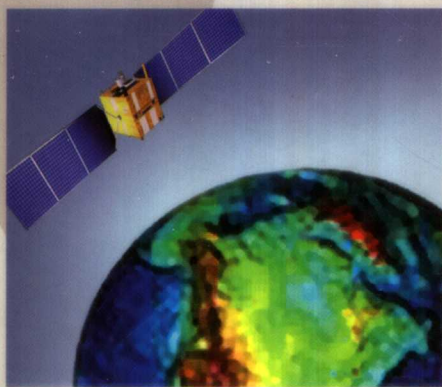


岩土工程国家重点学科专著系列

NATIONAL KEY SUBJECT GEOTECHNICAL
ENGINEERING MONOGRAPH SERIES

变形监测新方法及其应用

何秀凤 著



科学出版社

www.sciencep.com

岩土工程国家重点学科专著系列

变形监测新方法及其应用

何秀凤 著

国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目
岩石高边坡失稳的大型滑坡预警和防治（项目批准号：50539110）

国家自然科学基金资助项目
基于 InSAR/GPS 集成的岩石边坡变形稳定探测研究（项目批准号：50579013）

科学出版社

北京

1

内 容 简 介

本书系统地介绍了作者近几年在变形监测方面的研究成果,重点是变形监测的新方法,包括 GPS 一机多天线方法、GPS 和伪卫星组合定位方法及合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术。书中,理论方法的研究和实际工程的应用并重,所介绍的应用实例均来源于课题组完成的国家大型工程项目。

本书可作为高等院校土木工程和测绘工程类研究生和高年级本科生的教学参考书,也可供测量工作者以及相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变形监测新方法及其应用/何秀凤著. —北京:科学出版社,2007
(岩土工程国家重点学科专著系列)

ISBN 978-03-018894-6

I. 变 … II. 何… III. 变形观测-研究 IV. P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 059517 号

责任编辑:童安齐 庞海龙 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 6 月第一次印刷 印张: 9 7/8

印数: 1—2 000 字数: 197 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

变形监测的目的是要获得变形体(大到整个地球,小到一个工程建筑物)变形的空间状态和时间特性,同时还要解释变形的原因。它是测量工程的一项重要内容,与多个学科(如地球物理、土木工程、岩土力学等)有紧密关系。由于科学技术的日新月异,特别是自动控制、空间技术、计算机科学技术的发展,变形监测正在向边缘学科方向发展。因此,变形监测的理论发展更快、应用更广,新课题、新方法不断涌现。本书是在作者总结近五年来的研究成果的基础上撰写而成的,每章都包含作者的思想方法,并且在第二~七章的概述中,作者给出了问题的提出背景。

全书共分七章,第一章概述了变形监测的内容、特点和方法,第二章介绍了卡尔曼滤波方法在边坡变形监测中的应用,第三章和第四章介绍了GPS一机多天线方法及其在自动化变形监测系统中的应用,第五章和第六章介绍了伪卫星定位技术以及GPS和伪卫星组合定位方法,第七章介绍了合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术,特别介绍了InSAR用于地表变形观测。书中给出了大量工程应用实例,特别以小浪底大坝、东江大坝和小湾水电站高边坡为应用背景,给出了许多变形监测的结果和分析,说明了书中所提出方法的有效性、实用性和先进性。

本书内容反映了作者主持的国家自然科学基金面上项目“GPS伪卫星组合定位及其在形变监测中应用(项目批准号:50279005)”和“基于InSAR/GPS集成的岩石边坡变形稳定探测研究(项目批准号:50579013)”以及国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目“岩石高边坡失稳的大型滑坡预警和防治(项目批准号:50539110)”子项目的研究成果。作者感谢国家自然科学基金委的资助,同时还要感谢河海大学岩土工程国家重点学科建设经费的资助。

本书第一章内容主要由香港理工大学土地测量与地理信息资讯学系系主任、讲座教授陈永奇博士完成,陈教授还对书中其他章节提出了许多修改意见,作者深深感谢陈教授给予的帮助。作者还要感谢香港理

