逆断层三维地质体直接体绘制技术研究

忟 星

(安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南 232000)

【摘 要】带有逆断层的地质体绘制一直是三维地质体建模的难点,已有软件通过划分断块,对断盘两侧地层分 别建模型,不仅程序复杂,最后结果难以耦合。本文提出了一种新的三维地质体综合体建模技术,利用钻孔数据 获取层面和断面数据,直接插值形成分层界面,完成复杂断块实体模型的绘制,该方法不仅适合层状连续地层绘 制,而且能够将正断层、尖灭和逆断层统一起来,简化建模流程,提高建模效率,方便数据管理,为研究逆断层 条件下直接体绘制技术提供有益参考。

【关键词】逆断层;三维地质体模型;统一建模;直接体绘制

【中图分类号】P623.6

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307(2011) 03-0037-03

1 引言

目前三维地质体可视化或者建模方法可分为两大类: 表面拟合方法(Surface-fitting method) 和直接体绘制(Direct Volume Rendering ,DVR) [14] ,表面拟合方法只是建立了一 个地质体的外表,内部是空的,难以进入后续地质分析[5], 而且面片连接编辑需要很大的工作。体绘制方法是近年来 迅速发展的可视化方法,可以把面绘制方法无法显示出的 数据体内部结构淋漓尽致的表现出来。使用该方法绘制出 来的三维图形具有非常高的清晰度和强烈的真实感,直观 地再现地质单元的空间展布及其相互关系,最大限度地提 高地质分析的直观性和准确性[6]。

通过使用已有矿山三维建模软件,发现在针对具有逆 断层的地质体建模时,难以对具有多Z值的离散数据插值, 即使通过手动编辑的方法生成逆断层层面,也无法在空间 上剖分形成合理的体(图1)。

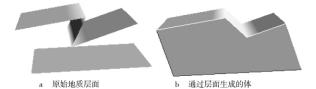


图 1 逆断层层面形成体存在的问题

国内外研究者提出了众多三维数据模型,期望解决该 问题,如贺怀建等提出了基于多层 DEM 的三维地层模型的 构建方法[7], Simon. W. H提出了基于三棱柱模型表达层状 地质体[8], Lemon. A. M 提出了地层水平法(horizons method) 构建三维地层实体模型^[9],吴立新等提出了一种基于广 义三棱柱体元的三维地质建模方法。这些建模方法各有千 秋,但又都各自存在缺陷和不足[5],最明显的缺陷是对断 层构造引起的地质界面的不连续、重复进行重构时的插值 困境,虽然可以通过构造虚拟界面等方法将包含断层的复 杂地质体转化为简单层状地质体,即对层面连续的部分块 段建模,然后在空间上整体合并,但在建模的过程中手工



作者简介: 刘星(1974-),男,江西高 安人,副教授,博士,研究方向为地球

E-mail: liuxing0795@126.com

收稿日期: 2009-10-21

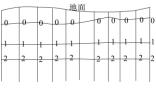
基金项目: 国家自然科学项目(40872103)

添加虚拟界面和划分地层层面都极为繁琐,不适合于用计 算机进行自动或半自动的建模[10]。

为解决这些难题,笔者将对包含逆断层在内的复杂地 质体三维体直接构模技术展开讨论,并提出相应的解决 方案。

2 层面数据提取与原始层面组织

地质体三维建模数据主要来源于钻孔资料,首先要进 行预处理,即进行钻孔内地 层的划分。在正常层状层序 下(图2),地层的划分层数 可以根据钻孔遇到的岩层分 界点综合分析获得,相同的 地质体由顶板和底板界面界 定为一个体,根据钻孔所遇 到的岩层竖向 Z 坐标的关



正常层状层序下 的钻孔分层

系,即层与层之间压与被压的上下关系可以确定地层的空 间顺序关系。同层数据由一系列钻孔坐标和层面深度 Z 值 构成离散数据。

在具有逆断层、正断层以及尖灭情况下,层面数据整 理相对复杂。

1) 正断层存在情况下层面数据组织

如图3,正断层通常会造成同一地层面不连续,部分钻 孔缺失该层面。将上盘钻孔坐标及层面 Z 值单独提出建立 一个层面,下盘钻孔坐标和 Z 值建立一个层面,另外将位 于上下断盘之间的断层 Z 值与钻孔坐标建立一个层面数 据集。

