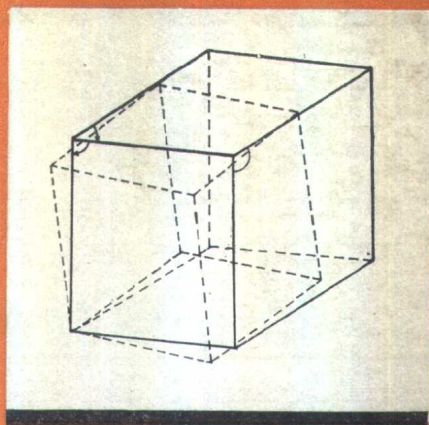


陈永奇 著



变形观测数据处理

测绘出版社

变形观测数据处理

陈永奇 著

测绘出版社

本书系统地讨论了变形观测数据处理的理论和方法，重点是变形的几何分析和物理解释。书中理论研究和实际应用并重。实例的选择兼顾到普遍性和先进性。

本书可作为测绘高等学校研究生和高年级学生的教学参考书，也可供测量工作者、科研人员以及其它专业的有关人员参考。

变 形 观 测 数 据 处 理

、 陈永奇 著

*

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

*

开本 787×1092 1/32·印张 16.125·字数 355千字

1988年10月第一版·1988年10月第一次印刷

印数 0.001—1,500册·定价 8.50元

ISBN 7-5030-0129-1/P·53

前 言

变形观测是测量工程的一项重要内容，与其它相关学科（例如地球物理，土木工程，岩土力学等）有紧密的联系，它正在向边缘学科的方向发展。近几年来，人们除了继续重视发展新的观测方法、手段和仪器外，越来越注意变形观测分析方法的研究。国际测量师联合会（FIG）于1978年成立了“变形观测分析专门委员会”，目的是要提出变形观测数据处理的方法和分析过程，同时促进测量工作者与其它学科专家在这个领域中的合作。

作者从1980年起开始对变形观测数据处理的理论和方法进行系统性的研究，提出了变形分析通用法，研制了相应的软件包。这些成果包括在作者1983年的博士论文中。本书是以博士论文为基础，总结过去六年中作者的研究成果而写成的。

在组织本书内容时，作者兼顾到理论和实用两个目的，既对数据处理的理论做了高度的综合和概括，使之具有通用性，又对变形分析的方法做了详细的讨论，使读者能够应用。与此同时，还充分注意到国内外学者在这个领域中的研究成果。选择实例时，既考虑到国内的实用性，也顾及到国际上的先进性。书中大部分实例的分析是作者自己、或在作者指导下完成的。

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。

著 者

1986年12月于武汉

目 录

绪论	(1)
第一节 变形观测的任务、特点和数据处理方法的发展	(1)
一、变形观测的意义、内容和目的	(1)
二、变形观测的特点	(5)
三、变形观测数据处理方法的发展	(11)
变形和变形监测	(15)
第二节 变形体的变形	(15)
一、地壳运动和变形	(15)
二、地面垂直变形	(22)
三、工程建筑物和基础的变形	(26)
四、变形的模拟	(28)
第三节 变形观测的方法和技术	(42)
一、常规地面测量方法	(42)
二、特殊的测量手段	(49)
三、摄影测量方法	(57)
四、空间测量技术	(61)
五、综合监测系统	(64)
第四节 观测量和变形模型	(69)
一、重力场变化对观测成果的影响	(69)
二、几何观测量和变形模型的函数关系	(79)
三、物理观测量和变形模型的函数关系	(91)

数据处理的理论和方法	(94)
第五节 向量空间的理论和参数估计	(94)
一、线性向量空间.....	(94)
二、向量空间中的优化原理——投影理论.....	(102)
三、向量空间中最小二乘法参数估计.....	(108)
四、广义高斯-马尔可夫模型的参数估计.....	(117)
第六节 自由网平差	(125)
一、参考系亏秩问题.....	(125)
二、利用向量空间投影的理论解自由网问题.....	(128)
三、自由网的其它解法.....	(135)
四、算例.....	(138)
第七节 广义的统计检验模型	(143)
一、正态分布随机量函数的统计特性.....	(143)
二、利用向量空间的理论构成广义高斯-马尔可夫模型的统计检验量.....	(147)
三、统计检验中显著水平 (α) 的选择.....	(156)
第八节 观测值质量的评定	(164)
一、方差-协方差分量估计.....	(164)
二、最小范数 (MINQE) 估计原理.....	(168)
三、其它方差-协方差分量估计方法以及它们和 MINQE 的关系.....	(175)
四、用 MINQE 评定观测值的质量.....	(182)
第九节 观测值的筛选	(195)
一、粗差和系统误差的统计检验原理.....	(195)
二、粗差的定位和检验方法.....	(205)