工大学土地测量与地理信息资讯学系丁晓利教授提供的帮助。

感谢由作者指导的历届研究生们,其中包括杨光、桑文刚、贾东振、刘志平、何敏、罗海滨、黄其欢、乐洋、周建民、许斌、徐勇、刘兴友、王守光等。他们对本书提出的新方法作了大量的工程应用研究与开发工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,望读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 变形监测内容和目的意义	1
1.2 变形监测的特点	2
1.2.1 精度要求高	2
1.2.2 重复观测	2
1.2.3 综合应用各种监测方法	2
1.2.4 数据处理要求严密	3
1.2.5 多学科的配合	3
1.3 变形监测方法	3
1.3.1 常规的大地测量方法	3
1.3.2 特殊的大地测量方法	4
1.3.3 GPS 测量	6
1.3.4 摄影测量方法	8
1.4 变形监测新技术	8
1.4.1 合成孔径雷达干涉测量技术	8
1.4.2 GPS 一机多天线技术	9
1.4.3 激光扫描技术	10
1.4.4 伪卫星定位技术	10
1.4.5 其他光电技术	12
参考文献	13
第二章 卡尔曼滤波方法及其在变形监测中的应用	14
2.1 概述	14
2.2 卡尔曼滤波方法	14
2.3 基于卡尔曼滤波的边坡变形预报	17
2.3.1 状态方程的建立	17
2.3.2 观测方程的建立	17
2.3.3 卡尔曼滤波初值确定	18
2.4 实例分析	18
2.4.1 边坡形变量估计与预报	18

2.4.2 边坡滑动趋势分析	21
参考文献	24
第三章 GPS 一机多天线方法及应用	25
3.1 问题的提出	25
3.2 GPS 一机多天线方法设计思路	26
3.3 GPS 多天线控制器开发	27
3.4 基于 GPS 多天线技术的变形监测系统设计	31
3.4.1 数据处理中心功能设计	31
3.4.2 数据传输方式	31
3.4.3 GPS 多天线控制系统	32
3.4.4 供电系统设计	34
3.5 变形监测结果与分析	34
参考文献	38
第四章 基于 GPS 一机多天线自动化边坡变形监测系统	39
4.1 边坡变形监测现状	39
4.2 边坡自动化变形监测系统总体结构	40
4.2.1 数据采集	41
4.2.2 数据传输	43
4.2.3 监控中心	45
4.2.4 数据管理及变形分析	46
4.2.5 预报预警	46
4.3 边坡变形监测控制网	47
4.3.1 基准点选择	47
4.3.2 边坡工程监测网布置	47
4.3.3 防雷击	48
4.3.4 基准站和监测点保护	48
4.4 GPS 数据处理与变形量解算	48
4.4.1 GPS 单历元定位算法	49
4.4.2 边坡变形建模	50
4.5 边坡变形预测预报	52
4.5.1 多项式拟合方法	52
4.5.2 边坡预报模型的建立	53
4.5.3 估计系数显著性检验	53
4.6 小湾电站高边坡远程自动化变形监测系统	54
4.6.1 工程概况	54

