

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(第二版)

变形监测数据处理

黄声享 尹晖 蒋征 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校测绘工程系列教材

变形监测数据处理

(第二版)

黄声享 尹 晖 蒋 征 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了变形监测及其数据处理与分析建模的基本理论和方法,注重理论的实际应用,反映了变形监测领域中的最新研究成果。全书共分7章,内容包括:变形监测的基本内容及现代发展;数理统计的有关理论;变形监测技术;变形监测资料的预处理;变形监测网的参考系和参考点的稳定性分析;变形分析与建模的基本理论与方法;变形的确定性模型和混合模型等。

本书可作为高等学校测绘工程专业的本科教材,并可供相关专业的科研、教学与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变形监测数据处理/黄声享,尹晖,蒋征编著.—2版.—武汉:武汉大学出版社,
2010.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校测绘工程系列教材

ISBN 978-7-307-08227-4

I. 变… II. ①黄… ②尹… ③蒋… III. 变形观测—数据处理—高等学校—教材 IV. P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 192611 号

责任编辑:王金龙 责任校对:黄添生 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北鄂东印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:286千字

版次:2003年1月第1版 2010年10月第2版

2010年10月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-08227-4/P·176

定价:20.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

第二版前言

《变形监测数据处理》教材自 2002 年出版以来,经兄弟院校和武汉大学测绘工程本科专业多年的教学实践,证明该教材的课程体系较好,教学内容是符合教学规律的,因此,第二版保留了原教材的结构体系。为适应当代科学技术的发展和人才培养教学改革的要求,有必要对原教材作一定的修改,修改的主要内容有:

1. 第 3 章增加了地面三维激光扫描技术的内容;
2. 第 6 章补充了适当的算例,以加强对变形分析建模方法的理解;
3. 对第 5 章 5.1 节和 5.2 节的内容,重新进行了编写;
4. 对教材 5.3.3 节的算例进行了重新调整;
5. 对教材在教学过程中所反映的个别问题进行了全面修改。

本教材修订工作由黄声享组织,集体讨论,分工负责。编写工作的分工为:黄声享(第 1 章、第 2 章、第 4 章,第 5 章的 5.4 节及第 6 章的 6.4~6.6 节);尹晖(第 3 章、第 6 章的 6.1~6.3 节);蒋征(第 5 章的 5.1~5.3 节、第 7 章)。全书由黄声享负责统稿工作。

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材建设项目,在课程教学和生产实践中,一些师生和技术管理人员为教材内容提出了宝贵修改意见,谨此致谢。

限于我们的水平,书中不当之处恳请读者批评指正。

作者

2010 年 8 月于武汉

前 言

变形监测工作正向边缘、交叉学科方向发展,所涉及的变形监测技术、数据处理与分析建模的理论和方法很多,目前也是工程测量、大地测量和工程地质等学科研究的重点。国民经济建设的发展,对从事工程变形与地质灾害监测工作的人才需求和要求非常迫切,为使本专业学生能够胜任这一工作,我校工程测量教研室于1984年开始开设该课程,采用吴子安教授编著的《工程建筑物变形观测数据处理》教材,沿用至今。十几年来,变形监测技术及数据处理方法得到了飞速发展,为了反映国内外最新研究成果,使教材更紧密结合教学与生产实际,测绘学院工程与工业测量教研室曾多次召开本书新编工作讨论会,并于2000年确定了负责撰写人员。

本书的基本思想是:紧密结合专业特点,注重教材内容的系统性、科学性、实用性和先进性,其直接读者对象是测绘工程、工程地质等专业的本科生,同时,也可供从事变形监测和工程测量工作的科研、生产、教学人员参考。本书对变形监测技术和变形分析的内涵及其研究进展作了较为全面的回顾和展望,在变形监测技术方面纳入了精度高、自动化程度强的空间定位技术(GPS)和测量机器人(Georobot)等最新技术,在数据处理与分析建模方面着重纳入了随机过程、小波变换、时序分析、灰色系统、Kalman滤波、人工神经网络、频谱分析等新理论和新方法,并对大坝变形的确定性模型、混合模型和反分析理论作了介绍。

本书共分7章,其中第1、2、4章,第5章的5.4节及第6章的6.4~6.6节由黄声享撰写;第3章及第6章的6.1~6.3节由尹晖撰写;第5章的5.1~5.3节及第7章由蒋征撰写;梅文胜为第3章提供了部分素材。全书由黄声享负责统稿。

本书是根据武汉大学测绘学院测绘工程专业最新的教学大纲和教学计划而撰写的,得到了测绘学院教学指导委员会的重视,是武汉大学“十五”规划教材。本书的出版得到了武汉大学出版社的大力支持,在此深表谢意。

