



测绘科技专著出版基金资助

CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

DEFORMATION MONITORING ANALYSIS AND
PREDICTION FOR ENGINEERING CONSTRUCTIONS

工程的变形监测 分析与预报

张正禄 黄全义
文鸿雁 邓跃进
等编著



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

工程的变形监测分析与预报

DEFORMATION MONITORING ANALYSIS AND
PREDICTION FOR ENGINEERING
CONSTRUCTIONS

张正禄 黄全义 文鸿雁 邓跃进 等编著

测绘出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

工程的变形监测分析与预报是一个永恒的课题。围绕这一课题,作者在总结教学、科研成果的基础上编著了该书,包括教材和多篇博士论文的有关部分。主要内容有:工程变形监测分析与预报的基础理论,变形分析的系统论方法,变形模式的拓扑约束识别及其应用,变形驱动力反演,自适应卡尔曼滤波、时间序列分析及应用,变形预报的人工神经网络方法和神经网络专家系统,小波理论及应用,粗糙集理论及其在边坡破坏模式中的应用,非线性问题及其在变形分析中的应用,变形监测分析与预报的进展和发展展望等。

本书可作为从事测绘、变形观测及数据处理等方面的教学、科研、生产人员的参考书,也可作为测绘工程专业本科生、硕士研究生的指定参考书和博士研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程的变形监测分析与预报/张正禄等编著. —北京:
测绘出版社,2007.11

ISBN 978-7-5030-1720-9

I. 工… II. 张… III. 变形观测 IV. P227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 151090 号

责任编辑 李建明

封面设计 赵培璧

出版发行 **测绘出版社**

社 址 北京西城区复外三里河 50 号

邮政编码 100045

电 话 010-68512386 68531609

网 址 www.sinomaps.com

印 刷 北京通州区次渠印刷厂

经 销 新华书店

成品规格 184mm×260mm

印 张 25.25

字 数 628 千字

版 次 2007 年 11 月第 1 版

印 次 2007 年 11 月第 1 次印刷

印 数 0001—2000 册

定 价 55.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-1720-9/P·460

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

工程变形监测的分析与预报是一个永恒的课题。变形监测是分析与预报的基础,是一门发展很快的技术。变形分析与预报技术和方法涉及多学科交叉,如系统论和非线性科学等。因此,研究工程变形监测分析与预报的理论具有重要的学术意义及应用价值。

本书是编著者在多年教学、科研(自然科学基金、国际合作项目)和博士学位论文研究的基础上,将研究成果以专著形式出版。全书共分 16 章,其中包括多篇博士论文的有关部分,围绕工程的变形监测分析与预报这一主题,将最新研究成果结合在一起。其主要内容如下:

——变形监测分析与预报的进展。

——工程变形监测分析与预报的基础理论。变形影响因子和变形模型,变形监测方案设计,变形监测技术与方法,变形观测数据处理以及监测资料整理、成果表达和解释等。

——变形分析的系统论方法。变形体系统研究的动力学方法,运动稳定性分析,动力学模型的建立,系统失稳的突变模型,变形分析与预报的输入—输出模型等。

——变形模式的拓扑约束识别及其应用。二、三维变形模式的拓扑约束识别方法。

——基于弹性力学平面和空间问题的变形驱动力反演。

——自适应卡尔曼滤波及其应用。运动点场分析与预报的卡尔曼滤波模型。

——时间序列分析和频谱分析法。时间序列与灰色系统组合模型,频域分析方法、变形动态响应分析。

——变形预报的人工神经网络法,BP 网络及其拓扑结构设计,确定 BP 网络结构的主成分法、大样本法,BP 网络的推广能力及性能评估,BP 网络的智能训练算法、改进算法与分析。

——变形预报神经网络专家系统。神经网络与专家系统集成的方法、神经网络专家系统的结构、规则抽取和功能模块设计。

——小波理论及小波滤波去噪方法。小波分解与重构法去噪、非线性小波变换阈值法去噪、小波函数的选取与去噪效果分析。

——小波多尺度变形分析建模。观测序列小波多尺度变换特征分析,小波多尺度自回归建模,小波多尺度卡尔曼滤波模型。

——小波神经网络变形预测。

——粗糙集理论及其在边坡破坏模式中的应用。边坡变形破坏地质工程模型的特征及建模方法,基于分形理论的边坡岩体结构特征粗糙预测,边坡变形破坏模式粗糙集判定。

——基于粗糙集理论的边坡稳定性预测,边坡稳定性粗糙集神经网络预测。

——非线性估计理论及其在变形监测中的应用。非线性参数模型、非参数模型和半参数模型的估计方法,非线性估计理论在变形监测中的应用。

——变形监测分析与预报的发展展望。

本书稿的编写分工是:

——张正禄教授、博士、博士生导师(武汉大学),撰写第 1 章、第 2 章、第 16 章,并负责全书的组织、设计及统稿工作。

——黄全义教授、博士、博士生导师(清华大学),撰写第 8 章、第 9 章。

——文鸿雁教授、博士、硕士生导师(桂林工学院),撰写第 10 章、第 11 章、第 12 章。

- 邓跃进副教授、博士、硕士生导师(武汉大学),撰写第3章、第6章。
- 蒋征副教授、博士、硕士生导师(武汉大学),撰写第4章、第5章。
- 包惠明教授、博士、硕士生导师(桂林工学院),撰写第13章、第14章。
- 张军副教授、博士、硕士生导师(华中农业大学),撰写第7章。
- 张松林讲师、博士(同济大学),撰写第15章。

感谢中科院测量与地球物理所许厚泽院士、中国地震局地震研究所周硕愚研究员、武汉大学灾害预防研究所王新洲教授对本书的推荐。

本书中的研究得到了国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目、国际合作项目和其他基金(见后记)的资助,特别是测绘科技专著出版基金的资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有谬误之处,敬请读者批评指正。

编著者

2006年12月18日

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
§ 1.1 工程的变形监测分析与预报的进展	(1)
§ 1.2 本书的主要内容	(4)
第 2 章 变形监测分析与预报的基础理论	(6)
§ 2.1 基础知识	(6)
§ 2.2 变形监测方案设计.....	(11)
§ 2.3 变形监测方法和自动化.....	(16)
§ 2.4 变形监测数据处理.....	(23)
§ 2.5 变形监测资料整理及成果表达和解释.....	(38)
§ 2.6 实例分析.....	(46)
第 3 章 变形分析的系统论方法	(51)
§ 3.1 系统科学基本理论.....	(51)
§ 3.2 变形分析与预报的系统论原理.....	(52)
§ 3.3 变形体系统研究的动力学方法.....	(58)
§ 3.4 根据监测资料计算非线性动力学特征.....	(80)
§ 3.5 变形体系统的运动稳定性分析.....	(84)
§ 3.6 变形体系统失稳的突变模型.....	(89)
§ 3.7 自组织临界模型.....	(95)
§ 3.8 数据处理的组合方法.....	(99)
第 4 章 变形模型的拓扑约束识别	(105)
§ 4.1 引言	(105)
§ 4.2 聚类分析相似性测度	(105)
§ 4.3 变形模型及其检验	(106)
§ 4.4 变形模式的拓扑约束识别	(108)
§ 4.5 拓扑约束识别中多传感器观测数据的应用	(114)
§ 4.6 应用说明	(116)
§ 4.7 应用实例	(120)
第 5 章 变形驱动力反演	(128)
§ 5.1 引言	(128)
§ 5.2 弹性力学基本方程	(129)
§ 5.3 弹性力学平面问题的有限单元法	(130)
§ 5.4 基于弹性力学平面问题的变形驱动力反演	(134)
§ 5.5 基于弹性力学空间问题的变形驱动力反演	(140)
第 6 章 自适应卡尔曼滤波	(146)
§ 6.1 卡尔曼滤波基本模型	(146)

§ 6.2	自适应卡尔曼滤波	(148)
§ 6.3	卡尔曼滤波在测量和变形分析中的应用	(149)
第 7 章	变形的时序分析和频谱分析法	(155)
§ 7.1	时间序列分析法的基本理论	(155)
§ 7.2	时间序列与灰色系统组合模型	(163)
§ 7.3	频域分析方法	(168)
§ 7.4	变形动态响应分析	(170)
§ 7.5	变形时序分析的应用实例	(171)
第 8 章	变形预报的人工神经网络法	(174)
§ 8.1	概述	(174)
§ 8.2	BP 网络及其训练算法	(178)
§ 8.3	BP 网络拓扑结构设计	(182)
§ 8.4	相似相关系数法确定 BP 网络结构	(186)
§ 8.5	主成分法确定 BP 网络结构	(189)
§ 8.6	大样本法确定 BP 网络结构	(191)
§ 8.7	训练样本的质量对 BP 网络推广能力的影响	(193)
§ 8.8	BP 网络的推广能力及网络性能的评估	(196)
§ 8.9	BP 网络的改进算法分析	(199)
§ 8.10	BP 网络的智能训练算法	(204)
第 9 章	变形预报神经网络专家系统	(210)
§ 9.1	概述	(210)
§ 9.2	神经网络与专家系统集成方法	(217)
§ 9.3	神经网络专家系统的结构	(220)
§ 9.4	神经网络专家系统的功能模块设计	(222)
§ 9.5	神经网络专家系统的规则抽取	(225)
第 10 章	小波理论及小波滤波去噪方法	(232)
§ 10.1	从傅里叶变换到小波分析	(232)
§ 10.2	小波变换	(236)
§ 10.3	小波分解与重构	(242)
§ 10.4	常用小波函数	(246)
§ 10.5	小波分解与重构法去噪	(252)
§ 10.6	非线性小波变换阈值法去噪	(257)
§ 10.7	小波函数的选取与去噪效果	(270)
§ 10.8	小波滤波去噪其它方法	(287)
§ 10.9	小波滤波去噪效果评价指标	(289)
第 11 章	小波多尺度变形分析建模	(291)
§ 11.1	小波多尺度概述	(291)
§ 11.2	观测序列小波多尺度变换特征分析	(293)
§ 11.3	小波多尺度傅里叶时频分析	(296)
§ 11.4	小波多尺度自回归建模	(301)