三、实例	(212)
四、利用 Robust 估计原理作粗差定位	(220)
变形观测的几何分析	(223)
第十节 变形观测几何分析原理	(223)
一、变形观测几何分析的数学模型	(223)
二、变形模型的假设检验	(232)
三、变形观测几何分析的一般过程	(241)
第十一节 变形观测的多元分析	(245)
一、变形观测多元分析模型	(245)
二、多元分析模型的假设检验	(248)
三、多元分析模型在变形观测中的应用	(256)
第十二节 变形模型的鉴别和模型参数的估计	(264)
一、变形模型的鉴别	(264)
二、用“稳健”估计的原理定义监测网的参考系	(273)
三、变形模型参数估计的个别问题	(282)
第十三节 参考点稳定性分析	(289)
一、分析参考点稳定性时的平差问题	(289)
二、用“变形分析通用法”分析参考点的稳定性	(291)
三、参考点稳定性分析的其它方法	(301)
四、算例	(307)
第十四节 相对临测网变形的分析和模拟	(313)
一、分析 FIG “变形分析专门委员会”模拟的监测网	(313)
二、分析 Huaytapallana 地壳形变	

监测网·····	(321)
三、分析一个三维矿山监测网·····	(324)
四、矿区地面变形的模拟·····	(329)
五、地壳垂直运动的模拟·····	(332)
六、在时间和空间中同时模拟地壳的水平 变形·····	(333)
七、用线性函数分区模拟地壳水平变形·····	(340)
八、用观测量的变化率模拟和分析变形的 空间特性·····	(343)
第十五节 变形观测几何分析的若干问题·····	(346)
一、动态平差和变形分析·····	(346)
二、变形分析的“直接法”和“位移法”·····	(352)
三、变形参数的估计和自由网平差方法·····	(357)
四、用位移场“投影法”计算变形模型参数 问题·····	(363)
五、“低灵敏度”检验方法·····	(367)
六、变形观测几何分析的数据管理·····	(369)
变形观测的物理解释·····	(372)
第十六节 变形观测物理解释的方法·····	(372)
一、物理解释的方法和它们的相互关系·····	(373)
二、回归分析法·····	(375)
三、确定函数法·····	(382)
四、回归-确定函数综合分 析 法·····	(390)
第十七节 有限单元法初步·····	(392)
一、最小位能原理·····	(392)
二、二维有限单元法·····	(393)
三、三维有限单元法·····	(400)

四、有限单元法的应用·····	(402)
第十八节 大坝变形观测的物理解释·····	(407)
一、大坝变形观测物理解释方法·····	(407)
二、某混凝土重力拱坝变形观测数据处理·····	(412)
三、某混凝土重力坝变形观测数据处理·····	(427)
动态变形分析·····	(441)
第十九节 动态变形分析原理·····	(441)
一、动态几何分析·····	(442)
二、动态响应分析·····	(450)
三、实例介绍·····	(460)
附录·····	(470)
附录 I 矩阵的某些代数运算·····	(470)
附录 II 最小二乘法当代进展的综合·····	(480)
附录 III 三维控制网平差·····	(495)
附录 IV 线性规划原理·····	(500)
主要参考文献·····	(505)

绪 论

第一节 变形观测的任务、特点和数据处理方法的发展

一、变形观测的意义、内容和目的

在测量工程的实践和科学研究活动中，变形观测占有重要的位置。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（例如抽取地下水、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。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，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面，水体（河流，湖泊，海洋）下面采矿（称为三下采矿），这些对变形观测都提出了更高的要求。地壳中地应力的长期累积，造成地震，严重地危及人类的生存，监测地壳的变形是预报地震的重要手段。

