

测绘科技专著出版基金资助

时空变形分析与 预报的理论和方法

尹 晖 著

测 绘 出 版 社

测绘科技专著出版基金资助

时空变形分析与预报的 理论和方法

尹 晖 著

测 绘 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统深入地讨论了顾及空间和时间关联信息的动态变形分析与预报的理论、方法及实际应用。

全书共分五章。主要内容包括变形分析研究现状及进展;变形分析与预报方法综述,叙述和分析了现有国内外变形数据处理的理论和方法,概括性地评价和指出了各种方法的特点及适用场合;DDS法用于动态变形分析与预报,比较了时间序列分析中的BOX与DDS法,系统而详细地讨论了一种动态变形分析的时间序列分析方法及其建模步骤,提出了描述变形体稳定性及稳定性判据的依据;讨论了多因子关联分析及动态预报模型的建立,包括用基于灰关联分析的系统状态模型来建立变形因果关系方程和将等维新息和等维灰数递补相结合的动态预测法来进行变形成因分析和预测的新思想、新方法;在第五章空间动态变形模型及其预报方法中,作者提出了用灰关联聚类分析方法来描述空间点之间的关系,推出了多点的时空非线性动态模型,使局部单点的变形分析转向空间多点的整体分析,该内容属于当前正在开发研究的新领域。

结合应用、面向应用、介绍基本理论和方法、开拓新的研究方向是本书的基本立足点。在附录中还详细给出了各种算法的程序。

本书可供从事变形监测和工程测量等方面的科技人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教师和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

时空变形分析与预报的理论和方法/尹晖著. —北京:

测绘出版社, 2002. 9

ISBN 7-5030-1128-9

I. 时… II. 尹… III. 变形观测-分析

IV. P227②TU196

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 044627 号

测绘出版社出版发行

(100045 北京市复外三里河路 50 号)

三河市艺苑印刷厂印刷·新华书店经销

2002 年 12 月第 1 版·2002 年 12 月第 1 次印刷

开本: 890×1240 1/16·印张: 7.25

字数: 213 千字·印数: 0001—2000 册

定价: 22.00 元

前 言

监测和分析地壳运动、工程变形的理论和方法是当今测绘学重要研究课题之一,由于变形体的具体情况、条件,产生形变的原因(机理)差异很大,因此其相关技术方法、手段、分析评价理论也有较大不同。但总体上在这一领域中,还有许多理论和实践问题需要研究,且很有价值。本书以作者的博士论文“顾及空间和时间关联信息的动态变形模型及其预报方法”为基础,其主要内容包括:①变形分析研究现状及进展;②变形分析与预报方法综述;③DDS法用于动态变形分析与预报;④多因子关联分析及动态预报模型的建立;⑤空间动态变形模型及其预报方法等。写作本书的目的是为了推动变形研究领域向时空性、整体性、非线性和可靠性方向发展,也为目前我国为数不多的有关变形研究书籍中增添一些新的研究成果,供有关的科技人员参考使用。

由于变形体的结构、组成物质的物理力学性质、外力作用的复杂性和不确定性,建立合适的确定性模型困难,因此,对局部地壳范围内(特别是滑坡及高边坡)稳定性的评价、活动规律和趋势分析,以及对它们活动状况的预报等问题的研究,通过揭示变形观测数据序列的结构与规律,建立动态预测模型,反映变形特征,推断变化趋势,就成为一种快、省、好的有效方法。近年来,用数学模型来逼近、模拟和揭示变形体的变形规律和动态特性成为新的研究方向,在动态变形分析方面已取得不少研究成果,但这些研究成果尚存在一些问题,如建模应顾及到信息量的多少,单点分析没有利用监测点之间的相互关联的信息等。对此,本书在这些方面进行了深入细致的研究并取得了一定的成果,这对实现变形监测目的,解释变形机理,验证设计,保护和改善资源环境、预测和避免灾害发生,具有重要的科学理论意义和实用价值。

本书与国内外已出版的同类书籍比较,有以下几方面的特点及独到之处:

1. 开拓新的研究思路和研究方向。由于变形体的时空特征明显,影响因素复杂,以往只是做单点的变形分析,多点的空间整体分析几乎是个空白。本书的最大贡献在于将局部单点的变形分析转向了空间多点的整体分析。首次提出了用灰关联聚类分析方法来描述空间点之间的关系,进而建立多点的时空非线性动态模型,这种分析方法能充分利用各类采集到的信息,发挥整体积极作用,改变以往静态的单点分析为更接近现实本质的动态分析,更为完整和全面地反映变形体的状况。它与其它模型相比有了本质上的提高,该研究成果和处理方法更具有先进性和优越性,是变形分析理论和方法的新突破。

2. 研究的内容范围定位在顾及和获取的时间和空间信息量的多少,以及时间和空间信息的关联性这一与工程实际密切相关的问题上。提出了一种动态变形分析的时间序列分析方法;提出了基于灰关联分析的系统状态模型来建立因果关系方程和将等维新息和等维灰数递补相结合的动态预测法来进行变形成因分析和预测的新思想、新方法;提出了基于系统因子发展态势的相似性,将单点的变形研究扩展到空间的多点研究,根据多点灰关联聚类分析结果,首先提出并建立了多点的时空非线性动态模型。整个研究以近代数据处理的理论和方法进行动态数据的处理,虽然书中以长江三峡链子崖危岩体作为应用的对象,但其理论和方法同样可应用于我国各类大坝和水工建筑物的安全监测。

