

# 岩体中复杂构造的三维可视化方法

## Visualization of Complicated Structures in Rock Masses

韦宏鹤<sup>1</sup> 王建锋<sup>2</sup> 杨 玮<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学建工学院, 北京, 100022; 2. 中国科学院力学所, 北京, 100083; 3. 山西省临汾市水资源局, 临汾市, 041000)

**摘要:** 岩体中复杂构造(如断层及褶皱)对地下建筑工程的安全影响很大, 因此如何根据工程勘察结果精确地再现构造的空间分布对于地下工程的设计及安全施工极为重要。本文基于地下工程中地质构造的空间形态, 结合 Gemcom 三维建模软件的基本功能, 分析复杂地质构造的三维建模问题, 解决诸如断层及倒转褶皱等复杂构造的可视化方法。

**关键词:** 断层 倒转褶皱 软弱夹层 可视化

### 1 引言

断层、褶皱及软弱夹层是地层中几种重要的构造形态。褶皱(特别是翻转褶皱)使地层发生了扭曲、断层使地层发生断裂、软弱夹层使地层容易发生滑动, 这些因素的存在使得地层的力学特性发生了很大变化, 大大减弱岩体的抗剪切强度及抗滑强度, 极大地影响了地下建筑的安全性。因此, 详细了解地下构造空间分布情况对提高地下建筑的设计、施工的稳定性非常重要。尽管目前钻孔工程勘察是获取地下地层、构造信息的主要手段, 但这些仍然只是一堆散落的孤燥数据, 需要更为有效的措施来处理并显示这些信息, 以便能充分了解岩体结构的空间分布、构造的空间形态以及其在岩体内的穿插关系, 才能更好地把握空间地质情况, 为设计、管理及施工部门提供更好的资料。3D 可视化技术是主要方法之一。岩体结构构造的 3D 可视化是一种有效方法来描述岩体结构构造的空间分布、相互制约以及相互交错的特性。

目前, 对于地下岩体结构构造的三维可视化问题出现了不少的方法技术, 这些方法技术均基于一定的算法条件以及函数关系, 可通过这些关系来描述结构构造的空间形态<sup>[1-4]\*</sup>。然而, 由于地下情况的复杂性, 很多情况下很难用某种函数关系来完整地描述这些构造现象, 这就需要具有更多的人机交互能力的方法来解决这些复杂的空间分布问题。本文以 Gemcom software International Inc. 开发的 Gemcom Desktop Edition 系统为基础, 利用其三维体生成方法以及各种交互切割处理功能, 分析复杂岩体、结构构造的三维地质体建模方法, 讨论断层、褶皱(特别是翻转褶皱)以及软弱夹层的建模方法。

### 2 面生成

三维地质模型的生成过程: 点(线)→面→体, 其中主要的步骤就是面的生成方法。现有的很多方法都是以 Delaunay 网格法, 即根据实际数据点的空间分布状态来生成网格面。这种方法虽然能够保持原始数据点的不变性(即所生成的面经过所有的数据点), 但它却存在一个不可回避的问题: 由于受客观条件的影响, 实际采样数据点的空间分布往往极不均匀。在这

\* 李魁星, 2000. 3D 地质空间信息系统设计及其可视化. 博士论文, 北京大学。

种情况下, Delaunay 法所生成的网格面容易产生过长的三角形, 而此类三角形在网格生成中最容易导致错误, 以至后续的工作无法继续进行, 并且也会使生成的面圆滑度较差。鉴于这种情况, 在生成网格面之前, 首先采用内插方法对实际数据进行插值处理。使数据点的空间形态尽可能达到均匀分布。

空间插值按数据点与插值结果之间的关系, 可分为纯插值和曲面拟合两类<sup>[5]</sup>。纯插值法要求插值结果与已知点之间的误差为 0, 即要求插值结果通过已知的每一个数据点; 曲面拟合方法不要求插值必须包括每个已知点, 但必须满足某种条件, 如最小二乘准则(插值结果与已知点之间误差的平方和最小)。可见, 纯插值法不可能形成规范的三角形网格, 而曲面插值法则可构成规则三角形网格, 即通过人工规定插值网格的长、宽间隔, 从而可以实现规则网格划分。具体处理采用 Laplace 插值法, 这是一种曲面拟合方法。Laplace 方法具有如下优点: 对于数据点稀疏或缺少的地方, 容易生成插值点\*, 而这正是工程勘察结果常见的数据点分布特征。