限于我们的水平,书中不当之处恳请读者批评指正。

作 者

2002年11月于武汉

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 变形监测的内容、目的与意义	1
1.1.1 变形监测的基本概念	1
1.1.2 变形监测的内容	1
1.1.3 变形监测的目的和意义	2
1.2 变形监测技术及其发展	3
1.3 变形分析的内涵及其研究进展	5
1.3.1 变形的时空特征分析及其建模方法	5
1.3.2 变形物理解释的进展	7
1.3.3 变形分析研究的发展趋势	8
思考题 1	8
第 2 章 数理统计的有关理论	9
2.1 随机变量及其概率分布	9
2.1.1 随机变量的基本概念	9
2.1.2 随机变量的概率分布	10
2.1.3 数理统计中几个常用的抽样分布	11
2.2 假设检验原理与方法	14
2.2.1 假设检验的基本思想	14
2.2.2 检验方法	15
2.3 随机过程及其特征	20
2.3.1 研究随机过程理论的实际意义	20
2.3.2 随机过程的基本概念	20
2.3.3 随机过程的特征量	21
2.3.4 随机过程特征量的实际估计	25
思考题 2	29
第 3 章 变形监测技术	30
3.1 变形监测技术	30
3.1.1 地面监测方法与测量机器人	30
3.1.2 地面摄影测量方法	33
3.1.3 GPS 变形监测及自动化系统	35
3.1.4 三维激光扫描技术及应用	37

3.1.5 特殊的测量手段	41
3.2 变形监测方案	42
3.2.1 监测内容	43
3.2.2 监测方法、仪器和监测精度的确定	43
3.2.3 监测部位和测点布置的确定	44
3.2.4 变形监测频率的确定	44
3.2.5 综合变形监测系统	45
3.3 变形监测网优化设计	46
3.3.1 控制网优化设计问题的分类及解法	47
3.3.2 控制网优化设计的质量标准	48
3.3.3 变形监测网机助法优化设计系统	53
思考题 3	56
第 4 章 变形监测资料的预处理	57
4.1 监测资料检核的意义与方法	57
4.2 用一元线性回归进行资料的检核	59
4.3 监测网观测资料的数据筛选及算例	62
4.3.1 数据筛选原理	62
4.3.2 算例	66
4.4 监测资料奇异值的检验与插补	69
4.4.1 监测自动化系统中观测数据序列的奇异值检验	69
4.4.2 监测资料的插补	70
4.5 小波变换用于信噪分离	71
4.5.1 引言	71
4.5.2 小波变换的基本理论及方法	72
4.5.3 小波变换在变形分析中的应用	76
4.6 变形监测成果的整理	78
4.6.1 工作基点位移对变形值的影响	78
4.6.2 观测资料的整编	79
4.6.3 变形值的统计规律及其成因分析	81
4.7 监测资料管理	85
思考题 4	87
第 5 章 变形监测网的参考系和参考点的稳定性分析	89
5.1 绝对网和相对网	89
5.2 监测网的参考系	91
5.2.1 自由网的约束平差解法	91
5.2.2 自由网的参考系方程	92
5.2.3 秩亏自由网平差参考系与拟稳平差参考系的特点	95
5.2.4 不同参考系之间平差结果的转换	96

5.2.5	参考系的选择对位移计算的影响	97
5.3	平均间隙法	99
5.3.1	整体检验	99
5.3.2	不稳定点搜索	100
5.3.3	算例	102
5.4	GPS 变形监测网的数据处理	103
5.4.1	GPS 监测网的经典自由网平差	103
5.4.2	GPS 监测网的秩亏自由网平差	104
5.4.3	GPS 监测网的拟稳平差	105
5.4.4	GPS 监测网变形分析基准的统一	106
	思考题 5	106

第 6 章 变形分析与建模的基本理论与方法

6.1	回归分析法	108
6.1.1	曲线拟合	108
6.1.2	多元线性回归分析	110
6.1.3	逐步回归计算	113
6.2	时间序列分析模型	114
6.2.1	概述	114
6.2.2	ARMA 模型建立的一般步骤	115
6.2.3	ARMA 的 Box 建模方法	116
6.2.4	DDS 建模法简介	121
6.2.5	三种建模方法的分析与比较	121
6.3	灰色系统分析模型	124
6.3.1	概述	124
6.3.2	灰色系统理论的基本概念	124
6.3.3	灰色关联分析	125
6.3.4	GM(1,N) 模型	128
6.3.5	GM(1,1) 模型	129
6.4	Kalman 滤波模型	132
6.4.1	Kalman 滤波的基本原理与公式	132
6.4.2	变形监测自动化系统中 Kalman 滤波的应用	133
6.4.3	递推式 Kalman 滤波的应用实例	135
6.5	人工神经网络模型	136
6.5.1	人工神经网络的基本概念	136
6.5.2	BP 网络结构及算法	137
6.5.3	BP 模型在滑坡及沉降预测中的应用	140
6.6	频谱分析及其应用	141
6.6.1	线性系统原理	141
6.6.2	频谱分析法	143