3. 本书在结构体系上始终围绕顾及空间和时间关联信息的变形分析这个主题,在综述评价了已有变形分析数据处理方法的前提下,首先将研究重点放在对历年大地测量、尤其是目前GPS用于大型工程或地表变形观测所获得的大量变形观测数据处理的动态分析上,通过对时间序列分析中的BOX与DDS法的比较,系统而详细地介绍了DDS法的建模步骤,提出了描述变形体稳定性及稳定性判据的依据。然后针对实际工程可能获得观测数据量少的情况,提出了灰色系统理论在变形预测中是否有效的问

题，并对此进行了深入的研究，提出了用灰关联分析的系统状态模型建立变形因果关系模型来研究变形成因分析以及预测有显著影响的因子的方法。最后，将单点的局部变形分析转向空间的多点整体分析，从而使变形分析研究提高到了一个新的水平，开辟了变形分析理论和分析方法的新的研究途径。

4. 本书在写作特点上运用近代数据处理的理论和方法对动态数据高层次的研究，坚持理论密切联系实际工程、定量分析与定性分析相结合的原则，所有成果均结合长江三峡链子崖变形观测科研项目实际进行了验证，并在书的附录提供主要的算法程序供参考应用。

在本书出版之际，我首先感谢我的导师陈永奇、张琰和丁寔纲三位教授多年来给予我的指导、培养和帮助，本书的研究工作自始至终是在三位教授的悉心指导下完成的，每一研究成果都凝聚了三位导师的心血。导师渊博的学识、严谨的学风使我受益终身，永远难忘。

在本书的写作和研究工作中，得到了武汉测绘科技大学陶本藻教授、同济大学刘大杰教授、水利部长江水利委员会勘测局姚楚光教授级高工的大力支持和帮助，湖北岩崩滑坡研究所所长王尚庆教授、易庆林高级工程师、华中理工大学陈绵云教授在资料收集和一些技术难点上给予了指导和帮助，在此一并向他们表示衷心的感谢。

感谢湖北岩崩滑坡研究所提供的资料数据。

由于作者水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2002 年 4 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 变形观测的研究内容	(1)
1.2 变形分析与预报的研究现状和进展	(2)
1.3 本书研究的问题	(4)
第二章 变形分析与预报方法综述	(6)
2.1 动态系统与模型	(6)
2.2 变形分析与预报方法	(6)
2.2.1 确定函数法	(6)
2.2.2 多元线性回归分析	(7)
2.2.3 趋势分析法	(7)
2.2.4 模糊线性回归	(8)
2.2.5 自适应过滤法	(9)
2.2.6 时间序列分析法	(9)
2.2.7 马尔柯夫模型	(10)
2.2.8 卡尔曼滤波法	(10)
2.2.9 灰色 GM 模型法	(11)
2.2.10 突变模型	(11)
2.3 分析与比较	(12)
第三章 DDS 法用于动态变形分析与预报	(13)
3.1 ARMA 模型描述	(13)
3.1.1 ARMA 模型	(13)
3.1.2 ARMA 模型的物理解释	(14)
3.2 动态系统的稳定性分析	(15)
3.2.1 Green 函数	(15)
3.2.2 系统稳定性判据	(16)
3.2.3 Green 函数的递推算式	(18)
3.3 模型的建立与建模方法	(19)
3.3.1 建模的一般步骤	(19)
3.3.2 Box 建模法	(19)
3.3.3 DDS 建模法	(22)
3.3.4 两种方法的比较	(22)
3.4 DDS 法建模与预报	(23)
3.4.1 模型参数的初估计	(23)
3.4.2 模型参数的精估计	(25)
3.4.3 模型适用性检验	(26)
3.4.4 模型修正	(27)

3.4.5	模型预报	(28)
3.5	应用实例	(29)
3.5.1	建模与预报	(29)
3.5.2	$T_8 \sim T_{12}$ 缝区稳定性分析	(32)
3.5.3	三种建模方法的分析与比较	(33)
3.6	本章小结	(36)
第四章	建立多因子关联分析及动态预报模型	(38)
4.1	引言	(38)
4.2	灰色系统理论的基本概念	(38)
4.2.1	基本概念	(38)
4.2.2	累加生成与累减生成	(39)
4.3	灰关联分析方法	(39)
4.3.1	构造灰关联因子集	(39)
4.3.2	灰关联度计算公式	(40)
4.3.3	关联序	(41)
4.4	多因子关联分析及同步预测的新方法	(42)
4.4.1	多元线性回归分析	(42)
4.4.2	GM (1, N) 模型	(44)
4.4.3	有效因子的确定	(45)
4.4.4	与多元线性回归分析比较	(45)
4.5	组合动态预测方法及其在变形预测中的应用	(50)
4.5.1	模型建立的条件	(50)
4.5.2	GM (1, 1) 模型	(50)
4.5.3	模型精度评定	(52)
4.5.4	灰色动态预测模型	(52)
4.5.5	分析与应用	(53)
4.6	本章小结	(57)
第五章	空间动态变形模型及其预报方法	(58)
5.1	引言	(58)
5.2	贫信息条件下的多点非线性模型	(58)
5.2.1	模型的建立	(58)
5.2.2	模型参数 $\hat{A}$, $\hat{U}$ 的求解	(59)
5.2.3	还原预测模型	(61)
5.2.4	模型检验	(61)
5.2.5	特 例	(62)
5.3	灰关联聚类分析	(62)
5.3.1	模糊聚类分析的数学基础	(63)
5.3.2	灰关联聚类分析	(64)
5.4	灰关联聚类法用于链子崖 $T_0 \sim T_6$ 缝区整体变形分析	(67)
5.4.1	链子崖概况	(67)
5.4.2	链子崖变形监测系统	(68)
5.4.3	$T_0 \sim T_6$ 缝区地质分析	(69)

