

# 三维地层模型误差修正机制及其实现技术

朱良峰, 吴信才, 潘 信

(华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘 要:** 三维地层模型是地下工程辅助分析的有效工具, 而工程钻孔数据是建模主要的数据源。由于地质现象的复杂性和采样数据的稀疏性, 仅仅利用零散的钻孔采样数据无法有效地控制最终建模结果的误差和精度。在分析三维地层建模误差来源的基础上, 提出并实现了两种误差修正方法: 地质剖面修正法和虚拟孔修正法。在建模过程中, 基于实际勘察获取的资料和工作经验, 结合对地质模型的理解, 在特定位置处生成能反映地层局部变化特征的地质剖面或虚拟孔, 然后将其与实际的钻孔数据一起约束到模型之中, 构建出相对精细的三维地层模型, 从而在三维空间中实现对地层模型的精确修正。

**关 键 词:** 三维地层模型; 误差修正; 剖面; 虚拟孔; 可视化

**中图分类号:** TU 17      **文献标识码:** A

## Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model

ZHU Liang-feng, WU Xin-cai, PAN Xin

(Key Laboratory of Geographical Information Sciences for Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** 3D strata model is useful to support underground engineering, and borehole data is the chief source for 3D geology modeling. For the complexity of geological entity and the sparsity of sample data, it is unable to control the accuracy of modeling outcome only using scattered borehole data. Based on the analysis of the source of modeling error, two approaches for error correction of 3D strata modeling from borehole data, called the cross-section method and the virtual borehole method, are presented. During the modeling process, cross-sections and/or virtual boreholes can be added directly to the 3D strata model in the proper place for the engineers' demand and comprehension. Cross-sections and/or virtual boreholes, which represent the local variation character, restrict the model just as real boreholes to generate solid model accurately, and it is easy to correct the error of 3D strata model using those approaches.

**Key words:** 3D strata model; error correction; cross-section; virtual borehole; visualization

## 1 引 言

三维地层模型<sup>[1~3]</sup>作为一种地下工程辅助分析的有效工具, 愈来愈受到项目规划、管理和施工单位的重视。目前国内外在三维地层建模方面的研究进展主要是体现在构模方法和可视化分析技术的研究上, 而应用则以对地层的直观描述和展示为主。实际上三维地层建模的意义远不于此, 还包含更深层次的信息提取和分析技术。由于地质现象的复杂性和采样数据的稀疏性, 导致三维地层建模的结果与实际地层分布情况差别较大, 且很难作相应的修正, 地质模型的精度检测与误差修正问题已成为制

约三维地层模型深入应用的瓶颈。要提高三维地层建模的可靠性, 就必须建立起一套完整的误差检测、分析和修正机制, 尽量减少数据误差、修正模型错误、提高模型精度, 这样才能为后续的地质分析工作提供可靠的依据<sup>[4]</sup>。本文重点讨论基于工程钻孔数据构建三维地层模型时的误差修正理论及实现技术, 在分析三维地层建模误差来源的基础上提出并实现三维地层模型的地质剖面修正技术和虚拟孔修正技术, 旨在弥补传统建模方法和工作流程的不足, 力求构建出更为精细、合理的三维地层实体模型, 使其能对实际的地质分析和工程决策起到积极的指导作用。

## 2 三维地层建模误差分析

三维地层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，其样本数据主要来自工程钻孔。然而，在特定的研究区域往往只能获取到有限的钻孔资料，不但钻孔数目稀少，分布也不均衡，且由钻孔资料揭示出来的地层分层参数只在该钻孔的有限范围（孔直径）内有效，各个钻孔之间并无相应的关联参数<sup>[2]</sup>。建模时是利用这些局部、稀疏、零散的钻孔采样点资料构建一个相对精确、完整的三维实体模型。显然，仅仅直接利用一些原始的采样点数据而不作任何加工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，对地层参数进行适当的内插外推，进而推算出地层的空间展布规律。而常规的空间插值方法无法顾及地层分布的多样性和建模区域的特点，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地区的具有众多不同特性的地层的模拟与重构，更无法保证建模结果的精度。