6.6.3 频谱分析算例	144
6.6.4 最小二乘响应分析	145
思考题 6	146
第 7 章 变形的确定性模型和混合模型	148
7.1 弹性力学的有关内容简介	148
7.1.1 位移、应变、应力	148
7.1.2 弹性力学的基本方程	149
7.1.3 边界条件	150
7.1.4 弹性力学问题的求解	151
7.2 有限元法的基本概念	151
7.2.1 有限元网格和有限单元	152
7.2.2 有限元模拟范围	153
7.2.3 平面问题有限元求解方法	153
7.3 大坝位移确定性模型的建立	158
7.3.1 水压分量 $f_H(t)$	158
7.3.2 温度分量 $f_T(t)$	161
7.3.3 时效分量 $f_\theta(t)$	163
7.3.4 确定性模型的一般表达式	164
7.3.5 参数估计	164
7.4 混合模型的表达式	164
7.5 确定性模型和混合模型的应用实例	165
7.5.1 位移确定性模型应用实例	165
7.5.2 变形混合模型的应用实例	167
7.6 反分析理论及其应用	167
7.6.1 反演分析法及其应用	167
7.6.2 反馈分析法	168
思考题 7	172
参考文献	173

第1章 引 论

1.1 变形监测的内容、目的与意义

1.1.1 变形监测的基本概念

变形是自然界普遍存在的现象,它是指变形体在各种荷载作用下,其形状、大小及位置在时间域和空间域中的变化。变形体的变形在一定范围内被认为是允许的,如果超出允许值,则可能引发灾害。自然界的变形危害现象很普遍,如地震、滑坡、岩崩、地表沉陷、火山爆发、溃坝、桥梁与建筑物的倒塌等。

所谓变形监测,就是利用测量与专用仪器和方法对变形体的变形现象进行监视观测的工作。其任务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。变形监测工作是人们通过变形现象获得科学认识、检验理论和假设的必要手段。

变形体的范畴可以大到整个地球,小到一个工程建(构)筑物的块体,它包括自然和人工的构筑物。根据变形体的研究范围,可将变形监测研究对象划分为这样3类:

- (1)全球性变形研究,如监测全球板块运动、地极移动、地球自转速率变化、地潮等;
- (2)区域性变形研究,如地壳形变监测、城市地面沉降等;
- (3)工程和局部性变形研究,如监测工程建筑物的三维变形、滑坡体的滑动、地下开采引起的地表移动和下沉等。

在精密工程测量中,最具有代表性的变形体有大坝、桥梁、矿区、高层(耸)建筑物、防护堤、边坡、隧道、地铁、地表沉降等。

1.1.2 变形监测的内容

变形监测的内容,应根据变形体的性质与地基情况来定。要求有明确的针对性,既要有重点,又要作全面考虑,以便能正确地反映出变形体的变化情况,达到监视变形体的安全、了解其变形规律的目的。例如:

(1)工业与民用建筑物:主要包括基础的沉陷观测与建筑物本身的变形观测。就其基础而言,主要观测内容是建筑物的均匀沉陷与不均匀沉陷。对于建筑物本身来说,则主要是观测倾斜与裂缝。对于高层和高耸建筑物,还应对其动态变形(主要为振动的幅值、频率和扭转)进行观测。对于工业企业、科学试验设施与军事设施中的各种工艺设备、导轨等,其主要观测内容是水平位移和垂直位移。

(2)水工建筑物:对于土坝,其观测项目主要为水平位移、垂直位移、渗透以及裂缝观测;对于混凝土坝,以混凝土重力坝为例,由于水压力、外界温度变化、坝体自重等因素的作用,其主要观测项目为垂直位移(从而可以求得基础与坝体的转动)、水平位移(从而可以求得坝体

的扭曲)以及伸缩缝的观测,这些内容通常称为外部变形观测。此外,为了了解混凝土坝结构内部的情况,还应对混凝土应力、钢筋应力、温度等进行观测,这些内容通常称为内部观测。虽然内部观测一般不由测量人员进行,但在进行变形监测数据处理时,特别是对变形原因作物理解释时,则必须将内、外部观测的资料结合起来进行分析。

(3)地面沉降:对于建立在江河下游冲积层上的城市,由于工业用水需要大量地开采地下水,而影响地下土层的结构,将使地面发生沉降现象。对于地下采矿地区,由于大量的采掘,也会使地表发生沉降现象。在这种沉降现象严重的城市地区,暴雨以后将发生大面积的积水,影响仓库的使用与居民的生活。有时甚至造成地下管线的破坏,危及建筑物的安全。因此,必须定期进行观测,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。

