

水利水电工程地质三维建模与分析 理论及实践



Theories and Applications of
3D Engineering-Geological Modeling and Analysis to
Hydraulic and Hydroelectric Projects

钟登华 李明超 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

- 国家杰出青年科学基金 (50525927)
- 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司
雅砻江水电开发联合研究基金 (50539120)
- 国家自然科学基金 (50479048)

资 助

水利水电工程地质三维建模与分析 理论及实践

Theories and Applications of
3D Engineering-Geological Modeling and Analysis to
Hydraulic and Hydroelectric Projects

钟登华 李明超 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了水利水电工程地质三维建模与分析的理论方法及其应用实践。在分析水利水电工程地质建模现状和建模关键问题的基础上,详细阐述了水利水电工程地质三维数据结构、水利水电工程地质空间解析理论与方法、水利水电工程地质三维建模技术方法及实现、基于三维统一模型的水利水电工程地质分析、水利水电工程地质建模与分析系统的研制与开发,并介绍了上述理论方法在10项具体水利水电工程中的实际应用。

本书可作为高等院校水利水电工程、工程地质、工程管理及相关专业研究生的教学用书,亦可作为广大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

水利水电工程地质三维建模与分析理论及实践/钟登华,李明超著. —北京:中国水利水电出版社,2006

ISBN 7-5084-3548-6

I. 水... II. ①钟... ②李... III. ①水利工程—工程地质—研究②水力发电工程—工程地质—研究
IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 009684 号

书 名	水利水电工程地质三维建模与分析理论及实践
作 者	钟登华 李明超 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 11 印张 261 千字 9 插页
版 次	2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	35.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

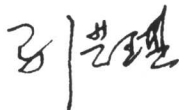
知悉《水利水电工程地质三维建模与分析理论及实践》一书即将出版，非常高兴，欣然为之作序。

众所周知，工程地质研究是水利水电工程设计与施工建设最基础的工作。处于高山峡谷中的水利水电工程区域因地质构造复杂、地质信息众多，给工程勘测、设计与施工带来了很大的困难。实践证明，没有高质量的、有效的工程地质勘测成果与资料分析，就不可能选择最优的设计和施工方案；而地质条件的变坏，往往是增加造价和延长工期的主要原因。进入 21 世纪后，随着我国水利水电工程建设规模、建设要求的不断提高和计算机技术的快速发展，传统二维静态的工程地质分析与处理方式已难以满足地质、水工和施工各方面专业人员的实际需要，实现水利水电工程地质三维建模与分析已成为提高现代水利水电工程勘测、设计和施工水平的一项基础性课题，具有很大的挑战性，受到了大家广泛而密切的关注。

正是在此背景下，本书作者在其十多年水利水电工程可视化设计、施工仿真研究的基础上，针对水利水电工程地质三维建模与分析中存在的关键技术问题开展了富有开拓性的研究工作。本书包含了作者多年工作的创新研究成果和经验，以其开阔的思路和丰富的知识，融合水利水电工程科学、工程地质学、数学地质学和计算机科学等多个交叉学科的先进理论技术，紧密结合多项实际工程，实现了水利水电工程地质三维统一模型的建立，并为地质勘测、大坝工程、地下工程等提供了一系列实用的地质分析手段，在我国水利水电工程建设中已经并将继续发挥重要的作用。

我相信，本书的出版将为水利水电工程勘测、设计与施工一体化研究指引一个好的方向，并为广大水利水电工作者提供有益的借鉴和参考。

中国工程院院士



2005 年 12 月 4 日

前言

随着我国经济的持续发展和西部大开发战略的实施,水利水电事业呈现出勃勃生机,一大批巨大型水利水电工程相继得到开发,如三峡、龙滩、小湾、溪洛渡、糯扎渡、锦屏一级、白鹤滩等,这些工程大多处于高山峡谷,所处地区地质构造复杂、地质信息众多,给工程勘测、设计与施工等各方面带来了很大的困难。传统二维、静态的地质处理与分析方式已难以满足地质工程师和设计人员的实际需求,作为构筑水利水电工程数字化、可视化设计与施工的基础,水利水电工程地质三维建模与分析这一项具有挑战性、亟待研究解决的关键技术问题,受到了广泛而密切的关注。

