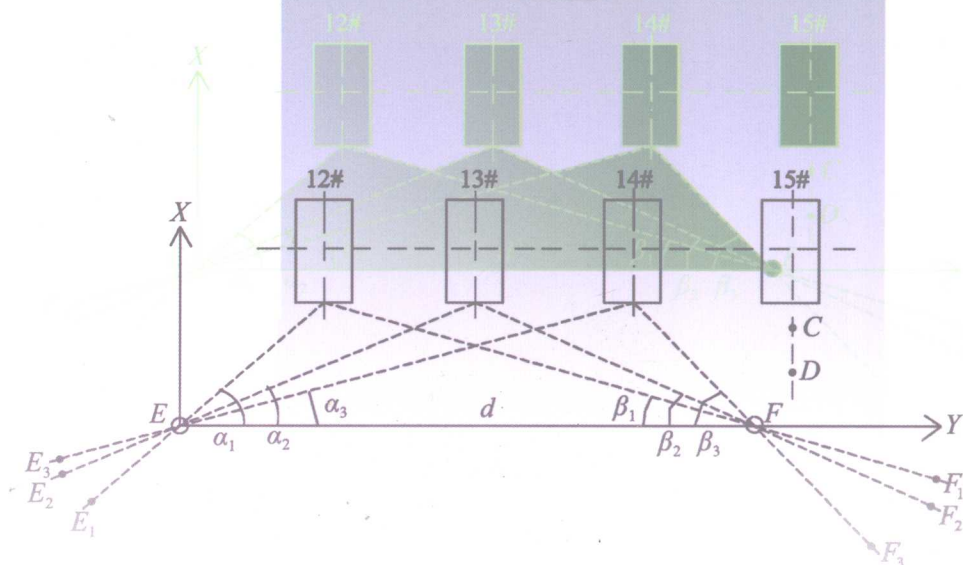


高等学校教材

# 变形监测理论

侯建国 王腾军 编著  
周秋生 主审

# 与应用



THEORY OF DEFORMATION MONITORING  
AND ITS APPLICATION

测绘出版社

中国矿业大学北京

# 变形监测理论

与应用

张永刚

主编

副主编



中国矿业大学北京

地质工程研究所

高等学校教材

# 变形监测理论与应用

Theory of Deformation Monitoring and Its Application

侯建国 王腾军 编著

周秋生 主审

测绘出版社

· 北京 ·

## 内容简介

本书系统介绍了变形监测技术所应用到的基础理论知识、各种类型变形体的监测技术、监测数据分析预测的数学方法和多种监测领域的工程实例,并附有大量的应用算例以及基于MATLAB的线性回归预测、时间序列预测、灰色系统预测、神经网络预测和小波去噪等计算机操作及程序源代码。全书共分九章,前三章介绍变形监测技术有关的基本概念以及与常规测量异同,包括变形体监测的意义、监测方案设计、监测网平差和参考点稳定性检验等内容;第四和第五章详细介绍了利用监测技术所获得的数据预处理方法和预测所用到的数学工具;第六、七和八章介绍了变形监测技术常用到的几个应用领域;最后一章结合建筑工程、基坑工程以及桥梁工程从监测方案的撰写到具体实施方法,以及监测中期和总结报告及图表的提交形式等都给出了具体实例。

本书可作为全国高校测绘专业及相关专业学生教材,也可作为测绘专业及岩土工程监测和管理等专业技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

变形监测理论与应用/侯建国,王腾军编著. —北京:  
测绘出版社,2008.6  
ISBN 978-7-5030-1862-6

I. 变… II. ①侯…②王… III. 变形观测—研究 IV.  
P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083103 号

责任编辑 金 君

封面设计 杨晓明

出版发行 测绘出版社

社 址 北京西城区复外三里河路 50 号

电 话 010-68512386 68531558

印 刷 北京市通州次渠印刷厂

成品规格 184mm×260mm

字 数 360 千字

版 次 2008 年 6 月第 1 版

印 数 0001—3000

邮政编码 100045

网 址 www.sinomaps.com

经 销 新华书店

印 张 14.75

印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷

定 价 27.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-1862-6/P·481

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

## 前 言

工程建设和地质灾害的监测,对保证工程的安全施工、运营及灾害的预测和预警是非常重要的手段。根据教学大纲要求,测绘工程专业的学生在学习完测绘专业相关课程后,在高年级必须掌握变形监测理论与技术及其应用。变形监测的内容涉及监测技术及监测数据分析与预测两大部分。本书在第一章详细阐述了变形监测在全球性变形研究、区域性变形研究和工程变形研究的情况,介绍各种监测对象的常用技术,并对监测数据几何分析和物理解释进行简要叙述。在第二章介绍监测网中有关监测点的概念、网的类型及网的优化情况。第三章首先介绍监测网平差时所必备的广义逆矩阵和方程组解之间关系知识,然后介绍监测网经典平差、秩亏自由网平差和拟稳平差以及参考点稳定性检验。第四章介绍监测资料的预处理方法,包括监测数据检核和取舍常用方法、监测数据插补方法及滤波方法,并详细给出了小波分析在监测数据去噪的应用。第五章详细介绍了监测数据预测常用的数学方法。第六、七、八章介绍变形监测在工程建筑物、深基坑工程和桥梁工程中的应用。第九章介绍了变形监测一些具体工程实例。

本书写作特点为:介绍监测技术时,把传统和现代方法相结合。考虑掌握 MATLAB 这一工具对工科大学生的重要性,在监测数据处理部分,给出了若干算例的 MATLAB 源代码及小波分析图形用户界面操作。在介绍近代测量数据处理工具时,如神经网络预测和小波去噪内容中,略去了复杂的理论基础,通过一个实例分析,可使读者掌握同类监测数据的具体应用。