§ 11.5 小波滤波模型	(303)
第 12 章 小波神经网络变形预测	(313)
§ 12.1 小波神经网络理论	(313)
§ 12.2 小波神经网络变形预测模型及应用	(315)
第 13 章 粗糙集理论及其在边坡破坏模式中的应用	(319)
§ 13.1 粗糙集理论	(319)
§ 13.2 边坡变形破坏地质工程模型	(326)
§ 13.3 基于粗糙集理论的边坡变形破坏地质工程模型判别	(339)
第 14 章 基于粗糙集理论的边坡稳定性预测	(349)
§ 14.1 边坡稳定性评价预测模型	(349)
§ 14.2 边坡稳定性粗糙集神经网络预测	(355)
第 15 章 非线性问题及其在变形分析中的应用	(368)
§ 15.1 概述	(368)
§ 15.2 非线性参数模型的估计方法	(369)
§ 15.3 非线性非参数模型的估计方法	(371)
§ 15.4 非线性半参数模型的估计方法	(374)
§ 15.5 变形分析中的非线性问题及应用	(378)
第 16 章 变形监测分析与预报的发展展望	(381)
§ 16.1 工程的变形监测技术的发展展望	(381)
§ 16.2 工程的变形分析和预报的发展展望	(383)
§ 16.3 工程安全监测、分析与预报综合信息系统	(386)
参考文献	(387)
后记	(393)

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	(1)
§ 1.1 Progress of Deformation Monitoring Analysis and Prediction for Engineering Constructions	(1)
§ 1.2 Main Contents of This Book	(4)
Chapter 2 The Rudiments of Deformation Monitoring Analysis and Prediction	(6)
§ 2.1 Fundamentals	(6)
§ 2.2 Design of Deformation Monitoring Scheme	(11)
§ 2.3 Deformation Monitoring Methods and Its Automatization	(16)
§ 2.4 Data Processing of Deformation Monitoring	(23)
§ 2.5 Arrangement Expression and Explanation of Deformation Monitoring Data	(38)
§ 2.6 Analysis of Examples	(46)
Chapter 3 System Theory of Deformation Analysis	(51)
§ 3.1 Fundamental Theory of System Science	(51)
§ 3.2 Principle of System Theory on Deformation Analysis and Prediction	(52)
§ 3.3 Dynamics Approach of Deformation System	(58)
§ 3.4 Calculating the Nonlinear Dynamics Characteristic according to Monitoring Data	(80)
§ 3.5 Analysis on Motion Stability of Deformation System	(84)
§ 3.6 Catastrophe Model of the Unstable Deformation System	(89)
§ 3.7 Self-organized Criticality Model	(95)
§ 3.8 Group Method of Data Handling	(99)
Chapter 4 Topological Constrained Recognition of Deformation Model	(105)
§ 4.1 Introduction	(105)
§ 4.2 Measure of Similarity in Clustering Analysis	(105)
§ 4.3 Deformation Model and Its Statistical Test	(106)
§ 4.4 Deformation Model Recognition under Topological Constrain	(108)
§ 4.5 Applying Multi-sensor Monitoring Data under Recognition of Topological Constrain	(114)
§ 4.6 Application explanation	(116)
§ 4.7 Application Examples	(120)
Chapter 5 Inversion of Deformation Driving Force	(128)
§ 5.1 Introduction	(128)
§ 5.2 Basic Formulae of Elastic Mechanics	(129)
§ 5.3 Finite Element Methods of Elastic Plane Problem	(130)
§ 5.4 Inversion of Deformation Driving Force Based on Elasticity Mechanics Plane Problems	(134)

