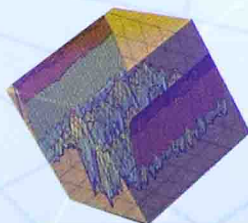
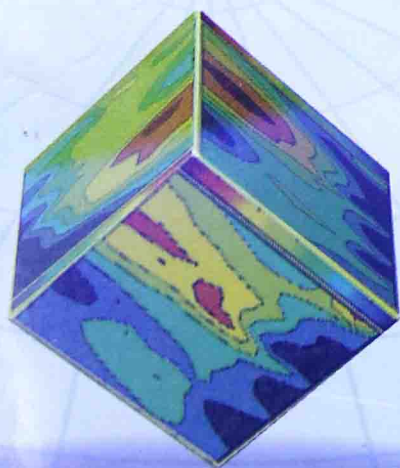


GNSS边坡监测与 变形分析

GNSS Slope Monitoring and
Deformation Analysis

刘志平 著



测绘出版社

江苏高校优势学科建设工程

GNSS 边坡监测与变形分析

GNSS Slope Monitoring and Deformation Analysis

刘志平 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 中国矿业大学环境与测绘学院 2014

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

本书主要介绍了作者攻读博士学位期间在 GNSS 变形监测数据处理与高边坡变形分析方面的研究成果,主要内容包括 GNSS 定位数据处理基础、整周模糊度估计、单历元变形监测方法、非线性变形预测与变形稳定性分析方法,以及所阐述理论方法在高边坡工程中的应用研究。

全书以 GNSS 变形监测信息提取与高边坡工程变形分析为主线,采用理论分析、仿真计算和实际应用相结合的研究方式,体现了原理方法与应用实践并重的特点。本书可供地学领域相关专业科研人员和工程技术人员参考,也可作为相关专业研究生和高年级本科生学习“GNSS 变形监测信息处理与分析”的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 边坡监测与变形分析/刘志平著. —北京:测绘出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5030-3512-8

I. ①G… II. ①刘… III. ①卫星导航—全球定位系统—应用—边坡—监测系统—研究②卫星导航—全球定位系统—应用—边坡—变形—研究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 140384 号

责任编辑 巩 岩 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 责任印制 喻 迅

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	三河市世纪兴源印刷有限公司	经 销	新华书店
成品规格	169mm×239mm		
印 张	9.5	字 数	190 千字
版 次	2014 年 7 月第 1 版	印 次	2014 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001-1000	定 价	34.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3512-8/P·728

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

随着我国经济的蓬勃发展和西部大开发战略的实施,西南地区迎来了大规模水利水电建设的高峰期。但我国西南地区独特而复杂的地形地质条件带来的大量高边坡稳定性问题,对工程地质、岩土力学和大地测量等相关领域工作者提出了严峻挑战。以 GNSS 技术为支撑的变形监测与高边坡变形分析方法,为大型高边坡稳定性监测提供了有效的解决方案。

本书以小湾水电站为例,介绍了高边坡 GNSS 变形监测信息提取、非线性变形分析方面的研究工作与相关成果。全书共分 6 章:第 1 章为绪论,简要总结了 GNSS 变形监测与高边坡变形分析方面的基本概况;第 2 章阐述了卫星精密定位的基本理论;第 3 章介绍了 GNSS 整周模糊度估计理论;第 4 章介绍了复杂高边坡环境下 GNSS 变形监测新算法;第 5 章介绍了时间域非线性变形分析方法;第 6 章介绍了高边坡变形稳定性变形分析方法。

这里要感谢河海大学何秀凤教授的指导与帮助;感谢清华大学过静珺教授、辽宁工程技术大学石金峰教授、中国矿业大学张华海教授审阅原稿并提出宝贵的修改意见;感谢书中参考文献的作者们。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金重点项目(50539110)和江苏省研究生创新计划资助项目(CX07B_137z)资助,出版得到了国家自然科学基金青年项目(41204011)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)资助,在此一并表示感谢。

