馈边坡变形趋势;测斜技术的突破,从主要依靠人工逐渐转变为人工智能,为边坡稳定性分析提供可靠数据;还有,在边坡裂缝处安装地表传感伸缩计,组建物联网可远程监控裂缝发展情况,对保证安全起重要作用。

1.2.2 基坑工程监测

基坑工程通常施筑于城市建筑物和地下管线密集分布的区域,其工程质量关乎着生命财产安全。因此,常需将基坑工程开挖引起的地表移动与变形限定在一定范围之内,亦即要求挡土结构的水平位移和其邻近地表的变形限制在允许值之内。

广义的基坑工程设计包括勘察、支护结构设计、施工、监测和周围环境保护等几个方面。基坑工程施工现场监测的内容分为两大部分:①围护结构监测,包括支护桩墙、支撑、围檩和圈梁、立柱、坑内土层等监测;②相邻环境监测,包括相邻土层、地下管线、相邻地表及房屋监测。

目前,我国通用的基坑工程现场监测内容及监测仪器见表 1-1。

基坑工程现场监测内容及监测仪器 表 1-1

监测对象	监测项目	监测仪器	必要性
围护桩墙	桩墙顶水平位移与沉降	全站仪、水准仪	必测
	桩墙深层挠曲	测斜仪	必测
	桩墙内力	钢筋应力传感器、频率仪	选测
	桩墙水平压力	压力盒、孔隙水压力探头、频率仪	选测
水平支撑	轴力	钢筋应力传感器、位移计、频率仪	必测
围檩和圈梁	内力	钢筋应力传感器、频率仪	选测
	水平位移	全站仪	选测
立柱	垂直沉降	水准仪	宜测
坑底土层	垂直隆起	水准仪	选测
坑内地下水	水位	观测井、孔隙水压力探头、频率仪	选测
相邻地层	分层沉降	分层沉降仪、频率仪	选测
	水平位移	全站仪	选测
地下管线	垂直沉降	水准仪	必测
	水平位移	全站仪	必测
相邻房屋	垂直沉降	水准仪	必测
	倾斜	全站仪	必测
	裂缝	裂缝观测仪	必测
坑外地下水	水位	观测井、孔隙水压力探头、频率仪	必测
	分层水压	孔隙水压力探头、频率仪	选测

深基坑围护结构的监测,常用常规测量方法,即用视准线测量、水准测量等方法监测桩墙的水平位移和沉降,测斜仪测量桩墙深层挠曲。垂直位移通常容易测量,水平位移测量的外业观测时间长,对施工影响大,还需在较好的观测条件下进行。由于工程现场条件限制,特别是城市施工场地往往十分狭窄,可供监测使用的空间有限,测点遭施工破坏的情况时有发生,使用常规测量方法存在困难,由此,许多基坑支护结构无法监测。目前监测基坑的可靠技术,主要依靠传感技术,如支撑轴力监测、土压力监测、孔隙水压力监测、水位监测、深层水平位移监测,其精度也不断提高,且受外界环境影响较小。采用三维激光扫描技术以及摄影测量方法可对整体进行监测。随着监测仪器精度和智能性的不断突破,位移监测也可通过远程遥控进行自动监测,如采用徕卡 TM30。

1.2.3 地下工程监测

地下工程的监测被认为是 1:1 的现场试验,所获取的信息不仅可用于反馈设计和指导施工,而且也是现场等效参数的客观反映。

通常,地下工程监测包括如下内容:施工阶段支护、结构工程监测;施工阶段沿线环境监测;运营阶段线路、结构和环境监测。

位移监测是地下工程施工过程中岩体性态监测的最有效方法。在施工中常用方法有:光学测量法;收敛(闭合)量测量以及钻孔引伸计测量法。

监测方案应根据地层岩土条件、地下工程结构埋深、支护类型、开挖方式及环境状况等因素制订,并按工程需要适时开展工作。通常监测方法可以是大地测量方法或近景摄影测量方法,也可选择位移计、收敛计、测斜仪、沉降仪等物理仪器测量。

