

水电工程地质信息三维可视化与分析

刘东海, 钟登华, 李明超

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

[摘要] 传统工程地质资料的描述和解释直观性差, 往往不能充分揭示地质构造空间变化的规律, 所以越来越难以满足设计人员进行空间地质分析的要求, 文章利用 GIS 和可视化技术, 提出了水电工程地质信息数字化与三维可视化方法, 实现了地质信息的可视化分析, 工程应用表明该方法可为直观描述复杂地质构造的空间展布及其相互关系, 以及进行工程地质交互设计提供有效的途径。

[关键词] 水电工程; 地质信息; 三维可视化; GIS; 地质分析

[中图分类号] P642; TP391 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)05-0065-06

1 引言

工程地质条件是进行大型工程设计的重要条件, 地质信息的数字化及可视化是进行工程计算机辅助设计的重要基础, 它有助于提高工程的设计效率与设计质量。但是传统的工程地质资料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起伏变化的直观性差, 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, 所以越来越不能满足工程设计人员进行空间分析的需求。GIS 技术及可视化技术 (ViSC) 的发展为利用地质勘探资料, 用计算机进行重建地下三维地质数字模型创造了条件^[1-3]。然而, 事实上许多地质调查和观察的结果为一系列空间分布不均的离散数据, 如何用这些数据来描述地质构造的空间展布, 如何再把这种空间描述变成计算机所能显示的三维图形, 如何在此基础上实现人机可视化的交互分析与操作等问题。

是当前数字地质研究的重要课题^[4,5]。国外, 最早从 S. W. Houlding 提出三维地质建模 (3D Geoscience Modeling) 的概念^[6], 到现在已经形成了一系列的理论与方法, 并开发研制了不少较为成熟的商业软件, 比如 Maptek 公司的 Vulcan, Gemcom Software International 公司的 Gemcom, Kirkham Geosystems 公司的 MicroLynx, 等等。然而, 在国内有关研究起步较晚, 且对于复杂地质的三维构造及显示机理的研究更是滞后。作者利用 GIS 和可视化技术, 研究水电工程地质信息的三维数字建模及其可视化方法, 并将其应用于实际工程。

2 基于 GIS 的工程地质信息数字化

2.1 工程地质信息数字化建模过程

工程地质信息数字化指的是把原始的地质勘测数据, 经一系列的解译、修正后, 构成能在计算机中操作及显示的三维模型, 包括地质构造几何形体与物性信息 (如厚度、孔隙率、渗透率、构造倾

[收稿日期] 2004-01-08; **修回日期** 2004-02-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50179023)

[作者简介] 刘东海 (1974-), 男, 浙江舟山市人, 博士, 天津大学讲师, 主要研究方向为工程 CAD 与优化决策; 钟登华 (1963-), 男, 江西赣州市人, 天津大学教授, 研究领域为工程 CAD 与优化决策等; 李明超 (1979-), 男, 湖北仙桃人, 天津大学建筑工程学院博士研究生, 主要研究方向为工程地质三维建模及可视化

斜、走向等)的数字化建模过程(见图 1)。地质构造的几何特征与物性信息之间的一一对应关系的建立是实现空间信息查询与管理,以及地质信息可视化分析的基础。利用 GIS 的数据组织形式,可为这种对应关系的建立提供便利。在地质数字化建模过程中,对模型的检验是不可忽略的。作者通过事先定义几个检验剖面(不参与建模),与从所建地质模型得到的相应剖面做比较,若吻合不好,则需要对模型做相应的修正。并且,随着地质勘测资料的不断更新,模型还需要适时进行修改。

