

三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法研究

朱良峰^{1,2}, 吴信才³, 潘 信¹

1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062
2. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062
3. 中国地质大学(武汉) 信息工程学院, 湖北 武汉 430074

Zhu Liangfeng^{1,2}, Wu Xincan³, Pan Xin¹

1. Key Laboratory of GIS for Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China
2. Shanghai Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, Shanghai 200062, China
3. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

Zhu Liangfeng, Wu Xincan, Pan Xin. Theory of accuracy assessment and methods for error correction in 3D geological structure models. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 363-371

Abstract : Accuracy assessment and error correction of 3D geological models has become a bottleneck that restricted the development and application of 3D geological modeling. Based on the review of the present situation and development trends in 3D geological modeling, we introduced a general research framework for the accuracy assessment, error detection and dynamic correction in 3D geological structure modeling. To evaluate the accuracy of 3D geological structure models, we proposed to establish the general theoretical model, the practical operating model oriented to the given geologic body and the 3D distribution model of spatial uncertainty for geologic structure, respectively. The research should focus on the influence of geologic features and 3D modeling approaches on the accuracy of 3D geological models, should solve the accuracy assessment problem that induced by the interpolation error of the popular geologic surface and the extrapolation error of special geologic entity. Two approaches for error correction of 3D geological structure models, called the original-data-based method and interim-model-based method, are presented. To implement those approaches, the visual interactive technique of modeling data and 3D model was adopted. This research laid a foundation to build the theory and method system for accuracy assessment and error correction in 3D geological models, and also is helpful in improving the 3D modeling techniques under complicated geologic conditions.

Key words : 3D geological modeling; structure model; accuracy assessment; error correction; complex geologic body

摘 要 : 三维地质模型精度评估与误差修正问题已成为制约三维地质模拟技术深入发展应用的瓶颈。在综合国内外研究现状与发展趋势的基础上,提出了三维地质结构模型精度评估、误差检测、动态修正的总体研究框架。在模型精度评估方面,提出分别构建三维地质结构模型精度评估的一般理论模型、面向特定地质体的实

收稿日期:2008-11-20;修回日期:2008-12-20

基金项目:国家自然科学基金委员会国家基础科学人才培养基金项目(J0730534);上海市自然科学基金项目(06ZR14031);上海市教育发展基金会晨光计划项目(2007CG34);北京大学数字中国研究院为新研究基金项目(W08SI03);国家海洋局海洋908专项(SH908-HD2);上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金项目(200803)

作者简介:朱良峰(1978—),男,博士,地理信息工程专业,主要从事三维GIS与地学空间信息建模研究。E-mail:zhuliangfeng@163.com

际操作模型和地质结构构造不确定性的三维空间分布模型的研究思路,指出应重点研究地质实体自身特性、三维地质建模方法对三维地质结构模型精度的影响,解决由一般地质界面的内插误差和特殊地质体的外推误差引起的精度评估问题。在模型误差修正方面,提出基于建模初始数据的模型误差修正方法和基于建模中间结果的模型误差修正方法,在具体实现时,引入“数据-模型的可视化交互技术”。这些研究成果为建立一套完整的三维地质结构模型精度评估与误差修正的理论体系和方法体系奠定了基础,有助于完善复杂地质条件下三维地质模拟的方法与技术。

关键词:三维地质建模;结构模型;精度评估;误差修正;复杂地质体

中图分类号:P208;TU17 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2009)04-0363-09

三维地质模拟是一门综合运用现代空间信息理论来研究地质体及其内部物理、化学属性的信息处理、数据组织、空间建模与数字表达,并运用科学计算可视化技术对其进行真三维的再现与交互的科学与技术^[1-2]。三维地质模拟包括两大部分的内容,即三维地质建模和地质模型的三维可视化分析^[3-4],其中前者是后者的基础。三维地质建模的核心任务是建立三维地质实体模型,它包括两类模型的构建:一类是地质体的几何结构模型(可简称为三维地质结构模型),另一类是地质体内部的物理、化学属性参数模型(可简称为三维地质属性模型)。三维地质结构模型在三维地质模拟的过程中具有至关重要的意义:它既能反映三维地质体的几何形态,又能反映地质体内各部分之间的关联关系;通过建立地质结构模型能够模拟地层面、断层面的位置、形态和相互关系,从而显示地质体的位置、形状,进而辅助各种工程设计、进行地震反演;通常可在三维地质体结构模型的基础上构建地质属性场模型,并建立属性数据与地质体几何结构数据之间的对应关系^[4]。