在变形测量过程中,当变形体发生显著变化时,应及时调整测量方案。同步进行地上、地下监测,观测记录也应同时附有施工现状、荷载变化、地层岩土和气象等资料。

地下工程建设经常会遇到地下空间测量及断面收敛测量问题。地下监测技术指监测结构体及岩土内部变形的技术。常用的内部位移观测仪器有位移计、测缝计、测斜仪、沉降仪、垂线坐标仪、引张线、多点变位计和应变计等。传统的位移计等点式监测设备,采用电阻式、电感式、电容式、压电式等传感器,易受雷击等电磁干扰,故障率高。近些年,利用光在光纤中的反射及干涉原理,已开发出各种各样的光纤传感器,其中包括多种用于变形监测的传感器。采用光纤传感器可以进行分布式、长距离、大范围的面状监测,且由于测点输入的不是电源而是光源,因此系统不受电磁干扰,稳定性好。光纤传感器本身又是信号的传输线,可进行远程监测,成本低。目前开发的变形监测光纤传感器主要形式和指标见表 1-2。

变形监测光纤传感器的主要形式及指标

表 1-2

方 式	面 状		点 状	
光纤监测技术	BOTDR	BOCDA	FBG	MDM
精度	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$	7×10^{-4}	4×10^{-6}	1mm
测量时间	5~15min	不详	高速实时	高速实时
测量范围/测点数	10~50km/分布式	1km/分布式	10km/数百点	10km/数十点
长度分辨率	1m	10cm	点	点
优点	长距离、分布式	高空间分辨率、分布式	高速、高精度	高速、高精度
缺点	高速监测性能差,光纤性能影响监测	光纤两端测量长距离监测不可	点式,监测距离及点数与光源强度有关	点式监测,测点多时测定时间长
适用工程	堤防、隧道、边坡,不适合激烈变化的边坡	结构物,如桥梁的监测	适合激烈变化的边坡工程,桥梁振动监测	结构物监测

采用光纤监测技术需要将传感器布置到需要监测部位,对于一些不能布点的监测部位,该技术无法使用。

1.3 变形监测方法

许多灾害的发生与变形有着极为密切的联系,如地震、溃坝、滑坡及桥梁垮塌等。大型建(构)筑物的大量兴建,以及滑坡等地质灾害的频繁发生,促使变形监测理论和技术迅速发展。目前,变形监测正向多学科交叉联合的边缘学科方向发展,成为相关学科研究人员合作的领

域。已有的研究工作涉及地壳形变、滑坡、大坝、桥梁、隧道、高层建筑、结构工程及矿区地面变形等。随着科学技术的进步和对变形监测要求的不断提高,变形监测技术也在不断地向前发展。

1.3.1 数字化摄影测量

摄影测量作为一种遥感式数据采集方法,作业人员可以远离被测对象进行测量。数字化近景摄影测量,使摄影测量的内、外业工作大大简化,对操作人员要求大大降低,与常规的边、角测量方法相比,外业速度快,信息记录全,而且在许多常规测量无法作业的地点(如矿山井筒内、塌陷区等)也能进行测量。同时,可将像片(数字影像)量测、三维坐标计算、计算结果的绘图输出一体化,整个内业过程在计算机上完成,操作方便。

由于使用高质量数字摄影机和高分辨率量测仪器,近景摄影测量点位测定精度高。而高精度则为摄影测量在变形监测中拓宽了应用,如大型滑坡的变形监测,将摄影机安置在待监测滑坡体周围稳定点上,在不同时期对监测点进行摄影测量,并利用相应软件对测量数据进行处理,得到变形点的三维坐标,并确定变形量。其优点是:不需要直接接触被测物体,适合于恶劣条件下的作业;快速获取被监测物体大量信息,减少野外工作量,适合于较大区域的变形监测;提供完全和瞬时的三维空间信息;同时测定任意点变形。

