https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.201



# 含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方法

花卫华,郭丹阳\*,刘修国,朱玉华,张 文,宿紫莹

中国地质大学地理信息与工程学院,湖北武汉 430078

摘 要:在三维地质模型构建过程中,由于复杂地质构造运动形成的地层倒转、褶皱、节理等现象,传统的地层连接方法对相 邻钻孔的地层对应考虑不足,从而导致三维模型地层连接不合理.针对该问题,提出一种含复杂倒转的地层层序统一修正与连 接方法,引入逻辑钻孔递归统一地层层序思想,通过地层底板高程插值依据倒转地层的判别规则计算零厚度层的插入位置,统 一钻孔的地层序列及修正标准地层层序,对钻孔中倒转、缺失、重复问题进行建模前的处理.通过讨论地层缺失、倒转、重复等 复杂地层构造情况和实验验证,研究结果表明该方法能够充分解决零厚度层插入位置的二义性和倒转地层判定的二义性问题.该算法能够有效解决复杂地层倒转现象,为三维地质建模中地层连接提供依据.

**关键词:**三维建模;递归统一地层层序;地层倒转;逻辑钻孔;数学模型. **中图分类号:** P628 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1532-11

收稿日期:2022-04-09

## Unified Correction and Connection Method of Stratigraphic Sequence with Complex Inversion

Hua Weihua, Guo Danyang\*, Liu Xiuguo, ZhuYuhua, Zhang Wen, Su Ziying

School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

**Abstract:** In the process of 3D geological model construction, due to the phenomena of stratum inversion, fold and joint caused by complex geological structure movement, the traditional stratum connection method does not consider the stratum corresponding to adjacent boreholes, which leads to the 3D model construction error. According to the problem, it puts forward a kind of complex stratigraphic sequence and unified revision and connection methods, introducing logic recursive unified stratigraphic sequence of ideas, drilling through stratigraphic math discriminant rule interpolation based on reverse calculation of layer thickness of zero insertion position, so as to unify all the drilling stratigraphic sequence and the revised standard stratigraphic sequence, inverted in the borehole, loss, repeated problems for processing. The results show that this method can fully solve the ambiguity of zero thickness layer insertion position and the ambiguity of reversed formation determination through the discussion of complex formation structures such as stratum missing, inversion and duplication and experimental verification. The algorithm can effectively solve complex stratum inversion and provide scientific basis for stratum connection in 3D geological modeling.

Key words: 3D modeling; recursively unified stratigraphic sequence; stratigraphic inversion; logic drilling; mathematical models.

引用格式:花卫华,郭丹阳,刘修国,朱玉华,张文,宿紫莹,2023.含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方法.地球科学,48(4):1532-1542.

Citation: Hua Weihua, Guo Danyang, Liu Xiuguo, ZhuYuhua, Zhang Wen, Su Ziying, 2023. Unified Correction and Connection Method of Stratigraphic Sequence with Complex Inversion. *Earth Science*, 48(4):1532-1542.

基金项目:国家重点研发计划课题(No. 2019YFC0605102);国家自然科学基金项目(No. 41972307).

作者简介:花卫华(1977-),副教授,博士,主要从事多约束下复杂地质模型快速构建与定量分析研究.ORCID:0000-0002-2255-7411. E-mail:huaweihua@cug.edu.cn

<sup>\*</sup>通讯作者:郭丹阳,E-mail:706489906@qq.com

## 0 引言

三维地质建模是运用计算机三维图形技术把 以点、线为基本形式的钻孔、剖面图、分区图、地质 图、中断图等勘探资料在三维空间里面综合起来, 重新恢复地下地质界面和地质体的空间形态和组 合关系的一种建模技术(陈兵等,2020; 贾龙, 2021; 戴粤和戴吾蛟,2022).三维地质模型快速、动 态、精细和全息构建,奠定了三维可视化表达、分 析、模拟、设计和决策基础,可支持城市地下资源和 空间评价、规划、开发和利用,为地质环境和地质灾 害分析、评估、开发和利用提供数据支持和技术支 持,促进城市地质调查工作,为城市规划、假设、管 理、运行和智慧城市建设服务(Li et al.,2021; 邹进 超等,2021; 习龙等,2022).