5.4.4 多点变形的灰关联聚类分析.....	(71)
5.5 链子崖危岩体多点变形模型的实例分析.....	(73)
5.5.1 模型建立.....	(73)
5.5.2 与单点预测模型比较.....	(75)
5.5.3 关于贫信息的讨论.....	(75)
5.6 本章小结.....	(75)
结 语	(77)
附录 1 DDS 法源程序	(78)
附录 2 多元线性回归分析源程序	(94)
附录 3 GM (1, N) 模型算法源程序	(99)
参考文献.....	(105)

第一章 绪 论

1.1 变形观测的研究内容

资源、环境和灾害是当今制约全球经济协调发展、影响人类生存条件的重要因素，是地球科学所面临的中心课题。大地测量学作为一门为人类活动提供地球空间信息的科学，在保护和改善环境资源、预测和避免灾害发生（如滑坡、地震和火山爆发等）的研究领域中，正发挥着前所未有的重要作用。

变形观测是在运动中的空间和时间域内进行的大地测量工作，其任务是确定在各种荷载作用下，变形体的形状、大小及位置变化的空间状态和时间特征。变形观测的目的和意义不仅仅是描述各种地球动力学现象，监测各种自然、人工建筑物的稳定性及其变形状态，更重要的是解释变形的机理，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。

根据专业文献^[2]的介绍，变形观测按其研究的范围可分为以下三类：第一，测定地极移动、地球转速度的变化以及地壳板块运动的全球性变形；第二，测定地壳板块内变形状态和板块交界处地壳相对速度的区域性变形；第三，测定工程建筑物的沉陷、水平位移、挠度和倾斜，滑坡体的滑动，以及采矿、采油和抽取地下水等人为因素造成的局部地壳变形。

研究全球性的变形、监测和解释各种地球动力学现象，空间大地测量是最基本最适用的技术。它包括全球定位系统（GPS）、卫星激光测距（SLR）、卫星测高、射电源甚长基线干涉测量（VLBI）、双向无线电卫星定位、卫星重力梯度测量等手段。

研究区域性的变形，GPS已成为监测板块边界区地壳运动监测的主要手段。对板内小尺度范围活动断裂带（一般为多震区）以及火山活动区的监测，最理想的手段是采用无人守测、全自动连续工作的密集GPS阵列，而最新一代GPS接收机已具有这一功能并开始进入实用。

研究局部性的变形，变形观测分为外部监测和内部监测两种。外部监测以大地测量为主，其主要手段包括重复精密水准测量、精密三角、三边或边角测量、高精度自动化的全站仪监测系统。对于局部小尺度控制网的实测，特别是对大型工程的变形监测，目前GPS定位技术已显示出很好的应用前景。用大地测量方法进行变形监测，其特点是所测量的量为绝对位移，监测范围广，监测精度高，但只能反映变形体的外观变形。内部监测主要采用岩土工程监测仪，如钻孔倾斜仪和多点位移计等，其特点是能监测到岩体内部的变形分布，但测量范围小，代表性较差，对于大型工程建筑物，重要的边（滑）坡，两种监测手段的有机结合，点、线、面立体交叉的监测方式正在形成。

对于区域的和局部的变形观测，其完整的过程一般应包括以下几个阶段：

1. 变形监测网的优化设计与观测方案的实施，包括监测网质量标准（精度标准、可靠性标准、灵敏度标准、可区分性标准和费用标准等）的确定、监测网点的最佳布设以及观测方案的最佳选择与实施；
2. 观测数据处理，包括观测数据质量评定与平差、观测值之间相关性的估计以及粗差和系统误差检测与剔除；
3. 变形的几何分析，包括变形模型的初步鉴别、变形模型中未知参数的估计、变形模型的统计检验和最佳模型的选择以及变形量的有效估计；
4. 变形的物理解释与变形预报，包括探讨变形的成因，给出变形值与荷载（引起变形的有关因素）之间的函数关系，作变形预报。

近年来,人们对变形观测的重要性有了深刻的认识,在产生变形的相关地区布设了监测网进行周期性的观测,并积累了大量的观测数据,但是很多资料还没有作详细的、系统的分析。由于数据本身可能包含重要的、有科学意义的信息,而这种信息通常不是明显可得的,故需要仔细地分析观测数据。通过对已有观测资料的分析,还可发现原有监测方案的不足和观测精度的局限,这对于设计新的监测系统有指导作用。因此,正确地分析与处理变形观测数据,建立合理的动态变形模型就显得十分重要。目前,尽管人们基于不同的任务需要和处理对象提出了多种变形观测分析方法,但要正确建立动态变形模型,准确地进行变形预报还需考虑下述的三个具体问题:

1. 数据分析:变形观测的重要部分是观测数据,经过观测数据的质量评定与平差、粗差和系统误差检测与剔除以及变形量的有效估计,我们可以获得变形体随时间动态变化的变形值序列,即时间序列。时间序列是一种综合反映,它含有丰富的信息,蕴藏着参与动态变形的全部其它变量的痕迹。因此,在静态变形分析已取得较成熟的研究成果的基础上,有必要进一步研究动态变形分析与数据处理的理论和方法。