作者水平有限、经验尚浅,书中存在的谬误之处,恳请同行专家与读者斧正。联系方式为 zhpliu@cumt.edu.cn 或 zhpnliu@gmail.com,作者不胜感激。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 GNSS 变形监测研究现状	4
1.3 高边坡变形分析研究进展	8
1.4 本书内容与不足	12
第 2 章 卫星精密定位基础	15
2.1 导航卫星系统	15
2.2 GNSS 时间与坐标系	19
2.3 GNSS 组合相位观测值研究	25
2.4 GNSS 定位数据处理基础	33
第 3 章 GNSS 整周模糊度估计理论	41
3.1 模糊度参数模型	41
3.2 模糊度估计及可靠性	45
3.3 模糊度降相关算法及评价	51
3.4 结果与分析	57
第 4 章 GNSS 高边坡变形监测方法	63
4.1 监测数据处理流程	64
4.2 单历元监测方法及存在问题	68
4.3 基于联合平差模型的改进单历元方法	75
4.4 基于双频宽巷/窄巷观测值的改进单历元方法	82
4.5 结果与分析	88
第 5 章 高边坡非线性变形预测	94
5.1 非线性变形预测方法分析	95
5.2 改进的灰色模型	97
5.3 改进的相空间预测方法	102
5.4 结果与分析	106

第 6 章 高边坡变形稳定性分析·····	113
6.1 边坡变形稳定性判别 ·····	114
6.2 边坡变形稳定性地统计分析 ·····	118
6.3 边坡变形稳定性最大李雅普诺夫指数分析 ·····	123
6.4 结果与分析 ·····	128
参考文献·····	135

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Problems	1
1.2 Advances in GNSS Deformation Monitoring	4
1.3 Advances in Steep Slope Deformation Analysis	8
1.4 Contents and Deficiencies	12
Chapter 2 Principles of GNSS Precision Positioning	15
2.1 Navigation Satellite Systems	15
2.2 GNSS Time and Coordinate Systems	19
2.3 GNSS Phase Observations Combinations	25
2.4 GNSS Data Processing Tutorial	33
Chapter 3 GNSS Integer Ambiguity Resolution Theory	41
3.1 Ambiguity Resolution Model	41
3.2 Ambiguity Resolution and Reliability	45
3.3 Ambiguity Decorrelation Algorithms and Evaluation	51
3.4 Results and Analysis	57
Chapter 4 GNSS Steep Slope Deformation Monitoring Methods	63
4.1 Data-processing Procedures for Monitoring	64
4.2 Single Epoch Monitoring Method and Its Deficiencies	68
4.3 Improved Single Epoch Method Using Joint Adjustment	75
4.4 Improved Single Epoch Method Using Wide-lane and Narrow-lane Combinations	82
4.5 Results and Analysis	88
Chapter 5 Steep Slope Nonlinear Deformation Prediction	94
5.1 Nonlinear Methods Analysis for Deformation Predicting	95
5.2 Improved Grey Model	97
5.3 Improved Phase-space Prediction Method	102

5.4	Results and Analysis	106
Chapter 6	Steep Slope Deformation Stability Analysis	113
6.1	Evaluation Criterion for Slope Deformation Stability	114
6.2	Geostatistical Analysis for Slope Deformation Stability	118
6.3	Maximal Lyapunov Exponent Analysis for Slope Deformation Stability	123
6.4	Results and Analysis	128
References	135

第1章 绪论

1.1 问题的提出

地质灾害是地质体在众多因素作用下变形、破坏、运动而给人类生存环境和生命财产造成危害与损失的地质现象(郑颖人等,2007;宋俭等,2004)。当地质体为边坡岩体时,其在重力、构造力、地震力及各种外营力的长期作用下,常有风化剥蚀、坍塌、滑坡、崩塌等边坡地质灾害发生。边坡地质灾害既包括人工边坡工程中的地质灾害,也包括天然边坡中的地质灾害。全世界有60多个国家和地区经常受边坡地质灾害影响。边坡地质灾害已成为同地震和火山相并列的全球性三大地质灾害之一。我国地处太平洋板块、印度洋板块和亚欧板块的交汇点,不但位于环太平洋地震带上,而且还处于地中海—喜马拉雅地震带经过的地方,地质构造活动剧烈而频繁。同时,我国山地和高原分布十分广泛,约占国土总面积的69.3%,加上季风气候、丰富的水资源条件,以及作为一个发展中国家所面临的大规模工程建设,使我国成为世界上边坡地质灾害最广泛、危害最严重的国家之一。

