文章编号：1674－9057（2010）03－0350－06

三维地质建模的数据融合与误差分析

叶思源[1,2]，吴树仁[1]，何淑军[3]

（1. 中国地质科学院 地质力学研究所，北京 100081；2. 北京市水利规划设计研究院，北京 100044；
3. 中化岩土工程股份有限公司，北京 102600）

摘 要：在简述地质三维建模图文数据类型和格式的基础上，对构建模型的基础异构数据的集成融合、精度匹配问题进行了分析探讨，并对由此而引起的模型误差产生、传递与积累进行了评述，最终从建模初始的数据输入、系统运行控制角度给出了一些减少误差产生、提高模型精度的措施和方法。

关键词：地质三维模型；数据结构；数据融合；误差分析；控制

中图分类号：P628；TP311 **文献标志码：**A

建立地质三维模型与“数字地球”息息相关。它涉及到地质学、计算机图形学、计算机高级语言编程等专门知识，更需要考虑具体的地质实体，如处理复杂的各类地质体如地层、断层、透镜体等之间的几何拓扑关系，地质体与具体参数的对应细节处理等[1-12]。它不但需要处理批量或海量的地质数据，而且要将各种不同来源、不同尺度的数据紧密集成在一起，刻画复杂的地质构造与地质现象。建成模型后，能够编辑、缩放、旋转或进行虚拟物理模拟试验。三维地质建模的建立可生成一系列的三角网格数据，为后续的地质数值模拟计算如有限元、边界元模拟分析等提供了计算基础[3-4]，更为矿产资源储量计算、GIS分析提供了强有力的工具。

地质三维模型构建的基础是数据和各种地质图等第一手资料，这些基础资料的数据分布广、数量大、多源、多尺度、多比例、多分辨率且具有矢量和栅格等多种数据形式。同时，由于数据资料的投影方式、坐标系统、格式、作业方式、作业时间、数据质量、编码方案、采用的标准等一系列描述信息的不确定性，必然存在着资料杂、精度低、可比性差、利用率低的现实问题。如何去伪存精、剔除变异数据，统一投影、格式、坐标、尺度等数据标准，则存在着地质数据融合的问题。

在模型构建过程中，不可避免地会导致误差的产生、传递与积累。从误差产生的源头分析，有基础资料方面的原因，也有建模过程中系统产生的误差。分析误差产生的原因，建立误差的控制机制，提高所建模型的质量和精度，关系到模型构建的成败。

1 基本数据类型与结构

1.1 基本数据需求

不同地质专业在建模时，需要考虑各自专业的需求和特点，如在石油地质建模中，需要对含油构造的细小砂层进行详细的刻画与描述；在工程地质建模中，需注重软弱夹层和软弱下卧层及结构面的描述；水文地质建模中，需要描述含水地层的特征，即含水层顶板、底板、含水地层结构等与地下水系统有关的重要地质信息。尽管有些层对于模型的整体来说可能是很小的，甚至可以忽略不计，但从专业角度来讲则具有显著的影响，必须考虑该层的存在。这也是各建模专业软件存在差别的地方：细化建模软件的分类，对数据的

收稿日期：2009－08－01
基金项目：中国地质调查局项目（1212010640401）
作者简介：叶思源（1972—），男，博士研究生，高级工程师，研究方向：地质工程及其地质信息系统，ye_siyuan@126.com。
引文格式：叶思源，吴树仁，何淑军. 三维地质建模的数据融合与误差分析[J]. 桂林理工大学学报，2010，30(3)：350－355.

存储方式、转换格式、使用方式都有不同的要求，需要具体分析对待。然而从地质建模的共性来讲，基本的数据类型是相同的。

1.2　相关数据结构

对于基本数据类型，它们具有相同或类似的数据结构，结合地质建模对其简述如下：

（1）地表数字高程数据，即 DEM 数据。该数据可以从测绘部门获取或向国家测绘局基础地理信息中心购买，属于标准数据，以 ArcInfo 数据格式存放。对于一般工程，可使用带有投影系统和坐标系统，有一定精度的地形图数据。

