



移动扫码阅读

李娟莉,杜文勇,谢嘉成,等.煤层数字高程模型构建与动态修正方法[J].煤炭科学技术,2022,50(7):59-66.
LI Juanli, DU Wenyong, XIE Jiacheng, *et al.* Coal seam digital elevation model construction and dynamic correction method[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 59-66.

煤层数字高程模型构建与动态修正方法

李娟莉^{1,2}, 杜文勇^{1,2}, 谢嘉成^{1,2}, 王学文^{1,2}

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:为解决在有限煤层地质数据条件下难以构建高精度煤层的难题,提出了一种基于多源煤层数据的煤层 DEM (Digital Elevation Model, 数字高程模型) 构建与动态精细修正方法。首先,基于采区煤层变化特征,提出结合双轨扫掠与加权融合的初始煤层 DEM 构建方法,通过该方法所构建的煤层 DEM 能够反映煤层的变化趋势,垂直方向上的模型节点 RMSE (Root Mean Square Error, 均方根误差) 与 MAE (Mean Absolute Error, 平均绝对误差) 分别达到 0.25 m 与 0.2 m 以下;其次,引入采区内离散分布的煤层地质数据,在原有模型基础上计算煤层 DEM 中相应节点处高程误差值,基于这些误差值通过拟合的方法得到残差曲面,并通过残差曲面对 DEM 节点进行整体性偏移。通过该方法对煤层 DEM 进行修正后,模型 RMSE 与 MAE 降低至 0.14 m 与 0.12 m 水平;最后,引入工作面上连续煤层地质数据,在该工作面处产生新的模型分段面,对同一区域的 DEM 进行划分,新划分的区域中重新构建区域煤层 DEM,覆盖原有 DEM,从而达到煤层 DEM 的动态精细修正。通过该方法对煤层 DEM 进行修正后,模型局部 RMSE 与 MAE 均达到 0.12 m 以下,模型精度水平能够为无人工作面的实现提供可靠的地质信息保障基础。

关键词:煤层数字高程模型;地质建模;双轨扫掠;加权融合;拟合残差曲面;动态精细修正

中图分类号:TD171 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)07-0059-08

Coal seam digital elevation model construction and dynamic correction method

LI Juanli^{1,2}, DU Wenyong^{1,2}, XIE Jiacheng^{1,2}, WANG Xuewen^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of constructing high-precision coal seam with limited geological data, a coal seam DEM (Digital Elevation Model) construction and dynamic fine correction method based on multi-source coal seam data was proposed. Firstly, based on the characteristics of coal seam change in mining area, an initial coal seam DEM construction method combining double-track sweep and weighted fusion is proposed. The DEM constructed by this method can reflect the change trend of coal seam, and the Model nodes RMSE and MAE in the vertical direction are less than 0.25 m and 0.2 m respectively. Secondly, the coal seam geological data distributed discretely in the mining area are introduced to calculate the elevation errors of corresponding nodes in coal seam DEM on the basis of the original model. Based on these errors, the residual surface is obtained by fitting, and the DEM nodes are integrated offset by the residual surface. The RMSE and MAE of coal seam DEM are improved to 0.14 m and 0.12 m after the DEM of coal seam is modified by this method. Finally, the continuous coal seam geological data on the working face is introduced to generate a new model segment surface at the working face, and the DEM of the same area is divided. The regional coal seam DEM is reconstructed in the new divided area to cover the original DEM, so as to achieve dynamic fine correction of coal seam DEM. After the DEM of coal seam is modified by this method, the local RMSE and MAE of the model reach below 0.12 m, which can provide a reliable basis for geological information guarantee for the realization of unmanned working face.

收稿日期:2022-01-30 责任编辑:周子博 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2022-0147

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004174);山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目(202101020101021);山西省青年科技研究基金资助项目(201901D211022)

作者简介:李娟莉(1979—),女,山西寿阳人,博士,教授。E-mail:lijuanli@tyut.edu.cn

通信作者:王学文(1979—),男,山西长治人,教授,博士生导师。E-mail:wxuew@163.com

Key words:digital elevation model of coal seam; geological modeling; double-track sweep; weight fusion; fitting residual surface; dynamic precision correction

0 引 言

地质信息透明化水平是煤矿智能化领域无人开采技术取得突破的重要基础,如何为煤矿开采提供高精度煤层三维地质模型是无人开采技术发展过程中亟待解决的瓶颈问题^[1-3]。在国家能源局、国家矿山安全监察局印发的《煤矿智能化建设指南(2021 年版)》^[4]中明确将智能地质保障系统作为井工煤矿智能化系统基本建设内容之一,井工煤矿中煤层地质精确建模技术作为其中需重点研究关键技术,其重要性不言而喻。