边坡地质灾害虽然不及地震那样易造成广泛而强烈的社会影响,使人们“谈震色变”,但由于它分布广泛、发生频率高,给人们造成的生命和财产损失并不亚于一般地震、火山喷发等地质灾害(宋俭等,2004;中华人民共和国国家统计局,2009)。国内外在这方面经历的惨痛教训不乏其数。例如,1903年加拿大艾伯塔省龟山发生的大滑坡,不仅导致大范围的铁路瘫痪,而且造成70余人伤亡。1963年意大利瓦依昂水库边坡发生了欧洲历史上最大的灾难性滑坡,共计2500余人死亡。1970年秘鲁钦博特市西岸约25 km处发生7.7级地震,引发大量的滑坡与崩塌,此次地震共造成6.7万人死亡。1980年我国成昆铁路铁西车站瓦底沟发生大滑坡,220万立方米滑坡体完全封堵了铁西隧道口,中断行车40天,造成的经济损失仅滑坡工程整治费就达0.25亿元。1989年我国云南漫湾水电站左岸缆机平台边坡发生10.6万立方米大规模滑坡,仅滑坡处理就耗资1.2亿元,延误工期1年以上,损失超过10亿元。2008年我国四川汶川发生8.0级特大地震,失踪与伤亡8.7万余人,经济损失达8451.4亿元。在汶川地震中,大量滑坡、崩塌等次生边坡地质灾害造成的损失约占总损失的1/3。

不论是天然边坡的坍塌、滑坡及崩塌等地质灾害,还是水利水电开发、矿产资源开采、陆路交通建设等人类工程活动引起的人工边坡失稳地质灾害,都对经济建

设和人民生命财产造成了巨大损失。尤其在大型水利工程建设和运营过程中,高边坡的稳定性涉及工程本身和整体环境的安全,其失稳破坏不仅会直接摧毁工程建设本身,还会通过环境灾难对工程 and 人居环境带来间接的社会性灾难,故其已成为影响国民经济及社会可持续发展的一个重大问题。因此,探求防治边坡地质灾害的方法特别是高边坡工程的稳定性研究和整治有重大意义和价值。在科学技术不发达的过去,由于边坡地质灾害的“突发”特征及其运动规律的不确定性,人们对于边坡地质灾害的认识水平仅停留在宏观现象的观察上。进入 20 世纪,国内外学者在边坡工程实践的基础上,对边坡体的强度稳定性评价进行了较为广泛和系统的研究,并逐渐认识到监测技术对高边坡稳定性研究的重要性。随着监测仪器设备与技术水平的不断提高,基于变形监测技术的稳定性研究受到学术界和工程界普遍关注,并形成了在高边坡稳定性评价中要开展变形稳定性评价的工作原则(黄润秋等,2002)。

高边坡稳定性研究是从生产实践中凝练出的重要科学问题,世界各国尤其是我国修建的众多大型工程和发生的大量边坡滑坡,不但丰富了高边坡工程实践的内容,亦推动了高边坡工程的理论发展(黄润秋等,2002)。20 世纪 80 年代以来,我国经济的高速增长极大地刺激了自然资源和能源的开发,以及交通体系的完善和城镇的都市化进程。一系列重大工程项目相继开工建设,西部大开发、三峡工程、青藏铁路和南水北调等,其规模之大、速度之快、波及面之广和难度之高举世瞩目。随之给矿山、铁道、城建特别是水利水电部门带来了众多的高边坡工程问题,对岩土工程及相关领域工作者提出了空前严峻的挑战。例如,“十五”期间开工建设的龙滩、小湾、水布垭、构皮滩、锦屏一级、溪洛渡等大型水电站,“十一五”开工建设的向家坝、糯扎渡、锦屏二级、虎跳峡、官地、两河口等高坝枢纽工程均形成了小则百余米,大则 300~1 000 m 高度不等的复杂边坡工程问题。与此同时,大规模工程建设高峰期的到来也为工程地质、岩石力学和大地测量等相关学科之间的相互渗透提供了千载难逢的机遇,使得与现代科学有关的一系列新的理论方法相继被引入边坡科学研究,从而大大促进了边坡工程基础理论的深入、应用研究的更新及决策水平的提高。

由上述可见,大量的高边坡稳定性问题已成为工程地质、岩石力学和大地测量等学科的热点课题,也是我国重大水利水电工程建设的关键难题。其中,具有独特而复杂的地质环境和强烈的河谷动力学过程的我国西南地区最为突出和典型,在世界范围内也属罕见。小湾水电站位于我国云南省西部南涧县与凤庆县交界的澜沧江中游河段与支流黑惠江交汇后下游的 1.5 km 处,是“国家西电东送骨干电源和重点工程”和“云南省实施西部大开发战略标志性工程”,被誉为澜沧江中下游梯级电站的“龙头水库”(何秀凤,2007)。工程枢纽区河段长约 2 300 m,当正常蓄水位为 1 240 m 时,河谷宽 720~800 m;河谷呈“V”字形,两岸山坡陡峻,高程在

