

复杂岩体边坡变形与 失稳预测研究

FUZA YANTI BIANPO BIANXING YU
SHIWEN YUCE YANJIU

苗胜军 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

复杂岩体边坡变形与 失稳预测研究

苗胜军 编著

北 京
冶金工业出版社
2016

内 容 提 要

边坡的稳定性既受到边坡所赋存的地质环境的制约与控制,同时又受到外界荷载条件和开挖方式的影响。本书将复杂岩体边坡的破坏模式、稳定性分析、位移动态监测、降雨入渗影响、边坡变形预测及失稳预报等问题组成一个研究链,从基础理论和工程实践两方面对复杂岩体边坡变形失稳的动态变化规律进行了全面系统的研究。内容包括:边坡工程研究概述;复杂岩体边坡工程地质环境研究;边坡岩体开挖的数值模拟研究;边坡变形 GPS 动态监测控制网的优化设计;GPS 边坡变形动态监测数据处理及结果分析;基于 BP 神经网络边坡变形非线性预测模型研究;降雨入渗对边坡稳定性的影响研究;基于灰色 Verhulst 理论的改进“斋藤法”边坡失稳预报研究。

本书内容广泛、科学系统、理论联系实际,可供矿业工程、水利水电工程、安全工程、隧道工程等科研和工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂岩体边坡变形与失稳预测研究/苗胜军编著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-5024-7384-6

I. ①复… II. ①苗… III. ①岩质滑坡—边坡稳定性—
研究 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274062 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcs@cnmp. com. cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7384-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版, 2016 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.5 印张; 242 千字; 187 页

54.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

我国冶金矿山 80% 的矿石量来自于露天开采, 露天矿山对我国工业的可持续发展具有特殊且重要的意义。目前, 我国一大批大、中型露天矿山已由山坡转为深凹开采, 最大开采深度已超过 500m, 最终形成的露天边坡的垂直高度将达到 700~1000m。随着开采深度的不断增加和边坡的加高加陡, 采场开采难度越来越大, 局部边坡的失稳破坏常有发生, 边坡采动灾害问题日益突出。因此, 对边坡变形进行合理、有效的监控和及时、科学的危险预警具有现实而深远的意义。边坡变形既受到边坡所赋存的复杂地质环境的制约与控制, 同时又受到外界荷载条件和开挖方式的影响。由于工程地质环境及岩土体参数的复杂性、多变性、随机性, 边坡工程可以看成是一个不断变化着的开放的复杂巨系统。但是由于深凹露天矿高陡边坡所处的复杂地质力学环境, 以及边坡破坏机理与诱发因素的复杂性和边坡失稳的突发性及不确定性, 目前对边坡失稳的发生机理、监测、预测及防控的基础理论研究还亟待深入。

本书以首钢矿业公司水厂铁矿复杂岩体边坡变形与失稳预测为背景, 运用工程勘查、理论分析、试验测试、现场监测、数值模拟、人工智能等多种综合分析研究方法, 对复杂岩体边坡变形的动态变化规律、破坏机理进行了系统研究, 主要内容如下:

(1) 首先介绍了国内外在边坡变形、稳定性研究、监测技术和方法、失稳预测预报等方面的研究现状和趋势; 然后通过工程地质调研, 对首钢矿业公司水厂铁矿北区采场区域复杂地质环境、矿区地层、边坡岩组、岩性分布及构造特征、岩体结构面的分布规律、主要的破坏

模式等进行了深入分析研究；为边坡开挖数值计算模型和边坡变形动态监测系统的建立提供了依据。

(2) 总结了现有的主要岩体力学参数确定方法，以试验为基础，采用地质强度指标（GSI）和非线性 Hoek-Brown 破坏准则确定边坡岩体宏观力学参数；通过压水和注水试验，获得了边坡不同岩体的渗透系数；采用应力解除法和水压致裂法进行了地应力现场测量，确定了各测点的地应力状态，获得了矿区深部岩体的地应力分布规律；为边坡开挖变形的数值模拟研究提供了力学参数。