4.6.2	小湾电站 2 号山梁堆积体	55
4.6.3	2 号山梁高边坡变形监测系统设计与实现	56
4.6.4	监测成果与分析	60
4.6.5	2 号山梁变形监测数据管理信息系统	66
	参考文献	69
第五章	伪卫星定位技术及其提高定位精度分析	71
5.1	问题的提出	71
5.2	伪卫星导航电文	72
5.3	伪卫星地面设备	73
5.3.1	简单式伪卫星发射器	73
5.3.2	脉冲式伪卫星发射器	74
5.3.3	同步式伪卫星发射器	75
5.4	伪卫星定位模式	75
5.4.1	单独伪卫星定位模式	76
5.4.2	伪卫星和 GPS 组合定位模式	77
5.4.3	伪卫星逆向定位模式	78
5.5	伪卫星定位关键技术	79
5.5.1	远近效应问题	79
5.5.2	对流层延迟估计	80
5.5.3	多路径效应误差估计	82
5.5.4	时间同步问题	83
5.6	采用伪卫星技术提高定位精度分析	84
5.6.1	精度因子的概念	84
5.6.2	精度因子的极值讨论	87
5.7	东江大坝应用实例分析	93
5.7.1	工程概况及卫星定位的问题	93
5.7.2	伪卫星对精度因子的影响	95
	参考文献	98
第六章	GPS 和伪卫星组合定位方法用于变形监测	100
6.1	伪卫星增强 GPS 精密定位概念	100
6.2	GPS 和伪卫星组合定位	100
6.2.1	伪卫星定位观测方程	100
6.2.2	GPS 和伪卫星组合定位观测方程	101
6.3	组合定位误差分析	104
6.3.1	非线性化误差分析	104

6.3.2	GPS 卫星位置偏差分析	106
6.3.3	伪卫星位置偏差对组合定位精度的影响	107
6.3.4	基于组合观测量的伪卫星时钟误差估计	110
6.4	GPS 伪卫星组合定位模糊度解算	112
6.5	伪卫星多路径误差和对流层延迟误差估计	119
6.5.1	伪卫星多路径误差估计	119
6.5.2	伪卫星对流层延迟误差估计	120
6.6	GPS 伪卫星组合定位软件设计	121
6.6.1	观测数据的采集与记录	122
6.6.2	数据预处理	122
6.6.3	周跳检测和修复	123
6.6.4	基线向量解算	123
6.7	实例分析	125
6.7.1	实验概况	125
6.7.2	数据处理与结果分析	128
	参考文献	132
第七章	合成孔径雷达干涉测量技术用于地表变形监测	133
7.1	概述	133
7.2	InSAR 的发展概况	133
7.3	InSAR 工作原理及数据处理流程	134
7.4	D-InSAR 技术	136
7.5	InSAR/GPS 集成技术用于地表变形观测	137
7.6	InSAR 在地表变形测量中应用	139
7.6.1	利用 InSAR 技术获取数字高程模型 (DEM)	139
7.6.2	D-InSAR 技术监测地表沉降	143
7.6.3	D-InSAR 技术监测地震形变	145
	参考文献	148

第一章 绪 论

1.1 变形监测内容和目的意义

在测量工程的实践和科学研究活动中,变形监测占有重要的地位。工程建筑物的兴建,从施工开始到竣工,以及建成后整个运营期间都要不断地监测,以便掌握变形的情况,及时发现问题,保证工程建筑的安全。人类开发自然资源的活动(如抽取地下水、采油、采矿等)会破坏地壳上部的平衡,造成地面变形。这种变形需要长期监测,以便采取措施控制其发展,保证人类正常的生产和生活。例如,在人口密集的地区大量抽取地下饮用水造成地面沉陷,地面不均匀的沉陷会引起建筑物和工业设施的损坏。地下采矿引起矿体上方岩层的移动,严重的会造成地面滑坡和塌方,危及人民生命财产的安全,需要监测。近年来,人们开始在城市下面、工业设施和交通干线下、水体(河流、湖泊、海洋等)下面采矿(称为三下采矿),这些对变形监测都提出了更高的要求。地壳中地应力的长期积累造成地震,严重危及人类的生存,监测地壳的变形是预报地震的重要手段。

变形监测有实用上和科学上两方面的意义。实用上的意义主要是检查各种工程建筑物和地质构造的稳定性,及时发现问题,以便采取措施。科学上的意义包括更好地理解变形的机理,验证有关工程设计的理论和地壳运动的假说,以及建立正确的预报变形的理论和方法。

变形监测按其研究的范围可分为三类:全球性的、区域性的和局部性的。全球性的变形监测主要是研究地极移动,地球旋转速度的变化以及地壳板块的运动。由于地球内部物质分布的变化,导致了转动惯性矩的变化,进而改变了地球自转的速度和地极的位置。

