

Theory and Practice of Deformation Monitoring Analysis  
and Prediction for Engineering Constructions



# 工程变形监测 分析预报 的理论与实践

© 刘祖强 张正禄 邹启新 赵卫 郭再春 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 工程变形监测分析预报 的理论与实践

刘祖强 张正禄 邹启新 赵 卫 郭再春 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 简 介

本书紧密围绕工程的变形监测分析与预报这一主题，总结了作者 1988 年以来在工程的变形监测分析与预报领域理论研究和工程实践方面的最新成果，体现了密切结合工程实际和鲜明的应用性特点。全书共分 5 章，包括综述、变形监测新技术及应用、变形监测网优化设计和平差、变形分析模型与预测方法和工程的变形监测分析与预报。

本书可供从事各种工程如大坝、高边坡、高层建筑物、桥梁、隧道以及病险库治理工程等的变形监测、分析与预报的生产、科研和管理人员参考，也可作为高等院校测绘工程专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工程变形监测分析预报的理论与实践/刘祖强等著.  
北京:中国水利水电出版社,2008

ISBN 978-7-5084-5993-6

I. 工… II. 刘… III. 变形观测 IV. P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 164123 号

书 名	工程变形监测分析预报的理论与实践
作 者	刘祖强 张正禄 邹启新 赵卫 郭再春 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 22 印张 522 千字
版 次	2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	65.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

随着国民经济的持续、快速发展,各种大型工程建筑物(如水坝、桥梁、隧道、高层建筑物以及高速公路、铁路、城市地铁等)如雨后春笋般地涌现,这些建筑物在施工建设和运行管理过程中,由于受各种外因及其变化的影响,都会产生变形,一旦变形超出设计允许值,就可能遭到损伤甚至造成如大坝溃坝、桥梁垮塌等巨大灾害。由工程引起的灾害还有地面沉陷、崩塌、滑坡、泥石流或地震等,这些灾害给人类带来的损失是非常巨大的。所以,工程的变形监测分析与预报就显得尤为重要,这是一个永恒的主题。变形监测是基础,变形分析是手段,变形预报是目的。通过变形监测和分析,变形是可以预测预报的,预警也是可以实现的,但准确的预报特别是准确的短期预报又是十分困难的。工程的变形监测分析与预报涉及多学科交叉,测绘学是最重要的学科。

变形监测的意义主要表现在两个方面:首先是工程上的意义,确保工程安全;其次是科学上的意义,研究变形机理,为工程设计服务。

变形监测的内容包括水平位移、垂直位移、倾斜及裂缝观测等,称外部观测;对工程建筑物内部结构有关的如应力、应变、压力、渗流、渗压等观测,称内部观测;还要进行气温、气压、水位等观测。在进行变形监测数据处理时,须将各种观测资料结合起来分析。

变形监测就是采用专用的仪器和方法对变形体进行周期性或持续性的观测,变形分析和预报是对变形监测数据进行处理,对变形体的时空变形性态进行描述,对变形的发展态势进行预测、预警和预报。比如:长江水利委员会和地方科技人员通过10余年的艰苦调查研究和长年累月的大地测量变形监测工作,成功地预报了1985年6月12日凌晨3时45分至4时20分发生在湖北省秭归县境内长江西陵峡中新滩镇的大型滑坡,该滑坡的体积约3000余万 $\text{m}^3$ ,滑坡产生的块石、碎石及泥土将新滩镇全部摧毁。滑坡体前部的土石堵塞长江江面的 $1/3$ ,江中激起涌浪54m高,涌波及上下游共42km长的江段。由于预报及时,撤离措施果断有效,致使首当其冲的新滩镇457户居民1371人无1人伤亡。使一场毁灭性的地质灾害带来的经济损失和人员伤亡,减小到最低程度。这是滑坡变形监测分析预报工作最成功的案例。1980年6月3日

湖北省某磷矿突然发生了一场巨大的岩石崩塌。乱石块把磷矿的五层大楼掀倒、掩埋，死亡 307 人。其实在岩石崩塌前，就发现了山体裂缝，该矿曾对裂缝的发展情况进行了设点简易监测，虽掌握一些实际资料，但不重视分析监测资料，没有密切注意裂缝的发展趋势，因而不能正确及时预报。也是造成这次灾难性崩塌的主要教训之一。

本书紧密围绕工程的变形监测分析与预报这一主题，总结了作者 1988 年来在工程的变形监测分析与预报领域理论研究和工程实践方面的最新成果。在编撰成书时，采用了非传统、非系统方法。非传统表现在各章节既相对独立又具有整体性；非系统表现在对工程变形监测、分析与预报的理论方法和技术并非进行系统性的介绍。

