

文章编号: 1674—8247(2025)02—0015—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.003

一种基于泊松重建的三维地质面推演算法

张可军 赵 龙 罗永亮

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:三维地质面的生成是地质建模的关键,通常需要通过钻孔、物探、勘探等资料生成地质面,这不可避免地耗费大量人力和物力。本文提出了一种基于产状推演的三维地质面生成算法,在缺少钻孔和物探资料的情况下,也能准确生成三维地质面。该算法首先利用产状推算出地质模型的大致走向,生成大量点云及其法向量;然后,利用泊松重建方法对点云进行全局重建,生成连续的三维地质表面。与传统的插值方法相比,泊松重建能够更好地处理不规则和稀疏的数据分布,提高模型的精度。研究结果表明,该算法在复杂地质条件下具有较高的适用性,可有效支撑铁路选线、地质勘探和资源评估等领域的应用。

关键词:三维地质建模;泊松重建;地质面推演;点云数据处理

中图分类号:U212.4

文献标志码:A

An Algorithm for Three-dimensional Geological Surface Extrapolation Based on Poisson Reconstruction

ZHANG Kejun ZHAO Long LUO Yongliang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The generation of three-dimensional geological surfaces is crucial for geological modeling and typically requires data from drilling, geophysical exploration, and surveys, which inevitably consumes substantial manpower and resources. This paper proposed a three-dimensional geological surface generation algorithm based on structural attitude extrapolation, capable of accurately generating three-dimensional geological surfaces even in the absence of drilling and geophysical data. The algorithm first utilized geological attitudes to estimate the general trend of the geological model, generating a large number of point clouds and their normal vectors. Then, it employed the Poisson reconstruction method for global reconstruction of the point clouds, producing continuous three-dimensional geological surfaces. Compared with traditional interpolation methods, Poisson reconstruction better handles irregular and sparse data distributions, thus enhancing the accuracy of the model. Study results demonstrate that the algorithm has high applicability under complex geological conditions and can effectively support applications in railway route selection, geological exploration, and resource evaluation.

Key words: three-dimensional geological modeling; Poisson reconstruction; geological surface extrapolation; point cloud data processing

三维地质建模是一种基于数据驱动和数学算法的地质空间分析方法^[1-2]。该方法以地质认知和地质规

律为指导,通过构建地质体的几何形态,附加物理属性,实现地质体在空间分布特征的描述。其关键在于

收稿日期:2024-10-22

作者简介:张可军(1967-),男,教授级高级工程师。

引文格式:张可军,赵龙,罗永亮.一种基于泊松重建的三维地质面推演算法[J].高速铁路技术,2025,16(2):15-21.

ZHANG Kejun, ZHAO Long, LUO Yongliang. An Algorithm for Three-dimensional Geological Surface Extrapolation Based on Poisson Reconstruction [J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):15-21.

利用少数已知点来推测未知区域的几何形态及分布规律。目前,常用的算法有克里金插值算法(Kriging)^[3]、离散光插值算法(DSI)^[4]和距离反比插值算法^[5]等。然而,这些算法严重依赖地质勘察数据,在地质数据匮乏区域,无法精准地构建三维地质模型。例如,在铁路选线的预可研阶段,设计人员只能通过历史资料或产状数据来推演三维地质模型。

为解决这一问题,研究者提出了基于产状推演的地质模型建模方法^[6-9],该方法充分利用地表观测和已知的产状信息,对地下地质体进行合理的预测和建模。其主要方法包括显式方法和隐式建模方法,其中显式方法包括二维剖面推演法和三维插值法^[10]等;隐式方法包括基于地质规则的推演、基于结构地质学的建模,以及机器学习^[11-15]和数据驱动方法等。

本文提出了一种基于泊松重建的三维地质面推演算法。该算法核心流程主要包括2个阶段:首先,基于地层产状数据推算出地质模型的大致走向,并根据该走向内插出地质面的点云模型及每个点的法向量信息。其次,采用泊松重建方法对点云进行全局重建,最终生成三维地质面模型。与其他方法相比,该算法能够更好地处理不规则和稀疏的数据分布,且具有算法简单、效率高、适用性和复用性强的特点,可有效支撑铁路选线、地质勘探和资源评估领域的应用。