国外的三维地质建模与分析研究虽然开展较早,并已发展了一系列较为成熟的建模理论方法和商业建模软件包,但其研究成果主要是面向油藏工程、采矿工程等领域,难以在我国水利水电工程地质领域推广使用。国内也有类似的软件产品,但能用于水利水电工程实践的很少。因此,近些年来以作者为代表的课题组,紧密依托实际工程,融合水利水电工程科学、工程地质学、数学地质学和计算机科学等多个交叉学科的先进理论与技术,提出了实现水利水电工程地质建模与分析的理论方法,研究成果在锦屏一级、小湾、溪洛渡、惠蓄、白鹤滩、糯扎渡、三峡、龙滩、阿鸠田、新疆恰甫其海、向家坝、勐旨、南水北调中线穿黄工程等10项大中型水利水电工程中得到应用与推广,对改变传统的工程地质制图和地质分析方式、提高工程设计水平与效率、指导地下工程施工及其管理有着积极的促进作用,有助于相关的不同专业学科间的沟通与交流,推动水利水电工程学科向数字化、可视化和智能化的方向发展。

本书深入系统地介绍了水利水电工程地质三维建模与分析的理论方法及其应用实践。全书共分8章:第1章是在当前背景下,分析水利水电工程地质三维建模的研究发展与现状,并提出了新的思路;第2章着重分析水利水电工程地质建模难点、建模空间对象、建模方法和建模体系,总结出建模实现的三项关键问题;第3章是在综合研究当前常用三维数据结构的基础上,提出了面向水利水电工程地质的混合数据结构;第4章通过对水利水电工程地质原始

数据的特点分析,结合锦屏一级工程研究了多源地质数据的空间解译分析和耦合理论方法;第5章主要研究了水利水电工程地质三维建模方法体系、建模技术和分类建模,结合锦屏一级工程完成了三维统一模型的建立;第6章研究了基于三维统一模型的水利水电工程地质分析,主要包括岩体质量分级三维建模、模型剖切分析、主体工程三维地质分析和其他常用分析,并探讨了基于三维地质模型的水利水电工程勘测、设计与施工一体化问题;第7章介绍了水利水电工程地质建模与分析系统(VisualGeo)的研制开发;第8章主要介绍了上述理论方法在具体水利水电工程中的实际应用。

本书主要由钟登华和李明超撰写,刘东海、刘杰、王刚、黄伟、杨晓刚、毛寨汉、周锐、安娜、刘奎建等也为本书付出了辛勤的劳动。本书的撰写和出版得到了曹楚生院士、崔广涛教授的鼓励和指导,得到了中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、中国长江三峡工程开发总公司、中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院、中国水利水电第十四工程局、云南苏帕河水电开发有限公司、中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、中国水电顾问集团中南勘测设计研究院、中水北方勘测设计研究有限责任公司、二滩水电开发有限责任公司等单位的帮助和支持,得到了中国水利水电出版社徐青博士的帮助,特此致谢!此外,在本书的撰写过程中,引用了部分文献资料,并已将主要参考文献附在书末,在此谨向有关作者致谢。

本书不仅系统阐述了水利水电工程地质三维建模与分析的理论方法,而且紧密结合我国在建或拟建的10项大中型水利水电工程,详细介绍了实际工程应用的途径和方法,相信本书能给广大地质工程师、工程设计人员、施工管理者以及科研人员提供一些有益的借鉴与参考。同时,由于理论技术发展的阶段性和局限性,以及作者的学识与水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2006年1月

于天津大学

目 录

序

前言

第1章	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	水利水电工程地质建模研究的发展与现状	2
1.3	基本概念	3
1.4	本书主要内容	4
第2章	水利水电工程地质建模关键问题分析	7
2.1	三维地质建模难点分析	7
2.2	三维地质建模空间对象分析	8
2.3	三维地质建模方法分析	9
2.4	三维地质建模体系结构	11
2.5	关键问题小结	13
第3章	水利水电工程地质三维数据结构	14
3.1	三维数据结构概述	14
3.2	面向水利水电工程地质的混合数据结构	17
第4章	水利水电工程地质空间解析理论与方法	26
4.1	水利水电工程地质原始数据分析	26
4.2	工程地质解译分析原理	28
4.3	复杂地质结构的构造解析	33
4.4	锦屏一级水电工程地质解译分析	38
第5章	水利水电工程地质三维建模技术方法及实现	45
5.1	水利水电工程地质建模方法体系	45
5.2	水利水电工程地质建模技术	46
5.3	水利水电工程地质对象分类建模	60
5.4	水利水电工程地质三维统一模型的建立	71
第6章	基于三维统一模型的水利水电工程地质分析	78
6.1	水利水电工程地质分析的内容和意义	78
6.2	水利水电工程岩体质量分级建模	79