(3) 采用 FLAC 二维和三维有限差分计算程序，分别对北区采场上盘 21 号勘探线所在剖面边坡与 I 区北端边坡开挖进行了固-流耦合数值模拟研究，对边坡开挖过程中的应力场、位移场、破坏场和渗流场进行了系统和全面的计算模拟，对复杂岩体边坡变形机制与规律以及破坏机理进行研究，对边坡的稳定性状况进行了分析。

(4) 针对露天矿复杂岩体边坡的变形特点，基于卫星信号、观测量等基础理论知识，研究了多台 GPS 接收机同时观测静态差分解算方法，提出了适合于露天矿这种小范围的 GPS 短基线测相伪距观测方程及其线性化，简化了原本繁琐的推导过程和观测方程，研究了 GPS 载波相位静态相对定位原理及其单差、双差、三差线性组合方程。

(5) 通过对水厂铁矿边坡工程地质勘查、构造地质力学资料的分析，根据边坡不同部位的重要程度，对水厂铁矿边坡变形监测进行分级，提出了覆盖整个采区的 GPS 边坡变形动态监测控制网，并对控制网的优化设计、布设、监测方式及首期和终期网形结构特点进行了分析研究，提出采用 GPS 和其他常规仪器相结合的测量技术，对边坡的稳定性进行监测。

(6) 对 GPS 控制网的星历预报、基线向量解算、网平差结果及其残差不确定度进行了细致分析研究，结合现场开挖和 GPS 控制网动态监测数据，对水厂铁矿边坡变形位移、速度和趋势以及 GPS 系统在矿

山边坡变形监测中的应用进行了全面分析,提出了适合于描述边坡变形的水平位移趋势等密图。

(7) 分析了影响边坡变形的敏感性因子,以岩体结构、岩体质量、降水、爆破开挖、监测点离坡肩距离、边坡高度、边坡角、边坡倾向、地应力方向、温度及时间为输入变量,以水平 N、E 方向和高程 H 方向 GPS 监测数据为输出变量,利用改进的 BP 神经网络的自组织、自学习、强容错性和较强的非线性动态数据处理能力,建立基于 BP 神经网络的边坡变形非线性预测模型,为复杂岩体边坡变形预测由定性向定量转变提供了一个较为有效的方法,并验证了该预测模型的精度和可靠性。

(8) 对降雨入渗诱发滑坡的基本原理进行了细致研究,运用 GEO-SLOPE 软件建立降雨入渗边坡模型,模拟计算在不同降雨强度和降雨持时下水厂铁矿北区采场边坡岩体的孔隙水压力、应力应变及安全系数,对边坡滑坡失稳机理与降雨入渗诱发滑坡条件进行了分析。

(9) 根据现场监测数据和“斋藤法”蠕变理论,提出了临近滑坡但未滑落部位边坡变形改进的“斋藤法”曲线和变形发展 4 阶段,推导出改进的“斋藤法”变形、速率、加速度曲线方程及失稳时间预报模型,并建立了基于位移信息的 Verhulst 灰色模型以确定失稳预报时间模型的参数。采用 GPS 和全站仪相结合的测量技术,对水厂铁矿上盘及四川某自然边坡滑坡变形过程进行了监测,利用监测数据对基于 Verhulst 灰色理论的改进“斋藤法”失稳时间预报模型进行了验证,确定了该模型的可靠性及精度。

本书为我国金属深凹露天矿山滑坡灾害监控与安全开采积累了宝贵的经验,为有效解决类似条件矿山采动灾害问题提供了示范作用。研究所取得的理论、方法与技术成果,完全可以推广应用于其他边坡工程,具有重大的学术价值。本书的研究成果已经在首钢矿业公司水厂铁矿得到应用,项目的实施为水厂铁矿深部安全开采提供了技术保

障,具有重大的经济效益和社会效益。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划 (“973”计划, 2015CB060200)、国家自然科学基金 (51574014) 的资助。本书在撰写过程中参阅和借鉴了诸多专家的文献与研究成果,在此对这些文献的作者致以崇高的敬意。同时,感谢北京科技大学硕士研究生梁明纯、张邓、郝欣、王子木、孔长青、郭向阳、宋元方、王辉,他们参与了与本书有关的文献查询、绘图、文字编校等工作,为本书的出版付出了辛勤劳动。

