

普通高等院校测绘课程系列规划教材

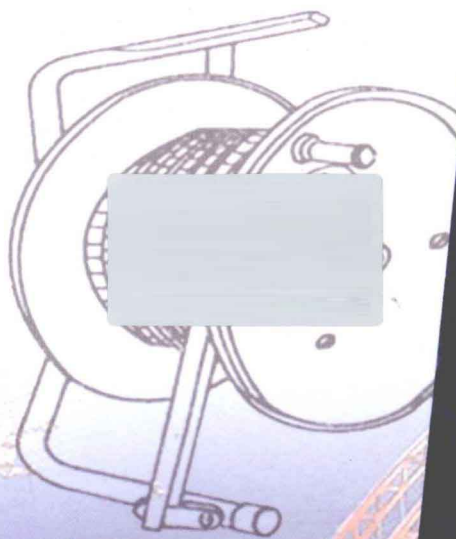
PUTONG GAODENG YUANXIAO CEHUI KECHENG XILIE GUIHUA JIAOCAI

BIANXING  
JIANCE

# 变形 监测

主 编 \ 李保平 潘国兵

主 审 \ 范东明



西南交通大学出版社  
Http://press.swjtu.edu.cn

普通高等院校测绘课程系列规划教材

# 变形监测

主 编 李保平 潘国兵  
主 审 范东明

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了测绘新理论、新技术在变形监测中的应用,力求做到逻辑严谨、内容新颖、技术先进、理论联系实际,贴近测绘科学的发展前沿,对培养学生的专业能力和执业能力具有重要的作用。本书共 13 章,主要内容包括绪论、变形监测方法、变形监测方案设计、变形监测资料整理、变形监测网数据处理的方法、变形分析及预报、工业与民用建筑变形监测、基坑工程变形监测、边坡工程变形监测、桥梁工程变形监测、软土地基(路基)工程变形监测、大坝变形监测、地下工程施工监测等。

本书可作为高等院校测绘工程专业及其他相关专业的本科生、研究生学习变形监测理论及应用时的教材,也可作为从事测绘和变形监测专业人员的参考书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

变形监测 / 李保平, 潘国兵主编. —成都: 西南  
交通大学出版社, 2012.8  
普通高等院校测绘课程系列规划教材  
ISBN 978-7-5643-1905-2

I. ①变… II. ①李… ②潘… III. ①变形观测—高  
等学院—教材 IV. ①P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 194602 号

---

普通高等院校测绘课程系列规划教材

### 变 形 监 测

主 编 李保平 潘国兵

\*

责任编辑 杨 勇

特邀编辑 姜锡伟

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川锦祝印务有限公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 17.375

字数: 429 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

**ISBN 978-7-5643-1905-2**

定价: 32.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 普通高等院校测绘课程系列规划教材

## 编审委员会名单

编审委员会主任：黄丁发

编审委员会副主任：郑加柱 方渊明

编委会成员：（以姓氏笔画为序）

马飞虎	马玉晓	王卫红	王化光	王增武
左小清	石信喜	史玉峰	吉长东	刘国栋
刘绍堂	刘贵明	刘福臻	杨久东	杨明强
李长春	李保平	何立恒	余代俊	汪金花
沙从术	张 飞	张文君	张国辉	张明华
张燕茹	陈绍杰	青 盛	林友军	胡圣武
聂启祥	徐 兮	高德政	蒋端波	程海琴
鲁小平	满 旺	潘国兵	潘建平	潘炳玉

# 前 言

本书是按照高等院校测绘工程专业培养方案的要求，以在多所高等院校测绘学科教材研讨会上制订的“变形监测原理与应用”教学大纲为主要依据，结合变形监测理论和技术的发展现状，在总结多年教学和大量实践经验的基础上编写完成的。

本书重点介绍了变形监测理论和技术的发展、变形监测方法、变形监测方案设计、变形监测资料整理、变形监测网数据处理的方法、变形分析及预报、工业与民用建筑变形监测、基坑工程变形监测、边坡工程变形监测、桥梁工程变形监测、软土地基（路基）工程变形监测、大坝变形监测、地下工程施工监测等内容，并结合工程实例介绍了测绘新技术在变形监测中的应用。本书内容新颖，贴近测绘科学的发展实际，对培养学生的专业能力和岗位能力具有重要的作用。

本书注重内容的针对性和实用性，在介绍变形监测的基本知识和基本技能时，基本理论的介绍以够用为度，略深于必需；注意教材的基础性，在内容的介绍上，概念准确、方法简单、由浅入深、先易后难、循序渐进；并注重教材的连贯性、衔接性和教材内容的系统性，每一章都结合变形监测的工程实例来扩大学生的知识面；注重教材内容的科学性和先进性，在书中增加了现代测绘新技术、新仪器和国家各种测量规范中的有关内容，充分体现了高、新、精等特点，能较好地满足学生学习和日后工作的需要。同时，为满足教学要求，每章之后都附有思考题和习题，便于学生自学和练习。