2. 模型建立:变形体的变形是一种不确定性现象。这种不确定性的产生是因为:一方面,由于自然的环境因素、地质条件、化学腐蚀、人工营力等综合影响而导致的变形体的变形现象本身具有不确定性;另一方面,虽然观测变形体变形的技术和手段日趋完善,但我们仍然可能要以离散的、信息不全和受时空尺度限制的手段来获取资料数据,并借以描述、模拟和研究连续复杂的动态变形过程及其现象,所以这种不确定性也是明显的。对变形不确定性的研究,不可能有一成不变的模式和方法,应根据工程问题的实际情况,寻求合适的建模方法。

3. 信息关联:虽然变形观测受观测仪器、观测条件和观测时间的限制,获取的信息或多或少,但由变形监测网所形成的变形时空范围中的点与点之间、序列与序列之间却存在着某种关系,数据分析和模型的建立应考虑时间序列的时空关联信息。

1.2 变形分析与预报的研究现状和进展

最初,变形观测的目的是确定物体的几何变形,因而变形观测数据处理主要是计算点的位移,然后画出位移场或位移过程线。但是人们很快发现,变形观测数据处理结果的有效性将直接影响位移计算的正确性,因为点的位移与参考系有关,参考点有移动,则变形点的位移将受到影响,参考系不同,则平差的方法不同。早在 60 年代,奥地利大地测量学者 P. Meissl 就引进了自由网平差的概念,提出了“内制约”平差方法。瑞士测量工程师 Keller [1976] 扩展了“内制约”平差方法,并称之为广义的赫尔默特变换。美国学者 W. Prescott [1981] 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。周江文 [1980] 提出了“拟稳平差”,用拟稳点定义监测网的参考系。但是由于我们事先无法知道监测网点的实际位移,因而选用某种平差方法去计算网点的位移,实质上是选用某种变形模型去模拟实际变形,从数理统计角度看,即是对处理成果作出的某种假设。对此,德国测量学者 H. Pelzer [1971] 开始应用统计检验的理论分析参考点的稳定性。随后,其他学者也提出了不同的方法,陈永奇 [1983] 推导了一个广义的假设模型,陶本藻 [1991] 提出了一种统一的假设检验方法。

为了深入研究变形观测分析方法,在 FIG 第二次变形测量会议 [1978] 上设立了特别委员会“变形观测分析专门委员会”,由德国汉诺威大学大地测量研究所、荷兰德尔夫特工业大学大地测量计算中心、德国卡尔斯鲁厄大学大地测量研究所、德国慕尼黑国防军大学测量研究所以及该委员会的主席单位加拿大新不伦维克大学测量工程系组成了五个研究中心,并于 1981 年发表了研究结果《变形观测分析中的不同方法的比较》。五个研究中心的分析方法各有特点,在确定位移和变形的计算中,大致包括观测数据筛选、权的估计、总体位移检验、单点位移检验和参考点稳定性检验、变形模型建立和检验、位移和变形计算以及变形力学解释等。陈永奇 [1983] 提出了变形分析通用法,并研制了相应的软件

DEFNAN, 这种方法适用范围广, 通用性强。A. Chrzanowski 等 [1988] 进行了变形几何分析中大地测量和非大地测量 (岩土力学) 观测值的综合分析。总之, 在过去的 15 年里, 变形观测分析已取得了显著的成绩, 变形几何分析的主要问题已经得到解决^[72]。

面对地震、滑坡、溃坝以及地面沉陷给人类的生存所构成的巨大威胁, 人们认识到变形监测只是手段, 而科学预报才是目的。除了根据变形体的地质条件、力学条件以及应用变形几何分析法获得的变形量作定性的解释与预报以外, 愈来愈多的测量学者开始致力于定量的解释与描述。定量预报有两种途径: 一是先通过变形观测的物理解释, 建立起变形与变形原因之间正确的函数关系, 再进行预报; 二是直接对变形观测获得的时间序列, 采用有关的数学理论与方法进行预报。

统计分析法和确定函数法是变形观测物理解释的两种基本方法。其任务是确定变形体的变形与变形原因之间的关系。统计分析法 (回归分析) 是目前广泛应用的变形成因分析法, 由葡萄牙 Rose 教授首先提出, 并用来确定大坝的变形和产生变形原因之间的关系。统计分析法需同时测定产生变形的各种物理量 (荷载) 以及变形的结果, 利用所测量的荷载和变形值, 用回归分析建立两者之间的函数关系, 有了这种函数关系后就能够预报变形。但由于回归分析中, 选用何种因子和该因子系用何种表达式有时只是一种推测, 而且影响变形因子的多样性和某些因子的不可测性, 使得回归分析在某些情况下受到限制; 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, 然后利用确定函数模型, 预报在荷载作用下变形体可能的变形。但由于组成变形体的岩土介质不均质、非连续, 使得变形体不可能是完全的弹性体。所以, 在应用确定函数法中, 可能存在一系列误差; 另一方面, 变形体的变形是复杂多变的, 有时很难用确定性的理论公式表达, 这在某种程度上也限制了确定函数法的广泛应用。