1 600 m以下,平均坡度为 $40^{\circ}\sim 42^{\circ}$;两岸冲沟发育、深切,岸坡地形欠完整,边坡岩体卸荷作用强烈,深度一般为20~50 m,在山梁部位可达160 m;工程施工开挖过程中形成了多处人工高陡边坡,左右两岸高、低缆平台;坝基一线开挖边坡高度近700 m,坝基上下游两侧开挖边坡不仅高度大,而且在左坝肩部位触及饮水沟堆积体。因此,高边坡稳定性问题是小湾水电站建设中的重大工程问题,其中2号山梁饮水沟堆积体高边坡是该电站边坡监测的重点。

2号山梁饮水沟堆积体位于小湾水电站左岸坝前,沿饮水沟呈似舌形分布,上宽下窄,南侧为相对凸起的山脊,北侧为冲沟凹地。该堆积体平均坡度为 $32^{\circ}\sim 35^{\circ}$,前缘高程为1 130 m,后缘高程为1 590 m,平均铅直厚度约33~36 m,最大厚度为60.63 m,长度约700 m,平均宽190 m,总体积为4 000 000 m^3 (何秀凤,2007)。堆积体主要由碎石质砂壤土(碎石含量20%~40%)、块石和特大孤石(3~5 m)组成,在天然状态下是稳定的,但由于堆积体靠近左坝肩,坝肩开挖时必然触及堆积体前缘,故可能引发堆积体失稳。虽然对堆积体实施了降坡、支护等工程措施,但形成的具有355 m高程差的高边坡稳定性问题仍是影响左岸缆机平台及导流洞开挖等一系列工程能否顺利完成、按期截流的重要因素,成为电站建设中亟须解决的关键科学与工程难题之一。现场变形监测可以提供坡体稳定性动态演化的定量数据,是评价边坡稳定性及失稳预测预报的重要依据。因此,高边坡失稳破坏的发生与变形有着极为密切的联系,高边坡变形监测工作应得到广泛和高度的重视。

高边坡变形失稳的发生往往集中在气候恶劣或是施工条件恶劣的情况下,这就要求边坡变形监测要从原始数据获取、传输、管理、变形解算与预测预报向系统化、自动化方向发展。以全球定位系统(Global Positioning System, GPS)为代表的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术以其全球性、全天候、全时域、高精度、测点之间不需通视、同时测定三维变形及易于实现自动化等优点成为当今最先进的变形监测手段之一,正逐步代替常规大地测量方法应用于人工高边坡和大型滑坡变形监测(何秀凤,2007)。显然,GNSS精密定位技术对高边坡工程的设计、施工及运营在安全稳定和经济合理的协调中具有极其重要的桥梁作用。然而,GNSS高边坡变形监测信息处理目前还存在如下问题:①水电工程一般位于深山峡谷地区,导致GNSS卫星信号遮挡严重、卫星几何图形结构强度低,降低了GNSS基线向量、三维变形解算精度,难以达到监测精度要求;②GNSS边坡自动化监测系统可连续获得多个测点、大样本、三维变形时间序列,而边坡变形预测与稳定性分析方法大多仅适用于单个测点、小样本、单维变形序列。鉴此,围绕GNSS变形监测信息的新解算模型与方法、变形预测与稳定性非线性整体分析方法,及其在小湾水电站2号山梁饮水沟堆积体高边坡监测中的应用开展的研究,在一定程度上拓宽了GNSS卫星定位方法在峡谷地区高边坡等特殊精密工程变形监测应用的范围,丰富了高边坡变形预测及稳定性分析的内容。