全书共分 5 章：第 1 章综述，综述了水利工程的变形监测和大坝安全监测分析与预报；第 2 章变形监测新技术及应用，介绍了拱坝位移监测新导线法及试验研究、高边坡变形监测新技术、滑坡变形监测的测量机器人和 GPS 联合监测技术与方法（该成果获 2007 年湖北省科技进步三等奖和长江水利委员会科技进步一等奖）；第 3 章变形监测网优化设计和平差，介绍了基于观测值可靠性的工程控制网优化设计方法，监测网的灵敏度、可靠性分析，GPS 平面控制网的模拟设计计算方法、GPS 变形监测网与地面观测值混合平差模型以及多维粗差定位与定值等；第 4 章变形分析模型与预测方法，介绍了回归分析方法、时序分析方法、灰色系统理论、卡尔曼滤波、人工神经网络、小波分析、模糊聚类分析等分析、预报方法及应用；第 5 章工程的变形监测分析与预报，介绍了三峡工程变形监测及若干技术问题，施工期安全监测与信息施工实践，三峡工程库首区地震活动性断裂监测与分析。特别对三峡工程永久船闸建筑物和高边坡变形监测（该项目 2002 年获全国第八届优秀工程勘察金质奖）分析与预测进行了详细的描述。还介绍了三峡工程库区新滩滑坡、黄腊石滑坡和云阳宝塔滑坡的变形监测与分析。此外，还对葛洲坝工程三号船闸安全监测更新改造实施、清江高坝洲库区丹水撇洪渠边坡变形监测、宝钢引水库大坝水平位移监测以及高层建筑物深基坑工程和邻近建筑物变形监测与信息施工实践等。

本书采用合著的方式完成，除了主要撰写人刘祖强、张正禄、邹启新、赵卫、郭再春的研究成果外，个别地方还引用了邓跃进、马能武、文鸿雁、裴灼炎、张潇、叶青、石建舟等同志的研究成果，在此表示最诚挚的谢意。

由于著者水平所限，书中难免存在谬误之处，敬请读者斧正。

著者

2008 年 10 月 18 日于武汉

## 前 言

<b>1 综述</b> .....	1
1.1 水利工程的变形监测 .....	1
1.2 大坝安全监测分析与预报 .....	5
<b>2 变形监测新技术及应用</b> .....	11
2.1 拱坝位移监测新导线法及试验研究 .....	11
2.2 高边坡变形监测新技术及其应用 .....	18
2.3 滑坡变形的测量机器人和 GPS 联合监测技术与方法 .....	22
<b>3 变形监测网优化设计和平差</b> .....	82
3.1 基于观测值可靠性的工程控制网优化设计 .....	82
3.2 变形监测网的灵敏度分析 .....	90
3.3 观测值的灵敏度影响系数及其在监测网优化设计中的应用 .....	96
3.4 大型水利枢纽工程高精度控制网设计 .....	105
3.5 GPS 平面控制网的模拟设计计算方法及其应用 .....	109
3.6 精密测边网的可靠性分析与迭代权平差法 .....	113
3.7 GPS 变形监测网与地面观测值混合平差模型 .....	117
3.8 多维粗差定位与定值的算法研究及实现 .....	120
<b>4 变形分析模型与预测方法</b> .....	126
4.1 工程变形态势的组合模型与预测 .....	126
4.2 变形体的动态组合模型 GM+ARMA .....	131
4.3 变形体的稳定性及其定量分析方法 .....	135
4.4 工程高边坡稳定性评价的信息量法 .....	141
4.5 大坝变形统计模型因子选择方法 .....	147
4.6 变形模式的拓扑约束识别 .....	150
4.7 模糊聚类分析及应用 .....	156
4.8 非线性拟合模型线性化后的参数估计 .....	160
4.9 非线性动态系统自组织建模的组合方法 .....	164
4.10 自适应性卡尔曼滤波模型及应用 .....	168
4.11 基于小波分析的卡尔曼滤波动态变形模型 .....	172
4.12 小波分析与傅立叶变换相结合及应用 .....	179

4.13	边坡变形分析与预报的模糊人工神经网络方法	182
4.14	基于模拟退火法的 BP 神经网络模型及应用	189
4.15	大坝安全监测动态系统灰色模型	192
4.16	变形体变形的灰色特征及其性态的灰色评估	197
4.17	变形趋势的灰色模型及其预测灰色平面	202
4.18	滑坡破坏的灰色预测	207
4.19	大坝变形灰色季节模型预测	213
4.20	土石坝垂直位移预报模型	216
4.21	大坝变形失稳的尖点突变模型	221
4.22	模拟高边坡动力学运动特性的滑块模型	226
4.23	系统辨识技术在大坝变形分析中的应用	230
4.24	滑坡变形的三维可视化研究	236
<b>5</b>	<b>工程的变形监测分析与预报</b>	<b>240</b>
5.1	三峡工程变形监测及若干技术问题	240
5.2	三峡工程施工期变形监测与信息施工实践	245
5.3	三峡工程库首区地震活动性断裂监测与分析	250
5.4	三峡工程永久船闸建筑物变形特性分析	257
5.5	三峡工程永久船闸高边坡岩体变形声发射监测	265
5.6	三峡工程永久船闸高边坡表层岩体变形监测与分析	269
5.7	三峡工程永久船闸高边坡深层岩体变形监测与空间模型预测	277
5.8	三峡工程永久船闸直立坡岩体变形监测及变形性态分析	283
5.9	三峡工程永久船闸有水调试期变形量级和规律分析	289
5.10	三峡工程永久船闸建筑物在蓄水期的垂直变形分布模型分析	294
5.11	三峡工程对外交通莲沱特大桥施工期沉降监测	298
5.12	三峡工程近坝库岸新滩滑坡前缘深层蠕变灰色处理	302
5.13	三峡工程近坝库岸黄腊石滑坡监测系统及蠕变分析	306
5.14	三峡工程库区云阳宝塔滑坡变形模式识别与分析	309
5.15	葛洲坝三号船闸安全监测更新改造及变形规律初步分析	315
5.16	清江高坝洲库区丹水撤洪渠边坡变形监测分析与预报	322
5.17	宝钢引水库大坝水平位移监测和分析	327
5.18	高层建筑物深基坑工程变形监测与信息化施工	333
	<b>参考文献</b>	<b>338</b>

