

基于层位标定的钻孔数据快速解译

明 镜, 潘 懋

(北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 现有的钻孔自动建模算法要求对原始钻孔数据进行解译。为解决现有钻孔解译方法效率低、易出错等不足, 提出了基于层位标定的钻孔数据快速解译方法。该方法以层面下沉的方式生成和标定模型中的各个地质界面, 并自动将层面编号记录到钻孔分层点上。解译过程中, 层面的下沉和确定都由解译者灵活控制。人机交互的方式使得专家经验可以很容易地融入解译过程中。基于该方法开发的解译软件, 提供了三维场景中直观的交互式解译工具, 辅助解译者快速、准确地完成钻孔解译。在实际钻孔解译工作中的成功应用, 证明该方法能够很好地处理工程实践中的复杂问题。

关键词: 层位标定; 钻孔解译; 快速解译; 交互建模

中图分类号: TU413.9; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)05-0692-07

作者简介: 明 镜(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为三维地质建模、岩土工程建模。E-mail: eric107@sina.com。

Quick borehole data deciphering based on stratum tagging

MING Jing, PAN Mao

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Raw borehole data have to be deciphered to carry out auto-modeling from boreholes. To overcome the disadvantages in the existing borehole deciphering methods, such as inefficiency and fallibility, a quick borehole deciphering method based on stratum tagging is proposed. It generates and tags each geological surface of the resulted model in manner of sinking the bedding surface, and automatically assigns the number of the surface to the dividing points on each borehole. During the deciphering process, the sinking and confirmation of the bedding surface can be controlled easily by decipherers. The interaction between the human and computers makes it easy to bring expertise into the deciphering process. The deciphering software developed with the method supplies an intuitionistic interactive tool in the three-dimensional scene, which helps decipherers to carry out deciphering quickly and accurately. Successful application to real borehole deciphering has demonstrated its ability to solve complicated problems in engineering practice.

Key words: stratum tagging; borehole deciphering; quick deciphering; interactive modeling

0 引 言

传统的工程地质勘察中, 各种平面地质图和地质剖面图等专业成果图件对于帮助工程师了解勘察区地质情况起了重要且不可替代的作用。随着计算机相关技术的发展, 在信息化和网络化日趋发达的今天, 将工程勘察成果以真三维的方式加以直观显示, 更能够快速、准确地将真实地质情况传达给工程建设的相关技术人员, 极大地提高工作效率, 同时将决策风险降到最低。因此, 三维地质建模技术业已成为地学和计算机交叉领域的一大研究热点^[1-3], 利用三维地质模型进行专业分析和仿真模拟也是工程建设信息化的大势所趋。

作为工程勘察中最常见的成果数据, 钻孔资料对于建立三维地质模型非常重要, 利用钻孔数据直接建

立三维模型也成为国内外学者的研究焦点^[4-7]。其中, Lemon A M 等^[4]以水平地层法 (horizons method) 自动构建三维地质体模型, 该方法可处理地层缺失的情况, 还能够以添加相邻钻孔间剖面的方式加入人工经验, 但不能建立含有断层构造的地质模型。水平地层法成为后来众多基于钻孔数据自动建立三维地质模型方法的基础。朱良峰等的方法与 Lemon 大致相同, 只是改进了其中的地层高程调整方法, 提出了河流侵蚀作用下三维地层模型的构建^[5], 并从理论上探讨了考虑断层构造后对水平地层法的改进^[6]。张煜等^[7]则更加详细地讨论了建模算法中缺失地层的尖灭等处理细节, 并采用了三棱柱体元的数据模型。

1 钻孔解译的必要性

前人基本解决了利用钻孔数据自动建立无断层三维地质模型的难题, 但利用他们的方法(后称钻孔自动建模算法)自动建模时有一个必要前提, 就是要求钻孔数据为已经解译完毕的标准化资料。具体地说, 钻孔自动建模算法要求每个钻孔上的地层分界点都有一个编号, 且这些编号从钻孔顶到底是递增的, 不允许出现重复和逆序排列; 这样, 在生成三维地质界面的时候就能够从每个钻孔上唯一提取一个采样点, 从而实现模型的自动生成。因此, 钻孔数据的解译(标准化)是钻孔自动建模算法的重要前提, 也是钻孔数据预处理中的主要工作, 对于建模结果有直接影响。对于同样的原始钻孔资料按照不同方案进行解译, 会建立出不同的三维模型。