由于作者水平所限,书中不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外研究进展及现状	1
1.1.1 边坡变形与稳定性研究现状	1
1.1.2 边坡变形监测技术方法及应用	3
1.1.3 边坡变形失稳预测预报研究历史和现状	7
1.2 存在的问题及本书研究目标	9
2 矿山复杂岩体边坡工程地质环境研究	12
2.1 概况	12
2.2 区域地质环境	13
2.2.1 区域构造	13
2.2.2 区域地层	13
2.3 边坡工程地质分区	14
2.4 矿区地层及边坡工程地质岩组特征	15
2.4.1 矿区地层	15
2.4.2 研究区域边坡位置和形状	15
2.4.3 边坡工程地质岩组及风化特征	15
2.5 边坡地质构造特征	17
2.5.1 研究区域边坡断裂构造特征	17
2.5.2 边坡岩体不连续面的统计分析	19
2.6 边坡岩体结构特征及岩体破坏模式分析	20
2.6.1 边坡岩体结构特征	20
2.6.2 边坡岩体潜在破坏模式分析	21
2.6.3 滑坡调查与分析	23
3 边坡岩体开挖的数值模拟研究	25
3.1 研究方法对象	25

3.2 非线性有限差分方法及 FLAC 计算程序简介	25
3.2.1 有限差分法	25
3.2.2 FLAC 程序简介	26
3.3 边坡开挖二维数值模拟研究	27
3.3.1 二维数值计算模型	27
3.3.2 力学模型和参数	29
3.3.3 模拟开挖过程	35
3.3.4 二维模拟计算结果分析	43
3.4 边坡开挖三维数值模拟研究	44
3.4.1 三维数值计算模型	44
3.4.2 力学模型和参数	47
3.4.3 模拟开挖过程	47
3.4.4 数值计算结果分析	49
4 边坡变形 GPS 动态监测控制网的优化设计研究	74
4.1 露天矿边坡动态监测	74
4.1.1 边坡监测目的与设计原则	74
4.1.2 国外矿山边坡监测	74
4.2 全球定位系统 (GPS) 简介	75
4.2.1 GPS 系统概述	75
4.2.2 GPS 系统的组成与应用	76
4.3 GPS 系统定位原理	78
4.3.1 GPS 卫星信号	78
4.3.2 GPS 观测量的基本概念	79
4.3.3 短基线测相伪距观测方程及其线性化	80
4.3.4 GPS 静态相对定位原理及其线性组合	83
4.4 水厂铁矿 GPS 控制网的建立及优化设计研究	86
4.4.1 水厂铁矿边坡变形监控分级	86
4.4.2 监测点的布设	87
4.4.3 水厂铁矿边坡监测网的建立	88
4.4.4 监测方式与周期	90
4.4.5 水厂铁矿 GPS 控制网的优化设计研究	90
5 GPS 边坡变形动态监测数据处理及结果分析	97
5.1 GPS 控制网监测数据处理	97

5.1.1	WGS-84 坐标系统及其转化	97
5.1.2	星历预报	98
5.1.3	基线向量解算	99
5.1.4	GPS 控制网基线向量三维网平差	101
5.2	GPS 控制网平差结果及不确定度分析	102
5.2.1	基线解算结果及观测质量分析	102
5.2.2	网平差结果及其不确定度分析	104
5.3	GPS 控制网监测点变形结果	106
5.4	边坡变形水平位移趋势等密图	111
5.5	GPS 边坡变形动态监测结果分析	115
6	基于 BP 神经网络边坡变形非线性预测模型研究	117
6.1	神经网络的发展及其在岩土工程中的应用	117
6.2	人工神经网络模型	119
6.2.1	神经元模型	119
6.2.2	神经网络模型及其特性	120
6.3	基于梯度下降法的 BP 神经网络	121
6.3.1	BP 神经网络概述	121
6.3.2	基于梯度下降法的 BP 神经网络学习算法	122
6.3.3	BP 神经网络算法流程	126
6.3.4	BP 算法的不足及改进	127
6.4	基于 BP 神经网络的边坡变形非线性预测模型	129
6.4.1	影响边坡变形的敏感性因子	129
6.4.2	预测模型输入输出变量数字化	130
6.4.3	BP 神经网络的设计分析	133
6.4.4	BP 神经网络预测模型的建立	134
6.4.5	预测结果及分析	139
7	降雨入渗对潜在滑坡区域的稳定性影响研究	140
7.1	降雨入渗的基本原理	140
7.1.1	降雨入渗的影响及模拟	140
7.1.2	降雨入渗特征	142
7.1.3	饱和-非饱和渗流模型	143
7.1.4	降雨入渗及地下水影响边坡稳定的机理分析	144
7.2	拟研究潜在滑坡区边坡现状及模型参数	145