变形观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。

拦河大坝是一类重要的工程建筑物，大坝失事所造成的损失是巨大的。溃坝大多数是发生在极为短促的时间里。根据一些资料介绍，溃坝灾害一般在 10~20 分钟内造成，洪波巨浪所到之处，摧毁能力极强。例如，1959 年法国 66m 高的 Malpasset 拱坝，水库蓄水 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，在坝崩溃时形成的洪水，以每小时 36km 的速度向下游倾泻，400 人死亡，损失 6800 万美元。1963 年意大利 266m 高的 Vajaut 拱坝，库岸发生大滑坡，滑坡体以每秒 25~30m 的速度滑向水库，在 30~60 秒内共滑下 $(2.7 \sim 3) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的土石方，使库中 5000 万 m^3 的水被挤出，掀起 250m 高的巨大水浪，洪水淹没坝顶 100m 高，在下游 1.6km 的峡口处，仍有 60m 高的巨浪。从滑坡开始到下游地区被摧毁，只经历了 7 分钟，毁灭一座城市和几个小镇，死亡 3000 人。根据国际大坝委员会的统计，截至 1965 年，本世纪国外高于 15m 的水坝失事有 290 次以上，仅 1959~1973 年间，至少就有 22 座水坝失事。

采矿引起地面变形也会造成很大的损失。据美国矿业局预计，在今后 15 年内，美国由于采矿引起地面沉陷的面积达 750 000 英亩，财产损失在 20 亿美元以上。

地震对于人类的生存构成最大的威胁。1923 年 9 月 1 日，日本东京发生了 8.2 级地震，强震引起的次生灾害——大火几乎焚毁了半个东京，死亡计 10 万人。1960 年 5 月 2 日智利 8.5 级大地震，引起了横扫太平洋的海啸，巨浪直驱日本，将大渔船掀上陆地的房顶。这次地震的死亡者，总数近 7000 人。1976 年 7 月 28 日，我国唐山 7.8 级大地震，是迄今为止世界地震史上最悲惨的一页，死亡 24 万余人，重伤 16 万人，整个唐山市夷为平地。

坚持长期的、严密的变形观测可以避免或减少损失。这

方面的实例是很多的，例如，瑞士的 Zeuzier 拱坝，高 156 m，在竣工后 20 多年中，大坝运行正常，但 1978 年突然发现异常，坝顶下沉 10cm，拱座间距离缩短了 5cm，拱冠顶向上游移动 9cm，超出了预计变形值一倍以上。发现异常后，泄放了水库中 90% 的水，发现坝体已产生裂缝。仔细地检查和分析原因，得知这是由于离坝不远处（距离大坝 1400m，比坝低 300m），正在开挖一条穿过阿尔卑斯山的公路隧道所造成的，当隧道工程停止后，坝体变形明显减小。在我国，所有的大型工程建筑物和危及人民安全的重点滑坡地段都定期地进行变形观测，对避免灾害起了积极的作用。例如，1984 年长江三峡地区发生了一次大滑坡，由于该地区进行了广泛的变形测量，对可能发生的滑动做了正确的预报，使滑坡体上 11 000 居民在滑坡滑动前一周撤离，避免了一场灾难的发生。

地壳形变监测是预报地震的一种重要手段。许多国家都在地壳活动带布设各种形式的监测网，测量地应变累积过程，这对中期和中短期地震预报起着极为重要的作用。测量工作者这种努力已得到了科学界和整个社会的承认。例如几年前，美国科学院的一份报告中就写道：“最终我们知道的一切关于美国西部引起地震的应变累积过程和特征，都是来自于测量工作者的研究，这种研究始于 19 世纪后期”。我国地震战线上的科技工作者成功地预报了 1975 年 2 月 4 日辽宁海城 7.3 级地震，这在世界大震预报史上还是第一次。他们根据小震的活动，地壳变形，地磁和海平面等四项异常资料，正确地预报了地震，使 100 多万人在大震前半天离开房子和工作地点，大大减轻了这一场特大灾难所造成的损失。这当中有测量工作者的功劳。

变形观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。全球性的变形观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。平极位置（拟合瞬时极位置的圆弧中心）和地球上地震是有联系的。例如，通过计算表明，1960年智利大地震使平极位置变化约50cm，1964年的阿拉斯加8.4级地震使平极变化30cm。全球激光测距和甚长基线观测，目前能以5cm的精度确定地极的位置，因此能够建立地震和极位置变化的关系。地壳板块相对运动的速度，板块交界处应变释放的全球模式，可以通过现代空间测量技术（甚长基线测量，卫星激光测距和全球定位系统）测定。