本文提出基于层位标定的钻孔数据快速解译方法, 提供了基于原始钻孔数据的层位标定工具, 方便了用户对钻孔的交互式解译, 极大地提高了从原始钻孔数据到三维地质模型的建模速度和效率。

2 现有解译方法的局限性

为了给钻孔自动建模算法准备数据, 需要对原始的钻孔数据进行预处理。其工作的重点内容是给钻孔上的地层分界点赋编号, 编号规则如前所述。本文将该预处理过程称为钻孔解译。

现有的解译方法不借助任何工具, 是一种纯手工的方式。在建模区域小、地层成层性好、缺失地层少、垂向地层总数小等简单情况下, 手工解译就可以较快较好地解决钻孔解译问题。如果地质情况稍微复杂一些, 比如在较大区域内建模、钻孔数目较多、各钻孔地层之间存在互层、缺失地层较多、垂向地层层数较大、垂向地层出现岩性重复等情况下, 手工解译效率低, 且极易出错。

总结起来, 对稍复杂地质情况的钻孔解译, 现有解译方法有如下局限:

(1) 对解译者的专业素养要求较高。解译者需综合考虑并深入理解全建模区地质情况, 才能够对钻孔上的地层分界点编号。通俗地讲, 解译者必须是地质专家, 需要通过对原始钻孔资料的理解, 在其脑中事先建立包含各个地层三维展布情况的地质模型, 才可能进行正确的解译。

(2) 易出错。即使解译者理解了综合的地质情况, 由于在解译过程中没有直观的辅助工具, 仅凭手工解译, 极易出错。

(3) 效率低。缺乏有效工具, 使得解译效率低,

从而影响了整个建模过程的速度。

3 解译思路和方法

为提高钻孔解译的效率和准确性, 提出基于层位标定的钻孔数据快速解译方法, 不仅在三维环境中为解译者提供直观的辅助工具, 还能够加入他们的思想, 以交互解译的方式按照解译者认为合理的方案完成钻孔解译工作。

3.1 钻孔的二分拓扑数据结构

为方便说明本文解译方法, 先介绍钻孔的二分拓扑数据结构。该数据结构的设计思路与朱合华等^[8]的相同, 将连续的实际钻孔数据抽象为若干按顺序排列的离散点, 每个点实际上代表两个地层的分界点, 也是上下两个相邻地层的分界面的控制点, 将这些离散点称为钻孔点。

钻孔点数据结构如下:

```
Struct DrillPoint {
    long m_ID; //钻孔点的 id
    double m_x; //x 坐标
    double m_y; //y 坐标
    double m_z; //z 坐标
    string m_UpAttribute; //该点以上地层岩性
    string m_DownAttribute; //该点以下地层岩性
    long m_StratumCode; //该点所在层面的编号}

```

图 1 为某钻孔的二分拓扑结构示意图, 其数据在计算机中存储为表 1。

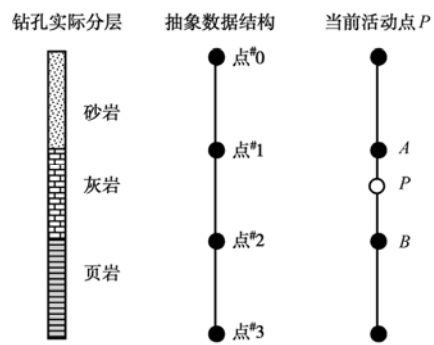


图 1 钻孔的二分拓扑结构示意图

Fig. 1 Topologic dimidiate data structure of scattered points on boreholes

表 1 钻孔点数据信息

Table 1 Scattered point information of boreholes

钻孔点 id	x 坐标	y 坐标	z 坐标	上层岩性	下层岩性	所在层面编号
0	0	0	6	-1	砂岩	0
1	0	0	5	砂岩	灰岩	0
2	0	0	4	灰岩	页岩	0
3	0	0	3	页岩	-2	0