§ 5.5	Inversion of Deformation Driving Force Based on Elasticit Mechanics Spatial Problems	(140)
Chapter 6	Self-adaptive Kalman Filtering	(146)
§ 6.1	Basical Model of Kalman Filtering	(146)
§ 6.2	Self-adaptive Kalman Filtering	(148)
§ 6.3	Application of Kalman Filtering in Surveying and Deformation Analysis	(149)
Chapter 7	Time Series Analysis and Frequency Spectrum Analysis of Deformation	(155)
§ 7.1	Basic Theory of Time Series Analysis	(155)
§ 7.2	Combined Model of Time Series Analysis and Grey System	(163)
§ 7.3	Frequency region Analysis method	(168)
§ 7.4	Dynamic Response Analysis of Deformation	(170)
§ 7.5	Application Examples of Deformation Time Series Analysis	(171)
Chapter 8	Deformation Prediction Using Artificial Neural Network	(174)
§ 8.1	Introduction	(174)
§ 8.2	BP Network and Its Training Algorithm	(178)
§ 8.3	Designing for the Topological Structure of BP Network	(182)
§ 8.4	Determining the Structure of BP Network by Similarity and Corelativity Coefficient Method	(186)
§ 8.5	Determining the Structure of BP Network by Main Element Analysis Method	(189)
§ 8.6	Determining the Structure of BP Network by Large Number Samples Method	(191)
§ 8.7	Effect of the Quality of Training Samples to the Extendibility of BP Network	(193)
§ 8.8	Evaluation of Extendibility and Capability of BP Network	(196)
§ 8.9	Improved Algorithm of BP Network	(199)
§ 8.10	Intelligent Training Algorithm of BP Network	(204)
Chapter 9	Expert System of Deformation Prediction Neural Network	(210)
§ 9.1	Introduction	(210)
§ 9.2	Integrated Method of Neural Network and Expert System	(217)
§ 9.3	Structure of Neural Network Expert System	(220)
§ 9.4	Design of the Function Modules of Neural Network Expert System	(222)
§ 9.5	Regular Extraction of Neural Network Expert System	(225)
Chapter 10	Wavelet Theory and Wavelet De-noising Methods	(232)
§ 10.1	From Fourier Transform to Wavelet Analysis	(232)
§ 10.2	Wavelet Transform	(236)
§ 10.3	Wavelet Decomposition and Reconstruction Algorithm	(242)
§ 10.4	General Wavelet Functions	(246)
§ 10.5	De-noising in Wavelet Decomposition and Reconstruction Method	(252)
§ 10.6	Nonlinear Wavelet Transform Threshold Value Method for De-noising	(257)

§ 10.7	The Choice of Wavelet Functions and De-noising Effect	(270)
§ 10.8	Other Wavelet Filtering and De-noising Algorithms	(287)
§ 10.9	The Evaluating Indicators of Wavelet Filtering and De-noising Effect	(289)
Chapter 11	Wavelet Multi-scale Deformation Analysis Modeling	(291)
§ 11.1	The Outline of Wavelet Multi-scale	(291)
§ 11.2	The Wavelet Multi-scale Transform Characteristic Analysis of Observation Sequences	(293)
§ 11.3	Wavelet Multi-scale Fourier Time-frequent Analysis	(296)
§ 11.4	Wavelet Multi-scale Autoregression Modeling	(301)
§ 11.5	Wavelet Filtering Model	(303)
Chapter 12	Wavelet Neural Network Deformation Prediction	(313)
§ 12.1	Wavelet Neural Network Theory	(313)
§ 12.2	The Deformation Prediction Modeling and Application of Wavelet Neural Network	(315)
Chapter 13	Rough Set Theory and Application in the Model of Slope Deformation or Failure	(319)
§ 13.1	Rough Set Theory	(319)
§ 13.2	The Geological Engineering Model of Slope Deformation or Failure	(326)
§ 13.3	Geological Engineering Model Distinguish of Slope Deformation or Failure Based on Rough Set Theory	(339)
Chapter 14	Slope Stability Prediction Based on the Rough Set Theory	(349)
§ 14.1	Evaluation and Prediction Model of Slope Stability	(349)
§ 14.2	Rough Set Neural Network Prediction of Slope Stability	(355)
Chapter 15	Nonlinear Problem and Its Application in Deformation Analysis	(368)
§ 15.1	Overview	(368)
§ 15.2	Estimating Methods of Nonlinear Parametric Model	(369)
§ 15.3	Estimation Method of Nonlinear Nonparametric Model	(371)
§ 15.4	Estimation Method of Nonlinear Semi-parametric Model	(374)
§ 15.5	Nonlinear Problems in Deformation Analysis and Its Application	(371)
Chapter 16	Development Prospects for Deformation Monitoring Analysis and Prediction	(381)
§ 16.1	Development Prospects for Engineering Deformation Monitoring Techniques	(381)
§ 16.2	Development Prospects for Engineering Deformation Analysis and Prediction	(383)
§ 16.3	Integrated Information System of Engineering Safety Monitoring, Analysis and Prediction	(386)
Reference	(387)
Postscript	(393)

第 1 章 绪 论

§ 1.1 工程的变形监测分析与预报的进展

1.1.1 工程的变形监测技术的进展

工程的变形监测技术(包括仪器、方法和手段等)可分为大地测量和非大地测量两种。在仪器方面,大地测量仪器又分传统的和现代的大地测量仪器,通用的和专用的大地测量仪器。传统的大地测量仪器主要有各种丈量工具、光学经纬仪、光学水准仪、电磁波测距仪、电子经纬仪、电子水准仪、电子全站仪等;现代的大地测量仪器则有 GPS(global positioning system,全球定位系统)接收机、测量机器人、激光跟踪仪、激光扫描仪等;它们大多是通用的大地测量仪器。专用的大地测量仪器有:精密的伸缩仪、各种铅直仪、准直仪、测倾仪、多点位移计和液体静力水准仪等;非大地测量仪器主要是指埋设在工程(如大坝、隧道)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、收敛计、测力锚杆、压力盒、温度计、气压计等。此外,非大地测量仪器还包括各种与摄影测量有关的仪器。

