

SHUILISHUIDIAN GONGCHENG BIANPO

ANQUAN JIANCE SANWEIKESHIHUA

FENXI LILUN FANGFA JI YINGYONG

水利水电工程边坡 安全监测三维可视化分析 理论方法及应用

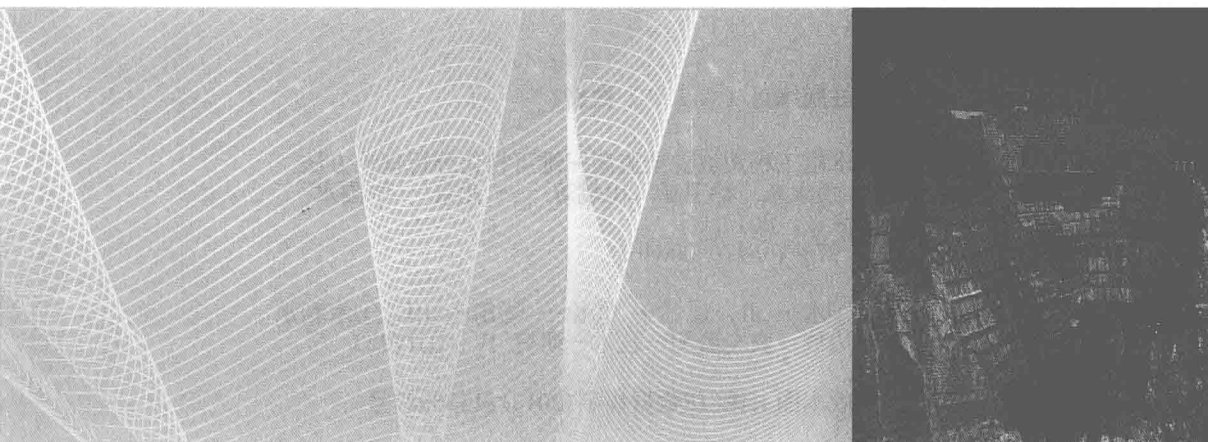


孟永东
徐卫亚 著
田 斌



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利水电工程边坡 安全监测三维可视化分析 理论方法及应用



孟永东
徐卫亚 著
田 斌

内 容 提 要

本书系统地介绍了水利水电工程边坡安全监测三维可视化分析理论方法及应用实践。结合当前水利水电工程边坡安全监测领域的发展和研究现状、面临的问题及需求,详细阐述了边坡工程三维建模理论与方法、面向监测数据场可视化的三维模型离散方法、水利水电工程边坡安全监测虚拟现实可视化、边坡工程安全监测三维可视化分析系统研发,并给出了上述理论方法和研发成果在大型水利水电工程边坡及堆积体安全监测分析中的应用实例。

本书可作为高等院校水利水电工程、岩土工程及相关专业的教学用书,也可作为工程技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程边坡安全监测三维可视化分析理论方法
及应用 / 孟永东, 徐卫亚, 田斌著. — 北京: 中国水
利水电出版社, 2013.6

ISBN 978-7-5170-0964-1

I. ①水… II. ①孟… ②徐… ③田… III. ①水利水
电工程—边坡—安全监测—技术—研究 IV. ①TV223

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第136927号

书 名	水利水电工程边坡安全监测三维可视化分析理论方法及应用
作 者	孟永东 徐卫亚 田斌 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×230mm 16开本 9.25印张 176千字 8插页
版 次	2013年6月第1版 2013年6月第1次印刷
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



我国西南地区复杂的地质构造和深切河谷等环境特征，给大型水利水电工程建设带来了前所未有的边坡稳定问题和工程安全问题。安全监测是了解边坡安全状态的最直接手段，目前在边坡工程中得到了广泛的使用，为掌握边坡工程在施工期和运行期的稳定状态和工作性态发挥了重要的作用。当前，边坡安全监测分析的基础理论体系尚不成熟，综合地质、施工、环境影响量等多源信息的复杂环境下岩石边坡工程安全监测分析和时空综合预测问题是目前亟待解决的难题。传统安全监测分析方法无法直观反映岩石高边坡工程的整体工作性态，不便于揭示边坡失稳模式和稳定性的演化规律，且各分析过程相对独立，缺乏集成性。

本书应用计算机三维建模技术、虚拟现实技术、数据库技术、计算机网络技术等先进技术方法，针对岩石边坡工程安全监测分析的网络化、智能化、可视化和集成化处理所面临的技术难题进行了系统研究和开发，提出了岩石边坡工程安全监测三维可视化分析方法，拓展了边坡工程安全监测分析的理论和方法。