1.2 GNSS 变形监测研究现状

1.2.1 监测方法

通过变形监测可以获取大量重复观测的数据,这些数据包含变形信息,同时也不可避免地受观测误差的影响,因此必须采用一定的平差方法正确解算变形信息。与基线向量解算模式类似,GNSS 变形监测信息解算模式可分为关联解算模式与独立解算模式。关联解算模式是将基准点(拟稳点)和多个监测点统一纳入监测网平差模型进行变形求解,所得结果的精度及可靠性取决于平差模型和平差基准(黄声享等,2003)。独立解算模式是对基准点和单个监测点采用一定的数据处理方法获得监测点相对基准点的相对变形信息。后者较前者的数学模型简单、数据处理响应速度快,故应用更加广泛。目前,独立解算模式已发展了两种变形监测信息处理方法:一是以几分钟甚至几小时作为一个时段,采用静态相对定位方式求解基—测站基线向量,通过与首期基线向量的比较得出变形序列,其处理方法称为精密基线方法,在变形监测实践中常采用该方法,其不足之处是存在周跳修复和模糊度搜索等棘手问题,且不利于 GNSS 实时自动化监测优越性的发挥;二是采用单历元变形监测方法建立高精度变形监测模型,直接求解三维变形,该方法避免了整周模糊度解算、周跳探测与修复等,因此在理论和应用上具有更加广阔的前景。目前,GNSS 精密基线方法和单历元变形监测方法的应用研究成果主要是以 GPS 为技术基础。

1. GPS 精密基线方法

GPS 精密基线方法可以间接获取变形监测信息,其原理是利用载波相对定位原理解算基准点与监测点的基线向量,然后比较各期基线向量与首期基线向量之差,间接地获得监测点变形。采用载波相位观测值求解(首期)基—测站基线向量是该方法求解变形的的基础,而获得精密基线向量的关键是周跳探测与修复、整周模糊度正确固定。

关于周跳探测与修复,已有相关研究有:利用电离层残差组合法的周跳探测(Goad,1987),基于统计检验理论的卡尔曼周跳探测修复方法(Schwarz et al, 1989),基于宽巷与伪距组合的周跳检测与修复方法(Blewitt,1990),连续周跳问题的处理策略与方法(Salzmänn,1995),基于小波变换技术的周跳检测方法(黄丁发等,1997),采用卡尔曼滤波技术的连续周跳探测方法(何海波等,1999),基于最优奇偶向量特征的周跳检测与修复方法(杨静等,2003),基于时间相对定位理论的周跳探测方法(Yu Guorong et al,2005),基于传统的伪距/载波探测原理模拟对多种情况下周跳与粗差的探测及修复(刘旭春等,2006),周跳在高阶差分中的

时序特征及精确估计方法(王爱生等,2008)。以上研究利用差分、组合、拟合、卡尔曼滤波和小波等方法均成功实现了较大周跳的探测与修复,但有效探测与修复小周跳的方法仍是研究难点。

关于整周模糊度固定,已有相关研究成果包括:模糊度函数法及其在静态定位、伪动态定位和动态定位中的应用研究(Mader,1992),基于双频伪距及载波相位线性组合的模糊度解算方法(Melbourne,1985),最小二乘模糊度降相关(least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)的解算方法(Teunissen,1995),得到了广泛的关注与发展。为避开多历元模糊度解算方法中存在的周跳探测与修复问题,国内外学者研究并提出了单历元模糊度求解方法,如GPS双频单历元模糊度快速固定方法(陈永奇等,1998;Corbett et al,1995)、基于先验变形约束条件的双频单历元模糊度解算方法(熊永良等,2001)、基于概略坐标的阻尼单历元模糊度估计方法(Liu Genyou et al,2002;Wang et al,2006)。此外,模糊度固定解的可靠性研究也是国内外研究的热点和难点,主要是围绕基于假设检验理论的近似确认方法(Verhagen,2005)和基于成功率的估计方法(Teunissen,2000)两方面开展,并且仍属于开放性研究问题。

2.GPS单历元变形监测方法

GPS精密基线方法的本质是在模糊度固定之后解算基线向量,这对变形信息求解的数据处理快速响应极为不利,而且,单历元模糊度固定解易受粗差等干扰,导致其可靠性较低(胡丛玮等,2001)。鉴此,结合首期基—测站基线向量已知条件和双频单历元模糊度方法提出了直接提取变形信息的高精度GPS变形监测方法,即单历元变形监测方法(李征航等,2002)。该方法利用变形监测中变形量引起双差值的变化一般小于半个波长的特点,避免了模糊度固定、周跳探测与修复,实现了不解算基线向量,直接从载波相位观测值中提取变形信息,具有数据处理模型结构简单、响应速度快等优点。但是,该方法对少于4颗可见卫星的载波相位观测值无法建立变形参数模型,严重制约了单历元变形监测方法在卫星信号严重遮挡区域(如峡谷地区高边坡工程)中的应用。为解决该问题,余学祥等(2004)提出了用2颗GPS卫星进行变形监测的单历元似单差方法,以适用于深山峡谷地区卫星信号遮挡严重的监测环境。然而,与单历元方法相比,似单差方法在最不利情况下要求测点实际变形量不超过0.144倍波长,同时增加了针对非差相位观测值的卫星钟差、大气延迟、相对论效应等多项误差改正工作,且需要估计接收机钟差,不利于数据处理响应速度和结果可靠性的提高。此外,似单差方法对同步卫星数要求的理论依据有待商榷。

