



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Research on the Uncertainty of the
Deformation Monitoring Analysis and Predication

魏冠军 党亚民 著

变形监测分析与预报的 不确定性研究



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

变形监测分析与预报的 不确定性研究

Research on the Uncertainty of
the Deformation Monitoring Analysis and Predication

魏冠军 党亚民 著



测绘出版社

· 北京 ·

© 魏冠军 2018

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

变形体的变形是一种不确定性现象,许多自然灾害的发生与变形体在不同时间尺度或不同空间尺度下的变形紧密相关。本书针对变形监测数据、变形模型参数及变形预报中的不确定性问题展开研究,主要包括:不确定性的起源、相关学科领域不确定性问题的研究现状及其不确定性处理的数学方法;以测量不确定度理论与模糊数学为基础,构建以测量不确定度为未知参数的测量数据不确定性评价的函数模型,提出以“模糊熵测度”作为函数模型求解的最优准则并建立相应的算法;推导了变形模型参数不确定性贝叶斯反演分析的递推公式,将马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)算法应用到变形模型参数的后验分布计算中,定量地分析了参数的不确定性;提出了顾及不确定性影响的变形概率预报法,定量地研究了变形预报的不确定性;针对现有的实时变形预报的局限性,提出实时变形概率预报的贝叶斯动态模型。

本书可作为从事测绘、变形监测及数据处理方面的教学、科研工作者的参考书,也可供与数据处理、变形分析相关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变形监测分析与预报的不确定性研究/魏冠军,党亚民
著. —北京:测绘出版社,2018.3
ISBN 978-7-5030-4102-0
I. ①变… II. ①魏… ②党… III. ①变形观测—研究 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 031763 号

责任编辑	巩 岩	封面设计	李 伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	6.75			字 数	130 千字		
版 次	2018 年 3 月第 1 版			印 次	2018 年 3 月第 1 次印刷		
印 数	001—800			定 价	38.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4102-0

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

在自然科学和工程技术领域都存在着大量的不确定性问题,变形监测分析也不例外。许多自然灾害的发生与变形体在不同时间尺度或不同空间尺度下的变形紧密相关,如地震、火山喷发、滑波和泥石流等地质灾害,或由工程引起的地面沉降、崩塌、滑波、大坝溃坝、桥梁垮塌等。客体的形变受地形、地质、气候、水文、材料、荷载、时效等因素的综合影响。这些影响因素具有随机性、模糊性、突发性等特点,并处于动态变化之中,这必然会使不确定性贯穿于变形监测分析的数据获取、模型构建及预报过程之中,给变形监测分析和预报结果带来了一定的不确定性。此外,变形体及其成因又构成了一个复杂的非线性系统,这又增加了变形监测分析与预报的不确定性研究的难度。因此,要提高变形监测分析与预报的精度及其可靠性,必须系统地研究形变监测和预报中的不确定性问题,其研究对灾害预警具有重大理论价值和现实意义。

本书针对变形监测数据、变形模型参数及变形预报中的不确定性展开研究,主要成果如下:

(1)本书研究了不确定性的起源及相关学科的研究现状,研究了不确定性处理的概率论、随机理论、可能性理论、贝叶斯方法、马尔可夫链蒙特卡罗算法、信息熵及不确定性优化理论等数学方法,研究了变形监测分析中不确定性问题的研究进展,并将变形监测分析与预报中的不确定性概括为三大类,即变形输入不确定性、变形模型不确定性和变形预报不确定性。

(2)本书提出了测量数据不确定性度量的最小模糊熵估计方法。以测量不确定度理论与模糊数学为基础,构建以测量不确定度为未知参数的测量数据不确定性评价的函数模型,提出以模糊熵测度作为函数模型求解的最优准则,并建立相应的算法,应用高程监测网数据进行解算并与最小二乘算法结果进行比较,结果表明该方法是可行的。

(3)本书推导了基于贝叶斯理论的变形模型参数不确定性分析的递推公式,并利用马尔可夫链蒙特卡罗算法对变形模型参数的不确定性进行定量分析。利用贝叶斯理论将参数看作随机变量,用概率分布来描述其不确定性,将监测信息和模型结构引起的不确定性用似然函数表示,推导了变形模型参数不确定性的贝叶斯反演分析的递推公式。针对变形模型参数后验分布难以计算的特点,将马尔可夫链蒙特卡罗算法应用到变形模型参数的后验分布计算中,并通过地基沉降逻辑斯谛(logistic)增长曲线模型(非线性)和大坝变形分析的回归模型(线性)实现了本书