1 数据检查与准备

1.1 DEM数据

1.1.1 DEM数据格式

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是一种采用数字化方式表示地球表面地形起伏的模型。该模型通过一系列具有空间坐标(x, y)和高程(z)值的栅格(网格)或矢量数据表示地形高程信息。主要特点包括:

(1) 栅格格式

DEM通常以栅格数据形式存在,每个像元(像素)都有1个对应的高程值。

(2) 分辨率

DEM的空间分辨率表示每个像元代表的实际地面距离,分辨率越高,地形细节表现越丰富。

DEM数据被广泛应用于地理信息系统(GIS)、遥感、城市规划、水文分析、工程设计和环境科学等领域。

1.1.2 DEM数据检查

为确保DEM数据的准确性和可靠性,需要对其进行系统的检查和验证。目前主要采用三维可视化检查和数据精度检查。

三维可视化检查是通过将DEM数据以三维形式

展示,利用3D渲染软件(如ArcGIS、Global Mapper)查看地形起伏是否符合实际情况,如图1所示。该方法可识别的问题包括数据缺失、高程异常、数据存在空值或断裂和数据拼接错误等。

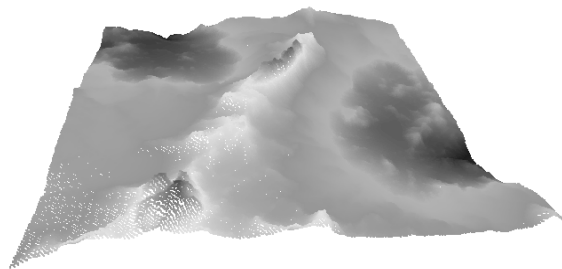


图1 三维可视化检查图

数据精度检查是通过将DEM数据与高精度测量数据(如GPS测量点、LiDAR数据)进行比较,计算误差。数据精度检查集中反映了DEM数据的质量。

1.2 带有产状信息的地质边界线

1.2.1 地质边界线格式

地质边界线是2个岩石层之间的边界线,作为矢量线地质边界线具备几何特点和属性字段,其中几何特点包含地质边界线上点的坐标、线号、线序号。属性字段包括左右岩石层信息,接触类型及产状信息。而接触类型包括整合接触、不整合接触和断层接触。产状信息包括产状的走向、倾向和倾角。地质边界线的格式如表1所示。

表1 地质边界线格式表

线号	序号	顶点坐标		地层信息		产状信息/(°)		接触类型
		x/m	y/m	左	右	倾向	倾角	
1	1	x_1	y_1	A1	A2	D1	S1	T1
1	2	x_2	y_2	A1	A2	D2	S2	T1
2	1	x_3	y_3	A2	A3	D3	S3	T2
2	2	x_4	y_4	A2	A3	D4	S4	T2
...

注:线号相同的行在同一条线上,线序号表示线上顶点的顺序

将表1转化为json文件如下:

```
{
  "type": "FeatureCollection",
  "features": [
    {
      "type": "Feature",
      "properties": {
        "Left": "A1",
        "Right": "A2",
        "Contact_Type": "T1",
        "Dip_Dir": D1,
        "Dip_Angle": S1
      }
    }
  ]
}
```

```

    },
    "geometry": {
      "type": "LineString",
      "coordinates": [
        [x1,y1],
        [x2,y2], ...
      ]
    },
    ...
  ]
}

```

1.2.2 地质边界线检查

地质边界线数据作为地质制图和地质建模中的重要基础数据,其准确性和完整性直接影响地质分析和工程应用的可靠性。对地质边界线数据的检查主要涉及空间位置关系的检查和拓扑关系的检查。

空间位置关系检查包括检查是否采用统一的坐标参考系和投影。通过将地质边界线与高分辨率遥感影像、地形图或实地测量数据进行叠加,检查空间位置的准确性。同时实地核查边界线与实际地质特征(如断层、接触带)的空间匹配程度。

