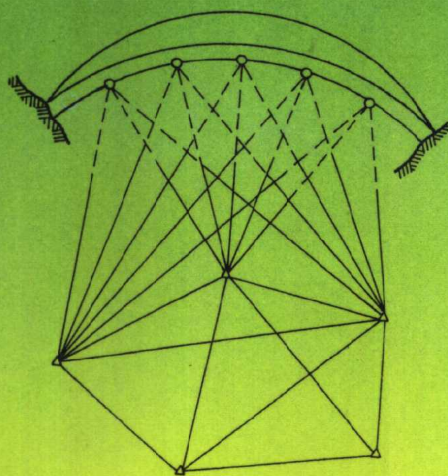


现代测绘科技丛书

# 变形监测分析与预报

陈永奇 吴子安 吴中如 编著



测绘出版社

现代测绘科技丛书

# 变形监测分析与预报

陈永奇 吴子安 吴中如 编著

测 绘 出 版 社

·北 京·

## 内 容 简 介

本书作者将多年来在变形监测领域中的研究成果，系统地、综合地展现在读者面前。全书共分五章，主要内容包括：变形监测，变形监测的空间与时间特征分析，变形物理解释的统计模型，变形物理解释的确定性模型和混合模型，以及安全监测资料管理系统。

本书可供从事变形监测和工程测量等有关方面的科研、教学和生产人员参考，也可作为高等院校测量工程专业的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

变形监测分析与预报/陈永奇等编著·—北京：测绘出版社，1997.11

(现代测绘科技丛书)

ISBN 7-5030-0907-1

I. 变… II. 陈… III. ①建筑物—变形观测—数据—分析②建筑物—变形—预报 IV. TU196

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 13276 号

测绘出版社出版发行

(100054 北京市宣武区白纸坊西街3号 (010) 63510007)

北京怀柔新华印刷厂印刷·新华书店总店北京发行所经销

1998年2月第一版·1998年2月第一次印刷

开本：850×1168 1/32·印张：5.875

字数：153千字·印数：0001—3000册

定价：14.00元

# 《现代测绘科技丛书》

## 编委会委员名单

主任委员：陈俊勇

副主任委员：宁津生 高俊 张祖勋  
楚良才 陈永奇 华彬文

委员：(以姓氏笔划为序)：

于来法 方恒 田应中  
朱华统 李德仁 陈绍光  
张清浦 林宗坚 陶本藻  
钱曾波 黄杏元 梁宜希  
喻永昌 廖克 潘正风

## 出版说明

《现代测绘科技丛书》是经国家测绘局批准列入我社“八五”重点出书规划的选题之一。其编写宗旨是对 80 年代以来测绘科技领域在新理论、新技术、新工艺等方面所取得的成果进行总结，整理成册，以期对改造传统测绘生产技术，提高劳动生产率和产品质量，形成我国现代测绘技术体系，发挥科技图书应有的作用；同时也为反映我国测绘科学研究水平，丰富我国测绘学术专著宝库服务。出版本套丛书也是为适应加速测绘科技成果转化为实现生产力的需要。

本套丛书按专题成册，专题有两种类型：一类偏重学术性，主要反映我国测绘各专业近十年来在理论研究方面所取得的、能代表我国先进水平的新成就和某些老专家毕生研究成果的专著，以及测绘前沿填补国内空白的著作；另一类偏重应用技术，是本丛书的主体，其内容是在理论指导下以新技术、新工艺、新材料、新产品研究成果的推广应用为主，个别的配有实用软件。

由于 GPS(全球定位系统)涉及测量界多方面的应用，内容较多，丛书中将分册配套编写。有关各册主题明确，内容相辅相成，组合起来 GPS 测量内容就显得比较完整，又发挥了各作者的专长。

丛书编委会于 1992 年 1 月成立，全体编委对丛书出版意图、读者对象，乃至每个选题及其内容都作了充分研究和讨论，在全国测绘界选择了有代表性的专家参加各个分册的撰写和审稿工作。按照计划，这套丛书的各分册将根据撰写完成情况先后定稿出版，陆续与读者见面。

## 前 言

变形监测正向边缘学科的方向发展，成为测量工作者与其它学科专家合作研究的领域。本书力求将多年来的研究成果在书中向读者作系统性的综合介绍，并且结合国内典型实例，以及国际上近期研究成果，以使国内读者了解这一领域的发展趋势。

本书共分五章：第一章、第二章的 § 2.1、§ 2.2 及第三章的 § 3.4 由陈永奇撰写；第二章的 § 2.3 ~ § 2.6、第三章的 § 3.1 ~ § 3.3 及第五章的 § 5.1 ~ § 5.3 由吴子安撰写；第四章及第五章的 § 5.4，§ 5.5 由吴中如撰写。全书由陈永奇统校。