提出的方法。计算结果表明,马尔可夫链蒙特卡罗算法能有效地抽样计算变形模型参数的后验分布,适合于线性或非线性变形模型的参数识别和不确定性分析。

(4)本书提出了顾及不确定性影响的变形贝叶斯概率预报法方法,定量地研究了变形预报的不确定性。针对变形预报的不确定性,考虑模型输入不确定性和模型参数不确定性等因素对变形预报结果的影响,为最大限度地利用预报时刻的所有信息,以马尔可夫链蒙特卡罗算法和贝叶斯预报理论为基础,提出了变形概率预报方法,该方法以概率分布的形式描述变形预报的不确定性。变形概率预报方法提供了预测值的可靠性区间,对灾害预警和工程安全性评估具有重要的参考价值。

(5)本书提出实时变形概率预报的贝叶斯动态模型。针对现有的实时变形预报的局限性,基于贝叶斯动态模型,提出实时变形概率预报方法,并建立相应的模型。将实时获得的变形信息更新到模型中,及时地校正、改善变形模型的参数或预报值,使预报结果更接近实测值,尽可能地减少预报误差,降低预报的不确定性,该预报方法适合在线预报。

本书的第1章、第2章(§2.1、§2.2)、第3章、第4章、第5章、第6章由魏冠军著,第2章(§2.3、§2.4)由党亚民著,全书由魏冠军负责总体统稿。

在本书的编写过程中,中国测绘科学研究院的党亚民研究员和章传银研究员、兰州交通大学的闫浩文教授、兰州大学的李琼博士等,给予了悉心指导和帮助。本书还得到了中国测绘科学研究院的薛树强博士、杨强博士的大力帮助,以及兰州交通大学测绘与地理信息学院的孙建国教授、韩峰教授和张黎明副教授等同事的支持。在此谨向给予关心和帮助的所有老师、同事及家人表示诚挚的谢意!在项目研究和本书写作过程中参阅了大量的国内外文献,限于篇幅未能一一列出,在此谨向这些文献的作者表示衷心的感谢!

本书出版得到国家自然科学基金(No.41771002)、甘肃省自然科学基金(No.1508RJZA065)、兰州交通大学科技支撑基金(No.ZC2014002)及兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”基金(No.152022)的联合资助,在此谨向提供大力支持的相关单位和人员表示诚挚的感谢!

由于作者学识和能力所限,书中不妥之处在所难免,敬请同行专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 研究背景及意义	1
§ 1.2 变形监测分析不确定性的研究进展	3
§ 1.3 本书的研究思路及主要内容	8
第 2 章 不确定性信息处理的数学方法研究	11
§ 2.1 不确定性信息处理的随机数学方法	11
§ 2.2 不确定性信息处理的贝叶斯方法	14
§ 2.3 不确定性信息处理的模糊数学方法	18
§ 2.4 不确定性问题处理的优化方法	24
第 3 章 基于信息熵的测量数据不确定性度量方法研究	29
§ 3.1 测量数据的不确定性	29
§ 3.2 测量数据不确定性的模糊数描述	30
§ 3.3 测量不确定性度量的最小模糊熵估计	35
§ 3.4 最小模糊熵估计在变形监测网数据不确定性处理中的应用	39
第 4 章 基于 MCMC 算法的变形模型参数不确定性贝叶斯反演分析	43
§ 4.1 参数不确定性及其反演分析	43
§ 4.2 变形模型参数贝叶斯不确定性反演分析	45
§ 4.3 基于 MCMC 算法的参数不确定分析	48
§ 4.4 地基沉降逻辑斯谛增长曲线模型参数不定性分析	56
§ 4.5 大坝变形预报的多元回归模型参数不确定性分析	64
第 5 章 顾及不确定性影响的变形概率预报法	68
§ 5.1 预报的不确定性	68
§ 5.2 变形贝叶斯概率预报原理	69
§ 5.3 数值试验与分析	73