全书共分七章：第一章分析了当前边坡安全监测发展及监测分析研究现状、三维可视化分析相关技术及研究现状、安全监测分析系统集成研究现状。第二章介绍了基于“界面引入—体划分”思想的面向边坡工程复杂 B-Rep 结构的三维实体拓扑关系建立方法，提出了基于 B-Rep 和 NURBS 三维数据结构的边坡工程三维实体建模理论。第三章探讨了边坡三维模型边界曲面和实体的 TIN/TEN 离散，提出了面向边坡监测数据场可视化的三维几何载体的离散方法。第四章提出了基于虚拟现实可视化技术的边坡安全监测三维可视化分析理论和方法，通过对监测系统各类测点进行三维图形符号的参

数化设计,实现了安全监测系统测点布设三维虚拟现实可视化,以及基于X3D的边坡工程安全监测三维场景的实时动态可视化、虚拟现实场景对象的三维可视化查询和空间数据场三维云图绘制。第五章介绍了集计算机网络、数据库、三维建模、虚拟现实可视化等多种先进技术于一体的边坡安全监测三维可视化分析系统(Slope-Moni^{3D})的设计和研发,实现边坡安全监测数据资料管理、监测资料分析预测、监测成果三维可视化分析平台的建立。第六章和第七章介绍了将上述理论方法和技术开发成果分别应用于锦屏一级水电站左岸高边坡和溪洛渡水电站左岸谷肩堆积体的安全监测分析中,实现了边坡安全监测分析的网络化、集成化和三维可视化。

本书的撰写基于作者近年来参与的多个科研项目成果。这些项目研究得到了国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司、中国长江三峡集团公司、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、河海大学等单位的大力支持。

本书的出版得到了三峡大学重点学科建设经费的资助。本书在撰写过程中引用了一些文献资料,均已在书末“参考文献”中列出,在此谨向这些相关作者表示衷心的感谢。

本书部分内容属交叉学科内容,涉及知识面广,由于作者学识水平有限,书中难免有不足和疏漏之处,恳请专家和读者批评指正。

作者联系方式:

孟永东,三峡大学,邮编:443002, E-mail: meng@ctgu.edu.cn;

徐卫亚,河海大学,邮编:210098, E-mail: wyxu@hhu.edu.cn;

田 斌,三峡大学,邮编:443002, E-mail: eudiltb@ctgu.edu.cn.

作 者

2013年3月



目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 边坡安全监测发展及监测分析研究现状	2
第三节 三维可视化分析相关技术及研究现状	6
第四节 安全监测分析系统集成研究现状	9
第五节 本书的主要内容	11
第二章 边坡工程三维建模理论与方法	14
第一节 边坡工程三维建模的数据结构	14
第二节 边坡工程三维界面的 NURBS 建模	24
第三节 复杂岩石高边坡工程的三维实体建模	33
第三章 面向监测数据场可视化的三维模型离散方法	38
第一节 裁减 NURBS 曲面的 TIN 离散	38
第二节 B-Rep 实体的 TEN 离散	44
第三节 边坡安全监测数据场可视化几何载体的离散	49
第四章 水利水电工程边坡安全监测虚拟现实可视化	51
第一节 虚拟现实技术及 X3D 规范	51
第二节 边坡工程三维实体模型的虚拟现实可视化	55
第三节 安全监测系统测点布设的三维可视化	71
第四节 监测数据场三维云图的实时动态可视化方法	79
第五章 边坡安全监测三维可视化分析系统研发	89
第一节 系统分析	89
第二节 系统设计	92
第三节 系统开发	102

第六章 SlopeMoni^{3D}在锦屏一级水电站左岸边坡工程中的应用	108
第一节 工程概况	108
第二节 左岸边坡工程安全监测系统	110
第三节 左岸开挖边坡区域安全监测三维可视化分析	112
第七章 溪洛渡水电站左岸谷肩堆积体深部变形监测三维可视化分析	120
第一节 工程概况	120
第二节 白铁坝堆积区三维地质建模及虚拟钻孔取样	122
第三节 深部变形监测可视化分析	127
参考文献	134