假设与待求点相邻的 4 个已知点的值分别为  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ , 并且  $f_1$ 、 $f_3$  相对,  $f_2$ 、 $f_4$  相对, 待求插值点的值为  $f_0$ , 则  $f_0$  可由下式求得:

$$f_0 = \frac{\left[ \frac{f_1}{a(a+b)} + \frac{f_2}{b(a+b)} + \frac{f_3}{c(c+d)} + \frac{f_4}{d(c+d)} \right]}{\left( \frac{1}{ab} + \frac{1}{cd} \right)}$$

其中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为待求点到  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  的距离。

### 3 复杂构造建模方法

#### 3.1 断层建模方法

断层构造最大的特征是断层两侧地层出现了相对位移、地层界面出现突变不连续性, 甚至断层带本身还具有一定的层厚。这种复杂的空间界面分布特征在计算机中很难通过一般的函数关系来精确表达, 必须通过人工交互处理才能实现这种突变现象的拟合再现。

考虑一般情况, 即断层带具有一定的厚度, 并且断层两侧地层出现了上下位移, 两侧地层界面发生了上下错动现象(图 1(a))。对于这种突变的界面现象, 采用以下方法进行处理:

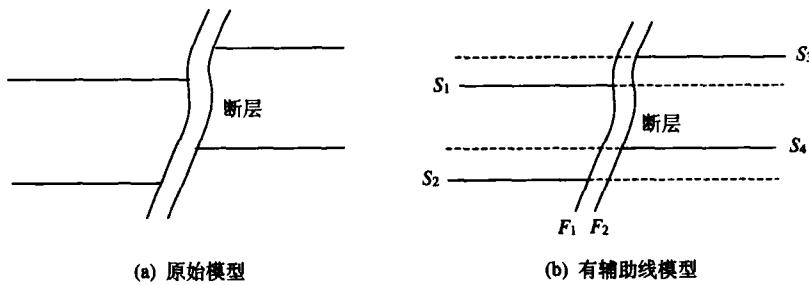


图 1 有断距与落差的断层模型及辅助线

##### 1. 作地层分界线的辅助线

在网格化之前, 首先根据实际地层分界线对所有剖面作界面辅助线(如图 1(b)中的虚线所

\* Gemcom software International Inc. Gemcom for Windows User Manuals, 1998.

示)。经过处理后,对于一个地层来说便有两对地层分界线:一对以断层左侧的地层分界线为准向断层右侧延伸而形成的界线(断层右侧虚线部分),另一对则以断层右侧的地层分界线为准向断层左侧延伸形成的界线(断层左侧虚线部分)。

## 2. 地层界面生成

利用地层分界线及辅助线生成地层界面,对于如图1(b)所示的断层来说,可以生成4个地层分界面:其中两个以断层左侧地层界面线为基础的上下分界面 $S_1$ 及 $S_2$ (包括右侧的虚线部分),另外两个则以断层右侧地层界面线为基础的分界面 $S_3$ 及 $S_4$ 。 $S_1$ 及 $S_2$ 所表示的地层界面在断层左侧是精确的,而在断层右侧则是虚构的;同样道理, $S_3$ 及 $S_4$ 在断层右侧是精确的,而在断层左侧则是虚构的。

同样道理,可利用断层界面线生成断层两侧的界面 $F_1$ (左侧界面)及 $F_2$ (右侧界面)。

## 3. 由地层分界面生成地质层

采用两个不相交的面来生成体。分别由 $S_1$ 、 $S_2$ 以及 $S_3$ 、 $S_4$ 生成两个地层体 $V_1$ 及 $V_2$ ,然后再由 $F_1$ 及 $F_2$ 生成断层体 $V_F$ 。

## 4. 体切割及体合成

首先利用 $F_1$ 对 $V_1$ 进行切割处理,保留左侧部分 $V'_1$ (断层左侧实际地层)。同样道理,利用 $F_2$ 对 $V_2$ 进行切割,保留右侧部分 $V'_2$ (断层右侧实际地层),然后将左右两部分的地层 $V'_1$ 及 $V'_2$ 合成分即得到该地层在断层两侧的实际地层体,最后将中间的断层体 $V_F$ 嵌入即可得到完整的地层(图2)。

## 3.2 翻转褶皱的建模方法

翻转褶皱是地层中最为复杂的构造形态之一,由于它的空间分布复杂性,几乎不能用一个函数形式来完整表示它的空间分布,因此,也就很难根据它的空间形态直接生成构造体模型。另一方面,由于翻转褶皱的空间形态复杂,因此从计算机三维图形建模的方法来说,不管从哪个方向对翻转褶皱进行平面投影处理,在部分网格点会出现多值性。因此,必须对褶皱进行分解处理,才能保证在投影平面网格点上的单值性。因此,翻转褶皱的建模工作可分为以下几个步骤完成。