目前,国内外在三维地质体结构建模方面的研究主要集中在两个方面^[5-12]:一是适合于地质体三维模拟的空间数据模型研究,一是三维地质结构建模的具体实现方法研究。从实际应用上来看,目前的三维地质模型构建方法及其可视化分析技术多是以对地质体几何结构构造的直观描述和空间展示为主,但三维地质建模的意义远不止于此,它还应包含更深层次的信息提取和分析技术^[13]。由于地质现象的复杂性和采样数据的稀疏性,导致三维地质模拟的结果与实际的地质构造分布情况差别较大,且很难作相应的评估与修正。地质模型的精度评估、误差检测及修正问题业已成为制约三维地质模拟技术深入发展应用的瓶颈^[13]。要提高三维地质建模的可靠度,就必须建立起一套完整的精度评估、误差检测、分析和修正机制,在此基础上尽量减少数据误差、调整建模参数、修正模型错误、提高模型精度,以

获取真实合理的三维地质模型,这样才能为后续的地质分析工作提供精确合理的地质依据。

本文将简要综述国内外在三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法这一研究主题上所取得的最新进展及存在的主要问题,提出三维地质结构模型精度评估与误差修正的标准流程框架,给出研究过程中所遇到的主要科学问题的解决思路或实现方案。

1 研究现状简述

从本质上来看,三维地质模型是一种数学模型,三维地质建模是一个数学模拟的过程,建立精确、可靠的三维地质模型是三维地质模拟的基本目标。一个好的三维地质模型应具有精确性、现实性、准确性、可靠性、一般性和成效性等基本特征。由于三维地质体自身存在的不稳定性和人类对其认识的不完备性,再加上三维地质建模的数据和规则、方法、流程等具有不精确性、随机性、模糊性、灰性(部分已知、部分未知的不确定性)、未确知性(主观的、认识上的不确定性),这不可避免的使得作为最终建模结果的三维地质模型只能是对客观地质实体的一种近似描述。

误差是三维地质模型的固有属性,三维地质模型的精度反映了误差的离散程度。目前,三维地质建模的采样数据主要来自地质勘探,包括地质钻孔(测井)数据、物探剖面数据、二维地质图、地形图资料、物探化探资料和遥感影像数据等。获取这些地质勘探数据的成本都比较高,在特定的研究区域往往只能获取到有限的资料,这些数据不但数目稀少,而且分布也不均衡。另外,从钻孔(测井)资料揭示出来的地层分层参数只在该钻孔(测井)的有限范围(孔直径)内有效,各个钻孔(测井)之间并无相应的关联参数。三维地质建模的目标就是利用这些稀疏、零散的局部采样点资料构建出一个相对精确、完

整的三维实体模型。显然,仅仅直接利用这些原始的采样点数据而不作任何数学处理是不可能实现这个目标的,这就需要采用特定的空间插值算法,对地质界面进行适当的内插外推,进而推算出地层及各种地质构造的空间展布规律。但常规的空间插值方法无法顾及地层分布的多样性和不同建模区域的特点,再加上地质现象的高度复杂性与多解性,任何既有的插值算法都是对未知属性的一种估计,都有其具体的适用范围和局限性,并不能最终解决所有区域的具有众多不同特性的地质体的模拟与重构,更无法保证建模结果的精度。

自 20 世纪 90 年代以来,随着三维地质模拟技术在数字城市、减灾防灾、城建工程、地下工程、交通工程、环境工程、资源开发中的广泛应用,国内外对于三维地质模型的精度评估与误差修正问题逐渐重视,地学界(包括 GIS、数学地质、工程地质等)开始研究进行三维空间模型精度评估与误差修正的模型与方法。

在美国地理信息与分析国家中心(NCGIA)所提出的关于遥感与 GIS 的 12 个研究专题中,第 1 研究专题就将 GIS 的精度问题列为最优先研究的主题,第 12 研究专题又把误差问题列为 6 个研究问题中的第一位,这充分显示了在现阶段地学研究领域中,空间模型(包括三维空间模型)的不确定性与误差分析问题已成为最重要的研究主题之一^[14]。具有典型意义的研究进展有:Leung 等(2004)系统研究了二维 GIS 中不确定性、误差的基本概念、处理方法与基本模型^[15];史文中(1998)发展了 GIS 中线段的置信区间、结合位置与属性不确定性的“S-带”模型^[14]以及三维地理信息系统(3D GIS)中几何特征(包括三维点、线段和线)的误差模型^[16];