拓扑关系检查包括线段的连续性检查和拓扑错误检查。线段连续性检查旨在确定边界线是否存在断裂、重复或悬空,保证线要素的连续性。拓扑错误检查主要识别并修正自相交、重叠等拓扑错误。

1.3 建模边界

1.3.1 建模边界格式

地质建模边界线是在地质建模过程中,用于定义模型空间范围的封闭矢量线。它明确了地质建模的边界,限定了模型中地质体、地层和构造的空间分布范围。地质边界线的数据格式通常为 shp 或 dwg 格式。

1.3.2 建模边界检查

与地质边界线数据检查一致,建模边界的检查也涉及空间位置关系检查和拓扑关系检查。空间位置关系检查与地质边界线检查相同。拓扑关系检查则增加了边界闭合性检查和顶点重合检查。边界闭合性主要检查建模边界是否闭合,顶点重合检查主要检查边界上是否存在重复的点,如果存在重复的点,则将这些重复的点去掉。

2 产状推演算法

2.1 地质边界线与 DEM 匹配

将地质边界线与 DEM 匹配是指将地质边界线准

确地叠加在地形表面上,如图2所示。由于地质边界线的产状表现为地质边界线在地表的走向,因此,将地质边界线叠加在 DEM 之上十分必要。

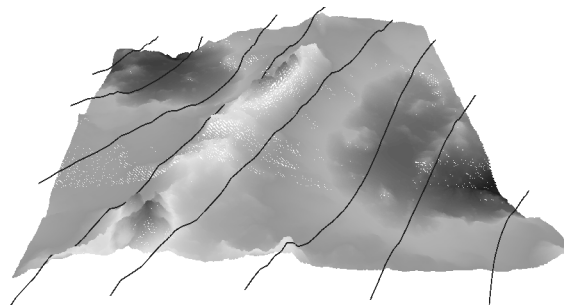


图2 地质边界线与 DEM 匹配图

地质边界线与 DEM 匹配算法有多个,包括三角网插值算法^[16], Kriging 插值法^[17],最小二乘法拟合^[18]和地形分析法^[19]等,本文采用了三角网插值算法。

2.2 曲线平面内插

2.2.1 数据归一化

由于每个地质边界线点的数量不同,因此需要对地质边界线进行重采样,进而获取点数相同的曲线,为曲线等距离内插提供数据支持。

设曲线 L_k 上的点集合 C_k 为 $C_k = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$, 其中,每个点 C_i 的坐标为 (x_i, y_i) , 则相邻点之间的距离可表示为:

$$d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

式中: d_i ——曲线 L_k 中第 i 段的长度(m);

x_i ——曲线 L_k 中第 i 个点的 x 坐标(m);

y_i ——曲线 L_k 中第 i 个点的 y 坐标(m)。

则累积距离为:

$$D_i = \sum_{j=1}^i d_j \quad (2)$$

式中: D_i ——曲线 L_k 从第 0 个点到第 i 个点的长度(m);

d_j ——曲线 L_k 中第 j 段的长度(m)。

将累积距离归一化,使得 D_i 的范围从 0 到 1:

$$D_{\text{nom},i} = \frac{D_i}{D_N} \quad (3)$$

式中: $D_{\text{nom},i}$ ——曲线 L_k 中的距离比值;

D_i ——曲线 L_k 从第 0 个点到第 i 个点的长度(m);

D_N ——曲线 L_k 的总长度(m)。

2.2.2 线性函数插值

线性函数是指给定一个一维输入数组 D (累积距离)和相应的二维输出数组 C_k , 构建一个函数,该函数可以 D 在数组 C_k 的区间内插值。

设 D_k 为累积距离函数数组, $D_k = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$, 由式(3)计算得到, C_k 为曲线 L_k 上的点集合。当需要对某个新值 u 进行插值时, 首先应确定 u 位于 D_k 中的哪两个已知点之间。假设 u 位于 d_i 和 d_{i+1} 之间(即 $d_i \leq u < d_{i+1}$), 则可以使用线性插值式(4)计算对应的曲线点:

$$f(u) = C_i + \frac{(C_{i+1} - C_i)}{(D_{i+1} - D_i)}(u - D_i) \quad (4)$$

式中: $f(u)$ ——插值后的坐标, 二元组(m, m);