# 1

## 综 述

### 1.1 水利工程的变形监测

#### 1.1.1 工程概况

三峡水利枢纽工程，具有防洪、发电、航运等综合效益，以其规模宏大、技术复杂、综合效益显著而为世人关注。枢纽由三大部分组成：大坝及电站厂房、通航建筑物、右岸茅坪溪防护坝。自1993年开工，至2009年竣工，工程施工总工期历时17年。

三峡大坝坝型为混凝土重力坝，坝址基岩主要为闪云斜长花岗岩，岩石坚硬完整，力学强度高，透水性低。大坝自左非溢流坝段至右非溢流坝段总长2309.47m，坝顶高程为吴淞高程185m，最大坝高181m，大坝总混凝土工程量约1600万 $m^3$ 。三峡工程水电站装机26台，总功率1820万kW。三峡工程通航建筑物包括永久船闸、垂直升船机、临时船闸，布置于长江左岸，都是在深切开挖的花岗岩山体中修建而成。永久船闸是目前世界上规模最大、水头最高的多级船闸，年单向通过能力为5000万t，总水头113m，采用双线连续5级船闸方案。永久船闸人工边坡断面形态为下陡上宽的喇叭形（W形），一般坡高70~120m，最大坡高170m，其中下部（闸面以下）直立坡高50~70m；在南、北两侧边坡岩体内不同高程各布置了7层排水洞，各层排水洞距坡面的水平距离为30~45m。茅坪溪防护坝为沥青混凝土心墙（两岸岸坡段为混凝土心墙）的土石坝，坝顶高程与大坝同高，主坝顶长1062m，最大坝高104m。

三峡工程安全监测系统是一个为全面、准确地掌握工程各建筑物（含基础与边坡岩体）及近坝区岸坡在施工、蓄水及运行过程中的性状变化和安全状态服务的结构复杂的大系统，变形监测系统是其重要组成部分。本节介绍了现阶段在三峡工程变形监测中应用的各种技术或手段，这对于其它水利水电工程、大型人工边坡工程的变形监测具有重要的指导意义。

#### 1.1.2 监测项目

针对工程安全的制约因素和工程设计的要求，恰当地确定监测项目及其测点数量，为进行工程建筑物安全程度综合评价、进行反馈分析提供必要和足够的实测资料。三峡工程变形监测系统的仪器监测项目分为变形、变形监测网、近坝区地壳形变与滑坡监测三大项；此外，还有巡视检查项目。



(1) 变形。变形是常规监测项目中效应量之一，其监测内容包括：①水平位移；②垂直位移；③坝体挠度；④坝基倾斜；⑤接缝和裂缝开合度。以工作基点或某一测点为参照点时，获得相对变形量；以基准点为参照点时，获得绝对位移量。三峡工程变形监测包含高边坡、建筑物及基础两大部分；其中高边坡变形监测又分为表层岩体变形监测、深层（排水洞）岩体变形监测。

(2) 变形监测网。在三峡工程中将变形监测网列入专项监测项目。它包括：①水平位移监测网（亦称平面监测网）。②垂直位移监测网（亦称高程监测网）。用于检测工作基点的稳定状态和测量近坝区岩体的绝对变形量。三峡工程变形监测采取从整体到局部，逐层发展的布网方案，即全网—简网—最简网。全网是第1层次网，它为整个枢纽变形监测提供统一基准；简网与最简网为分部、分项工程提供变形监测基准或工作基准，部分简网点或最简网点的位置变化亦代表该部位岩体的位移。

(3) 近坝区地壳形变监测与滑坡监测。这两项属于三峡工程近坝区（秭归县以下）地质环境监测范畴。地壳形变监测主要是库盆沉降、大断裂定点监测；库首区滑坡监测现阶段未实施。库盆沉降监测采用大面积精密水准测量的方法，大断裂定点监测主要采用布置三维监测网、短基线、短水准等测量方法，本节不赘述。

### 1.1.3 变形监测

围绕三峡工程变形监测项目，应用各种不同的测量方法或手段对其实施观测。对于这些测量方法或手段，要求精确、及时、可靠，操作简便，可以互相检校，能够抗干扰和可更换；关键或重要部位的监测设备应具有既能人工测量，又能自动测量的双效性；另外，变形监测所应用的仪表设备须有合理的性能价格比。

#### 1.1.3.1 监测方法与设施

##### (1) 水平位移监测。

1) 边角网与边角交会。三峡工程水平位移监测全网、简网均为一等边角网，其设计精度为位移量中误差不大于 $\pm 2\text{mm}$ ；水平位移监测最简网为一等测边网，相对于简网点，其位移量中误差不大于 $\pm 2\text{mm}$ 。测边（边角）交会是监测人工边坡表层岩体水平位移的主要手段。变形监测网点和监测点标志均采用强制归心混凝土观测墩。边角网和边角交会观测执行的主要技术规范是SDJ336—89《混凝土大坝安全监测技术规范（试行）》、GB/T16818—1997《中、短程光电测距规范》。