钻孔点 0 在该钻孔的顶部, 其上没有地层, 规定

其上地层岩性为-1。钻孔点3在钻孔底部，其下没有地层，规定其下地层岩性为-2。钻孔点的 $m_StratumCode$ 字段记录了该点所在层面的编号。对于原始钻孔，该编号是未知的，初始化为0。钻孔解译的过程就是给该字段填入合理编号的过程。

单个钻孔由若干个按顺序排列的钻孔点组成。钻孔的数据结构如下：

```
Struct Drill {
    long m_ID; //钻孔的 id
    CArray< DrillPoint , DrillPoint > m_PointArray;
        //包含的钻孔点的数组
    long m_nActivePtIndex; //当前活动点之上的最近
        钻孔点在点数组中的索引号
    int m_nMovePercent; //当前活动点在两个钻孔点
        之间的下沉幅度，以百分比表示，值为 0~100
}
```

其中， $m_nActivePtIndex$ 和 $m_nMovePercent$ 字段是专门为钻孔交互解译过程服务的，在后面将加以介绍。

3.2 思路

假设利用若干原始钻孔数据，已经建立好了三维地质模型，则在该结果模型中，垂向上自上而下存在若干地质界面。每个地质界面为相应地层的上边界或者下边界，也是相邻两个地层的公共层面，它必然经过某个钻孔上的钻孔点（也即地层分界点）。如果自上而下将所有的地质界面按照递增的方式加以编号，并将单个地质界面通过的各个钻孔点给予与其相同的编号，就完成了钻孔解译的工作。

取每个钻孔上最顶端的钻孔点构成点集 T ，将 T 进行 Delaunay 三角剖分即可得到三维空间中的不规则三角网 S_0 ，该三角网可表达整个结果模型的顶面。沿钻孔路径向下调整 S_0 中某些点，得到新的三角网 S_1 ，它可以表达结果模型中的第二个地质界面。重复下调三角网中的点，依次得到新的三角网 S_2, S_3, \dots 。如此操作，直到三角网中每个钻孔点都已经到达其所在钻孔的底端，此时的三角网 S_n 就表达了整个结果模型的底面。至此，下调过程结束（图2）。

钻孔解译思路就是按照上面的方法，以层面下沉的方式生成结果模型中的各个地质界面，并在该过程中自动标定钻孔点所在地质界面，记录下该层面的编号，并存入钻孔点的 $m_StratumCode$ 字段中。

在解译过程中，下沉的层面（后称当前解译层面）和所有钻孔将在计算机模拟的三维场景中耦合显示，当前解译层面也可半透明显示（图2），以此让解译者可以更为直观地观察和理解建模区域的真实地质情况，从而辅助他更快更准确地完成钻孔解译。

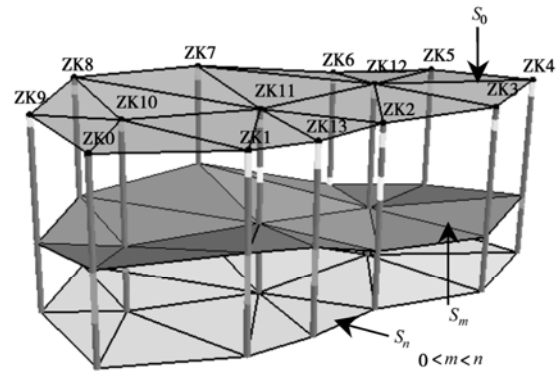


图2 地层层面下沉过程示意图

Fig. 2 Sinking process of stratum surface

本文旨在为解译者提供三维环境中直观的辅助工具，解译的过程是一个人机交互的过程。实际上，在较为复杂的地质环境中，要做到计算机自动解译非常困难，必须加入人的专业知识和经验，才可能准确地对钻孔进行解译。

3.3 当前解译层面和当前活动点

为便于理解，首先介绍当前解译层面和当前活动点。

当前解译层面最初是由每个钻孔最顶端的钻孔点三角剖分而得到的不规则三角网，这些钻孔点集合就是三角网的三角形顶点集合。将当前解译层面上的顶点 P 沿它所在的钻孔 D 下移，当前解译层面也随之下沉，形态也会发生变化。此时的顶点 P 所在的位置就称为钻孔 D 的当前活动点。因此，当前解译层面实际上是由每个钻孔上的当前活动点三角剖分而得到的不规则三角网。