第 6 章 基于贝叶斯动态模型的实时变形概率预报	84
§ 6.1 贝叶斯动态模型	84
§ 6.2 基于贝叶斯动态模型的实时变形概率预报	87
§ 6.3 工程实例分析	88
参考文献	91

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Research background	1
§ 1.2	The progress of uncertainty research of deformation monitoring and analysis	3
§ 1.3	Research ideas and content of this book	8
Chapter 2	Research on the mathematical methods of uncertainty information processing	11
§ 2.1	The random mathematical methods of uncertainty information processing	11
§ 2.2	The Bayesian methods of uncertainty information processing ...	14
§ 2.3	The fuzzy mathematical methods of uncertainty information processing	18
§ 2.4	An optimization method for handling uncertainty problem	24
Chapter 3	The uncertainty measurement of the deformation monitoring data based on information entropy theory	29
§ 3.1	The uncertainty of survey data	29
§ 3.2	Using fuzzy mathematics to describe the uncertainty of survey data	30
§ 3.3	Measurement the uncertainty of survey data based on least fuzzy entropy estimation	35
§ 3.4	Using the least fuzzy entropy estimation to process the uncertainty of deformation monitoring network data	39
Chapter 4	Bayes inverse analysis of deformation model parameters uncertainty based on MCMC algorithm	43
§ 4.1	Parameter uncertainty and its inverse analysis	43
§ 4.2	Paramater uncertainty of deformation model using Bayesian inverse analysis	45

§ 4.3	Parameter uncertainty analysis based on MCMC algorithm	48
§ 4.4	Parameter uncertainty analysis of logistic growth curve of settlement model	56
§ 4.5	Parameter uncertainty analysis of multiple regression model for dam deformation prediction	64
Chapter 5	Methed deformation probability prediction considering the influence of uncertainty factors	68
§ 5.1	Prediction uncertainty	68
§ 5.2	Bayesian probability prediction principle of deformation	69
§ 5.3	Numerical experiment and analysis	73
Chapter 6	Real-time deformation probability prediction based on Bayesian dynamic model	84
§ 6.1	Bayesian dynamic model	84
§ 6.2	Real-time deformation probability prediction based on Bayesian dynamic model	87
§ 6.3	Engineering case analysis	88
References		91

第1章 绪论

§ 1.1 研究背景及意义

在自然科学和工程技术领域都存在着大量的不确定性问题,变形监测分析也不例外。变形是自然界中普遍存在的现象,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。同时,变形又是一种不确定性现象(尹晖, 2002),其受到地形、地质、气候、水文、材料、荷载、时效等因素的综合影响,这些影响因素具有随机性、模糊性、突发性等特点(杨杰等, 2004),并处于不断的动态变化之中。

许多自然灾害的发生与变形体在不同时间尺度和空间尺度下的变形紧密相关,如地震、滑坡和泥石流等地质灾害,由工程引起的地面沉降、崩塌、滑坡、溃坝、桥梁及建筑物垮塌等工程灾害也与变形体的变形有密切关系。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、大跨度桥梁、隧道、高速铁路、城市地铁等)如雨后春笋般涌现,一旦变形超出设计允许值,工程建筑物就可能遭受损失甚至出现大坝溃坝、桥梁垮塌等巨大灾害,这些灾害带来的损失也非常巨大(刘祖强等, 2008)。在保护和改善环境资源、预报和避免灾害发生的研究领域中,现代大地测量技术正发挥着前所未有的作用(郑立中等, 1994; 宁津生等, 1997; 陈俊勇, 2000; 岳焕印等, 2001),其研究内容涉及:全球性的变形、各种地球动力学现象的监测和解释,主要使用 GPS、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星重力梯度测量等技术手段;区域性的变形,如小尺度范围内的活动断裂带、火山活动区、城市地面沉降的监测,主要使用 GPS、合成孔径雷达干涉测量(interferometry SAR, InSAR)等技术手段;局部性的变形及工程变形,主要使用 GPS、精密水准测量、精密三角测量、高精度自动化的全站仪监测系统。利用变形监测反演理论,我国在 1993 年准确地预报了 1996 年发生的丽江大地震;通过大地测量变形监测,长江水利委员会和地方科技人员成功地预报了 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新滩的大型滑坡,将灾害损失降到最低;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发挥了巨大作用,避免了荆江大堤的灾难性分洪(黄声享等, 2010)。因此,科学、准确、及时地监测和预报变形体的变形过程就显得尤为重要,对工程的施工和运营管理及人民生命财产安全的保护都具有十分重要的意义。