2) 正垂线、倒垂线。三峡工程混凝土建筑物及基础变形监测中大量应用正、倒垂线来监测其顺水流方向和垂直于水流方向的二维变形。方法可靠，操作简便，量测精度高，经济实用。

3) 引张线。大坝和永久船闸闸墙水平位移监测的主要量测方法。它以其两端结合布置的倒垂线（或正、倒垂线联合）作为工作基准。直观简便，精度较高。

4) 激光准直测量。在三峡大坝的坝顶和基础各布置一套真空激光位移测量系统，其中坝顶一套全长2005m，设测点99个。真空激光位移测量是一项新技术，比较复杂，造价高昂。目前有关方面已安排在葛洲坝坝顶廊道进行试验研究，三峡工程现场并未开始实施。

5) 视准线。视准线监测水平位移精度相对较低，主要用以监测右岸茅坪溪防护土石

坝的坝面水平位移。观测通常采用经纬仪小角法。

6) 精密量距。利用专门的精密量距带尺直接测量两点间距离, 距离的变化反映出两点间相对水平位移。

7) 伸缩仪。伸缩仪主要用于监测高边坡深层岩体(排水洞监测支洞)的水平位移, 也利用其监测大坝相邻坝块间的伸缩变形。由于伸缩仪在安装初期钢丝存在徐变, 所以它往往与精密量距结合布设, 通过精密量距对其直接观测结果施加改正。

8) 钻孔倾斜仪。应用活动式钻孔倾斜仪监测岩体深部重要断层、裂隙的错动。

9) 水平向多点位移计。针对永久船闸高边坡变形, 利用水平向多点位移计了解爆破开挖对岩体松弛变形的影响。

## (2) 垂直位移监测。

1) 精密水准测量。精密水准测量是监测枢纽各建筑物及其基础、人工高边坡、近坝区岩体垂直位移的最广泛、最主要的方法。基准点(包括校核基准点)通常是设置在远离大坝的下游稳定区域的双金属标; 工作基点通常为离建筑物较近或在基础部位设置的深埋双金属标或测温钢管标。软弱夹层等地质缺陷监测也是通过设置钢管标组利用精密水准来监测。三峡工程永久性建筑物采用一等水准测量精度施测垂直位移。

2) 液体静力水准测量。液体静力水准测量主要用于建筑物基础的垂直位移监测, 其量测精度高, 在基础廊道内利于保护。由于液体静力水准测量测得的结果只是相对垂直位移, 需要与精密水准测量(配合竖直传高)联测来获得绝对位移量。

3) 竖直传高仪测量。竖直传高仪测量是高程传递方式的一种。其基本原理是采用标准尺测定竖直高度(高差), 采用两种线膨胀系数相差较大的金属丝进行高差差分观测, 测定其变化量, 根据变化量求算各次高程传递时的竖直高度(高差), 同时根据两种不同线膨胀系数的钢丝的变化差值进行温度修正。竖直传高仪不但测量精度高, 而且操作简便, 省时省力, 较之传统水准测量方法传递高程大大提高工效。在三峡大坝坝面到坝腰、坝基以及永久船闸闸面到基础均设置了多套竖直传高仪器。

4) 竖向多点位移计测量。是测量岩体深部不同深度的垂直位移, 主要用于船闸高边坡变形监测。

## (3) 挠度倾斜和转动监测。

1) 挠度倾斜监测: 正垂线。采用一线多测站式, 目的是便于实现自动化观测。

2) 转动监测: 精密水准与静力水准、倾角计(用在高边坡坡面)。

(4) 裂缝和接缝监测。主要用测缝计。

(5) 其它监测。在三峡工程变形监测系统中, 现阶段主要应用一些稳妥可靠的成熟技术或手段, 同时考虑到易维护、易恢复、经济性等要求。对于 GPS、测地机器人(电子测距仪)等新技术、新方法的应用, 有关方面正在进行研究。

### 1.1.3.2 监测仪器与数据采集

#### (1) 监测仪器。

##### 1) 大地测量仪器。

① 测距仪: 主要选用 ME5000 激光测距仪(标称精度  $0.2\text{mm}+0.2\text{ppm}$ )、DI2002 红外测距仪(标称精度  $1\text{mm}+1\text{ppm}$ )等, 照准棱镜与测距仪配套进口。

② 经纬仪：主要选用 J1 级 WILD T3 光学经纬仪、WILD T2000S 电子经纬仪等。

③ 水准仪及水准尺：主要选用 S05 级 NI007 自动安平水准仪、Leica NA2+GPM3 水准仪等；水准尺主要是与水准仪同步进口的 3m、2m 线条式因瓦尺。

2) 专用量测仪器。

① 垂线坐标仪：CG—2A、CG—3 型光学坐标仪（国家地震局地震仪器厂），RxTx 遥测坐标仪（加拿大洛克泰斯特公司）、VDD2ET 遥测坐标仪（瑞士胡根伯格公司）、STC—100 遥测坐标仪（南京达捷公司）、EMD—S 遥测坐标仪（国家地震局地震仪器厂）。