由于水平有限，书中一定会有不少缺点，希望读者给予批评指正。

作 者

1995 年 3 月

# 目 录

<b>第一章 变形监测</b> .....	( 1 )
§ 1.1 变形监测技术 .....	( 1 )
§ 1.2 变形监测方案 .....	( 7 )
§ 1.3 监测网优化设计 .....	( 15 )
<b>第二章 变形的空间与时间特征分析</b> .....	( 29 )
§ 2.1 监测网平差 .....	( 29 )
§ 2.2 参考点稳定性分析和位移值的计算 .....	( 34 )
§ 2.3 变形模型 .....	( 40 )
§ 2.4 变形模拟 .....	( 47 )
§ 2.5 动态变形分析 .....	( 54 )
§ 2.6 观测资料处理 .....	( 62 )
<b>第三章 变形物理解释的统计模型</b> .....	( 69 )
§ 3.1 多元回归分析 .....	( 69 )
§ 3.2 灰色系统理论与时序分析 .....	( 76 )
§ 3.3 矿山地面变形预报模型 .....	( 83 )
§ 3.4 动态响应分析 .....	( 89 )
<b>第四章 变形物理解释的确定性模型和混合模型</b> .....	( 107 )
§ 4.1 有限元法和有限元计算模式 .....	( 108 )
§ 4.2 混凝土坝位移确定性模型 .....	( 116 )
§ 4.3 地面变形的确定性模型 .....	( 130 )
§ 4.4 混合模型的表达式 .....	( 134 )
§ 4.5 反分析理论及其应用 .....	( 135 )

<b>第五章 安全监测资料管理系统</b> .....	( 147 )
§ 5.1 数据管理系统的主要功能 .....	( 147 )
§ 5.2 监测资料库与资料库管理 .....	( 148 )
§ 5.3 监测资料整理系统 .....	( 150 )
§ 5.4 监测资料解释系统 .....	( 154 )
§ 5.5 实时自动安全监测系统 .....	( 168 )
<b>主要参考文献</b> .....	( 178 )



# 第一章 变形监测

变形观测方法的选择取决于变形体的特征、变形的大小和变形的速度等因素。合理设计变形观测方案是变形观测过程中很重要的一步。方案设计包括变形观测方法的选择，以及精度和观测周期的确定。

本章先介绍各种监测技术的当代发展，然后讨论监测网的优化设计方法以及变形监测方案中要考虑的问题。

## § 1.1 变形监测技术

### 一、常规地面测量方法

常规地面测量方法主要是指用常规测量仪器(经纬仪、测距仪、水准仪)测量角度、边长和高程的变化来测定变形。它们是目目前变形观测的主要手段。常规地面测量方法具有如下的优点：

- (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，能适用于不同的精度要求、不同形式的变形体和不同的外界条件。

但是，常规的地面测量方法也存在着一些缺点，主要是外业工作量大，作业时间长，不易于实现连续监测和测量过程的自动化。

#### 1. 精密距离测量

测距仪的广泛应用改变了监测网的布网方式，传统的三角网已逐步被三边网和边角网所代替。目前，在国际市场上，测距仪

有近百种，而且新的型号不断出现，用于变形观测，高精度的测距仪有瑞士生产的 Mekometer ME3000/ME5000，测程分别为 2.5km 和 5km，精度为  $(0.2 \sim 0.3) \text{mm} + (0.2 \sim 1.0) \times 10^{-6} \times D$ 。英国 com - Rad 电子仪器公司的 Geomensor CR204/234，测程 10km，精度为  $0.1 \text{mm} + (0.1 \sim 1.0) \times 10^{-6} \times D$ 。上述两种仪器的比例误差在很大程度上取决于大气的条件， $1 \times 10^{-6}$  是比较实际的。Tellurometer MA-200，精度为  $0.3 \text{mm} + (1 \sim 2) \times 10^{-6} \times D$ 。此外，Terrameter 公司的双色激光测距仪 LDM2 (已不再生产了)，它利用红光和蓝光所测距离的差值来计算大气折光的影响，并进行改正，从而减少测距的比例误差。仪器目前可测到 20km，精度为  $0.1 \times 10^{-6}$ 。