国内外相关学者对变形监测分析及不确定性给予高度的关注(陈永奇等, 1998; 党亚民, 1998; Acar et al, 2006; Neumann et al, 2006a, 2006b; Eichhorn, 2007; 李珍玉等, 2008; 张正禄等, 2010; 尹晖等, 2016)。诸多国际学术组织, 如国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)、国际测量师联合会(Fédération International des Géomètres, FIG)、国际岩石力学协会(International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM)、国际大坝委员会(International Commission on Large Dams, ICOLD)、国际矿山测量协会(International Society for Mine Surveying, ISM)等定期进行学术交流。为了深入分析变形监测分析方法, 国际测量师联合会于 1978 成立了变形观测分析专门委员会, 定期召开专业会议研究对策。2005 年 5 月在伊朗德黑兰召开的国际大坝委员会第 73 届年会上, 委员会专门组织召开了大坝工程的不确定性评估专题研讨会, 议题涉及不确定性因素与对不确定性因素的评价方法、水文不确定性、工程地质不确定性、混凝土大坝安全评价的不确定性、土石坝安全评价的不确定性、大坝监测及测量的不确定性等内容(杨杰, 2006)。此外, 变形灾害的监测与防治也受到各级政府及主管部门的重视, 《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》第 10 个重点领域“公共安全”第 62 个优先主题“重大自然灾害监测与防御”中明确指出: 要重点研究开发地震、地质灾害、溃坝、决堤险情等重大灾害的监测预警技术及重大自然灾害综合风险分析评估技术。

变形监测分析研究涉及测绘、地球物理、地质、水文、力学等多学科知识。综观变形监测分析的各项研究, 从变形基准的选择到各类监测数据的人工或自动化采集, 从监测数据的误差处理分析到监测数据序列的各类模型拟合与预报, 从变形模型物理力学参数的反演分析到变形预报结果和可靠性度量及最终的变形灾害风险分析、综合评价与决策, 各个环节存在着以随机性、模糊性、灰性、未确知性、混沌性等为特征的不确定性, 有时这些不确定性会达到很高的程度。各种不确定性因素在一定程度上降低了变形分析结果的准确度及可靠性。如何科学合理地分析变形过程中的不确定性问题? 考虑其对变形分析与预报结果的影响, 亟须研究顾及不确定性因素的变形监测分析与预报的新理论与方法。

综上所述, 不确定性对工程的影响是巨大的, 给工程设计、安全监控带来了巨大的困难, 设计时往往为了保证工程的绝对安全、增加安全系数, 从而增加工程的成本; 反之, 如果不考虑不确定性因素的影响, 就可能造成工程的破坏, 造成经济和人身安全上的巨大损失(林育梁, 2009)。因此, 研究变形监测分析过程中的不确定性因素、考虑其对变形分析与预报结果的影响的意义在于: 有利于提高变形监测分析与预报的精度及其可靠性; 有助于反馈工程设计, 验证设计参数的正确性; 有利于对工程的稳定性、安全性做出更合理判断, 为工程安全评价及科学决策提供依据, 从而保护国家及人民生命财产安全。

§ 1.2 变形监测分析不确定性的研究进展

1.2.1 不确定性及其研究现状

不确定性一词最早出现于1836年穆勒的《政治经济学是否有用》一文(李德毅等,2004)。德国物理学家海森伯于1927年在一篇题为《关于量子论的运动学和力学的直觉内容》的文章中首先提出测不准原理,指出了由于量子的存在而导致对两个共轭变量同时进行测量的不可能性,表明了获得严格精确的初值在原理上是不可能的,从而产生了不确定性。