当前活动点的确定。在单个钻孔的数据结构中，设计了 $m_nActivePtIndex$ 和 $m_nMovePercent$ 两个字段，用于记录该钻孔上的当前活动点的位置。 $m_nActivePtIndex$ 用于记录当前活动点之上的最近一个钻孔点在点数组中的索引号。图1中假设 $m_nActivePtIndex$ 对应的钻孔点为 A ，该钻孔上的下一个钻孔点的索引号即为 $m_nActivePtIndex+1$ ，令其表示的点为 B 。 $m_nMovePercent$ 记录了当前活动点 P 的下沉幅度，以百分数来表示，其数值为 $|AP|/|AB| \times 100$ 。如图1所示，当 $m_nActivePtIndex=1$ 且 $m_nMovePercent=40$ 时，就可以确定当前活动点的位置 P 。直观地讲，当前活动点是通过当前解译层面所处的地层层位和从该层位顶部向下的下沉幅度共同确定的。

3.4 算法流程

根据解译思路，算法流程设计如图3。

3.5 简单示例

为了更直观地说明算法各步骤，给出一个非常简

单的例子 (例 1) 对整个解译过程加以简要说明。同样的目的, 将原本在三维场景中的钻孔解译以二维剖面示意图的方式来展现 (图 4)。例 1 中, 待解译的原始钻孔有 6 个, 分别为 ZK0~ZK5 (图 4 (a)), 所有钻孔中一共出现了 4 种不同岩性的地层。

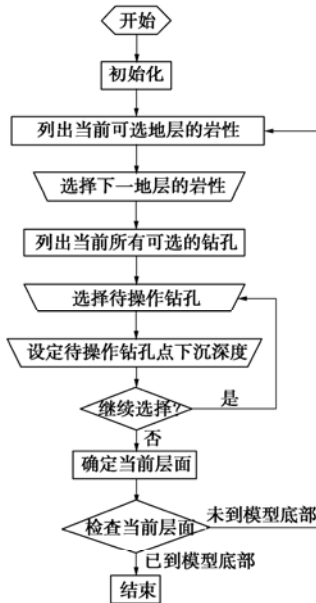


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the algorithm

3.6 算法步骤简介

结合算法流程图和例 1, 对算法各步骤加以简介。

步骤(1)初始化。设置整个解译过程的初始状态。

将各个钻孔的 $m_nActivePtIndex$ 和 $m_nMovePercent$

两个字段置零。此时, 每个钻孔的当前活动点为所在钻孔最顶端的点, 当前解译层面为结果模型的上表面。如图 4 (b), 层面 S_0 被自动确定。当前解译层面为 S_0 。

步骤(2)列出当前可选地层的岩性。遍历当前解译层面所经过的各个钻孔上的钻孔点, 将这些钻孔点的下地层岩性提取出来, 并去除里面的重复岩性, 即可得到当前可选地层的岩性。它代表了当前解译层面以下地层岩性的集合。例 1 中, 当前解译层面为 S_0 时, 当前可选地层的岩性为 M 和 A 。这表示, 如果当前解译层面继续下沉, 将会进入岩性为 M 或者 A 的地层, 但具体是哪种岩性, 需要解译者根据实际地质情况来选择。如图 4 (b), 当前解译层面为 S_0 时, 可以将当前解译层面继续下沉到图 4 (c) 中的 S_1 的位置, 则 S_0 和 S_1 之间的地层岩性为 A ; 也可以将当前解译层面下沉到图 4 (d) 中的 S_1 的位置, 则 S_0 和 S_1 之间的地层岩性为 M 。

步骤(3)选择下一地层的岩性。解译者根据实际地质情况或者其经验, 判断出当前解译层面下一个地层的岩性, 并将结果反馈给算法。例 1 中, 选择 M 作为下一地层岩性。

步骤(4)列出当前所有可选的钻孔。根据步骤(3)中选中的岩性, 找出当前活动点的下地层岩性与选中岩性相同的所有钻孔。这些钻孔上的当前活动点, 才可以在步骤(6)中向下移动。否则, 当前解译层面的下一个地层的岩性将不会与步骤(3)中的选择结果严