DEM 是基于 GIS 的数字地形分析的理论、方法与应用^[5],其能够充分表达地质体高程变化特征,具有二次开发与应用方便、模型数据储存与变换容易等优点^[6]。与构建地表地质体 DEM 不同,限于当前地下煤层勘测技术水平,一次性获取全部所需的建模数据源存在高成本、高难度、低效率等难以克服的困难^[7-9]。有学者结合煤矿生产特点提出“一次构建,逐步修正”的煤层 DEM 构建思路,即将煤层开采过程中暴露出的地质信息逐步引入到原有煤层地质模型中,以提高煤层模型的精度。贾庆仁等^[10]提出在开采过程中获得新的地质数据后,首先确定新数据对原有模型的影响范围,并以此为基础对原有模型进行动态修正;刘万里等^[11]提出利用上一回采阶段新揭露的煤层信息,基于克里格空间曲面插值法动态修正下一回采阶段煤层地质模型;李鹏等^[12]提出融合地质、钻探、物探数据构建回采工作面煤层地质模型等。

虽然新思路下的建模方法能够显著提升煤层 DEM 建模精度,但是目前这些方法在实际生产中依然难以得到广泛应用^[13-14]。笔者认为,究其原因是一些建模方法没有充分考虑地下煤层地质建模中数据来源特点,即获取采区中部的地质数据是十分困难的,而开采前往往能够依托巷道获取到可靠的、精确的、集中在采区边缘的煤层地质数据。现有建模方法在建立初始煤层 DEM 时过于依赖采区中部的煤层地质数据^[15-17],这无疑大幅增加了煤层 DEM 建模实现难度。

为此,笔者提出一种煤层数字高程模型构建与动态修正方法。在构建初始煤层 DEM 时,基于双轨扫掠、加权融合原理最大限度利用采区边缘的煤层地质数据;在向模型中引入采区内分散钻孔勘测所

得的煤层地质数据时,通过构造残差曲面的方法实现煤层 DEM 宏观形态修正;在向模型中引入从综采工作面勘测得到的连续煤层地质数据时,通过分段建模、局部覆盖的方法实现对煤层 DEM 动态精细修正,为提升煤矿地质信息透明化水平提供了切实可行的途径。

1 总体技术架构

在煤层开采前获取充分的煤层地质数据,一次性构建精准的煤层 DEM 是较为困难的,因此,随着采煤工作面的推进,需要将各类新获取的煤层地质数据源源不断地引入煤层 DEM 中,以实现煤层 DEM 的动态修正^[18-19]。笔者针对这一过程,提出基于采区边缘煤层地质数据的初始煤层 DEM 构建方法、引入采区内分散煤层地质数据修正采区煤层 DEM 方法及引入工作面上连续煤层地质数据动态修正采区煤层 DEM 方法,总体技术架构如图 1 所示。

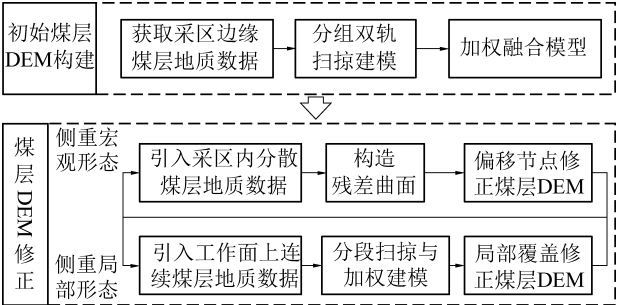


图 1 总体技术架构

Fig.1 Overall technical architecture

1) 基于采区边缘煤层地质数据构建初始煤层 DEM。基于采区四周巷道中获取的煤层地质数据,通过沿不同方向分组双轨扫掠的方法得到多个煤层 DEM,然后依据每个 DEM 在不同节点处高程值的可靠性,通过加权融合方法对所有由单方向扫掠构建的模型进行融合,最终得到总体上较为可靠的初始煤层 DEM。

2) 引入采区内分散煤层地质数据修正煤层 DEM。引入通过钻孔勘测所得的一些采区内煤层地质数据,在原有模型的基础上计算煤层 DEM 中相应节点处高程误差值,然后在这些误差值的基础上通过高次拟合的方法得到残差曲面,最后利用残差曲面对 DEM 中节点进行整体性偏移,最终实现煤层 DEM 宏观形态修正。