7.3 计算模型建立	146
7.3.1 GeoStudio 软件简介	146
7.3.2 计算模型	147
7.3.3 边界条件	147
7.3.4 岩土体的水力参数	147
7.3.5 边坡降雨因素分析	149
7.4 降雨入渗条件下数值分析	150
7.4.1 渗流场变化模拟分析	150
7.4.2 渗流场和应力场耦合分析和评价	153
7.4.3 降雨对边坡稳定性的影响分析	157
7.5 北区采场 II-1 剖面边坡稳定性数值模拟研究	159
7.5.1 24h 降雨入渗作用下渗流场变化模拟	159
7.5.2 24h 降雨边坡渗流与应力耦合分析评价	160
7.5.3 24h 降雨入渗作用下边坡稳定性分析	162
8 基于灰色 Verhulst 理论的改进“斋藤法”边坡失稳预报研究	163
8.1 边坡失稳预测预报的研究内容	163
8.2 基于位移监测和蠕变理论的“斋藤法”	164
8.3 改进的“斋藤法”	166
8.3.1 改进的“斋藤法”曲线及变形阶段	166
8.3.2 改进的“斋藤法”时间预报模型研究	167
8.4 基于位移信息的 Verhulst 灰色模型	168
8.4.1 加生成 (AGO)	168
8.4.2 Verhulst 灰色模型	169
8.4.3 系数 a 、 b 的灰色求解	169
8.5 水厂铁矿北区采场上盘边坡失稳预测预报的研究	170
8.5.1 监测点的布设	170
8.5.2 监测方式与周期	170
8.5.3 监测结果及边坡失稳发展阶段	171
8.5.4 边坡失稳预测预报结果及分析	172
8.6 四川省某自然滑坡预报研究	175
8.6.1 滑坡基本特征及监测点布设	175
8.6.2 滑坡监测及预测结果	175
参考文献	177

1 绪 论

1.1 国内外研究进展及现状

1.1.1 边坡变形与稳定性研究现状

边坡变形是指边坡发生失稳前的运动过程，如露天矿台阶面和地表面出现断续裂缝、运输铁轨出现轻度的弯曲等，此时边坡仍能保持完整。边坡失稳是指边坡变形到一定程度而导致边坡解体、崩落、滑落。边坡变形常是边坡失稳的前兆，但如果能提前加以整治，往往不会发生破坏。

复杂岩体边坡的变形与稳定性研究一直是工程地质学与岩石力学领域的一个重要课题。在很多大型工程活动中，需要对复杂岩体或土体进行大规模开挖，形成人工岩体边坡，其与一般自然斜坡不同的地方在于：（1）形成的时间较短；（2）根据工程的重要性和特点，在一定的时间内应具有较高的安全系数，甚至是严格的变形限制；（3）工程运营中的工况变化一般会影响到边坡的变形和稳定性。为解决复杂岩体边坡的合理设计以及变形与稳定性问题，国内外学者进行了广泛的研究，在理论和实践上都取得了很大的进展。

边坡稳定性的分析研究始于 20 世纪 20 年代，最早是对土体的稳定性进行分析和计算，其成果可见于瑞典的 Fillenius、美国的 Terzaghi 和 Taylor 的土力学经典著作中，直到 60 年代初，才开始进行岩体边坡的稳定性与变形分析研究。