第一章 绪论

第一节 概述

我国西南地区高山峡谷的地貌特征,蕴藏了金沙江、雅砻江、澜沧江等丰富的水能资源,随着锦屏、向家坝、溪洛渡、糯扎渡、白鹤滩等一大批大型水利水电工程先后开工建设,西南地区高地应力、复杂地质构造及深切河谷等复杂环境给大型水利水电工程带来前所未有的边坡稳定性问题及工程安全性问题。在建大型水电工程的大坝已达到 300m 级的高度,但相对于边坡的高度而言,工程主体建筑物的高度远小于人工开挖边坡的高度,且还有更大范围的自然岩质边坡,这部分边坡构成了水利水电工程枢纽建筑物重要的环境^[1]。西南地区水利水电工程有一个共同的特点,就是所建工程区域一般都进行了人工边坡开挖,边坡既高又陡,地质条件复杂,环境因素恶劣,不仅有强烈的卸荷作用,并且有多因素联合作用^[2,3]。

高边坡的稳定问题不仅涉及工程本身的安全,同时也涉及整体环境的安全,边坡的失稳破坏不仅会直接摧毁工程建设本身,而且也会通过环境灾难对人民生命财产安全带来不利影响和灾害。国内外曾发生多次因为边坡失稳造成的灾难事件,1959 年法国 Malpasset 双曲拱坝由于左坝肩部分岩体产生了不均匀变形和滑动后突然溃决;1963 年意大利 Vajont 拱坝左岸发生 2.5 亿 m^3 的大型滑坡,造成下游数千人死亡^[4]。国内,1967 年四川甘孜州境内雅砻江右岸唐古栋发生大规模岸坡失稳,滑坡规模达 6800 万 m^3 ,滑坡形成的痕迹在卫星图片上依然可见;2000 年西藏易贡发生巨型滑坡,滑坡方量达 3 亿 m^3 ,形成了天然坝高 290m 的堰塞坝;2007 年湖北清江水布垭库区大堰塘滑坡,约 500 万 m^3 山体整体滑入清江,激起高达 30m 左右的涌浪,致使清江沿岸多个乡镇的村民失踪,位于滑坡体上的房屋全部没入清江。当前,如何有效解决因边坡失稳而导致的灾害问题,实现人类与自然的和谐发展,是人类面临的一个重大科学问题。边坡安全监测正是随着边坡失稳事件的发生和水利水电工程的兴建而发展起来的^[5]。



借鉴大坝安全监控方面较成熟的理论和方法^[6],边坡安全监测资料预处理、监测资料的分析与预测建模、安全监测反馈分析以及安全综合评判与决策等研究内容成为掌握边坡稳定状态和边坡工程工作性态的主要途径,也构成了边坡安全监测分析的基础理论体系。然而,由于水利水电工程中的岩石高边坡面临地质条件、施工、环境影响量等一系列不确定因素,影响边坡稳定性和造成边坡失稳的原因是多因素、多变量、强耦合、非线性的综合作用结果,因此,考虑地质、施工、环境影响量等多源信息的复杂环境下岩石边坡工程安全监测分析和时空综合预测问题是目前亟待解决的难题^[7,8]。传统安全监测分析方式无法直观反映岩石高边坡工程的整体工作性态,不便于揭示边坡失稳模式和稳定性的演化规律,且各分析过程相对独立,缺乏集成性,因此,实现岩石高边坡工程安全监测分析的三维可视化、集成化是目前研究的热点问题。

鉴于以上分析,对复杂环境下的大型水利水电工程岩石高边坡而言,依据工程施工期布设的安全监测系统所获得的海量监测数据资料,应用计算机三维建模技术、虚拟现实技术、数据库技术、计算机网络技术等先进技术方法,针对岩石边坡工程安全监测分析的网络化、智能化、可视化和集成化处理所面临的技术难题进行系统研究,拓展边坡工程安全监测分析理论和方法,实现基于计算机三维可视化理论和方法的岩石边坡工程工作性态的智能、动态、直观的多方法综合集成分析,对于解决我国西电东送等大型水电工程建设过程中出现的高边坡问题,具有重要的理论和实践指导意义。

第二节 边坡安全监测发展及监测分析研究现状

一、边坡安全监测发展现状及趋势

近代岩土工程监测开始于20世纪30—40年代^[9],早期主要使用一些简单的仪器来监测变形、土压力及孔隙水压力^[10]。在我国水利水电工程领域,安全监测可追溯到20世纪50—60年代,主要在丰满、官厅、南湾、佛子岭等水库大坝开展了简单的安全监测,监测的对象主要是大坝。

我国从20世纪60—70年代开始在基岩中开展安全监测,首先在刘家峡、葛洲坝等大型水利水电工程中将测缝计改装成岩基变形计和锚杆应力计用于监测导流洞、地下厂房及边坡等,刘家峡还采用了钢筋应力计、压力计和渗压计。该阶段的监测手段和方法相对较为简单。自20世纪70—80年代,新奥法(NATM)施工在我国水利水电行业大力推广,作为新奥法三大要素之一的施