D_i ——曲线 L_k 中的距离比值, 由式(3)得到;

u —— $u_i = \frac{i}{N-1}$, i 为 $(i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$, N

为曲线上点的总数。

由式(4)可知, 线性函数实际上是通过已知的累积距离和曲线点的线性关系创建的插值函数, 在给定的范围内可以进行平滑的插值。这种方法在重采样和曲线平滑中非常有效, 确保了插值结果的连续性和一致性。

2.2.3 曲线等距离内插

为方便在两条曲线之间创建平滑的过渡或中间曲线, 需在给定的两条曲线之间生成一组均匀分布的插值曲线, 如图3所示。

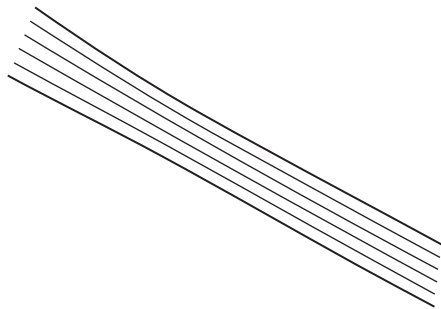


图3 曲线的等距离插值图

内插的曲线个数 N 为:

$$N = \left\lceil \frac{T}{f} \right\rceil \quad (5)$$

式中: N ——内插曲线的个数(个);

T ——2个内插曲线端点的距离(m);

f ——平均插值的距离(m)。

则:

$$C_{in}(t) = (1-t)C_k + tC_{k+1} \quad (6)$$

式中: $C_{in}(t)$ ——在 t 点的平面坐标内插值(m, m);

C_k ——曲线 k 和曲线 $k+1$ 在 t 点的坐标(m, m);

t —— $t_i = \frac{i}{N+1}$ ($i = 1, 2, \dots, N$)。

式(6)通过线性插值生成了 N 条在两条曲线之间

均匀分布的中间曲线。通过变化的参数 t , 可以实现从一条曲线到另一条曲线的平滑过渡。

2.3 二次曲线内插

2.3.1 数据投影

设已知曲线 C_k 和 C_{k+1} 的最低点(即 z 值最小的点)分别为 B_k 和 B_{k+1} , 过 B_k 点做1个平面 PL , PL 垂直于曲线 C_k 在 B_k 处的切线方向 K 。在平面 PL 内, 做平面直角坐标系, 坐标系原点坐标为 B_k , Y 轴为地理坐标系的 Z 轴, 坐标系 X 轴可通过右手坐标系获得, 具体为:

$$X = Z \times K \quad (7)$$

式中: X ——坐标系 x 轴方向;

Z ——坐标系 z 轴方向, 取 $(0, 0, 1)$;

K —— PL 垂直于曲线 C_k 在 B_k 处的切线方向。

则空间中的任意一点的坐标 P 投影到 PL 平面中的坐标为:

$$\begin{cases} x = X \times (P - B_k) \\ y = Y \times (P - B_k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: (x, y) ——坐标 P 投影到 PL 平面坐标;

X ——由式(7)得到;

K —— PL 垂直于曲线 C_k 在 B_k 处的切线方向。

2.3.2 二次曲线方程求取内插曲线高程

为防止在2个曲面相交过程中形成尖锐的山谷线, 本文采用二次曲线的方法过渡。二次曲线可将山谷线光滑, 避免产生尖锐的山谷线, 设二次曲线的方程为:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (9)$$

式中: $f(x)$ ——曲线方程;

x ——曲线方程 x 方向变量;

a ——取 $\frac{y_{k+1} - \tan(\vartheta) \times x_{k+1}}{x_{k+1}^2}$;

b ——取 $\tan(\vartheta)$;

c ——取0值;