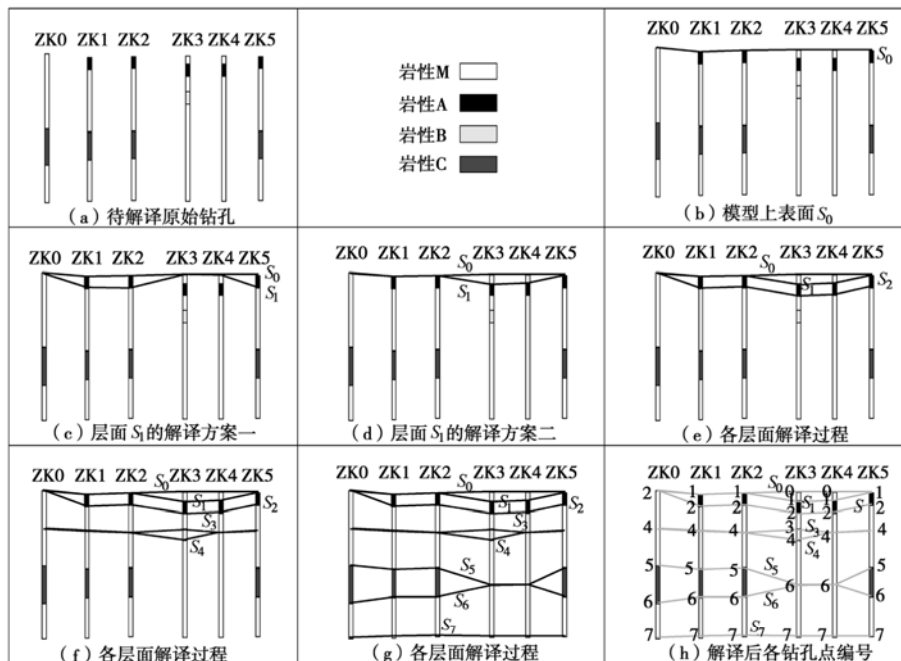


图 4 钻孔解译过程示意图。

Fig. 4 Borehole deciphering process

格相等, 出现与原始钻孔资料相矛盾的解译结果。例 1 中, 当前解译层面为 S_0 时, 若步骤 (3) 的选择结果是岩性 M, 就可以确定钻孔 ZK0, ZK3 和 ZK4 是当前可选的钻孔。

步骤 (5) 选择待操作的钻孔。即选择将要在步骤 (6) 中向下移动的钻孔。步骤 (4) 中列出了所有的可选钻孔, 但并不是所有可选钻孔上的当前活动点都必须下沉, 且下沉幅度可以各不相同。这种设计, 使得解译者可以非常灵活地下调各个钻孔的当前活动点, 得到最合理的解译层面。最灵活的方式就是, 每次只从步骤 (4) 的结果中选择一个钻孔, 到步骤 (6) 中精确设定每一个钻孔上当前活动点的下沉深度。但很多时候, 这种方式是很繁琐且不必要的。每次选择一个还是多个待操作的钻孔, 是解译者根据实际情况来决定的。

步骤 (6) 设定待操作钻孔点的下沉深度。该步骤用于调节步骤 (5) 中选出的钻孔上的钻孔点的下沉深度。为了统一处理, 下沉深度用钻孔上两个钻孔点距离的百分比来表示, 而不用绝对的下沉深度值来表示。0% 表示不下沉, 100% 表示下沉到该钻孔上当前活动点以下第一个钻孔点。一般在处理多值和透镜体时, 下沉幅度才会出现 0% 和 100% 之间的数。

步骤 (5) 和步骤 (6) 可以多次使用, 直到解译者将钻孔上的当前活动点下调到他认为最合适的位置, 然后进入步骤 (7)。例 1 中, 如果 ZK0 下调 0%, ZK3 和 ZK4 下调 100%, 就得到如图 4 (d) 的结果, 当前解译层面就从 S_0 下沉到了 S_1 。