随着变形分析研究的全面开展, 尤其是控制论、信息论、运筹学、系统动力学、模糊数学和灰色理论等构成的系统科学体系的兴起以及在变形分析研究领域中的重大应用, 人们认识到变形体的变形是在各种荷载 (力) 作用下的动态连续过程, 变形体是具有“惯性”、“记忆”和“时序”的动态系统, 其变形值, 即系统输出 (结果) 变量不仅依赖于同时刻的, 而且还依赖过去和输入的变量的值。变形体还不断受到外界环境的影响, 在各种荷载的作用下发生着能量的转移和变化。当变形的成因分析不可能把一切因子都赋予清晰的物理概念而始终离不开一个经验性的参数的时候, 在许多因子的关系方面普遍存在模糊性, 或是得到的信息不充分, 很难建立清晰函数关系的情况下, 系统辨识、时间序列分析、卡尔曼 (Kalman) 滤波、模糊数学和灰色系统理论的引入则是一个进步。在测绘界, 权威测量学家已普遍感到, 变形分析已经到了这样一个阶段: 每一项努力都应该致力于变形动态模型的研究与应用^[91]。近年来, 用数学模型来逼近、模拟和揭示变形体的变形规律和动态特性成为新的研究方向, 在动态变形分析的研究方面已取得不少成果。周硕愚 [1988, 1990] 从系统论、控制论、信息论观点提出了 SD、PP、IP 等定量指标法、用系统辨识和时序分析相结合的方法建立了动态灰箱模型以及提出了用系统动力学的观点研究板内形变问题; 贾明海 [1988]、徐晖 [1990]、奚锐锋 [1990] 等讨论了平面监测网动态变形的卡尔曼 (Kalman) 滤波方法; Dayong Ren and Xiao Li Ding [1996] 则用 Kalman 滤波方法进行了矿山开采边坡的动态变形分析。徐培亮 [1988] 用时间序列分析法作了大坝的变形预报; 张兴飞 [1992]、吴定洪 [1992]、陈德豪 [1994] 等则综合运用了回归分析与时间序列分析方法, 建立了变形观测数据处理与变形预报的动态模型; 陈明东 [1985] 应用灰色系统理论进行了新滩滑坡及其监测预报的研究; 朱瑞赓等 [1991] 引入现场监测位移和变形速度建立了能够实现信息传递、相互修正的灰色预测 GM (1, 1) 和 Verhulst 联合模型进行了地下硐室围岩的变形监测及灰色预测预报; 陈永奇等 [1993] 在第七届 FIG 变形测量研讨会上介绍了灰色系统理论及其在变形观测分析中的应用, 受到国际测绘界同行的瞩目。这方面的成果还反映在第八届 FIG 变形测量研讨会的论文集上^[110]。

非线性理论的迅速发展, 特别是突变论、分形论、混沌动力学理论以及神经网络理论的出现与应用, 为自然界复杂现象的研究带来了新的方法。在自然灾害的预测预报研究方面, 人们也开始运用突变

理论进行滑坡危险性判断与预测,用分形理论研究地震发生前后的维数变化等。刘鼎文 [1989] 提出了一种基于突变理论的滑坡危险性判断与预测方法;李荣强 [1993] 建立了顺层边坡的尖点型突变模型,推导了边坡系统的总势能表达式以及这类边坡失稳条件;秦四清等 [1993] 则对滑坡时间预报的突变理论及灰色突变理论方法进行了深入研究;高鹏 [1994] 运用突变理论,建立了土质滑坡破坏的突变模型;秦四清等 [1993]、周萃英等 [1995]、易顺民 [1996] 对滑坡灾害预报的非线性动力学理论和方法进行了较深入的研究。这方面的研究成果还有:形变熵 [陈时军, 1991]、形变分形 [D. L. Turcotte, 1986, 刘鼎文, 1993]。所有这些反映了变形分析研究领域的最新的研究动态。

随着现代科学技术的发展和计算机应用技术水平的提高,各种理论和方法为变形分析与变形预报提供了广泛的研究途径。然而,纵观目前各类方法在变形分析研究领域的研究状况和进展,我们可以看到这些方法尚存在两大问题:其一,各种方法不论是静态的还是动态的、线性的还是非线性的,都需要通过模型的建立来实现,因此就必须顾及到信息量的多少,即不同的解决模式和方法问题;其二,变形观测是通过变形监测网采用周期性的观测来获取资料信息,监测网由多个空间的变形监测点组成,上述各种方法都只是针对单点或单个时间序列进行分析。单点的分析没有利用监测点之间相互关联的信息,而多点的空间的分析由于存在较大的难度,因而在空间多点的整体变形分析与变形预报的研究方面目前几乎还是个空白。

当前,高精度监测各类工程(包括灾害工程)的稳定性及其变形的手段和方法,正在由传统的单一监测模式向点、线、面交叉的空间多元监测模式发展,数据获取由离散采集向连续采集发展,数据分析由静态向动态分析发展。因此,在发展高精度、自动化的连续监测设备和变形监测数据获取的技术和方法的同时,更需要不断完善、改进变形分析和变形预报的理论和方法,并形成变形监测分析与预报的一整套较为完善的监测分析系统。

1.3 本书研究的问题

本书研究的重点是现代变形分析与变形预报的理论和方法,主要顾及获取的时间和空间信息量的多少,以及时间和空间信息的关联性来建立动态变形模型。研究的内容包括以下几方面:

较全面地分析了现有国内外变形分析与变形预报的理论与方法,概括性地评价和指出了各种方法的特点及适用场合。提出变形模型的建立与预报应考虑各种方法的适用条件与应用场合,并尽可能采用多种方法进行综合分析。

运用动态数据处理的理论,探讨大信息量下变形观测时间序列的分析途径。通过对时间序列分析中的 BOX 法与 DDS 法的比较,系统而详细地介绍了 DDS 法的建模步骤,这是一种简洁快速、适宜于工程实际问题的动态变形分析的时间序列分析方法。该方法的特点是可不对原始序列作任意变换,而把建模作为寻求随机动态系统的表达式的过程来处理,直接从代表广泛一类的 ARMA 模型出发导出最终合适模型。同时,从系统分析的角度出发,讨论了表征系统动态特征的 Green 函数,揭示了系统动态特性,并给出变形体的稳定性判据。