本书作者通过多年的变形监测课程理论教学和监测工程实践工作,根据学生的教学反馈信息以及工程上的要求,组织了本书的编写提纲。考虑学生在学习变形监测课程的时候,除了掌握常用监测的技术外,还应该了解变形监测数据处理的一些理论基础。所以,本书撰写时遵循省略变形监测理论知识的推导,通过实际算例使读者熟悉该知识点的应用情况,并给出若干监测领域所涉及的变形监测技术内容,使学生走向工作岗位能够参考书中实例完成相应的工程监测工作。

本书第一、四、五、六、八、九章由黑龙江工程学院侯建国编写;第二、三、七章由长安大学王腾军编写,全书由侯建国统稿。在本书的编写过程中,得到了长安大学博士生导师张勤教授的关心和支持。书稿编写完成后,全国高等学校测绘学科教学指导委员会委员黑龙江工程学院周秋生教授审阅了全书,在此谨致衷心感谢。

我们殷切希望使用本教材的教师和广大读者对本书提供宝贵意见或建议,以便再版时修正。

作者  
2008年5月

# 目 录

第一章 变形监测概述	1
§ 1-1 变形监测对象和意义	1
§ 1-2 变形监测技术	5
§ 1-3 变形监测数据分析	12
第二章 变形监测方案设计	19
§ 2-1 变形监测网的布设	19
§ 2-2 变形监测精度和频率的确定	23
§ 2-3 变形监测网的优化设计质量标准	26
§ 2-4 变形监测网优化设计分类	36
§ 2-5 监测方案编制	37
第三章 监测网平差及参考点稳定性检验	39
§ 3-1 预备知识	39
§ 3-2 监测网经典平差	44
§ 3-3 秩亏自由网平差	53
§ 3-4 监测网拟稳平差	62
§ 3-5 参考点稳定性检验方法	65
第四章 监测数据的预处理	73
§ 4-1 监测数据检核的意义和方法	73
§ 4-2 观测异常数据取舍原则	74
§ 4-3 监测数据曲线平滑	78
§ 4-4 监测数据滤波	83
§ 4-5 监测数据插值与拟合	85
§ 4-6 小波变换在变形监测数据去噪中应用	88
第五章 变形预测常用方法	92
§ 5-1 监测曲线形态判断法	92
§ 5-2 监测数据线性回归分析法	93
§ 5-3 监测数据非线性曲线预测模型	102
§ 5-4 监测数据时间序列预测模型	104

§ 5-5	非平稳监测数据时间序列分析方法	110
§ 5-6	时间序列预测常用方法	114
§ 5-7	监测数据的灰色系统预测方法	119
§ 5-8	变形预测的神经网络模型	127
<b>第六章</b>	<b>工程建筑物变形监测</b>	<b>135</b>
§ 6-1	概述	135
§ 6-2	高程控制网的建立及沉降监测	138
§ 6-3	变形监测平面控制网的建立	145
§ 6-4	水平位移监测方法	148
§ 6-5	倾斜监测	153
§ 6-6	建筑物裂缝与挠度观测	156
§ 6-7	日照和风振变形监测	157
<b>第七章</b>	<b>基坑工程施工监测</b>	<b>161</b>
§ 7-1	基坑监测概述	161
§ 7-2	深基坑工程监测方法	164
§ 7-3	基坑工程监测方案设计	170
§ 7-4	监测报表与监测报告	179
<b>第八章</b>	<b>桥梁变形监测</b>	<b>181</b>
§ 8-1	概述	181
§ 8-2	桥梁静态变形监测	183
§ 8-3	桥梁运营期间健康诊断监测	186
§ 8-4	GPS技术在大跨度斜拉桥动态变形监测	189
<b>第九章</b>	<b>变形监测工程实例</b>	<b>192</b>
§ 9-1	玉森新城1#楼沉降监测方案	192
§ 9-2	紫郡城楼盘一期2#楼沉降监测中期报告	194
§ 9-3	广泉小区沉降监测	196
§ 9-4	香格里拉大酒店扩建工程基坑围护施工监测方案	203
§ 9-5	天津国际航运大厦施工监测实施技术方案	209
§ 9-6	彩虹大桥变形监测技术方案	211
<b>参考文献</b>		<b>227</b>

# 第一章 变形监测概述

任何测量工作都是针对相应对象而言的,如地形图测绘是对某区域进行地物和地貌的测量,地籍及房地产测量是精确测定土地权属界址点的位置。变形监测是对变形体上的监测点进行测量,亦称变形观测或形变测量。其任务是确定在外力作用下,变形体的形状、大小及位置变化的空间状态和时间特征。变形监测的主要目的就是监测变形体的安全状态,验证有关工程设计的理论或地壳运动的假说,以及建立正确预报变形的理论和方法。变形分析包括变形的几何分析和物理解释,变形预测是建立在一定的数学模型基础之上。对于变形体的安全来说,监测是基础,分析是手段,预报是目的。

## § 1-1 变形监测对象和意义

### 一、变形监测的对象

变形监测的对象是多种多样的,变形体的范围大到整个地球,小到一个工程建(构)筑物的块体。也就是说一切关系到人们生活的实物对象都可能成为变形监测的对象,而同一类型的对象,其产生变形的原因不同,则变形分布及其规律也不相同。所以,在变形监测实施之前,必须弄清楚产生变形的原因,才能布设监测控制网,观测得到可靠的变形数据和正确的变形分析结果。

#### (一) 全球性变形监测研究

地球和其他物质一样,是在不断运动和变化的,如地壳的水平移动和垂直升降、大陆漂移、海面高度变化、地球两极周期性运动等。因此,地球作为一个变形体通过长期重复测量,就可以发现地壳变化情况,通过对监测数据分析作出科学的预报,以此减少由于地壳瞬变运动而引发的地震和火山等自然灾害给人类造成的危害。