2) 地层尖灭下层面数据采集

如图 5, 地层尖灭也会造成地层层面不连续, 但这种情 况处理起来比较简单,在建立层面数据采样点时,按照钻 孔中存在该层面就加入该钻孔点,不存在就不加入的原则, 分别建立有上下尖灭关系的地层面数据点集[5]。

3) 逆断层存在情况下的层面数据采集

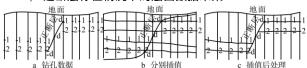


图 3 正断层下地层面的数据组织与处理

如图 4, 逆断层会造成同一钻孔中时存在两个同一层面 的分界面,即多Z值问题,在层面数据采集时,把断盘上 盘钻孔的层面分界点数据单独提出,下盘数据也单独为一 个采样点集。逆断层层面数据根据有的钻孔建立 Z 值点集

地层中所有的单个层面, 无外乎这三种情况, 如果遇

到某个地层面同时存在多个断层,则按照遇到断层就分上 下盘分别建立层面的原则处理。

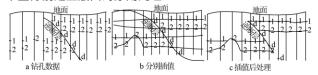


图 4 逆断层一个层面的数据组织与处理

3 层面数据多 Z 值的插值后处理

目前由离散点数据插值拟合成曲面的方法很多,常用的有反距离插值法、自然邻域插值法、线性插值法、径向基函数插值法、最小曲率等。考虑到各地层结构的复杂性,经过实践发现,为了使得断层面与层面在上、下盘都具有唯一的交线,采用最小曲率(Minimum Curvature)方法比较合理。不推荐其他克里格插值法。

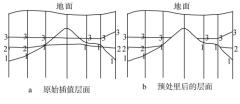


图 5 地层面尖灭插值与处理[5]

值无法得到合理的层面。

图 3b,图 4b是原始层面,可以看出,直接由离散点插值拟合的曲面通常是不合理的,无法进行体绘制,图 5 表明地层尖灭情况下,直接插值得到的层面也是不合理的,会造成上下层面的局部颠倒。下面分正断层、尖灭和逆断层三种情况进行插值及后处理。

1) 正断层地层面插值

如图 3 所示,以层面 1 为例,上下盘、断面数据分别插值,上下盘插值后的曲面覆盖全区,断裂面插值后的曲面也会覆盖全区,但断裂面与上下盘的交线是唯一的。如果层面 1 下盘的 Z 值小于断面,那么将层面 1 的 Z 值用 ∞ 示其无意义,如果层面 1 下盘的 Z 值大于断面,将断面的 Z 值用 ∞ 示。同样,如果层面 1 上盘的 Z 值大于断面,将层面 1 的 Z 值赋予 ∞ 。

2) 逆断层地层面插值

与正断层相似,逆断层的一个层面会被断层错动,变成不连续层面,并且产生多 Z 值采样点,理论上无法直接插值。本研究中采用的方法为上下盘分别插值,插值后处理形成一个整体面。以图 4 为例,层面 1 上下盘分别插值,插值后层面下盘 Z 值大于断面的部分应该清除,同时断面部分比层面 1 下盘小,同时清除,赋予 ∞ ,层面 1 上盘与断面比较,如果层面 1 上盘值大于断面 2 值,二者同时赋予 ∞ 。

3) 地层尖灭

如图 5 ,按照原始数据集,分别插值形成三个层面,但会发生局部上覆岩层面位于下伏岩层面之下,这是不合理的结果,需要调整插值结果,以层面 1 和层面 3 为例,按照地质演变,层面一定位于层面 3 之上,而在中部发生层面 3 低于层面的不合理情况,必须遍历所有插值点,判别插值点的 Z 值,一旦层面 1 的 Z 值大于层面 3 的 Z 值,强令层面 3 的 Z 值等于层面 1 的 Z 值。层面 2 与层面 1 的处理情况类似,处理后的层面形成合理的尖灭形态。

4 复杂断块的直接体绘制

首先产生一个立体数据,数据模型为等大立方体,数据为三维数组,对应现实地理坐标的X,Y和Z方向,数组三个向量大小最好与层面数组大小一致,各个立方体数据

的初始属性值全部设定为 0。采用自底部向上遍历体元方法,依次将体元的属性值设置为对应的地质单元编号。具体步骤如下:

- 1) 各层面按照自老到新的顺序排放到硬盘文件。需要哪个层面读取该层面文件到内存,此时层面文件为二维数组。
- 2) 从最底部地层开始(如图6),如果碰到逆断层,这时一个层面的数据至少为 3 个二维数组,如果一个层面被两个不同断层错开,那么该层面至少由 5 个二维数组构成。在体元绘制时,首先要从下盘绘制。以图 4 层面 1 为例,遍历体元,判断体元 Z 值与层面 1 下盘和断面 d 的关系,如果体元 Z 值大于层面 1 下盘并且小于断面 Z 值,则将该体元属性值设置为地层编号 1。同时判断体元 Z 值是否大于上盘面的 Z 值,如果大于,同样赋予该体元属性值 1。这样,逆断层地块的底部界线绘出。

如果层面有多个断层,按照先下盘后上盘顺序依次与体元Z值判断。

3) 第二次遍历体元,比较其 Z 值与倒数第二个层面关系,如果遇到逆断层,按照步骤 2) 的方法处理。如果碰到正断层,此时层面数据也至少由三个二维数组组成,将体元 Z 值与正断层下盘层面比较,如果体元 Z 值大于层面下盘又大于断面 Z 值,将体元属性值设置为相应地层编号值 2。同时检测体元 Z 值与上盘关系,如果大于上盘 Z 值,同样将体元属性值设置为地层编号值 2。

如果正断层有多个端断面,依照从下盘到上盘顺序依 次比较。

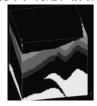
- 4) 第三次遍历体元,比较体元 Z 值与倒数第三个层面关系,如果是尖灭地层面,或者正常连续地层,直接比较体元 Z 值与层面 Z 值,如果体元 Z 值大于层面 Z 值,将体元属性值设置为地层编号值 3。
- 5) 后面的地层面无外乎这三种情况,依次将体元与不同编号的层面比较,将层面编号值赋予体元的属性。
- 6) 最后一层可能是地层面,比较体元与地层面的关系后,将大于地层面的体元属性值赋予为 0 , 这样可以将其透明显示。即将地表以上体元"切除"。

根据属性值,选择不同的颜色加以显示,如果属性值为0,则将该体元透明显示。

如果后期勘探数据新变化,只需调整相应的层面。勘探剖面数据经过采点后,也可以融入体元模型,该方法可以很好地同时处理多种特征的地层建模型,满足实际应用的需要。该算法的时间复杂度为 $O(m \times n \times l)$,参数为立方体横向纵向和垂向体单元数,效率较高。

5 研究实例

研究实例如图 6,模型中融合了正断层,逆断层和地层 尖灭现象。该研究钻孔数据来源于淮北某煤矿勘探区,研 究区约 30 多平方公里,共有 64 个钻孔,地层划分经过简 化,但构造和褶皱发育,一般软件难以模拟出逆断层。



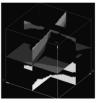




图 6 复杂断块三维地层体模型和任意切片图

基于上述方法,在 Windows 环境下,利用 IDL 作为开发平台,研制出了基于钻孔数据的复杂断块体直接绘制建模系统,三维地质建模结果基本反映了研究区地层、构造分布情况,对后期勘探,采矿方法设计及地质分析具有重要的指导意义。

6 结束语

本文提出了利用钻孔数据,直接进行地质体三维体建模的新方法,人工干预很少,可以满足复杂断块条件下多种构造同时存在的建模要求,并且后期数据的修改方便,数据管理简单,概念清晰,可操作性强,尤其是解决了逆断层情况下难以进行体建模的难题。实验结果表明该方法快速简易可行,对复杂地质结构的建模有较好的效果,可应用于地质分析,采矿设计等生产需要。

参考文献

- [1] Elvins T A. Survey of algorithms for volume visualization [J] . Computer Graphics , 1992 , 26 (3) : 194-201.
- [2] 唐泽圣.三维数据场可视化 [M].北京:清华大学出版社,1999.
- [3] 曾锫凯,杨蔚,曾锫龙,等.三维数据场可视化及 其在医学图象处理中的应用[J].沈阳工业大学学 报,1999,21(1):63-66.

- [4] 刘晓强. 科学可视化的研究现状与发展趋势 [J]. 工程图学学报,1997,(223): 124-130.
- [5] 罗智勇,杨武年.基于钻孔数据的三维地质建模与可视化研究[J].测绘科学,2008,33(2).
- [6] 陈学习,等.基于钻孔数据的含断层地质体三维建模方法[J].煤田地质与勘探,2005,33(5).
- [7] 贺怀建,白世伟,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.
- [8] Simon W H. 3DGeoscience Modeling. Computer Techniques for Geological Characterization [M]. New York: SpringerVerlag, 1994.
- [9] Lemon A M , Jones N L. Building solid models from bore-holes and user defined cross section [J] . Computers and Geosciences , 2003 , 29(3): 547-555.
- [10] 朱良峰,潘信.地质断层三维构模技术 [J].研究 岩土力学,2008,29(1):274-279.