Makarovic、Kubik、Frederiksen 等(2003)基于不同的数学工具(主要有傅立叶变换、地理统计学、区域变化理论等)建立了 DEM 表面模型精度预测的一些数学模型^[17];Tacher 等(2006)研究了地下三维地质模型的不确定性问题,提出了一种评估简单层状地质体(包括沉积地层、侵蚀地层)模型的不确定性的基本流程(如图 1 所示)及其实现方法^[18];Bistacchi 等(2008)研究了包含褶皱、断层的三维地质模型重构中的不确定性问题,指出对复杂地质体地质界面的精度评估应有别于简单地层层面^[19];曹代勇等(2004)研究了对三维地质模型进行直接三维交互的实现技术^[20];朱良峰等(2006)研究了三维地层模型的误差修正问题,提出三维地层模型的地质剖面修正技术和虚拟孔修正技术^[13]。从总体上来看,目前还没有形成完整的理论体系用于处理地学中的不确定性,更没有形成对三维地质结构模型进行精度评估与误差修正的一般性理论。

三维地质结构模型的不确定性问题是一个复杂的非线性问题,研究该问题的理论基础除了经典的误差理论、概率论、数理统计理论之外,还需要寻找证据数学理论、模糊数学、空间统计学、熵理论、云理论、信息论、人工智能等非线性科学理论的支持^[21]。现有的一些理论(如区域变化理论、概率论、模糊数学、证据数学理论、空间统计理论等)只能用来处理三维地质结构模型精度评估中的若干侧面问题,既有一些方法也只能处理简单地层模型精度评估或误差修正时的某一局部问题,缺乏对三维地质结构模型精度评估和误差检测、分析、修正机制的系统研究,无法解决在断层、褶皱以及其他复杂地质构造作用下的三维地质结构模型的不确定性评估与误差修正问题。

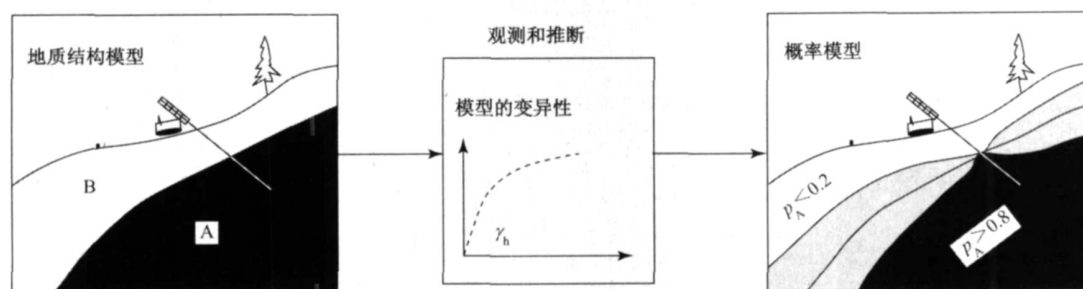


图 1 简单层状地质体不确定性评估的基本流程
(修改自 Tacher 等,2006^[18])

Fig. 1 Diagram of uncertainty assessment associated with simple stratigraphic models in 3D

从技术发展的历程上来看,三维地质模型是从2.5 维的数字高程模型 (DEM) 演化而来的。事实上,模型的精度评估、误差修正问题在 DEM 中早已存在并一直没有得到完美的解决^[17, 22]。在建模的尺度扩充到三维空间之后,这个问题的重要性和迫切性更是日益凸现。从目前掌握的文献资料来看,国内外在三维地质结构模型精度评估、误差检测方法、修正机制及其实现技术上的研究尚处于初级阶段,开展相关领域的深度理论分析和系统实证研究是一项极为迫切的任务。

2 总体研究框架

三维地质结构模型不确定性研究的核心,就是建立一套完整的精度评估与误差修正的理论体系和方法体系,形成一套完善的三维地质结构模型精度评估、误差检测、动态修正的标准流程框架。综合现

有的三维地质结构建模基础理论和实际情况,本文提出三维地质结构模型精度评估与误差修正研究的总体框架(如图 2 所示),基本的研究流程简述如下:典型研究场区复杂三维地质体 原始地质数据 三维地质综合数据库 初始的三维地质结构模型 精度评估模型(包括一般理论模型和面向特定地质体的实际操作模型) 模型精度可视化展示(地质结构构造不确定性的三维空间分布模型) 检测模型精度是否满足要求 如不满足要求,则进行模型误差修正 修正后的三维地质结构模型 重新检测模型精度是否满足要求:如不满足要求,则进行模型误差修正;如满足要求,则在研究场区进行实际工程实验验证 修正精度评估模型 模型预测与实际工程分析、应用。