1.1.3 变形监测的目的和意义

人类社会的进步和国民经济的发展,加快了工程建设的进程,并且对现代工程建筑物的规模、造型、难度提出了更高的要求。与此同时,变形监测工作的意义更加重要。众所周知,工程建筑物在施工和运营期间,由于受多种主观和客观因素的影响,会产生变形,变形如果超出了规定的限度,就会影响建筑物的正常使用,严重时还会危及建筑物的安全,给社会和人民生活带来巨大的损失。尽管工程建筑物在设计时采用了一定的安全系数,使其能安全承受所考虑的多种外荷载影响,但是由于设计中不可能对工程的工作条件及承载能力做出完全准确的估计,施工质量也不可能完美无缺,工程在运行过程中还可能发生某些不利的变化因素,因此,国内外仍有一些工程出现事故。以大坝为例,法国 67m 高的马尔巴塞(Malpasset)拱坝 1959 年垮坝;意大利 262m 高的瓦依昂(Vajont)拱坝 1963 年因库岸大滑坡导致涌浪翻坝且水库淤满失效;美国 93m 高的提堂(Teton)土坝 1976 年溃决;我国板桥和石漫滩两座土坝 1975 年洪水漫坝失事等。再如近几年发生的桥梁垮塌事例,2007 年 6 月 15 日广东九江大桥的船撞桥事故,造成 200m 桥面被撞垮塌;美国当地时间 2007 年 8 月 1 日,明尼阿波利斯市位于密西西比河上的一座高速桥梁发生桥面突然坍塌,造成至少 7 人死亡,37 人受伤。可见,保证工程建筑物安全是一个十分重要且很现实的问题。为此,变形监测的首要目的是要掌握变形体的实际性状,为判断其安全提供必要的信息。

目前,灾害的监测与防治已越来越受到全社会的普遍关注,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,经常定期地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近 40 年的共同努力,在变形监测领域取得了丰硕的理论研究成果,并发挥了实用效益。以我国为例:

(1)利用地球物理大地测量反演理论,于 1993 年准确地预测了 1996 年发生的丽江大地震。

(2)1985 年 6 月 12 日长江三峡新滩大滑坡的成功预报,确保灾害损失减少到了最低限度。它不仅使滑坡区内 457 户 1 371 人在滑坡前夕全部安全撤离,无一人伤亡,而且使正在险区长江上、下游航行的 11 艘客货轮及时避险,免遭灾难。为国家减少直接经济损失 8 700 万元,被誉为我国滑坡预报研究史上的奇迹。

(3)隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统在 1998 年长江流域抗洪错峰中所发挥的巨大作用,确保了安全度汛,避免了荆江大堤灾难性的分洪。

科学、准确、及时地分析和预报工程及工程建筑物的变形状况,对工程建筑物的施工和运营管理极为重要,这一工作属于变形监测的范畴。由于变形监测涉及到测量、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,因此,它是一项跨学科的研究,并正向边缘学科的方向发展,也已成为测量工作者与其他学科专家合作研究的领域。

变形监测所研究的理论和方法主要涉及这样3个方面的内容:变形信息的获取、变形信息的分析与解释以及变形预报。其研究成果对预防自然灾害及了解变形机理是极为重要的。对于工程建筑物,变形监测除了作为判断其安全的耳目之外,还是检验设计和施工的重要手段。

总而言之,变形监测工作的意义重点表现在两方面:首先是实用上的意义,主要是掌握各种建筑物和地质构造的稳定性,为安全性诊断提供必要的信息,以便及时发现问题并采取措施;其次是科学上的意义,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,进行反馈设计以及建立有效的变形预报模型。

1.2 变形监测技术及其发展

变形信息获取方法的选择取决于变形体的特征、变形监测的目的、变形大小和变形速度等因素。

在全球性变形监测方面,空间大地测量是最基本且最适用的技术,它主要包括全球定位系统(GPS)、甚长基线射电干涉测量(VLBI)、卫星激光测距(SLR)、激光测月技术(LLR)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)等技术手段。

在区域性变形监测方面,GPS已成为主要的技术手段。近20年发展起来的空对地观测遥感新技术——合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR),在监测地震变形、火山地表移动、冰川漂移、地面沉降、山体滑坡等方面,其试验成果的精度已可达cm级或mm级,表现出了很强的技术优势,但精密水准测量依然是高精度高程信息获取的主要方法。

在工程和局部性变形监测方面,地面常规测量技术、地面摄影测量技术、特殊和专用的测量手段、以及以GPS为主的空间定位技术等均得到了较好的应用。地面三维激光扫描技术和地面微波干涉测量技术的试验应用已取得大量的实用性成果。