步骤 (7) 确定当前层面。该步骤的作用实际上是将当前解译层面“固化”。此时, 当前解译层面的各个当前活动点可以分为两类。第一类, 当前活动点为所在钻孔上的钻孔点; 第二类, 当前活动点不是所在钻孔点。在该步骤中, 需要在两个钻孔点之间插入一个新的钻孔点, 新钻孔点与当前活动点重合。插入新的钻孔点后, 当前解译层面上每个点均成为了所在钻孔上的钻孔点。把当前解译层面的编号, 赋给这些钻孔点的 $m_StratumCode$ 字段, 以此方式记录下当前解译层面, 完成对它的“固化”。该步骤是层位标定的关键步骤。

当前层面被确定后, 还需要根据当前状态更新各个钻孔的 $m_nActivePtIndex$ 字段, 且将 $m_nMovePercent$ 字段置零。这是为解译的下一个层面所做的准备工作。

步骤 (8) 检查当前层面。如果当前解译层面还没有到达所有钻孔的最底部, 也即没有达到模型底部, 返回步骤 (2), 开始新一层面的层位标定。如果当前解译层面已经到达模型底部, 所有层位标定完毕, 交

互解译过程结束。例 1 中, 经过交互解译, 一共标定了 8 个层面 (图 4 (g))。由于在资料缺乏的情况下, 地质问题往往存在多解性, 这只是例 1 的一种解译方案而已。

3.7 多值问题的处理

前面提到, 当前解译层面是由每个钻孔上的当前活动点三角剖分而得到的不规则三角网, 它不能够形成多值面。因此, 本文的解译方法不能够直接处理含有多值现象的钻孔建模。实际上, 通过添加虚拟层面, 将多值地层在水平方向上切开形成若干个单值地层面, 就可建立含有多值现象的地质模型 (图 5)。本文解译方法按照上面的思路可以间接地处理多值问题。

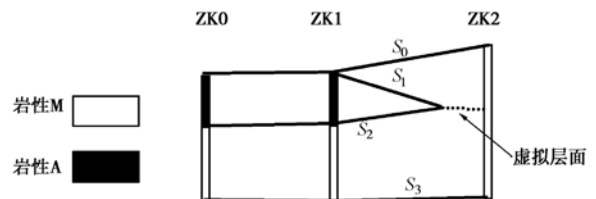


图 5 多值问题处理

Fig. 5 Disposal of multi-value

4 解译后钻孔自动建模

经过交互解译之后, 原始钻孔中所有的钻孔点都会获得一个层面编号。很多时候, 同一个钻孔点可能被多个层面所共用, 钻孔点的 $m_StratumCode$ 字段只会记录下这些层面中最大的那个编号。如例 1 中, 经过交互解译, 钻孔点编号如图 4 (h)。

在利用钻孔自动建模算法对解译后钻孔建模时, 需要找出一个钻孔上属于某个特定层面的钻孔点。假如该层面的编号为 m , 如果钻孔上存在地层编号为 m 的钻孔点, 该点就为查找结果; 如果钻孔上不存在地层编号为 m 的钻孔点, 那么查找结果一定是自上而下遍历钻孔时第一个地层编号大于 m 的钻孔点。例 1 中, 假设需要在 ZK0 上找出层面 S_3 所经过的钻孔点, 但 ZK0 上并没有出现地层编号为 3 的钻孔点 (图 4 (h)), 查找结果为编号为 4 的钻孔点, 因为按照本文的解译方法, 层面 S_3 和 S_4 共同经过该钻孔点。

这样, 钻孔自动建模算法就可以在每个钻孔上取出特定层面的钻孔点, 进一步插值拟合各个地层面。经过层面相交处理、层面高程调整和层面缝合体等几大步骤, 就能够自动生成三维地质模型。

5 建模实例

利用本文的钻孔解译方法, 在北京大学信息地质研究实验室的 GIS2.0 三维可视化平台上开发了钻孔交互解译工具和解译后钻孔自动建模系统。图 6 中的

例 2 共有 14 个原始钻孔数据, 其中包含了例 1 中 6 个钻孔 (ZK0~ZK5)。对例 2 进行快速解译后, 自动建立的模型如图 6 (b) 和 6 (c), 交互解译过程耗时不到 1 min。对例 2 按照另一种方案进行解译, 则可以自动建立如图 6 (d) 和 6 (e) 的三维模型, 交互解译过程耗时约 2 min。对同样的原始钻孔数据, 按照不同方案进行解译, 最后会建立出不同的地质模型, 这体现了出本文解译方法的交互性。交互的解译过程融入了解译者对地质问题的经验和理解, 自动建模系统只是按照解译后的结果重建三维地质模型, 将解译者的思想以直观三维模型的方式展现出来而已。