目前,构建三维地质模型的数据源主要由钻 孔、地质图、剖面(Hou et al.,2021;李健等,2022)、 中断图等数据组成(杨波等,2015;刘鑫等,2021), 其中钻孔数据能够直观、准确地表示地层在垂向的 分布特点(钟频,2017;Kim et al.,2020),因此基于 钻孔数据进行三维地质建模一直是国内外研究的 热点,其中地层连线方法主要有基于空间插值方 法、复杂地层情况(地层倒转、缺失、重复等)分类处 理和子钻孔递归方法.

(1)基于空间插值方法.可将三维地质建模分 为显式建模与隐式建模(刘乐和杨智,2019).①目前 显式建模方法通常结合空间插值方法(如:反距离 加权(Liu et al., 2021)、样条插值、克里格插值(Che and Jia, 2019)、多项式插值等进行三维地质体曲面 重建,再基于面或体模型的地质体构建方法进行三 维地质体模拟,唐丙寅等(2015)提出了一种基于钻 孔依靠专家经验构建地质剖面,接着对剖面间的地 层连线进行 Kriging 插值地层面模型, 形成基于钻孔 的点→线→面→体快速递进三维地质建模方法.王 甲怡等(2021)采用空间自协方差插值法、尖灭点处 理算法及Loop细分算法,生成插值加密虚拟钻孔、 尖灭处理虚拟钻孔及细分光滑虚拟钻孔,基于稀疏 实测钻孔和虚拟钻孔构建三维地质模型.该方法计 算耗时且建模效果不理想,难以动态更新,对于地 层缺失严重区域拟合效果差,不能处理地层倒转等 复杂情况.②隐式建模通过隐式函数进行地表重建, 恢复三维矿体模型,其中隐函数插值方法主要包括 离散光滑插值(DSI)、径向基函数(RBF)、Hermite RBF (HRBF)、移动最小二乘(MLS)、各向异性 RBF (ARBF)、广义RBF (GRBF)等(Zhong et al., 2019a, 2019b, 2020; Guo et al., 2021). 王博等 (2021)提出了一种基于原始钻孔数据的广义径向 基函数插值矿体隐式建模方法,将地质约束转化为 不同的插值约束和约束规则,利用距离场计算地质 约束下的隐函数,从而应用于矿体的构造建模.隐 式建模与传统的显式建模方法相比,隐式建模方法 具有网格质量高、过程可重复、全局不确定性低和 便于动态更新等优点.

(2)在复杂地层情况分类处理.杜子纯等(2019) 提出了一种识别钻孔分层中的倒转、缺失、重复等特殊情况,将同一岩性中倒转与正常情况加以区分,通 过添加零厚度层,从而统一钻孔的地层序列,构建各 钻孔分层间的对应关系,从而降低存在复杂地层情 况的地层连线错误率.该类方法可以解决简单的倒 转情况,对于复杂的倒转现象存在零厚度层插入位 置的二义性和倒转地层判定的二义性.

(3)在基于子钻孔递归方法方面,李璐等 (2018)提出了基于统计学理论确定标准地层层序, 首次引入子钻孔递归思想,利用表面建模方法,自 下而上逐层创建三维地层模型,该思想适应地层尖 灭、地层超覆、透镜体等复杂地质构造,但对于标准 层序的确定及倒转地层的确定考虑欠佳.

为解决地层连接中存在地层倒转、地层重复、 地层缺失等问题,本文提出了一种含复杂倒转的地 层层序统一修正与连接方法,能够充分解决零厚度 层插入位置的二义性、倒转地层判定的二义性,从 而减少建模过程中人工干预的工作量,减少地层对 应的错误率,提高建模速度和精度.

### 1 钻孔数据分析

本文建模的数据来源主要为钻孔数据、钻孔分 层数据、标准地层版本数据及标准地层数据.钻孔 数据用于描述垂直钻孔的地理位置、高程、孔深等 相关信息,钻孔分层数据用于描述垂直钻孔的钻孔 ID、钻孔编号、标准地层版本、地层编码、顶板埋深、 底板埋深等相关信息,标准地层版本表用于描述标 准地层版本 ID、项目名称等相关信息,标准地层表 用于描述标准地层版本 ID、地层级别、地层编码、地 层名称、材质编号、材质颜色、地层颜色等相关信息. 为了方便后续算法的叙述,将引入候选地层及构建 地层概念.





表1 各钻孔候选地层

Table 1 Candidate formations for drilling

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
$S_k$	В	В	С

将钻孔 Z<sub>i</sub>中未被确定地层对应连接关系的地 层中的最顶层地层称为候选地层,候选地层中最新 地层称为构建地层.如图1所示,模型中共有3个钻 孔,分别为Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub>,其中A、B、C、D为不同属性的 地层代号,其标准地层自上而下的顺序为 A、B、C、D.自上而下,选取钻孔 Z<sub>i</sub>的候选地层(S<sub>k</sub>) 如表1所示,则依据标准地层表顺序,选取的构建地 层(S)为B.