6.3	水利水电工程地质模型剖切分析	83
6.4	水利水电主体工程三维地质分析	88
6.5	水利水电工程地质模型其他分析	91
6.6	基于三维地质模型的水利水电工程勘测、设计与施工一体化	94
第7章	水利水电工程地质建模与分析系统的研制开发	97
7.1	系统分析	97
7.2	系统设计	105
7.3	VisualGeo 系统的开发实现	108
7.4	系统地质数据库的建立与管理	112
第8章	工程应用实例	118
8.1	小湾工程地质三维建模与分析	118
8.2	溪洛渡工程地质三维建模与分析	123
8.3	惠州抽水蓄能电站工程地质三维建模与分析	129
8.4	白鹤滩工程地质三维建模与分析	133
8.5	糯扎渡工程地质三维建模与分析	138
8.6	三峡库区野猫面滑坡地质体三维建模与分析	143
8.7	龙滩工程地质三维建模与分析	145
8.8	阿坞田工程地质三维建模与分析	149
8.9	新疆恰甫其海工程地质三维建模与分析	152
结束语		155
参考文献		159



第1章 绪 论

1.1 概述

随着中国经济的持续发展和西部大开发战略的实施,水利水电事业呈现出勃勃生机,一大批巨大型水利水电工程相继得到开发,如三峡、龙滩、小湾、溪洛渡、糯扎渡、锦屏一级、白鹤滩等。这些工程大多处于高山峡谷,所处地区地质构造复杂、地质信息众多,给坝址选择、枢纽布置、地下工程设计与施工等各方面带来了很大的困难。随着对水利水电工程设计要求的不断提高和计算机软硬件技术的不断发展,作为构筑水利水电工程数字化、可视化设计与施工的基础,三维地质建模与分析这一项具有挑战性、亟待研究解决的关键技术难题,受到地质工程师、工程设计和施工人员等广泛而密切的关注,并已成为当前数学地质、水文工程地质等多个领域的研究前沿和热点。

在水利水电工程地质勘察勘探的各个阶段,可以从野外获得各种地质信息,包括地表地形、地层界面、断层、地下水位、风化层厚度分布以及各种物探、化探资料等。但这些信息都是离散不连续的数据,地质工作者很难直接利用它们分析其在地质体中的分布规律,必然会面临如何利用这些实测资料来推断地质信息在研究区域内的分布规律及其复杂关系的问题。即使能够预测各种信息在所研究地质区域中的分布值,面对大量的输出数据,地质工作者仍然会感到很难分析,而且他们往往习惯于用图件来反映地质信息,自然会希望能利用计算机自动显示这些信息在地质体内的分布规律。因此,利用计算机技术进行三维地质建模与分析是计算机在工程地质领域应用的一个必然趋势。

然而,传统的工程地质资料的分析和解释一般局限于二维、静态的表达方式,它描述空间地质构造的起伏变化直观性差,往往不能充分揭示其空间变化规律,难以使人们直接、完整、准确地理解和感受地下的地质情况,越来越不能满足实际分析的需求。因此,利用工程地质勘探和实验分析所得到的一系列空间分布不均的离散数据来描述地质构造的空间展布情况,建立恰当的水利水电工程三维地质模型,并使相应的空间可视化分析具有可操作性,是水利水电工程科学、工程地质学、数学地质学和计算机科学等多学科交叉领域研究的一项重要应用基础性课题。

在此背景下,数学地质理论、计算机图形学、科学计算可视化技术(Visualization in Science Computer, ViSC)和地理信息系统(Geographical Information Systems, GIS)等理论技术的发展为三维地质模型重建创造了条件。三维地质模型实质上是地质信息在计算机中的数据表达方式,包括数据存储结构和可进行的相关操作,上述先进技术为此提供了有力的支持。利用三维地质模型不仅可以直观地描述地下复杂的地质构造情况,形象地表达地质构造的形态特征以及构造要素的空间关系,而且结合强大的交互式空间分析功能,可以使地质分析更为灵活、直观、准确,从而为快速、适时地再现工程地质三维信息与地



质综合分析开拓了一条有效的途径。

1.2 水利水电工程地质建模研究的发展与现状

三维地质建模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的模拟与辅助工程设计的需要而展开的,随着水利水电工程建设的迅速发展,对水利水电工程地质三维建模与分析的需求也愈来愈强烈。国内外三维地质建模研究的发展与现状总体情况分析如下。