##### 1. 地极移动监测

地轴自转不仅受到日、月引力作用而在空间变化,而且还受到内部质量不均匀影响而在地球体内运动。因此,地球自转在空间的位置和指向并不是固定不变的,地球在绕太阳运行时,其自转轴方向并不保持恒定,而是绕着北黄极缓慢地旋转。地轴在直径大约是 18m 圆圈作不规则曲线运动,大约是 14 个月转一圈。自转轴的变化是大地测量学、天文学和地球物理共同关心的问题,1900 年国际大地测量学会在地球上盖瑟斯堡、太平洋岸、日本和意大利设站监测极移。

##### 2. 地球板块运动监测

地球动力研究表明,地壳被划分若干个彼此相对运动的板块,构造活动主要发生在板块的边缘。地质学家认为现代岩石圈已破裂分成 12 个大板块,即北美板块、南美板块、加勒比板块、欧亚板块、菲律宾板块、阿拉伯板块、太平洋板块、非洲板块、印度澳大利亚板块、纳兹卡板块、



科科斯板块和南极板块。证明板块运动的主要方法,是在各板块上设立固定测站,利用空间大地测量技术,长期监测各站的位置及各站间的长度和高差的变化。对各期监测资料分析,就可发现板块之间移动的速度和移动方向。到1985年止,全球已建立包括44个站的板块运动监测网,其中北美板块上17个,欧亚板块上16个(包括我国的上海站),太平洋板块上4个,南美板块上3个,印澳板块上2个,阿拉伯板块上1个,纳斯卡板块上1个。目前,已经通过空间测量手段证实大西洋每年以2.5cm的速度在扩大,而太平洋板块在缩小。各板块之间运动速率也是不同的,非洲大陆每年加宽几个毫米到几十毫米;日本东京正在以每年2.5cm的速率向中国上海大陆靠近;地球表面温度升高使海平面以每年2.1mm的速度上升。

### 3. 地球旋转速率变化监测

众所周知,地球旋转一周需要约24小时,假如一个人待在家里,他在宇宙空间一昼夜也运行了四万公里,“坐地日行八万里”嘛!但是地球旋转的速度并不是一个固定的常数,它是在不断变化的。地球自转的线速度与纬度及高度有关,地球自转的角速度为 $2\pi/T$ 。由于地球自转速度变化引起日长的变化,且其变化是很复杂的。时间尺度有几天到几十年,甚至有长期变化。为了检验某一时间尺度的地球旋转速度的变化,采用比地球自转更稳定的石英钟( $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量级的稳定度)可测出短周期的变化通常是 $10^{-3}$ s的量级,如采用更稳定的原子钟( $10^{-13}$ 量级的稳定度)可测出10年尺度的变化是 $10^{-2}$ s的量级。

## (二) 区域性变形监测研究

一个地区、一个国家或城市由于受到自然因素和人为因素的影响,破坏了地壳上部的平衡,造成地面变形,而引发一系列的地质灾害。这种变形需要长期观测监视,以便采取措施控制其发展,保证人类正常的生产和生活。

### 1. 地壳形变监测

所谓地壳运动,是在地球内部构造应力的作用下,所引起的地壳一些元素的相对运动。它们可以是垂直运动、水平运动或倾斜运动,综合表现为大面积的地壳形变。地壳运动可分为长期运动和瞬变运动,由于地壳的瞬变运动可能引起地震和火山等自然灾害的发生。通过监测地壳的变形是预报地震发生时间和地点的主要方法,因此,测定地壳板块内变形状态和板块交界处地壳相对速度的区域性变形研究是非常重要的。监测地壳运动通常建立了三级监测网:除全球板块运动监测网外,还有区域地壳运动监测网(几百公里到1000km)和局部地壳运动监测网(几十米到几十公里)。

### 2. 城市地面沉降监测

目前,全球已知的重要表层沉降地区有150个以上的城市。美国、日本和墨西哥分布最多,东京最大沉降达到4.3m,最严重达到10m。中国有50多个城市存在不同程度的地面沉降问题,下面就上海、天津、西安和北京等比较突出城市给予介绍。

(1) 上海市从1921年发现地面下沉开始,到1965年止,最大的累计沉降量已达2.63m,影响范围达400km<sup>2</sup>。有关部门采取了综合治理措施后,市区地面沉降已基本上得到控制。从1966~1987年22年间,累计沉降量36.7mm,年平均沉降量为1.7mm;

(2) 天津市从1959~1982年间最大累计沉降量为2.15m,1982年测得市区的平均沉降速率为94mm。目前,最大累计沉降量已达2.5m,沉降量100mm以上的范围已达900km<sup>2</sup>;

(3) 北京市自从上世纪70年代以来,北京的地下水位平均每年下降1~2m,最严重的地

区水位下降可达 3 ~ 5m。地下水位的持续下降导致了地面沉降,有的地区(如东北部)沉降量 590mm,沉降总面积超过 600km<sup>2</sup>。而北京城区面积仅 440km<sup>2</sup>,所以,沉降范围已波及到郊区;

(4) 西安市地面沉降发现于 1959 年,1971 年后随着过量开采地下水,在 1972 ~ 1983 年,最大累计沉降量 777mm,年平均沉降量 30 ~ 70mm 的沉降中心有 5 处。1983 年后,西安市地面沉降趋于稳定发展,部分地区还有减缓的趋势。到 1988 年最大累计沉降量已达 1.34m,沉降量 100mm 的范围达 200km<sup>2</sup>;

(5) 太原市经 1979 年、1980 年和 1982 年三次在市区 600km<sup>2</sup> 范围的测量,发现沉降量大于 200mm 的面积有 254km<sup>2</sup>,大于 1000mm 的沉降区面积达 7.1km<sup>2</sup>。最严重的是吴家堡,其次是小店。吴家堡水准点的累计沉降量:1980 年是 819mm,1982 年是 1232mm,到 1987 年累计沉降量达 1380mm。