由上可见,单历元变形监测方法是在已获得首期基—测站基线向量的前提下,利用基于载波相对定位原理建立单历元变形监测模型,直接求解三维变形,避免了模糊度固定、周跳探测与修复等难题,不仅适用于定期重复监测模式,而且适用于

固定连续监测模式和动态实时监测模式,从而在变形监测领域比精密基线方法更具应用前景。但是,单历元变形监测方法在峡谷地区高边坡变形监测中还存在诸如卫星信号遮挡、几何图形强度不佳对监测精度的影响、允许实际变形量范围偏小等问题,需要进一步研究。

1.2.2 监测应用

在 20 世纪 80 年代及以前,变形监测工作主要是采用以经纬仪、水准仪、测距仪和全站仪等仪器为主的大地测量手段。这些利用传统仪器的变形监测方法虽然技术成熟,精度较高,但其对施测环境要求高,不适合在地形地貌起伏大、气候复杂多变、施工干扰大等复杂环境下工作。此外,常规大地测量方法在连续性、实时性和自动化程度等方面越来越难以满足精密变形监测的要求。进入 20 世纪 90 年代以后,GPS 以其精度高、站间无需通视、不受天气限制、同时测定三维坐标和易于实现自动化等优越性,为精密变形监测提供了一种先进的有效手段(何秀凤,2007;余学祥等,2004)。目前,以 GPS 为代表的卫星定位技术已在大坝、高边坡及地壳运动监测中得到了应用(李征航等,2000;吴云等,2003;徐绍铨等,2003;Frei et al, 1994;Hudnut et al, 1998)。

1. GPS 在大坝监测中的应用

对施工与运营期间大坝及其构筑物的 GPS 监测工作,国内外均进行了有益的尝试与应用。在国外,Frei 等(1994)在瑞士南部地区的马贾(Maggia)谷地纳雷特(Naret)大坝进行了 GPS 网的观测和重复测量试验,将 WILD200 双频 GPS 接收机观测结果与 ME5000 精密测距仪和 T3000 精密电子经纬仪的观测结果进行了比较,表明 GPS 观测精度可以达到 1 mm 左右,从而开创了 GPS 大坝监测的先河。Hudnut 等(1998)在美国加利福尼亚帕科伊马(Pacoima)大坝建立了 GPS 自动化变形监测系统,该 GPS 连续监测系统由距坝 2.5 km 的 1 个基准点、距坝约 30 km 的南加利福尼亚综合 GPS 网中的 3 个点和坝上 2 个监测点组成,数据处理采用麻省理工学院的 GAMIT 软件和 GPS 精密星历进行,每 6 小时的观测数据作为一个测段。2 年的观测数据处理结果表明,几个月的观测数据可以探测大坝毫米级变形,单天解精度为 4~6 mm。在国内,我国湖北清江隔河岩大坝于 1998 年建成了外观变形 GPS 自动化监测系统,它由 2 个基准点和 5 个监测点构成,包括数据采集、传输、处理与分析等子系统,其 6 小时监测数据解算的精度优于 ± 1.0 mm,2 小时解算精度优于 ± 1.5 mm,成功将 GPS 定位技术应用于大坝观测。我国河南小浪底大坝于 2002 年进行了 GPS 一机多天线监测试验,将一机多天线与常规 GPS 监测结果进行对比,结果表明,监测成本大幅度下降的同时保证了与常规 GPS 监测精度相当,为大范围精密变形监测开辟了一种新思路。