区域性的变形监测,用以研究地壳板块范围内的变形状态和板块交界处地壳的相对运动。前者一般由定期复测国家控制网的数据获得,后者要建立专用监测网,监测板块相对运动在其交界处造成的地壳变形。随着 GNSS/GPS 技术的发展,近年来,很多国家和地区都建立了 GPS 连续监测网,用于研究区域性变形。

局部性的变形监测主要是研究工程建筑物的沉陷、水平位移、挠度和倾斜,滑坡体的滑动以及采矿、采油和抽地下水等人为因素造成的局部地壳变形。

变形从其时间特性来分,有运动式变形和动态式变形两种。运动式变形包括地壳应变的积累、地质构造断层两边的相对错动、建筑物或地表下沉等,这种形式的

变形总趋势是朝一个方向的。动态式变形是指高层建筑物的摆动、桥梁在动荷载作用下的振动等,这种形式的变形呈周期性,监测的目的是要获得变形的幅度和周期的信息。

总的说来,变形监测的目的是要获得变形体(大到整个地球,小到一个工程建筑物)变形的空间状态和时间特性,同时还要解释变形的原因。对于前一个目的,相应的变形监测数据处理任务成为了变形的几何分析;对于后一个目的,相应的任务成为了变形的物理解释。

1.2 变形监测的特点

1.2.1 精度要求高

和其他测量工作相比,变形监测要求的精度高,典型精度是 1mm 或相对精度为 10^{-6} ^[1]。确定合理的测量精度是很重要的,过高的精度要求使测量工作复杂,费用和时间增加,而精度定得太低又会增加变形分析的困难,使所估计的变形量误差大,甚至会得出不正确的结论。制定变形监测的精度取决于变形的大小、速率,仪器和方法所能达到的实际精度,以及监测的目的等。一般来说,如果变形监测是为了研究变形值是否超过某一允许的数值,以确保建筑物的安全,则其监测的误差应小于允许变形值的 $1/10 \sim 1/20$ ^[1];但如果是为了研究变形的过程,则其误差应比上面这个数值低得多,甚至应采用目前测量手段和仪器所能达到的最高精度。

1.2.2 重复观测

重复观测的频率取决于变形的大小、速度以及观测的目的。在工程建筑物建成初期,变形的速度比较快,因此观测频率也要大一些。经过一段时间后,建筑物趋于稳定,可以减少观测次数,但要坚持定期观测。

对于地壳形变的测量,根据目的不同,观测频率也不同。用于监测长期应变积累,一般每年观测一次;用于中、短期地震预报,观测频率从几星期一次到近于连续的观测。

1.2.3 综合应用各种监测方法

变形监测方法一般分为四类:①地面测量方法,包括几何水准测量,三角高程测量,方向和角度测量,距离测量等;②空间测量技术,如甚长基线干涉法测量(VLBI),卫星激光测距(SLR),全球定位系统(GPS),合成孔径雷达干涉(InSAR);③摄影测量方法;④专门测量手段,这里主要是指各种准直测量,倾斜仪监测,应变计测量等。各种测量方法都有其优缺点。地面测量方法精度高,应用灵

活,适用于各种不同的变形体和不同的监测环境,但野外工作量大,目前也采用监测系统。空间测量技术可提供大范围的变形信息,但成本较高。与前两种方法相比,摄影测量外业工作量少,可以提供变形体表面上任意点的变形,但精度较低。专门测量手段容易实现连续、自动监测以及遥测遥控,而且相对精度较高,但它们提供的是局部的变形信息。设计监测方案时,一般都应综合考虑各种方案的应用,取长补短。

变形监测网基本上分为两类:参考网(也称绝对网)和相对网。参考网是所有的网点都布置在变形体外,用作变形监测的参考点,以确定变形体上目标点的绝对位移。相对网的各个点都设置在变形体上,用于测定相对变形状态。此外,变形监测网和定位控制网是有区别的,定位控制网主要目的是测定点在所给的坐标系统中的绝对位置,而变形监测网用于测定位置的变化。