（2）遥感影像数据，即卫星/航测影像数据。它是地球空间数据最直接、时效性最强的数据形式，地质模型的表面需要用影像数据进行贴图，来表达真实的地表景观。一般来说，卫星影像图是合成好的、进行了几何精纠正的图片资料，可根据需要转换成多种图像格式。

（3）地理信息数据。可根据专业要求在三维模型的表面进行各种图元的标注，不仅可以绘制点、线、区的图元，而且可以标注文字及图形图像，来表达与模型地表空间信息有关的属性信息。

（4）钻孔数据。主要包括钻孔各地层深度、岩性、所属时代等与地质结构相关的内容，它对于模型的生成起直接或间接校正的作用。一般存放在数据库中供建模系统调用。

（5）剖面数据。剖面是地质专业人员根据工作要求,依据钻孔信息绘出的地层断面图,需要说明的是,剖面图也许不是地质情况的真实反映,但它包含着技术人员的推理和经验，可以说是地层情况最接近真实的反映。剖面图的存放格式，国内大体有 MapGIS 和 AutoCAD 两种图形数据格式。

（6）断层数据。断层是地质构造的产物，表示地层的断裂和错动，它对于地质研究、地质资源勘探、地下水流场分布都有重要的意义，它的表达主要为断层的空间展布，如性质、走向、方位角、倾角、断距参数，可以用图形方式表达，也可以用参数形式存放。

（7）物探数据。该数据类型有地震、电法、磁法、重力等勘探数据，用以表达地质点位资料、层位划分及其属性。建模中，通常使用处理后的等值线数据，对研究区域水平和垂向上进行结构划分。

（8）区域地质图文资料等数据，如研究区域的地质图、地质报告、专题研究资料等等。这些资料数据对模型的建立具有重要的参考价值。

2　数据融合

2.1　数据概化预处理

基础数据概化预处理是对能够反映地层结构的相关数据信息按一定规则进行概化处理，使反映地层垂向结构的数据逐步变得有序化和反映规律性，为进一步自动生成地质三维结构奠定基础。具体讲，即按一定的尺度判别地质体的分层方法，给出一定的尺度，当某层的最大层厚小于标准尺度时，不考虑该层，并将该层合并到它的上层或下层；当某层的最大层厚大于标准尺度时，考虑该层，然后计算机按概化分层标准自动进行分层处理，并提供按颜色、纹理，显示概化的地层。对剖面的处理，不仅要概化处理地层与断层情况，还要考虑剖面的纵横比例，要使模型的范围大小与地层深度达到一个合适的比值，才能保证模型构建的美观。

在对地质结构进行较为细致的刻划时，用来描述地质结构的数据信息将是非常庞大的，这些数据大都存放在数据库中，在建模准备阶段，需要一定的算法程序对地层数据按上述原则同样进行概化预处理。

2.2　坐标系统和高程系统的选择

地图投影的基本问题是如何将地球表面表示在地图平面上。由于地球椭球面是不可展开的曲面，在编制地图时，必须采用地图投影的方法，将地球表面的经纬网格用各种方法投影到地图平面上，满足制图要求。

我国地图多采用高斯－克里格等角横切椭圆柱投影，以中央经线和赤道投影后为坐标轴，中央经线和赤道交点为坐标原点。该投影将地球划分为 60 个投影带，每带经差为 6°，已被许多国家作为地形图的数学基础。我国1∶2.5万～1∶50万地形图采用6°分带，1∶1万及更大比例尺地形图采用3°带。一般地质图件，大多是基于高斯坐标的基础上进行绘图，因此，地质建模大多采用高斯－克里格坐标系统。对于其他的坐标系统条件，可采用专业软件转换为相同的坐标系统。图 1 为 MapGIS 投影转换参数对话框。