边坡稳定性与变形问题比较复杂，在不同时期，人们用不同的方法从不同的角度对边坡进行了大量研究。我国对边坡工程的研究大致可分为 3 个阶段：

（1）20 世纪 80 年代前，对边坡工程的研究从边坡崩塌（滑）造成的地质灾害出发，定性地分析了边坡失稳的地质环境条件，进而利用类比法对边坡的稳定性进行初步评价。对边坡的稳定性分析与变形计算采用了二维极限平衡方法、块体理论及数值方法。极限平衡方法（limit equilibrium method）是通过潜在滑体的受力分析，引入莫尔-库仑强度准则，根据滑体的力（力矩）平衡，建立边坡安全系数表达式进行定量评价，这种方法由于安全系数的直观性至今仍被工程界广泛应用。块体理论（block theory）由石根华提出，1977 年他在《中国科学》上发表的“岩体稳定分析的赤平投影方法”，标志着块体理论雏形的形成。数值方

法 (numerical methods) 如有限元法、边界元法、离散元法等, 能从较大范围考虑岩体的复杂性, 全面地分析边坡的应力应变状态, 有助于对边坡变形和破坏机理的认识, 较极限平衡方法有很大改进和补充。

(2) 20 世纪 80 年代到 90 年代中期, 为适应大型露天矿建设和改扩建需要, 开展了大量的区域工程地质环境研究, 在大量野外实地调研基础上, 总结、分析了各类边坡的工程地质条件与采矿工程对边坡地质影响问题。本阶段在理论上开始引入统计学、弹塑性力学、流变力学、灰色预测系统等理论和计算机技术。在深入研究了边坡岩 (石) 体的力学时间效应的基础上, 对边坡蠕变变形的研究采用了物理模拟和数值模拟方法, 总结归纳出蠕变边坡变形破坏的类型和模式。在工程实践中, 常常将边坡稳定性评价视作二维问题来简化处理。灰色预测系统是将边坡视为一个灰色系统, 根据影响边坡稳定性的不确定因素之间发展状态的相似或相异程度, 来衡量各因素间的关联程度, 确定它们对边坡稳定性的主次关系, 从而对边坡的变形情况和稳定性进行分析。

(3) 20 世纪 90 年代中期后, 在采矿和区域工程地质环境研究的基础上, 进行了边坡变形与破坏的动态研究, 即边坡滑坡的变形破坏机制研究和稳定性动态评价。在研究方法上广泛引入了数学力学、分形几何、边坡控制技术等, 将具有复杂几何特征的边坡变形问题与稳定性评价问题, 作为三维问题来处理。初步引用了蠕变分析法、模糊数学法、三维极限平衡分析法等。蠕变分析法主要是找出边坡岩体中蠕变变形最大的软岩或软弱夹层, 分析和计算它的蠕变情况, 并且认为边坡的变形破坏特征主要是由它来显现的。模糊理论在边坡稳定分析中的应用主要是用隶属函数代替确定性方法中非此即彼的量, 对那些边界不清的过渡问题进行描述, 最后用综合评价理论对边坡稳定性进行总的评价。极限平衡分析法主要是把边坡岩体的岩块当做刚体来处理, 认为岩体本身不变形, 只考虑岩块沿滑移面的平动与转动等。

目前, 国外一些发达国家对露天矿边坡工程的研究已广泛应用了非线性科学方法论和思维观。即建立在非线性科学基础上的三维边坡的统一变形、破坏、失稳动态分析理论与边坡控制技术, 对复杂岩质边坡进行三维蠕变变形计算。另外, 还将神经网络、极限平衡、数值计算等各种方法进行集成, 建立了集成智能系统, 对边坡的变形与稳定性进行综合分析评价。专家系统和人工神经网络是其中两个最重要的领域。在边坡工程中, 专家系统的应用在于利用专家系统中的指示处理、知识运用和不确定性推理的技术去分析边坡的稳定性; 人工神经网络的应用在于利用神经网络的学习和联想记忆功能, 运用网络存储的领域知识对边坡进行变形与稳定性分析。它既能提供定量的结果, 又能进行定性分析, 还能进行专家式的咨询。总的来说, 根据边坡的受力特点, 边坡变形与稳定性计算方法可分为两大类: 一类是刚性块体极限平衡法; 另一类是应力应变分析法。一些大