三维地质结构模型不确定性研究的主要内容可概括为两方面:一是三维地质结构模型精度评估的理论模型问题,二是三维地质结构模型误差修正方

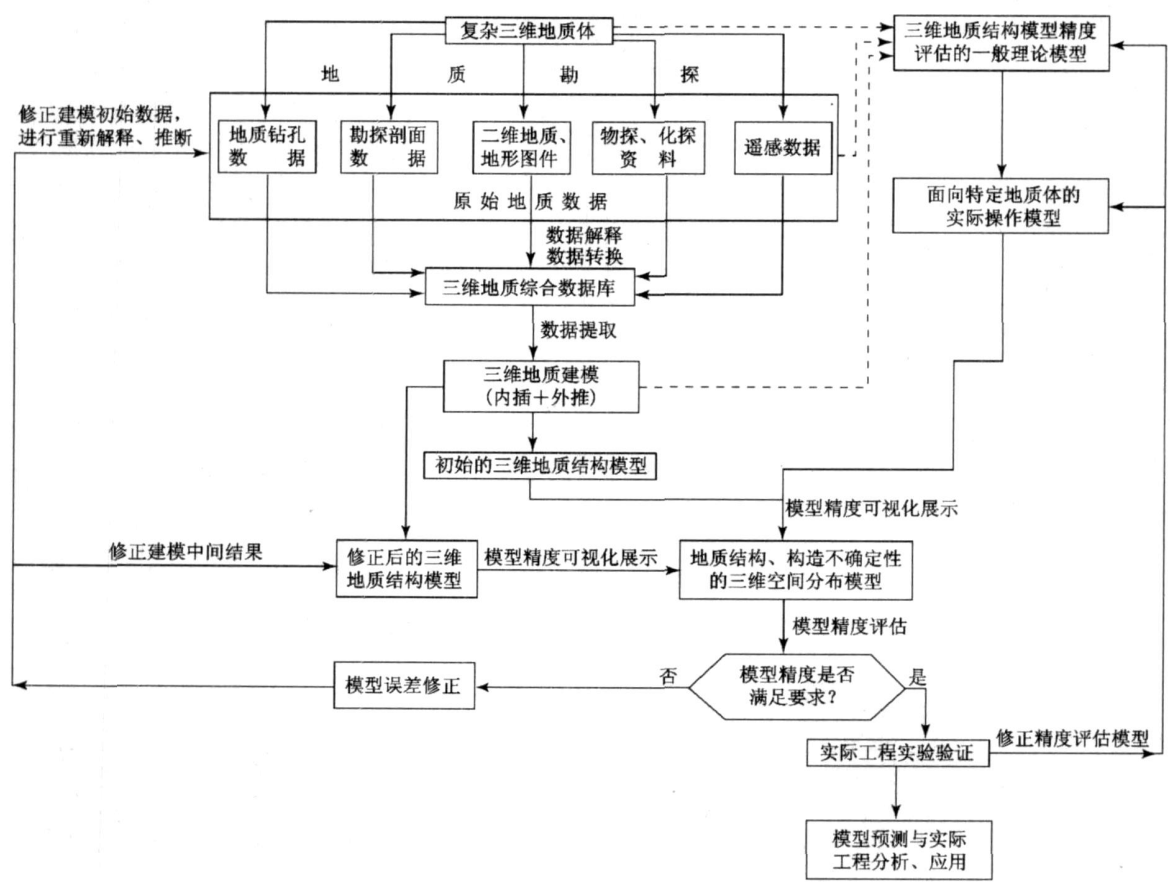


图 2 三维地质结构模型精度评估与误差修正的基本流程

Fig. 2 Flow chart of accuracy assessment and error correction in 3D geological structure models

法问题。下面详细解述。

3 三维地质结构模型精度评估的理论模型

从理论上讲,三维地质结构模型的精度评估可通过3种途径:一是理论分析,二是试验检测,三是理论与试验相结合。理论分析的方法是通过寻求对地质体复杂变化的统一度量和各种内插、外推数学模型的通用表达方式,使评定方法、评定所得的精度和某些带规律性的结论具有比较普遍的理论意义。而试验检测的方法则是通过大量的实验来建立数学模型,但这种方法费时费力且具有很大的局限性。由于地质体及其空间关系极为复杂,在无法获取充足的采样数据和通用的地质模型的情形下,影响三维地质几何结构模型的因素多种多样,单纯采用一种方法并不能很好的解决所有的问题,再加上地质建模过程的复杂性,在实际的操作实践中,对三维地质结构模型的精度评定与检测需要采用理论与试验相结合的方法。