图 1　MapGIS 投影参数对话框

Fig. 1　Dialog box of projection parameters in MapGIS software

坐标系统选定后，还需要确定高程系统，在我国，地质图件大多以标高为单位绘制，即以 1956 年黄海平均海水面为基准。如图件按自定义高程绘制，需转换为标准高程。

2.3　涉及的软件或工具

建模系统软件：国外的如 GoCAD、Micromine、Gemcom 等，国内的如 GeoView、TITAN T3D、网格三维等。

GIS 软件：如 ArcGIS、MapInfo、MapGIS 等。主要用来对剖面扫描矢量化处理、转换图形文件成为文本文件格式，实现图形文件投影、坐标转换等功能。

AutoCAD：Autodesk 公司的绘图软件产品，在中国有广泛的用户群，用于绘制图形与转换数据，它的 dxf 文件格式是工业标准，可与建模软件进行数据接口。

数据库软件：Oracle、SQL Server、FoxPro、Access 等。

图像图片处理软件：如 ERDAS、MGE、Photoshop 等，使用它们进行遥感卫片的合成处理，以及图片的扫描、编辑、裁剪等。

2.4　数据融合

地质建模所涉及的基础资料有图文数据、矢量位图，不同投影、不同高程、不同比例、不同坐标系的数据，建模时需要进行数据融合转换，精度匹配，存精去伪。解决投影变换、比例缩放、范围裁减、坐标匹配等问题，才能为模型构建奠定坚实的基础。但随着专业建模不同的需求，细化建模软件的分类，则它们对数据的要求也不相同，存储方式、转换格式、使用方式都有不同的形式，需要具体分析对待。基本的数据处理转换融合过程如图 2 所示。

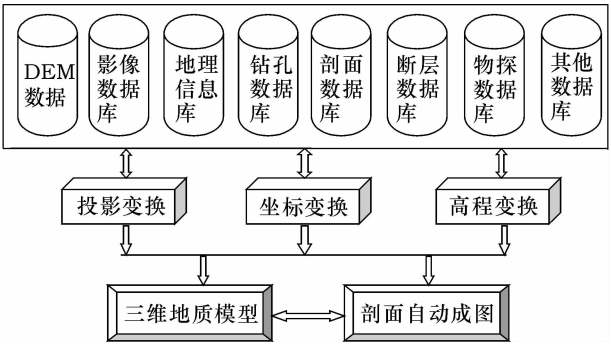

图 2　地质三维建模数据组织及转换

Fig. 2　Geological 3D model data struction and pretreatment process

一般来讲，建模过程中常用的几种空间数据格式有：ESRI 公司的 Arc/Info Coverage、ArcShape Files、E00 格式；AutoCAD 的 dxf 格式和 dwg 格式；MapInfo 的 mif 格式；MapGIS 的 wl、wp、wt 格式等。这些数据格式经过处理，可在不同的建模环境中接口调用。具体来讲，主要有以下的转换过程：

（1） DEM 数据。原始数据以 ArcInfo 格式存放，首先需要用 ArcInfo 软件将此数据转换为建模软件能够接受的格式，进行接图操作，把分块的小图拼装为一张大图，进行投影变换，以1∶25万为例，则以源投影参数比例为 25 万，地理坐标格式，椭球参数为北京 54/克拉索夫，比例尺为 1，坐标单位为度的投影方式转换为目标投影方式。投影转换完毕后，进行等高线的高程数据和高程属性提取，转换成 dbf 格式数据库文件，再使用数据库软件转换成文本文件，则大部分建模系统可以调用。这样，每条线段与高程数据一一对应，就有了地表的三维坐标。通过这种变换，也可以提取其他图层的地理信息数据，如河流、公路等。对于其他不明投影的图形，除进行投影识别和投影变换外，还需要进行图形的误差校正。

（2） 遥感卫片的处理变换。首先需要使用 ERDAS 软件进行波段叠加处理，即多波段低分辨率影像数据的光谱信息与单波段高分辨率影像数据的分辨率信息进行融合。在建模阶段，还需要

使用 GIS 软件对其进行几何精纠正及配准，几何精纠正的目的是对图像地物像元进行坐标匹配，经过转换运算和重采样，使得遥感影像带上地图投影和地理坐标进行配准。用 Photoshop 软件进行图像的格式变换和裁剪，使之符合建模分辨率、场区范围的要求。