型有效通用和专用的有限元软件已应用于研究实际边坡变形与稳定性问题。另外,在监测手段上,已开发出大变形岩体监测设备及技术,例如,利用卫星定位技术(GPS、GLONASS、北斗)及合成孔径雷达(SAR、INSAR、D-INSAR)等技术实时跟踪蠕变边坡变形、破坏及失稳全过程,提高了对露天矿边坡在减灾方面的预测预报精度和研究水平。

1.1.2 边坡变形监测技术方法及应用

露天矿山边坡开挖破坏了原岩的应力平衡状态,边坡岩体内部的应力将重新分布并过渡到另一平衡状态,而当边坡岩体内部的应力场由一种平衡状态过渡到另一种平衡状态时,岩体将产生位移和变形。由于矿山工程开挖是一个动态平衡过程,因此岩体内部应力场不断发生变化,只有当作用力达到或超过岩体的极限强度时,才产生破坏性作用。为了探测这一变形的动态过程、破坏机制及变形的发展趋势,多种边坡监测技术和动态分析手段应运而生。根据监测内容不同,边坡监测可分为地表变形监测、地下变形监测、影响因素监测(地下水动态、地表水、地声、地温、地应力、人类活动)、宏观地质监测等。常用的边坡监测方法有:

(1) 常规大地测量法。常规大地测量法使用的仪器有:1) 经纬仪、水准仪及红外测距仪。其特点是投入快、精度高、监测面广、直观、安全、便于确定边坡变形方向及变形速率,适用于不同变形阶段的水平位移和垂直位移,受地形通视和气候条件的影响,不能连续观测;2) 全站型电子测距仪。一种集自动测距、测角、计算和数据自动记录及传输功能于一体的自动化、数字化和智能化的三维坐标测量与定位系统。其特点是精度高、速度快、自动化程度高、易操作、省人力、可自动连续观测,监测信息量大,适用于加速变形至剧变破坏阶段的水平位移、垂直位移监测。该方法在长江三峡库区十几个监测体上得到普遍应用,监测结果可直接用于指导防治工程施工。

(2) 全球定位系统(GPS)法。全球定位系统(GPS)是美国国防部研制的导航定位授时系统,由24颗卫星组成。卫星分布在6个轨道面上,轨道高度约为20183km。GPS可同时观测得到待测点的三维坐标 X 、 Y 、 Z ,并能精确地测出待测点的运动速率。GPS相对定位技术精度高、定位快、易操作、可全天候观测,且不受通视条件限制,能连续监测。适用于不同变形阶段的水平位移和垂直位移监测。中国地震局地壳所、国土资源部及长江委的有关单位,在三峡库区的滑坡监测中普遍采用了GPS技术。

此外,当前具有较高定位精度的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)还包括:俄罗斯GLONASS卫星导航系统和中国北斗卫星导航系统(BDS)。俄罗斯GLONASS卫星导航系统是由苏联(现俄罗斯)国防部独立

研制和控制的第二代军用卫星导航系统, GLONASS 系统标准配置为 24 颗卫星, 而 18 颗卫星就能保证该系统为俄罗斯境内用户提供全面服务。GLONASS 技术可为全球海陆空以及近地空间的各种军、民用户全天候、连续地提供高精度的三维位置、三维速度和时间信息。中国北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 是中国自行研制的, 继美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 之后第三个成熟的卫星导航系统。北斗卫星导航系统由空间段、地面段和用户段三部分组成, 可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠定位、导航、授时服务, 并具短报文通信能力, 已经初步具备区域导航、定位和授时能力, 定位精度 10m, 测速精度 0.2m/s, 授时精度 10ns。