## 2. 电子经纬仪和全站型仪器

电子经纬仪的出现是地面测量技术的一项显著进步，它最重要的优点是使实现从野外测量到室内数据处理过程的自动化成为可能。目前已广泛用于采集三维变形信息。把由微处理机控制的跟踪设备加到全站仪后，就能对目标进行自动测量，这种系统有人称为测量机器人(Georobot)，第一套系统是 1983 年 Hannover 大学研制的。为了准确地照准目标，又加 CCD 相机用于代替十字丝，采用数字影像处理原理准确地确定目标中心。为了实现遥控和数据传输，加上无线电通讯装置，这就构成了一个完善的机器人，目前商品化的装置有 E2-S2，HT3000，Geodimeter4000。

测量机器人已开始用于变形观测中，例如：Geodimeter140SMS 监测系统由计算机控制，定时地对滑坡体上的目标点进行自动测量，数据传到计算机并显示变形的状态。

## 3. 精密高程测量

精密水准测量是研究垂直方向变形的最主要手段，其作业过程在过去的几十年中没有明显的变化。目前，一等水准测量的偶然误差约每公里  $0.5 \sim 0.7 \text{mm}$ ，系统误差约每公里  $0.06 \text{mm}$ 。但水准测量的作业过程劳动强度大、进度慢，特别是在山区。水准测

量的另一个缺点是系统误差(特别是折光误差)累计严重。最近几年来,随着全站型仪器的广泛使用,用三角高程测量和测距仪高程导线进行精密高程传递,引起了测量工作者的高度重视,许多国家都进行了大量的实验,结果表明,每公里1mm或更高的精度是可以达到的,进度比水准测量快得多。

水准测量方面的最新进展是采用数字水准仪,例如NA2000/3000。这种水准仪采用影像处理技术可以直接获得水准尺上的读数。

## 二、特殊的测量手段

特殊的测量手段包括应变测量、准直测量和倾斜测量。和常规的地面测量方法相比,它们具有如下的特点:

- (1) 测量过程简单;
- (2) 容易实现自动化观测和连续监测;
- (3) 提供的是局部的变形信息。

### 1. 应变测量

应变计根据工作原理可分为两类。一类是通过测量两点间距离的变化来计算应变;另一类是直接用传感器测量应变。设两点间的距离为 $l$ ,第二周期测量时距离变化了 $\Delta l$ ,那么

$$\epsilon = \Delta l / l \quad (1-1)$$

为两点间的平均线应变。当距离 $l$ 和变形体的尺寸相比很小时,由(1-1)式所得到的应变可看成是某一点处的。

精密测量距离的变化有机械法和激光干涉法。机械法用因瓦丝、石英棒等作为长度的标准,长度的变化用机械-电子传感器测量,精度一般为几十个微米。激光干涉法可以测到几百米,甚至几千米,测量精度在 $10^{-7}$ 以上,真空中可达 $4 \times 10^{-10}$ 。

应变传感器实质上是一个导体(金属条或很窄的箔条),埋在变形体中,由于变形体中的应变使得导体伸长或缩短,从而改变了导体的电阻。导体电阻的变化用电桥测量,通过测量电阻值

的变化就可以计算应变。

## 2. 倾斜仪测量

地面或建筑物的倾斜可以用倾斜仪测量。目前倾斜仪的种类很多，大体可分为“短基线”倾斜仪和“长基线”倾斜仪。前者一般用垂直摆锤或水准气泡作为参考线；后者一般根据静力水准的原理做成。

静力水准可连成网状，固定设置在廊道中以测定各部分的倾斜。为了减弱温度的影响，有的采用两种液体（水银和水）。然而，静力水准的测点基本上要处于同一水平，测量范围受到限制。为了克服这一缺点，近年来有的采用压力传感器测量液体压力的变化，从而计算高差的变化。

不同的倾斜仪，测量精度差别很大。一般来讲，“短基线”倾斜仪精度范围是  $0.5'' \sim 1.0''$ 。而“长基线”倾斜仪精度很高，用水作液体的倾斜仪，每 10m 距离的测量精度可达 0.01mm。用水银作为液体，测量精度可达  $0.001''$ 。实际工作中根据需要选择倾斜仪。

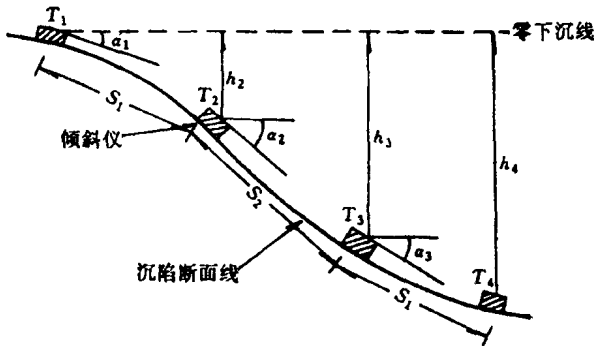


图 1-1 用倾斜仪测定地面的沉降

倾斜仪列阵可用于测量地面的沉降，其原理如图 1-1 所示，第  $i$  点的下沉量为

$$h_i = \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j S_j \quad (1-2)$$