由于影像数据的容量大，为了能够快速、高质量地进行显示，需要根据显示的范围、显示的比例选择分辨率最合适的影像进行纹理映射。一个模型可以有不同分辨率的多套卫星/航测影像数据，某些影像数据有可能只限于局部。因此，在显示时，可根据需要，把不同分辨率的影像数据读入内存，以实现多分辨显示。这就需要在技术上做一些处理，比如图像格式的转换，根据显示分辨率和比例的不同，转换为不同分辨率的图像如 BMP、TIFF、GIF 等图像格式。

（3）剖面文件的处理变换。一般涉及到两种数据格式，即 MapGIS 和 AutoCAD 数据格式。对剖面的输入有两个文件，即剖面线文件和剖面文件。剖面线需在已投影的地形图上单独提取出来，转变为建模系统能够识别的文件格式，与剖面数据配合使用。需要说明的是，剖面的坐标需要按照规则进行调整，即设定剖面左下角标尺的横坐标为零，纵坐标为实际高程除以剖面纵向比例后的数值。剖面线方向为从左向右，这样才能保证剖面在输入系统后与剖面线保持一致，不会出现剖面与剖面线相分离的现象。当剖面输入后，必然会出现交叉的剖面地层线不连接的现象，这需要地质技术人员人为干预或设定一定的算法程序解决这一问题。

（4）断层数据。断层在地质建模中对于地质体的生成、场区边界的确定起重要的作用，在建模过程中需要明确：断层面的空间展布，断层不同点的产状，断层的性质。平面上断层的表达方法有两种：一种是在平面图上绘制断层走向及标注倾角，如平面图或地质图；另一种是在剖面图上绘制断层线。结合这两种图件，断层在空间的展布情况就会一目了然，断层产状可由系统读取数据库数据或人工给定。断层的性质对于后期数值模拟计算是必须的，可存放在数据库中或直接存放于模型断层属性数据库中。

（5）钻孔数据。一般以数据库形式存放，大型的如 Oracle，小型的如 Excel 表或 Access，钻孔数据从数据库或数据表中读入系统后，建模系统并不是直接应用，还需要人工或系统按照一定算法规则进行概化和变换处理，才能参与建模，在进行模型编辑生成时，系统根据这些数据将钻孔轨迹以三维图形方式显示在屏幕上，而且可以用不同表达方式，如彩色柱、贴图、纹理等进行显示。

（6）物探数据。物探数据的处理常涉及到的是等值线数据，一般需要剔除异常点，对数据进行离散化和抽稀处理，否则系统在以点拟合面的过程会浪费大量的内存资源、占用过长的运行时间，而且即使拟合好曲面，曲面也会显得高低起伏较为粗糙不光滑，这与系统由点生成的三角形有关。使用合适的离散化的等值线点，建模系统也可插值拟和地层面或断层面，反映一定的地质规律。

（7）地理信息数据。在模型顶面展现这些图元信息，一般的建模系统只是作一些较为简单的 GIS 图元数据的分层显示，没有数据的空间查询与空间分析、可视化表达与输出等 GIS 功能。

3　误差的产生与控制

3.1　基础资料产生的误差与控制

从模型构建的源头，即输入的原始数据说起，模型构建主要使用剖面数据和钻孔数据，钻孔数据会由于钻孔地层变化过于杂乱而使生成的地层起伏变大，剖面在绘制的过程中，由于受人为因素或固定算法的影响，也必然有所取舍。这两种数据由于进行了预处理，会使误差在建模之初便必然产生了。同理，断层数据、物探等值线数据都存在这种问题。

概括来说,不同的技术人员对地质结构有不同的认识和处理,必然会反映在剖面图的地层变化及数值上。另外,采用不同的地质资料,有些地质资料之间存在着不同甚至是矛盾的观点,反映在图面上,形成明显的误差。在资料处理过程中,由于受工具等的影响,在绘图、扫描、接图、矢量化等过程中，必然出现数据的误差甚至误差的逐级传递放大。突出的表现是在剖面图交叉位置，地层线的位置出现不能相交的情况，或发生与别的剖面图地层走向趋势不一致的现象，如图 3 所示。