针对贫信息条件下的系统建模与预报,指出了灰色预测具有一定的适用场合。为提高 GM (1, 1) 模型的预测效果,提出了用等维灰数递补和等维新息相结合的组合动态灰色预测模型代替常规 GM (1, 1) 建模,并以构造模型群、进行模型比选和给出预测区间的模式进行预测模型的有效性检验和提高预测的准确度。

在分析了多元线性回归方程用于变形观测物理解释的原理和方法之后,提出了用基于灰关联分析的系统状态模型来建立变形的因果关系方程,并基于系统因子发展态势的相似性,提出了采用灰关联分析方法,通过因子实际协调性与定性分析的判断来确定对预测对象有显著影响的有效因子。与经典多元线性回归分析相比,该法可避免统计方法量化分析与定性分析不符的缺陷,且不受数据量大小、数据分布

的限制，是进行变形成因分析的一种新方法。

针对单点或单时间序列进行变形分析的不足，首次提出了顾及空间点之间彼此关联信息的空间整体的变形分析方法，推导了基于贫信息条件下的多点变形预测模型形式。运用矩阵函数的复杂运算与编程，实现了空间多点变形预测模型的建立，并以实例验证了模型的有效性。提出了构造变形相似矩阵，进行灰关联模糊聚类分析来定位空间变形点相互关系的方法，采用数学定量分析与地质定性分析的综合评判结果，保证了空间多点模型的建立由彼此关联性最强的点组成，从而使单点局部的变形分析转向空间多点的变形分析，使变形分析具有整体性和时空性。

用长江三峡链子崖的实测数据进行了 DDS 法与趋势提取 + ARMA 模型以及多项式拟和方法的比较，DDS 法与 GM (1, 1) 预测模型进行不同序列长度建模的比较，单点与多点的建模比较等。验证了 DDS 法是比较趋势提取 + ARMA 模型更简洁、更快速，比多项式拟合更高级的动态建模方法。并验证了空间多点模型是比单点模型更具有科学性、精度更高的非线性模型。这是本书的主要实用成果。

附录中列出用 C 语言编制的时间序列分析的 DDS 法程序、多元线性回归程序和 GM (1, N) 程序，可供读者参考使用。

第二章 变形分析与预报方法综述

2.1 动态系统与模型

系统是由若干相互联系和相互作用的部分（要素、过程）所构成的具有特定功能的一个整体^[17]。动态系统是有记忆系统。对动态系统的描述可用图 2.1.1 所示的因果律关系来表示。在动态变形分析中，变形体的变形是在各种荷载（力）和环境因子作用下的动态连续过程，变形体是具有惯性和记忆的动态系统，其中输入信号（原因）是作用在变形体上的各种荷载，输出信号（结果）则是通过系统能量的转移、变化的传递过程所产生的结果变形值。

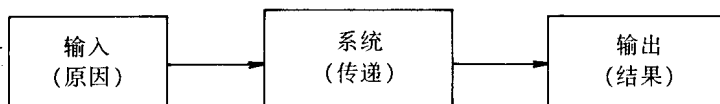


图 2.1.1 动态系统的因果律关系图

对系统（变形体）的定量分析，建立系统的模型是深入研究的前提和基础。因为模型是系统或过程的一种简化、抽象和类比表示，是进行系统分析、系统综合的有效工具。

系统模型的建立方法可分为三种：物理结构已知的白箱法、物理结构及机理未知的黑箱法以及部分信息已知、部分信息未知的灰箱法。白箱法是从基本的物理、化学定律和已知的系统结构数据直接导出模型，如确定函数法，这样构成的模型可同时表达系统的内部结构和功能；黑箱法则是把系统当作黑箱，采用系统辨识的方法建模，该方法不深入系统的内部结构，完全根据对系统的观察、观测所得到的输入输出数据推断出模型的结构，进而求出模型参数，如 ARMA 模型法；而灰箱法则是上述两种方法的结合，它是利用系统的某些基本特性的信息，把模型分为已知（主要指模型结构）和未知（主要指模型参数）两部分，然后根据对系统观测所得到的数据将未知参数估计出来，如 GM 模型。

从揭示系统本身固有的性质和辨识的目的，系统又可分为线性系统与非线性系统、时不变系统与时变系统、因果系统与非因果系统、连续时间系统与离散时间系统。本章主要介绍国内外现有的变形分析与变形预报的理论和方法，并简要地对诸方法进行比较和评价。

2.2 变形分析与预报方法

2.2.1 确定函数法

确定函数法是利用变形体的物理性质、材料的力学性质，以及应力与应变间的关系来建立荷载与变形之间函数模型的一种具有“先验”性质的分析方法。运用确定函数法建立模型需要知道变形体的物理性质和力学性质，如力学参数杨氏模量 E 和泊松比 ν ，但不需要用到大量的变形观测资料，且在变形观测的初期也能进行变形预报。

确定函数法一般采用“有限单元法”计算，其核心是：用有限元法计算荷载作用下的效应量，并研究其与实测值的拟合问题。

有限元法分析工程力学问题的基本特点是将结构物进行离散，即将连续体离散为有限多个在结点上互相连接的单元，这些单元简称有限单元。将结构物离散为有限个单元后，若是连续体，则单元间的结点为铰接，边界根据约束情况可用铰接、连杆和自由等模拟。每个单元所受的重力和面力都可按等效原理移置到结点上，成为结点荷载，采用结构力学中的位移法对上述结构进行计算，计算工作量较大。