3) 引入工作面上连续煤层地质数据修正煤层

DEM。引入某一工作面上一系列连续的煤层地质数据,继而得到煤层 DEM 中相应一系列节点处的高程值,然后在该工作面处产生新的模型分段面,将分段面两侧本属于同一区域的 DEM 分为不同的区域,在各区域中重构更加精准的区域性煤层 DEM,最终用这些新构建的区域性煤层 DEM 对原有煤层 DEM 进行局部覆盖,实现煤层 DEM 的动态精细修正。

2 构建初始煤层 DEM

2.1 建模基础

如图 2 所示,在采区内适当位置处,选取巷道方向或垂直方向等容易确定的方向作为坐标轴方向,建立 XY 面与地面平行的三轴直角坐标系 XYZ。将此坐标系所对应的三轴与坐标原点作为真实地质体与 DEM 模型的匹配基准,DEM 模型中节点坐标便可基于这一基准与真实地质体中的节点相互映射。将采区煤层在 XY 面上的矩形投影规则网格化后,依托这个网格建立煤层 DEM,其煤层顶板与底板面中的高程信息以数字高程矩阵 H 的形式储存:

$$H = \begin{bmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{m1} & \cdots & t_{mn} \\ b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}_{2 \times m \times n} \quad (1)$$

式中, m 和 n 分别为网格中交叉点的总行数和总列数; t_{ij} 为煤层顶板面上与网格中第 i 行 j 列交叉点相垂直对应节点的高程值; b_{ij} 为煤层底板上与网格中第 i 行 j 列交叉点相垂直对应点的高程值, m 。

随着网格节点密度的提升,网格中所有节点的水平坐标与数字高程矩阵 H 中能够包含更多的煤层地质信息,煤层 DEM 精度也会得到相应的提升。

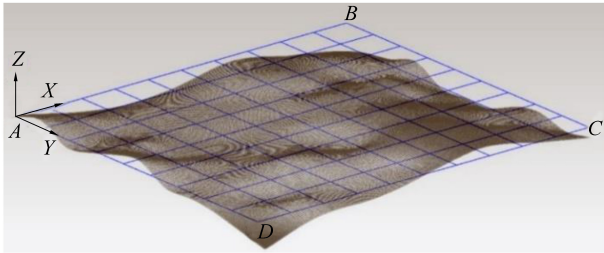


图 2 坐标系建立示意

Fig.2 Schematic of coordinate system establishment

根据巷道与煤层相对位置关系的不同分别采用直接测量法、向上或向下钻孔法,可以从巷道中获得煤层顶板面与煤层底板面上延巷道分布的一系列节

点坐标^[20],如图 3 所示。用三次样条插值的方法对获得的边缘节点进行插值处理后,便可以得到沿巷道方向延伸的曲线,如图 4 所示,这些曲线能够很好地反映煤层顶底板面在采区边缘的变化情况,并且容易得到数字高程矩阵 H 中所有处于边缘位置元素的值。

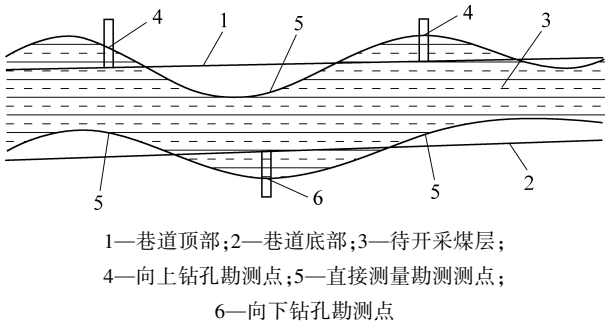


图 3 从巷道中获取煤层数据示意

Fig.3 Schematic of obtaining coal seam data from roadway

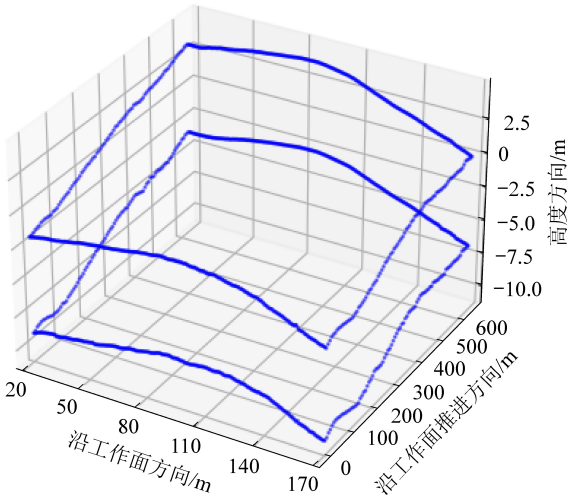


图 4 煤层 DEM 中的边缘节点

Fig.4 Edge nodes in coal seam DEM

2.2 煤层 DEM 构建

以求解采区煤层底板面 DEM 所对应的数字高程矩阵 B 为例,首先基于规则网格以及已有的煤层数据构建初始底板数字高程矩阵 B_0 , B_0 中所有元素值未知的位置用 0 填充:

$$B_0 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1(n-1)} & b_{1n} \\ b_{21} & 0 & \cdots & 0 & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b_{(m-1)1} & 0 & \cdots & 0 & b_{(m-1)n} \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{m(n-1)} & b_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