工程变形监测的方法包括:构网(地面边角网、导线网、混合网、水准网以及 GPS 网等)平差法、各种交会法、极坐标法、卫星定位法、激光雷达法以及几何水准法、三角高程法、液体静力水准测量法、基准线法、摄影测量法、激光扫描法等。

变形监测技术发展很快,特别是仪器的发展,从单纯光学的、机械的、电子的仪器到光机电一体化的仪器集成系统。变形监测技术的进步与自动控制、精密机械、光电、微电子、计算机、航天、传感和通讯等科学与技术的进步密不可分。发展的特点可概括为:自动化、智能化、数字化、网络化以及高精度、高可靠性、实时、连续、动态、遥控、遥测等。

1.1.2 工程的变形分析与预报的进展

变形分析包括变形的几何分析和变形的物理解释。几何分析涉及变形体几何状态及其变化的描述,物理解释涉及力或引起变形的原因。

1. 变形的几何分析

变形监测网分为参考网和相对网。变形的几何分析包括变形监测网的几何分析和监测点的几何分析。

变形监测网的几何分析主要是参考点的稳定性分析和相对于稳定基准的监测网点的变形分析。在 20 世纪 20 年代,Zoelly H 和 Lang S 就研究了从两期观测值的差值判断点位的稳定性,Pelzer H 于 1971 年提出了平均间隙法和最大间隙法,Chrzanovski A 和陈永奇等提出了稳健 S 变换法,国内外研讨的很多自由网平差、拟稳平差等都与变形监测网参考点的稳定性分析有关。

变形体的空间变形状态可由 9 个变形参数描述,这些变形参数可由变形体上离散点的

位移进行估计。当存在不连续带时,识别变形块体具有重要意义,由变形观测数据进行变形模型的识别、判断是变形的几何分析中的一大内容。

监测点的几何分析基于在监测点上进行的周期或持续离散的观测,从而构成变形的时间序列。该时间序列一般是非平稳的,通过差分、拟合或变换等处理方法,可得到平稳的时间序列;然后,利用时间序列理论建立平稳随机时间序列的线性随机模型。因此,监测点的几何分析是实现了对时间序列的辨识、预测与控制的有效途径。对于识别变形系统输出的随机特性和变形随机性漂移部分的预报具有重要意义。

采用卡尔曼滤波法建立变形监测点的运动模型可以得到监测点的位移、速度和加速度估值,将卡尔曼滤波方法与有限单元法结合起来,用有限单元法建立变形系统的状态方程,由变形观测量构成系统的观测方程,则可得到变形体的力学状态变量。

变形体在动荷载作用下的动态变形与静荷载作用下的静态变形有着很大的区别,如桥梁在车辆荷载作用下,高层建筑物在风荷载作用下的动态变形属于周期性振动。利用傅里叶变换提取各种频率的振动成分,可以认识结构对动荷载的响应特性,通过振动频谱还可识别结构物理变化。

几年来迅速发展起来的小波分析理论也被用于动态变形的几何分析。通过对变形观测序列的多分辨分析可发现动态变形特性参数的变化时刻,或在变形信号作的小波分解后再进行重构来实现强噪声下的变形趋势提取,小波分析在动态变形几何分析中的潜力有待进一步挖掘。

对动态变形时间序列的非线性动力学分析是发掘变形系统的动力学特征的一种新的途径。Pack N H 等和 Taken F 提出了动态系统的相空间重构方法,由时间序列重构相空间轨迹以及提取动态系统可预测性指标——李雅普罗夫指数和状态空间的维数是研究混沌系统的基本方法。由观测时间序列重构的相空间轨迹只是一个 D 维有限时间序列,以它为基础建立相空间的非线性动力学模型是一个不适定的逆问题, Haykin S 等提出了利用径向基函数网络模型建立非线性递归预报模型。

2. 变形的物理解释

与几何变形分析不同,变形解释的目的是要确定变形体空间状态及其变化与变形因素(或称之为作用于变形体上的力)之间的关系,以解释产生变形的原因。与运动模型相对应,这类模型称为动力模型。变形的物理解释又分定性和定量解释。在 20 世纪 50 年代以前,对于大坝、边坡等的变形,仅仅是对变形观测值的定性描述和解释。定量解释常用的方法有统计分析法和确定函数法。统计分析法中以回归分析、相关分析为主,意大利的 Tonlali D 把影响大坝位移的因素分为温度、水压及时效变化 3 类,并利用变形和这 3 类因素的观测值采取回归分析方法建立变形和原因的回归方程,这就是物理解释的一种统计方法。徐培亮和刘国林等人都有过研究。