## 2 含复杂倒转的地层层序统一修正 与连接方法

#### 2.1 预处理候选地层

预处理候选地层是分辨该候选地层是否正常的主要依据,并对异常候选地层进行初步处理,方 便后续倒转地层的判别.

(1)计算钻孔 Z<sub>i</sub>当前候选地层(S<sub>k</sub>)为构建地层
(S)时的中心点坐标 CS<sub>ik</sub>(X<sub>ik</sub>, Y<sub>ik</sub>)及深度取值范围
([S<sub>ik min</sub>, S<sub>ik max</sub>]),并计算深度取值范围
([S<sub>ik min</sub>, S<sub>ik max</sub>])的并集范围(U[min, max]).

若候选地层(S<sub>k</sub>)为构建地层(S)则说明该候选 地层为正常地层,则计算该候选地层的中心点坐标 及深度取值范围,为后续异常层插值做准备.取钻 孔  $Z_i$ 中当前候选地层 $(S_k)$ 为构建地层(S)的钻孔, 记 钻 孔  $Z_i$ 的 候 选 地 层  $(S_k)$ 中 心 点 坐 标 为  $CS_{ik}(X_{ik}, Y_{ik})$ (其中 $X_i$ 为对应钻孔 $Z_i$ 的x坐标, $Y_{ik}$ 为对应钻孔 $Z_i$ 的 $H_i - (\frac{BD_{ik} - TD_{ik}}{2.0})$ ,其中 $H_i$ 为钻 孔 $Z_i$ 的孔口高程, $BD_{ik}$ 为候选地层的底板埋深, $TD_{ik}$ 为候选地层的顶板埋深).

如图2所示,取钻孔Z<sub>1</sub>地层B的中心点坐标及 深度取值范围,取钻孔Z<sub>2</sub>地层B的中心点坐标及深 度取值范围,并取深度取值范围的并集范围,如表2 所示.

(2)以钻孔 Z<sub>i</sub>当前候选地层(S<sub>k</sub>)不为构建地层
(S)的钻孔为中心搜索参考钻孔(RZ<sub>i</sub>(i>=1&&:i<=n)),并筛选符合要求的地层中心点坐标 RCS<sub>ik</sub>(X<sub>ik</sub>,Y<sub>ik</sub>),用中心点坐标插值计算该构建地层(S)在钻孔 Z<sub>i</sub>中的插值深度,记插值对应地层为插值地层(R).

取钻孔( $Z_i$ )当前候选地层( $S_k$ )不为构建地层 (S)的钻孔,对应坐标为 $Z_i(x, y)$ ,以该点为中心查 询缓冲半径内的非当前建模钻孔为参考钻孔 ( $RZ_i(i \ge 1 \& \& i < = n$ )),其中缓冲半径为钻孔 ( $Z_i$ )与参与当前建模的钻孔之间的最远距离.取参 考钻孔中在并集范围(U[min,max])内与当前构建 地层一致的地层的中心点坐标 $RCS_{ik}(X_{ik}, Y_{ik})$ (其





表2 钻孔Z<sub>1</sub>及Z<sub>2</sub>的中心点坐标及深度取值范围

Table 2Center point coordinates and depth range of bore-<br/>holes  $Z_1$  and  $Z_2$ 

	$Z_1$	$Z_2$
候选地层	$S_1 = B$	$S_2 = B$
中心点坐标	$CS_{1B}(X_{1B},Y_{1B})$	$CS_{2B}(X_{2B},Y_{2B})$
深度取值范围	$\left[ S_{1B\min}, S_{1B\max} \right]$	$\left[ S_{2B\min}, S_{2B\max} \right]$
并集范围	$[S_{1B\min}, S_{1B\max}]$ t	$J[S_{2B\min}, S_{2B\max}]$

 $\left(\frac{BD_{ik}-TD_{ik}}{D}\right)$ ,其中 $H_i$ 为钻孔 $RZ_i$ 的孔口高程, BD<sub>ik</sub>为候选地层的底板埋深,TD<sub>ik</sub>为候选地层的顶 板埋深.如图 $3a, RZ_1, RZ_2, RZ_8$ 中的B地层均在深 度取值范围且与当前构建地层一致,取其中心点 坐标.