式中, b_{ij} 为煤层底板面上与网格中第 i 行 j 列交叉点相垂直对应节点的高程。

如图 5 所示,从 AB 出发以 AD 与 BC 为导轨进行双轨扫掠,得到数字高程矩阵 B_{AB} 的过程如下:

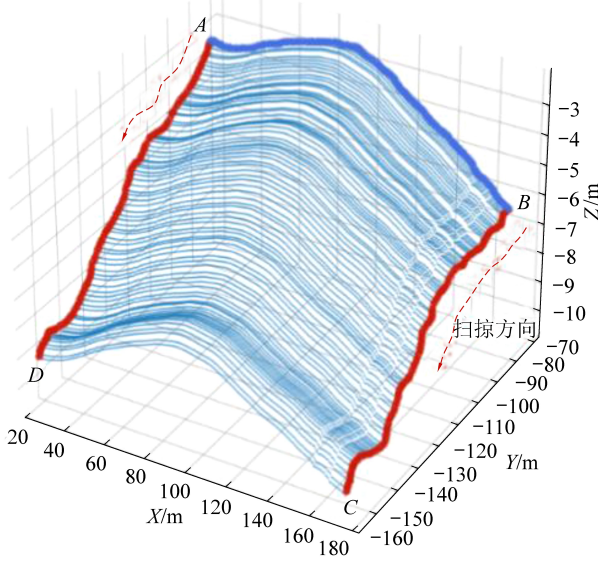


图 5 双轨扫掠示意

Fig.5 Schematic of dual-track sweep

1) 计算矩阵 C_{AB}

设:

$$\Delta h = \begin{bmatrix} (b_{1n} - b_{11}) / (n - 1) \\ \vdots \\ (b_{mn} - b_{m1}) / (n - 1) \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (3)$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{11} & \cdots & b_{11} & b_{11} \\ b_{21} & b_{21} & \cdots & b_{21} & b_{21} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b_{(m-1)1} & b_{(m-1)1} & \cdots & b_{(m-1)1} & b_{(m-1)1} \\ b_{m1} & b_{m1} & \cdots & b_{m1} & b_{m1} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

则:

$$C_{AB} = C_0 + [0 \quad \Delta h \quad 2\Delta h \quad \cdots \quad (n - 1)\Delta h]_{m \times n} \quad (5)$$

2) 基于 C_{AB} 将 B_0 补充完整得到 B_{AB}

设:

$$\alpha = \begin{bmatrix} b_{11} - c_{11} \\ b_{12} - c_{12} \\ \vdots \\ b_{1(n-1)} - c_{1(n-1)} \\ b_{1n} - c_{1n} \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (6)$$

式中: c_{ij} 为 C_{AB} 中第 i 行 j 列元素。

$$B_{AB} = C_0 + \begin{bmatrix} \alpha^T \\ \alpha^T \\ \vdots \\ \alpha^T \\ \alpha^T \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (7)$$

同理,可以分别求解从 BC 、 CD 、 AD 出发,沿对应不同方向进行双轨扫掠后所构建的矩阵 B_{BC} 、 B_{CD} 、 B_{AD} 。

由煤层变化的连续性易知,在上述方法构建数字高程矩阵时,距扫掠起始线段越近的节点处,所求解出的高程值可靠性越高。因此可以通过距离平方反比加权^[21]的方式得到相对可靠的数字高程矩阵 B 。从而得出矩阵 B_{AB} 所有元素在加权中对应的权重参数矩阵 w_{AB} :

$$w_{AB} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & \left(\frac{1}{d_{22}}\right)^2 & \cdots & \left(\frac{1}{d_{2(n-1)}}\right)^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & \left(\frac{1}{d_{(m-1)2}}\right)^2 & \cdots & \left(\frac{1}{d_{(m-1)(n-1)}}\right)^2 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (8)$$