利用变形体的物理力学性质、几何形状及边界条件,以及应力—应变关系建立变形模型,是物理解释的确定函数法。确定函数法是以有限元法、边界元法、离散元法以及有限变形理论为基础,确定变形与原因之间的确定性模型。Chrzanoviski A 和陈永奇等 1981 年进行了基于有限元法的物理解释研究,研制了相应的软件 FEMMA 在此基础上提出了将几何分析和物理解释结合起来进行整体分析的思想。将有限元法和卡尔曼滤波结合起来,用有限元法建立状态方程,用变形监测数据建立观测方程,从另一途径实现了几何分析和物理解释的结合。此外,应用卡尔曼滤波模型和输入—输出模型模拟变形物理过程也有相当多的

研究。上述研究的主要代表有: Pelzer H、Wiugalis S 和 Heuneek O 等人。

1991年,意大利的 Fanelli M A 等提出了用实测位移资料调整有限元确定性数学模型参数来建立位移方程,导致了反演分析法。通过监测得到的位移值反演变形体的物理力学参数,可为设计提供重要反馈信息。1983年,陈久宇利用回归分析法由大坝位移观测资料提取水位引起的位移分量反演混凝土大坝的弹性模量,杨喜中研究了变形参数的随机反演问题。1970年开始的国际地球动力学10年计划,将探讨构造运动的力源作为计划的重点目标,根据大地测量资料反演地壳的构造应力场的研究,王仁、强祖基等、赵少荣、许才军等作了重要工作。反演的作用是明显的,由前期测量资料的反演结果,可提高后续的物理解释精度,并为科学研究提供资料。

系统论、控制论以及非线性动力学方法等,为建立物理解释模型提供了新的方法和思路。在对变形体系统的结构了解不充分的情况下,变形体的荷载—变形模型的函数结构是未知的。在这种情况下,属于基于“黑箱”建模问题。Heine H 研究了 Volterra 核函数级数和模糊人工神经网络建立变形系统的输入—输出模型的方法。Ivankhnenko A G 提出了数据处理的组合方法(Group Method of Data Handling, GMDH)。王秀峰、沈心焯等研究了启发式自组织建模方法,章传银、邓跃进进行了基于 GMDH 建模方法研究。

3. 变形的预报模型

综上所述,在变形几何分析、物理解释建模中,许多学者提出并研究了各种各样的模型。FIG 变形分析专门委员会进行了变形模型分类,如图 1-1 所示。

上述对变形模型分类方法并不是对所有的变形模型都适宜,有的模型可能既有几何模型的性质,又含物理模型的性质,但并不影响对模型的研究。

变形监测、分析的中心问题在于预报,对未来可能的变形进行预报,目的是防灾减灾和为工程设计提供依据。变形体的变形涉及到各种内外因素的复杂影响,准确进行变形或灾害预报将是一个永恒的课题。迄今为止,变形预报研究的主要内容有:变形预报理论、变形预报模型、变形预报工具。

变形预报的基础理论是各种力学(即理论力学、材料力学、断裂力学等)和与变形对象相关各专业的理论知识。由于变形系统的

复杂性,直接应用这些基础理论进行变形预报存在很大的困难,导致了专业学者致力于从数学、物理学的普遍理论中寻求新的途径,非线性系统理论就是近几十年发展起来的备受研究者关注的理论。其中与灾变有密切联系的理论是分叉理论,在 20 世纪 60 年代,法国数学家 Thom R 在动态系统的分叉理论上研究了多参数变化下系统的行为转化,提出了突变(catastrophe)理论。“突变”是自然和社会系统中普遍存在的现象,用非线性系统理论来描述就是动态系统在不同的平衡位置之间分叉(bifurcation),各种的分叉具有其固有特性,可以按照参数(控制因子)分类。Thom R 对于控制因子少于或等于 5 的情况进行了分类,并给出

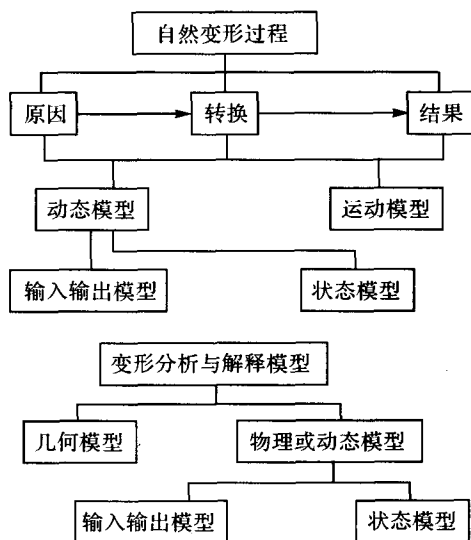


图 1-1 变形模型分类

了每一种突变的突变流形和分叉点集,建立了初等突变理论框架,为解释在环境变化不大时系统行为的突然转化现象、建立突发事件的预报模型提供了理论基础,并被许多研究者所采用。其中用得最多的突变类型是只有两个控制因子的“尖点”突变。动态系统具有混沌解的特性推动了经典的分叉理论。混沌现象首先由 Lorenz E N 在大气系统中发现。混沌现象的存在决定了变形的长期预报是不可能的,从理论上说明了不间断地进行变形监测的必要性。