工现场监测首先在工程广泛应用,逐步意识到工程安全监测工作的重要性,岩石工程安全监测逐渐被纳入工程勘察、设计、施工的各个环节,其中,三峡工程在开工之前就开始对链子崖危岩体、新滩滑坡体、黄蜡石滑坡体等^[11,12]进行了长期的安全监测,有效防止了崩塌、滑坡等重大灾害的发生,取得了巨大的社会效益和经济效益。

从20世纪90年代起,岩土工程施工逐步迈向信息化时代,施工中的安全监测在大型工程中也基本普及,安全监测技术也不断提高,除增加一些监测项目(如应力、应变、锚索测力计等),监测方法及仪器本身也有了较大的进步,各种形式的收敛计、位移计、应力计、压力盒、远视沉降仪、测斜仪等的研制,监测仪表的性能、精度和稳定性得到很大的提高^[13]。另外,监测内容也不断扩大完善,监测数据的采集和管理、监测资料的整理和分析以及监测信息的反馈等技术在信息化施工中发挥重要作用^[14]。自此,更多监测技术、监测方法、监测理论成功应用到高边坡工程安全监测中,边坡安全监测的目的、内容与方法都得到了丰富和发展^[15]。

从21世纪开始,边坡安全监测已被规定为重要工程边坡设计和施工的主要环节,边坡安全监测开始全面飞速发展,主要体现在:对安全监测的内涵及其对工程的意义理解和认识更加全面、深入;数据智能处理与数据动态管理方法,进行实时监测、安全预警和可靠性预测成为监测仪器的发展方向;安全监测的尺度更大、范围更广,数字摄影、GPS、GIS和INSAR等新的监测技术手段在边坡监测中不断推广应用^[16]。

当前,边坡安全监测已成为边坡工程设计、施工和运行过程中不可缺少的组成部分,被视为工程设计效果以及施工和运行安全的直接指示器。但由于边坡是一种自然地质体,其稳定性受地质、施工、环境影响量等众多因素影响,具有未确知性、随机性、模糊性、可变性等特点,而当前边坡安全监测普遍存在“重监测、轻分析”的问题^[17,18],通过监测系统获得了源源不断的监测数据,而用于揭示边坡变形趋势、演化规律和稳定状态的监测分析工作却明显不足,监测资料分析手段、分析方法和预测预报水平有待进一步提高。

未来,边坡安全监测发展的主要趋势^[19]如下。

(1) 安全监测数据的无线遥控化采集。随着计算机网络技术和无线通信技术的飞速发展,使安全监测数据的远程无线采集成为可能,监测数据采集的无线遥控化不仅可节约人力和物力,还可增加更多的监测项目,而不会发生监测项目之间的干扰以及与施工的冲突,可大大提高安全监测信息采集与反馈的效率。



(2) 安全监测数据采集的实时化。施工造成对边坡工程及地下工程环境量的变化是实时的, 因此要求进行安全监测信息的及时快速反馈, 做到对工程对象工作性态的实时掌握, 以便及时调整施工方法和优化施工方案, 保证工程施工的顺利进行。

(3) 安全监测数据采集精度的不断提高。边坡工程在运行期的安全监测数据的变化很小, 因此需要更高的监测精度和数据采集准确性, 以便把握边坡状态的细微变化。

(4) 监测资料后处理的自动化和三维可视化。监测资料分析成果的后处理是安全监测内容的一部分, 当前使用较多的方法仍然是人工后处理方法, 无法应对海量监测数据的处理, 大大影响了监测分析反馈的实时性。同时, 当前监测成果的可视化程度不高, 大都只是对监测成果的二维可视化, 无法直观表现监测对象的工作性态和变化趋势, 无法进行安全监测与地质、施工关系的综合分析。因此, 采用计算机软件对监测数据进行自动化和三维可视化的处理、分析、反馈, 是边坡安全监测的发展方向。

二、边坡监测分析研究现状

边坡监测资料的分析方法主要包括^[20]: ①用于进行定性分析的常规分析方法, 如比较法、作图法、特征值统计法和测值因素分析法等; ②进行定量分析的数学模型分析方法, 如统计分析法、时间序列分析法、非线性智能分析法等; ③数学物理模型分析方法, 如确定性模型和混合模型分析。