由于组成变形体的材料，如岩土体介质的多相性、不均质、非连续性、岩体结构面的各向异性等，使得变形体不可能是完全的弹性体。因而，在确定函数法的实际运用中，可能会存在一系列误差，如变形体物理常数（ E , ν ）的误差、弹性假设带来的误差，以及有限元法单元划分（单元划分得越细，计算精度越高）的计算误差等，从而使得确定函数法计算的结果与实际误差较大。另一方面，复杂多变的变形体，其变形有时很难用确定的理论公式来表达，这在某种程度上对确定函数法的广泛应用也是一个限制。

2.2.2 多元线性回归分析

多元线性回归分析是经典的，但仍然广泛应用于变形观测数据处理中的数理统计方法。它是研究一个变量（因变量）与多个因子（自变量）之间非确定关系（相关关系）的最基本方法，其数学模型是：

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \cdots + \beta_p x_{tp} + \epsilon_t \quad (2.2.1)$$

$$(t = 1, 2, \cdots, N)$$

$$\epsilon_t \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$$

式中，下标 t 表示观测值变量，共有 N 组观测数据， p 表示因子个数。回归方程的建立，主要是通过自变量 x_{t1} , x_{t2} , $\cdots$, x_{tp} 对因变量 y_t 影响程度的大小来建立起它们之间的关系，通过 N 个周期的观测值，运用最小二乘原理求出回归方程中的回归系数 β_0 , β_1 , $\cdots$, β_p 的估值 $\hat{\beta}$ ，然后运用 t 时刻的影响因子观测值 x_{t1} , x_{t2} , $\cdots$, x_{tp} 预报 t 时刻的变形值 y_t 。

多元线性回归分析应用于变形观测数据处理与变形预报中主要包括以下两个方面：

1. 变形的成因分析，当 (2.2.1) 式中的自变量 x_{t1} , x_{t2} , $\cdots$, x_{tp} 为因变量的各个不同影响因子时，则方程 (2.2.1) 可用来分析与解释变形与变形原因之间的因果关系。
2. 变形的预测预报，当 (2.2.1) 式中的自变量 x_{t1} , x_{t2} , $\cdots$, x_{tp} 在 t 时刻的值为已知值或可观测量时，则方程 (2.2.1) 可预测变形体在同一时刻的变形大小。

由于在 (2.2.1) 式中，自变量 x_{ti} ($i=1, 2, \cdots, p$) 是作为确定性因素， $\{y_t\}$ 的统计性质由 $\{\epsilon_t\}$ 确定， $\{y_t\}$ 序列彼此相互独立，都是同一总体 y 的不同次独立随机抽样值；(2.2.1) 式反映了变形值相对于自变量 x_{ti} ($i=1, 2, \cdots, p$) 之间在同一时刻的相关性，而没有体现变形观测序列的时序性、相互依赖性以及变形的继续性，因此多元线性回归分析应用于变形观测数据处理是一种静态的数据处理方法，所建立的模型是一种静态模型。

2.2.3 趋势分析法

趋势分析法称之趋势曲线分析、曲线拟合或曲线回归，它是迄今为止研究得最多、也最为流行的定量预测方法。

人们常用各种光滑曲线来近似描述事物发展的基本趋势，即

$$Y_t = f(t, \theta) + \epsilon_t \quad (2.2.2)$$

其中 Y_t 为预测对象， ϵ_t 为预测误差； $f(t, \theta)$ 根据不同情况和假设，可取不同的形式，而其中的 θ 代表某些待定的参数。下面给出几类典型的趋势模型：

1. 多项式趋势模型

$$Y_t = a_0 + a_1 t + \cdots + a_n t^n \quad (2.2.3)$$

2. 对数趋势模型

$$Y_t = a + b \ln t \quad (2.2.4)$$

3. 幂函数趋势模型

$$Y_t = at^b \quad (2.2.5)$$

4. 指数趋势模型

$$Y_t = ae^{bt} \quad (2.2.6)$$

5. 双曲线趋势模型

$$Y_t = a + b/t \quad (2.2.7)$$

6. 修正指数模型

$$Y_t = L - ae^{bt} \quad (2.2.8)$$

7. 逻辑斯蒂 (Logistic) 模型

$$Y_t = \frac{L}{1 + \mu e^{-bt}} \quad (2.2.9)$$

8. 龚伯茨 (Gompertz) 模型

$$Y_t = L \exp[-\beta e^{-\theta t}] \quad \beta > 0, \theta > 0 \quad (2.2.10)$$

经验表明, 事物的发展完全由随机动因所驱使, 并且与过去的状况毫无联系, 不遵循任何可以认识的规律, 这是很少见的。因此, 趋势分析通常是预测的首要一步, 以发现主要的变化趋势。

2.2.4 模糊线性回归

80 年代, 日本田中英夫 (H) 等人不断提出模糊线性回归的概念和方法^[54]。认为观测值 y_t 与预测值 $\hat{y}_t$ 之间的离差是由系统的模型参数的模糊性引起的, 这样根据历史数据进行预测的结果也不是一个精确的数值, 而是带有一定模糊幅度的模糊数。通俗地说, 预测结果只是“大约多少”, 这是符合很多实际情况的。

与经典的线性回归分析类似, 设变量 y_t 与它的相关因素 $x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tp}$, 有 (2.2.1) 式的线性关系, 但模糊线性回归分析 (简称 FLR) 中, 认为模型具有模糊性, 具体地说, 回归系数 β_i 是模糊数, 于是模型的拟合值 $\hat{y}_t$ 与观测值 y_t 之间的偏差就是由这种模糊性引起的。