此外,还有宁波市、常州市、苏州市、无锡市、嘉兴市、杭州市、台湾的屏东、彰化、云林、嘉义、台中和台北等 6 个县(市),均发生了不同程度的地面沉降。地面沉降会引起严重的环境问题。例如,沿海的海面相对上升,沿海低洼地区潮水倒灌,沿湖低地泛滥,防洪系统效益降低,城市地下管道被破坏,建筑物的安全受到威胁等等。因此,需要在沉降区进行经常性的监测工作,提供精密数据以建立环境资料档案,让有关部门随时掌握地面动态,及时采取措施,防患于未然。

### (三) 工程和局部变形监测研究

工程建(构)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需要不断监测。以便掌握变形的情况,及时发现问题,保证工程的安全。人类开发自然资源的活动(抽取地下水、采油和采矿等)会引起局部地表变形,如在人口密集地区大量抽取地下水,造成地面沉降,地面不均匀沉降会引起建筑物和工业设施的破坏。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。

#### 1. 工程建(构)筑物的三维变形监测

通过对工程建(构)筑物的沉陷、倾斜及挠度等的监测,可以为改善建(构)筑物物理参数和地基强度参数提供科学合理的依据,防止工程破坏事故,提高抗灾的能力。对于机械设备,则保证设备安全、可靠和高效地运行,为改善产品质量和新产品的设计提供技术数据。对大型特种精密工程,如大坝、桥梁、核电站、粒子加速器以及隧道、地铁等也有重要的工程意义。

#### 2. 滑坡体滑动监测

滑坡的孕育和发生过程是一个复杂的物理过程,受多方面因素的影响,内在的因素主要有岩石介质的各向异性、岩体结构的高度非均匀性、地形地貌以及地应力的复杂性。外在的因素主要有地下水、降雨、温度等因素的变化以及人类活动的影响等等。这些内在、外在因素的相互耦合又相互竞争,导致滑坡位移随时间变化表现出很强的非线性特征。因此,对于滑坡体通过监测其随时间的变化过程,可以进一步研究滑坡的成因,预报大的滑坡灾害。

#### 3. 地下开采引起地表沉陷监测

在开采影响波及到地表以后,受采动影响的地形从原有标高向下沉降,从而在采空区上方地表形成一个比采空区面积大的多的沉陷区域,这种地表沉陷区域称为地表移动盆地或称沉陷盆地。在地表沉陷过程中,改变了地表原有的形态,引起了高低、坡度及水平位置的变化。因此,对于影响范围内的道路、管线、建筑物和生态环境等,都带来不同程度的影响。地表下沉

1m左右,沉陷盆地内便可积水,严重影响土地的使用,造成矿区耕地大量减少。通过对矿山由于矿藏的开挖所引起的实际变形的观测,可以采用控制开挖量和加固等方法,避免危险性变化的发生,同时可以改进变形预报模型。

## 二、变形监测的意义

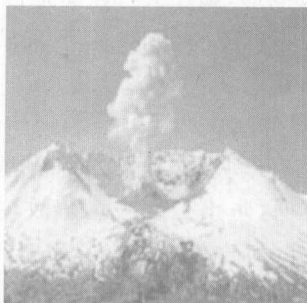
由于不同的变形体变形可能导致不同的灾害发生,因此灾害的监测和防止已经受到全社会普遍的关注,各级政府及主管部门对此问题十分重视。诸多国际学术组织,如国际大地测量协会(IAG)、国际测量师联合会(FIG)、国际岩石力学学会(ISRM)、国际大坝委员会(ICOLD)、国际矿山测量协会(ISM)等,经常定期召开专业会议进行学术交流和研究对策。经过广大测量科技工作者和工程技术人员共同努力,在变形监测领域取得丰硕的理论研究成果。为采取紧急安全措施提供有关数据。

### (一) 对地观测和防灾减灾

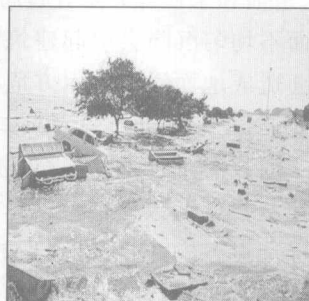
地球是个结构复杂、动态变化和各种因素,相互影响的不确定性巨系统。人类在持续得到地球恩惠的同时,也不断受到大自然的惩罚,如地震(如图1-1(a)所示)、火山喷发(如图1-1(b)所示)和海啸(如图1-1(c)所示)等地质灾害,危及人们生命和生产的安全。通过对火山活动的监测,如发现火山附近在近期有地表发生形变,可以揭示其喷发的前兆。目前,变形监测技术是火山喷发预测的主要手段。利用现代大地测量方法进行对地观测可以获取地球几何与物理信息,通过进行关联分析可以对灾害进行预测并预警,进而减少因自然或人类活动引起灾害所造成的损失。减灾是人类面临的重大问题之一。



(a) 地震的影响



(b) 火山喷发的影响



(c) 海啸的影响

图 1-1 地质灾害的影响

### (二) 工程建(构) 筑物破坏及影响

对工程建(构) 筑物进行定期、系统的监测,发现异常及时采取工程补救,不论是施工期间还是运营期间都非常重要。如我国的丰满发电厂混凝土重力坝,坝内蜂窝、渗漏严重,经监测坝基水平位移很大,采取灌浆等加固技术后,大坝的整体性和稳定性大大提高。1985年6月12日长江三峡新滩大滑坡的成功预报和隔河岩大坝GPS自动化变形监测系统在1998年长江流域抗洪错峰中发挥的作用,都说明变形监测的重要意义。而在国外20世纪下半叶发生了三次震惊水利水电工程界的重大工程事故:法国马尔巴塞(Malpasset)双曲拱坝溃坝、意大利凡依昂(Vajout)双曲拱坝近坝库区左岸发生2.5亿 $m^3$ 的大滑坡和美国提堂(Teton)土坝在基岩坝