如图 1-1 所示,目标点(控制点和待定点)在像空间坐标系和物空间坐标系之间的关系见图(1-3)。

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

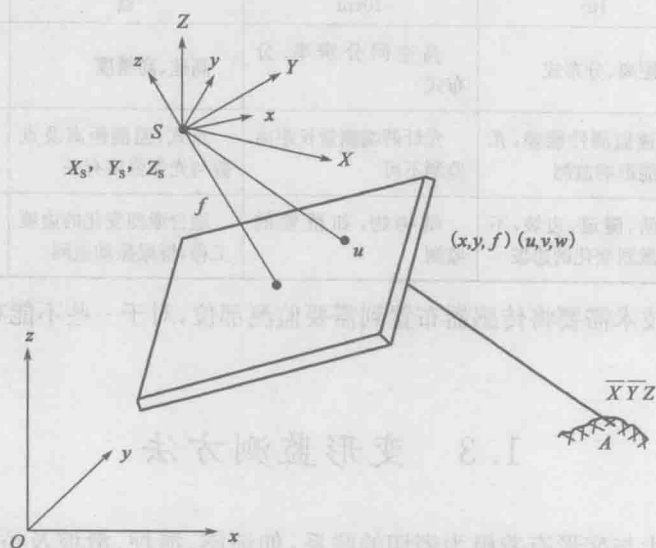


图 1-1 监测原理示意

式中: x, y ——像点坐标;

f ——摄影机主距;

X, Y, Z ——目标点在物空间坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标;

X_S, Y_S, Z_S ——摄站点 S 的物空间坐标;

a_i, b_i, c_i ——两轴系的方向余弦。

式(1-3)还可表达为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

为求出目标点的物空间坐标,需测定一些控制点坐标或外方位元素(摄影坐标和两轴系旋角),数据处理系统中,采用附有已知条件的自由网平差和拟稳平差,计算得到各像点的两期物空坐标,并解算出各测点的三维位移量或二维位移量(例如,垂直位移 ΔZ 和指向基坑方向的水平位移 ΔX),并绘出平面测点、摄站布置图。

1.3.2 高精度变形测量机器人系统

测量机器人是能进行自动搜索、跟踪、辨识和精确照准目标,并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息的智能型电子全站仪,具有自动目标识别传感装置和提供照准部转动的电动机。内置于全站仪中的 CCD 阵列传感器可识别被测量棱镜返回的红外光,CCD 判别接受后,电动机驱动全站仪自动转向棱镜,实现自动精确照准。CCD 识别不可见红外光,能够在夜间、雾天甚至雨天(保证镜面无雨水)进行监测,可以实现监测自动化。测量机器人与能够制订测量计划、控制测量过程、进行测量数据处理与分析的软件系统相接合,可以代替人完成许多测量任务。

以三边交会法确定监测点三维坐标,实现全自动观测为例,说明测量机器人的工作原理。建立三个观测站,并安装三套自动测距系统,在被监测对象上设置多个监测点,在监测点上安置反光镜,通过计算机控制对各监测点自动监测。以第一次测得各点坐标作为初始值,以后每测一次得到一组坐标值,然后将全部数据自动存入数据库,实时显示观测点的位移过程线、安全状态等,并按预设参数作超限报警。

变形测量机器人系统由三套高精度自动测距系统、数据通信设备、反射棱镜组、系统软件、中央控制室主计算机、频率校准仪、高精度通风温度计、数字气压计、数字湿度计等组成(图 1-2)。设三个基准点的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) , 监测点坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 三个基准点与同一监测点的距离分别为 s_1, s_2, s_3 , 则:

$$\begin{aligned} s_1 &= \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + (z_1 - z_p)^2} \\ s_2 &= \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 + (z_2 - z_p)^2} \\ s_3 &= \sqrt{(x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2 + (z_3 - z_p)^2} \end{aligned} \quad (1-5)$$

设初次观测 p 点的坐标为 (x_p^0, y_p^0, z_p^0) , 第 i 期观测 p 点的坐标为 (x_p^i, y_p^i, z_p^i) , 则 p 点在 x, y, z 方向上的位移分量分别为:

$$\begin{aligned}\Delta x_p &= x_p^i - x_p^0 \\ \Delta y_p &= y_p^i - y_p^0 \\ \Delta z_p &= z_p^i - z_p^0\end{aligned}\quad (1-6)$$

p 点的总位移为:

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x_p^2 + \Delta y_p^2 + \Delta z_p^2} \quad (1-7)$$



图 1-2 变形测量机器人系统

这样,进行自动连续观测时,每次观测可得到一个位移值,从而可获得移动速度及移动变化规律,并通过设定极限值来判断是否超限和报警。

测量机器人监测系统一般采用两种方式:固定式全自动持续监测;移动式半自动变形监测。

1) 固定式全自动持续监测系统

在野外测站上建立监测房,将全站仪长期固定在测站上,通过供电通信系统与计算机相连,实现无人值守、全天候连续监测、自动数据处理、自动报警、远程监控等,目前该类系统有单台极坐标模式、多台空间前方交会模式、多台网络模式等。