1.2.4 数据处理要求严密

变形量一般很小,要从含有观测误差的观测值中分离出变形信息,需要严密的数据处理方法。此外,观测值中经常含有粗差和系统误差,在估计变形模型之前要进行筛选,以保证结果的正确性。另外,变形模型一般是预先不知道的,需要仔细地鉴别和检验。对于发生变形的原因还要进行解释,建立变形和变形原因之间的关系。此外,变形监测资料可能是由不同的方法在不同的时间采集的,需要综合地利用。再者,变形观测是重复进行的,多年观测积累了大量的资料,必须有效地管理和利用这些资料。

1.2.5 多学科的配合

在制定变形监测精度,优化设计变形监测方案,合理地分析变形监测结果,特别是进行变形的物理解释时,变形测量工作者要熟悉所研究的变形体。研究地壳变形,需要有地球物理的知识,研究工程建筑物的变形,需要土力学和土木工程的知识,研究变形的机理,需要力学方面的知识。可以说,变形测量处于测绘学和地球物理、土木工程等科学的边缘。一个成功的变形测量工作者需要兼备其他各学科的知识,这样才能与其他学科方面的专家有共同语言,紧密地协作。

1.3 变形监测方法

1.3.1 常规的大地测量方法

常规大地测量方法是指通过测角、测边、水准等技术来测定变形的的方法,它具有以下一些优点:①能够提供变形体整体的变形状态;②观测量通过组成网的形

式可以进行测量结果的校核和精度的评定;③ 灵活性大,能够适应于不同的精度要求、不同形式的变形体和不同的外界条件。常规大地测量方法包括以下一些典型的测量技术。

1. 精密高程测量

高程测量一般通过几何水准测量或者电磁波测距三角高程测量的方法获得。在变形监测中,多采用重复精密水准仪或者精密三角高程精确测定监测点之间的高差及其变化。

2. 精密距离测量

重复精密测距可测定点在某个方向上的相对位移。早期的测距工具是因瓦基线尺,目前因瓦基线尺仍然是有效的精密测距工具,但其不适用于距离远、地表起伏不定或跨越深沟的区域。20世纪70年代以来,各种新型号的精密光电测距仪或全站仪广泛应用于变形监测,使得变形测量中的精密距离测量变得非常便利,测距精度由毫米精度提高到亚毫米精度。长距离测距需要解决大气折光问题,20世纪90年代以后,由于GPS的广泛应用,长距离测距仪已被GPS所取代。

3. 角度测量

角度测量又分为水平角测量和高度角测量,主要工具是经纬仪,包括光学经纬仪、电子经纬仪,全站仪等,全站仪已成为地面测量的主要工具。由伺服马达带动的全站仪可以实现自动测角、测距,也称测量机器人。

4. 重力测量法

地面高程的变化也可以间接地用重力测量测定。目前精度约 $10\mu\text{Gal}$,相当于高程变化30mm,这样的精度是不够高的。但是,由于重力测量的成本比较低,因此可以在较大范围的地壳形变监测中作为水准测量的补充。重力测量一般可以用于以下几个方面:① 在地震预报时,测定和解释地面的垂直运动,监测和解释地震后地壳的垂直运动;② 在火山地区结合水准测量和重力测量可以发现地下岩浆的运动;③ 研究用于采油、抽地下水 and 利用地热蒸汽等造成的地表变形;④ 研究地壳的板块运动和变形。

1.3.2 特殊的大地测量方法

1. 液体静力水准测量

液体静力水准测量是利用静止液面原理来传递高程的方法,利用连通器原理测量各点位容器内液面高差,以测定各点垂直位移的观测方法,它可以测出两点或多点间的高差,适用于混凝土坝基础廊道和土石坝表面垂直位移观测。一般将其中一个观测头安置在基准点,其他各观测头放置在目标点上,通过他们之间的差值就可以得出监测点高程。该方法无需点点之间的通视,容易克服障碍物之间的阻挡,另外还可以将液面的高程变化转换成电感输出,有利于实现监测自动化。