中 $X_{ii}$ 为对应参考钻孔 $RZ_{i}$ 的x坐标, $Y_{ii}$ 为 $H_{i}$ 一

用中心点坐标 $RCS_{ik}(X_{ik}, Y_{ik})$ 插值计算该构建 地层(S)在钻孔Z;中的插值深度,记插值对应地层 为插值地层(R).如图 3b,基于中心点坐标  $RCS_{ik}(X_{ik}, Y_{ik})$ 插值计算该构建地层(S)在钻孔  $Z_3$ 中的插值点位置所对应的插值地层为B.

(3)记钻孔Zi候选地层与插值地层之间的地层 为逻辑钻孔,用于判断是否需要递归调用预处理候 选地层.若存在多个逻辑钻孔则递归调用预处理候 选地层,否则依据倒转地层的数学判别规则判别地 层倒转、缺失、重复.

如图 3c 所示,Z<sub>3</sub>的候选地层与插值地层之间的 地层为C,则Z。其逻辑钻孔为(c1)所示,Z4的候选 地层与插值地层之间的地层为C、D,则Z。其逻辑钻 孔为(c2)所示.当前建模过程中存在两个逻辑钻孔 c1、c2,则这些逻辑钻孔需要递归调用预处理候选地 层,否则依据倒转地层的数学判别规则判别地层倒 转、缺失、重复.

#### 2.2 倒转地层的数学判别规则

(1)若钻孔Z的候选地层下方无构建地层,则 在候选地层上方直接插入缺失层.

如图 4a 所示,当前的构建地层为地层 B,钻孔  $Z_3$ 的候选地层为C,基于候选预处理过程,钻孔 $Z_3$ 的插值地层(R)为地层C,且候选地层下方无构建 地层,则在候选地层C上方直接插入缺失地层B.

(2)若钻孔Z的候选地层下方有构建地层,则 分情况讨论.

①如果插值地层(R)即为构建地层(S),则判定 当前候诜地层( $S_i$ )和插值地层(R)之间的地层(不 包含R,包含S<sub>k</sub>)均为倒转地层,并对钻孔Z,中当前 候洗洗地层与构建地层一致的候洗地层上方补充 零厚度层.

如图4b所示,钻孔Z。中插值地层为地层B,与 构建地层一致,则判定候选地层与插值地层之间的 地层C、D均为倒转地层,由于钻孔Z,和Z。当前候 选地层即为构建地层,则在候选地层上方插入零厚 度层C.D.

②如果插值地层(R)不为构建地层(S), 查找周 围钻孔候选地层下方的插值地层(R),计算周围钻 孔的插值地层与该钻孔的插值地层相交深度(RH). 查找该钻孔候洗地层下方的构建地层,并计算该构 建地层与周围候选地层为构建地层的钻孔的相交 深度(SH).比较插值地层相交深度(RH)与构建地 层相交深度(SH).

如果插值地层相交深度(RH)大于构建地层相 交深度(SH),则说明插值地层为正常地层,该钻孔 存在当前构建地层缺失,则在候选地层上方补充零 厚度层.

如图 4c 所示,钻孔 Z<sub>3</sub>的插值地层为地层 C,计 算钻孔 Z3的插值地层与钻孔 Z1的插值地层的相交 深度为0,钻孔Z<sub>3</sub>的插值地层与钻孔Z<sub>2</sub>的插值地层 的相交深度为RHz2,则插值地层相交深度(RH)为  $RH_{z2}$ . 查找钻孔  $Z_3$ 的构建地层的位置, 与  $Z_1$ 的构建 地层(当前的构建地层和候选地层一致)的相交深 度为SH<sub>z1</sub>,与Z<sub>2</sub>的构建地层(当前的构建地层和候 选地层一致)的相交深度为0,则构建地层相交深度 (SH)为SHz1,且RH>SH.则插值地层C为正常地 层,判断为地层缺失,在钻孔Z。候选地层上方插入 零厚度层B.







Fig.3 Pretreated formation candidate



图 4 判定逻辑钻孔倒转地层的数学判别规则示例



如果插值地层相交深度(RH)小于构建地层相 交深度(SH),则说明插值地层为倒转地层,则在候 选地层为构建地层的钻孔 Z<sub>i</sub>中候选地层上方补充 零厚度层.