ϑ ——原点产状值(弧度);

(x_{k+1}, y_{k+1}) ——坐标 P 投影到 PL 平面坐标。

2.3.3 法线重建

由于泊松重建需要用到每个点的法向量作为约束, 因此, 需要计算原始曲线和内插曲线每个顶点的法向量。

对于任意一条原始地质边界曲线 L , O 为 L 上的点, O 点的产状为 a , OX 为边界向量 $(u_x, u_y, 0)$, OZ 为地理坐标系的高程坐标轴 $(0, 0, 1)$, 如图4所示。

则 O 点法线 ON 为 OZ 绕 OX 顺时针旋转 a 角度, 公式为:

$$ON = (u_y \sin(a), -u_x \sin(a), \cos(a)) \quad (10)$$

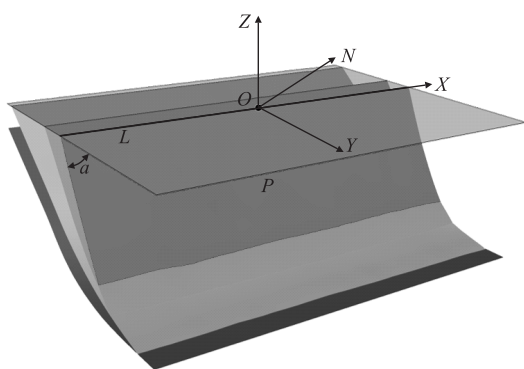


图4 地质边界线法向量重建图

式中: ON —— O 点法线向量 ON ;

a ——旋转角度(弧度);

u_x, u_y —— OX 边界向量的 x 值和 y 值。

可根据式(9)求得任意一条插值得到的曲线 L' , 则其法线在平面中的投影为:

$$ON = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2ax_0 + b)^2}}}, \frac{-\frac{1}{2ax_0 + b}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2ax_0 + b)^2}}} \right] \quad (11)$$

式中: ON ——法线在平面中的投影坐标向量;

a, b ——式(9)中的参数;

x_0 ——原点 O 的 x 值。

3 泊松重建

3.1 泊松重建的基本流程

泊松重建技术^[20]是一种用于从点云数据生成连续三维表面模型的方法。该技术可用于处理稀疏和不规则的点云数据,生成光滑且具有物理一致性的表面。然而,如果仅使用原始地质边界曲线及其法线,则曲面内部会生成不规则的洞。因此,在构建曲面过程中,需要加入一定密度的点,才能构建出符合地质规律的地质分界面。泊松重建流程如图5所示。

首先进行数据准备,检查栅格数据、地质边界数据和建模边界数据。将检查后的数据根据建模边界裁切,并对地质边界线进行 DEM 匹配。接着,先对匹配后的数据在平面内进行插值,然后在高程方向进行二次曲线插值,并对地质边界曲线和插值曲线进行法线重建。至此,可以得到足够密度的点数据和法向量数据。最后,使用泊松曲面算法生成地质曲面。

3.2 泊松重建的数学原理

泊松重建是基于泊松方程和隐式表面表示的三维重建方法,而泊松方程是泊松重建的核心,可以表示为:

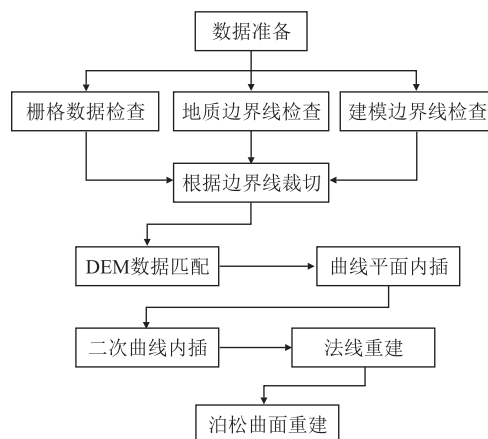


图5 泊松重建流程图

$$\nabla^2 f = p \quad (12)$$

式中: ∇^2 ——拉普拉斯算子,表示场的曲率;

f ——隐式表面函数;

p ——法向量散度 $p(P) = \nabla n(p)$;