2. 准直测量

准直测量就是测量偏离基准线的垂直距离,它以观测某一方向上点位相对于基准线的变化为目的,包括准直法和铅直法两种。准直法为偏离水平基线的微距离测量,该水平基准线一般平行于被监测的物体,基准线一般可用光学法、光电法和机械法产生;铅直法为偏离垂直基准线的微距离测量,过基准点的铅垂线作为垂直基准线,该基准线同样可以用光学法、光电法或机械法产生。

3. 应变测量

应变是与结构变形有关的一个重要概念,它是力学、机械设计、材料等领域中用得最多的待测物理量。力学中用测量应变的方法来检测工程中结构物的变形,掌握结构的变形特点就可以了解工程结构的工作状态,随时提供相关信息以便预报工程险情。

应变的测量方法一般有抗力测量、复合抗力测量、静应变测量、动应变测量等多种测量方法,应力应变测量在地学领域及大型工程监测中应用非常广泛。传统的测量应变的方法一般都是一种接触式的测量方法,需要在被测材料上贴应变片来进行测量。电阻应变片的基本原理是基于导体的“应变效应”,也就是利用导体的电阻随机械变形而变化的物理现象。这种测量方式成本比较高,对环境要求也比较高,而且误差比较大、精度低^[2]。

由于传统的应变测量方法具有诸多缺点,因而近年来又发展了一些先进的方法,如光纤光栅法。光纤传感器具有测量精度高、动态范围大、频带宽并可实现绝对测量、抗电磁干扰以及耐腐蚀等优点,而且光纤体积小、柔软并可弯曲,能以任意形式复合于被测材料结构中而不影响材料的性能。因此,可将光纤传感器埋入混凝土结构中,用于各种建筑物,如高大的楼房、桥梁以及大坝等的测量。美国的 Mendez 等人于 1989 年首先提出将光纤传感器埋入混凝土建筑和结构中,并描述了实际应用中的的一些基本设想;1993 年加拿大的研究者率先在卡尔加里的贝丁顿特雷尔桥上布置了光纤传感器进行桥梁监测,该监测系统至今一直在实时运行。我国国内也已开始在桥梁监测中应用光纤光栅传感技术。

4. 倾斜测量

基础不均匀的沉降将使建筑物倾斜,对于高大建筑物影响更大,严重的不均匀沉降会使建筑物产生裂缝甚至倒塌。倾斜测量的关键是测定建筑物顶部中心相对于底部中心或者各层上层中心相对于下层中心的水平位移矢量。建筑物倾斜观测的基本原理大都是测出建筑物顶部中心相对于底部中心的水平偏差来推算倾斜角,常用倾斜度(上下标志中心点间的水平距离与上下标志点高差的比值)来表示。

根据建筑物高低和精度要求不同,倾斜观测可采用悬挂垂球法、倾斜仪观测法和激光铅垂仪法等多种观测方法。悬吊垂球测定偏差的方法比较简单,但是要求在建筑物顶端能够悬挂垂球线。常见的倾斜仪有水准管式倾斜仪、气泡式倾斜仪和电

子倾斜仪等,倾斜仪一般具有能连续读数、自动记录和数字传输等特点,有较高的观测精度,因而在倾斜观测中得到广泛应用。激光铅垂仪法是在被测物顶部适当位置安置接收靶,在其垂线下的地面或地板上安置激光铅垂仪或激光经纬仪,按一定的周期观测,在接收靶上直接读取或量出被测物顶部的水平位移量和位移方向。此外,当建筑物立面上观测点数量较多或倾斜变形比较明显时,也可采用近景摄影测量的方法进行建筑物的倾斜观测。

建筑物倾斜观测的周期,可视倾斜速度的大小,一般每隔1~3个月观测一次。如遇到基础附近因大量堆载或卸载,场地降雨长期大量积水而导致倾斜速度加快时,应及时增加观测的次数。施工期间的观测周期与沉降观测周期取得一致。倾斜观测应避免强日照和风荷载影响大的时间段。