影响三维地层建模精度的主要因素有：原始采样数据的属性（如精度、密度、分布）、地质实体自身的特性（如地层自身演化的原理；地层层面特性、复杂程度以及断裂构造的控制与影响；地层相互间的关联性、相似性等）、三维地层建模的方法等。建模的误差包括原始数据的采集误差和地层内插误差两个方面：(1) 数据采集误差包括原始资料（如钻孔）的误差、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，本文不作赘述。(2) 三维地层建模需要进行大量的插值计算，在内插外推的时候不可避免的产生误差。地层插值的误差既与采用的数学插值算法有关，也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、DSI 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<sup>[6]</sup>。采样点的密度与空间分布特征也会对建模结果产生影响。当样本数据非常稀少或者空间分布很不规整时是无法构建出完整、精确的三维模型的。要全面解决上述难题，实现对地质模型精度的有效控制，需要在建模过程中引入人工交互，利用其它勘察手段获取的资料的解释成果，结合实际工程人员在长期的地质工作中形成的丰富

经验，对未知区域的地层模型进行适当的修正，从而真实的再现地层的分布情况和形态结构。采用交互建模方法对地层模型进行精度控制和误差修正时，可用的数据源有两类：地质剖面图和虚拟孔。这两类数据所反映的地质现象的空间分布情况不同，实现过程也有区别，本文将分别介绍。

## 3 地质剖面对三维地层模型的修正

地质剖面图是各类工程勘察试验和专家经验解释结果的综合，能够较好地反映研究区典型、特殊的地质现象，直观地表达地层的分布与构造特征。将已有的工程地质剖面图蕴涵的信息加入到三维地层模型之中，或者在建模的过程中根据相邻钻孔数据绘制一系列新的剖面，再将这些剖面图与钻孔数据结合在一起建模，会大大提高三维地层模型的精度与表现能力<sup>[7,8]</sup>。

图 1 描述了根据钻孔及地质剖面构建三维地层模型并对模型进行误差检测、修正的基本流程。建模前将钻孔资料存贮在钻孔数据库中，建模时可先生成一系列地质剖面（或采用既有的地质剖面），然后将地质剖面参与建模。在对地层进行内插时，既采用原始钻孔所蕴涵的地层层面控制点高程数据（纵向数据），又采用地质剖面图上的控制点数据（横向数据）对模型的精度进行有效控制。在建模过程中可采用特定的三维分析方法（如模型漫游、切割和开挖）对模型进行分析，观察模型是否与预想的结果一致，如果模型不合要求，则修改相应位置处的地质剖面，然后将修改后的剖面数据约束到模型之中，实现模型误差的动态检测与修正。

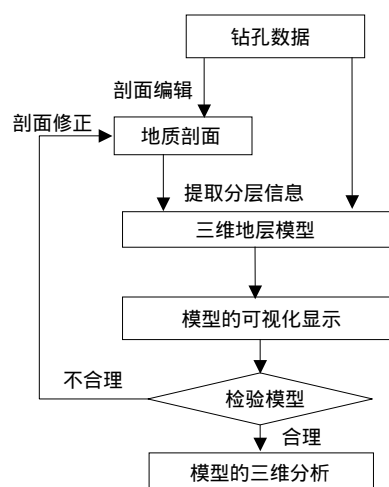


图 1 基于钻孔及剖面数据构建三维地层模型  
Fig.1 3D strata modeling based on boreholes and cross-sections data

地质剖面是通过在地层层面上增加插值控制点而对模型起一定的约束与修正作用,这种插值约束不具有强约束力(特别是在对邻近钻孔间地层尖灭位置的控制上),从而导致三维模型(即使是经过修正的)与原地质剖面图中所反映的信息有细微的出入,不能实现对三维地层模型的精确修正,若要实现对模型的精确修正,就需要应用虚拟孔修正技术。

#### 4 基于虚拟孔的误差修正技术

所谓“虚拟孔”,是相对于实际钻孔而言的,它是指在构建三维地层模型的过程中,由于建模工作的需要而在特定的位置处添加的一个或多个具有假想性质的控制性钻孔,这些钻孔反映的地层层位信息不是由实际钻探工作获取的,而是由工程人员根据自己的工作经验获取的结果作出的推断。因此,建模者可以编辑、修改虚拟孔中的地层层位信息,并将修改后的虚拟孔中的地层信息约束到模型之中,从而实现对整个三维地层模型的修正,使建模的结果更为精细与合理。与地质剖面数据对地层模型的约束不同,虚拟孔对地层模型的约束具有强约束力,即虚拟孔一旦生成并参与重构三维模型,它就具有和实际钻孔一样的精度,生成的模型形态在虚拟孔位置处要与虚拟孔保持一致,这一特性对控制模型中的断层、地层尖灭、缺失、夹层等复杂地质现象极为有用。