由于地质体及其空间关系极为复杂,在无法获取充足的采样数据和通用的地质模型的情形下,特殊地质构造(如褶皱、断层、岩脉和岩床、透镜体、丘状构造等)之间的复杂关系(包括空间结构和属性变化)使得普通地质工作者很难建立起精确可靠的三维地质模型,更难以应用一个统一的模式、方法或数学模型对三维地质模型的精度进行有效的评判。为解决这一难题,本文将“三维地质结构模型精度评估的理论模型”问题分解为相互关联的三个子问题分别研究,包括:三维地质结构模型精度评估的一般理论模型;面向特定地质体的实际操作模型;地质结构构造不确定性的三维空间分布模型。具体实现时,首先通过分析影响三维地质结构模型精度的主要因素,建立三维地质结构模型精度评估的一般理论模型;然后基于具体的研究场区的地质数据,采用特定的模型组织方法和构模技术构建出具体的三维地质结构模型;结合这一具体的三维地质模型,建立对特定地质体精度进行评估的实际操作模型并转换为地质结构构造不确定性的三维空间分布模型,并以计算机图形三维可视化的方式来展现复杂地质结构构造的不确定性在三维空间内的分布情况。

3.1 三维地质结构模型精度评估的一般理论模型 三维地质结构模型精度评估一般理论模型研究

的主要内容是:基于对三维地质结构模型误差元素的理论研究和经验分析,研究控制三维地质结构模型的主要因素以及建模过程中误差传播规律和误差积累效应,借鉴数字高程模型(DEM)表面精度评估模型与方法,建立对三维地质结构模型进行精度评估的数学表达式(即一般理论模型),使之能定性或半定量地反映地质实体自身的特性、原始数据的精度、原始数据的采集误差、一般地质界面(地层层面)的内插误差、特殊地质体的外推误差对三维地质结构模型精度的影响。

影响三维地质结构模型精度的主要因素可概括为:原始采样数据的属性(如模糊性、精度、密度、分布等);原始数据的采集误差;地质实体自身的特性;三维地质建模的方法(简单地层界面的内插和特殊地质体的外推所导致的误差)。在构建三维地质结构模型精度评估的一般理论模型时,需要重点研究地质实体自身特性、三维地质建模方法这两类因素对三维地质结构模型精度的影响。

数据采集误差包括原始资料(如钻孔、剖面等)误差、人为误差、坐标转换误差、数据采集设备误差等,这类误差在建模前就应采用特定的技术控制在一个合理的范围之内。三维地质建模的原始数据精度不一,既有来自直接观测或勘察的高精度原始数据(如钻孔数据、地质属性数据等),也有从地质图中获取的地质边界、褶皱、断层、DEM数据、地质构造图、2D/3D地震反演数据等不同精度和分辨率的间接数据,还有从航片、卫片、扫描图片中提取的辅助性数据,这些数据仅对建模过程起一定的辅助图示作用。因此,参与三维地质建模的数据具有很大的不确定性和模糊性(如来自遥感图像的数据、来自地质工作者的经验解释等),这些数据参与建模之后,其不确定性必然会影响到最终的模型精度,这些数据对模型精度造成的影响及其精度控制应贯穿于整个建模流程之中。

地质实体的自身特性包括:地层自身演化的规律,地层层面特性、复杂程度以及地质断裂构造的控制与影响,地层相互间的关联性、相似性,复杂地质构造(断层、褶皱、透镜体、侵入体、矿体等)的类型、控制参数等。

三维地质建模方法对三维地质结构模型精度的影响主要体现在对地质界面内插、外推过程中的误差传播和误差积累。地质界面内插的误差既与采用的数学插值算法有关,还与采样点的空间分布有关。

对于较为复杂的地质实体,采用常规的线性插值方法可能无法构建出合理的模型,需要应用高次插值方法(如 Kriging 法、多层 B 样条曲面法、离散光滑插值 DSI^[1,9]等)或者加入特定的地质原理及相关制约条件后再进行插值^[10]。采样点的密度与空间分布也会对插值结果产生极大的影响。当采样数据非常稀少或者空间分布很不规整时,也无法构建出完整、精确的三维模型。在构建断层、褶皱、透镜体、侵入体、矿体等复杂地质体时,多数情况下需要根据稀疏、零散的局部观测点数据,结合地质人员的认识、经验与推断,进行适当地外推。由于特殊地质体的观测数据本身就具有很大的不确定性和模糊性,再加上地质人员推断时的经验性和个别性,导致特殊地质体外推的结果具有很大的不确定性,对其精度进行评估也具有很大的难度。可以看出,“内插误差”和“外推误差”是两个不同的概念,地质界面的内插误差是由插值方法的不同和样本地质数据的空间分布规律差异所共同决定的,而特殊地质体的外推误差则主要是由于地质人员在认识、经验上的差异所引起的,对这两类误差应使用不同的模式或方法进行精度评估^[19]。

3.2 面向特定地质体的实际操作模型

三维地质结构模型精度评估的一般理论模型只是对三维地质结构模型精度进行评估的一个通用数学表达,它只能定性或半定量地反映控制三维地质结构模型精度的主要因素对三维地质结构模型精度的影响。由于影响三维地质结构模型精度的因素既有定量数据,又有定性特征,因此,不可能定义出一个具体的函数表达式来包括所有的情况,只有当具体问题确定之后,才可以定义三维地质结构模型精度评估的一般理论模型的具体型式,从而需要引入“面向特定地质体的实际操作模型”。