如图 4d 所示,钻孔  $Z_2$ 的插值地层为地层 C,计 算钻孔  $Z_2$ 的插值地层与钻孔  $Z_1$ 的插值地层的相交 深度为 0,钻孔  $Z_2$ 的插值地层与钻孔  $Z_3$ 的插值地层 的相交深度为 0,则插值地层相交深度 (RH)为 0.查 找钻孔  $Z_2$ 的构建地层的位置,与  $Z_1$ 的构建地层(当 前的构建地层和候选地层一致)计算相交深度为  $SH_{z1}$ ,与  $Z_3$ 的构建地层(当前的构建地层和候选地 层一致)计算相交深度为  $SH_{z3}$ ,则构建地层相交深 度(SH)为  $SH_{z1}$ + $SH_{z3}$ ,且 SH > RH.则钻孔  $Z_2$ 插 值地层 C为倒转地层,判断为地层倒转,在  $Z_1$ 和  $Z_3$ 的候选地层上方插入零厚度层 C.

#### 2.3 含倒转地层的标准层序处理与统一修正

基于对钻孔数据进行候选地层预处理及倒转 地层数学判别后,通过添加零厚度层的方式,将所 有的钻孔统一为完全相同的地层层序,在此基础 上,需要根据该地层层序对标准地层表进行修订, 将标准地层的层序关系与钻孔数据的地层层序保 持一致.

依据章节2.1及2.2含复杂倒转的地层层序统 一修正与连接方法,对每一个钻孔数据通过倒转地 层的数学判定原则,通过添加零厚度层的原则,将 所有的钻孔数据的地层层序处理一致,并按照该地 层层序对标准地层表进行修正,修订过程及结果如 图5所示.

2.4 倒转地层不同类型的地层连接分析实例

2.4.1 地层缺失情况讨论 地层缺失是指地层记

录中比较大的明显的中断,通常表现为地层之间的 不整合或假整合,主要是由于该地区未曾有过该地 层的沉积或是沉积后在上覆地层沉积前遭受了侵 蚀.在钻孔中主要表现为部分钻孔存在某地层,而 其他钻孔不存在,在本文方法中,存在地层缺失的 钻孔以在缺失位置添加零厚度层的方式进行处理, 从而与周围真实存在的地层进行连接,如图6,Z2钻 孔缺失B地层,Z3钻孔缺失C地层,经过本文方法统 一地层层序的结果为[A,B,C,D].图6b中将缺失 地层添加到对应钻孔的对应位置,使所有的钻孔具 有统一的地层层序,不考虑尖灭位置的情况下,将 所有的钻孔分层的顶底板进行连接,其连接结果如 图6c所示,其地层缺失的连接结果满足依靠专家经 验进行手工连接的一般规律且与实际情况保持一 致性.

**2.4.2** 地层倒转情况讨论 地层倒转是指因构造运动而造成的岩层底面在上、顶面在下,即老岩层在上、新岩层在下的反常顺序.按本文所述的方法倒转地层会被当作异常层处理,在周围钻孔相应位

置插入零厚度层,从而与该倒转地层连接,如图7所示,钻孔Z<sub>3</sub>相对于钻孔Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>,B、C层倒转了,通过本文方法判定,钻孔Z<sub>3</sub>的C地层为异常层,在钻孔Z<sub>1</sub>和Z<sub>2</sub>的B地层上方插入零厚度层C,统一后的地层层序为[A,C,B,C,D].图7b为依据本文的判定方法统一后的地层层序,不考虑尖灭位置的情况下,将所有的钻孔分层的顶底板进行连接,其连接结果如图7c所示,其地层缺失的连接结果满足依靠专家经验进行手工连接的一般规律且与实际情况保持一致性.

2.4.3 地层重复情况 讨论地层重复是指某些钻 孔中不同深度存在同样岩性的地层,在传统地层连 接方法中无法判定相邻钻孔间的地层连接规则.使 用本文含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方 法处理此问题,重复地层会根据情况与周围钻孔建 立对应地层连接关系.如图 8a所示,钻孔 Z<sub>2</sub>存在重 复地层 B,钻孔 Z<sub>1</sub>、Z<sub>3</sub>只有一个地层 B,通过本文判 定方法,在钻孔 Z<sub>3</sub>的 C地层上方插入零厚度层 B,在 钻孔 Z<sub>1</sub>的D地层上方插入零厚度层 B,将所有的钻



#### 图5 标准地层层序修正过程

Fig. 5 Standard stratigraphic sequence correction process



图6 地层缺失情况讨论

Fig. 6 Discussion of stratigraphic absence



#### 图 7 地层倒转情况讨论 Fig.7 Discussion of stratigraphic inversion



Fig.8 Discussion of stratigraphic repetition

孔统一地层层序为[A,B,C,B,D],从而将钻孔 Z<sub>2</sub> 中的两个地层B区分开来,如图 8b为依据本文的判 定方法统一后的地层层序,不考虑尖灭位置的情况 下,将所有的钻孔分层的顶底板进行连接,其连接 结果如图 8c 所示,其地层缺失的连接结果满足依靠 专家经验进行手工连接的一般规律且与实际情况 保持一致性.