图2描述了引入虚拟孔后三维地层建模的基本流程。建模前所有的钻孔(包括实际钻孔和既有虚拟孔)资料都存贮在钻孔数据库中。构建三维地层模型时,首先需要选取研究区一定数目的钻孔,从钻孔数据库中提取各个钻孔的地层分层信息作为建模的原始数据,然后采用特定的模型重构算法生成一个初始的三维模型并将之在三维空间中显示出来,再采用特定的三维分析工具(如模型漫游、切割、基坑与隧洞开挖等)对模型进行全面的观察与检验,如果发现模型存在有不合理之处,就需要进行调整虚拟孔数据的工作:修正已有的虚拟孔的地层分层信息或者在特定位置处新增虚拟孔并按照自己对模型的理解修正虚拟孔资料。建模者把对虚拟孔的调整情况保存到数据库中,将调整后的虚拟孔资料约束到整个模型之中,并重新生成三维模型,再进行模型检验工作。重复这一工作直至最终生成一个合理、满意的模型。最后对最终的模型进行一些后续的三维分析操作,如模型观察、模型切割、隧洞开挖、体积量算等。

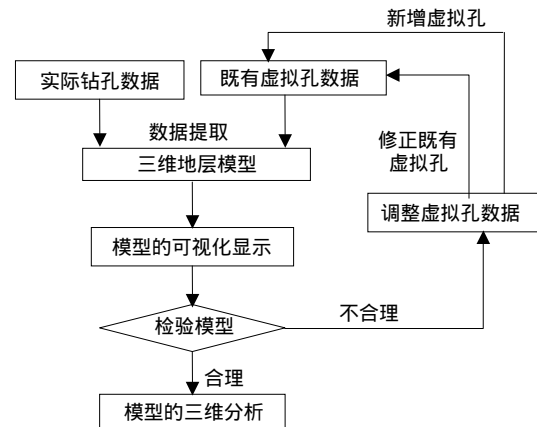


图2 引入虚拟孔后三维地层建模的基本流程  
Fig.2 Flow chart of 3D strata modeling applying virtual borehole

#### 5 系统实现

本文提出的三维地层模型误差修正技术已经在微机平台、OpenGL 图形库下采用 Visual C++语言开发实现,并集成到笔者研发的三维地质建模系统之中。图3为系统应用地质剖面数据对三维地层模型进行精度检测和误差修正的运行界面。图4为采用虚拟孔进行建模和误差修正的运行界面。该系统在构建三维地层模型时,采用笔者改进的“地层-实体模型算法”,以钻孔资料作为地层建模的数据源,并将虚拟孔和用户手工编辑修改的地质剖面融入到建模流程,解决了以往单纯依靠钻孔数据进行建模而导致的建模结果不精确且难以修正的问题。

系统具有完善的地质剖面数据管理机制,提供了一个具有剖面自动生成与编辑、修改功能的“剖面编辑器”(图3)。建模时,用户只需选取相邻的2个或多个钻孔进入“剖面编辑器”即可生成对应的地质剖面图;用户可编辑修改钻孔间各个地层分界面上的控制点并将修改的结果保存下来,然后将地质剖面参与建模,通过剖面数据对三维地层模型的精度进行控制。系统具有强大的钻孔数据管理功能,在三维场景中系统可采用不同的显示方式(如将实际钻孔显示为实心方式,而虚拟孔显示为线框模式)将实际钻孔与虚拟孔直观的区分开来,以利于用户查看与辨识。系统具有自动探测虚拟孔位置的功能,它能够根据实际钻孔数据的空间分布情况以及钻孔深度,采用特定的算法计算出需要添加的虚拟孔的数目及大致位置,并提示给用户,由用户决定是否需要在此位置添加虚拟孔。用户可自主的在研究区域中任意位置处通过鼠标指定或者直接输入位置坐标添加虚拟孔,系统根据既有的三维地层模型自动计算出虚拟孔的地层分布情况并生成虚拟

孔的钻孔柱状图，用户可以查看、编辑、修改、保存虚拟孔的全部信息，然后将修改后的虚拟孔信息反馈于三维模型之中，实现对模型的动态修正与更新。可以看出，应用地质剖面修正技术和虚拟孔修正技术之后，系统具有了完善的模型生成、检测机制，为构建具有足够精度的三维地层模型提供了一个较为直观、简便的可视化环境。