区域性的变形观测，用以研究地壳板块范围内变形状态和板块交界处地壳相对运动。前者一般从定期复测国家控制网的资料获得，后者要建立专用监测网。板块相对运动在其交界处造成地壳变形。地震一般集中在断层附近，宽度从几十公里到上百公里的范围内。在这个地壳活动带，变形观测有三个目的：（1）测定长期的应变累积形式和速率；（2）发现中期应变的变化。所谓中期，一般是指两星期至六个月；

（3）发现震前短期征兆。一般前兆性运动出现在震前几分钟至几天内。为了前面两个目的，一般布设高精度的监测网。而为第三个目的，监测系统多是跨越断层的固定的连续测量装置。

局部性的变形观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“静态”式、运动式和动态

式三种。所谓“静态”式，是指固定参考点，其中个别点可能由于某种局部因素发生变动，但这种变动没有一定的时间特性，变形观测的目的是要查明它们的稳定性。运动式变形包括地壳应变的累积、地质构造断层两边相对错动、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。动态式是指高层建筑物的摆动、桥梁在动荷载作用下的振动等等。这种形式的变形呈周期性，观测的目的是要获得变形的幅度和周期的信息。

总的说来，变形观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，相应的变形观测数据处理任务称为变形的几何分析，对于后一个目的，相应的任务称为变形的物理解释。

二、变形观测的特点

1. 精度要求高

和其它测量工作相比，变形观测要求的精度高，典型精度是 1mm 或相对精度为 10^{-6} 。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，以及观测的目的等。一般来说，如果变形观测是为了使变形值不超过某一允许的数值，以确保建筑物的安全，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。

地壳形变测量用于预报地震，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，表 1-1 概括了主要的精度要求。

地壳形变测量的理想精度

表 1-1

基线长 (km)	重复观测周期	精度	方法	备注
长期应变累积:				
1—100	1 年	10^{-6}	水准测量	高程精度
10—30	1 年	10^{-7}	三边测量	平面精度
100	1 年	3×10^{-7}	全球定位系统(GPS)、三边测量	
50	10 年	10^{-6}	水准、三边测量	测量震后大范围变形
100	1 年	10cm	专用仪器	测量海底运动
中期应变变化:				
1—10	1—4 周	10^{-7}	边长测量	重点几条边长
10	1—4 周	10^{-6}	GPS、重力测量、边长测量	沿主要断层每隔一定距离布设一条测线
震前连续观测:				
1—10	1 天 1 小时 1 秒	5×10^{-8} 10^{-8} 5×10^{-9}	地壳运动观测台站(应变仪, 倾斜仪, 重力仪)	测量震前短期前兆
震后变形监测:				
10	1 月 1 天 1 小时	10^{-6} 10^{-6} 10^{-6}	GPS、EDM、倾斜仪	测量震后变形过程

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 1mm 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 0.1mm。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 1-2 中。滑坡变形测定精度一般在 10~50mm 之间。

大坝变形观测典型精度

表 1-2

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

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。前面介绍的瑞士 Zeuzier 拱坝是一个例子，该坝在正常运营 20 多年后才出现异常，如果没有坚持定期观测，就无法发现，就会发生灾害。以大坝作为典型例子，变形观测的频率概括在表 1-3 中。

大坝变形观测周期

表 1-3

变形种类	水库蓄水前	水库蓄水	水库蓄水后 2~3年	正常运营
混凝土坝:				
沉 陷	1 个月	1 个月	3~6月	半年
相对水平位移	半个月	1 周	半个月	1 个月
绝对水平位移	0.5~1 个月	1 季度	1 季度	6~12个月
土石坝:				
沉陷、水平位移	1 季度	1 个月	1 季度	半年

对于地壳形变测量, 根据目的不同, 观测频率也不同。用于监测长期应变累积, 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, 见表 1-1。

3. 综合应用各种观测方法

变形观测方法一般分为四类: 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; 空间测量技术, 例如甚长基线干涉法测量 (VLBI), 卫星激光测距, 全球定位系统 (GPS); 摄影测量方法; 专门测量手段, 这里主要是指各种准直测量, 倾斜仪观测, 应变计测量等。各类测量方法都有它的优缺点。地面测量方法精度高, 应用灵活, 适用于不同的变形体和不同的工作环境, 但是野外工作量大, 而且不容易实现自动和连续监测。空间测量技术可提供大范围的变形信息, 是研究全球性变形的最主要手段, 但用于区域性变形观测, 仪器目前还比较笨重 (GPS 除外, 但 GPS 目前还处于实验阶段)。和前面两种方法相比, 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,