式中: d_{ij} 为网格中第 i 行 j 列交叉点与扫掠起始线的欧氏距离。

同理,可分别求出 B_{BC} 、 B_{CD} 、 B_{AD} 所有元素在加权中对应的权重参数矩阵 w_{BC} 、 w_{CD} 、 w_{AD} 。设 w_{1ij} 、 w_{2ij} 、 w_{3ij} 、 w_{4ij} 分别为 w_{AB} 、 w_{BC} 、 w_{CD} 、 w_{AD} 中第 i 行 j 列元素,则可得数字高程矩阵 B 中第 i 行 j 列元素 B_{ij} :

$$B_{ij} = \frac{w_{1ij}}{\sum_{\varepsilon=1}^4 w_{\varepsilon ij}} B_{ABij} + \frac{w_{2ij}}{\sum_{\varepsilon=1}^4 w_{\varepsilon ij}} B_{BCij} + \frac{w_{3ij}}{\sum_{\varepsilon=1}^4 w_{\varepsilon ij}} B_{CDij} + \frac{w_{4ij}}{\sum_{\varepsilon=1}^4 w_{\varepsilon ij}} B_{ADij} \quad (9)$$

式中, B_{ABij} 、 B_{BCij} 、 B_{CDij} 、 B_{ADij} 分别为数字高程矩阵 B_{AB} 、 B_{BC} 、 B_{CD} 、 B_{AD} 中第 i 行 j 列元素。

从而可以得到与采区煤层顶板面 DEM 所对应的数字高程矩阵 T ,进而得到与整个煤层 DEM 相对应的数字高程矩阵 H :

$$H = \begin{bmatrix} T \\ B \end{bmatrix}_{2m \times n} \quad (10)$$

3 动态修正煤层 DEM

3.1 引入采区内分散煤层地质数据修正煤层 DEM

上述构造煤层 DEM 的方法充分利用了采区边缘煤层地质信息,以下提出一种引入采区内分散煤层地质数据修正煤层 DEM 的方法,其数据通常来源于自上而下的、少量的、分散的钻孔勘测。钻孔的位

置则需结合实际勘测条件在初始煤层 DEM 所包含的范围内选取,位置应尽量均匀分散,经试验发现选在煤层可能存在“谷”或“脊”的地方钻孔能够对模型的宏观走势修正起到更好的效果。

将 DEM 中某一节点的实际高程值与理论高程值之差作为 ΔZ 值,再结合该节点 XY 坐标,便可得到一系列含有 DEM 残差信息的点 $(X_i, Y_i, \Delta Z_i)$ 。再将一部分位于采区边缘含有 DEM 残差信息的点 $(X_i, Y_i, 0)$ 引入,便可得出所有参与残差曲面拟合的点。

根据采区内煤层变化的复杂程度,选取 3~5 次的多项式函数作为拟合函数(初始煤层模型越复杂则选择次数越高的多项式函数),将所有残差点进行拟合得到具体的残差曲面函数:

$$R(x, y) = \sum_{i=0}^{\gamma} C_i x^i y^{\gamma-i} \quad (11)$$

式中, γ 为拟合次数, $3 \leq \gamma \leq 5$; C_i 为待定系数。

如图 6 所示,为使得残差曲面在采区边缘收敛到 0,设工作面长度为 l ,选取边缘参数 $m\left(\frac{1}{3}l < m < \frac{1}{2}l\right)$,可以在残差曲面函数的基础上得到残差矩阵:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} > m \\ \frac{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}{m^2}, \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \leq m \end{cases} \quad (12)$$

$$r_{ij} = R(x_{ij}, y_{ij}) k_{ij}^2 \quad (13)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (14)$$

式中, x_{ij} 为网格中第 i 行 j 列交叉点所对应的 X 坐标值; y_{ij} 为网格中第 i 行 j 列交叉点所对应的 Y 坐标值。

最后,利用残差矩阵 R 修正数字高程矩阵 H :

$$H = \begin{bmatrix} T + R_T \\ B + R_B \end{bmatrix}_{2 \times m \times n} \quad (15)$$

式中, R_T 为煤层顶板所对应的残差矩阵; R_B 为煤层底板所对应的残差矩阵。

3.2 引入工作面上连续煤层地质数据修正煤层 DEM

随着煤层开采的进行,工作面逐步向采区深处推进,从暴露的煤层断面上能够更加容易获取到高质量的煤层地质数据,采用与之前处理巷道中煤层地质信息类似的方法,用 3 次样条差插值的方法可以得到工作面处完整的煤层顶底板曲线,利用已知煤层地质信息的工作面作为分界面可以把采区煤层分为多个部分。对每个部分采用双轨扫掠,采用加