国外三维地质建模及可视化分析研究开展得较早,在理论研究、软件开发和实际应用等方面的发展较为成熟。在基础理论方面,不少学者从各种角度和所在领域提出了不同的相关理论与方法。加拿大学者 Houlding 最早于 1994 年提出了三维地质建模(3D Geoscience Modeling)的概念,即在三维环境下将地质解译、空间信息管理、空间分析和预测、地质统计学、实体内容分析以及图形可视化等结合起来,并用于地质分析技术。Houlding 详细阐述了实现三维地质建模的一些基本技术和方法,其中包括空间数据库的建立、三角网生成方法、三角网面模型构建方法、三维三角网固化方法、地质体边界的划定和连接等许多方面,总体上体现了当前三维地质建模技术的核心成果,反映了该问题的研究水平。针对地质体建模的特殊性和复杂性,法国的 Mallet 教授提出了离散光滑插值(Discrete Smooth Interpolation, DSI)技术,该技术基于对目标体的离散化,用一系列具有物体几何和物理特性的相互连接的节点来模拟地质体,目前已成为 GOCAD(地质目标计算机辅助设计)的核心技术,并在国际上受到极大的重视。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,国外三维地质建模软件已形成相当的规模,比较典型的大型专业软件有:EarthVision、Vulan、Gemcom、MicroLynx、GOCAD、SurpacVision、Landmark、GeoQuest、GRISYS 等。这些软件分别在石油物探、石油开采和露天矿开采等领域取得了颇有成效的研究成果,但是,由于国外软件费用高,并且受到具体地质条件的限制,大都面向石油、矿产等领域,其应用目的与水利水电工程地质分析存在较大的区别,在我国水利水电工程三维地质分析研究中难以推广使用,尤其是对于大型水利水电工程,从勘探数据处理到模型建立、表达等方面的针对性和实用性均不强,只适用于某些特定的条件。

自计算机在地学中应用以来,我国由于受到硬件以及人才培养等客观因素的限制,地质工程师大多从二维上对地质体进行分析和研究,并且研制了许多二维制图的应用软件,而对于三维地质建模和可视化分析方面的研究还在探索中。目前,很多高等院校和研究单位结合所属领域开展了这项研究工作,取得了一定的理论和应用成果。中国科学院张菊明、陈昌彦等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。中国矿业大学武强和徐华设计了超体元实体模型,并提出了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。北京市勘察设计研究院陈树铭提出了泛权算法理论,试图解决任何复杂的三维地质数字化与重构问题。此外,南京大学、武汉大学、北京大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、长江勘测技术研究所等单位也做过相关的研究工



作。对于水利水电工程地质,成都理工大学柴贺军、黄地龙、黄润秋等结合溪洛渡水电站研制开发了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。

综上所述,从国内外所开展的一系列研究和应用来看,三维地质建模与可视化模拟分析已经受到国内外专家、学者越来越多的重视,并取得了相当的成果,丰富和发展了三维地质建模的理论与方法。然而,从总体上看,虽然国外三维地质可视化模型研究和应用走在前列,有不少成熟的建模软件,国内也有类似的软件产品,但其成果除了在露天矿山开采和石油物探领域应用取得较好的效果外,在水利水电工程设计与建设领域离实际应用还有一定的距离,真正应用于特殊而复杂的水利水电工程地质三维建模与分析的实践非常少见。而且,目前的工程地质三维模拟大都着重于单层地质实体的表示,对断层、褶皱等构造因素的分析建模重视不够,不能反映工程设计和大型结构面及其结构面相互交切关系的综合信息和三维特征,缺乏结合特定工程部位的地质结构适宜性和稳定性分析评价功能。水利水电工程大区域的三维地质建模与分析研究可以说仍然处于探索阶段。

因此,针对该技术问题研究的不足,紧密结合实际工程,本书对水利水电工程三维地质建模与分析开展了理论方法、关键技术和工程应用研究,进行了有益的探索,并取得了一定的成果。

1.3 基本概念

由于三维地质建模的研究和应用非常广泛,因此出现了各种各样的术语,为便于理解和阅读,综合国内外相关文献资料,并结合水利水电工程领域,对一些与本书研究主题密切关联的基本概念或术语加以归类总结,给出较为明确的阐释。

1.3.1 三维地质建模

三维地质建模(3D Geological Modeling)又称为三维地学建模(3D Geoscience Modeling)、三维地质数字化建模等。实际上,从广义的角度,地学(Geoscience)是研究地理学(Geography)、地质学(Geology)、地球物理学(Geophysics)及大地测量学(Geodesy)等与地球相关学科的统称。本书将三维地学建模狭义化,统一界定为三维地质建模。三维地质建模是指在原始的地质勘探数据基础上,如地质点、钻孔、平硐、地球物理测量、航卫片、野外制图和地震剖面等,在地质工程师的专家知识和经验指导下经过一系列的解译、修正后,以适当的数据结构建立地质特征的数学模型,通过对实际地质实体对象的几何形态、拓扑信息(地质对象间的关系)和物性三个方面的计算机三维模拟,由这些对象的各种信息综合形成的一个复杂整体三维模型的过程。大多数三维地质模型都是在—维和二维地质数据解释后建立的。

1.3.2 地质信息三维可视化

地质信息三维可视化属于三维地质建模的后期表现过程,是指在三维地质几何模型的建立基础上,采用计算机图形技术,将几何描述以3D真实感图像的形式予以表现。三维可视化技术对于地质构造研究十分重要,通过不同颜色和实际岩土照片材质对不同地质对象进行纹理映射,地质三维可视化模型能够形象地表达地质构造的真实形态特征以及构造