合理设计变形监测方案是变形监测的首要工作。对于周期性变形监测网设计而言,其主要内容包括:确定监测网的质量标准;选择观测方法;点位的最佳布设和观测方案的最优选择。在过去的40年里,变形监测方案设计和监测网优化设计的研究较为深入和全面,取得了丰富的理论研究成果和较好的实用效益,这一点可从众多文献中得到体现。目前,在变形监测方案与监测系统设计方面,其主要发展是监测方案的综合设计和监测系统的数据管理与综合处理。例如,在大坝的变形监测中,要综合考虑外部和内部观测设计,大地测量与特殊测量的观测量(Geodetic and Geotechnical Observations)要进行综合处理与分析。

纵观国内外数10年变形监测技术的发展历程,传统的地表变形监测方法主要采用的是大地测量法和近景摄影测量法。

(1)常规地面测量方法的完善与发展,其显著进步是全站型仪器的广泛使用,尤其是全自动跟踪全站仪(Robotic Total Stations, RTS),有时也称测量机器人(Georobot),为局部工程变形的自动监测或室内监测提供了一种很好的技术手段,它可进行一定范围内无人值守、全天候、全方位的自动监测。实际工程试验表明,测量机器人监测精度可达到亚mm级。比如,在美国

加州南部的一个新水库(Diamond Valley Lake)就安装了由8个永久性RTS(仪器型号为Leica TCA1800)和218个棱镜组成的地面自动监测系统。但是,TPS(Terrestrial Positional System,地面定位系统)最大的缺陷是受测程限制,测站点一般都处在变形区域的范围之内。

(2)地面摄影测量技术在变形监测中的应用虽然起步较早,但是由于摄影距离不能过远,加上绝对精度较低,使得其应用受到局限,过去仅大量应用于高塔、烟囱、古建筑、船闸、边坡体等的变形监测。近几年发展起来的数字摄影测量和实时摄影测量为地面摄影测量技术在变形监测中的深入应用开拓了非常广泛的前景。

(3)光、机、电技术的发展,研制了一些特殊和专用的监测仪器可用于变形的自动监测,它包括应变测量、准直测量和倾斜测量。例如,遥测垂线坐标仪,采用自动读数设备,其分辨率可达0.01mm;采用光纤传感器测量系统将信号测量与信号传输合二为一,具有很强的抗雷击、抗电磁场干扰和抗恶劣环境的能力,便于组成遥测系统,实现在线分布式监测。

(4)以GPS为代表的现代空间定位技术,已逐渐在越来越多的领域取代了常规光学和电子测量仪器。自20世纪80年代以来,尤其是进入90年代后,GPS卫星定位和导航技术与现代通信技术相结合,在空间定位技术方面引起了革命性的变化。用GPS同时测定三维坐标的方法将测绘定位技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间,从静态扩展到动态,从单点定位扩展到局部与广域差分,从事后处理扩展到实时(准实时)定位与导航,绝对和相对精度扩展到m级、cm级乃至亚mm级,从而大大拓宽了它的应用范围和在各行各业中的作用。地学工作者已将GPS应用于地表变形监测的多个试验中,取得了丰富的理论研究成果,并逐步走向了实用阶段。数据通信技术、计算机技术和以GPS为代表的空间定位技术的日益发展和完善,使得GPS法由原来的周期性观测走向高精度、实时、连续、自动监测成为可能。

GPS用于变形监测的作业方式可划分为周期性和连续性(Episodic and Continuous Mode)两种模式。

周期性变形监测与传统的变形监测网没有多大区别,因为有的变形体的变形极为缓慢,在局部时间域内可以认为是稳定的,其监测频率有的是几个月,有的甚至长达几年,此时,采用GPS静态相对定位法进行测量,数据处理与分析一般都是事后的。经过10多年的努力,GPS静态相对定位数据处理技术已基本成熟。在周期性监测方面,利用GPS技术的最大屏障还是变形基准的选择与确定,它已成为近几年研究的热点。

连续性变形监测指的是采用固定监测仪器进行长时间的数据采集,获得变形数据序列。虽然连续性监测模式也是对测点进行重复性的观测,但其观测数据是连续的,具有较高的时间分辨率。根据变形体的不同特征,GPS连续性监测可采用静态相对定位和动态相对定位两种数据处理方法进行观测,一般要求变形响应的实时性,它为数据解算和分析提出了更高要求。比如,大坝在超水位蓄洪时就必须时刻监视其变形状况,要求监测系统具有实时的数据传输和数据处理与分析能力。当然,有的监测对象虽然要求较高的时间采样率,但是数据解算和分析可以是事后的。比如,桥梁的静动载试验和高层建筑物的振动测量,其监测的目的在于获取变形信息,数据处理与分析可以事后进行。