变形预报模型可以分为基于变形时间序列的预报模型和基于变形原因的预报模型。在变形预报研究的早期,一般是用变形时间序列拟合经验模型得到变形的预报模型,这种做法在 20 世纪 60~70 年代滑坡预报中应用较多。时间序列分析、灰色理论提供了建立基于变形时间序列的预报模型方法。由物理解释所建立的荷载—变形关系模型,无论是统计模型、确定性模型还是混合模型,都可以作为基于变形原因的预报模型。

变形预报是一个需要多学科的研究者开展合作研究的领域。研究历史已经表明,单纯依靠一种理论、一种方法或一个模型,或单纯依据一种现象、一种观测数据是很难对变形及灾害做出可靠预测的。综合多学科的理论与方法,基于多种观测手段所获取的资料,是提高预报的可靠性和精度的有效途径。实现这种综合需要一定的工具支持,在工程地质方面,崔政权提出了系统工程地质的思想,并致力于建立一种集成了多学科的信息和方法的预报系统。建立一个比较完善,集成多学科知识、信息、方法经验等,并能进行自动分析和预报的系统工具还有待长期地研究。

§ 1.2 本书的主要内容

本书共分 16 章,包括以下主要内容:

第 1 章 绪论。综述了变形监测分析与预报的进展,包括:工程变形监测技术的进展,工程变形分析方法的进展,其中又分变形的几何分析、物理解释和变形预报,并对各章内容作了归纳。

第 2 章 工程变形监测分析与预报的基础理论。阐述了变形监测的定义、作用、内容和特点,介绍了一般的动态变形模型、变形影响因子以及变形监测方案设计等基础理论,归纳了变形监测技术与方法,对变形观测数据处理以及监测资料整理、成果表达和解释等作了高度的概括和总结,最后用一实例进行了说明。这一章是全书的基础。

第 3 章 变形分析的系统论方法。该章扼要介绍了系统科学的基本理论和用于变形分析与预报的原理;研究了根据监测资料计算非线性动力学特征,如关联维数、科尔莫戈罗夫、李雅普罗夫指数等的动力学方法;对运动稳定性分析、分岔与结构稳定性、变形体系统失稳突变模型、尖点突变模型、自组织临界模型和数据处理的组合方法等进行了较深入的研究,并进行了实例分析,是学习系统论应用的必读内容。

第 4 章 变形模式的拓扑约束识别。这一章主要研究了二维和三维变形模式的拓扑约束识别方法,并用实例说明了该方法的应用,属于作者的创新性成果。

第 5 章 变形驱动力反演。较深入地研究了基于弹性力学的基本方程和有限单元法;进行了弹性力学平面和空间的变形驱动力反演问题的研究可计算平面边界力及其等效节点荷载、体积力及其等效节点荷载、底部驱动力等;同时给出了二维、三维驱动力反演的步骤。本章对于进行变形的物理解释研究者来说极具参考价值。

第6章 自适应卡尔曼滤波。在介绍卡尔曼滤波基本模型的基础上,给出了自适应卡尔曼滤波模型,讨论了他们在测量和变形分析中的应用。该章与第2章有关内容相呼应,属于变形分析方面值得一读的经典章节。

第7章 变形的时序分析和频谱分析法。介绍了时间序列分析法、频谱分析法的基本理论,研究了时间序列与灰色系统的组合模型,在利用短时傅里叶变换小波分析进行频域分析方面与第11章相联系,同时阐述了变形动态响应分析方法,并进行了应用实例计算分析,与第6章相似,是变形分析与预报方面的重要理论和方法。

第8章 变形预报的人工神经网络法。在叙述人工神经网络基本概念、特征和模型的基础上,对BP网络及其拓扑结构设计、确定BP网络结构的主成分法和大样本法、BP网络的推广能力及性能评估、BP网络的智能训练算法、改进算法与分析等众多方面进行了较深入的研究。本章和第9章一样,都是从事变形分析与预报的研究人员应该掌握的最新知识。

第9章 变形预报神经网络专家系统。主要研究了神经网络与专家系统集成的方法、神经网络专家系统的结构、规则抽取和功能模块设计。

第10章 小波理论及小波滤波去噪方法。系统地介绍了小波分析理论、小波变换和常用小波函数等基础知识;研究了小波分解与去噪方法,即重构法、非线性小波变换阈值法;并进行了小波函数的选取与去噪效果。