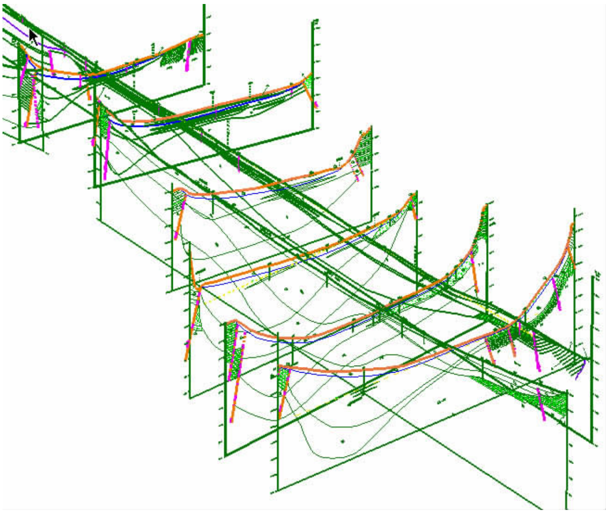

图 3　相交剖面立体展示
Fig. 3　Pictorial drawing of geological crossing section

对于基础资料方面的误差，除加强资料的校准核查、加强质量控制、增强技术人员的责任心外，还可聘请地质专家审核把关，这些措施都会起到很好的质量监控作用。例如建模中常见的纵横剖面地层线不一致的问题，可仔细地调整剖面的位置、尽量使各地层的位置一致，对于明显的数据误差，则要依据整体资料分析该地层的变化趋势，使用系统的编辑功能编辑出现误差的地层线，在生成层面过程中，尽量在剖面线上增加离散点数据，使生成的地层网格通过所属剖面的线。同时，将资料互相对照，减少误差。

3.2　系统运行产生的误差与控制

由于构建模型的基础资料在数据生产过程中会产生一定的误差,当带有误差的数据输入到建模系统中后,会造成误差的传递与放大,使模型的精确度降低。在尽量避免基础资料数据出现误差的情况下,还应分析系统在运行过程中出现的误差。

对建模过程的误差进行分析，可以得出在建模的所有步骤中，都有可能由于操作失误或系统精度的设置而产生误差。在数据处理阶段，各种数据、图文资料进行数据融合时会出现误差，如投影变换、误差校正时的误差。另外，系统建模在插值运算处理过程中，局部的点较密集，如选中的剖面线处，其余的区域离散点稀少，几乎没有，按照数学方法插值，会出现插值曲面与实际曲面有不相符合的现象，为使曲面更符合实际，采取使用控制点拉升或压低的算法进行处理，这必然会造成一定的误差。

另外，当模型层与层之间的距离小时，容易发生地层面的交叉与重叠，当使用控制点进行校正时，透镜体或地层面发生改变，误差极易发生。再则，当调整地层面与透镜体之间的位置时，极易发生连锁反应，造成误差的产生与传递。

针对上述误差的产生,需逐条分析原因,采取多种技术方法进行处理。如数据密集处进行数据抽稀处理。图形效果处理则采用多种网格剖分方法、插值方法、光滑处理方法进行图形效果优化等措施[7,10],使模型贴近实际,误差减少到最低。

3.3　最小图元产生的误差与控制

不同的建模系统，生成模型的最小图元单位是不同的，如长方体、针状体、四边形网格、三角形网格等等，这些图元单位在生成模型过程中，必然受原始数据及计算机硬件条件等的限制而产生误差。以应用最广的三角形网格为例，生成模型的三角形网格过大，则模型面比较粗糙，模型不精细，甚至不能表现面的形态特征；网格过小，则网格的密度大，对这些三角形运算需占用大量的系统资源，使计算机处理的数据量剧增，从而使机器运行速度变慢。三角形的数量多少对模型的精度、系统运转的快慢有直接的影响。另外，如果数据离散点量过多或过少，还会使模型面变得复杂，不能表现模型面的总体特征。系统在这种矛盾中，有时会顾此失彼，造成误差产生。最常见的是地层面在建模时出现上下交错的现象。

回到原始数据方面，假如要建立某一区域的三维地质结构模型，如果这个区域的面积是几万甚至几十万平方千米，而勘探的深度只有几百米或者几十米，这就与常规小范围地质建模截然不同，直接的后果是系统要处理构成模型的基本单位——三角形问题的复杂化。