② 引张线读数仪：EX—II 型引张线仪（国家地震局地震仪器厂）。

③ 静力水准仪：JSY—1 型液体静力水准仪（国家地震局地震仪器厂），该仪器既可目视读数，亦可自动观测。

④ 竖直传高仪：竖直传高仪（TH—III、TH—IV）是长江水利委员会综合勘测局工程测量与安全监测中心开发研究的新型仪器。它一方面可以传递高程；另一方面可以直接量测建筑物的垂直伸缩变形；既可人工测读，也可安装传感器实现自动化。

3) 数据采集控制器。控制遥测垂线坐标仪等的采集控制器为：2380/80（进口）及 MCU—2M、IDTS—MC（国产）。

(2) 数据采集。

数据采集分为人工采集、半自动采集、自动采集三种方式。

1) 人工采集。测量和数据记录均由人工完成。如精密量距、引张线观测、垂线和静力水准人工观测等。

2) 半自动采集。

① 显示读数，人工记录。主要是应力、温度监测仪表，在变形监测方面此种方式较少。

② 人工测量，电脑或记录器记录。如边长测量、水准测量等，施工期监测大量采用此方式。

3) 自动采集。借助测量控制单元（MCU）控制测量仪表按规定的频次直读原始数据并通过传输设备输入电子计算机，达到全自动化水平。由于三峡工程正在施工期，整个三峡安全监测系统还未完全建立。目前，只是对永久船闸建筑物及基础的所有正、倒垂线测点实现了现地原始数据自动采集。在施工后期和运行期，一些关键或重要部位的监测仪表将逐步实现观测自动化。

### 1.1.3.3 监测成果处理

(1) 数据预处理与平差。大地测量数据预处理与平差主要采用两套软件系统，一套为长江水利委员会综合勘测局开发，一套为武汉大学测绘学院开发。这两套平差软件均具有功能齐全，通用性强，数学公式及处理方法严密，输出成果规范化、表格化等特（优）点。其中，长江水利委员会综合勘测局开发的控制网观测数据预处理与平差软件系统（DOS 版本）作为“高精度大地测量监测自动化系统研究”成果的主要组成部分曾获 1997 年国家科学技术进步三等奖。

(2) 位移量计算。按照《混凝土大坝安全监测技术规范（试行）》（SDJ 336—89）中

有关变形量正负号的规定要求，各实施单位自行编制程序，计算当次位移、累计位移、成果数据报表（业主规定的格式）等。

(3) 工作基点位移修正。由于监测精度、速度（频次）的需要，工作基点通常布置在工程建筑物附近，它只是在一定的时间段内相对固定，其自身的稳定性要由基准网点来检测。三峡工程中，通过一年一次的水平、垂直位移监测全/简网的观测结果，计算相邻两次简网点的坐标差或高程差，对其按时间进行线性内插，得出这一年中简网点的坐标或高程在每个月的内插值，再利用内插值作为最简网点与监测点观测数据处理的起算数据，重算监测点的坐标、高程，最后重算得到的监测点位移量即为修正后的位移量。

#### 1.1.4 小结

举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程，功在当代，利及子孙。工程监测具有涵盖面广、监测点多、观测量大、施工期长等特点外，人工开挖大型边坡的稳定性也是一项重大技术难题；对于每一个工程建设者而言，既是机遇，也是挑战。通过对三峡工程的变形监测，有以下几个方面的认识。

(1) 设计思想的正确性、先进性。突出重点，兼顾全面，统一规划，分期实施的监测原则，合理地反映了确保各类建筑物在施工期、分期蓄水期和运行期安全的监测目的。将监测部位（断面）划分为关键、重要和一般 3 个层次，既能快速、量化地了解敏感部位的工作状态，又能宏观、全面地掌握整个工程的运行性状。从整体到局部、逐层发展的监测网布网方案，不断使整个枢纽工程的变形监测基准得到了联系和统一，而且保证了各分部分项工程具有足够的变形监测精度。

(2) 应用方法的可靠性、多样性。应用不同的测量方法或手段监测不同建筑物或建筑物不同部位的变形效应量，目的明确，针对性强。大量采用传统的变形监测方法，如边角网、边角交会、水准测量、垂线、引张线等，操作简便，稳妥可靠，精度高而成本较低；同时，一些先进的、新的测量技术如遥测垂线坐标仪、真空激光位移测量、GPS 等也在积极的应用或应用研究之中。

(3) 实测成果的准确性、有效性。已经取得的监测资料，特别是自 1994 年底开始的通航建筑物开挖边坡变形监测资料序列，监测精度相当高，不仅满足了《混凝土大坝安全监测技术规范（试行）》（SDJ 336—89）的变形监测 $\pm 2\text{mm}$ 的精度要求，而且大部分测点的水平、垂直位移监测精度在 $\pm 1\text{mm}$ 以内。三峡高边坡变形监测，较全面、系统地反映出边坡的变形过程全貌及进行动态分析的资料，为认识边坡的性状、判断（或验证设计）边坡的整体和局部稳定性提供了非常可靠的资料，为边坡的稳定性评价提供了重要依据。随着工程各部位变形监测的不断深入和积累，将为工程分期蓄水期和运行期的安全起到有效的监控作用。