本书共 13 章，由河南城建学院的李保平和重庆交通大学的潘国兵主编。第 1 章和第 7 章由河南城建学院李保平编写；第 2 章和第 6 章由成都理工大学曾涛编写；第 3 章和第 9 章以及第 10.1 ~ 10.4 节由重庆交通大学潘国兵编写；第 10.5 节由重庆交通大学徐金鸿编写；第 4 章和第 8 章由南京林业大学陈健编写；第 5 章和第 12 章由河南城建学院朱宝训编写；第 11 章由重庆交通大学柯宏霞编写；第 13 章由河南城建学院黄倩编写。全书由李保平组织和统稿，潘国兵负责本书的统一修改。

本书在完成由西南交通大学范东明教授主审，范教授为本书提出了许多有益的建议和修改意见，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免会有欠妥之处，敬请专家和广大读者批评指正。

编 者

2012 年 4 月



# 目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 变形监测概述	1
1.2 变形监测技术和理论的发展	5
思考题与习题	10
第 2 章 变形监测方法	11
2.1 水平位移监测方法	11
2.2 垂直位移监测方法	23
2.3 内部变形监测方法	26
2.4 变形监测方法的选择	29
思考题与习题	30
第 3 章 变形监测方案设计	32
3.1 监测内容	32
3.2 监测精度、仪器和方法	33
3.3 监测部位和测点布置	34
3.4 监测周期和监测频率	35
3.5 监测的预警	36
3.6 变形监测方案设计实例	37
思考题与习题	46
第 4 章 变形监测资料整理	47
4.1 监测资料检核的意义	47
4.2 监测资料检核的方法	47
4.3 粗差剔除	48
4.4 监测资料的整理	51
思考题与习题	56
第 5 章 变形监测网数据处理的方法	57
5.1 经典自由网平差	57
5.2 秩亏自由网	62
5.3 自由网拟稳平差	78
思考题与习题	81



<b>第 6 章 变形分析及预报</b>	82
6.1 变形监测网的参考系	82
6.2 基准点稳定性分析	88
6.3 变形分析与预报	93
思考题与习题	105
<b>第 7 章 工业与民用建筑物变形监测</b>	107
7.1 概 述	107
7.2 垂直位移(沉降)监测	108
7.3 水平位移监测	116
7.4 倾斜监测	128
7.5 挠度监测与裂缝监测	133
7.6 日照和风振变形监测	138
7.7 工程实例——GPS 技术在某电视塔的变形监测中的应用	139
思考题与习题	143
<b>第 8 章 基坑工程变形监测</b>	144
8.1 概 述	144
8.2 监测内容和方法	145
8.3 监测方案的设计	151
8.4 工程实例	157
思考题与习题	160
<b>第 9 章 边坡工程变形监测</b>	161
9.1 概 述	161
9.2 监测内容和方法	161
9.3 监测方案的设计	170
9.4 监测数据的整理与分析	173
9.5 工程实例	175
思考题与习题	179
<b>第 10 章 桥梁工程变形监测</b>	180
10.1 概 述	180
10.2 监测内容和方法	181
10.3 监测方案的设计	185
10.4 监测数据的整理与分析	188
10.5 工程实例	189
思考题与习题	199



第 11 章 软土地基(路基)工程变形监测	200
11.1 概 述	200
11.2 监测的内容和方法	201
11.3 监测方案的设计	202
11.4 监测数据的整理与分析	207
11.5 工程实例	210
思考题与习题	213
第 12 章 大坝变形监测	214
12.1 概 述	214
12.2 平面变形监测	217
12.3 垂直变形监测	224
12.4 内部变形监测	228
12.5 工程实例	232
思考题与习题	241
第 13 章 地下工程施工监测	242
13.1 概 述	242
13.2 监测方法	245
13.3 监测方案的设计	251
13.4 工程实例	260
思考题与习题	265
参考文献	266





# 第1章 绪论

随着我国国民经济的飞速发展和城镇化进程的加快,人们的生产生活领域不断扩大,大型和高层建筑物越来越多,地下铁路和高速铁路不断在各大城市延伸,桥梁、隧道、大坝与船闸相继建成。我国的工程建设规模日益增大,工程费用相继增加,工程建筑物、构筑物 and 工业设施在运营过程中的安全问题引起了人们越来越多的关注。而影响建筑物、构筑物和工业设施安全的主要因素就是其自身的变形。