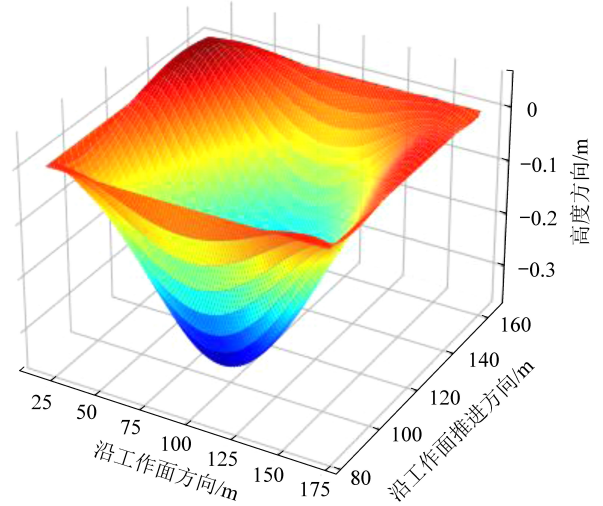


图 6 边缘收敛后的残差曲面函数图像

Fig.6 Image of residual surface function after edge convergence

权融合的方法对模型进行重构,再对原有模型进行局部覆盖便可以实现煤层 DEM 动态精细修正。

4 试验结果及分析

为验证本文提出的煤层 DEM 的构建及修正方法的正确性和有效性,以某矿综放工作面为例,进行了煤层 DEM 模型的构建及动态修正试验。

4.1 综采工作面煤层概况

试验针对某矿综放工作面采区进行模拟建模,该工作面设计可采走向长度 691.2 m,倾向长度 180 m,煤层平均厚度 6.67 m,直接顶为泥岩,基本顶为 K2 石灰岩,底板为铝质泥岩,煤层倾角 $2^\circ \sim 10^\circ$,平均倾角 6° 。当前该工作面采区已开采完成且保存了相对完整的采煤机工作记录(包括截割轨迹与采煤机位姿等)与钻探勘测记录。

在进行模拟建模试验之前,笔者依据采煤机工作记录与钻探勘测记录对煤层地质体进行了复原,以得到模拟地质体。在模拟地质体上进行虚拟勘测与建模,通过比较建模结果与模拟地质体的差异便可以实现对 DEM 建模方式的检验,图 7 为通过数据反演得到的模拟地质体(煤层顶板与煤层底板面模型)。

4.2 构建与修正煤层 DEM

以采区边缘地质数据为已知条件,用本文第 2 节中提出的方法对煤层进行 DEM 建模,得到沿不同方向扫掠构建的煤层 DEM,最终经加权融合后所构建的模型如图 8 所示。