不确定性是指事物在客观或主观上不能完全明确确定的属性,由事物变化环境条件的随机性、模糊性、不精确及非线性等因素决定。不确定性是一个很宽泛的术语,它通常涵盖很多概念。从信息分类的角度,将不确定性分为四种形式:随机信息、模糊信息、灰色信息和未确知信息。随机信息是由随机试验获得的信息,它描述非此即彼现象;模糊信息是由概念的外延不清晰而产生的不确定性信息,它描述亦此亦彼现象;灰色信息是由噪声干扰的存在和接收能力的限制而导致的不确定性信息;未确知信息完全是由主观原因引起不确定性的信息。从研究对象的不确定性类型角度,不确定性主要分为三类:①客观对象本身具有的随机性;②人们对客观对象认识和知识不完备所引起的不确定性;③人们对于客观对象的概念模糊而引起的不确定性。

由于不确定性的普遍性和现实性,因而受到国际学术界的广泛重视,成为当前各学科领域研究中的一个热点和难点。各个学科也开始研究各自领域内的不确定性现象,如在水文监测过程及预报的不确定性(Beven,1993;王书功,2010)、水质监测的不确定性(Beck,1987a,1987b;Krzysztofowicz et al,2000)、气候变化的不确定性(Mann et al,1999;龚道溢等,2002)、地震工程中的不确定性(王时标等,1994;王晓青等,2007)、岩土工程中的不确定性(冷伍明等,1995;林育梁,2009;张洁,2011)等方面展开了深入研究,取得了一定的成果。特别是近年来,“不确定性”一词已经成为测绘领域科学文献中一个重要的主题。特别是在地理信息科学(geographic information science, GIS)领域,不确定性研究已经成为一个很重要的研究领域(Goodchild et al,1989;刘文宝,1995;史文中等,1998;李大军,2003)。GIS中不确定性的研究主要集中在地理空间数据不确定性方面,研究涉及位置不确定性、属性不确定性、不确定性的可视化模型及时域不确定性,并在数据不完整等方面进行了非常有意义的探索。此外,国内外众多学者对遥感信息不确定性也展开了研究,如地面控制点的不确定性(葛咏等,2006)、遥感参数反演的不确定性(李小文等,1997;王锦地等,2004)等。这些理论成果从不同的专业领域和不同角度、运用不同的方法描述和处理各类不确定性问题。

自然科学和工程技术领域都存在着大量的不确定性,如量子力学中粒子位置的不确定性、GIS 中空间数据的不确定性、岩土与结构材料本构关系及参数的不确定性、工程设计与优化的不确定性等,科学界对不确定性问题的研究极大地推动了不确定性问题的数学处理理论与方法的发展。早在 17 世纪概率论就成为了研究不确定性现象的方法,概率论的目的是寻求不确定性中的确定性,随后在 18 世纪和 19 世纪出现了数理统计和随机过程,以此来寻求不确定性中的确定性(即统计确定性或统计规律性)。自 20 世纪以来,研究不确定性问题的理论得到快速的发展:40 年代出现的人工神经网络特别适合处理需要同时考虑多种不确定性因素和不同条件的、不精确的信息;60 年代出现的遗传算法从生物遗传学的角度出发,探讨了诸多不确定性系统的变化与发展,是研究不确定性系统最优化问题的好方法之一;60 年代,美国计算机与控制论专家扎德(1965)提出模糊(fuzzy)集概念,建立了研究模糊不确定性问题的理论方法,迄今已成为一个较为完善的数学分支;70 年代出现的突变理论用于研究不确定性事物的突发性;80 年代,邓聚龙(1990)提出的灰色系统理论以小样本、贫信息的不确定性系统为研究对象,大大地改善了由于信息不足而对不确定性问题的研究无能为力的状况;同时期,波兰数学家 Pawlak(1982)提出粗糙集理论(简称 RS 理论),是一种从知识分类入手来处理不精确、不确定与不完全数据的新数学方法;90 年代,哈尔滨建筑工程学院王光远(1990)揭开了未确知数学的第一页,开创了研究未确知信息的数学表达和处理方法的新途径;90 年代,王清印(1992)建立了泛灰集,尝试通过“糰”来包含各种类型的不确定性信息,讨论了泛灰数的序关系、泛灰数的代数运算性质及简单灰代数方程和求解问题,为灰信息的定量描述提供了新途径;90 年代,李德毅等(1995)提出了云理论。人工智能不确定性的知识表示、学习和推理问题也是当前研究的热点,此外,熵理论、粒计算、证据理论等不确定性处理方法的研究成果从不同角度、不同侧面论述了描述和处理各类不确定性的理论和方法(苗夺谦等,2011)。