用于定性分析的常规分析方法中比较法被广泛采用, 该方法将监测物理量监测成果与理论的试验成果进行对比, 分析监测物理量的变化规律、趋势和大小的一致性与合理性, 以及将监测值与理论计算值对比, 作出安全评估与决策。作图法是监测分析二维成果图的主要表达方式, 通过根据监测成果绘制相应的过程线图、相关图和分布图, 以及综合其他环境量信息的过程线图^[21], 以便分析监测物理量的变化规律和演化趋势。特征值可用于揭示监测物理量变化规律, 特征值统计法通过对特征值的统计来判断监测物理量的变化规律是否合理, 以得出相应的分析结论。

进行定量分析的数学模型分析方法中的统计分析法在安全监测分析中应用最为广泛^[22], 该方法可分析各种监测物理量与其他相关监测量以及环境影响量间的定量关系, 通过对各种影响量的显著性分析来获得各环境量对监测物理量影响的主次关系; 另外, 可利用统计得到的监测物理量的回归关系式判断研究对象的稳定状态, 实现监测预报与预警。黄铭、葛修润等(2001)采用多元



逐步回归分析方法建立既能反映位移大小、方向随水压、温度和时间变化的规律,又能反映位移在区域内的分布情况的模型^[23]。徐洪钟、吴中如(2001)提出偏最小二乘法多元回归方法,解决了自变量之间的多重共线问题^[24]。通常,在监测的因变量和效应量之间的关系比较明确时,监测资料的统计分析效果较好。

进行定量分析的数学模型分析方法中的时间序列分析法是在多领域广泛应用的方法,它是概率统计学科的一个分支,基本原理是运用概率统计理论和方法分析随机数据系列,以建立数学模型,通过进行参数估计、模型定阶等过程,实现统计量的预测和自适应控制。时间序列分析方法最早由数学家 Yule (1927) 提出,他建立了自回归 (AR) 模型,用来预测市场的变化规律。随后,数学家 Walker (1931) 受 AR 模型的启发,建立了滑动平均 (MA) 模型和自回归滑动平均 (ARMA) 混合模型,由此奠定了时间序列分析方法的理论基础。由于时间序列分析方法能以较高的精度进行短期预测,因此被广泛应用于人文社会、自然科学和工程技术等领域^[25-28]。

灰色系统理论是一种研究包含确知和未确知信息(灰色)系统的理论和方法。由于边坡工程诸多的不确定性,边坡系统可看成是一种灰色系统,灰色理论被广泛应用于边坡变形预测分析中^[29-32],得到了较好的分析成果。人工神经网络是一种随着计算机技术的发展而出现的新兴非线性智能分析方法,自从物理学家 J. J. Hopfield (1982) 提出人工神经网络的 Hopfield 计算模型^[33],以及 D. E. Rumelhart、J. L. McClelland (1985) 提出多层前馈网络的误差反向传播训练算法 (BP 算法)^[34]以来,人工神经网络被广泛应用于众多研究领域。采用人工神经网络对监测数据进行拟合可避免传统监测分析方法需将各环境影响量分离的缺点,鉴于水利水电工程和岩土工程的多样性、复杂性、非线性的特点,人工神经网络在边坡变形分析与预报方面取得了大量较成功的应用成果^[35-38]。

以上介绍的数学模型定量分析方法都是基于实测资料通过将效应量作为随机变量或随机过程建立数学模型来进行监测数据的分析和预测,以上模型主要依靠数学理论和方法处理,无法从空间上考虑实际工程的施工、地质和环境量的影响,不能对研究对象的工作性态从地质条件、施工影响等方面加以解释,其监测分析成果无法直观反映岩石高边坡工程的整体工作性态,不便于揭示边坡失稳模式和稳定性的演化规律,且各种分析方法和分析过程相对独立,缺乏集成性。