图 7 为利用北京市某小区的工程地质勘察钻孔建立的三维地质模型。原始数据中共包含 13 个钻孔, 所有钻孔中共含有 15 种不同的岩性, 单个钻孔中平均含有 24 层地层 (图 7 (a))。也就是说, 单个钻孔平均含有 9 个岩性重复的地层, 钻孔间地层出现互层的情况很常见。如果利用手工解译, 将会是一项复杂且困难的工作。利用本文的钻孔交互解译工具对该实际钻孔进行解译, 只用了约 10 min 的时间。从图 7 的结果三维模型中可以看到本文方法对复杂钻孔数据的解译

能力和对多值现象的建模能力。

6 方法分析

6.1 优点

(1) 快速。由于提供了直观的钻孔解译工具, 摆脱了传统解译方法中的手工编号过程, 钻孔解译速度得以大幅提高。

(2) 交互性。实际的地质情况可能比较复杂, 要想利用计算机来对稍复杂的原始钻孔数据进行自动解译几乎不可能。解译者对专业地质问题的分析能力强, 计算机对于程序化的自动操作效率高。通过建立解译者和计算机之间的交互工具, 发挥并结合解译者和计算机各自的优势, 使得本文方法对钻孔解译工作完成得又快又好。

(3) 辅助性。三维环境中直观的解译工具, 很好地辅助了解译者, 帮助他们分析和理解实际地质情况, 并记录下交互式解译过程中的解译结果。正是有了这样的辅助型解译工具, 才使得解译者从单纯的编号工