## 1.2 大坝安全监测分析与预报

在所有工程建筑物的安全监测中，大坝的安全监测是最为重要和最被重视的。我国有 86000 多座大坝，大中型大坝达 3000 多座，是世界上大坝最多的国家。国家对大坝安全非常重视，成立有大坝安全管理中心，大坝安全管理纳入了法制轨道，制定了一系列大坝安全法规性文件。大坝安全监测、分析和预报是国际大坝会议讨论的焦点。本节从大

地与工程测量学的角度论述大坝安全监测、分析与预报的技术和方法，旨在加强多学科间的交流与合作。

### 1.2.1 大坝安全监测技术

大坝安全监测可分为外部观测和内部观测两大类型，主要是要研制各种专用监测仪器，并使用一些传统的和现代的大地测量仪器，动态地获取大坝的性态资料，以便作出安全评价。它涉及自动控制、精密机械、光电、微电子、计算机、传感和通信等技术，大坝安全监测技术发展的特点可概括为：自动化、智能化、高精度、高可靠性、实时、连续、遥控、遥测和网络化。

#### 1.2.1.1 外部观测

外部观测主要是从整体和局部监测大坝所处环境、大坝本身及局部位置随时间的变化，确定测点在某一时刻的空间位置或特定方向的位移。外部观测项目主要包括以下几个方面。

(1) 大坝变形监测网的周期观测。主要采用大地测量方法，用传统或现代的测角测距仪器、光学或电子水准仪以及全球定位系统（GPS）等进行周期性测量。监测网要有足够的多余观测，需进行严密的数据处理，获取网点的一维、二维、三维坐标。变形监测网的布置、优化设计和数据处理是该项观测的重点。其目的在于提供各种监测资料的几何基准，获取监测点相对于基准的绝对变形。

(2) 基准线观测。包括由正锤、倒锤构成垂直基准线，用垂线坐标仪测量位移特别是垂向偏距；由激光或真空激光构成的准直线，采用光电探测器、波带板或 CCD 传感器等测量沿激光光路上各测点的垂向位移；用金属丝或尼龙丝构成引张线，测量沿线测点的偏移量。若与外部观测的基准点相联系，可得各测点的在大坝坐标系各坐标轴轴线方向上的位移量。上述基准线均布置在坝内，已实现非接触遥测的数据采集自动化。在坝顶沿坝轴线用视准线法布置基准线，采用测小角法或活动标牌法测量大坝水平位移的方法，对大中型大坝已很少采用。

(3) 坝内各高程面上的垂直位移观测。主要采用几何水准测量方法或液体静力水准测量方法，后者已实现自动化观测，并解决了两容器之间高差较大情况下的测量。

(4) 典型项目观测。如大坝两岸边坡稳定性观测，靠近大坝的上下游岸坡的滑坡监测等，除上述有关方法外，还有近景摄影测量方法，以及采用测量机器人进行周期观测或持续性自动遥测。

外部观测还包括对大坝特定部位用挠度计或电平仪测量挠度和用测倾仪测量倾斜值。

#### 1.2.1.2 内部观测

内部观测主要是通过埋设在大坝内部特定部位的仪器，如应变计、测缝计、裂缝仪、渗压计、扬压力计、测压管、渗流量仪、温度计等，对大坝的应力应变、裂缝、渗流渗压以及温度等进行持续自动化观测，如差动电阻式仪器（卡尔逊仪器）和弦式仪器广泛地用于混凝土坝的温度、应力应变、渗压等监测。根据实测应变计算坝体内部应力，如拱坝的径向应力、拱向应力和梁向应力等，看是否有较大的拉应力存在，对于大坝的安全评判十分重要。基于 Fabry-Perot 的光纤传感技术用于应变、渗压、温度和裂缝测量，具有许多传统传感器无法替代的优点，且可布设成分布式网络，在大坝内部观测中有广阔的应用

前景。

### 1.2.1.3 其它观测

与外部观测和内部观测有关的其它观测还包括用水位计测量大坝的上下游水位、溢流堰水位，用雨量计测量降水量，用温度计测大气干湿温度等。

## 1.2.2 大坝变形分析与预报

对大坝的安全简明地说：监测是基础，分析是手段，预报是目的。监测涉及许多新技术的应用，分析与预报则涉及到多学科交叉的许多方法和理论。针对大坝变形，现将分析与预报方法和有关理论归纳于下，仅供同行和邻行专家的参考。

### 1.2.2.1 变形监测资料预处理

包括对于用各种方法获取的观测值作完整性、可靠性检查，进行粗差剔除，离群观测值处理，对时间序列作等间隔插补，绘制变形过程曲线，进行趋势分析，将经过予处理后的观测值入库管理。

### 1.2.2.2 监测网数据处理

对于监测网的数据处理属于变形的几何分析范畴：包括确定相对或绝对变形量的大小、几何分布和变化规律。变形监测网一般由参考网和相对网组成，对于监测网周期观测数据处理，主要是确定稳定点，估计变形点相对于稳定点（或基准）的变形。对于零期和一期观测，多采用秩亏自由网平差或拟稳平差法作变形分析，一旦确定存在稳定点，则仍以稳定点为基准进行约束平差为宜。周期观测点场稳定性的统计检验与判别，通常采用平均间隙法和最大间隙法。对于监测滑坡体的周期观测网，在获取到各期监测点的位移值后，可采用聚类分析法进行变形模式的拓扑约束识别，自动划分变形块体和估计各块体的变形模型参数。