小小的三角形，带给人们一系列的难题，也指出了我们解决问题的途径。对于该问题，除进行建模初期的布局，如确定纵横比例、分区域处理等，还需增加一些局部三角形细化处理，如二次剖分等技术措施，这些措施都有很好的图形效果和降噪效果。

4　结束语

三维地质模型的构建是根据已有的数据（都

可看作离散点）建立地质曲面，再使用建成的地质曲面建立地质体。这个过程可以看作是由点生成面、由面生成体的一个过程。但这个过程不是简单的直线式的重复，而是建立了众多复杂的点与面、面与体之间的拓扑关系。对于每个子地质体，又是由地层面、断裂面与边界面围成，形成各子地质体后再将它们集中起来就可以得到总地质体模型。因此，对于建立每个体、面的基本元素数据，它们的正误及有机结合直接关系到模型构建的成败。

实际建模过程中，建模数据往往存在着数量大、杂、精度低、利用率少的现实问题。如何使这些数据有序一体化，则存在着数据融合与预处理问题。建模中常遇到如高程不准、坐标不一致、投影错误、钻孔与剖面不一致、纵横剖面层位不一致、位图比例不确切、钻探资料与物探资料相矛盾等现象。这必然使所建模型产生误差，进而传递和积累误差。只有把误差降到最低，控制建模过程每一步骤的系统误差，才能构建优质、高精度的模型。

参考文献:

［1］刘少华，程朋根，陈红华．三维地质建模与可视化研究［J］．桂林工学院学报，2003，23（4）：154－158.

［2］董梅，慎乃齐，胡辉，等．基于 GOCAD 的三维地质模型构建方法［J］．桂林工学院学报，2008，28（2）：188－192.

［3］曾新平，杨自安，刘碧虹，等．地质体三维可视化建模的技术方法研究［J］．矿产与地质，2005，19（1）：103－106.

［4］徐能雄，何满潮．褶皱岩体三维可视化构模技术及其工程应用［J］．岩土工程学报，2003，25（4）：418－421.

［5］何满朝，李学元，刘斌，等．工程岩体三维构模中钻孔数据处理方法［J］．岩体力学与工程学报，2005，24（11）：1821－1826.

［6］侯卫生，吴信才，刘修国，等．基于线框模型的复杂断层三维建模方法［J］．地质科技情报，2006，25（5）：109－112.

［7］孟小红，侯建全，梁宏英，等．离散光滑插值方法在地球物理位场中的快速实现［J］．物探与化探，2002，26（4）：302－306.

［8］钟登华，李明超，杨建敏．复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用［J］．岩石力学与工程学报，2005，24（4）：575－580.

［9］王纯祥，白世伟，贺怀建．三维地层可视化中地质建模研究［J］．岩石力学与工程学报，2003，22（10）：1722－1726.

［10］邹汾生，董军义．空间数据建模中的内插方法讨论［J］．中国钨业，2004，19（4）：36－40.

［11］潘炜，刘大安，钟辉亚，等．三维地质建模以及在边坡工程中的应用［J］．岩石力学与工程学报，2004，23（4）：597－602.

［12］丁继新，尚彦军，杨志法．水库设计的三维可视化研究［J］．工程地质学报，2005，13（4）：508－515.

Data Pretreatment and Error Analysis in 3D Geological Model Constructrion

YE Si-yuan[1,2], WU Shu-ren[1], HE Shu-jun[3]

(1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Beijing Municipal Institute of Hydraulic Engineering Planning*, *Design & Research*, *Beijing* 100044, *China*;
3. *China Zhonghua Geotechnical Engineering Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 102600, *China*)

Abstract: Three-dimensional geological model is the focus in contemporary geology research. In model construction process, the data structure of foundational data exists in numerous data structures. With graphic and text data types and formats of three-dimensional geological model briefly discussed, the integration, amalgamation and precision match of different structural foundational data are analyzed. The generation, transmission and accumulation of model error are evaluated from the viewpoint of initial model data input and model system operation control. Some measures, methods of error reduction and model accuracy promotion are put forward.

Key words: 3D geological model; data construction; data analysis and pretreatment; error analysis; control