变形是物体在外来因素作用下产生的形状、大小及位置的变化,它是自然界普遍存在的现象。变形体一般包括工程建筑物、构筑物、大型机械设备以及其他自然和人工对象。

变形体的变形若在一定范围内,则被认为是允许的;如果超出允许值,就会影响建筑物、构筑物的正常使用,严重时还会影响建筑物的安全,并引发灾害。自然界的变形危害现象很普遍,如桥梁与建筑物的倒塌、地表的沉陷、水库的溃坝、隧道的坍塌、滑坡等。这些地质灾害的发生,给人们的生命财产造成了巨大损失,严重地扰乱了人们正常的生活秩序。而这种灾害往往是变形体在变形达到极限的时候发生的。如果我们能有效地测量变形体变形的大小和速度,就可以提出预报和防治措施,从而保证人们生命财产的安全。

变形监测就是利用专用的仪器和方法对变形体的变形现象进行持续观测,对变形体变形性态进行分析,并对变形体变形的空间状态和时间特征进行预测等所开展的各项工作。变形监测又称为变形测量或变形观测。工程建筑物、构筑物、大型技术设备及局部地表的变形监测是工程测量学的重要内容,因而通常把变形测量作为工程测量的一个重要组成部分。同时,变形监测还涉及工程地质、水文、结构力学、地球物理、计算机科学等诸多学科的知识,它是一项跨学科的研究,并正向边缘学科的方向发展。

## 1.1 变形监测概述

### 1.1.1 变形监测的对象

变形监测的对象是多种多样的,从地表到地下的各种建筑物、构筑物及工业设施等一切关系到人们生活的实物对象都有可能成为变形监测的对象。根据变形体的研究范围,可将变形监测的研究对象划分为以下几类:

全球性变形研究:主要监测全球板块运动、地极运动、地球自转速率的变化、地潮等,并研究其变化规律。

区域性变形研究:研究主要区域的地表变形,进行地壳形变监测、城市地面沉降监测。



例如：我国在地震多发地区和城市建立了地震监测机构，实时监测各地的地壳形变；大连市地震宏观监测点已达 84 个。另外，城市人口的快速增加、人工地下抽水和灌溉引起的地表沉降和回弹，已成为上海、天津、西安等大城市的一个非常突出的问题；大多数以地下矿床开采为主的工业城市和地区，长期的开采引起周围地表的移动、变形和塌陷，给人们的生产和生活带来了诸多不便。这些现象都需要我们对相关地区进行区域性变形研究。

工程建筑物、构筑物的变形研究：主要是监测工程建筑物的三维变形，如高层建筑物、高速铁路和地下铁路、大型水利枢纽工程、桥梁与隧道、尾矿坝、地下井巷和硐室的变形以及地表滑坡体的滑动等。

大型精密工程设施的变形研究：主要是对大型精密设施在施工、运营过程中由于各种原因产生的变形进行监测，并分析研究变形的产生原因和规律。

### 1.1.2 变形监测的目的和意义

在我国城市化进程的加快和国民经济的发展过程中，大型建筑物施工和运营中的安全问题成为政府、地方部门和使用单位十分关注的重要问题，大型建筑物的安全监测也越来越受到人们的重视，绝大多数重要的大型建筑物都实施了监测工作。变形测量的目的就是监视变形体的安全，研究其变形过程，提供和积累可靠的资料。它包括以下几个方面：

#### 1. 分析和评价建筑物的安全状态

工程建筑物在施工和运营期间，由于受到多种主观和客观因素的影响，会产生变形。这种变形常常表现为建筑物整体和局部发生坍塌、沉陷、倾斜、裂缝、滑坡等现象。如果这种变形超出了规定的限度，就会直接影响建筑物的正常使用，严重时甚至会危及建筑物的安全，带来灾难性后果，给国家和人民的生命财产造成巨大的损失。为了确保大型建筑物的安全使用，需要对其进行长期的精密变形观测，以确定其变形状态，分析和评价其安全状态，对其稳定性和安全性做出判断，从而采取措施进行处理，防止事故的发生。例如：1979 年，冶金部第十九冶金建设公司第三分公司测量队对宝钢一号高炉施工平面控制网进行复测，发现施工中的一号高炉基础本体与所属热风炉基础有相向位移。此后，他们又发现一号焦炉基础、烧结机基础、转炉基础和初轧厂设备基础均有 10~240 mm 的位移。此情况经逐级上报，引起了上级领导的关注。他们安排测量队在全厂区进行了多次位移观测，以分析和评价建筑物的安全状态，确保宝钢的安全生产。