在构建“面向特定地质体的实际操作模型”时,需要分析、借鉴现有的 DEM 表面精度评估指标体系,结合典型研究场区的实际地质数据,通过敏感度、代表性以及可获得性分析进行指标筛选,对不同类型的地质数据和地质体区别对待,分别研究基于不同类型的地质数据(如地质图、钻孔、剖面、特殊地质体控制参数等)对特定类型的地质体(如简单地层、断层、褶皱、透镜体、侵入体等)进行精度评估的具体模型和操作步骤,重点解决一般地质界面的内插、特殊地质体的外推对三维地质结构模型精度的影响及其定量评估方法。

为了解决一般地质界面(通常是指简单地层界面)由地层内插误差所引起的精度评估问题,可根据区域变化理论,将简单地层界面在三维空间内的分布当作是一个既具有随机性又具有结构性的区域化变量,引入克里金(Kriging)方法中的变差函数,通过设计不同的变差函数来定量地描述简单地层界面空间分布的结构化成分、随机成分以及误差信息^[18];在此基础上对三维地质结构模型中每一个简单地层界面的空间分布精度进行定量模拟评估;然后,基于地质统计学原理和概率论,将简单地层界面在三维空间内分布的不确定性转化为地质构造分布的定量概率表达,并以计算机图形三维可视化的方式进行展示。

对于断层、褶皱、透镜体、侵入体、丘状构造等特殊地质构造的精度评估,则比较棘手。由于这些特殊地质体的实测控制数据稀少,且数据精度各异,在三维模型重构的过程中,需要较多应用地质人员的经验知识、专家推断来进行外推,所以应重点考虑由于外推误差所引起的精度评估问题。对于地质断层构造,尽管断层面是一个复杂的几何曲面,但在大多数情况下,可以将其看作多个平面的组合,用多个平面来近似的模拟逼近实际的断层面,这些平面可根据一系列的断层控制参数(如断点坐标、走向、倾向、倾角、断距等)来计算确定^[4],对断层面的精度评估可通过在三维空间中对这些控制参数的不确定性或误差范围进行评估来实现。地质褶皱需根据描述其形态、反映其几何特征和几何组成的各种要素(如核部、翼部、转折端、枢纽、轴面、轴线等)来进行重构。对于褶皱的要素,需要由地质人员先行解释推断并对解释推断的结果赋予定量化的概率表达,然后根据实测控制数据,利用空间统计学原理,计算出地质褶皱的控制界面在三维空间内的概率分布。对于透镜体、侵入体、丘状构造等外形不规则、获取实测数据困难的复杂地质体,可先由地质人员根据经验分析,在三维空间中生成一个“三维缓冲体”来表征这些复杂地质体可能的地质界面形状^[19],然后基于个别实测控制数据和空间统计学原理,计算出这些控制界面在三维空间内的概率分布。

3.3 地质结构构造不确定性的三维空间分布模型及其可视化表达

地质结构构造不确定性的三维空间分布模型及其可视化表达是指将地质结构构造空间分布的不确定性转化为地质构造分布的定量概率表达,并以计

算机图形三维可视化的方式来展现地质结构构造不确定性在三维空间内的概率分布,把抽象的三维地质模型不确定性的尺寸及分布转换为人的视觉可以直接感受的具体图形,这有利于建模人员直观准确地评估模型质量、查看地质模型精度评估的结果,并能快速定位、重点核查三维地质结构模型中精度较差的部位,为后续的误差修正工作提供依据。

4 三维地质结构模型误差修正方法

为了有效控制三维地质结构模型的精度,需要在三维地质结构模型精度评估结果的基础上,从三维地质建模的误差来源入手,提出实用、高效的三维地质结构模型误差修正方法。在当前的技术条件下,对三维地质结构模型进行误差修正的方法可分为两类:一类是基于建模初始数据的模型误差修正方法,另一类是基于建模中间结果的模型误差修正方法。在具体实现时,需要引入“数据-模型的可视化交互技术”。

4.1 基于建模初始数据的模型误差修正方法

三维地质结构建模的初始数据既有强约束效力的“硬数据”(如实际钻孔数据、实测剖面数据),也有约束效力较弱、仅具有一定参考意义的“软数据”(如地质专家的经验、解释和推断)。在构建三维地质结构模型时,需要在减少初始数据的采集误差、提高原始数据的精度的前提下,在充分利用好宝贵的第一手资料(“硬数据”)的同时,加上适当的推断与解释,对地质资料不完备、地质情况不明确的地区进行经验分析与推测,生成相应的“软数据”,并及时将推测的结果返回到模型之中,使之能对模型产生一定的约束,实现“地质资料—专家经验—三维模型”的互动,直至最终得到一个合乎情理、令人满意的模型,真正体现专家知识、经验和地质解释在建模流程中的指导、检验和修正作用。