(3) 遥感法与摄影法。遥感法 (RS) 适用于大范围、区域性崩滑体监测。可根据不同时期遥感图像变化了解滑坡的变化情况, 进行滑坡判释。此外, 利用高分辨率遥感影像可以对地质灾害进行动态监测, 随着遥感传感器技术的不断发展, 遥感影像对地面的分辨率越来越高。利用卫星遥感影像所反映的地面信息丰富并能周期性获取同一地点影像的特点, 可以对同一地质灾害点不同时间的遥感影像进行对比, 确定不同时间内边坡移动特征, 进而达到对地质灾害动态监测的目的。近景摄影法用地面摄影经纬仪等进行监测。其特点是监测信息量大, 省人力、投入快、安全; 但精度相对较低, 主要是用于变形速率较大的滑坡体水平位移和危岩体陡壁裂缝变化的监测, 受气候条件影响较大。此外, SAR、INSAR、D-INSAR 等技术已在广域滑坡监测领域得到一定的应用。合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种高分辨率成像雷达, 可以在能见度极低的气象条件下得到类似光学照相的高分辨雷达图像。利用雷达与目标的相对运动把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成一较大的等效天线孔径的雷达, 也称综合孔径雷达。合成孔径雷达干涉测量技术 (interferometric synthetic aperture radar, INSAR) 是以同一地区的两张 SAR 图像为基本处理数据, 通过求取两幅 SAR 图像的相位差, 获取干涉图像, 然后经相位解缠, 从干涉条纹中获取地形高程数据的空间对地观测新技术。合成孔径雷达差分干涉技术 (differential interferometry synthetic aperture radar, D-INSAR) 是利用同一地区不同时相的 SAR 影像, 通过差分干涉, 获取该地区地表形变信息的技术手段。

(4) 深部位移监测技术方法。深部位移监测技术方法有: 1) 钻孔倾斜法。利用仪器探头内伺服加速度计测量埋设于岩土体内的导管沿孔深的斜率变化, 在钻孔、竖井内测定滑体内不同深度的变形特征及滑带位置。钻孔倾斜仪是监测深部位移的最好办法之一, 其精度高、效果好, 易遥测、易保护, 受外界因素干扰少, 资料可靠, 但测程有限, 相对成本较高。2) 测缝法。利用多点位移计、井壁位移计、测缝计、收敛计等进行监测。一般通过钻孔、平硐、竖井监测深部裂缝、滑带或软弱带的相对位移情况。目前因仪器性能、量程所限, 主要适用于滑

坡初期变形阶段,即小变形、低速率、观测时间相对不很长的监测。其特点是精度较高、效果较好、易保护,但投入慢、成本高,仪器、传感器易受地下水、气候等环境的影响。

(5) 地下水动态监测方法。地下水动态监测包括地下水位和间隙水压监测。利用自动水位记录仪测量水位,这种方法对进行远距离遥测、多点测量及小口径钻孔(仅30mm)很有效。在国外,应用间隙水压计进行边坡变形监测已很普遍,但国内尚未普及使用。其关键技术是如何实测滑动带中的真实孔隙水压力值,为此牵连到很多安装埋设的工艺技术问题。几十年来,各国先后研制了各种形式的间隙水压力测量仪器,如开口立管式、卡隆格兰德型、气动型、液动型和电动型的探头等。该方法对于降水引起的滑坡的监测具有非常重要的作用。

(6) 声发射技术(AE)。声发射技术是利用测定滑坡岩体受力破坏过程中所释放的应力波的强度和信号特征来判别岩体的稳定性。仪器有地声发射仪、地音探测仪。利用仪器采集岩体变形破裂或破坏时释放出的应力波强度和频度等信号资料,分析判断崩滑体变形的情况。仪器应设置在崩滑体应力集中部位,灵敏度较高,可连续监测。声发射技术最早应用于矿山应力测量,近十几年来逐渐被应用到滑坡的监测中,多应用于露天边坡岩体垮落等方面的预报,而对崩滑体匀速变形阶段不适宜。测量时将探头放在钻孔或裂缝的不同深度来监测岩体(特别是滑动面)的破坏情况。近年来,基于AE的微震监测技术在滑坡预报方面取得了一定的进展。微震监测技术可通过监测岩体破裂产生的震动或其他物体的震动,对监测对象的破坏位置、破坏状况、安全状况等作出评价,从而为预报和控制灾害提供依据。

(7) 倾斜变形监测法。地表倾斜移动观测具有效率高、成本低、操作简单等特点,因此这种监测方法很适合于高边坡、高挡墙等因开挖及沉降引起的旋转变形监测。应注意的关键问题是所使用的仪器必须具有较大的测量范围,较高的测量精度和较低的温度系数。