## 3 数据验证

基于上述含复杂倒转的地层层序统一修正与 连接方法的研究成果,笔者将该方法应用于含有复 杂倒转的某城市的三维地质建模及剖面图自动生 成中,该地区涉及工程地质钻孔516个,涉及地层79 个,如图9a所示,从钻孔数据可明显发现存在地层 倒转、缺失、重复等现象.通过C++语言和VS平 台进行三维地质建模及剖面图自动生成的研发,并 基于钻孔数据进行三维地质建模,如图9b所示.进 行模型切割,其切割结果如图 9c 及 9d 所示.在整个 建模过程中,用户只需要选择钻孔数据及相关参 数,设置约束条件,软件即可自动生成三维地质模 型.本文采用定量评价方法对模型精度进行评价, 其评价方式主要包括:(1)计算生成模型地层面与 参与建模的钻孔的地层顶板的吻合率;(2)计算生 成模型切割剖面与专家绘制剖面的吻合率.其中生 成模型地层面与参与建模的钻孔的地层顶板的吻 合率为 98.7%,其误差主要由于建模精度和地层光 滑程度影响;生成模型切割剖面与专家绘制剖面的 吻合率为 86.5%,其主要依据沿专家绘制剖面中所 涉及的钻孔切割三维地质模型,并依据三维与二维 互相转换算法转换至二维剖面进行比对,其地层连 接情况吻合度较高,其误差主要由于尖灭位置计算 影响.

利用该方法绘制剖面图与专业人员绘制的剖面进行比对,其满足实际情况,与专业人员绘制的



图 9 三维地质建模及切割展示 Fig.9 3D geological modeling and cutting display

剖面图在地层连接情况、钻孔间对应连接关系保持 一致,说明该算法有很好的准确度和可信度.如图 10a和10b所示分别举例地层缺失、地层倒转、地层 重复现象在实际剖面图中的连接效果.分别采用该 区域的算法生成的剖面与专业人员绘制的剖面图 进行比对,如图10c~10f所示,其中图10c和10e为 专业人员绘制的剖面图,图10d和10f为算法生成剖 面图,由于专业人员绘制的剖面图采取向下延伸一 定深度作为剖面图最终成图深度,而本实验采取钻 孔深度作为最终剖面图成图深度,因此特别标注蓝 色区域内为对比区域,方便进行对比实验结果是否 达到剖面可信度标准,经过地层连接情况对比,说 明基于该算法的剖面连接可信度较高,具有很好的 现实意义.

## 4 结语

(1)文针对由于复杂地质构造运动导致地层倒转、缺失、重复等现象引起在地层连接过程中容易 出现错误的问题,以地层沉积新老关系为依据,提 出一种含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方 法,引入逻辑钻孔递归统一地层层序思想,通过插 值计算零厚度层的插入位置,从而统一所有钻孔的 地层序列及修正标准地层层序,对钻孔中倒转、缺 失、重复问题进行处理,明确了不同钻孔中各地层 的倒转判定数学原则及对应规则,降低了地层连线 的错误率及对专家经验的依赖,更为省时省力.

(2)本算法适用于存在地层倒转、地层缺失、地 层重复现象的三维地质建模及剖面图智能地层连 接过程中,思路清晰,易于通过编程实现,具有鲁棒 性好、运行效率高、可操作性强的特点,通过数据验 证该方法能够充分解决零厚度层插入位置的二义 性和倒转地层判定的二义性问题,也存在对于地形 起伏较大、区域插值计算零厚度的位置存在倒转判 定误差,需要人工干预进行地层线的连接才能得到 正确结果.