基于建模初始数据的模型误差修正方法,是指将三维地质模拟的“软数据”(地质专家的经验、解释和推断),转变为在地质界面内插、外推过程中具有强约束效力的“硬数据”,通过对建模初始数据的修正来实现对最终建模结果的修正。

在实际实现时,可通过添加地质剖面或虚拟钻孔的方法来实现对三维地质模型的修正^[13]。在建模过程中,工程人员可以根据实际工作的需要,结合地质专家对地质模型的理解,在特定位置处生成能

反映地层及其他特殊地质体局部变化特征的地质剖面或(和)虚拟钻孔,然后将其与实际的地质数据一起约束到模型之中,从而构建出相对精细准确的三维地质结构模型,在三维空间中实现对地质模型的精确修正,以迅捷、经济的方式获取最接近于实际的三维地质结构模型并将之用于指导后续的地质分析与工程建设。

4.2 基于建模中间结果的模型误差修正方法

三维地质建模的中间结果反映了在建模过程中,基于特定的地质数据、应用特定的建模方法所生成的一些临时性的、中间性的地质结构模型。由于地质问题的高度复杂性和多解性,三维地质建模应是一个反复迭代的过程,任何建模方法都应该允许并且需要用户对建模中间结果进行必要的人工干预,直接对中间地质模型进行误差修正是一种简洁、直观的模型误差修正方法。但从具体实现的角度来看,由于三维模型的复杂性、维护三维拓扑关系的巨大难度和实现真三维编辑修改操作的巨大障碍,三维地质模型生成之后,即使发现某些位置对模型的处理并不妥当,也很难进行进一步的修改与编辑工作。目前,这方面的技术方法还有待于突破,需要进一步研究三维地质建模中间结果的交互式修正技术。

4.3 数据-模型的可视化交互技术

复杂地质体三维结构模型是由地质数据、建模规则及专家知识共同作用、反复交互的结果。要实现对地质结构模型精度和误差的有效控制,需要在建模过程中引入“数据-模型的可视化交互技术”,这包括两个层面的涵义:一是在建模初始数据层面的可视化交互修正,即利用其他勘察手段获取的资料的解释成果,结合地质学家和实际工程人员在长期的地质工作中形成的丰富经验,将地质专家的知识、经验、推断作为对原始建模数据的补充,并定量化的表达为虚拟钻孔、地质剖面等可交互式修改的数据,然后参与到模型构建的流程之中,从而实现对三维地质结构模型进行修正的操作;二是在建模中间结果层面的可视化交互修正,即直接对建模中间结果进行可视化的交互编辑修正操作。在具体实现“数据-模型的可视化交互技术”时,应通过将地质数据、模型图形、专家知识与三维地质体的动态模拟一体化,自动地或交互式的半自动地实时检测三维空间数据的显示效果,尽早避免或发现各种观测误差、计算误差、解释误差和视觉误差,并及时提供修正数据、调

整相关参数的途径,以获取真实合理的三维地质结构模型^[4]。通过应用“数据-模型的可视化交互技术”,使得三维地质结构模型不再仅仅是由计算机根据一定的地质数据和建模规则自动生成的“静态”模型,而是由地质人员、建模人员、地质数据、建模规则共同影响、相互反馈的动态、可交互、可评估、可修正的模型。

5 结语

(1) 三维地质模型精度评估与误差修正研究的基本思路可概括为:以典型场区典型地质体三维空间分布形态为研究对象,将三维地质结构模型构建与模型精度评估、误差检测、动态修正作为整体过程加以研究,将模型的精度控制因素和误差修正方法相结合,将工程实验验证和计算机模拟计算结果相结合,采用计算机图形三维可视化技术来克服场地模型试验的缺点,建立三维地质结构模型精度评估的一般理论模型、面向特定地质体的实际操作模型和地质结构构造不确定性的三维空间分布模型,重点研究地质实体自身特性及三维地质建模方法对三维地质结构模型精度的影响,解决地质界面的内插和特殊地质体的外推误差引起的精度评估问题,提出、实现并完善三维地质结构模型误差修正方法,形成三维地质结构模型精度评估、误差检测、动态修正的标准流程框架,达到预测与控制模型精度、修正模型误差的目的。