### 1.2.2.3 回归分析法

取变形（称效应量，如各种位移值）为因变量，环境量（称影响因子，如水压、温度等）为自变量，根据数理统计理论建立多元线性回归模型，用逐步回归法可得到效应量与环境量之间的函数模型，用这种方法可作变形的物理解释和变形预报。因为它是一种统计分析方法，需要效应量和环境量具有较长且一致性较好的观测值序列。在回归分析法中，当环境量之间相关性较大，可采用岭回归分析；如果考虑测点上有多个效应量，如三向垂线坐标仪、双向引线线仪，二向、三向测缝计的观测值序列，则可采用偏回归模型，该模型具有多元线性回归分析、相关分析和主成分分析的功能，在某些情况下优于一般的逐步线性回归模型。

### 1.2.2.4 时间序列法

大坝变形观测中，在测点上的许多效应量如用垂线坐标仪、引张线仪、真空激光准直系统、液体静力水准测量所获取的观测量都组成一个离散的随机时间序列，因此，可以采用时间序列分析理论与方法，建立  $p$  阶自回归  $q$  阶滑动平均模型 ARMA ( $p, q$ )。一般认为采用动态数据系统 (Dynamic Data System) 法或趋势函数模型 + ARMA 模型的组合建模法较好，前者把建模作为寻求随机动态系统表达式的过程来处理，而后者是将非平稳相关时序转化为平稳时序，模型参数聚集了系统输出的特征和状态，可对变形进行解释和预报。若顾及粗差的影响，可引入稳健时间序列分析法建模。

对于小数据量的时间序列，可采用灰色系统理论建模，通过对原始数列采用累加生成法变成生成数列，可以减弱随机性，增强规律性。在组合建模中，也可以通过建立灰微分方程提取变形的趋势项。在时序分析中，一般是针对单测点，若顾及各测点间的相关性进行多点的关联变形分析，则可能取得更好的效果。

#### 1.2.2.5 频谱分析法

对于具有周期性变化的变形时间序列（大坝的水平位移一般都具有周期性），可采用傅立叶（Fourier）变换将时域信息转到频域进行分析，通过计算各谐波频率的振幅，找出最大振幅所对应的主频，可揭示变形的变化周期。若将测点的变形作为输出，与测点有关的环境量作为输入，通过对相干函数、频率响应函数和响应谱函数进行估计，可以分析输入输出之间的相关性，进行变形的物理解释，确定输入的贡献和影响变形的主要因子。

#### 1.2.2.6 卡尔曼滤波法

将变形体视为一个动态系统，系统的状态可用卡尔曼滤波模型即状态方程和观测方程描述，状态方程中若含监测点的位置、速率和加速度等状态向量参数，则为典型的运动模型。这种模型特别适合滑坡监测数据的动态处理，也可用于静态点场、似静态点场（如变形监测网）在各周期观测中显著性变形点的检验识别。该法的优点是有严密的递推算法，不需要保留使用过的观测值序列，而且可把模型的参数估计和预报结合在一起。该法是一种变形的动态几何分析方法。应用时需注意初始状态向量及其协方差阵以及动态噪声向量协方差阵的确定，采用自适应卡尔曼滤波可较好地解决后一问题。

#### 1.2.2.7 有限元法

是一种采用确定函数模型直接求解变形的具有先验性质的方法，属于确定函数法，它不需要作任何变形监测。将混凝土大坝按一定规则划分为很多计算单元，根据材料的物理力学参数（如弹性模量、泊松比、内摩擦角、内聚力以及容重等），建立荷载与变形之间的函数关系，在边界条件下，通过解算有限元微分方程，可得到有限元结点上的变形。计算的变形值与单元划分、函数模型和物理力学参数选取有关，假设性较大，同时，未考虑外界因子的随机影响，因此，用该法所计算的变形仅作参考。如果计算的变形值与实测值有较大的差异，往往需要对模型和参数进行修改并进行迭代计算。若根据实测变形值采用确定性函数反求变形体材料的物理力学参数，则称为反演分析法。反演分析法一般与有限元法联合使用。

#### 1.2.2.8 人工神经网络法

大坝变形与影响因子之间是一种非线性、非确定性的复杂关系，模糊人工神经网络法将生物特征用到工程中，用计算机解决大数据量情况下的学习、识别、控制和预报等问题，是新近发展起来的一种行之有效的方法，对于具有大量监测资料的大坝安全分析与预报尤其适合。以影响因子作为神经网络的输入层，以变形量作为输出层，中间为隐含层的三层反传（Back Propagation）模型（称BP网络模型）最为成熟，网络拓扑结构（每层特别是隐含层的节点数确定）、反传训练算法、初始权选取和权值调整、步长和动量系数选择、训练样本质量、训练收敛标准等是重要的研究内容。此外，将小波分析与人工神经网络相结合的小波神经网络组合预报方法，将人工神经网络与专家系统相结合建立大坝变形、预报的神经网络专家系统也极具应用前景。