(3)该算法依托于国家重点研发计划课题"城市地下全要素信息集成与智能建模技术"(2019 YFC0605102)及国家自然科学基金项目 (41972307)"多元数据联合影响下复杂地质模型快速构建方法".前者意在研究构建城市地下全要素信息多尺度语义表达模型和一体化组织框架,突破全要素语义表达下的高实用性三维模型智能构建与可视化技术,建立城市地下全要素智能建模与信息服务平台.感谢相关项目给予本算法在框架及技术等方面的资助.后者意在研究面向地质领域的多元地质数据联合影响理论方法,确定构造联合影响函数













图 10 含地层倒转的剖面图连接展示及对比实验

Fig.10 Displaying and comparison test of section drawing with stratum inversion

1541

的数学条件,实现基于联合影响的复杂地质模型自动构建方法,充分约束地质知识、地质构造、地质产状、地球物理等全部来源信息.

#### References

- Che, D. F., Jia, Q. R., 2019. Three-Dimensional Geological Modeling of Coal Seams Using Weighted Kriging Method and Multi-Source Data. *IEEE Access*, 7: 118037-118045. https://doi. org/10.1109/AC-CESS.2019.2936811
- Chen, B., Zhu, Y.B., Zhang, Y., 2020. Research on EVS-Based 3D Geological Modeling. *High Speed Railway Technology*, 11(6): 6-10, 18(in Chinese with English abstract).
- Dai, Y., Dai, W.J., 2022. Three-Dimensional Geological Modeling Based on Surfer FLAC3D and Its Verification. Geotechnical Investigation & Surveying, 50(3): 43-46(in Chinese with English abstract).
- Du, Z.C., Liu, Z., Ming, W.H., et al., 2019. Unified Stratigraphic Sequence Method for Three Dimensional Urban Geological Modeling. *Rock and Soil Mechanics*, 40(S1): 259-266(in Chinese with English abstract).
- Guo, J. T., Wang, X., Wang, J., et al., 2021. Three-Dimensional Geological Modeling and Spatial Analysis from Geotechnical Borehole Data Using an Implicit Surface and Marching Tetrahedra Algorithm. *Engineering Geology*, 284: 106047. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106047
- Hou, W. S., Liu, H. G., Zheng, T. C., et al., 2021. Hierarchical MPS-Based Three-Dimensional Geological Structure Reconstruction with Two-Dimensional Image(s). *Journal of Earth Science*, 32(2): 455-467. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1443-x
- Jia, L., 2021. Research on 3D Geological Modeling Based on GOCAD. Inner Mongolia Coal Economy, (7): 190-191 (in Chinese with English abstract).
- Kim, M., Kim, H. S., Chung, C. K., 2020. A Three-Dimensional Geotechnical Spatial Modeling Method for Borehole Dataset Using Optimization of Geostatistical Approaches. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24 (3): 778-793. https://doi. org/10.1007/s12205-020-1379-1
- Li, J., Wang, X.Y., Liu, P.R., et al., 2022. Three-Dimensional Geological Hybrid Interpolation Method Combining Boreholes and Geological Sections. *Journal* of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 54 (3): 1-9(in Chinese with English abstract).

- Li, L., Liu, X.G., Wu, W.B., 2018. Key Technology of 3D Stratum Modelling Based on Borehole Data. *Rock and Soil Mechanics*, 39(3): 1056-1062(in Chinese with English abstract).
- Li, N., Li, C. B., Chu, W. K., et al., 2021. Uncertainty Visualisation of a 3D Geological Geometry Model and Its Application in GIS-Based Mineral Resource Assessment: A Case Study in Huayuan District, Northwestern Hunan Province, China. *Journal of Earth Science*, 32 (2): 358-369. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1434-y
- Liu, L., Yang, Z., 2019. Comparative Study on Spatial Interpolation Methods of 3D Geological Modeling Based on Borehole Data. *Energy Technology and Management*, 44(3): 162-164(in Chinese with English abstract).
- Liu, X., Li, J.X., Hu, L.T., 2021.3D Geological Modeling of Complex Geological Mining Area Based on Multi-Source Data Fusion. *Geotechnical Investigation & Sur*veying, 49(12): 35-39(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Zhang, Z. L., Zhou, C. Y., et al., 2021. An Adaptive Inverse-Distance Weighting Interpolation Method Considering Spatial Differentiation in 3D Geological Modeling. *Geosciences*, 11(2): 51. https://doi.org/ 10.3390/geosciences11020051
- Tang, B.Y., Wu, C.L., Li, X.C., et al., 2015. A Fast Progressive 3D Geological Modeling Method Based on Borehole Data. *Rock and Soil Mechanics*, 36(12): 3633-3638(in Chinese with English abstract).
- Wang, B., He, K., Zhong, D.Y., 2021. Automatic Construction Method of Constraint Rules for Implicit Modeling of Geological Bodies Based on Borehole Data. *Gold Science and Technology*, 29(3): 345-354(in Chinese with English abstract).
- Wang, J.Y., Cheng, Y.Y., Ma, S., et al., 2021. City 3D Geological Model Based on Virtual Boreholes. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 49(6): 46-52(in Chinese with English abstract).
- Xi, L., Ni, Y.G., He, J., et al., 2022. Three-Dimensional Geological Modeling and Resource Estimation of the Marine Sand and Gravel Orebodies Based on GMS. *Ge*ology and Exploration, 58(2): 429-441(in Chinese with English abstract).
- Yang, B., Hu, H.F., Zhao, P.F., et al., 2015. Multivariate Data-Based 3D Geological Modeling Study. *Geology of Anhui*, 25(4): 298-300, 317(in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. Y., Wang, L. G., Bi, L., 2020. Extended Her-