$n(p)$ —— P 点的法向量。

隐式表面是一种用标量场定义的表面,对于一个点 P ,如果定义一个标量函数 $f(P)$,则可以通过等值面 $f(P) = 0$ 表示表面,这种表示方式的优势在于其能够自然处理复杂的拓扑结构。

当得到 p 之后,可以利用数值方法求解泊松方程。求解的目标是找到一个标量场 f ,使得其拉普拉斯算子与散度 p 相等,通常可以通过有限差分法、有限元法或其他数值求解方法来实现。求解泊松方程后,得到标量场 f 。隐式表面由等值面 $f(P) = 0$ 表示,在实际应用中,可以利用三维网格生成算法将隐式表面转换为显式的三维表面网格。

泊松重建的优点包括能够有效处理噪声和稀疏数据,能够生成平滑且物理一致的表面,可适应复杂的几何结构和拓扑结构。

4 实验结果分析

4.1 实验数据说明

本文采用某工程项目数据,包括 DEM 数据(TIF 格式,面积约 100 km^2)、地质边界线(SHP 格式,结合实际采集和影像判读)以及建模边界数据(DWG 格式,根据工程实际需要)。数据边界呈正方形,该区域内有海拔超过 $1\,000 \text{ m}$ 的高山,且高山呈南北走向,由向斜挤压而成。地质边界从南向北横穿整个建模区域,地质边界数据具有 3 个属性,分别为:边界左侧地质年代编号、边界右侧地质年代编号和地层的产状。经实地调研,边界产状约呈 30° 的角。地质边界线则需要根据项目人为划定。

4.2 实验对比

4.2.1 精度对比

为验证插值数据精度,本文将泊松重建后数据与原始已知点进行对比,如表2、表3所示。

表2 泊松重建法表

点号	X 坐标差 /m	Y 坐标差 /m	Z 坐标差 /m	方向差 /(°)	角度差 /(°)
1	0.03	0.02	0.05	0.01	0.4
2	0.01	0.04	0.10	0.04	0.2
3	0.08	0.03	0.12	0.03	0.5
4	0.05	0.04	0.09	0.04	0.3
5	0.02	0.05	0.11	0.03	0.1
6	0.06	0.12	0.05	0.02	0.3

表3 三角内插法表(m)

点号	X 坐标差 /m	Y 坐标差 /m	Z 坐标差 /m	方向差 /(°)	角度差 /(°)
1	0.04	0.05	0.19	0.17	0.7
2	0.02	0.02	0.12	0.13	0.5
3	0.04	0.01	0.12	0.15	1.0
4	0.03	0.05	0.10	0.12	1.3
5	0.03	0.08	0.08	0.09	0.9
6	0.02	0.09	0.04	0.10	0.6

由表2、表3可知,两种算法的坐标差并不明显,因为本方法和传统的三角内插法均是严格按照点的坐标推算出的。而对于产状的方向差和角度差,本方法要明显优于三角内插法,因为三角内插法是按平面线性内插的,中间内插缺少过渡,造成推算的数据与真实数据偏差过大,这点在效果对比中尤为明显。

4.2.2 效果对比

与数据直接推算产状相比,本算法可以推演出光滑的曲线,如图6所示。

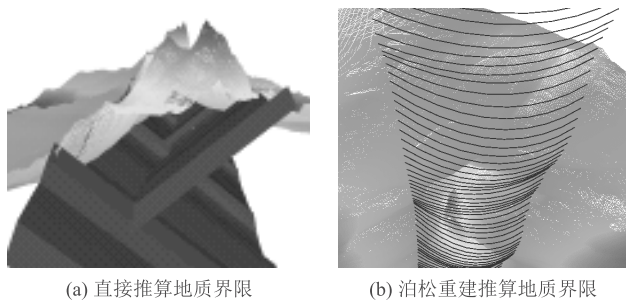


图6 泊松重建推算地质界限对比图

由图6可知,基于泊松重建推算出的地质界限更加光滑,主要是由于本算法采用了二次曲线内插了地质边界面的高程。

另外,基于泊松重建的地质界限推算方法是一种一次性生成表面的技术。与传统方法不同,这种推算方法的核心在于从点云数据中直接生成连续的三维表面。然而,在实际应用中,直接推算地质面往往需要先