在动态监测方面,过去一般采用加速度计、激光干涉仪等测量设备测定建筑结构的振动特性,但是,随着建筑物高度的增高,以及连续性、实时性和自动化监测程度要求的提高,常规测量技术已越来越受到局限。GPS作为一种新方法,由于其硬件和软件的发展与完善,特别是高采样率(目前已达20Hz)GPS接收机的出现,在大型结构物动态特性和变形监测方面已表现出其独特的优越性。近10年来,一些大型工程建筑物已开展了卓有成效的GPS动态监测实验

与测试工作。例如,应用 GPS 技术成功地对加拿大卡尔加里(Calgary)塔在强风作用下的结构动态变形进行了测定;国内外一些大型桥梁(尤其是大跨度悬索桥和斜拉桥,如广东虎门大桥)已尝试安装 GPS 实时动态监测系统;深圳帝王大厦的风力振动特性采用了 GPS 进行测量。目前,GPS 动态监测数据处理主要采用的是整周模糊度动态解算法(Ambiguity Resolution On-The-Fly,OTF 法)。同时,GPS 变形监测单历元求解算法及其相应软件开发的研究也在发展之中。已有研究表明,对于长期监测的 GPS 系统,采用 Kalman 滤波三差法代替 RTK(Real-Time Kinematic)技术中的双差相位求解,可以实现 mm 级精度。令人鼓舞的是,正如 Loves(1995)所言,随着 GPS 动态变形监测能力的进一步证实,这一技术可望被采纳为测量结构振动的标准技术。

展望变形监测技术的未来方向有以下几个方面:

①多种传感器、数字近景摄影、全自动跟踪全站仪、地面三维激光扫描系统和 GPS 的应用,将向实时、连续、高效率、自动化、动态监测系统的方向发展,比如,某大坝变形监测系统是由测量机器人、GPS 和特殊测量仪器所构成的最优观测方案;

②变形监测的时空采样率会得到大大提高,变形监测自动化为变形分析提供了极为丰富的数据信息;

③高度可靠、实用、先进的监测仪器和自动化系统,要求在恶劣环境下长期稳定可靠地运行;

④实现远程在线实时监控,在大坝、桥梁、地铁、边坡体等工程中将发挥巨大作用,网络监控是推进重大工程安全监控管理的必由之路。

1.3 变形分析的内涵及其研究进展

人们对自然界现象的观察,总是对有变化、无规律的部分感兴趣,而对无变化、规律性很强的部分反映则比较平淡。如何从平静中找出变化,从变化中找出规律,由规律预测未来,这是人们认识事物、认识世界的常规辩证思维过程。变化越多、反应越快,系统就越复杂,这就导致了非线性系统的产生。人的思维实际是非线性的,而不是线性的,不是对表面现象的简单反应,而是透过现象看本质,从杂乱无章中找出其内在规律,然后遵循规律办事。这就是变形分析的真正内涵。

变形分析的研究内容涉及变形数据处理与分析、变形物理解释和变形预报的各个方面,通常可将其分为变形的几何分析和变形的物理解释两部分。变形的几何分析是对变形体的形状和大小变形作几何描述,其任务在于描述变形体变形的空间状态和时间特性。变形物理解释的任务是确定变形体的变形和变形原因之间的关系,解释变形的原因。

1.3.1 变形的时空特征分析及其建模方法

传统的变形几何分析主要包括参考点的稳定性分析、观测值的平差处理和质量评定以及变形模型参数估计等内容。

监测点的变形信息是相对于参考点或一定基准的,如果所选基准本身不稳定或不统一,则由此获得的变形值就不能反映真正意义上的变形,因此,变形的基准问题是变形监测数据处理首先必须考虑的问题。过去对参考点的稳定性分析研究主要局限于周期性的监测网,其方法有很多,例如,A. Chrzanowski(1981)论述了这样的 5 种方法:以方差分析进行整体检验为基础

的 Hannover 法(H. Pelzer,1971),即通常所采用的“平均间隙法”;以 B 检验法为基础的 Delft 法,即单点位移分量法;以方差分析和点的位移向量为基础的 Karlsruhe 法;考虑大地基准的 Munich 法;以位移的不变函数分析为基础的 Fredericton 法。后来又发展了稳健-S 变换法,也称逐次定权迭代法。

观测值的平差处理和质量评定非常重要,观测值的质量好坏直接关系到变形值的精度和可靠性。在这方面,主要涉及观测值质量、平差基准、粗差处理、变形的可区分性等几项内容。在固定基准的经典平差基础上,发展了重心基准的自由网平差和拟稳基准的拟稳平差(周江文,1980;陶本藻,1984)。在 W. Baarda(1968)提出数据探测法后,粗差探测与变形的可区分性研究成果已极为丰富,这已体现在李德仁(1988)、黄幼才(1991)、陶本藻(1992)等的著作中。