要素的空间关系,结合三维信息处理和空间分析功能,可以使地质构造分析更为直观、准确。

1.3.3 三维地质建模系统

三维地质建模系统是用于建立三维地质模型的计算机软件系统。一个理想的三维地质建模系统一般有以下三种类型:

(1) 全交互系统。地质工程师建立地层、断层等的剖面线,计算机得到相关的拓扑关系,建立相应的三维模型。这对于在工程地质勘探初期是理想的。

(2) 批处理系统。地质工程师输入地层岩性、断层等的结构表和拓扑表,计算机用这些指令集合或关系表进行建模操作。这对于复杂构造区域的三维地质模型重构很有用。

(3) 全自动系统。所有地质结构的交错空间关系都是根据其相应的拓扑关系自动算出,而不需要用户干预。这是人们理想状态中的三维地质建模系统。

实际中更多实现的是第二类系统,而且在计算机建立相应的模型之后,人们往往还根据自己的经验知识对模型进行交互修正,因此,在三维地质建模系统中实际上离不开人的交互。总的来说,三维地质建模系统的研制应该遵循健壮性、应用性、可视性、交互性以及可扩充性等原则,在充分考虑地质数据多源性、复杂性及不确定性等特点的前提下,明确三维地质建模的目的不仅仅是用计算机来展现地质体的真实面貌,更重要的是能够为解决地学领域许多理论和应用问题提供一个开发研究的崭新环境和科学手段。

1.3.4 工程地质三维统一建模

工程地质三维统一建模是本书提出的一个新的术语。工程地质学是研究与工程建设有关的地质问题的科学。工程建筑与地质环境两者相互作用、相互制约,应将其作为一个统一的系统分析研究。工程地质三维统一建模就是在已构建的三维地质模型和工程建筑物模型基础上,通过三维图形运算操作获得工程建设区域内耦合工程建筑与地质环境的三维统一模型,提供工程勘测、设计、施工所需的地质信息,分析解决各种工程地质问题。例如,在水利水电工程领域,一个完整的工程地质三维统一模型主要包括工程布置区域(一定纵深)的三维地质模型,与地质条件密切相关的大坝、导流洞、泄洪洞、地下厂房等水工建筑物模型,以及两者的耦合运算。

1.3.5 工程地质三维分析

建立三维地质模型的目的是为了对工程地质条件进行有效的分析,为指导工程勘测、设计与施工服务。工程地质三维分析就是基于工程地质三维统一模型,通过对模型的一系列运算操作,如动态显示、实时任意剖切、与工程建筑物相关的地质分析等,获得更多对工程勘测、设计和施工有用的地质信息,为工程优化设计和快速施工提供有效的技术支持。例如,水利水电工程地质三维分析主要包括勘探布置下的数字钻孔/平硐、岩体质量可视化分级、任意横剖/纵剖/平切、大坝建基面地质分析和地下洞室地质分析等,为水利水电工程勘测、设计与施工提供全方位、动态的地质分析手段和丰富的地质信息。

1.4 本书主要内容

综合以上的研究背景和国内外分析现状,本书研究的总体目标是:为分析解决大区域



内复杂且不确定的地质环境、地质构造形态和地质条件等具有错综空间关系的地质信息给水利水电工程勘测、设计和施工带来的诸多工程地质问题,充分利用已有的地质勘探和实验分析资料建立方便实用的水利水电工程地质三维建模与分析系统,提供先进的理论方法和技术手段,实现工程地质信息全方位动态分析与利用,并应用于水利水电工程领域解决实际难题。

为了实现上述目标,提出了如图 1.1 所示的总体思路,将总目标分解为三个具体明确的分目标,采用理论与实践相结合的研究方法,通过理论研究、技术开发和工程应用三大环节,最终实现研究的总体目标。

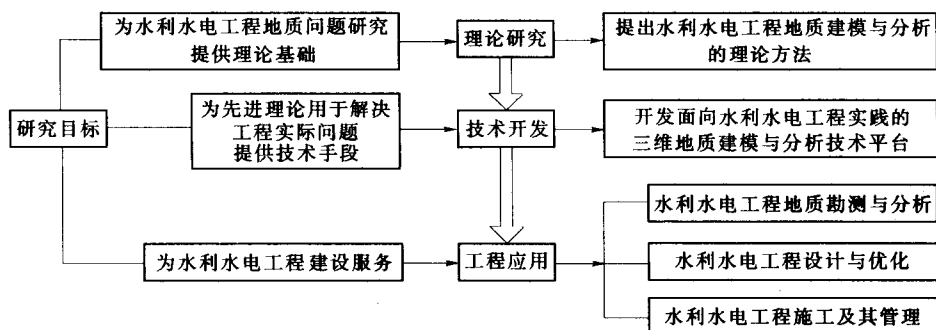


图 1.1 总体研究思路

本书将围绕上述三个环节展开,主要包括:

(1) 理论研究。这是基础。在为水利水电工程建设服务的前提下,针对多源地质数据的耦合分析、地质体的复杂性、模型信息存储量大且分析速度慢、地质构造的动态性、模型的可靠性及快速更新修改等关键问题,融合水利水电工程科学、工程地质学、数学地质学和计算机科学等多个交叉学科的先进理论技术,提出了实现水利水电工程地质建模与分析的理论方法,主要体现在以下三个方面:

1) 面向水利水电工程地质的 NURBS (Non - Uniform Rational B - Splines, NURBS) 混合数据结构。

2) 耦合多源数据的水利水电工程地质三维统一模型的构建方法。

3) 基于三维统一模型的水利水电工程地质分析方法。

(2) 技术创新。这是将所建立的先进理论体系用于解决工程实际问题的桥梁和纽带。结合理论方法和工程实际需求,设计了各种满足地质建模与可视化分析的快速算法模块,研制开发了实用的水利水电工程地质建模与分析系统 VisualGeo,并提供了丰富的专业地质可视化分析手段和数据接口,为水利水电工程勘测、设计与施工提供分析地质问题的技术平台。

(3) 工程应用。这是最终目标。应用水利水电工程地质建模与分析理论方法和技术手段,分析解决地质勘察、工程设计和施工中遇到的地质问题,为实际工程服务。

为了具体实施上述总体研究思路,本书提出了图 1.2 所示的总体技术方案。在所提出的水利水电工程地质建模与分析理论方法的基础上,设计相应的算法模块,研制开发相应



的技术平台 (VisualGeo 系统), 经过工程实践应用和后期反馈信息检验, 验证理论方法及技术的可行性, 便可在该平台上广泛开展工程应用技术研究, 解决水利水电工程勘测、设计与施工中的相关地质问题。

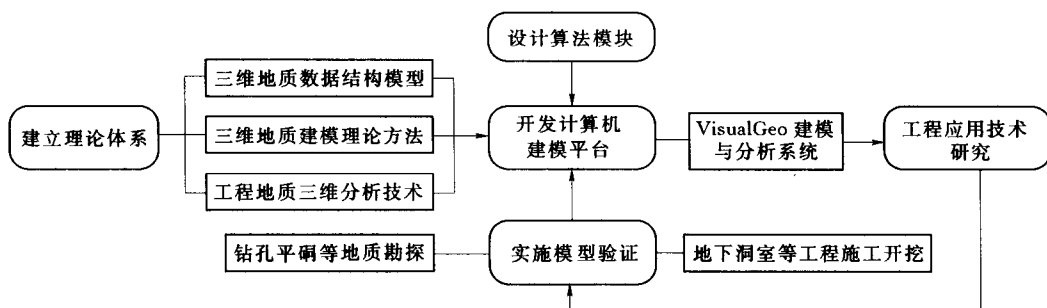


图 1.2 总体技术方案

水利水电工程地质建模与分析的重点在于工程对象和地质对象的统一结合, 三维地质模型是基础, 而为水利水电工程建筑物选址、布置、设计和施工等各方面提供多方面可行的地质分析手段才是所要达到的目标。工程地质是工程建设的基本载体, 实现水利水电工程地质三维建模与分析, 对于水利水电工程勘测、设计和施工, 在不同阶段有三维地质模型支持, 将能够实现各方面的多种需求:

(1) 可以辅助地质人员进行钻孔、平硐优化布置, 指导勘探工作, 不仅能提高工程地质工作的效率和精度, 还有助于地质工程师预测分析地质信息在研究区内的空间位置及其关系。

(2) 可以对模型进行自动剖切, 满足设计方案变更、及时提交数字化成果的需要, 使工程地质制图实现系统化、专业化、标准化, 且将地质工程师、工程设计人员从繁杂的手工制图工作中解放出来。

(3) 可以优化工程设计, 提高工程设计水平和效率, 缩短设计周期; 可以指导实际施工, 辅助施工管理决策, 有助于缩短工期, 减少施工事故。

因此, 建立完善、简便、实用的水利水电工程地质三维建模与分析系统, 快速、准确地为水利水电工程勘测、设计与施工等提供全面的地质信息和丰富的分析手段, 进行综合一体化和三维量化的分析与管理, 有利于合理、有效地进行各种地质分析评价和预测, 降低风险, 对水利水电工程勘测、设计与施工具有理论指导意义和实用价值。