计算出2个面,然后再通过求交和合并这2个面来形成最终的地质界限。这一过程不仅涉及复杂的几何运算,还需要进行大量的数值计算以确保最终生成的面符合实际地质特征。因此,相较于单一面生成的方法,基于泊松重建的推算方法在算法上更加复杂,计算时间也更长。这种复杂性使得在实时应用或大规模地质建模中,使用该方法可能会受到性能的限制。因此,在选择地质推算方法时,需要综合考虑精度、计算效率和应用场景,以便更好地满足实际需求。

5 结论

本文提出了一种基于泊松重建的三维地质面推演算法,通过地质边界线和地质边界线的产状推演出足够密度的点云数据,将点云数据转化为连续的三维地质模型,成功实现了地质面重建。实验结果表明,该算法在处理复杂地质条件下表现出较高的精度。

通过多组实验数据的分析,发现该算法能够有效填补原始地质边界曲线和法线信息所产生的不规则洞穴,从而生成光滑且具有物理一致性的地质表面。同时,泊松重建算法在重建过程中的计算效率良好,适用于大规模数据集的处理。

此外,本文通过与其他重建方法的对比分析,验证了泊松重建在处理不规则和稀疏点云数据时的优势。该算法在实际地质勘探、资源评估和城市规划等领域具有良好的应用前景。

未来的研究可集中于进一步优化算法的计算效率,探索与深度学习等先进技术的结合,以提升模型的重建精度和适用性。综上所述,基于泊松重建的三维地质面推演算法为地质建模提供了一种有效的工具,具有广泛的应用潜力和发展前景。

参考文献:

- [1] 郭福钟,郑博文,祁生文,等. 三维地质建模技术与方法综述[J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 1143-1153.
GUO Fuzhong, ZHENG Bowen, QI Shengwen, et al. A Review of 3D Geological Modeling Technology and Methods[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 1143-1153.
- [2] 陈麒玉,刘刚,何珍文,等. 面向地质大数据的结构-属性一体化三维地质建模技术现状与展望[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 51-58.
CHEN Qiyu, LIU Gang, HE Zhenwen, et al. Current Situation and Prospect of Structure-attribute Integrated 3D Geological Modeling Technology for Geological Big Data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 51-58.
- [3] 杨鹏程,文卫兵,王彦兵,等. 基于遗传-克里金插值算法的岩土勘探工程三维地质建模[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 85-92.