(8) 雷达法。边坡稳定性雷达监测技术主要是基于差值干涉测量法采用雷达波对露天矿边坡进行监测。系统先以近毫米级精度对边坡面进行分区域、连续、反复扫描,然后通过专用软件将扫描结果与之前获得的扫描数据进行比较,从而确定边坡面的位移程度,并将位移变形量图形化显示于监视器,当位移变化量超过设定临界阈值时触发预警系统。边坡雷达主要由硬件和软件两大部分构成。硬件部分有数据采集及辅助设备,主要包括天线、雷达电子箱、计算机箱、显示器和拖车,该部分用于监测边坡现场,完成现场边坡原始变形数据的采集、存储。软件部分可以根据计算机处理结果显示和监测边坡的动态变化过程。

(9) 无线遥测法。无线遥测法具有监测参数多、实时数据传输、全天候监测、安装方便、无需人员值守等特点。中国地震局地壳应力研究所采用先进适用

的传感器技术,与计算机信息处理技术和通信技术整合形成的新一代 RDA 型地质灾害遥测系统,系统集成包括了包括滑坡地表位移与沉降监测仪、倾斜变形测量仪、裂缝测量仪、崩滑体微破裂声发射信号记录仪、钻井式深部地层滑移变形测斜仪,以及地下水孔隙压力测量仪和钢筋计、锚索(杆)计在内的 8 种滑坡监测仪器。该系统可在全天候的条件下提供亚毫米级的精度,监测边坡是否发生了超出正常范围的滑移和变形。

测量机器人是当前应用较为广泛的一种无线遥感技术,又称自动全站仪,是一种集自动目标识别、自动照准、自动测角与测距、自动目标跟踪、自动记录于一体的测量平台。它的技术组成包括坐标系统、操纵器、换能器、计算机和控制器、闭路控制传感器、决定制作、目标捕获和集成传感器等八大部分。

(10) 地应力监测法。地应力监测法包括地下和地表水平地应力的监测。地应力测量方法分直接测量法和间接测量法。直接测量法是由测量仪器直接测量和记录各种应力量,如补偿应力、恢复应力、平衡应力,并由这些应力量和原岩应力的相互关系,通过计算获得原岩应力值。常用的有扁千斤顶法、刚性包体应力计法、水压制裂法、声发射法。间接测量法是借助某些传感元件或某些媒介,测量和记录岩体中某些与应力有关的间接物理量的变化,如岩体中的变形或应变,岩体的密度、渗透性、吸水性、电磁、电阻、电容的变化等,然后由测得的间接物理量的变化,通过已知的公式计算出岩体中的应力值。因此,在间接测量法中,为了计算应力值,首先必须确定岩体的某些物理力学性质以及所测物理量和应力的相互关系等。常用间接测量法有套孔应力解除法、局部应力解除法、松弛应变测量法、地球物理探测法。这些测量结果不能直接反映变形量,但可配合其他监测资料,用于数值、物理模拟计算,进而分析岩体变形动态。

(11) 爆破震动监测。爆破震动监测是指爆破时产生的振动波对边坡的影响,根据爆破安全标准(GB 6722—2014)规范中是否振动超标作出一个评判。岩体爆破开挖工程中,当药包在岩石中爆破时,邻近药包周围的岩石会产生压碎圈和破裂圈。当应力波通过破裂圈后,由于它的强度迅速衰减,再也不能引起岩石的破裂而只能引起岩石质点产生弹性振动,这种弹性振动以弹性波的形式向外传播,造成地面的振动。当爆破引起的地面振动达到一定的强度时,可以造成临近爆区边坡的破坏。采用专用的振动测试设备,在爆破开采时可以直接测定边坡的振动情况,并根据所测数据对边坡所受影响进行评价。

爆破震动监测一般包括质点运动参数监测和质点动力参数监测,前者常以质点振动速度监测为主,加速度监测为辅。对于破碎风化岩体,质点振动频率低,可选用低频仪器;对于坚硬完整岩石,振动频率高,可选用频带高的地震检波器;动应变测量可采用超动态应变仪和顺态记录仪。

(12) 地温监测技术方法。利用温度计测量地温,分析温度变化与岩石变形