2. GPS 在高边坡地质灾害监测中的应用

高边坡地质灾害监测主要包括滑坡体变形、滑坡体内应力应变、降雨量及地下水位等外部环境监测。其中,变形是尤为重要的监测信息,也是判断边坡是否发生滑坡的重要依据。1999年,在三峡库区新滩至巴东段9个滑坡体和3处边坡进行了GPS监测试验,结果表明,GPS较常规大地测量方法在成果精度、响应速度、时效性、效益等方面都有明显的优势,验证了GPS代替常规大地测量方法进行三峡库区边坡监测的可行性。2000年,三峡工程万州区开始建设GPS监测网,将库区30余处滑坡纳入监测之中,各个滑坡上有3~6个不等的变形监测点,建成了由120个流动站组成的GPS滑坡变形监测网,且监测数据采集、处理和分析均基于万州库区滑坡灾害信息系统。近两年的定期监测资料表明,大多数GPS控制点的坐标变化均小于 $\pm(3\sim 4)$ mm。2006年,在雅砻江卡拉水电站近坝址河段内分布的田镇、田三、岗尖、下马鸡店和草坪五处特大型滑坡建立了由6个基准点和36个监测点组成GPS监测网,Bernese软件处理结果较好地反映了各滑坡体的变形情况。2007年,郑万模等人建立了四川丹巴县甲居、干桥沟、红军桥和亚喀则四个典型滑坡的GPS监测网,共布设了60个GPS监测站,利用GAMIT/GLOBK软件进行数据处理并计算了各GPS监测站的速度矢量,结果较为准确地反映了四个滑坡体的变形趋势。

3. GPS 在地壳运动监测中的应用

GPS地壳运动监测包括全球板块大构造运动、亚板块和板块内地块的构造运动及小尺度活动构造带的地壳变形监测研究与工作,已在国内外得到了广泛的开展。美国航空与航天局(NASA)喷气动力实验室、斯克里普斯海洋研究所及南加州地震中心(SCEC)共同建立了南加州综合GPS观测网络(Southern California integrated GPS network, SCIGN),该网络由约250个GPS站组成,在区域上每30 km一个站。其中,在主要活动断层上设置两条密集型测线,沿两条测线每3 km一个站,主要为地震预测服务。日本提出建立平均站间距30 km的全面覆盖国土的密集GPS观测台阵,拥有1000多个参考站,目的在于监测太平洋板块和菲律宾海板块的消减运动造成的日本列岛的应变场,监测板块运动伴有地壳应变积累的地震活动和火山爆发,研究GPS与验潮站联测海平面变化及大气层变化。我国于1997年正式启动了国家重大科学工程——中国地壳运动观测网络(crustal movement observation network of China, CMONOC),由中国地震局牵头,总参测绘局、中国科学院和国家测绘局共同建设,于2000年通过国家验收并投入使用。CMONOC由基准网(25个连续观测站)、基本网(56个定期复测站)、区域网(1000个不定期复测站)和数据传输与分析处理系统四大部分组成,是一个综合性、多用途、连续观测、数据共享、全国统一的观测网络,以地震预测预报为主,兼顾大地测量和国防建设的需要,可服务于广域差分定位、气象预报、电离层监测等领域。

在以上提及的大坝监测、边坡滑坡监测及地壳运动监测应用中,绝大多数采用定期重复监测方式获取变形监测数据。因此,一般是基于精密数据处理软件通过精密基线方法获得监测对象的变形信息。要广泛应用单历元变形监测方法直接获取变形信息,需采用固定连续监测方式,并结合监测工程环境特点深入研究新的变形监测数学模型与方法。

1.3 高边坡变形分析研究进展

1.3.1 变形预测分析

变形序列的建模与预测分析,即基于监测对象的多期或连续变形监测时间序列数据利用一定的数学方法建模得到变形规律并对监测对象作出变形预测与解释(何秀凤 2007;黄声享等,2003),是充分发挥监测作用的核心工作。由于变形监测手段的日益丰富、变形监测方法的日益精密,以及工程监测需求的日益增多,变形时间序列的预测分析研究也得到了较为全面的开展。近年来,取得的研究成果主要包括以下两方面。

1 线性变形预测分析

线性变形预测分析的方法主要有多元线性回归、时间序列分析和卡尔曼滤波。

多元线性回归是研究一个变量(变形)与多个因子(影响因素)之间非确定关系(相关关系)的最基本方法。当变形的影响因素已知且可得到其观测值时,便能够应用多元线性回归方程描述变形与影响因素之间的关系。但在高边坡工程中,某些因素与变形间的关系是不确定的,复杂的现场情况往往使得确定影响因素非常困难。即使确定了变形的多个影响因素,由于客观条件的限制,也很难通过测量得到其序列值,因而无法建立变形与各因素间的多元线性回归方程。