段溃决。这些灾害的发生除了岩石水力学的一些问题外,还和大坝缺乏必要的观测检查而酿成。马尔巴塞拱坝建于1952年至1954年,破坏于1959年12月,拱坝溃决后,库内洪水汹涌奔腾,下游水位瞬即上涨。水深7~15m,宽度1km后以每小时70km速度向下飞驰,历时45min,坝下游10km处的费雷茹斯城变成废墟,坝前8km处一兵营500名士兵全部死亡。事后调查认为:由于拱坝岸坡局部岩石脆弱,使拱座产生不均匀变形和滑坡而导致全坝崩溃。该坝运行期间没有设置观测仪器,对建筑物缺乏定期检查观测,大坝破坏前的变形情况未能充分及时了解,没有作出相应的加固补救措施,也是垮坝重要原因之一。

## § 1-2 变形监测技术

变形体的变形过程一般都是动态过程,有的变形速度快,有的则很慢。通常是通过被研究对象的不同离散时刻点进行观测,把对象看作静态系统,然后由多个时刻的观测结果,再来研究其运动的动态过程。变形监测技术选择取决于变形体变形特征、变形的大小和变形的速度等因素。

### 一、全球性变形监测技术

在全球性的变形监测中,空间大地测量是最基本且最适用的技术。它主要包括甚长基线干涉测量(VLBI)、卫星激光测距(SLR)、全球定位系统(GPS、GLONASS、GALILEO)以及卫星重力探测技术(卫星测高、卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量)等。

#### (一) 甚长基线干涉测量

甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)是射电天文学的观测技术,它利用地面上相距很远(几千公里,甚至超过1万公里)的两台射电天线构成甚长基线。来自宇宙射电源的信号,同时记录在基线的两端,然后传送到处理中心作互相关处理,以得出信号到达基线两端的时延,换算为基线长度和方向,或基线两端的三维坐标差,如图1-2所示。该技术是随着干涉测量法和射电天文学的发展以及现代电子技术和高稳定度频率标准的诞生而形成的,于1967年春由美国和加拿大试验成功,1972年开始用于大地测量学和地球物理学。目前全球有40多个VLBI站。

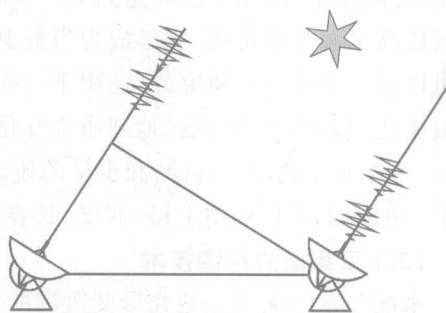


图1-2 VLBI监测原理

中国有上海VLBI站,它是中国VLBI网中最早建的站,位于上海佘山观测基地,1987年建成,射电望远镜口径25m,1988年用S、X两个波段进行大地测量工作。第二个VLBI站设在乌鲁木齐天文台,1993年底建成,射电望远镜口径25m。1999年10月,我国自行研制的流动型VLBI固置于昆明,直径32m接收天线。VLBI是测定长基线最精密技术,精度为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ,极移测定精度0.001rad,日长变化的测定精度达0.05毫时秒。它能监测地球自转变化和极移,以1mm/a的速度分辨率精确测定板块相对运动,能以前所未有的空间分辨率和时间分辨率测定全球的地壳运动,为解释板块内断裂作用、地震活动以及其他构造过程提供依据。

## (二) 卫星激光测距

卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR) 或称激光测卫(见图 1-3), 即利用激光测距仪在地面上跟踪观测装有激光反射棱镜的卫星, 测定测站到卫星距离的技术和方法。SLR 是目前精度最高的绝对定位技术, 在定义全球地心参考系中起决定性作用, 又是卫星重力技术确定全球重力场模型的主要工具。同 VLBI 一样, 它能以高精度测定两站间相对位置, 站间距离同样可以很远。激光测卫开始是使用 BE-C 卫星, 1976 年美国宇航局发射了激光地球动力卫星 LAGEOS-I, 1992 年美国 and 意大利合作发射了 LAGEOS-II, 扩大了地球上 SLR 的观测范围。同时, 法国、前苏联、日本和德国等先后都发射了 SLR 卫星。

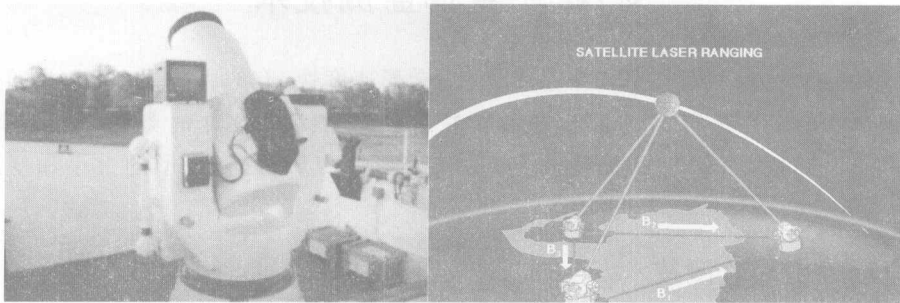


图 1-3 SLR 及其测量原理

从 20 世纪 70 年代第一代 SLR 系统 1m 测距精度, 发展为 80 年代第三代 SLR 系统 5 ~ 10cm 的测距精度, 如今已经达到 1 ~ 2cm 的测距精度。因此, 在短短 30 年内, SLR 系统的测距精度提高了两个数量级, 它已成为当前卫星精密定轨、定位中观测精度最高的观测技术。它除了可以用于地球自转研究外, 还用于一些缓慢变化的地球动力学现象, 如板块运动、地球惯性张量变化引起的重力时变、地球质心变化以及地球动力扁率  $J_2$  的长期变化研究。目前, 全球约有 50 个左右 SLR 固定台站和少量的流动站。测距精度已经达到厘米级, 少数台站达到毫米级水平。中国的 SLR 网由上海、武汉、长春、北京、广州和西安固定站以及两台流动式 SLR 组成。