#### 2. 验证设计参数

通过在施工及运营期对变形体进行观测、分析、研究，可以验证地基与基础的计算方法、工程结构的设计方法，可以对不同地基与工程结构规定合理的允许沉陷与变形数值，也可以为工程建筑物的设计、施工、维护管理和科学研究工作提供相关资料，还可以为建筑结构安全评价提供分析数据。例如，我国的刘家峡大坝，根据观测结果进行反演分析，得出了初期时效位移分量、坝体混凝土弹性模量、渗透扩散率及横缝作用等有关结构本身特性的信息，验证了设计参数的正确性。



### 3. 反馈设计及施工质量

变形监测不仅能监视建筑物的安全状态，而且是人们获取科学知识、检验理论和科学假设的必要手段。在工程建设中，变形监测对反馈设计及施工质量等起到了重要的作用。例如，隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统多年来的观测数据表明：该大坝的变形值在允许范围内，大坝是安全稳定的，设计及施工质量是可靠的。

### 4. 研究正常的变形规律和预报变形的的方法

变形观测是工程管理运行的耳目。由于大型建筑物结构类型、建筑材料、施工模式、地质条件等的不同，其变形特征和规律存在着一定的差异。因此，对已经投入运营的建筑物实施安全监测，从中获取大量的安全监测信息，并对这些信息进行系统的分析研究，寻找建筑物变形的基本规律和特征，从而才能监控建筑物的安全，为预报建筑物的变形趋势提供依据。例如，1986年11月，中船勘察设计研究院受徐汇区市民村联建指挥部委托，监测市民村1~6号高楼在打桩期间对某大学高压实验室精密设备和文治中学有60余年历史的砖木结构办公楼的影响。监测内容分为沉降观测和位移观测。从1986年11月到1987年1月，共进行了6次沉降观测，测得沉降量分别为2 mm和3 mm；共进行了7次位移观测，测得高压实验室位移值为3 mm，文治中学办公楼位移值为27 mm。观测结果改变了该大学高压实验室原来准备搬家的打算。

变形监测的意义具体表现为：对于大型建筑物，主要是保证其安全运营，提高其运营效益；对于机械设备，则保证其安全、可靠、高效地运行，为改善其产品质量和设计新产品提供技术数据；对于滑坡，通过监测其随时间的变化过程，可进一步研究引起滑坡的成因，预报大的滑坡灾害；对于矿山，通过对矿藏开挖所引起的实际变形的观测，采用控制开挖量和加固等方法，可避免危险性变形的发生。另外，地壳构造运动的监测对保证大型特种精密工程的安全运营也具有十分重要的工程意义。

变形监测是掌握建筑物工作性态的基本手段，但仅对建筑物进行位移特征的监测是不够全面的，还需要对其结构内部应力、温度以及外部环境进行相应的监测，只有这样才能全面掌握建筑物的性态特征，并在变形监测的基础上发展成为安全监测。安全监测的成果不仅可以反映建筑物的工作性态，还能反馈给生产管理部门，以控制和调节建筑物的荷载，所以，安全监测有时又称安全监控。安全监测的主要目的是确定建筑物的工作性态、保证建筑物的安全运营，为此，需要建立一套完整的安全评判理论体系，以分析和评判建筑物的安全状况，由此而产生和发展了一种新的理论——建筑物健康诊断理论。变形监测技术起源于测绘领域，虽然随着科学技术的进步，其内涵和理论体系发生了很大的变化，但在测绘领域，人们还是习惯地称之为“变形监测”。

## 1.1.3 变形监测的内容

变形监测是确定在各种荷载和外力作用下，变形体的形状、大小及位置变化的空间状态和时间特征。由于工程建筑物都允许有一定的变形（不影响其正常使用和造成一定的伤害），因此要求能够准确地估计和观测各种移动与变形值，并能够判定工程建筑物的允许变形值。变形监测就是根据变形体的性质、地基情况和地质条件，对工程建筑物进行位移、沉降、倾



斜、裂缝和挠度等的测量，并从历次测量结果的比较中了解变形随时间的变化情况，这些变形测量称为外部观测。为了了解建筑物内部结构的情况，还应对混凝土应力、钢筋应力、温度等进行观测，这些内容常称为内部观测。在进行变形监测数据处理，特别是对变形原因作物理解释时，必须将内、外观测资料结合起来进行分析。

变形监测的具体内容为：

(1) 工业与民用建筑监测：主要进行沉陷、日照变形、倾斜及裂缝观测等。基坑边坡进行垂直位移、水平位移、基坑回弹监测。

(2) 高层建筑监测：测定在风力、温度等作用下建筑物顶部的倾斜、动态变形（振幅与频率）。

(3) 桥梁监测：测定在动荷载作用下的振动大小，桥墩垂直位移，桥面水平、垂直位移。

(4) 水工建筑物变形监测：对施工期临时围堰、近坝区滑坡进行监测；对水库土坝进行水平位移、垂直位移、挠度、倾斜以及裂缝观测；对混凝土重力坝进行水平位移、垂直位移、应力、应变及伸缩缝等的观测。