第11章 小波多尺度变形分析建模。讲述了小波多尺度分析的概念和特点,进行了观测序列小波多尺度变换特征分析和傅里叶时频分析,研究了小波多尺度自回归建模和小波多尺度卡尔曼滤波模型,给出了实例分析。

第12章 小波神经网络变形预测。叙述了小波神经网络概念和结构,进行了小波神经网络变形预测模型研究和算例分析。第10章到第12章,也是从事变形分析与预报工作的研究人员必须了解与掌握的重要知识。

第13章 粗糙集(rough set,RS)理论及其在边坡破坏模式中的应用。在介绍粗糙集理论及其在工程中的应用之后,阐述了边坡变形破坏地质工程模型的特征及建模方法,研究了基于分形理论的边坡岩体结构特征粗糙预测和边坡变形破坏模式粗糙集判定等内容,对于测量工作者来说,是一种全新的知识。

第14章 基于粗糙集理论的边坡稳定性预测。主要研究了边坡稳定性评价预测模型,以及边坡稳定性粗糙集神经网络预测,并作了算法说明和实例分析。

第15章 非线性问题及其在变形分析中的应用。对非线性参数模型、非参数模型和半参数模型的估计方法进行了归纳和若干研究,指出了变形分析中的非线性问题及应用。

第16章 变形监测分析预报发展展望。结合研究和实践,发表了作者的一些观点。

本书的特点可以归纳为高、新、尖、全四个字。所谓“高”是指起点高,水平高;属于博士学位论文研究内容,多篇论文获优秀博士学位论文奖;“新”即学术思想新、内容新、有创新;“尖”是指研究的内容深入、难度大、尖端性强;所谓“全”是指本书的研究面广、内容丰富、联系紧密、逻辑性强、结构体系好、既有理论,又有实践。本书在写作上注意了章节编排清楚、结构严谨、语句通顺、图表文结合得当。为了便于读者阅读,增加了必要的概述、综述性介绍,章节间还有一定的联系,同时,给出了大量的应用实例。

第2章 变形监测分析与预报的基础理论

§ 2.1 基础知识

2.1.1 变形监测的定义、作用和内容

1. 变形监测的定义

变形监测是对监视对象或物体(简称变形体)进行测量以确定其空间位置随时间变化的特征。变形监测又称变形测量或变形观测,它包括全球性的变形监测、区域性的变形监测和工程的变形监测。全球性的变形监测是对地球自身的动态变化如自转速率变化、极移、潮汐、全球板块运动和地壳形变的监测;区域性的变形监测是对区域性地壳形变和地面沉降的监测;对于工程的变形监测来说,变形体一般包括工程建(构)筑物(以下简称工程建筑物)、机器设备以及其他与工程建设有关的自然或人工对象,例如:大坝、船闸、桥梁、隧道、高层建筑、地下建筑物、大型科学实验设备、车船、飞机、天线、古建筑、油罐、贮矿仓、崩滑体、泥石流、采空区、高边坡、开采沉降区域等都可称为变形体。变形体用一定数量的、有代表性的位于变形体上的离散点(称之为:监测点或目标点)来代表。监测点的变化可以描述变形体的变形。变形体的变形又分为两类:即变形体自身的形变和变形体的刚体位移。变形体自身的形变包括:伸缩、错动、弯曲和扭转四种变形;而刚体位移则含整体平移、整体转动、整体升降和整体倾斜四种变形。变形监测分静态变形监测和动态变形监测,静态变形监测通过周期测量得到,动态变形须通过持续监测得到。

工程的变形监测分析与灾害预报是20世纪70年代发展起来的新兴学科方向。由工程建筑物以及与工程建设有关的对象所可能引发的灾害(称工程灾害),关系到人民生命和财产的安全,受到国际社会的广泛关注。许多国际学术组织,如国际大地测量协会(IAG)、国际测量师联合会(FIG)、国际岩石力学协会(ISRM)、国际大坝委员会(ICOLD)和国际矿山测量协会(ISM)等,都非常重视该领域的研究,定期举行学术会议,交流和研究减少工程灾害的对策。变形监测为变形分析和预报提供基础数据,对于工程的安全来说:监测是基础,分析是手段,预报是目的。工程的变形监测(下面简称变形监测)是工程测量学的重要内容之一。本章主要叙述工程的变形监测和数据处理方面的基本知识,有关变形分析和预报方面更深入的理论和知识将在本书后面各章论述。

2. 变形监测的作用

变形监测的作用主要表现在以下两个方面:

(1) 实用上的作用

保障工程安全,监测各种工程建筑物、机器设备以及与工程建设有关的地质构造的变形,及时发现异常变化,对其稳定性、安全性作出判断,以便采取措施处理,防止事故发生。

(2) 科学上的作用

积累监测分析资料,能更好地解释变形的机理,验证变形的假说,为研究灾害预报的理