工程领域的不确定性研究一般都涉及复杂的非线性问题,除了上文提到的不确定性处理的数学知识外,还需要非线性、最优化等理论的支持。随着人类的探索和社会的进步,不确定性及其理论将不断发展完善(刘宝碁等,2005)。

1.2.2 变形监测分析的不确定性及其研究进展

1. 变形监测分析的不确定性

变形监测分析不确定性产生的原因有两方面:一方面是受自然环境因素、地质条件及各种荷载(力)等综合影响,且存在的动态变化而导致的变形过程不确定性;另一方面,由于监测数据误差的存在,难以建立精确的物理力学参数模型来描述、模拟和研究连续复杂的动态变形过程,这种不确定性也是显而易见的。

变形监测分析与预报的不确定性可大致归纳为以下几个方面。

1) 变形监测数据的不确定性

对变形监测而言,一般涉及位移、应力、应变、渗流、温度、荷载等监测量,监测仪器性能及观测方法的限制,必然会导致观测值带有不同程度的误差,误差本身是不确定性的。对水工结构来说,上下游的水位变化往往难以预料,水位的不确定性会导致坝基扬压力的不确定性,温度荷载也具有不确定性。此外,变形自动化监测系统运行过程中产生的数据噪声、信号异常等也属于数据的不确定性。

2) 变形反演模型及参数的不确定性

为了提供变形监测的物理解释、变形分析及灾害预警,需要建立变形体的变形与变形原因之间的关系。由于受变形体的岩土体性质变异、结构材料等影响,很难建立精确的数学模型来解释变形产生的原因,并提供变形分析,因此要对变形的机理、模式及其环境条件做出某些假设和概化,且通过不精确的数学模型反映变形过程固有的不确定性。

此外,由于变形体的材料组成不可能是理想均质的,材料性质具有时间和空间变异性引起的随机性,使得变形反演模型的物理、力学参数具有不确定性,因此通过参数反演分析得到的参数也只能是近似等效参数。此外,如果采用不同的模型和不同的分析方法,参数的计算结果也不尽相同,也存在着一定的不确定性。

3) 变形预报的不确定性

变形监测只是手段,而科学的变形预报才是目的。由于存在监测数据的不确定性、反演模型及参数的不确定性,故变形预报的不确定性一定存在。目前回归分析法和确定函数法是变形预报的常用方法。利用回归分析建立所测量的荷载和变形值的函数关系,然后根据所建立的函数进行预报。在回归分析中,有时选用何种因子和该因子用何种表达式只是一种推测,而且变形因子的多样性和某些因子的不可测性、因子之间关系的模糊性,使得回归分析的预报结果与实际存在一定的偏差,实质上,这种偏差也是一种不确定性。确定函数法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,利用确定的函数模型预报在荷载作用下变形体的变形趋势。但组成变形体的岩土介质不均质、非连续,使变形体不可能是完全的弹性体。因此,确定函数法可能存在一系列误差,造成变形预报的不确定性。

此外,有些学者采用有关的数学理论与方法直接对变形监测的时间序列数据进行预报。但是采用不同数学方法得到的预报结果之间存在一定的偏差,这种偏差实质上也是一种不确定性。

2. 变形监测分析不确定性的研究进展

国内外学者针对变形监测中各种不确定性问题进行了较深入的研究,本书将变形监测分析的不确定性研究归纳为以下几个方面。

1) 监测数据的不确定性研究进展

变形监测数据的质量及不确定性将直接影响变形位移量计算的正确性。在测绘领域,关于测量数据的不确定性研究出现较早。18 世纪末,在测量学、天文测量学等实践中,有人提出如何消除由观测误差引起的观测量之间矛盾的问题,即如何从带有误差的观测值中找出未知量的最佳估值。1794 年,德国数学家高斯首先提出了解决这个问题的方法,即最小二乘算法。现在国内外学者仍普遍采用最小二乘算法对变形监测数据的随机误差进行处理。