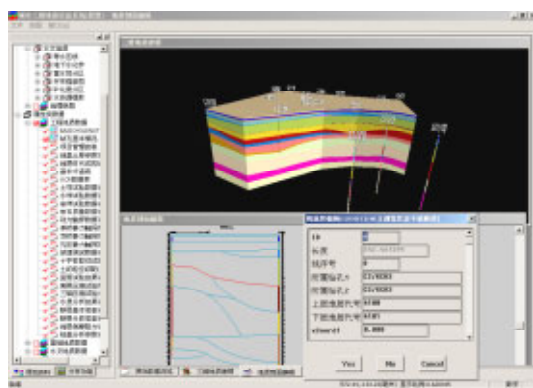


图3 基于地质剖面的模型误差修正

Fig.3 Error correction of 3D strata model based on cross-sections

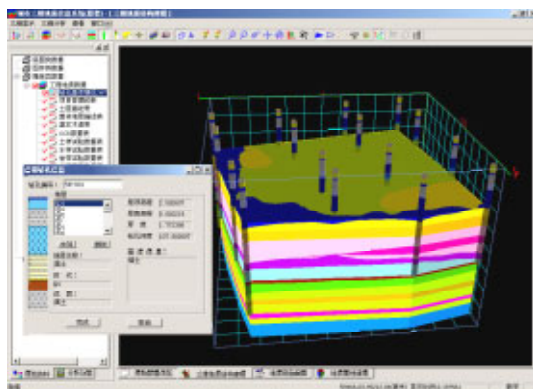


图4 虚拟孔建模程序界面

Fig.4 User interface of 3D strata model applying virtual borehole

## 6 结语

对地质模型的精度进行控制是三维地层建模的关键环节之一。由于地质实体在空间分布上具有很大的不确定性，单纯采用既有的数学方法和地质理论构建出来的地层模型与地层的实际空间展布特征存在着或多或少的差异。要修正这些误差，需要在建模的过程中进行相应的人工干预，三维地层建模是一个反复迭代、反复交互的过程。工程钻孔数据是构建三维地层实体模型的主要数据源，但对于特定的研究区域，往往只能获取到有限数目的钻孔资料，仅仅利用这些稀疏、零散的钻孔数据很难构建出相对完整、精确的三维模型，也无法对建模结果

进行精度检测与误差修正。

本文提出了三维地层模型的地质剖面修正技术和虚拟孔修正技术，将地质剖面和虚拟孔应用到实际的三维地层建模流程之中，从而高效地解决了这一难题。在建模过程中，工程人员可以根据实际工作的需要，结合自己对地质模型的理解，在特定位置处生成能反映地层局部变化特征的地质剖面或（和）虚拟孔，然后将其与实际的钻孔数据一起约束到模型之中，从而在三维空间中实现对地层模型的精确修正，以迅捷、经济的方式获取最接近于实际的三维地层实体模型，并将之用于指导后续的地质分析与工程建设。

## 参 考 文 献

- [1] 白世伟, 贺怀建, 王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2002, 19(1): 23 - 26.  
BAI Shi-wei, HE Huai-jian, WANG Chun-xiang. 3-dimension strata information system and information of geotechnical engineering[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Urban Science Edition)*, 2002, 19(1): 23 - 26.
- [2] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637 - 639.  
HE Huai-jian, BAI Shi-wei, ZHAO Xin-hua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 637 - 639.
- [3] 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.  
LI Pei-jun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(Supp.): 271 - 277.
- [4] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学(D 辑, 地球科学), 2004, 34(1): 54 - 60.  
WU Qiang, XU Hua. On three-dimensional geological modeling and visualization[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(1): 54 - 60.
- [5] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [6] 吴春发, 李星. 地质模拟中数据插值方法的应用[J]. 地球信息科学, 2004, 6(2): 50 - 52.  
WU Chun-fa, LI Xing. Interpolation methods in geological simulation[J]. *Geo-Information Science*, 2004, 6(2): 50 - 52.
- [7] 朱良峰, 吴信才. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 26 - 30.  
ZHU Liang-feng, WU Xin-cai. Reconstruction of 3D strata model based on borehole data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(3): 26 - 30.
- [8] ALAN M. Lemon, NORMAN L. Jones. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(3): 547 - 555.