对于变形模型参数估计,陈永奇(1988)概括了两种基本的分析方法,即直接法和位移法。直接法是直接用原始的重复观测值之差计算应变分量或它们的变化率;位移法是用各测点坐标的平差值之差(位移值)计算应变分量。同时,他还提出了变形分析通用法,研制了相应的软件 DEFNAN。

1978 年 FIG 工程测量专业委员会设立了由国际测绘界 5 所权威大学组成的特别委员会“变形观测分析专门委员会”,极大地推动了变形分析方法的研究,并取得了显著成果。正如 A. Chrzanowski(1996)所评价的,变形几何分析的主要问题已经得到解决。

实质上,自 20 世纪 70 年代末至 90 年代初,对几何变形分析研究得较为完善的是用常规地面测量技术进行周期性监测的静态模型,但它考虑的仅仅是变形体在不同观测时刻的空间状态,并没有很好地建立各个状态间的联系,更谈不上变形监测自动化系统的变形分析研究。事实上,变形体在不同状态之间是具有时间关联性的。为此,后来许多学者转向了对时序观测数据的动态模型研究,如变形的时间序列分析方法建模;基于数字信号处理的数字滤波技术分离时效分量;变形的卡尔曼滤波模型;用 FIR(Finite Impulse Response)滤波器抑制 GPS 多路径效应等。

动态变形分析既可以在时间域进行,也可以在频率域进行。频谱分析方法是时将域内的数据序列通过傅立叶(Fourier)级数转换到频域内进行分析,它有利于确定时间序列的准确周期并判别隐蔽性和复杂性的周期数据。有些学者应用频谱分析法研究了时序观测资料的干扰因素,以便获得真正的变形信息,并取得了一定效果。频谱分析法用于确定动态变形特征(频率和幅值)是一种常用的方法,尤其在建筑物结构振动监测方面被广为采用。但是,频谱分析法的苛刻条件是数据序列的等时间间隔要求,这为一些工程变形监测分析的实用性增加了难度,因为对于非等间隔时间序列进行插补和平滑处理必然会带入人为因素的影响。

多年来,对变形数据分析方法研究是极为活跃的,除了传统的多元回归分析法以及上述的时间序列分析法、频谱分析法和滤波技术之外,灰色系统理论、神经网络等非线性时间序列预测方法也得到了一定程度的应用。比如,应用灰关联分析方法研究多个因变量和多个自变量的变形问题;应用灰色理论建模预测深基坑事故隐患;应用人工神经网络建模进行短期的变形预测。

在变形分析中,为了弥补单一方法的缺陷,研究多种方法的结合得到了一定程度的发展。例如,将模糊数学原理与灰色理论相结合,应用灰关联聚类分析法进行多测点建模预测;将模糊数学与人工神经网络相结合,应用模糊人工神经网络方法建模进行边坡和大坝的变形预报;在回归分析法中,为处理数据序列的粗差问题,提出了应用抗差估计理论对多元回归分析模型

进行改进的抗差多元回归模型;还有研究认为,人工神经网络与专家系统相结合,是解决大坝安全监控专家系统开发中“瓶颈”问题的一个好方法。

由于变形体变形的错综复杂,可以将其视为一个复杂性系统。这个复杂系统含有许多非线性、不确定性等复杂因素以及它们之间相互作用所形成的复杂的动力学特性。创立于 20 世纪 70 年代的非线性科学理论在变形研究中也得到了反映。例如,根据突变理论,用尖点突变模型研究大坝及岩基的稳定性;将大坝运行性态看成一种非线性动力系统,来研究大坝观测数据序列中的混沌现象。

在变形分析中,出于实用、简便上的考虑,我们一般应用较多的是单测点模型,同时,为顾及监测点的整体空间分布特性,多测点变形监控模型也得到了发展。

但是,从现行的变形分析方法中,我们不难发现,大多是离线的(事后的),不能进行即时预报与监控,无法在紧急关头为突发性灾害提供即时决策咨询,这与目前的自动化监测系统的要求很不相符,为此,研究在线实时分析与监控的方法成为技术的关键。已有研究表明,采用递推算法的贝叶斯动态模型进行大坝监测的动态分析是可行的。在隔河岩大坝 GPS 自动化监测系统中,我们采用递推式卡尔曼滤波模型进行全自动在线实时数据处理起到了较好效果。

在 GPS 监测系统中,数据处理的主要工作是观测资料的解算,如 GPS 差分求解、GPS 监测网平差等,以提供高精度、高可靠性的相对位置信息。而数据分析的重点则包括变形基准的确定,正确区分变形与误差,提取变形特征,并解释其变形成因。