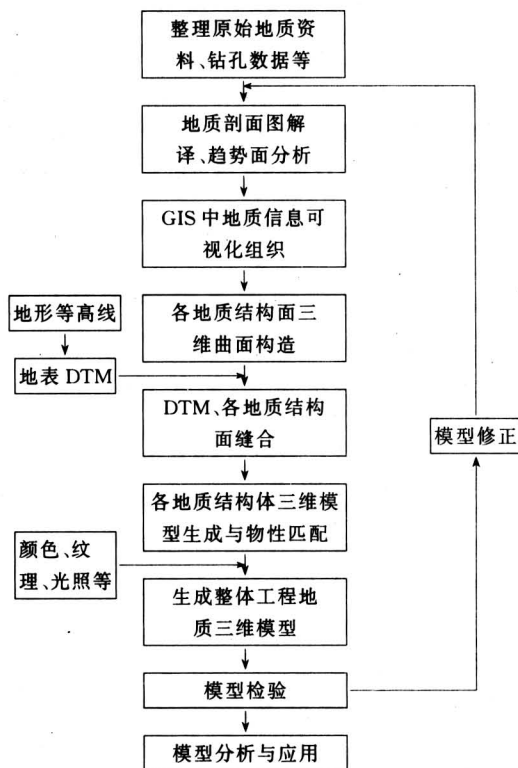


图 1 工程地质信息数字化建模过程

Fig.1 Digital modeling of engineering geoinformation

2.2 地质构造趋势面分析与改进

传统的地质趋势面分析一般采用多项式回归统计方法,尽管在一定程度上该方法能较好地描述地质构造的趋势性,但对于有空间突变的情况,其拟合精度较低;此外,它人为地假定了一个连续光滑的拟合函数,而这种关系并不一定能真实反映地质数据的空间变化规律。事实上,对于一个复杂的工程地质系统,其往往具有非线性、非均衡性、突变性、自组织性和随机性等特点,因此,采用该方法来做地质构造信息的插值有一定的弊端。近年来迅速发展的非线性自适应智能方法,为地质构造趋势

面分析提供了新的途径。作者采用人工神经网络(包括 BP 网络和径向基网络)方法、混合进化规划方法(遗传规划和遗传算法结合)与三次多项式回归法做比较,发现无论在拟合精度还是插值精度上,前两种方法明显优于传统的多项式回归法^[7]。

2.3 地质构造三维数字模型

地质三维数字模型实质上是地质信息在计算机中的数据表达方式,包括数据存储的结构和可进行的操作,它是研制地质三维可视化软件的基础和核心。近年来,对于构造三维数字地质模型的数据模型;国内外已有不少研究与探索,比较典型的有三维栅格模型、TIN 模型、八叉树体元模型以及混合模型等。针对工程具体情况,可采用混合数据模型,即 TIN 模型和三维栅格模型相结合,来建立地质的三维数字模型。由于 TIN 能细腻、真实地描述空间起伏特征,因此,对于地质构造形体的可视化采用 TIN 型;而为减少运算量,提高计算速度,在满足精度的条件下,地质构造物性的可视化采用三维栅格模型。同时,这两种模型之间能进行相互转化。此外,由于地质构造一般表现为实体的形式,因此用 TIN 模型表示地质构造时需要考虑多个 TIN 之间的封闭及吻合。特别是对地层翻卷的情况,可采用多个 TIN 的组合来描述。

3 地质构造的三维可视化

较为常见的地质构造一般有地层、断层、裂隙以及特殊地质体等,但它们均可用体或面来表示。在地质数字建模中,对于裂隙及特殊地质体的处理比较复杂,由于裂隙特征(走向、大小、长度)在空间分布上的随机性较大,而且众多,因此在实际建模中只考虑把较大的裂隙数字化,并用面来表示,而对于较小的裂隙只表示其相应物性信息,没有形体建模;对于特殊地质体,可把它看作是嵌入地层的岩体,用不规则曲面围成的体来表示。下面以地层及断层为例来说明地质构造的三维可视化方法。

3.1 地层三维可视化

地层在空间上的表现应该是体的形状,对于这一体的表现,可采用地层层面、层底以及前后左右地层边界面的缝合来实现。因此,地层三维可视化的实现需要两个主要环节,即地层层面的三维可视化及地层层面的缝合。