第2章 水利水电工程地质建模关键问题分析

2.1 三维地质建模难点分析

广义的三维地质模型可作如下描述：在野外地质勘探和室内地质资料分析的基础上，利用计算机量化（数字化）描述地质对象的几何形态、拓扑关系（地质结构体间的空间关系）和物性等信息，包含的元素层次有点（地质点）、线（钻孔平硐路径）、曲面（地层面、断层面等）、交线（地层与断层的交线）、闭合区域体（断块、岩脉等）、网络（断层网络）、属性（年代、密度、孔隙度等）。通过对研究区域内这些对象的一维、二维和三维信息数据综合解释后重建建立而成的复杂整体计算机模型，即为广义上的通用三维地质模型。

由该定义可知，建立一个客观准确的三维地质模型必须获得足够的原始采样地质数据，能够真实反映复杂地下空间关系的地质解译分析和合适的数据结构。因此，目前复杂地质体的三维建模主要面临的困难可归纳为以下四点：

（1）原始地质数据获取的艰难性。三维地质建模的准确性很大程度上依赖于原始输入的地质数据。然而，一方面由于经费的限制，通常难以采集足够多的样本数据以解决许多不确定问题，只能获取一些非常不全面、有时甚至是相互冲突的信息；另一方面由于所获得的剖面数据缺乏解释和源于遥感的数据较为模糊等，使得模型的建立相当困难，而且导致无法客观准确地描述整体区域内的地质构造和空间属性的变化特征。因此，基于原始离散的地质数据进行合理、快速的空间构造解译分析是三维地质建模的基础。

（2）地下地质体及其空间关系的极端复杂性。断层、岩脉等将地层切割成不连续的空间分布、岩体内复杂的岩性变化以及地质构造过程的动态性等使得地下的自然环境变得异常复杂。地质体中包含如断层、岩脉侵入体、倒转褶皱等多值面的地质结构，增加了三维地质建模数据结构、拓扑关系及相应算法的复杂程度，缺乏成熟的解决方案，使得重建的三维模型信息存储量异常巨大，无法满足实际分析应用。因而，针对应用目标，提供合适的三维数据结构模型，解决地质体复杂、模型数据量大与模型需满足实时分析要求的矛盾，是水利水电工程地质三维建模面临的最大困难之一。

（3）地质体属性的未知性与不确定性。这实际上是由稀疏的不充足采样数据和地质体的复杂性共同决定的，而且影响地质体属性的不确定因素很多，如相互矛盾的信息源、地质条件的变化等。然而，工程实际所需要的地质模型却要求是已知且确定的，传统的二维地质解译图仅仅局限于有限的不连续的剖面，其间的构造形态需要地质工程师或设计人员去想像，这就存在主观上的不确定性。因此，如何将地质专家的经验认识和先进的智能推断预测技术有机地结合起来，尽可能消除地质体属性的未知与不确定因素，客观合理地构



建以整个区域地质体为解释对象的三维地质模型, 具有很大的挑战性。

(4) 三维地质分析能力的局限性。基于上述分析, 由于地质数据的匮乏, 地质环境中存在的复杂性、不连续性、未知性和不确定性等客观因素, 以及三维地质建模不同的应用目标等主观因素, 使得三维地质模型的建立缺乏统一而完备的理论技术, 导致现有的相关系统缺乏专业的三维地质分析能力。因而结合所属领域开展三维地质建模理论体系研究, 有针对性地开发完整且专业的建模与分析系统, 显得尤为实用和必要。

2.2 三维地质建模空间对象分析

地质空间对象的特征是三维地质建模过程中要考虑的一个重要因素。在水利水电工程地质三维建模系统中, 空间对象可以分为人工对象和自然对象两大类。人工对象如大坝、地下洞室、钻孔、平硐等, 是工程师们按照实际工程的需求设计而成的, 其形状一般是规则的, 自然对象的形态是不规则的, 人们要通过各种勘探和测量数据才能把握其外部形态和内部变化。Raper (1989) 将自然对象分为采样局限 (Sampling - limited) 对象和定义局限 (Definition - limited) 对象。采样局限对象是指形态仅由采样数据的多少来决定的自然对象, 如断层的上下盘; 定义局限对象则是指形态由人为的分类标准来决定的自然对象, 如地层是根据化石组合和岩石变化特征来划分的。

人工对象、采样局限对象和定义局限对象具有不同的特征。一般来说, 人工对象是确定不变的; 采样局限对象的形态随着采样数据的增加而更准确; 定义局限对象若改变相应的分类标准, 其形状和范围会产生很大的变化。因此, 在对空间对象进行三维建模表达时, 要充分考虑到不同类型对象之间的差异, 选择相应合适的数据结构。