第三节 三维可视化分析相关技术及研究现状

一、三维建模技术研究及应用现状

作为边坡工程安全监测三维可视化分析的前提和基础,对边坡工程尤其是复杂岩质高边坡工程进行三维建模研究需要考虑研究对象的地质结构和工程构筑物特征。边坡工程三维建模的难点是三维地质模型的构建,该方面的研究最初主要是为了满足地球物理、矿业工程和油藏工程等地质模拟与辅助工程设计需要而展开的。加拿大学者 S. W. Houlding (1994) 最早提出了三维地质建模的概念^[39]。法国学者 J. L. Mallet (1992, 1997, 2002) 针对地质体建模的特殊性和复杂性,提出了离散光滑插值 (DSI) 技术,该技术基于对目标体的离散化,考虑已知信息引入的约束,用一系列具有物体几何和物理特性的相互联结的节点来模拟地质体,它是基于图形拓扑的,具有自由选择格网模型、自动调整格网模型、实时交互操作并能够处理一些不确定的数据等优点,适用于构建复杂模型和处理模型表面不连续的情况^[40-42]。随着相应理论基础的研究和深入,以及计算机技术的迅速发展,国外已经出现一些三维地质建模及可视化软件,如: GoCAD, LYNX, EarthVision, 3DGMS 等。在国内,很多学者结合所属领域开展了三维地质建模研究,取得了一定的理论和应用成果。张菊明、陈昌彦等 (1996, 1998) 应用拟和函数法开发研制了边坡工程地质信息的三维可视化系统,并应用于长江三峡永久船闸边坡工程的三维地质结构的模拟和三维再现工作中^[43,44]。陈树铭 (2000) 提出泛权算法理论,试图解决任何复杂的三维地质信息数字化与重构问题^[45]。曹代勇、李青元等 (2000, 2001) 提出基于 OpenGL 的切片合成法,并应用于煤田三维地质模型可视化分析中^[46,47]。柴贺军、黄地龙、黄润秋等 (2001) 结合溪洛渡水电站研制开发一套岩体结构三维可视化系统,在一定程度上建立了三维地质模型构图,并能够进行一些简单的剖切分析^[48]。武强、徐华 (2004) 设计了超体元实体模型,并提出基于特征的驾驭式可视化设计思路,建立了面向采矿应用的三维地质建模体系结构^[49]。潘炜、刘大安等 (2004) 从地质数据分析预处理、地质表面和实体的生成、断层和地层以及三维地质模型的其他要素的处理等方面,详细阐述了三维地质模型的建立过程^[50]。胡瑞华、王秋明等 (2005) 结合清江水布垭水利枢纽工程、重庆江口水电站和南水北调穿黄工程,应用采用可视化交互数据语言 (IDL) 开发了三维地质模型可视化系统 3D-GVS, 针对所研究地质对象的空间形态和相互关系建立工作区的三维地质模型,能进行动态显示



和自动剖切分析^[51]。朱良峰、潘信等(2005, 2006)基于三维 GIS 软件平台 MAPGIS-TDE 研制开发了三维地质建模与可视化系统^[52,53]。钟登华、李明超等(2005, 2007)开发了基于 TIN-Nurbs 几何结构的水利水电工程三维地质可视化软件,并将水利水电工程的建筑物空间模型与三维地质模型耦合,提出了三维地质统一模型的概念^[54]。郑文棠、徐卫亚等(2007)针对复杂边坡三维地质可视化和数值计算模型的构建问题,基于 AutoCAD 进行二次开发,并采用插值拟合算法构建三维可视化模型,同时实现可视化模型与数值计算模型的转化,为 ANSYS、FLAC^{3D}等数值计算软件提供了便捷的计算网格建模方法^[55]。孟永东、徐卫亚等(2009)将带约束 Delaunay 剖分算法用于边坡工程三维地质建模,采用“分解—拼合”的思想以应对大规模复杂地质结构的建模,实现工程地质结构的快速三维可视化表达和地质条件分析^[56]。

纵观以上所述三维地质建模技术和方法,在描述复杂地质结构尤其是在断层等地质构造交错发育的条件下存在不足,由于所采用模型表达方式的局限而使模型存储所需数据量随模型复杂度提高而不断加大,从而影响三维可视化显示的效率和质量;另外,由于所应用开发平台本身的局限性,无法表达某些复杂地质和工程结构;由于以上方法描述模型所采用的三维数据结构大多只能进行研究对象空间几何信息的表达,缺乏空间拓扑关系信息的描述,从而无法实现特定的三维可视化分析和查询功能。

二、三维可视化技术研究及应用现状

目前,国内岩土工程领域在三维模型可视化显示方法研究方面,大都采用 OpenGL、Direct3D 等底层三维驱动技术^[46,47],或借助 GIS 等第三方商业软件平台进行二次开发的方式进行三维地质模型的可视化显示^[52-54],对于非计算机专业的工程科研和技术人员,OpenGL、Direct3D 等底层开发方式具有门槛高、难度大、编程复杂等缺点。而基于 GIS 二次开发的方式还很不成熟,GIS 环境非真三维的固有缺点致使无法表达复杂地层结构和洞室,不利于系统集成开发、网络共享和在线分析,开发成果受系统扩展性和版权问题影响。