时间序列分析是 20 世纪 20 年代后期开始出现的一种动态数据处理方法,其代表性模型包括自回归(autoregression, AR)模型、滑动平均(moving average, MA)模型和自回归滑动平均(autoregression moving average, ARMA)模型,并在变形监测领域得到了应用研究(黄声享等,2003)。徐培亮(1988)较早将时间序列分析用于大坝变形预测;刘志平等(2007a)将时间序列分析应用于边坡变形预测;尚岳全等(2000)分别利用 AR 模型和 MA 模型描述滑坡变形趋势和波动性;许国辉等(2004)研究了 AR 模型定阶的改进 F 检验法;陈廷武等(2008)将时间序列分析应用于非线性变形预测分析。但是,时间序列分析本质上属于线性方法范畴,因而需要结合其他方法先剔除时间序列的非线性趋势项。

卡尔曼滤波模型是 20 世纪 60 年代发展起来的动态实时数据处理方法。将变形体视为一个动态系统,其状态可用卡尔曼滤波模型即状态方程和观测方程描述。

若状态方程中含监测点的位置、速率和加速度等状态向量参数,则为典型的动力学模型。卡尔曼滤波方法的优点是无须保留历史观测值序列,按照线性递推算法把参数估计和预测有机地结合起来。徐晖等(1997)较早将卡尔曼滤波应用于高层建筑变形监测数据处理;Mastelic-Ivic(2001)给出了一种改进的卡尔曼滤波变形分析方法;王利等(2006)基于卡尔曼滤波研究了大坝动态变形监测数据处理;陆付民等(2008)基于指数趋势模型提出了改进的卡尔曼滤波并应用于岩体变形分析;戴吾蛟等(2009)分析比较了四种卡尔曼滤波状态模型,得到了不同模型在变形监测应用中的优缺点,并指出随机游走模型适用于描述缓慢变形。

2. 非线性变形预测分析

非线性理论的迅速发展,特别是灰色系统、分形论、混沌动力学及人工神经网络模型等的提出与应用,为变形预测分析研究带来了新方法。近年来,许多学者围绕灰色预测、混沌时间序列预测、支持向量机及神经网络预测等进行了大量的研究。

关于灰色预测,柳治国等(2004)研究了基于非等时间步长GM(1,1)模型的边坡变形预测;唐天国等(2005)通过分析灰色模型递推式存在的初始条件缺陷,给出了改进的GM(1,1)模型;何文章等(2005)探讨了不同差商形式对GM(1,1)模型的影响;岳东杰等(2000)在分析灰关联度的基础上建立了常规灰关联模型GM(1, M);何习平等(2007)对GM(1, M)模型中灰导数及其最佳背景值的生成进行了改进研究,并给出了生成因子的经验计算公式;吉培荣等(2000)在分析GM(1,1)模型常规建模方法有偏性的基础上,提出了GM(1,1)模型无偏建模方法。需指出的是,由于边坡监测点演化系统包括多维变量如三维变形、应力及渗压等状态量,且这些系统状态量往往密切关联,因此应深入研究多变量灰色建模方法以更加客观地描述边坡变形规律(刘志平等,2008a)。

关于基于混沌时间序列分析的相空间预测模式,Farmer等(1987)较早研究了基于混沌动力学系统理论的多维空间向量预测方法;付义祥等(2003)基于混沌时间序列的相空间重构得到了反映边坡变形特性的关联维数,为研究边坡位移预测奠定了基础;陈益峰等(2001)研究了基于相空间重构的李雅普诺夫指数(Lyapunov)预测法,并得出基于相空间重构的预测方法具有比非平稳时间序列更高预测精度和更广适应性的结论;蒋斌松等(2005)研究了深部岩体变形混沌预测方法;盛松涛等(2006)基于水利工程高边坡历史变形数据的相空间重构,建立了加权一阶局域法多步预报模型,并取得了较好的预测效果;王创业等(2008)对边坡位移预测中的相空间重构方法进行了综述,并指出相空间预测模式是目前边坡变形预测中较有前途的方法。

关于支持向量机和神经网络预测,赵洪波等(2003)提出了一种新的岩土结构位移预测的进化支持向量机方法,工程应用结果表明该方法具有可靠和实时的优点;董辉等(2007)针对滑坡变形时序非线性与少数据的特点建立了支持向量机预