3.1.1 地层层面的三维可视化 地层层面的三维

可视化有以下几个步骤：

1) 控制点确定及插值。根据地质钻孔数据及地质剖面图中的相应地层剖线，采用趋势面分析法，来对其进行空间插值，形成符合一定精度的地层离散数据点阵。

2) 地层层面边界确定。地层在区域上的分布不一定是连续的，有时是分区分布的，这就需要确定地层的分区边界。为确保上下相邻地层有唯一分界面，在地层边界确定时需增加两个限制条件：**a.** 在地层分区边界上，地层层面高程等于上一地层层底高程，且厚度为零；**b.** 在该地层分布区域内，下层地层的层面高程强制限定为该地层层底高程。当边界确定后，需沿边界按一定精度进行插值。

3) 地层层面 TIN 模型建立。根据生成的地层离散数据点阵，就可采用不规则三角形网 (TIN) 来生成地层三维曲面。模型生成采用 Delaunay 三角剖分法^[8]。

3.1.2 地层层面的缝合 在建立所有地层层面的基础上，可构造由各地层层面和边界面封闭而成的不规则地层三维实体。对于每一个地层体，它是由上下前后左右的界面围成。上下界面分别是地层的层面和层底面，前后左右界面为地层层面与层底缝合而成的边界面（或边界线）。而事实上，某地层的层底面往往是相邻下一地层的层面。上地层（由①表示）层底与下地层层面（由②、③表示）的关系一般可表示成图 2 所示的四种关系，其中（d）图是（c）图的特例，它表示上地层层底被多个下地层层面相交。（b）图，由地层边界唯一性的限制条件，已经从理论上保证了两者相交处的吻合，此时地层①的上下层面吻合为一条边界线。地层层底与层面的缝合是指（a）图这种情况。（c）、（d）图则是（a）与（b）的混合情况，即既有线的边界，又有缝合面的边界。

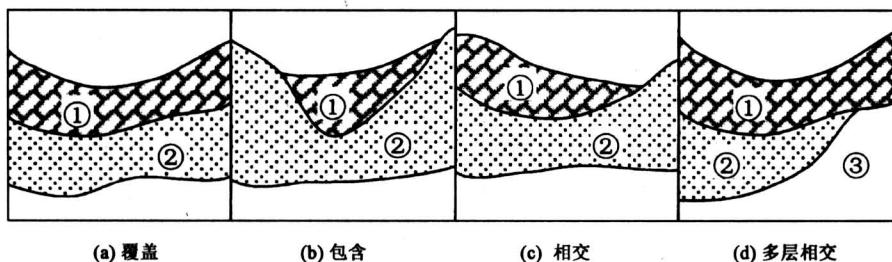


图 2 相邻地层空间关系示意图

Fig.2 Spatial relationship between adjacent layers

地层面缝合的基本思路是：依序上下连接该地层上下层面边界的三角网格节点，来完成层面间三角片曲面的重构，从而在地层上下层面间建立三角形网构成的环状曲面。在建立三角形环状曲面时，如果地层上下层面边界上的节点数不一致，则需要节点相对较少的层面多边形边界上进行插值，使上下地层面边界多边形上的节点数相同，且尽量使节点均匀分布，从而可避免狭长三角形的产生。这样，把上下边界多边形上的节点依次相连，就可以构建地层实体边界的环状三角网。

3.2 断层三维可视化

同样，对断层进行三维可视化前，首先需确定其控制点阵，然后根据确定的断层边界，用 Delaunay 三角形来构建断层面的 TIN 模型。当断层厚度不大时，可将其作为一个空间曲面来处理；如果断层的厚度不可忽略，则需把其作为一个实体