通常取 β_i 为三角模糊数 $\beta(\alpha, c)$, 它的隶属函数

$$\mu_\beta(z) = \begin{cases} 1 - \frac{|z - \alpha|}{c}, & \alpha - c \leq z \leq \alpha + c \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2.2.11)$$

式中, α 为 β 的中心值, c ($c > 0$) 是 β 的模糊幅度。于是容易得出 (2.2.1) 式中 y_t 的隶属函数为

$$\mu_y(y_t) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_t - \sum_i \alpha_i x_{ti}|}{\sum_i c_i |x_{ti}|}, & \sum_i \alpha_i x_{ti} - \sum_i c_i |x_{ti}| \leq y_t \leq \sum_i \alpha_i x_{ti} + \sum_i c_i |x_{ti}| \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2.2.12)$$

在 FLR 分析中, 要求合于下述两个准则:

准则 1 必须使各回归系数的模糊幅度之和为最小 (即精度最大), 即

$$\text{最小化 } J = c_1 + c_2 + \cdots + c_p \quad (2.2.13)$$

准则 2 按一定的置信水平 H , 必须能“覆盖”所有的观测数据 y_t , 即满足

$$\mu_y(y_t) \geq H \quad 0 \leq H \leq 1 \quad (2.2.14)$$

这在模糊集理论中称为“ H 水平截集”, 或通俗地称为“门槛”, 保证了没有隶属度小于 H 的 y_t , 结合

上述公式, FLR 的问题最终可转化为求解线性规划问题。

$$\begin{cases} \min & J = c_1 + c_2 + \cdots + c_p \\ s. t & \sum_i \alpha_i x_{it} - (1-H) \sum_i c_i x_{it} \leq y_i \\ & \sum_i \alpha_i x_{it} + (1-H) \sum_i c_i x_{it} \geq y_i \end{cases}$$

2.2.5 自适应过滤法

将统计回归模型 (2.2.1) 式作适当修改, 就可以得到一类新的线性模型, 称之为自回归模型, 模型形式是:

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_n x_{t-n} + \varepsilon_t \quad (2.2.15)$$

自适应过滤法应用于 (2.2.15) 式的自回归模型上, 对模型参数的求解是从 φ_i 中的一组初始值开始, 利用公式 (2.2.16) 逐次迭代, 不断调整, 以实现自回归系数的最优化。

(2.2.15) 式中的自适应系数表达式可表述如下:

$$\begin{aligned} \varphi'_i &= \varphi_{i(t-1)} + 2k\varepsilon_t x_{t-i} \\ i &= 1, 2, \cdots, n \\ t &= n+1, n+2, \cdots, N \end{aligned} \quad (2.2.16)$$

式中 φ'_i 是新的自适应系数, $\varphi_{i(t-1)}$ 是老的自适应系数, k 为滤波常数 (调整系数), 它确定了逐次逼近的收敛速度, ε_t 是剩余误差, x_{t-i} 是时刻 $t-i$ 时的时间序列观测值。

自适应过滤法在实践中一个很重要的特点是它能把自回归方程中的系数调整成为新的所需要的值。也就是说, 自回归系数 φ_i 并不像公式 (2.2.15) 那样固定不变, 而是每迭代一次, 变化一次, 逐次迭代, 逐渐向最佳估计值逼近。自适应过滤法简单易行, 可采用标准程序上机运算, 约束条件少, 是一种可变系数的数据模型。但为了减少计算工作量和提高预测精度, 必须考虑到要尽量选取恰当的回自回归模型的阶数, 要选择适宜的滤波常数 k 。如果要求利用自适应过滤法取得更准确的结果, 就需要时间序列分析的基本知识。

2.2.6 时间序列分析法

时间序列分析是本世纪 20 年代后期开始出现的一种现代数据处理方法, 是系统辨识与系统分析的重要方法之一 [杨叔子, 1991]。其基本思想是对于平稳、正态、零均值的时序 $\{x_t\}$, 若 x_t 的取值不仅与其前 n 步的各个取值 $x_{t-1}, x_{t-2}, \cdots, x_{t-n}$ 有关, 而且还与前 m 步的各个干扰 $a_{t-1}, a_{t-2}, \cdots, a_{t-m}$ 有关 ($n, m = 1, 2, \cdots$), 则按多元线性回归的思想, 可得到最一般的 ARMA 模型:

$$\begin{aligned} x_t &= \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_n x_{t-n} \\ &\quad - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \cdots - \theta_m a_{t-m} + a_t \\ a_t &\sim \text{NID}(0, \sigma_a^2), \end{aligned} \quad (2.2.17)$$

从系统分析的角度, 建立 ARMA 模型所用的时间序列 $\{x_t\}$, 可视为某一系统的输出, 对式 (2.2.17) 移项, 有

$$x_t = \frac{\theta(B)}{\varphi(B)} a_t \quad (2.2.18)$$

式中 $\theta(B) = 1 - \sum_{j=1}^m \theta_j B^j$, $\varphi(B) = 1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i B^i$ 。若视 a_t 是输入, x_t 是输出, 那么 ARMA 模型描述了一个传递函数为 $\theta(B)/\varphi(B)$ 的系统, 在输出等价原则下, 此系统是产生 $\{x_t\}$ 的实际系统的一个等价系统。需要指出的是, 由于 ARMA 模型只是基于 $\{x_t\}$ 建立起来的模型, 不论系统的输入是否可观, 它都没有利用系统输入的任何信息, 而总是将白噪声 $\{a_t\}$ 视为输入, 因此, 它是建立在输出等价