(5) 矿区岩层与地表移动监测：通过处理矿区的观测资料，在断面图的上方绘制观测的各种曲线图；在曲线图的基础上，确定移动角和最大下沉角。

(6) 古文物的保护监测：采用近景摄影的测量方法进行量测、收藏、复制、定期监测，以防止其毁坏。

(7) 地下工程变形监测：对地下建、构筑物的柱基、墩台的垂直位移、水平位移、倾斜，地下隧道的拱顶下沉、底板垂直位移、侧墙挠曲、衬砌结构变形等进行监测。

(8) 工业企业、科学试验设施与军事设施中的各种工艺设备、导轨等的监测：主要是水平位移和垂直位移的监测。

(9) 地面沉降监测：对于建立在江河下游冲积层上的城市，由于工业用水等大量开采地下水而影响了地下土层的结构，将使地面产生沉降现象；对于地下采矿地区，由于大量的采掘，也会使地表产生沉降现象。这种沉降现象严重的城市和地区，暴雨过后将发生大面积的积水，影响仓库的使用与居民的生活；有时甚至会造成地下管线的破坏，危机建筑物的安全。因此，必须定期对地面进行观测，掌握其沉降与回升的规律，以便采取防护措施。对于这些地区，主要应进行地表沉降观测。从大范围讲，通过监测地面沉降可研究地壳形变，如地震引发的大地变形等。

#### 1.1.4 变形监测的特点

变形监测具有鲜明的特点，它与常规的测量工作相比，既有相同点，又有各自不同的要求和特点，具体体现在：

##### 1. 变形监测要进行重复观测

为了观测变形体在自然和人为条件下的变形，需要周期性地对布设的观测点进行重复观测，以求出变形体在观测周期内的变形量。周期性观测是指观测的时间间隔是固定的，不能随意更改；重复观测是指在规定的观测条件下，采用相同的观测方法和观测要求，使用同样精度等级的测绘仪器进行若干次观测。

在变形监测时，为了最大限度地测量出变形体的变形特征数据，减小测绘仪器、外界条件和



人为因素等引起的误差的影响，每次观测时，测绘人员、测绘仪器、作业条件等都应相对固定。

## 2. 变形监测精度要求高

由于变形体的变形速度和变形量都相对较小，为了准确地了解变形体的变形特征和变形过程，需要精确地测量变形体特征点的空间位置的变化量，因此，变形监测的精度要求比常规工程测量的精度要求高。另外，由于变形监测点大都是根据变形体的重要性及其地质、地形条件布设在变形体上的，所以变形体的形状特征决定了监测点的空间分布特征，同时也决定了变形监测网的形状特征。变形监测网的布设形状因受到变形体形状的影响，所以有时不能够按照测量控制网的布设要求设置观测点，这势必会给测量工作和测量精度带来一定的影响。但无论变形监测的条件怎样，观测精度一定要达到规范的要求。例如：在大坝的变形监测中，坝体的水平位移监测精度一般要求达到 $\pm 1\text{ mm}$ ，坝基等其他重要部位的变形监测精度要求达到 $\pm (0.3 \sim 0.5)\text{ mm}$ 。而对于大型精密工程，其与人民生命和财产相关的变形监测项目精度要求则更高。因此，高精度的变形监测对测量仪器、测量方法和作业人员提出了更高的要求。

## 3. 变形监测是多种测绘技术的综合应用

随着科学技术的快速发展和进步，现代工程建筑物的规模越来越大，造型越来越复杂，难度越来越高，变形监测的技术手段随之越来越先进，监测方法越来越多样化。在变形监测工作中，除采用常规的大地测量方法外，对于那些只需要监测某些特定位移特征量的场合，则使用专门的测量仪器，采用专门的测量方法。目前，大多数重大工程的主要监测工作都逐步实现了自动化观测，仪器能够在恶劣环境下长期稳定、可靠地工作。这不仅提高了观测速度，降低了测量作业强度，而且可以实时监控变形体的安全，提高测量精度。同时，配合自动观测仪器，建立测量控制和数据传输的通信网络以及进行数据采集、传输、管理、分析等的计算机软件系统，可使变形数据信息获取的空间分辨率和时间分辨率得到很大提高。变形监测正在实现多种测绘技术的综合应用。

## 4. 变形监测网侧重于研究变形点位的变化

变形监测工作最终关心的是实测点的点位变化情况，而并不过多地关注测点的绝对位置。因此，在变形监测中，可以根据工程需要，灵活建立采用独立坐标系统和独立高程系统的监测网。但是，为了保证监测资料的正确性和完整性，独立坐标系统和独立高程系统一经建立就不允许更改。建立的变形监测控制网可以和国家地方的坐标系统和高程系统联测，也可以不进行联测，但在测绘成果中要加以说明。