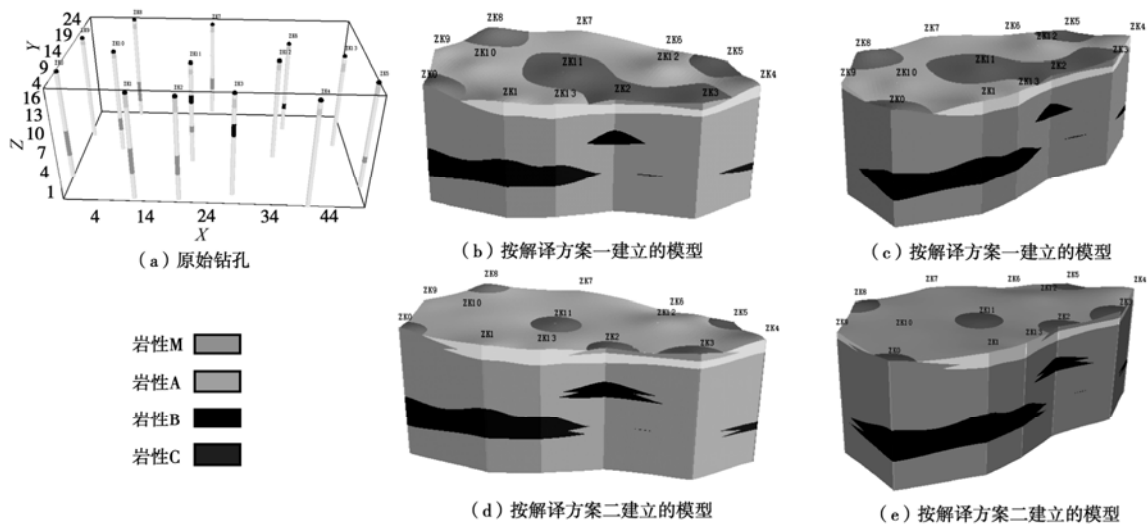


图 6 简单建模示例

Fig. 6 A simple modeling case

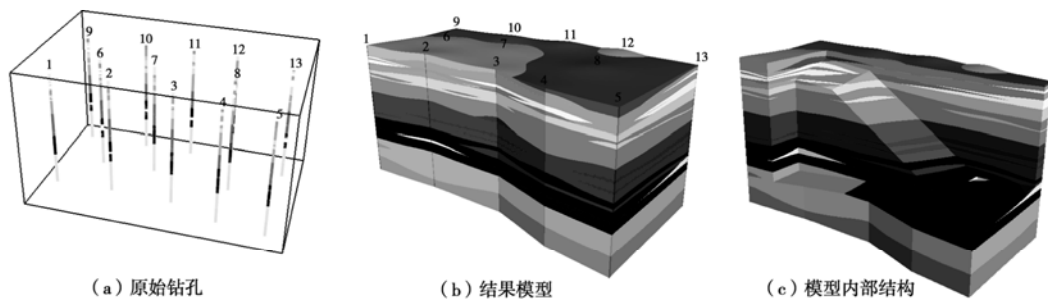


图 7 某地建模实例

Fig. 7 A practical modeling case

作中解脱出来, 全心专注于专业问题的处理。

(4) 灵活。解译过程中, 每个钻孔上的当前活动点都可以有不同的下沉幅度, 使得解译者可以最大限度地调整当前解译层面的形态。

6.2 缺点

(1) 不支持断层。当前解译层面是由每个钻孔上的当前活动点三角剖分而得到的不规则三角网。有断层存在时, 当前解译层面有可能被分割成若干小的层面。目前还不支持有断层存在时的钻孔解译。

(2) 不直接支持多值。由当前解译层面的形成方法可知, 它不可能是多值曲面, 因此目前解译方法不直接支持多值情况的处理。

6.3 该方法的其他特点

(1) 多值处理。添加虚拟层面的策略, 使得该方法虽然不能够直接处理多值问题, 但能够以切割转化多值面为若干单值面的方式, 间接地解决多值问题。

(2) 支持斜井。本文解译方法并不局限于对与竖直钻井的解译。如果原始钻孔为斜井, 方法同样可用。但是对于解译后的斜井数据, 目前的钻孔自动建模算法还不能利用它进行自动建模。

7 结 语

利用钻孔数据自动构建三维地质模型, 要求钻孔数据必须是解译好的标准化数据。本文提出基于层位标定的钻孔数据解译方法, 以交互式解译工具, 辅助解译者快速、准确、方便、灵活地对原始钻孔数据进行解译, 不但能够又快又好地完成钻孔解译工作, 还能够在解译过程中融入专家经验。该解译方法支持斜井解译, 并且可以间接地解决多值问题。文中给出了算法的设计思路和详细描述, 分析了解译方法的优缺点。最后, 基于本文解译方法开发的解译工具, 在北京市某小区的工程地质勘察钻孔解译工作中得到了应用, 证明该方法能够很好地处理工程实践中的复杂问题。

参考文献:

- [1] WU Q, XU H, ZOU X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. *Computers & Geosciences*, 2005, **31**(1): 35 - 43.
- [2] GONG J Y, CHENG P G, WANG Y D. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, **30**(4): 391 - 404.
- [3] WU L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, **30**(4): 405 - 418.
- [4] LEMON A M, JONES N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, **29**(5): 547 - 555.
- [5] 朱良峰, 潘 信. 河流侵淤作用下三维地层模型的构建[J]. *岩土力学*, 2005(增 1): 65 - 68. (ZHU Liang-feng, PAN Xin. Reconstruction of 3D stratigraphic model for fluvial erosion and aggrading action[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005(S1): 65 - 68. (in Chinese))
- [6] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 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, LIU Xiu-guo, et al. Reconstruction of 3D strata model based on borehole data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, **20**(3): 26 - 30. (in Chinese))
- [7] 张 煜, 谭德宝, 孙家柄. 基于竖直钻孔数据的层状地层建模[J]. *长江科学院院报*, 2005(6): 71 - 74. (ZHANG Yu, TAN De-bao, SUN Jia-bing. Three-dimensional stratified stratum modeling based on vertical borehole data[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2005(6): 71 - 74. (in Chinese))
- [8] 朱合华, 吴江斌. 基于 Delaunay 构网的地层 2D, 2.5D 建模[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(22): 4073 - 4079. (ZHU He-hua, WU Jiang-bin. 2D and 2.5D modeling of strata based on delaunay triangulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(22): 4073 - 4079. (in Chinese))