### 3. 准直测量

准直测量用于测定某一方向上点位的相对变化，可以是水平方向，也可以是垂直方向。准直测量方法很多，有导线法、测小角法、活动标牌法、激光准直法和引张线法。

激光准直根据其原理分为两类：一类是利用激光方向性强的特点，进行直接准直；另一类是利用激光单色性好的优点，进行衍射法准直。

在大气条件下，激光准直的精度为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ，提高精度的主要障碍是大气折光的影响。在真空条件下，准直精度可达  $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 。水平激光准直广泛用于大坝等线状工程的建筑物的变形观测。

在没有气流影响的地方，也采用钢丝或尼龙丝准直，由于它们不受折光影响，精度也能达到  $10^{-6}$ 。

垂直激光准直(激光铅直仪)，可用于测定高层建筑物的摆动。机械法垂直准直有正锤和倒锤，它们用于观测建筑物的挠度和倾斜。埋设在稳固基岩上的倒锤还可用作变形观测的基准点。目前，锤线观测多采用自动读数设备，遥测锤线坐标仪 TELEPENDLUM 分辨率为 0.01mm。还有“自动视觉系统” AVS (Automated Vision System)，采用固态照像机，自动拍摄锤线的影像，从而确定锤线位置的变化，分辨率为  $3\mu\text{m}$ 。美国加州的几个坝均采用这种观测系统。

“三维倒锤”用因瓦丝代替普通钢丝，除了用于测定水平位移外还同时监测点的高程的变化。

## 三、摄影测量方法

地面摄影测量的方法越来越广泛地用于大型工程建筑物(例如混凝土大坝、挡土墙、高层建筑物等)的变形观测。空中摄影

测量也有用于较大范围的地面变形测量，例如，测定由于地下采矿而引起的地表移动。采用摄影测量方法，其原因除了它本身的优点外，主要是近十多年来摄影测量点位测定精度的显著提高。精度提高的主要因素是硬件的改进(包括高质量的摄影机和精密的量测仪器)，以及软件的发展。计算机的广泛应用，使得人们能够采用严密的数学处理方法来模拟摄影测量过程中的系统误差，包括摄影机镜头的畸变以及底片的变形。采用数理统计的方法评定观测值的质量和剔除粗差，从而保证成果的可靠性。目前，摄影测量点位测定精度已可达  $2 \sim 4\mu\text{m}$  (像片坐标的精度)，取决于摄影测量仪的焦距。地面摄影测量的精度可以达到摄影距离的十万分之一。在变形观测中，应用摄影测量方法具有如下优点：

- (1) 可以同时测定变形体上任意点的变形；
- (2) 提供完全和瞬时的三维空间信息；
- (3) 大量减少野外的测量工作量；
- (4) 可以不需要接触被测物体；
- (5) 有了摄影底片、可以观测到变形体以前的状态。

近年来发展起来的数字摄影测量和实时摄影测量为该技术在变形监测中的应用开拓了更加广泛的前景。

#### 四、GPS 测量技术

全球定位系统的应用是测量技术的一项革命性变革，它使建立三维网的监测变得简单，且不需要测站间的通视，可以免去建标、砍树之类的工作，并使监测网的一类设计有更多优化的余地。全球定位系统可以提供  $1 \times 10^{-6}$  的相对定位精度，可以预计， $0.1 \times 10^{-6}$  或更高的精度终将可以达到。它在精度上和经济上的优越性将使它取代很多传统的地面测量方法。

过去几年中，GPS 广泛用于各种变形监测。GPS 连续自动监测系统已研究成功，并用于 San Andreas 断层地壳运动和大坝变形的实时监测。

图 1-2 是大坝连续监测方案，在远离大坝的稳定控制点和坝的两端点上安置能接收  $L_1$  和  $L_2$  信号的双频监测单元(双频监测器)，为了经济起见，在大坝的监测点上安置单频监测单元(单频监测器)，因为坝长度不大，相对大气延迟影响小。监测单元由天线和低成本接受单元组成，它们组成一个整体。连续监测处理单元(CMPU)包括一台微机和一些附加硬件，监测单元采集的数据通过 MODEM 输入计算机处理，CMPU 还对监测器进行遥控，监视它们的工作。