选取垂直方向上的模型节点 $RMSE$ 与 MAE 作为模型评价标准,对沿不同方向扫掠构建的煤层 DEM 进行误差分析,最终得到结果见表 1。

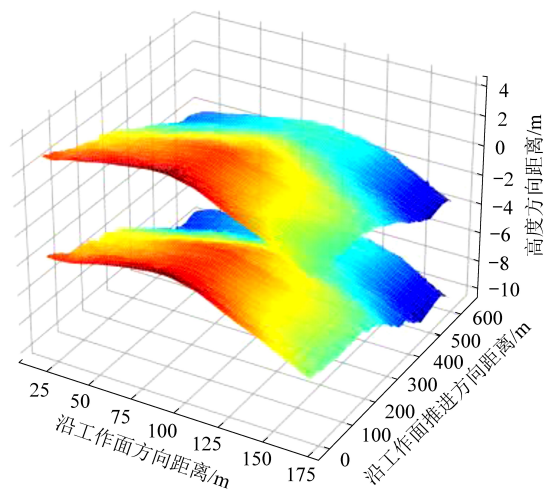


图 7 模拟地质体
Fig.7 Simulated geologic body

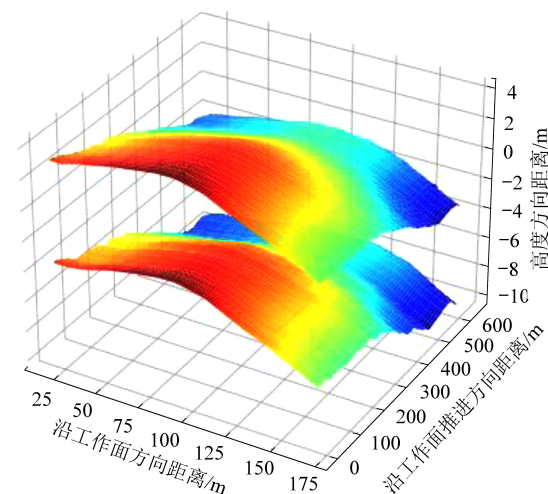


图 8 加权融合模型
Fig.8 Weighted fusion model

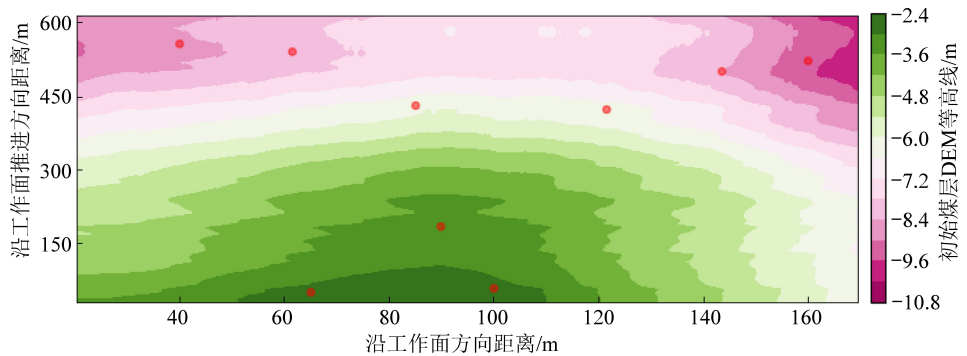


图 9 钻孔勘测位置选择示意
Fig.9 Schematic of selecting locations for drilling holes

采用本文第 3 节中所提出的方法,通过引入工作面上两处连续煤层地质数据,将原有模型分为 3 个区域分别建模并覆盖修正原有煤层 DEM 后(图 10),不同区域内煤层 DEM 误差变化见表 2。

表 1 中 $RMSE$ 与 MAE 的计算方法如下:

$$RMSE(\hat{z}, z) = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{z}_{ij} - z_{ij})^2} \tag{16}$$

$$MAE(\hat{z}, z) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\hat{z}_{ij} - z_{ij}| \tag{17}$$

式中, \hat{z}_{ij} 为网格中第 i 行 j 列交叉点所对应的 z 坐标估计值; z_{ij} 为网格中第 i 行 j 列交叉点所对应的 z 坐标实际值; m 为网格节点的总行数; n 为网格节点的总列数。

表 1 初始煤层 DEM 误差

Table 1 DEM error of initial coal seam		
构建模型	$RMSE/m$	MAE/m
单方向扫描模型 1	0.292	0.236
单方向扫描模型 2	0.296	0.203
单方向扫描模型 3	0.201	0.145
单方向扫描模型 4	0.443	0.363
加权融合模型	0.239	0.180

由此可见,沿不同巷道方向进行扫描建模将对应得到不同精度的煤层 DEM,将多个单方向扫描模型加权融合后,所得模型的精度优于大多数单方向扫描模型。

按照第 3 节中所提出的方法,引入图 9 中红点所示位置处一系列采区内分散煤层地质数据对初始煤层 DEM 进行修正后,模型整体 $RMSE$ 由 0.239 m 下降至 0.135 m, MAE 由 0.180 m 下降至 0.114 m,由此可见,此种修正方法在本次试验中起到了很好的修正效果。

表 2 引入连续煤层地质数据修正模型前后煤层 DEM 误差

Table 2 DEM error of coal seam before and after the model is corrected by introducing continuous coal seam geological data

构建模型	RMSE/m		MAE/m	
	修正前	修正后	修正前	修正后
区域 I	0.201	0.101	0.139	0.076
区域 II	0.145	0.095	0.152	0.089
区域 III	0.134	0.130	0.116	0.109

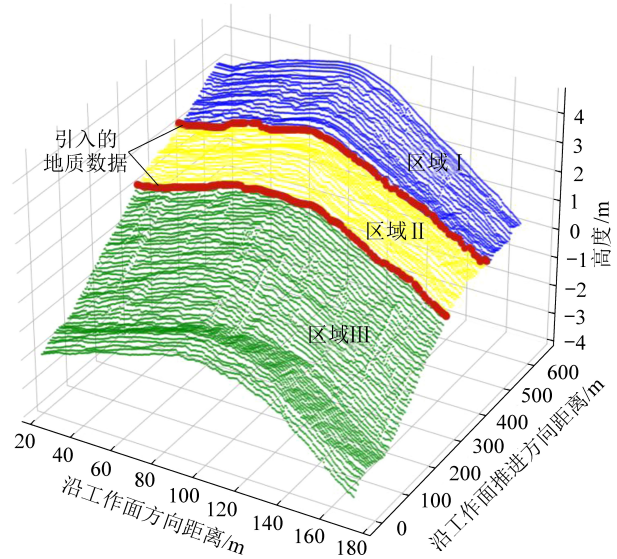


图 10 分区重构法修正模型示意

Fig.10 Schematic of modified model by zonal reconstruction method

5 结 论

1) 提出基于采区边缘煤层地质数据,结合双轨扫描与加权融合构建初始煤层 DEM 方法。在模拟建模试验中,模型均方根误差与平均绝对误差分别达到 0.25 m 与 0.2 m 以下。