# 1.2 变形监测技术和理论的发展

## 1.2.1 变形监测技术的发展

随着测绘技术、计算机技术和通信技术等的快速发展，在变形监测技术传统方法的基础上，科研人员研制和开发了高精度、稳定可靠的自动化、光电化和遥测仪器和设备。



## 1. 边角网方法

### (1) 常规大地测量方法。

变形监测的传统方法主要是大地测量方法,包括三角测量、水准测量、交会测量等方法。该类方法的主要特征是:可以利用传统的大地测量仪器,理论和方法成熟,测量数据可靠,观测费用相对较低。但该类方法有很大的缺陷:观测所需时间长,劳动强度高,观测精度受到观测条件的影响较多,不能实现自动化观测等。目前,该类方法的改进主要表现在:

- ① 利用高精度测距代替精密测角,以提高工作效率。
- ② 采用电子水准仪代替原来的光学水准仪进行观测,有效地提高观测数据的可靠性。
- ③ 采用测量机器人代替原来的经纬仪进行观测,实现观测和数据处理的自动化和智能化。

### (2) 测量机器人技术。

测量机器人即全自动跟踪全站仪。它由带电动马达驱动和程序控制的 TPS 系统结合激光、通信及 CCD 技术组合而成,集目标识别、自动照准、自动测角测距、自动跟踪、自动记录于一体,可以实现测量的全自动化。它为局部工程变形的自动监测或室内监测提供了一种良好的技术手段。测量机器人能够自动寻找并精确照准目标,在 1 s 内完成对单点的观测,并且可以对成百上千个目标作持续的、全天候的重复观测,而且监测精度可达 0.1 mm。目前,我国包括小浪底大坝在内的多个水利设施的外观监测都使用了测量机器人,效果非常理想。

## 2. 基准线测量法

基准线法是变形监测的常用方法,该方法特别适用于直线形建筑物的水平位移监测(如直线形大坝等),其类型主要包括视准线、引张线、垂直和激光准直等。

(1) 视准线法所用设备普通、操作简便、费用少,曾经是土工建筑物普遍采用的变形监测方法之一。但是,该方法受多种因素的影响,如照准精度、大气折光等,操作不当时,误差不容易控制,精度就会受到明显的影响。因此,该方法近年来在大型工程中已较少采用。

(2) 引张线法是精密基准线测量的主要方法之一,广泛应用于各种工程测量。20 世纪 60 年代,该方法引入我国,并在我国大坝监测领域得到了广泛应用。用引张线方法测量水平位移,因其具有设备简单、测量方便、速度快、精度高、成本低等特点,在我国得到了广泛的应用,特别是在大坝监测中起着重要作用。早期的引张线仪由人工测读水平位移,随着自动化技术的发展,国内已有步进电机光电跟踪式引张线仪、电容感应式引张线仪、CCD 式引张线仪以及电磁感应式引张线仪等。目前,在工程中实际应用的引张线仪基本都实现了自动化观测,为此,取消了系统中的浮托装置,这样不但可以减少误差,提高引张线的综合精度,而且可以简化引张线的观测程序,便于其实现完全自动化观测。

(3) 垂线有两种形式:正垂线和倒垂线。正垂线一般用于建筑物各高程面处的水平位移监测、挠度观测和倾斜测量等。倒垂线大多用于岩层错动监测、挠度监测,或用做水平位移的基准点。目前,垂线监测大多采用遥测垂线坐标仪进行自动化观测,是水利工程变形监测的主要方法。

(4) 激光准直测量:按照测量原理可分为直接测量和衍射法准直测量两种,按照测量环境可分为大气激光准直测量和真空激光准直测量。在大气条件下,激光准直测量的精度一般为  $\pm(10^{-5} \sim 10^{-6})\text{m}$ ,影响其精度的主要原因是大气折光。在真空条件下,激光准直测量的精度可达  $\pm(10^{-7} \sim 10^{-8})\text{m}$ ,较大气激光准直有明显的提高,但其工程的造价和系统的维护费用



也相应地增高。目前,水利工程的变形监测主要采用衍射法激光准直测量,真空管道激光准直测量在我国的水利工程变形监测中也有许多成功的应用。近年来,真空激光准直系统有了新的发展——采用密封式激光点光源,利用光电耦合器件 CCD(面阵)作传感器,采用新型的波带板和真空泵自动循环冷却水装置等新措施和新技术,这将进一步提高系统的可靠性。