1.3.3 GPS 测量

GPS(global position system)卫星定位系统是当前卫星导航定位系统应用最广泛的一种。它是美国海陆空三军共用的新一代卫星导航系统,由空间部分、地面监控部分和用户接收机三大部分组成。GPS系统由24颗卫星组成,工作卫星分布在轨道高度为20 200 km的6个轨道面内,每个轨道上分布4颗卫星。自1994年整个系统投入使用以来,在地球上任何位置、任何时刻,GPS都可为各类用户连续地提供动态的三维位置、三维速度和时间信息,实现了全球、全天候的连续实时导航、定位和授时。GPS卫星发射的无线电信号含有两种精度不同的测距码,即P码(又称精码)和C/A码(又称粗码)。相对这两种测距码,GPS提供两种定位服务方式,即精密定位服务PPS(precise positioning service)和标准定位服务SPS(standard positioning service)。精密定位服务PPS的主要对象是美国军事部门和其特许的部门或同盟国。这类用户可利用P码获得较高的定位精度,单点实时定位精度可优于10m。标准定位服务SPS的主要对象是广大的民间用户,这类用户只能利用C/A码获得较低的定位精度,单点实时定位精度约为30m左右。由于GPS与美国的国防现代化发展密切相关,为了降低其他国家使用GPS的导航定位精度,美国实行了所谓的选择可用性(select application, SA)政策,即人为地将GPS标准定位服务的精度降低到约100m。

美国政府对GPS用户实施SA限制政策后,引起广大民间用户特别是欧洲国家的不满。为了摆脱这种限制,国际民航组织、加拿大和欧洲等国家都在建立区域性或全球性卫星导航定位系统,并主张发展由民间控制的全球卫星系统CNSS。在这种情况下,美国政府为了维持其在全球卫星定位系统中的主导地位和对该领域的控制,抑制其他国家发展卫星导航定位系统的计划,同时扩大美国GPS产业的快速发展,美国政府制定了相应的GPS政策,并对GPS系统进行了重要改进,自2000年5月4日起取消了SA政策,这是GPS现代化的第一步。对于全世界接受

标准定位服务 SPS 的广大民间 GPS 用户, SA 关闭后的单点实时定位精度可提高到 10m 左右。

GPS 卫星定位技术相比于传统的测绘作业及方法有着显著的特点和优越性: 它不受天气的干扰, 点位间毋须通视, 容易实施长距离的精确定位, 可以进行实时测量, 具备良好的自动化和集成性能, 特别适用于动、静态的安全监测和较大工程区域内满足现代施工所需的复杂测量工作。GPS 优秀的性能及广泛的适应性, 是常规测量作业难以比拟的。GPS 以其精度高、速度快、全天候等优点, 成为当今最先进的监测手段。在区域内, 中国建设了“中国地壳运动观测网络”, 建立起了一个连续观测的核心框架, 并已获得 3×10^{-9} 量级精度的地壳运动数据, 为地震的长、中期预报提供了依据。今后还将进一步建设中国卫星导航定位综合服务系统, 为地面沉降、海水侵蚀、火山爆发、岩崩滑坡等自然灾害的监测和预报提供必要的基础资料。在局部范围内, 中国已采用 GPS 技术对单个滑坡体、单个矿区、单个建筑物等进行变形监测, 并取得了一系列成果, 积累了丰富的经验。随着接收机硬件性能和软件处理技术的提高, 近年来 GPS 定位技术已在大地测量、地壳形变监测、精密工程测量等诸多领域得到了普及。