在变形监测过程中,监测点的位移与参考系有关,参考系不同,则平差的方法也不同。早在 1962 年,奥地利大地测量学家 Messl 引进了自由网平差的概念,提出了内制约平差方法;德国测量学者 Pelzer(1974)应用统计检验理论来分析参考点的稳定性,提出以方差分析进行整体检验为基础的 Hannover 法;瑞士测量工程师 Keller 扩展了内制约平差方法,即广义的赫尔默特变换;美国学者 Prescott 提出了外坐标平差法,用于分析地质断层两边地壳的相对运动。我国大地测量学者也对此问题进行了深入研究:周江文提出拟稳平差原理,辩证地将监测网中的点划分为拟稳点与形变点,较好地解决了形变监测分析中秩亏问题,随后又提出相对属度的概念,创建了基于相对属性进行综合评判和比较的名次法,将拟稳平差理论进一步完善;陶本藻(1982)在自由网平差及拟稳平差的性质、解的转换方面做了系统而深入的研究,丰富了自由网平差理论,使得自由网平差与拟稳平差迅速地在工程实践中得到应用;陈永奇(1983)推导了一个广义的假设模型。此外,一些学者将模糊聚类方法应用于基准点稳定性的选择(吴子安,1987;王树元,1989)、大坝安全监控模型中的因子多重相关性及其不确定性问题,以及在不确定性因素影响下大坝安全监测基准值的修正问题(杨杰等,2006)。

为了消除或削弱粗差对估值的影响,荷兰学者 Baarda(1968)提出数据探测法和可靠性理论,为粗差的探测研究奠定了基础。我国学者于 20 世纪 80 年代中期开始系统地研究抗差统计学在大地测量中的应用,一些学者对此进行了深入研究,形成了具有特色的抗差—最小二乘估计理论(李德仁,1988;周江文,1989;黄幼才,1990;杨元喜,1991);赵斌(1998)在大坝观测数据处理中引入污染分析、观测对权等概念,以逐步消除粗差的影响,最终得到合理的参数估计;针对测量数据中的异常值,一些学者用贝叶斯统计进行测量数据中异常值探测的研究(Weise et al, 1993;Soukup, 2001;Koch, 1990;Mualla, 2003);郑东健(2000)用平均杠杆理论识别观测数据的异常值,实现了误差的灰箱诊断;一些学者利用模糊理论研究测量数据的随机性和不精确性(Shyllon, 2001;Kutterer, 2001;Neumann et al, 2008;王新洲等, 2007)。

2) 变形反演模型及参数的不确定性研究进展

受各种不确定性因素的影响,变形的参数化模型和参数都带有不确定性。针

对变形分析中模型的不确定性,一些学者将以部分信息已知、部分信息未知的小样本和贫信息不确定性系统为研究对象的灰色系统理论应用到变形分析研究中,建立变形分析的灰箱模型。陈明东等(1988)较早地应用灰色理论进行新滩滑坡监测及其预报;Chen等(1993)在第七届国际测量师联合会变形测量研讨会上介绍了灰色系统理论及其在变形监测分析中的应用;蓝悦明等(1996)将灰色预报理论用于大坝水平变形预报的研究;在分析GM(1,1)预报模型的不足之后,尹晖(1996)提出了一种实时引入新信息的等维信息和等维灰数递补组合动态预报方法;杨杰等(2002)建立了土石坝变形预报的灰色非线性模型;根据灰色系统理论,胡冬等(2009)建立了基坑变形的GM(1,1)预报模型,并利用实际监测资料对基坑变形进行预报,结果与实测值较一致。

此外,一些学者将变形过程看成一个黑箱问题来处理模型结构的不确定性,并用神经网络理论模拟具有不确定性、严重非线性的变形过程,不断地用实测的变形资料来扩充样本库、训练网络,逐渐提高网络的预估精度与泛化、推广能力。孙海涛等(1998)、王旭东等(2002)将神经网络方法用于深基坑工程变形预报;邓跃进等(1998)用模糊人工神经网络的方法对边坡变形进行分析与预报;杨杰等(2001)提出将基于误差逆传播算法的BP神经网络模型用于大坝变形监测数据的拟合分析及其预测、预报研究;张小峰等(2002)建立基于BP神经网络的河道断面变形预报模型;秦永宽等(2009)将混沌理论与神经网络方法相结合,实现变形监测数据的建模及预报;此外,陈福军等(2009)应用近似推理模型和信息分配法建立大坝裂缝变形的不确定性分析模型。