### 3. GPS 变形监测技术

GPS 是一种全新的现代空间定位技术,已在诸多领域逐步取代了常规光学和电子测量。特别是 20 世纪 90 年代,由于接收技术和数据处理技术的日臻完善,使得测量的速度和精度不断提高, GPS 在我国的变形监测领域中得到应用。GPS 自动化监测系统具有速度快、全天候观测、测点间无须通视、自动化程度高等优点,能对各监测点进行同步变形监测,并实现了数据采集、传输、处理、分析、显示、存储等的一体化和自动化,测量精度可达 0.1 mm。变形监测系统在硬件上主要分为一机一天线和一机多天线两种模式,这两种模式各有特点,前者的观测精度高、系统稳定可靠,后者在系统建设经费方面有一定的优势。例如:广东虎门大桥尝试安装了 GPS 实时动态变形监测系统;深圳的地王大厦的风力振动特性监测也采用了 GPS 进行监测。

### 4. 3D 激光扫描技术

3D 激光扫描技术是 20 世纪 90 年代中期出现的一项高新技术,是继 GPS 空间定位系统之后的又一项测绘技术新突破。它通过高速激光扫描测量的方法,大面积、高分辨率地快速获取被测对象表面的三维坐标数据,可以快速、大量、高精度地获取空间点位及其变化信息。

### 5. 摄影测量方法

在利用变形监测点监测变形体的变形特征时,由于测点的数量有限,有时难以反映变形体变形的细节和全貌,特征信息不够全面;而采用摄影测量方法可以全面采集变形体变形的特征信息具有快速、直观、全面的特点。摄影测量方法是在摄站对变形体进行摄影,然后通过内业数据处理得到变形监测点的坐标,比较不同时刻目标点的坐标差异而得到它们的位移。摄影测量方法已广泛应用于高边坡、滑坡等的监测工作。但该方法存在一定的缺陷,主要是测量的精度相对较低。

近几年发展起来的数字摄影测量和实时摄影测量为传统摄影测量技术在变形监测中的广泛应用开拓了非常广阔的前景。数字摄影测量是利用数字影像处理技术和数字影像匹配技术获得同名像点的坐标,然而计算对应物点的空间坐标,比较不同时刻目标点的坐标差异而得到它们的位移。

### 6. 光纤传感检测技术

光导纤维是以不同折射率的石英玻璃包层及石英玻璃细芯组合而成的一种新型纤维。它使光线的传播以全反射的形式进行,能将光和图像曲折传递到所需要的任意空间。光纤灵敏度相当高,其位移传感器能测出 0.01 mm 的位移量,温度传感器能测出 0.01 °C 的温度变化。光纤传感检测技术已应用于土木工程的位移、裂缝、应力、应变、温度、渗流等的监测。该技术具有以下几个优点:①将传感器和数据通道集为一体,便于组成遥测系统,实现在线分



布式检测；② 测量对象广泛，适于各种物理量的观测；③ 体积小、质量轻、非电连接、无机械活动件、不影响埋设点特性；④ 灵敏度高、可远距离测量；⑤ 耐水性、电绝缘好、耐腐蚀、抗电磁干扰；⑥ 频带宽，有利于超高速测量。因此，光纤传感器有很强的适应能力，尤其可以替代高雷区、强磁场区或潮湿地带的电子仪器，有着广泛的应用前景。

## 7. 卫星遥测技术

合成孔径雷达（SAR）是 20 世纪 50 年代末研制成功的一种微波传感器，也是微波传感器中发展最为迅速和有效的传感器之一。随着 SAR 技术的飞速发展，20 世纪 60 年代末出现了新兴的交叉学科——合成孔径雷达干涉技术 InSAR，它是 SAR 与射电天文学干涉测量技术的完美结合。该技术特别适于大面积的滑坡、崩塌、泥石流以及地裂缝、地面沉降等地质灾害的监测预报，精度可以达到 1 mm，是一项快速、经济的空间探测高新技术。差分干涉（Differential InSAR, D-InSAR）技术是在 InSAR 技术的基础上发展起来的，它以合成孔径雷达复数据提供的相位信息为信息源，可从包含目标区域地形和形变等信息的一幅或多幅干涉纹图中提取地面目标的微小形变信息，主要用于对 DEM 修测和精化、地壳形变监测、地震形变监测、地面沉降监测及滑坡监测等，监测精度可达 1 cm 甚至 1 mm。目前，随着对 SAR 技术研究热潮的掀起，InSAR 技术也逐渐走向成熟。但由于 InSAR 技术对大气误差、卫星轨道误差、地表状况以及时态不相关等因素非常敏感，这造成了该技术在地表形变探测应用中的困难。因此，GPS 与 InSAR 技术的结合也成了一种必然。采用 GPS-InSAR 合成技术将突破单一技术应用的局限，发挥其各自优势，极大地改善空间域和时间域的分辨能力。因此，该技术必将在地表形变监测方面展现出大范围覆盖与高精度的巨大潜力。