利用 GPS 建立大区域的安全监控网可有效地克服常规监控网的弊端。此外, 由于 GPS 定位以地心坐标系为参考系, 十分理想地解决了各种地壳变形监测中的基准难题。坝区及周边区域的地壳变形、构造和断层的变形、坝区附近地震的预测、水库蓄水对库区周围地层的影响等对大坝的安全监控有重要的意义。因此, 有必要建立较大范围的坝区安全监控网, 进行定期或不定期的观测。常规的监控网受地形条件制约, 顾及精度和网形优化后, 不容易控制较大范围, 而且观测工作繁重, 需要较长时间才能完成一个周期的测量。GPS 监测网的布点更为灵活, 可根据需要加强对构造、断层、裂谷等不良地质条件活动情况的监测。

GPS 测量技术集平面和高程测量于一体, 使得三维监测网的观测变得简单。当然, GPS 定位技术也有不足的方面, 主要是对测点所处的天空应具备良好的开阔度, 以确保能接收到 4 颗以上、图形强度较好的卫星信号。

GPS 测量技术在我国水电工程建设中已获得了一些应用, 但是更深层次的开发和推广尚有待进一步的共同努力。产生这种结果的原因是多方面的, 其中包括有水电工程特有的地形及环境条件, 工程区域常位于深山峡谷, 对卫星信号接收受到限制; 也有因为对 GPS 定位精度的疑虑, 对目前 GPS 技术的进展了解不够。从目前大量的 GPS 定位应用结果来看, 采用一定的技术和数据处理方式, 定位精度达到 $\pm 1 \sim \pm 2\text{mm}$ 是不困难的。

在大坝安全监测中 GPS 技术应用较少, 是个十分薄弱的环节, 同时也是 GPS 值得进一步推广应用的领域。通常坝体安全监测的精度要求 $\pm 1 \sim \pm 2\text{mm}$, 这种精度实际上是相对精度(观测大坝变形量的精度)。以引张线为例, 坝体各测点的变形

是两期测得的以引张线基点为参考标准(或以倒垂为参考标准)的偏离值之差。其实,由于坝高、蓄水高程变化,坝体观测的基准点在不断的变化,有时甚至是比较显著的^[3],只是通常不易被人们测出而已。因此,对于现代的高坝、曲线型大坝,建立坝顶 GPS 观测系统是非常有利的。

1.3.4 摄影测量方法

摄影测量具有以下一些优点。

1) 摄影测量不需要接触被监测的变形体。

2) 摄影测量观测时间短,因而外业工作量小,可以大量减少野外测量工作量、可快速获取变形过程。

3) 摄影测量信息量大、利用率高。摄影测量方法可以同时测定变形体上任意点的变形信息,对变形前后的信息做各种后处理后、通过底片可以获得变形体的任一位置的状态等。

由于摄影测量具有以上一些优点,因此摄影测量也常应用于某些变形监测中。用摄影测量方法测定各种工程建筑物、滑坡体等的变形,其方法就是在这些变形体的周围选择稳定的点,在这些目标点上安置照相机或者摄像机,对变形的物体进行拍摄,然后通过内业处理得到变形体上目标点的二维或者三维坐标,通过对不同时期相同目标点的坐标变化得到他们的变化情况,从而得到建筑物的变化。

摄影测量的方法包括航空摄影、遥感和地面摄影测量法三种。航空摄影、遥感适宜对大范围的目标进行监测,而地面摄影测量适宜对较小范围的物体(如楼房、坝体、滑坡体等)进行监测。

1.4 变形监测新技术

1.4.1 合成孔径雷达干涉测量技术

20 世纪 50 年代,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)系统开始在美国军队中使用。后来,美国航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)和密执安环境研究所将 SAR 转为民用。20 世纪 90 年代, SAR 系统进入了高速发展阶段, SAR 卫星也日渐增多。合成孔径雷达干涉测量(SAR interferometry, InSAR)是近年来迅速发展起来的一种微波遥感技术,它是利用合成孔径雷达的相位信息提取地表的三维信息和高程变化信息的一项技术,目前已成为国际遥感界的一个研究热点。

InSAR 可以测量地面点的高程变化,是目前空间遥感技术中获取高程信息精度最高的一项技术。由于它可以获得全球高精度(毫米级)、高可靠性(全天时、全