来构造。对于后一种情况，与地层处理类似，在建立断层上下层面的基础上，把所有构成面缝合起来即可。当然，无论哪种方法都必须考虑断层所影响的地层，并确定断层与断层间、断层与地层间的边界吻合。此外，由于断层描述的特殊性，当对断层的表现不要求太高精度及细度时，可以通过对其产状（倾角和走向）的描述来实现，即用一次趋势面来拟合

$$\hat{z} = a_0 + a_1x + a_2y$$

式中 x, y 是大地坐标， \hat{z} 为断层面的趋势高程， a_0, a_1, a_2 为趋势面拟合方程的系数，式中系数可用最小二乘法求得。

3.3 断层与地层的相交处理

尽管在构建地层与断层的 TIN 模型时考虑了两者的边界关系，但实际上，由于误差和精度的影响，往往会发现两者在边界上并不一定完全吻合。

因此,为反映两者间的真实情况,应该使两者在边界上相交,且吻合起来,具体可采用如下方法:

首先,按断层面原有的趋势及走向,适当地外推延伸断层的空间分布范围,使断层面能够与需吻合的地层层面在空间上相交。接着,可对断层面与地层层面进行求交,由于断层面和地层面都是由 TIN 构建的,两者的求交实质上表现为两个三角形网中的三角形相互求交的问题。两者的交线求得后,再沿着交线,从断层面 TIN 模型中切去多余部分的三角形,从而生成新的断层面 TIN,这个新的 TIN 保证了断层面与地层面的无缝吻合。

如果断层的描述是体的形式,由于它是由两个断层面封闭围成的,所以在处理断层体与地层层面的吻合问题时,可采用两个断层面分别与地层层面进行吻合来解决。

3.4 地质模型的可视化表现

为能达到逼真的显示效果,可在地质数字模型上贴合相应影像图。但实际工作中,为了方便及节省工作量,对地质模型采用的是人造纹理,即使用系统所提供的调色板生成仿真的纹理,然后再对模型进行光照等渲染。实例应用表明,该方法具有较好的显示效果,而且还可以方便地实现地质体的透明设置。经渲染后的三维地质模型可进行多种方式的显示,以满足工程人员直观、多方位的观察与分析需要。

1) 动态显示。根据观察者需求,可通过 *Camera (ObservPoint, TargetPoint, ViewAngle, RollAngle)* 函数,对地质三维数字模型进行平移、缩放、视点转移、观察方向改变等交互操作,从而实现不同角度、不同方位、不同距离的观察,以及按任意线路的穿越或漫游。函数中的参数反映了观察者位置、被观察对象中心、观察者视角范围和被观察物体在二维投影面的旋转角度等。

2) 单层显示。由于在地质三维数字模型中,各地质构造体的图层是分别组织、分层管理的,所以,如果想要详尽地了解某一地质构造体的情况,可以方便地关闭其他图层,而只显示所关心的对应图层。

3) 掀盖层显示。它是第二种方式的推广,即观察者可以从上到下依次关闭掉相关图层,就可不断地掀开上面覆盖的地层,而观察到下面的地质情况。

4) 透视方式。由于地质构造体的纹理是用系

统调色板生成的颜色填充的,只需把某一地质构造体的填充色设置成一定的透明度,即可方便地使该地质构造体具有一定透明性,从而能穿透三维模型外面包裹的地质体,直接观察到地质内部细节。

5) 切面方式。通过空间剖切及剖切图绘制算法,可以生成任意方向剖切后的地质三维数字模型及相应的地质剖切图,并且可以用一组平行切片来表达地质的内部结构。这样使工程人员能更充分直观地了解地质构造的内部情况及相互的空间展布关系。

4 工程地质信息三维可视化分析

4.1 地质信息三维可视化查询

由于在建模中把地质构造的空间几何形体与其物性信息一一对应起来,因此在地质三维数字模型上,可方便地进行地质构造信息的三维可视化查询。这些查询包括双向查询、条件查询与热连接等。所谓双向查询就是用鼠标点击屏幕上任意一点,则可弹出与该点对应的属性信息;或者拾取属性数据库中的某一条记录,即可查询到模型中对应的地质构造几何形体,并且被查询到的图形颜色变得鲜亮,以示突出。由于屏幕像点与三维地质模型在屏幕上的投影点之间并不一定是唯一对应的,为确保查询结果的唯一性,须根据可视点的判别方法^[8],使鼠标捕捉到的屏幕可见点与实际模型空间点之间一一对应。条件查询是根据特定的逻辑表达式作为查询条件,找出符合该逻辑条件的图形。可在属性数据库中,通过 SQL 查询语句来实现该功能。热连接就是把地质模型中某一图形单元和文件、数据库、图层或应用模型等对象连接起来。当启动热连接工具用鼠标点中该图形单元时,能立刻显示出与其相连接的对象。比如,地质勘探资料、剖面 CAD 图等查询就可通过热连接来实现。