A direct volume drawing method for reverse fault strata

Abstract: There is a problem when modeling a reverse fault strata, some software model the reverse fault strata by dividing it into different block, but with the complex program, the result is not coupled. This paper gave a method to solve this problem. Based on the data of borehole, it obtained the data of strata interface, and directly interpolated to get the fault surface to implement drawing the strata body directly by some rules. This method was not only suitable for continuous strata but also for those faulted strata, especially for those complex geological body and structure, and owned the advantage of consolidating the modeling of the fault, reverse fault, thin out strata. The way was simple flow, easily operated, high efficiency, and convenient data management, which could supply a reference for reverse fault strata volume drawing.

Key words: reverse fault; 3D geological model; unified modeling; direct volume drawing

LIU Xing (Faculty of Earth & Environment Anhui University of Sciences and Technology , Anhui Huainan 232000 , China)

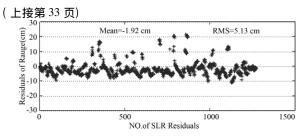


图 4 GRACE B 卫星站星距与 SLR 测距信息的较差

从上述的 SLR 残差图示可以看出: 残差大部分在 10cm 以内,无明显的系统偏差,比较的结果与 JPL 的事后轨道 (PSO) 也是相符的。

5 结束语

GRACE A/B 非差简化动力学定轨方法解算的轨道与 JPL 的事后轨道及 SLR 高精度测距信息的比较表明:解算的非差简化动力学轨道无明显系统误差,定轨精度大约为 7cm,可满足低轨卫星科学任务的需求。

简化动力学模型仅考虑重力场模型、日月引力、固体 潮和相对论效应等力学模型,而不考虑大气阻力等非保守 力的影响,实践证明:通过设置相应的随机脉冲参数可有 效地吸收力学模型误差的影响。

参考文献

- [1] 吴江飞.星载 GPS 卫星定轨中若干问题的研究:博士论文[D].上海:中国科学院上海天文台,2006.
- [2] W I Brtiger , Y E Barsever , et al. GPS precise tracking of Topex/Poseidon: Results and implications [J] . Journal of Geophysical Research , 1994 , 99(C12) .
- [3] D Švehla, M Rothacher. Kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination of low earth orbiters [J]. Advances in Geosciences, 2003, (1): 47-56.
- [4] 李济生.人造卫星精密轨道确定 [M].北京:解放军出版社,1995.
- [5] 黄珹. 利用 LAGEOS 激光测距资料精确测定地球自 转参数 [D]. 中科院上海天文台, 1985.
- [6] 赵春梅,等. 阿根廷圣胡安激光测距系统的 SLR 数据质量分析 [J]. 测绘学报,2008,37(3).
- [7] 韩保民.动力学模型对简化动力学定轨精度影响仿真 [J].系统仿真学报,2006,18(10).
- [8] GFZ. http://www.isdc.gfz-potsdam.de/.
- [9] Oliver Montenbruck, Tom van Helleputte, Remco Kroes, Eberhard Gill. Reduced dynamic orbit determination using GPS code and carrier measurements [J]. Aerospace Science and Technology, 2006: 261-271.
- [10] 秦显平,等. 利用 SLR 检核 CHAMP 卫星轨道 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2005,30(1).

GRACE reduced-dynamic orbit determination using zero-difference data

Astract: Based on the basic theory of Precise Orbit Determination , the method of the reduced-dynamic orbit determination using zero-difference data onboard GPS observations was researched in this paper. The orbit of GRACE satellite was determined by the autonomic software CASMORD. Compared GRACE orbiting results of reduced-dynamic method's solutions with JPL's PSO and SLR measurement , the results showed that the 3D-RMS was better than 7 cm and the direction of X, Y, Z was about 3 ~ 5 cm , to demonstrate the feasibility and practicability of this method.

Key words: zero difference; GRACE satellite; reduced-dynamic orbit determination; onboard GPS

YI Peng-ju^{©2}, ZHAO Chun-mei[©], ZHENG Zuo-ya² (①Institute of Geodesy and Geodynamics Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China; ②Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)