## (三) 卫星重力探测技术

水准与重力测量是地壳形变监测的两种重要手段。水准测量是几何大地测量, 重力测量是物理大地测量, 以往二者资料的获取和处理都是相互独立、自成体系的, 但实际上它们是相互关联的。地下物质的运动不仅会造成地表的几何变形, 而且会引起水准面的变形。同样, 不仅地下物质密度的变化会引起重力值的变化, 地壳的几何升降也会引起地表重力值的变化。因此, 两类观测是密不可分的, 它们不仅含有自身的主要信息, 而且含有互补的信息。测定地球的形状可以用重力测量方法(物理方法), 也可以用几何测量方法。前者可以在地面上任何地点(包括大陆和海洋)实施, 而且重力点之间不需要向几何测量方法那样考虑各点之间的相互联系, 点位选定和观测数据处理都很简单。因此, 重力测量方法, 比较容易在全球表面布设相当多的重力点, 由此求定比较可靠的地球扁率, 研究全球性的地球形状和建立全球地球参考框架。由于地球自然表面的形状及其内部的质量分布极不规则, 地球重力场是很复杂的, 地球上观测的重力值的逐点变化, 是这种复杂性的反映。重力逐点变化的原因有三: 第一, 各点的高程不同, 重力值随着高程的增加而减小; 第二, 地球的扁率, 它引起重力变化是全球性的, 是



纬度的函数;第三,地形及地球内部质量分布不规则,所引起的重力变化是区域性和局部性的。地球重力场变化更是地球内部密度和结构变化的直接反映,高精度的重力场数据结合地震波数据可以反演地球的内部结构和地球内部动力学机制。

地球重力场的研究始终是大地测量学科发展最活跃的领域之一。人类对地球重力场的认识取决于全球范围内重力场探测技术和确定地球重力场的理论发展,由于地面重力测量、航空重力测量以及空间重力测量的发展,对地球重力场的研究已取得突破性进展。进入 20 世纪 90 年代, GPS、INS 及高灵敏度、高稳定度梯度仪的应用,导致航空重力测量的研究取得突破性进展,航空重力测量系统精度可达到  $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^2 \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}^2$ ,分辨率为  $5 \text{ km} \sim 10 \text{ km}$ 。空间技术应用于海洋重力场的测定,如卫星测高(satellite altimetry, SA)技术已在 20 世纪 90 年代进入生产实用阶段。从 2000 年开始,空间技术应用于包括大陆范围的全球重力场测定的卫星追踪(SST)技术(即高轨卫星追踪低轨卫星,低轨卫星追踪低轨卫星)和卫星重力梯度测定技术(SGG)。目前,具有测定地球重力场能力的卫星有德国的 CHAMP(challenging mini-satellite payload for geophysical research and application)、美国和德国联合研制的 GRACE(gravity recovery and climate experiment)和欧空局的 GOCE(gravity and ocean circular exploration)三颗星,它们提供的地球重力场信息使空间重力测量在精度和分辨率方面有一个重大的进展,而且它还能实时提供重力场长波部分随时间变化的信息。

## 二、区域性变形监测技术

在区域变形监测方面, GPS 成为主要的技术手段,它在板块运动、地震和大城市地面沉降监测等发挥重要作用。但是作为雷达遥感的一个分支,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric synthetic Aperture Radar, InSAR)技术在过去一二十年取得重大的突破,运用差分干涉手段(D-InSAR)量测高程的变化(地表形变)可达到厘米级甚至毫米级。在监测地震变形、火山地表移动、冰川漂移、地面沉降和山体滑坡等方面,表现出很强的优势。

### (一) 高精度 GPS 形变测量

GPS 系统的建立给定位技术带来了革命性的巨大变化。应用 GPS 静态定位技术在多个测站上长时间观测,再经过事后处理,可以在数百公里甚至上千公里的距离上达到厘米级甚至毫米级的观测精度。高精度的 GPS 测量不同于一般的 GPS 测量,基线处理时采用了经事后处理的精密星历。在 GPS 技术发展中,由不同组织和机构计算并发布了多种精密星历,目前使用的精度最高、最具权威性的星历当属由 IGS(International GPS Service for Geodynamics, 国际 GPS 地球动力学服务)发布的 IGS 综合精密星历。IGS 全球跟踪站全球 100 多个,中国有上海、武汉、拉萨、西安、乌鲁木齐和北京等站。IGS 将全球 GPS 跟踪站的数据进行处理和分析,最终获得 IGS 综合精密星历。高精度的外业观测,需要高精度 GPS 平差与分析软件,国际著名的有瑞士 Bernese 大学的 Bernese 软件,美国 MIT 的 GAMIT/GLOBK 软件,德国 GFZ 的 EPOS. P. V3,美国 JPL 的 GIPSY 软件等,国内著名的有武汉大学的 GPSADJ 和同济大学的 TGPPS 静态后处理软件。

自 20 世纪 80 年代后期,一些国家和地区通过高精度 GPS 测量建立区域性的与 ITRF(international terrestrial reference frame)框架一致的 3 维地心坐标参考基准,为区域变形监测提供可靠基础。1992 年,英国建立了包含 700 个测站的国家 GPS 网 SciNet92。澳大利亚也利用