鉴于以上原因,探寻新的三维模型可视化显示方法是十分必要的。虚拟现实技术未来计算机三维可视化技术的发展趋势,随着计算机网络技术的发展和网络应用的普及,作为桌面级虚拟现实应用的网络三维技术(Web3D)是成为当前三维可视化技术新的发展方向,第二代虚拟现实建模语言 X3D 的提出加快了 Web3D 技术发展和应用。X3D 是一种位于 OpenGL、Direct3D 等底层图形驱动之上的高级三维可视化语言,具有便捷的三维交互性、超强真实感的



场景以及丰富的扩展接口等特点,逐渐被应用于各领域的三维可视化应用研究中^[57,58]。李冉、蔡正林(2005)将虚拟现实技术应用于工程建模和仿真中,实现高速公路施工中的场景虚拟布置、施工过程模拟及用户的实时动态交互^[59]。孟永东、田斌等(2004,2005)进行了基于Java和MySQL的虚拟现实动态施工场景构建方法的研究,并成功应用于混凝土坝浇注施工过程的三维可视化和信息的三维交互式查询研究^[60,61]。虚拟现实技术与地理信息技术的结合,派生出虚拟现实地理信息技术(VRGIS)^[62],其实质是虚拟现实可视化技术、数据库技术和信息管理技术的综合集成,国内已有相关技术的初步应用实例^[63]。当前,国内在边坡工程尤其是安全监测领域尚未出现虚拟现实X3D技术的三维可视化应用研究案例。

三、空间数据场可视化技术研究及应用现状

科学和工程计算结果、测量数据所形成的数据场往往是三维空间数据场,即数据值均定义于空间的某个几何位置,空间数据场可视化就是运用计算机图形学和图像处理技术,将这些数据场转换为图形及图像在屏幕上显示出来并进行交互处理的理论、方法和技术^[64]。

近年来,在美国、德国、日本等发达国家的著名大学、国家实验室及大公司中,空间数据场可视化的研究工作及应用实验十分活跃,其技术水平正在从纯粹的三维可视化显示向实时跟踪和交互控制发展,并且已经将超级计算机、光纤高速网、高性能图形工作站及虚拟现实四者结合起来、体现出这一领域技术发展的重要方向,分别在医学、航空航天、气象等领域出现一些代表性的研究成果,如:美国国家医学图书馆建立了包含全部医学三维CT扫描和MRI核磁共振数据的庞大数据库,供用户通过因特网浏览这些数据的三维可视化结果;美国国家超级计算机应用中心(NCSA)开发了大气及流体可视化系统(Pathfinder),可在交互及分布环境下研究飓风、暴风雨等极端天气的形成规律;美国国家宇航局Ames研究中心用一台超级计算机进行飞行器流体力学模拟计算,而计算结果的可视化则在超级计算机互联的两个虚拟现实终端中实现,通过虚拟现实环境提供的头盔显示器和数据手套,用户可协同工作,从不同视点和方向更加逼真地观察同一个流场的三维可视化结果。当前,国内外在岩土工程领域的空间数据场可视化研究相对较滞后,大多还仅局限于有限元等数值计算结果的可视化显示^[65,66](如有限元后处理),对于安全监测数据场的可视化也仅局限于二维可视化图形的绘制^[67,68]。

空间数据场三维可视化的主要技术难点表现在:三维云图的实时动态可视化显示;可视化显示过程的交互控制。空间数据场三维云图绘制的算法主要有



两种^[64]。

(1) 第一类算法称为面绘制, 首先由三维空间数据场构造出中间几何图元(如曲面、平面等), 然后再由传统的计算机图形学技术实现可视化图形绘制。面绘制的核心内容是等值面的提取, 当需要表现空间数据场更丰富的细节变化时, 需要生成大量等值面, 面绘制算法的执行效率大大降低。面绘制方法构造出的可视化图形不能反映整个原始数据场的全貌及细节, 该方法很难实现三维数据场的实时动态可视化。

(2) 第二类算法称为体绘制, 与第一类算法完全不同, 它并不构造中间几何图元, 而是直接由三维数据场产生屏幕上的二维图像, 是近年来得以迅速发展的一种三维数据场可视化方法, 这种方法能产生三维数据场的整体图像, 包括每一个细节, 并具有图像质量高、便于并行处理等优点。