### 1. 分解地层剖面

在图3所示的褶皱剖面模型中,地层分界线主体上是以水平分布为主,因此,选择水平面作为网格化投影平面。为了避免投影点出现多值性,采用分块建模的方法,即引入辅助线

将地层划分为三部分。如图3中的虚线所示:由两条缓变曲线以及虚线之间作为体模型的第一部分 $V_1$ ,上部下凹线及上部虚线所围成的空间构成体模型的第二部分 $V_2$ ,而下部凹线及下部虚线所围成的空间则构成体模型的第三部分 $V_3$ 。对于这三部分,采用不同的方法建模,既可避免多值性问题,同时又使得复杂构造的建模过程变得十分简单。

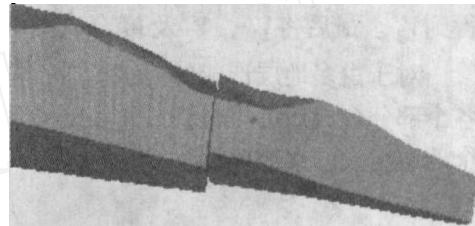


图2 断层三维模型

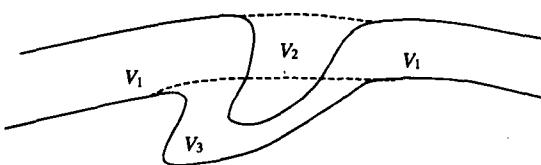


图3 褶皱模型及辅助线



## 2. 体生成

第一部分采用由面生成体的方法，首先利用改造后的两条平缓变化曲线来生成两个面，然后再由这两个不相交的面来生成。对于第二、第三部分，采用由闭合环来生成体的方法。由剖面中所加入的辅助线(虚线)和对应的下凹分界线来构成一个闭合环，然后利用软件将各个剖面中对应的闭合环用连接线连接起来形成连接的闭合环串。

首先调出对应  $V_1$  的上下两个(不相交)界面，然后利用这两个不相交界面来生成体  $V_1$ ，这是一个边界平稳变化、近似水平的地层。其次，调出对应  $V_2$  的所有闭合环。Gemcom 软件提供了由闭合环生成体的功能。调用相应的软件功能生成体  $V_2$ ，体的属性与上一层的体的属性一样。同理可生成  $V_3$ 。

## 3. 体切割及体合成

利用  $V_2$  对  $V_1$  进行切割，将  $V_1$  中被  $V_2$  所占据的部分切掉后得到  $V'_1$ ，对  $V_3$  也进行同样处理得到  $V'_3$ 。最后将  $V'_1$ 、 $V_2$  及  $V'_3$  合成便得到了倒转褶皱的最终三维构造模型。

对于由多地层形成的褶皱构造，可以对各个地层按照上述方法生成各层的模型，然后将各个部分合成后即可得到最后多地层褶皱构造的模型。图 4 所示为按照上述方法生成的由 4 个地层组成的褶皱模型。

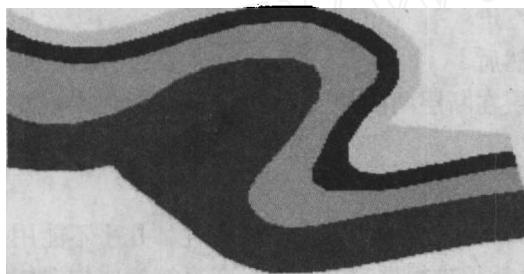


图 4 倒转褶皱模型

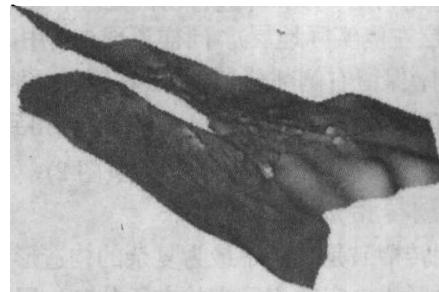


图 5 软弱夹层三维模型

### 3.3 薄软弱夹层的建模方法

软弱夹层是在地下岩土工程中占据着重要位置的一个力学结构层，其空间分布特征是，范围广、厚度薄，因此按照常规的方法很难完整、精确地描述其空间形态。由于 Gemcom 系统提供体生成的一般方法是，利用两个不相交的三维面来生成体。当两个面存在相交时，由此方法生成的体不完备，不能用于进一步处理(如切割处理等)。由于软弱层厚度小，因此在整个建模的范围内可能还会出现局部缺失的现象。因此由软弱层上下界面点所生成的两个界面往往会有交叉现象。在这种情况下，不能直接利用夹层两侧的两个界面来生成体。为了避免出现面的交叉性，可对薄层模型生成做如下处理：