高精度的 GPS 测量,建立了澳大利亚 3 维地心坐标参考基准 GDA94(geocentric datum of Australia 1994),该基准与 ITRF92 框架、1994.0 历元的基准一致。美国国家大地测量局计划通过高精度的 GPS 测量,计算 ITRF 框架下的国内测站坐标,这类测站数目最终达到 7000 个点。欧洲通过一次大规模的 GPS 会战,建立了欧洲 89 参考框架 EUREF89,近 100 个测站点。

我国已经建立的高精度 GPS 网主要有全国一、二级网,国家 GPS A、B 级网,中国地壳运动观测网:① 全国 GPS 一、二级网于 1991 年~1997 年由总参测绘局布设,全网 534 个点,在全国陆地(除台湾外)、海域均匀分布,还包括南沙重要岛屿。一级网有 44 个点,平均边长 800km,相对精度  $3 \times 10^{-8}$ ,于 1991 年 5 月至 1992 年 4 月观测。二级网分 6 个测区,即南海岛屿,东北、华北,西北,华东,华南以及青藏云贵川测区,是在一级网基础上布设的,平均边长 200km,相对精度  $1 \times 10^{-7}$ ,先后于 1992 年到 1997 年施测。② 国家 GPS A 级网第一次于 1992 年结合国际 IGS92 会战,由国家测绘局、中国地震局等单位布设,全网共有 27 个点,平均边长 650km,1996 年国家测绘局进行了 A 级网的复测,全网整体平差后在 ITRF1993 参考架中地心坐标精度优于 0.1m,点间水平方向的相对精度优于  $2 \times 10^{-8}$ ,垂直方向的相对精度优于  $7 \times 10^{-8}$ 。由国家测绘局于 1991~1997 年建立了覆盖全国的国家高精度 GPS B 级网。由 818 个点组成,其中大部分重合了原天文大地网的天文点、三角点或重力点,新埋设 89 个点,沿海经济发达地区平均边长 50~70km,中部地区 100km,西部地区 150km。平均点位中误差水平方向 0.013m,垂直方向 0.026m,基线分量重复性水平方向优于  $4 \times 10^{-7}$ ,垂直方向优于  $8 \times 10^{-7}$ ,绝对地心坐标精度不低于  $\pm 1\text{m}$ 。③ 中国地壳运动观测网络(crustal movement observation network of china, CMONOC)是我国“九五”期间国家投资建设的一项重大科学工程。由中国地震局、总参测绘局、国家测绘局和中国科学院等四单位于 1998 年开始布设,由 25 个测站的基准网、56 个测站的基本网及 1000 个站的区域监测网组成。这些测站覆盖了我国各主要的地学块体,其精度达到  $10^{-9}$  量级。

现在 2000 国家 GPS 控制网已投入使用,该网由国家测绘局布设的 GPS A、B 级网,总参测绘局布设的 GPS 一、二级网,以及中国地壳运动观测网络组成(见图 1-4),全网共 2609 个点,通过联合处理归于一个坐标参考框架,形成紧密的联系体系,可满足现代测量技术对地心坐标的需求。为了满足地球动力学研究、地震监测和预报的需要,还建立了一些区域性的高精度 GPS 地壳形变监测网,如青藏高原地球动力学监测网(1993,1995,1997),华北地区地壳运动监测网(1995,1996),新疆地区地壳运动监测网(1995,1996,1997,1998)等。

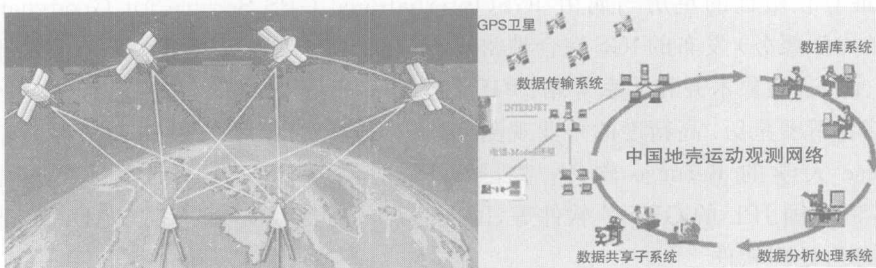


图 1-4 中国 GPS 地壳运动网络监测系统

以上介绍的大规模高精度的 GPS 网,在建立和维持全球和地区的地心坐标框架、地震预

报、精密形变测量、地球动力学研究及精化大地水准面等方面都发挥重要的作用。

## (二) 合成孔径雷达干涉测量

如图 1-5 所示,合成孔径雷达干涉测量(interferometry synthetic aperture radar, InSAR)是继 GPS 之后,在测绘领域又发生的一次革命性变化,是正在发展中的极具有潜力的微波遥感新技术。起初,它主要应用于生成数字高程模型(DEM)和制图,后来很快被扩展为差分干涉技术(differential InSAR, D-InSAR)并应用于测量微小的地表形变,它已在研究地震形变、火山运动、冰川漂移、城市沉降以及山体滑坡等方面表现出极好的前景。目前,欧美国家对这一技术正竞相研究,我国对雷达干涉的研究仍处于起步阶段,但已引起国内测绘界与地学界极大兴趣和广泛关注。该技术从诞生之日起就受到青睐,不但是因为 InSAR 技术提取高程精度可达到数米,运用差分干涉手段(D-InSAR)量测高程的变化可达到厘米甚至毫米级,而且是通过遥感影像处理的方式量测地表形变。GPS 技术可以在地表上以点的形式测定地表形变,而 InSAR 可以在地面上以面的形式测定地表形变。此外,InSAR 可以在较短的时间间隔内对所考虑的地区重复进行大面积测量,因而在时间测度上也具有较高的分辨率。