## 1.2.2 变形监测理论的研究进展

变形监测理论是在不断研究中发展的，目前正在进行的研究有：

### 1. 自动化监测技术

变形监测的自动化是监测工作的发展方向。自动化监测除了需要布设自动监测的传感器外，还要建立测量控制和数据传输的通信网络，以及进行数据采集、传输、管理、分析等。目前，常用的传感器有机械式、光敏式、电式（又分为电压式、电容式、电感式）等几种形式，精度各不相同，运用最多的是电式和磁式传感器。例如：广西大化大坝监测系统应用的变形遥测仪器均为差动电容感应式，精度为  $\pm(0.1\sim 0.2)$  mm，结构简单，可在高湿度环境下长期可靠地工作；新丰江大坝变形监测设备采用的是地震研究所研制的 EMD-S 型遥测垂线仪和 EMD-T 型引张线遥测仪，是用磁场差动法测量位移的二维传感器，它独到的电路和结构设计，使仪器具有良好的线性度、极小的横向位移影响，且抗磁、防雷、耐潮，有极好的长期稳定性和可靠性。

目前，大多数重大工程的主要监测工作都实现了自动化观测，这不仅提高了测量的速度，降低了测量作业的劳动强度，而且对实时监控建筑物的安全、提高测量精度等都有着重要的意义。

### 2. 监控模型研究

监控模型是安全监测数据分析的一种基本手段。目前普遍采用的监控模型主要有三种：





统计模型、确定性模型和混合模型，其中统计模型用得最多，确定性模型和混合模型用得相对较少。另外，基于新的数学处理方法和建模理论的新模型也在不断地发展和完善，如时间序列分析、系统辨识、模糊数学、突变论、混沌论及灰色系统理论等。但基于这些新理论所建立的模型大多还处于研究阶段，实际应用相对较少，其中最大的缺陷是物理成因解释的机理不够完善。因此，在许多场合其应用和普及受到限制。

### 3. 监控指标研究

监控指标是监测建筑物安全的重要指标，但其研究又是一项颇为复杂、迄今仍在继续的重大课题。建筑物制定监控指标后，只要将监测值与监控指标进行比较，若监测值小于监控指标，则是安全的；若监测值大于监控指标，则可能有安全问题，从而需立即寻找原因和采取相应措施，以便及时消除安全隐患。目前，制定监控指标的方法一般有两类，即基于小概率事件的置信区间法和基于反分析的结构分析法。这些方法虽在实践中发挥了一定的作用，但其理论体系还很不完善，因此，还需要进一步加深其理论研究。

### 4. 自动化数据处理系统研究

监测系统需要及时、准确地报告出变形体关键部位的变形情况。而位移变形监测又是一项长期性、重复性获取累积观测数据的工作，监测项目多，数据量庞杂。传统的依赖办公自动化软件对监测数据进行简单处理的方法，已经满足不了实际需求。因此，应积极开展编制自动化数据处理软件的研究，该软件应具有资料录入、计算分析、查询、数据更新、统计、图形绘制、报表打印等基本管理功能并能利用监测点的三维坐标，通过相应的算法分析拟合作出预报；同时，该系统能根据监测成果，建立预警机制，以便及时为决策部门提供情报，使决策部门作出最迅速的反应，避免造成不必要的损失。

### 5. 安全监控专家系统研究

专家系统（Expert System，ES）由人工智能的概念突破发展而来，是在某个特定领域内运用人类专家的丰富知识进行推理求解的计算机程序系统。它是基于知识的智能系统，主要包括知识库、综合数据库、推理机制、解释机制、人机接口和知识获取等功能模块。专家系统采用计算机技术来实现应用知识的推理过程，与传统程序有着本质的区别。作为人工智能的重要组成部分，专家系统近年来在许多领域的应用卓有成效。例如：近年来兴起的大坝安全综合评价专家系统就是在专家决策支持系统的基础上，加上综合推理机，形成了“一机四库”的完整体系。它着重于应用人类专家的启发性知识，用计算机来模拟专家对大坝安全所作出的综合评价（分析、解释、评判和决策）的推理过程。

近年来，将人工神经网络技术应用于专家系统中，成了又一研究热点。传统的专家系统致力于模拟人脑的逻辑思维，而神经网络则擅长于模拟人脑的形象思维，将这两者结合，建造出更为实用的混合专家系统，将是今后安全监控专家系统的发展方向之一。

## 1.2.3 变形监测技术和理论展望

（1）变形监测系统的设计与建立将与工程的设计与建设同步进行。监测系统不仅要为运