诞生于 20 世纪 80 年代末的小波分析理论,是一种最新的时频局部化分析方法,被认为是自傅立叶分析方法后的突破性进展。应用小波方法,进行时频分析,可望有效地求解变形的非线性系统问题,通过小波变换提取变形特征。早在第 21 届 IUGG 大会上“小波理论及其应用”被 IAG 确定为大地测量新理论的研究方向之一。在 1999 年召开的第 22 届 IUGG 大会上,“小波理论及其在大地测量和地球动力学中的应用”再次被 IAG 确定为 GIV 分会(大地测量理论与方法)的新的研究小组。可见,开展小波理论及其应用研究的重要性。从目前的应用研究来看,虽然小波分析要求大子样容量的时间序列数据,但是,长序列数据可从 GPS、TPS 等集成的自动化监测系统中得到保障。小波分析为高精度变形特征提取提供了一种数学工具,可实现其他方法无法解决的难题,对非平稳信号消噪有着其他方法不可比拟的优点。小波理论在变形监测(尤其是动态变形监测)的数据分析方面将会发挥巨大的作用。

1.3.2 变形物理解释的进展

变形物理解释的方法可分为统计分析法、确定函数法和混合模型法 3 类。

统计分析法中以回归分析模型为主,通过分析所观测的变形(效应量)和外因(原因量)之间的相关性,来建立荷载-变形之间关系的数学模型,它具有“后验”的性质,是目前应用比较广泛的变形成因分析法。由于影响变形因子的多样性和不确定性,以及观测资料本身的有限,因此,很大程度上制约着回归分析建模的准确性。回归分析模型中包括多元回归分析模型、逐步回归分析模型、主成分回归分析模型和岭回归分析模型等。统计模型的发展包括时间序列分析模型、灰关联分析模型、模糊聚类分析模型以及动态响应分析模型等。

确定函数法中以有限元法为主,它是在一定的假设条件下,利用变形体的力学性质和物理性质,通过应力与应变关系建立荷载与变形的函数模型,然后利用确定的函数模型预报在荷载作用下变形体可能的变形。确定性模型具有“先验”的性质,比统计模型有更明确的物理概念,但往往计算工作量较大,并对用作计算的基本资料有一定的要求。

统计模型和确定性模型的进一步发展是混合模型和反分析方法的研究,这已在大坝安全监测中得到了较好的应用。混合模型是对那些与效应量关系比较明确的原因量(比如水质分量)用有限元法(Finite Element Method, FEM)计算的数值,而对于另一些与效应量关系不很明确或采用相应的物理理论计算成果难以确定它们之间函数关系的原因量(比如温度,时效),则仍用统计模式,然后与实际值进行拟合而建立的模型。例如,林兵(1998)采用混合模型分析坝体性态得到了较好效果。反分析是仿效系统识别理论,将正分析成果作为依据,通过一定的理论分析,借以反求建筑物及其周围的材料参数,以及寻找某些规律和信息,及时反馈到设计、施工和运行中去。反分析按其实际内涵包含反演分析和反馈分析,两者之间既有联系又有区别。

由于变形的物理解释涉及多学科的知识,已远不是测量人员所能够独立完成的,所以需要相关学科专家的共同合作。

1.3.3 变形分析研究的发展趋势

回顾变形分析方面所取得的大量实践及研究成果,展望变形分析研究的未来,其发展趋势将主要体现在如下几个方面:

(1) 数据处理与分析将向自动化、智能化、系统化、网络化方向发展,更注重时空模型和时频分析(尤其是动态分析)的研究,数字信号处理技术将会得到更好应用。

(2) 会加强对各种方法和模型的实用性研究,变形监测系统软件的开发不会局限于某一固定模式,随着变形监测技术的发展,变形分析新方法的研究将会不断涌现。

(3) 由于变形体变形的不确定性和错综复杂性,对它的进一步研究呼唤着新的思维方式和方法。由系统论、控制论、信息论、耗散结构论、相同学、突变论、分形与混沌动力学等所构成的系统科学和非线性科学在变形分析中的应用研究将得到加强。

(4) 几何变形分析和物理解释的综合研究将深入发展,以知识库、方法库、数据库和多媒体库为主体的安全监测专家系统的建立是未来发展的方向,变形的非线性系统问题将是一个长期研究的课题。

思考题 1

1. 变形监测的任务是什么?以某一工程为例,试述变形监测的内容,并简述变形监测工作的意义。
2. 变形监测的方法有哪些?简述GPS在变形监测中的应用特点,其应用前景如何?
3. 试述变形分析的内涵。你所了解的变形分析方法有哪些?