(2) 三维地质模型精度评估与误差修正问题是制约三维地质建模技术深入发展应用的瓶颈。在综合国内外研究现状与发展趋势的基础上,本文提出了三维地质结构模型精度评估、误差检测、动态修正的标准流程框架,为建立一套完整的三维地质结构模型精度评估与误差修正的理论体系和方法体系奠定了基础。这有助于完善复杂地质条件下三维地质模拟的方法与技术。

(3) 本文提出的研究方案和解决思路,仅仅奠定了该项研究的粗略框架,还有许多问题需要进行进一步的研究与探索。今后的重点研究方向包括:复杂地质体三维结构模型精度评估与误差修正过程中的人机交互、动态可视化实现技术;复杂地质体三维结构模型精度评估与误差修正软件平台的设计与开发;三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法的实证分析研究等。

References :

- [1] Mallet J L. Geomodeling[M]. New York: Oxford University Press, 2002: 10-35.
- [2] Thomas A J. Modeling geology in three dimensions[J]. Geobyte, 1988, 3(1): 14-20.
- [3] Turner A K. Challenges and trends for geological modelling and visualization[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65(2): 109-127.
- [4] Wu Q, Xu H. On three-dimensional geological modeling and visualization[J]. Science in China: Series D, 2004, 47(8): 739-748.
- [5] Pan M, Fang Y, Qu H G. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 1-5 (in Chinese).
- [6] Wu L X, Che D F, Guo J T. The new 3D-GIS for seamless integration of terrain overground and underground entities [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2006, 15(5): 1-6 (in Chinese).
- [7] Zhu L F, He Z, Pan X, et al. An approach to computer modeling of geological faults in 3D and an application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 16(4): 461-465.
- [8] Kaufmann O, Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(3): 278-290.
- [9] Meng X H, Wang W M, Yao C L, et al. Principle and Application of Computer-Aided Design for Geological Model[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 53-78 (in Chinese).
- [10] Li P J. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(Suppl): 271-277 (in Chinese).
- [11] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(5): 547-555.
- [12] Calcagno P, Chilès J P, Courrioux G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008, 171(2): 147-157.
- [13] Zhu L F, Wu X C, Pan X. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 268-271 (in Chinese).

- [14] Shi W Z. Theory and Methods for Handling Errors in Spatial Data[M]. Beijing: Science Press, 1998: 69-125(in Chinese).
- [15] Leung Y, Ma J H, Goodchild M F. A general framework for error analysis in measurement-based GIS, Part 1: The basic measurement-error model and related concepts; Part 2: The algebra-based probability model for point-in-polygon analysis; Part 3: Error analysis in intersections and overlays; Part 4: Error analysis in length and area measurements[J]. Journal of Geographical Systems, 2004, 6(4): 325-428.
- [16] Shi W Z. Error models for geometric features in Three-Dimensional GIS[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(1): 18-20(in Chinese).
- [17] Li Z L, Zhu Q. Digital Elevation Model[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 60-72(in Chinese).
- [18] Tacher L, Pomian-Szrednicki I, Parriaux A. Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(2): 212-221.
- [19] Bistacchi A, Massironi M, Piaz G V D, et al. 3D fold and fault reconstruction with an uncertainty model: An example from an Alpine tunnel case study[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(4): 351-372.
- [20] Cao D Y, Wang Z G. Direct 3D-interaction in 3D geological model visualization[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 384-387(in Chinese).
- [21] Wang C. Review on spatial data uncertainty and its research [EB/OL]. [2008-05-04]. <http://www.gisuniversity.net/read.php?tid=3737>(in Chinese).
- [22] Liu X J, Gong J Y, Zhou Q M, et al. Research on error of derived slope and aspect related to DEM data properties[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(6): 1-5 (in Chinese).

参考文献:

- [5] 潘懋, 方裕, 屈红刚. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 1-5.
- [6] 吴立新, 车德福, 郭甲腾. 面向地上下无缝集成建模的新一代三维地理信息系统[J]. 测绘工程, 2006, 15(5): 1-6.
- [9] 孟小红, 王卫民, 姚长利, 等. 地质模型计算机辅助设计原理与应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 53-78.
- [10] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化[J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 271-277.
- [13] 朱良峰, 吴信才, 潘信. 三维地层模型误差修正机制及其实现技术[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 268-271.
- [14] 史文中. 空间数据误差处理的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 69-125.
- [16] 史文中. 三维地理信息系统中几何特征的误差模型[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 18-20.
- [17] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 60-72.
- [20] 曹代勇, 王占刚. 三维地质模型可视化中直接三维交互的实现[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 384-387.
- [21] 王春. 地理空间数据不确定性与研究进展[EB/OL]. [2008-05-04]. <http://www.gisuniversity.net/read.php?tid=3737>.
- [22] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 1-5.