工程地质三维建模空间对象是相当复杂的, 既有地层、断层、褶皱等自然对象, 又有钻孔、平硐、地下洞室等人工对象, 在三维地质建模选择数据结构模型时, 首先必须对这种复杂性有足够的认识, 而其中最为复杂的还是地质体对象, 其复杂性主要体现在以下三个方面 (Houlding, 1994):

(1) 几何形态的复杂性。地质体是在漫长的地质历史过程中, 由各种不同的地质过程综合作用而成。大多数地质体在初期是由沉积作用或岩浆作用所形成的, 几何形态比较简单, 复杂性来自于后期的侵蚀、岩浆侵入或变质作用。对于计算机表达来说, 最显著的复杂性来自于各期构造运动, 它们造成地层的隆起、褶皱、剪切、断裂、位移乃至倒转等。用计算机来表达地质实体, 要求数据结构具有处理离散、不规则和三维空间地质体的能力。

(2) 信息源的复杂性。地质工作者进行地质调查, 往往采用不同的手段, 这使得所获取的地质信息有各种各样不同的来源, 最常用的有钻孔平硐资料、地形测量数据、地质制图剖面资料和遥感影像等。为了得到令人满意的表达效果, 必须提供合适的数据模型对这些信息进行综合处理。

(3) 地质条件变化的复杂性。不同的地区, 地质条件不同, 有的是简单的层状地层, 有的是极端复杂的褶皱和断层的复合体, 对于计算机表达来说, 应该能够提供可供选择的建模机制, 以便用来处理各种不同的地质条件。



任何地质对象在空间都占有一定的位置和范围，具有一定的形态和性质特征，并与其他地质对象之间存在着一定的空间联系。因此，地质对象的基本特征可归结为空间特征、空间关系特征和属性特征三个方面：

(1) 空间特征表示地质对象所处的空间位置特征，也称为几何特征。地质对象一般通过地质体反映，其形态通常是不规则的，且具有不同的产状。图 2.1 为一个含有断层、侵入岩脉等结构，空间特征较为简单的地质体示意图。

(2) 地质对象之间的空间关系主要为拓扑关系，包括包含、覆盖、相交、相离等关系，如图 2.2 中的 T1 和 T2（包含）、T2 和 T3（覆盖）、T3 和 T4（相交）以及 T3、T4 和 T5（多层相交）等。

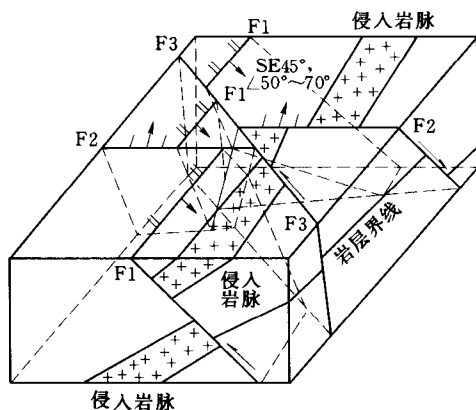


图 2.1 地质体空间结构示意图

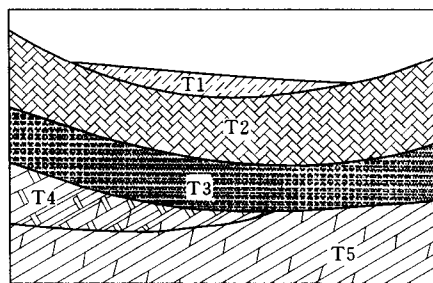


图 2.2 地层空间关系示意图

(3) 属性特征表示地质对象的各种性质特征，如地质对象的年代、岩性、孔隙度、渗透率、含水率、力学强度参数等。不同的地质对象具有不同的属性特征，而同一地质对象的属性特征在空间上往往是不均一的，如断层的力学强度参数在不同位置并不一致。

由此可知，三维地质模型应该包含对研究区域内各种地质对象的几何特征、拓扑关系和属性信息等的综合表达。

2.3 三维地质建模方法分析

三维地质建模研究是当前地质学中具有挑战性的前沿课题之一，是许多地质学家和计算机专家一直探索的方向。自 20 世纪 80 年代起，学者们提出了各种方法构建三维地质模型来模拟复杂的地质结构，使得这方面的研究有了长足的发展。例如，Vistelius (1989) 提出了基于地质概念模型的数学方法重建地质体；Yfantis (1988) 运用分形技术对地质体表面进行模拟；张菊明 (1996) 建立了各种空间曲面拟合函数来模拟三维地质曲面，并与陈昌彦合作 (1998)，将其应用于三峡船闸边坡工程地质信息的三维可视化；毛善军等人 (1996) 提出了利用网格插值法建立地质信息的三维网格化模型；Mallet (1997) 提出的离散光滑插值 (DSI) 几何建模方法已在 GOCAD 地质建模中得到广泛的应用；de