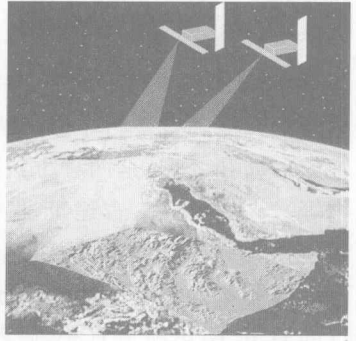


图 1-5 雷达干涉测量卫星

InSAR 是基于时间测距的成像机理,充分利用了雷达回波信号所携带的相位信息,来提取地面高程信息。其原理是通过两副天线同时观测或两次平行的观测,获得同一地区的重复观测数据(复数影像对),提取同一目标对应的两个回波信号之间的相位差,结合观测平台的轨道参数等提取高程信息,利用差分干涉技术可以精密测定地表微小变形。InSAR 影像像对的基线要求比较短,对数据获取的时间间隔和系统参数却十分严格。目前,用于 InSAR 的卫星有欧空局的 ERS-1/2、Envisat、日本宇航局的 JERS-1 和加拿大的 RADARSAT 等。

## 三、工程和局部性变形监测

工程和局部的变形监测分为外部监测和内部监测,外部监测以大地测量为主,其主要手段包括重复精密水准测量、精密三角、三边或边角测量和高精度自动化的全站仪监测系统。对于局部大型工程的变形监测,GPS 技术有好的应用前景。用大地测量方法进行变形监测,其特点是所测的量为绝对位移,监测范围广,监测精度高,但只能反应变形体的外观变形。内部监测主要采用岩土工程监测仪,如钻孔倾斜仪和多点位移计等,其特点是能监测到岩体内部的变形分布,但测量范围小,代表性差。对于大型工程建(构)筑物、重要的滑坡,采用内部和外部监测手段相结合,可以得到好的监测结果。

### (一) 常规地面测量方法

常规地面测量方法指用常规或现代的测量仪器测量方向(或角度)、边长和高差等观测量对变形体测量的总称。是一般的工程建(构)筑物、深基坑工程和城市地下工程等变形监测的主要手段。随着全站仪的普及和测量机器人的出现,为局部工程变形的监测提供一种很好的技术手段,它可以实现自动监测或室内监测,并且可达到亚毫米级测量精度。由于变形监测相对于常规测量的精度高,因此,在作业中应选择高精度测量仪器。目前,测角精度最高达到



0.5",如徕卡的马达驱动自动跟踪型全站仪 TCA2003 和马达驱动、自动跟踪、工业测量型全站仪 TDA5005。利用光的干涉原理研制的双频激光干涉仪是目前距离测量仪器中精度最高的一种,它能测到几百米,甚至几千米,测量精度可达到  $10^{-7}$  以上,真空中达到  $4 \times 10^{-10}$ 。电磁波测距精度最好为  $0.1 \times 10^{-6}$  (10km 误差为 1mm),精密高程测量仪器精度达到每公里往返测高差平均值的标准差 0.4mm。

## (二) 摄影测量方法

摄影测量方法包括单张相片摄影测量、地面立体摄影测量和航空摄影测量等。单张相片摄影测量只能测定平行于摄影机承片框平面上的变形,地面立体摄影测量则可测定物体空间位置的移动和变形,这两种方法适用于近距离大型工程建筑物(如混凝土大坝、挡土墙、高层建筑物等)、高塔、烟囱、古建筑、船闸和边坡体的变形监测。航空摄影测量用于大范围的地面变形测量,如由于地下采矿而引起的地表移动。

摄影测量的精度主要取决于像点的量测精度和摄影测量的几何强度,前者与摄影机和量测仪的质量、摄影材料有关,后者与摄影站和变形体之间的关系以及变形体上控制点的数量和分布有关。目前,像片坐标精度可达到  $2 \sim 4 \mu\text{m}$ ,目标点精度可达到摄影距离的十万分之一。摄影测量的方法具有很多优点,在同一时刻对变形体的很大范围进行观测,并可测定任意数量的点,其中包括不能直接测量的点,外业工作量小,效率高。近年来,数字摄影 CCD 技术已逐渐取代传统的胶片摄影模式,使得相片数据处理更方便,精度更高。

## (三) 特殊监测方法

作为对常规方法的补充或部分的代替,某些特殊的测量方法更适合于一些变形体的监测。

### 1. 短距离测量

对于小于 50m 的距离,由于电磁波的固定误差所限,根据实际条件可采用机械法。如 GERICK 研制的金属丝测长仪,是将很细的金属丝在固定拉力下绕钢测鼓上,其优点是受温度影响小,在上述测程下可达到优于 1mm 的精度。

### 2. 准直测量

一点到一平面(或一条直线)的垂直距离(偏距)在许多变形体的监测中遇到,这种监测的特点是垂直距离一般较小,如在几米的距离上,要求绝对精度几十个微米。它适合于水平基线通常平行于被监测物体,如大坝、机器设备的轴线。基准线可用光学法、光电法和机械法产生。

(1) 光学法是用一般的光学经纬仪或电子经纬仪的视准线构成基准线,也采用测微准直望远镜的视准线构成基准线。若在望远镜目镜端加一个激光发生器,则基准线是一条可见的激光束。光线法准直测量有测小角法、活动觇牌法和测微准直望远镜法。

(2) 光电法是通过光电转换原理测量偏距的,最典型的是三点法波带板激光准直。激光器点光源中心、光电探测器中心和波带板中心三点在一条直线上,根据光电探测器上的读数可计算出波带板中心偏离基准线的偏距。

(3) 机械法是在已知基准点上吊挂钢丝或尼龙丝(亦称引张线)构成基准线,用测尺游标、投影仪或传感器测量中间的目标点相对于基准线的偏距。

### 3. 铅直测量

以过基准点的铅垂线为垂直基准线,沿铅垂基准线的目标点相对于铅垂线的水平距离(称偏距)可通过垂线坐标仪、测尺或传感器得到。与水平基准线一样,可以用光学法、光电法或机