- YANG Pengcheng, WEN Weibing, WANG Yanbing, et al. Three-dimensional Geological Modeling of Geotechnical Exploration Engineering Based on Genetic-Kriging Interpolation Algorithm[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2021, 43(4): 85–92.
- [4] MALLET J L. Discrete Smooth Interpolation in Geometric Modelling[J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(4): 178–191.
- [5] 康帅, 季灵运, 焦其松, 等. 基于地基 LiDAR 点云数据插值方法的对比研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(4): 400–404.
- KANG Shuai, JI Lingyun, JIAO Qisong, et al. Comparative Study of Point Cloud Data Interpolation Based on Ground-based LiDAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(4): 400–404.
- [6] 薛源, 胡丹, 白林, 等. 基于产状数据的三维岩层分界面模拟[J]. 中国科技论文, 2015, 10(3): 327–330.
- XUE Yuan, HU Dan, BAI Lin, et al. Simulation on 3D Rock Stratum Interface Based on Orientation Data [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(3): 327–330.
- [7] 徐诗宇. 基于地质图的断层构造发育过程解析与时空建模[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- XU Shiyu. Analysis and Spatio-temporal Modeling of Fault Structure Development Process Based on Geological Map [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.
- [8] 黄北秀, 李丽慧, 薛媛, 等. 准噶尔盆地东北缘平地泉组岩体结构特征与三维模型构建[J]. 工程地质学报, 2024, 32(4): 1234–1248.
- HUANG Beixiu, LI Lihui, XUE Yuan, et al. Rock Mass Structure Characteristics and 3D Modeling of the Pingdiquan Formation, Northeast Margin of the Jung-Gar Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(4): 1234–1248.
- [9] 孟令瀚, 崔光耀. 水平产状砂质板岩铁路隧道洞室成形爆破参数研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(6): 21–25.
- MENG Linghan, CUI Guangyao. Study on Blasting Parameters of Cavern Formation of Railway Tunnel in Horizontal Occurrence Sandy Slate[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 21–25.
- [10] 乔金海, 潘懋, 金毅, 等. 基于DEM 三维地层建模及一体化显示[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 34–37.
- QIAO Jinhai, PAN Mao, JIN Yi, et al. 3D Strata Modeling and Integrative Visualization Based on DEM[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(2): 34–37.
- [11] 毕征发. 人工智能三维地震解释与地质建模方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- BI Zhengfa. Research on Artificial Intelligence Three-dimensional Seismic Interpretation and Geological Modeling Method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [12] 刘彦锋, 段太忠, 黄渊, 等. 沉积过程模拟驱动下的深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 226–237.
- LIU Yanfeng, DUAN Taizhong, HUANG Yuan, et al. Deep Learning-based Geological Modeling Driven by Sedimentary Process Simulation[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 226–237.
- [13] 黄旭日, 代月, 徐云贵, 等. 基于深度学习算法不同数据集的地震反演实验[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(6): 16–25.
- HUANG Xuri, DAI Yue, XU Yungui, et al. Seismic Inversion Experiments Based on Deep Learning Algorithm Using Different Datasets[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(6): 16–25.
- [14] 刘彦锋, 张文彪, 段太忠, 等. 深度学习油气藏地质建模研究进展[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 235–241.
- LIU Yanfeng, ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, et al. Progress of Deep Learning in Oil and Gas Reservoir Geological Modeling[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 235–241.
- [15] 韦子文. 基于改进蚁群算法的路径规划算法研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 69–74.
- WEI Ziwen. A Study on Path Planning Algorithm Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 69–74.
- [16] 张永亮, 朱美正, 李欣, 等. 基于稠密与稀疏高程点的DEM 插值算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(1): 167–174.
- ZHANG Yongliang, ZHU Meizheng, LI Xin, et al. Algorithms of DEM Interpolation Based on Dense and Sparse Elevation Points[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(1): 167–174.
- [17] 陈锡超, 宁芊. 基于 Kriging 方法的动态地形反向多级细化研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(9): 171–175.
- CHEN Xichao, NING Qian. Research on Kriging-based Multi-level Backward Refinement of Dynamic Terrain Modeling[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(9): 171–175.
- [18] 刘昌军, 叶长锋, 赵雨, 等. 基于激光扫描技术的复杂工程挖填方计算[J]. 水电能源科学, 2011, 29(12): 95–97, 131.
- LIU Changjun, YE Changfeng, ZHAO Yu, et al. Excavation and Embankment Volume Calculation for Complicated Engineering Based on Laser Scanning[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(12): 95–97, 131.
- [19] 李胜天, 徐贵兴. DEM 构建及地形特征线提取研究[J]. 安徽地质, 2022, 32(4): 365–370.
- LI Shengtian, XU Guixing. A Study on DEM Construction and Topographic Feature Line Extraction[J]. Geology of Anhui, 2022, 32(4): 365–370.
- [20] 唐为峰, 高照祥, 田强, 等. 基于布料模拟滤波和点云泊松曲面重建技术的土方量计算方法研究[J]. 城市勘测, 2024(3): 128–133.
- TANG Weifeng, GAO Zhaoxiang, TIAN Qiang, et al. Research on Earthwork Quantity Calculation Method Based on Cloth Simulation Filter and Point Cloud Poisson Surface Reconstruction Technology [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2024(3): 128–133.