4.2 空间剖切算法与剖面图绘制

由于地质三维数字模型中的地质构造体是由不规则三角网表示的空间曲面所围成的封闭实体,所以,当剖切面的空间几何拓扑关系确定后,对地质数字模型的三维剖切就反映为三维剖切平面与 TIN 所表示的各地质体(地层、断层等)所构成曲面进行空间求交的问题,其实质是三角形空间平面与剖切面求交线的问题。然后,可根据 TIN 中三角形网的拓扑关系,依次对各三角形的交线相连接成一条曲线,就得到了一系列各地质构造与剖切面

的交线。再沿交线，对各地质构造的 TIN 进行修改，即切去多余的三角形，并进行缝合，从而得到剖切后的地质三维模型。同时，把空间剖切交线投影到剖切平面所确定的坐标系，然后按一定的比例尺，可绘制出地质剖面图。在开发的系统中，分别用下列函数来实现空间剖切和剖面图绘制：

```
(RemainObjects, Sect3DLines) =
Do3DSection (SectObjects, Sect3DPlane,
RemainDirec, BooleanDiff) Sect2Dplane =
DrawSectionPlane (Sect3DPlane,
Sect3DLines, Projection2D, Rational)
```

其中，参数 RemainObjects 和 Sect3DLines 分别表示剖切后的三维地质模型和三维剖切交线，SectObjects 和 Sect3DPlane 分别表示所要进行剖切操作的对象和三维剖切面，RemainDirec 用来定义剖切后应保留的部分，BooleanDiff 表示进行布尔查运算（包括相交判断）；Sect2DPlane 是得到的平面剖面图，Projection2D 表示定义的平面坐标系，Rational 为绘制的比例尺。

4.3 结合水工建筑物的工程地质分析

通过建立工程地质信息三维可视化模型，可以更好地为水电工程建筑物设计与施工提供直观、科学的分析手段。如结合大坝或地下洞室结构等进行地质剖切分析，或是根据地下建筑物形体布置，直接从整体地质模型中掏挖出相应部分，从而可以直观清晰地展示建筑物所处位置的地质条件、建筑物与地质体的相互关系等，为大坝基础处理及地下洞室施工等提供指导。同时，可在地质模型上对所关心的位置进行模拟钻孔（或开挖平洞），来辅助建筑物设计分析。当然，这样的模拟只能是忠实于现有的勘测资料。

5 工程实例

黄河上游某水电工程坝址处主要地质构造包含中生代印支期花岗岩 (γ_5)、第四系崩积层 (Q_4^{col})、第四系坡积层 (Q_4^{dl}) 和第四系冲积层 (Q_4^{al}) 及其混合层等多种地层，并包括多个断层。根据现有的工程地质勘探资料，整理出上述各地层的空间离散测点及观测数据，包括地层的高程、厚度、渗透率、风化程度以及断层的倾角、走向等信息。根据上文介绍的方法，构建了该工程的地质信息三维数字模型，并用原始坝址处 2 275m 高程的

平切图和沿河向的纵 I 横剖面图与模型剖切得到的相应剖面图作比较，通过检验，认为所建模型符合工程地质分析的精度要求。在此基础上实现了地质空间剖切以及三维查询等可视化分析。图 3、图 4 所示为从整体数字模型上切下的局部地质三维数字模型经任意平切、纵切后得到的平切图及平行切片图。同时，为显示地质构造与工程建筑物之间的空间关系，在数字地质模型上加了枢纽建筑物布置及地形，其剖切图见图 5。