### 1.2.2.9 小波分析法

小波理论作为多学科交叉的结晶在科研和工程中被广为研讨和应用。小波变换被誉为“数学显微镜”，它能从时频域的局部信号中有效地提取信息。利用离散小波变换对变形观测数据进行分解和重构，可有效地分离误差，能更好地反映局部变形特征和整体变形趋势。与傅立叶变换相似，小波变换能探测周期性的变形。将小波用于动态变形分析，可构造基于小波多分辨卡尔曼滤波模型。将小波的多分辨分析和人工神经网络的学习逼近能力相结合，建立小波神经网络组合预报模型，可用于线性和非线性系统的变形预报。

### 1.2.2.10 系统论方法

变形体是一个复杂的系统，是一个多维、多层的灰箱或黑箱结构，具有非线性、耗散性、随机性、外界干扰不确定性、对初始状态敏感性和长期行为混沌性等特点。系统论方法包括两种建模方法，一种是输入—输出模型法，前述的回归分析法、时间序列分析法、卡尔曼滤波法和人工神经网络法都属于输入—输出模型法；另一种是动力学方程法，该法与有限元法中的确定函数法相似，系根据系统运动的物理规律建立确定的微分方程来描述系统的运动。但对动力学方程不是通过有限元法求解，而是在对系统受力和变形认识的基础上，用低阶、简化的在数学上可求解和可分析的模型来模拟变形过程，例如用弹簧滑块模型模拟边坡粘滑过程，用单滑块模型模拟大坝变形过程，用尖点突变模型解释大坝失稳机理等；也可根据监测资料反演变形体的非线性动力学方程。对动力学方程的解的研究是系统论方法的核心，为此引入了许多与动力系统和与变形分析、预报密切相关的基本概念：状态空间或相空间（称解空间）、相点、相轨线、吸引子、相体积、李亚普诺夫指数和柯尔莫哥洛夫熵等。相点代表状态向量在某一时刻的解；相轨线代表相点运动的迹线；吸引子代表系统的一种稳定运动状态，它可以是一个稳定的相点位、环或环面，也可以是相空间的一个有限区域，对于局部不稳定的非线性系统，将出现奇怪吸引子，表示系统为混沌状态；李亚普诺夫指数描述系统对于初始条件的敏感特征，根据其符号可以判断吸引子的类型以及相轨线是发散的还是收敛的；柯尔莫哥洛夫熵则是系统不确定性的量度，由它可导出系统变形平均可预报的时间尺度。对变形观测的时间序列进行相空间重构，并按一定的算法计算吸引子的关联维数、柯尔莫哥洛夫熵和李亚普诺夫指数等，可在整体上定性地认识变形的规律。

系统论方法还涉及变形体运动稳定性的研究，这种稳定性在数学上可转化为微分方程稳定性的研究，主要采用李亚普诺夫提出的判别方法。

变形受确定性和随机性两部分的联合作用，其演化过程可用一个随机扩展过程如伊藤随机过程来描述，利用随机过程的平均时间来进行变形的随机预报，仅依赖确定性模型进行稳定性分析和变形预报更为合理。

系统论方法涉及许多非线性科学学科的知识，如系统论、控制论、信息论、突变论、协同论、分形、混沌理论、耗散结构等。上述理论远不是测量工作者所能掌握的，将系统论方法与变形分析与预报相结合的研究只是初步的，希望有更多的青年学者加入到这一交叉领域的研究中来。

## 1.2.3 大坝安全监测分析与预报信息系统

大坝安全监测获取的海量数据需要采用数据库技术进行管理，变形分析和灾害预报需



要采用各种模型和方法进行处理，对处理的结果需要进行综合分析、评价和决策。如果不对各类观测资料进行及时（最好是实时）处理，不对处理成果进行及时分析，则不可能监控和指导大坝的安全运行，若不能及时发现隐患，则可能会造成重大损失。因此，建立大坝安全监测、分析与预报综合信息具有非常重要的意义。系统总体设计主要应包括：总控部分、输入、输出系统、数据库及管理系统、模型库（或方法库）及管理系统、应用程序库及管理系统、知识库及管理系统、综合分析推理系统、图形图像库及管理系统、多库协同器等。系统的数据管理核心是一个分布式数据库，系统的数据处理灵魂是各种数学模型和程序化处理，系统的安全评价和决策支持是基于知识库的专家系统，灾害预报和三维可视化采用仿真与虚拟现实技术，而整个系统则采用分级管理或网络管理模式。

要将前述的各种变形分析与预报方法以程序的形式实现并放到综合信息系统，再加上专家系统的实现及其与变形分析与预报相结合，从原始数据、生成数据和处理结果中去挖掘和发现知识，对于同一组数据采用不同方法处理，对结果的比较分析和评价等无疑是一件相当困难的事。对于一个大坝来说，需要实现数据获取的自动化、数据处理的模型化、分析评判的智能化、图表和结果输出的可视化、数据传输和管理的网络化。目前，国内已开展有很多这方面的研究，如大坝安全监测自动化系统、大坝安全综合评价专家系统、大坝安全评价决策支持系统等。但离上述系统设计目标还有一定距离，且未达到实用化的程度。建立一个功能齐全、实用性强的信息系统需要借鉴国内外的经验和教训，进行周密分析，细致调研，精心设计，联合多学科人员，采用生产管理单位、科研院所、高等学校和公司相结合的模式进行持续性的研发，尽量采用成熟的平台和方法，将最新最好的研究成果转化为产品。研发中应注意系统的先进性和可扩展性，使研发应用从简单到复杂，从单功能到多功能，从专用到通用不断升级。