体绘制的关键内容是体光照模型和体绘制算法, 国内外有关学者围绕体绘制的光照模型和体绘制算法做了大量的研究工作, N. L. Max (1995) 假定连续分布的三维数据场由无数小粒子构成, 由于粒子的发光、吸收、反射等使光线通过三维数据场时发生了明暗变化, 基于这一假设形成了光线吸收模型、光线发射模型, 以及光线吸收与发射模型^[69]。体绘制的实现是三维离散数据场的重新采样和图像合成的过程, 由于在对离散数据场进行连续数据场重构进而完成图像合成时需要进行复杂的三维卷积运算, M. Levoy (1988) 提出了一种图像空间扫描的体绘制算法——光线投射算法 (Ray-casting), 该方法不仅将重新采样过程用离散方法实现, 而且将图像合成也应用了光学模型的离散形式^[70]。L. Westover (1990) 提出了足迹表法 (Footprint Method), 该算法逐层、逐行、逐个计算每个数据点对屏幕像素的贡献并加以合成, 形成最后的可视化图像, 是一种物体空间扫描的体绘制算法^[71]。

由以上分析可知, 体绘制方法是实现三维数据场实时动态云图绘制的首选方法。然而, 由于体绘制算法涉及复杂的采样和图像合成运算, 且涉及图形硬件的底层驱动运算, 工程研究人员很难掌握算法的原理和程序实现方法, 从而阻碍了体绘制方法在边坡工程三维可视化中的应用, 因此, 需要寻求更加先进的技术方法以便快捷实现边坡安全监测数据场的三维实时可视化。

第四节 安全监测分析系统集成研究现状

重大水利水电工程的岩石高边坡安全监测具有周期长、信息种类多、数据量大等特点, 而信息化施工的目标是在尽量短的时间内完成监测数据采集、处



理、反馈的过程,因此需要开发专门的安全监测分析系统软件来完成监测信息的集成化处理,以实现信息化施工的目的。

目前,已出现一些应用于大坝、基坑、隧道、桥梁和边坡工程安全监测的监测系统软件。吴中如、顾冲时(1997,2000)在大坝安全监测专家系统方面做了大量深入的研究工作^[72,73]。刘大安、杨志法等(1997,2000)为了解决边坡、地下工程等地质工程的设计理论问题,提出工程地质力学综合集成理论和方法,使工程地质力学和系统科学在地质工程动态优化设计和信息化施工中有机结合,开发研制了综合地质信息系统及地质工程监测信息系统^[74,75]。孙钧(1999)对城市地下工程施工安全的智能控制预测与控制及其三维仿真模拟进行了研究,开发了相应的监测分析系统^[76]。葛修润、王浩、吴振君等(2001,2006)先后针对隧道工程和地下厂房施工期安全监测,基于GIS技术开发了分布式综合施工数据库管理系统^[77,78]。张启伟(2001)为实现大型桥梁结构整体行为的实时监控和结构状态的智能化评估,开发了大型桥梁健康监测系统^[79]。朱合华、李元海(2002)对岩土工程施工监测信息系统进行了研究,实现了以测点地图为中心的查询和数据输入输出的双向可视化^[80]。刘国彬、侯剑锋(2003)研制了用于地铁信息化施工的自动监测系统^[81]。丁文其、李志刚等(2004)针对隧道现场监测的特点,运用数据库技术和Web技术开发了隧道监测远程管理系统^[82]。雷跃明、吴洪明(2006)开发了以三维模型为基础的桥梁可视化安全实时监测系统,实现桥梁工程的实时监控与安全分析结果显示的三维可视化^[83]。田应富等(2007)开发了洪家渡水电站安全监测三维仿真及虚拟现实系统,对洪家渡水电站安全监测系统中仪器的埋设安装信息进行三维仿真,将安全监测数据分析处理成果进行二维动态模拟^[84]。张强勇、陈晓鹏(2008)开发了岩体边坡监测信息管理与监测数据分析网络系统^[85]。叶英、穆千祥等(2009)研究了隧道施工过程中各种信息的自动采集、无线传输、预警及安全管理系统的技术与方法,开发了隧道施工多元信息预警与安全管理研究^[86]。何满潮(2009)研制了滑坡地质灾害远程监测预报系统,包括现场监测子系统和室内监测子系统,开发了相关监测软件、控制监测核心电路模块和预测预报技术,实现了对滑坡灾害和边坡稳态的实时远程智能监测^[87]。

分析以上研究成果不难发现,安全监测分析系统的集成研究是伴随计算机技术和信息技术的发展和应用而不断发展的。近年来,安全监测分析系统正在向三维可视化、数据采集分析一体化、高度集成化和自动化方向发展。目前,国内岩土工程领域安全监测分析系统软件大多只停留在监测数据的存储,可视