在参数的不确定性研究方面,杨喜中(1994)针对岩体力学参数的不确定性及其对数值计算结果的影响,提出了参数灵敏度分析法,并根据参数灵敏度排序将参数分为主要参数和次要参数;冷伍明等(1995)根据影响土工参数不确定性的主要因素建立随机模型,探讨了一种计算土工参数不确定性的途径,并获得了土工参数空间变异系数的综合计算公式;杨杰等(2004)对大坝安全监控模型因子间的相关性及其不确定性进行了研究,引进了偏最小二乘算法,对大坝安全监控变量及其影响因子进行了偏最小二乘回归分析,可同时实现回归建模、数据结构简化及因子相关的不确定性分析。

3) 变形预报的不确定性研究进展

变形监测分析的中心问题在于对未来可能的变形值进行预报,目的是防灾减灾和为工程设计提供依据。变形体的变形涉及各种因素的复杂影响,因此准确进行变形或灾害预报将是一个永恒的课题。一些学者将突变理论、模糊理论、粗糙集理论应用到变形监测分析与预报中:周硕愚等(1988)以信息论、系统论和控制论的观点提出了SD、PP、IP定量指标法,用系统辨识和时间序列相结合的方法建立了动态灰箱模型,并提出了用系统动力学的观点研究板内形变问题;何金平等(1997)

利用突变理论进行大坝安全评价,计算出不同时期大坝安全总突变隶属函数值,从而动态地对大坝安全状态进行了模糊综合分析与评判;邓跃进等(1999)根据突变理论推导出大坝变形失稳的尖点突变模型,并利用该模型对大坝变形失稳的机理和力学条件进行了分析;陈继光等(2000)采用模糊近似推理后的隶属度作为BP神经网络的输出神经元,从而实现大坝坝位移量的预报;张士林(2002)将粗糙集理论应用到地下硐室的稳定性分析。

综上所述,从监测数据的不确定性、模型结构与参数的不确定性及变形预报的不确定性三方面研究进展可以看出,变形监测分析与预报的不确定性研究取得了丰硕的成果,并发挥了实用效益。但是,随着国民经济的快速发展,一些大型、超大型工程对变形监测分析提出了更高的要求,变形监测条件也越来越复杂,这使得变形监测分析的不确定性在以下几个方面有待进一步研究:

(1)已有的监测数据不确定性研究主要针对随机误差(随机不确定性)进行。实质上,监测数据的不确定性并非仅由随机误差组成,而是多种不确定性因素综合影响的结果。随着变形监测数据获取手段的更新,新的数据会包括异常值、有色噪声、不完备信息等新的误差,既有可以数值化的不确定性因素(误差、噪声),又有无法数值化、参数化的不确定性因素。因此,如何全面评估监测数据质量及不确定性需进行深入研究。

(2)变形分析的回归模型及确定函数法有一定的局限性,可采用灰箱问题或黑箱问题及突变理论等方法对变形过程固有不确定性进行处理。此类方法没有显式的数学表达式,不便于进行变形分析。此外,变形模型参数的不确定性及参数的相关性需进一步完善。

(3)已有的变形预报不确定性研究相当有限,甚至没有明确给出预报值的可靠性区间。预报值的可靠性区间对工程的安全评估及风险分析十分重要,因此变形预报的不确定性是一个亟待解决的问题。

§ 1.3 本书的研究思路及主要内容

1.3.1 本书的研究思路

根据目前变形监测分析不确定性研究的不足之处,本书的研究思路如下:

(1)测量数据的不确定性度量方法的研究。针对测量数据的不确定性,以测量不确定度理论与模糊数学为基础,拟构建以测量不确定度为未知参数的评价测量数据不确定性的函数模型,提出以模糊熵测度作为函数模型求解的最优准则,研究基于模糊熵准则的变形监测数据不确定性的度量方法。

(2)变形模型参数的不确定性研究。针对变形模型参数的不确定性,将变形模