mite Radial Basis Functions for Sparse Contours Interpolation. *IEEE Access*, 8: 58752-58762. https://doi.org/ 10.1109/ACCESS.2020.2982802

- Zhong, D. Y., Wang, L.G., Lin, B.I., et al., 2019a. Implicit Modeling of Complex Orebody with Constraints of Geological Rules. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(11): 2392-2399. https://doi.org/ 10.1016/s1003-6326(19)65145-9
- Zhong, D. Y., Zhang, J., Wang, L. G., 2019b. Fast Implicit Surface Reconstruction for the Radial Basis Functions Interpolant. *Applied Sciences*, 9(24): 5335. https://doi. org/10.3390/app9245335
- Zhong, P., 2017. Research on 3D Geological Modeling Technology and Application Based on Virtual Drilling Technology. *Modern Informationn Technology*, 1(3): 100– 101(in Chinese with English abstract).
- Zou, J.C., Hu, J.K., Li, J.Y., 2021. Research on 3D Geological Modeling of Mines Based on 3D Mine. *Mineral Exploration*, 12(3): 718-724(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈兵,朱泳标,张燕,2020. 基于 EVS 的三维地质建模研 究.高速铁路技术,11(6):6-10,18.
- 戴粤,戴吾蛟,2022. 基于 Surfer 平台的 FLAC3D 三维地质 建模方法与模型验证.工程勘察,50(3):43-46.
- 杜子纯,刘镇,明伟华,等,2019.城市级三维地质建模的统 一地层序列方法.岩土力学,40(增刊1):259-266.

- 贾龙, 2021. 基于 GOCAD 的三维地质建模研究. 内蒙古煤 炭经济, (7): 190-191.
- 李健, 王心宇, 刘沛溶, 等, 2022. 融合钻孔与地质剖面的三 维地质混合插值方法. 郑州大学学报(理学版), 54(3): 1-9.
- 李璐,刘新根,吴蔚博,2018.基于钻孔数据的三维地层建 模关键技术.岩土力学,39(3):1056-1062.
- 刘乐,杨智,2019.基于钻孔数据的三维地质建模空间插值 方法的对比研究.能源技术与管理,44(3):162-164.
- 刘鑫, 李季秀, 胡立堂, 2021. 基于多源数据融合的复杂地 质矿区三维地质建模. 工程勘察, 49(12): 35-39.
- 唐丙寅,吴冲龙,李新川,等,2015.一种基于钻孔地质数据 的快速递进三维地质建模方法.岩土力学,36(12): 3633-3638.
- 王博,贺康,钟德云,2021.基于钻孔数据的地质体隐式建 模约束规则自动构造方法.黄金科学技术,29(3): 345-354.
- 王甲怡,成远湲,马莎,等,2021.基于虚拟钻孔的城市三维 地质模型构建方法.工程勘察,49(6):46-52.
- 习龙,倪玉根,何健,等,2022.基于GMS软件的海砂矿体
   三维地质建模和资源量估算.地质与勘探,58(2):
   429-441.
- 杨波, 胡海风, 赵鹏飞, 等, 2015. 基于多元数据的三维地质 建模研究. 安徽地质, 25(4): 298-300, 317.
- 钟频,2017.基于虚拟钻孔技术的三维地质建模应用研究. 现代信息科技,1(3):100-101.
- 邹进超,胡加昆,李金勇,2021.基于3Dmine的矿山三维地 质建模研究.矿产勘查,12(3):718-724.