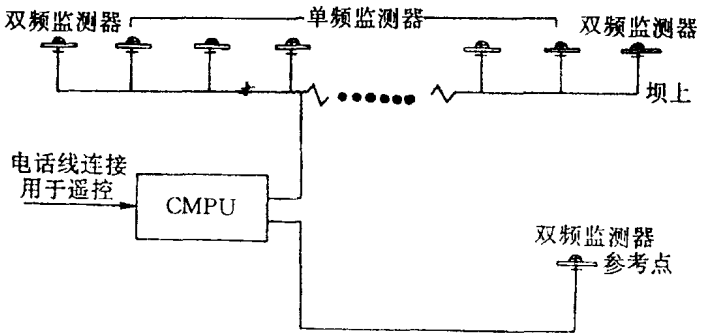


图 1-2 GPS 连续监测系统框图

## § 1.2 变形监测方案

变形监测方案的制定是变形监测中非常重要的一项工作，它影响到观测的成本以及成果的精度和可靠性，因此应当认真、仔细的进行设计。然而，监测方案随变形体而异，不可能有一个统一的模式，因此本节只讨论在方案拟定中需要考虑的问题。

### 一、变形量测定的精度

和其它测量工作相比，变形观测要求的精度高，典型精度 1mm 或相对精度为  $10^{-6}$ 。确定合理的精度是很重要的，过高的

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，使所估计的变形参数误差大，甚至会得出不正确的结论。制定变形观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，以及观测目的等。一般来说，如果变形观测是为了确保建筑物的安全，则其观测的误差应小于允许变形值的  $1/10 \sim 1/20$ ；如果是为了研究变形的过程，则其误差应比上面这个数值小得多，甚至应采用目前测量手段和仪器所能达到的最高精度。

地壳变形测量用于预报地震、研究地震和地面变形的关系，以及地震发生的机理，测量精度要求比较高，一般在  $10^{-6}$  以上。

不同类型的工程建筑物，变形观测的精度要求差别较大。对于同类工程建筑物，根据其结构、形状不同，要求的精度也有差异。即使同一建筑物，不同部位的精度要求也不同。普通的工业与民用建筑，变形观测的主要内容是基础沉陷和建筑物本身的倾斜。一般来讲，对于有连续生产线的大型车间(钢结构，钢筋混凝土结构的建筑物)，通常要求观测工作能反映出 2mm 的沉陷量，因此，对于观测点高程的精度，应在  $\pm 1\text{mm}$  以内。特种工程设备(例如高能加速器、大型天线)，要求变形观测的精度高达  $\pm 0.1\text{mm}$ 。拦河大坝是一类典型的工程建筑物，变形观测的精度要求概括在表 1-1 中。滑坡变形测定精度一般在几毫米到 50 毫米。

表 1-1 大坝变形观测典型精度

观测内容	沉陷量/mm	水平位移/mm
岩基上的混凝土坝	1	1
压缩土上的混凝土坝	2	2
土坝：		
施工期间	10	5~10
运营期间	5	3~5



## 二、监测系统设计

### 1. 监测网

监测网一般分为参考网(也叫绝对网)和相对网。参考网所有的点一般设置在变形体外,用于测量变形体上目标的“绝对”变形。参考网测量的目的是要验证参考网点本身的稳定性。图 1-3 是用于某大坝变形观测的参考网,坝上目标点的位移从参考点上用前方交会的方法测定。相对网的所有点都在变形体上,通过测量网点之间的相对移动来确定变形体的几何变形状态。图 1-4 是一个监测地壳变形的相对网。有时,参考网和相对网混合在一起,图 1-5 所示的是一个用于监测油田地面沉降的一等水准网略图,参考点在油田的周围,尽可能设置在沉降区范围外。参考网通过相对网点联系在一起,单纯参考点本身并没有构成一个完整的网形。

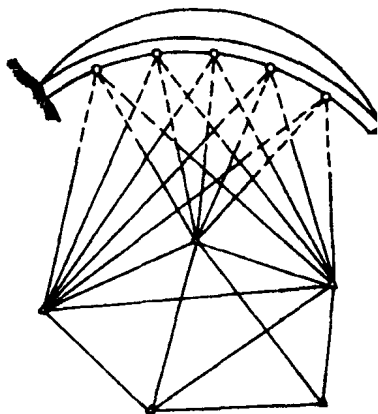


图 1-3 用于某大坝变形观测的参考网

用地面测量方法进行变形观测有时并不一定构成完整的图形,例如用于监测地壳沉降的水准测量,可能只分布在不同地方的一些单水准线路;监测地壳水平方向应变累积的监测方案可能