以夹层的一个界面为基础，将另一个界面拉开一定的距离，以保证两个面不相交。然后再利用这两个面进行三维体生成，最后再利用移动前的界面对体进行切割处理，便得到实际的软弱夹层，如图 5 所示。

## 4 建模实例

本实例为我国一个水电建筑工程，工程所处的地段多为裸露的基岩。主坝位置位于一山凹中，两侧地势起伏很大(图 6)。在整个场地中，影响工程岩体稳定性的因素为 4 条较大的断

层带以及 7 个层间软弱夹层。根据工程勘察结果表明, 软弱夹层的空间分布形态虽然相互基本平行, 但厚度很小, 最小只有 30 cm。4 条断层带均具有一定的厚度, 且在建模区内纵横交错, 相互之间存在穿插现象。根据工程要求, 坝区内建模地层对象共有 12 个地层。所有这一切为建模工作增加了很大的难度。

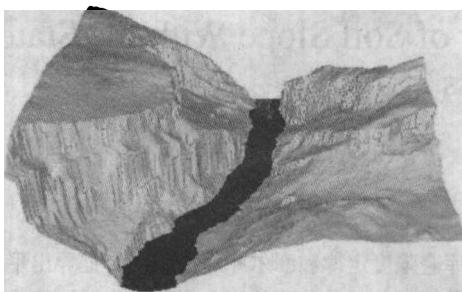


图 6 某水电工程地形图

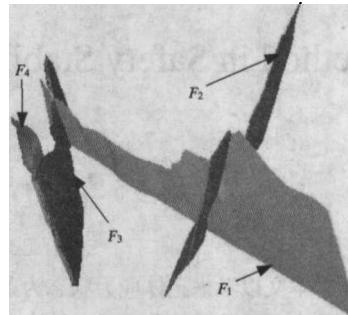


图 7 某水电工程断层分布图

实际建模时利用上述方法分别对地层、断层及软弱夹层进行建模。对断层及软弱夹层的建模结果显示了 4 条断层带及 7 个软弱夹层的空间形态如图 7、8 所示。

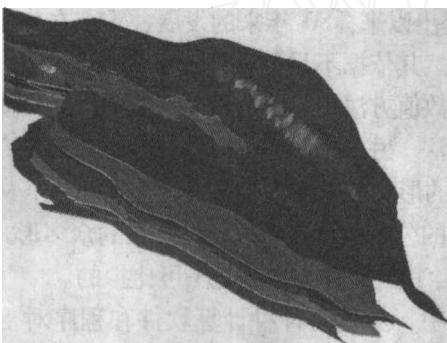


图 8 某水电工程软弱夹层模型

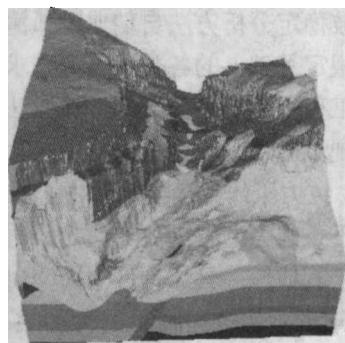


图 9 某水电工程三维地质图

4 条断层带倾角很大, 几乎是直立的。将断层带、软弱夹层以及经过切割处理后的地层合成分即可得到整个工区内的三维地质模型(如图 9 所示)。通过该图可以容易地看到在河谷的不同地段不同地层的分布情况, 为工程设计提供了清晰的三维空间地质及构造资料, 从而为消除工程隐患、提高地下工程建筑的安全性提供了有用的信息。

## 参 考 文 献

- 1 Eric A. de Kemp. Visualization of complex geological structures using 3-D Bezier construction tools. *Computers & Geosciences* 25, 1999. 581-597
- 2 Chai Hejun. 3D visualization of rockmass structure and its application in engineering. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23(2): 217-220
- 3 Mallet. Three-dimensional graphic display of disconnected bodies. *Mathematical Geology*, 1988, 20(8). 977-990
- 4 Pinto V, Casas A. An interactive 3-D gravity modeling program for IBM-compatible personal computers. *Computers & Geosciences*, 1996, 22(5). 535-546
- 5 柯正谊, 何建邦, 池天河. 数字地面模型. 北京: 中国科学技术出版社, 1993