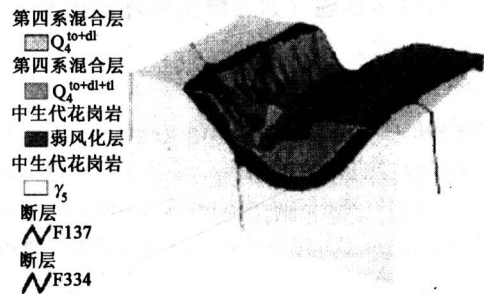


图 3 局部区域地质三维平切图

Fig.3 3D section view of engineering geoinformation in a local area

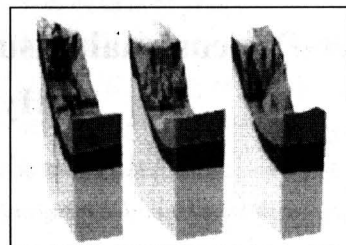


图 4 局部区域地质三维平行切片图

Fig.4 3D parallel section view of engineering geoinformation

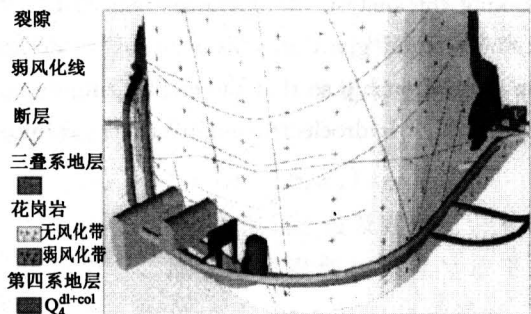


图 5 5#引尾轴线地质三维剖面图

Fig.5 3D section view of geoinformation along No.5 axes with engineering structures

6 结语

作者提出了水电工程地质信息的三维数字建模及其可视化方法,实现了地质任意空间剖切、信息查询以及结合水工建筑物的工程地质可视化分析,并通过一个具体工程的应用,验证了笔者的方法的有效性,同时为快捷、交互地进行工程地质设计提供了新的途径与手段。地质三维建模及其可视化是一项复杂而又艰巨的工作,笔者的研究可能只是一个开端,有许多难题(如三维实体建模技术)还需做进一步的研究。

参考文献

- [1] Fritsch D. Three-dimensional geographic information system: status and prospects [R]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vienna, the Committee of the 18th ISPRS, 1996, 18 (B3): 215~221
- [2] 孙敏,马嵩乃,毛善军. 3D GIS中树的表达与可视化研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(10): 901~905
- [3] Rosenblum L J. Research issues in scientific visualization [J]. IEEE Computer Graphic and Application, 1994, 14(2): 61~63
- [4] 柴贺军,黄地龙,黄润秋,等. 岩体结构三维可视化模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 55~59
- [5] 陈昌彦,张菊明,杜永廉,等. 边坡工程地质信息的三维可视化及其在三峡船闸边坡工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 1~6
- [6] Houlding S W. 3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994
- [7] 刘东海. 工程可视化辅助设计理论方法及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2003
- [8] 刘东海,钟登华,周锐,等. 基于GIS的水电工程施工导流三维动态可视化研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1051~1055

Three-Dimensional Visualization and Analysis of Geoinformation in Hydroelectric Engineering

Liu Donghai, Zhong Denghua, Li Mingchao

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] As the traditional description of engineering geoinformation is lack of visualization, and can not reveal the spatial tendency of geological structures very well, it is more and more difficult to meet the designers' demands for making geological spatial analysis. By using GIS and visualization techniques, a method of geological digital 3-D modeling and its visualization in hydroelectric engineering is presented in the paper, aiming at making the analysis of geoinformation visual. With an example of engineering application, it has been shown that the method gives an effective way to describe the spatial distribution of geological structures and their complex relationship so that the engineering design can be executed interactively and conveniently.

[Key words] hydroelectric engineering; geoinformation; 3D visualization; GIS; geological analysis