单台极坐标模式配置简单,设备利用率高,但监测范围较小,无法组网测量,要达到亚毫米级精度,必须采取合理的测量方案和数据处理方法。该方法特别适用于小区域(约 1km^2 内)实时自动化监测的变形体。空间前方交会主要采用距离空间前方交会,以三边或多边交会法确定监测点的三维坐标,该模式利用高精度边长,获得亚毫米点位精度。但系统配置过于庞大,成本较高,设备利用率较低,同时由于受几何图形结构限制,较平坦的地面监测不宜采用。多台网络模式是将多台测量机器人和多台控制计算机通过网络、通信供电电缆连接起来,组成监测网络系统,该模式通过组网解算各测站点的坐标,然后对变形观测数据进行统一差分处理,该模式实现控制网测量、变形点测量及数据处理的完全自动化,非常适合较大区域变形监测。自动化数据处理软件的功能菜单见图 1-3。

固定式全自动变形监测系统的缺点:没有多余观测量,测量的精度随着距离的增长而显著降低,且不易检查发现粗差;系统所需的测量机器人、棱镜、计算机等设备因长期固定,需采取特殊的保护措施;需要雄厚资金做保证,测量机器人等昂贵仪器设备只能在一个监测项目中专用。

2) 移动式半自动变形监测系统

基于常规的搬站方式,利用便携计算机或全站仪内置程序自动控制全站仪进行测量。在各观测墩上安置仪器,进行必要的测站设置,定向后测量机器人将按预置参数,自动寻找目标,

精确照准、记录观测数据,计算限差,做超限重测或等待人工干预等。完成一个测点工作后,将仪器搬到下一测点,重复上述工作,直至所有外业工作完成。该方式简单、灵活、成本低,已应用在上海磁悬浮工程、南水电站大坝等工程变形监测中。常用仪器见图 1-4。

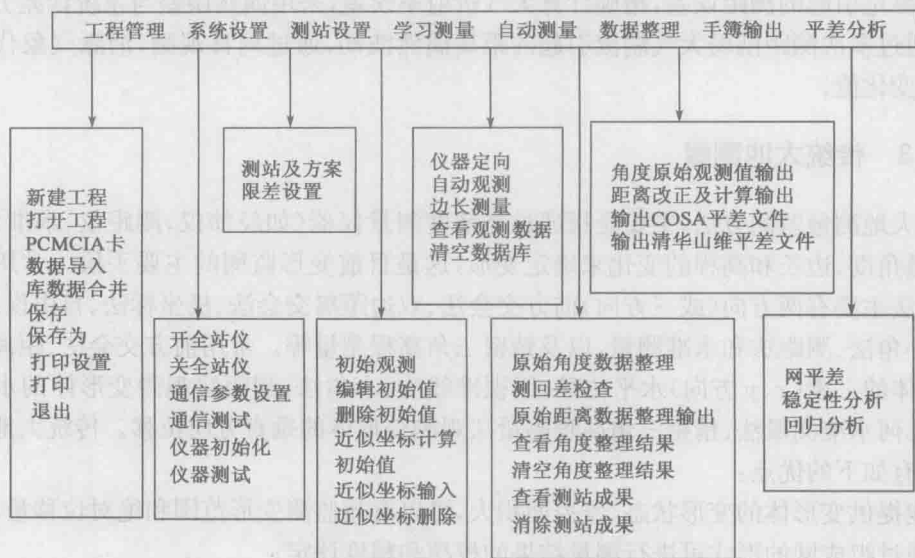


图 1-3 自动化数据处理软件主要功能菜单图



图 1-4 常用监测仪器

在测站位置选择恰当的情况下,监测点的精度取决于测距仪的测距精度。通常,测距精度表示为:

$$m_D = \pm (A + B \cdot D) \quad (1-8)$$

式中: A ——与所测距离长短基本无关的部分(mm);

B ——比例误差系数(mm/km 或 1×10^{-6});

D ——所测距离(m);

m_D ——一次测距中误差(mm)。

式(1-8)中,非比例误差 A 主要由对中误差及反光镜照准误差所引起。比例误差系数 B 中调制频率误差、气象元素测定误差均较大,其中关键是气象代表性误差较大,且对测距影响不稳定,有时甚至连仪器的标称精度都无法达到。