2) 提出引入采区内离散煤层地质数据,在原有模型的基础上计算煤层 DEM 中相应节点处高程误差值,并基于这些误差值通过拟合的方法得到残差曲面,最后利用残差曲面对 DEM 中节点进行整体偏移的煤层 DEM 修正方法。在模拟建模试验中,通过该方法对煤层 DEM 进行修正后,模型均方根误差与平均绝对误差由 0.25 m 与 0.2 m 分别降至 0.14 m 与 0.12 m。

3) 提出引入工作面上连续煤层地质数据,在该工作面处产生新的模型分段面,将分段面两侧分为不同区域,在各自区域中重新构建区域煤层 DEM,再用新构建的区域 DEM 覆盖原有模型的煤层 DEM 修正方法。在模拟建模试验中,通过该方法对煤层

DEM 进行修正后,模型局部均方根误差与平均绝对误差均达到 0.12 m 以下。最终模型精度水平能够为无人工作面的实现提供可靠的地质信息保障基础。

参考文献 (References) :

[1] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41.
WANG Guofa,ZHAO Guorui,REN Huaiwei.Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J].Journal of China Coal Society,2019,44(1):34-41.

[2] 葛世荣,郝尚清,张世洪,等.我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):28-46.
GE Shirong,HAO Shangqing,ZHANG Shihong,et al.Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J].Journal of China Coal Society,2020,48(7):28-46.

[3] 袁 亮,张平松.煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J].煤炭学报,2019,44(8):2277-2284.
YUAN Liang,ZHANG Pingsong.Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J].Journal of China Coal Society,2019,44(8):2277-2284.

[4] 国家能源局,国家矿山安全监察局.煤矿智能化建设指南(2021)[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/19/content_5619502.htm,2021-06-05.

[5] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325.
TANG Guoan.Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J].Acta Geographica Sinica,2014,69(9):1305-1325.

[6] 刘 鹏,孟 磊,王 勃,等.基于位姿测量与煤层 DEM 的采煤机滚筒自动调高方法[J].煤炭学报,2015,40(2):470-475.
LIU Peng,MENG Lei,WANG Bo,et al.An automatic height adjustment method for shearers drums based on pose measurement and coal seam DEM[J].Journal of China Coal Society,2015,40(2):470-475.

[7] 葛世荣,郝雪弟,田 凯,等.采煤机自主导航截割原理及关键技术[J].煤炭学报,2021,46(3):774-788.
GE Shirong,HAO Xuedi,TIAN Kai,et al.Principle and key technology of autonomous navigation cutting for deep coal seam[J].Journal of China Coal Society,2021,46(3):774-788.

[8] 王国法,刘 峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa,LIU Feng,Meng Xiangjun,et al.Research and practice on intelligent coal mine construction(primary stage)[J].Coal Science and Technology,2019,47(8):1-36.

[9] 王宝山.煤矿虚拟现实系统三维数据模型和可视化技术与算法研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2006.
WANG Baoshan.Study on the coal mine virtual reality system three dimensional data model and virtual technology and arithmetic[D].Zhengzhou:Information Engineering University,2006.

[10] 贾庆仁,车德福,李佳徐,等.动态精化的煤层三维建模方法[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(5):726-730.
JIA Qingren,CHE Defu,LI Jiaxu,et al.Three-Dimensional Mod-

eling Method of Coal Seam with Gradual Refinement[J].Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39 (5): 726-730.

[11] 刘万里,张学亮,王世博.采煤工作面煤层三维模型构建及动态修正技术[J].煤炭学报,2020,45(6):1973-1983.
LIU Wanli, ZHANG Xueliang, WANG Shibo. Modeling and dynamic correction technology of 3D coal seam model for coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (6): 1973-1983.

[12] 李 鹏,程建远.回采工作面煤层三维建模技术及其在智能开采中的应用[J].煤矿安全,2021,52(8):156-161.
LI Peng, CHENG Jianyuan. 3D modeling technology of coal seam in working face and its application in intelligent mining[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52 (8): 156-161.

[13] 李志鹏,杜晓敏,徐 朝.面向实时可视化的煤层三维模型构建与三角剖分[J].地理与地理信息科学,2013,29(1):32-35,40.
LI Zhipeng, DU Xiaomin, XU Chao. Study on 3D coal seam modeling and triangulation for real-time visualization[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29 (1): 32-35, 40.

[14] 朱梦博.采煤工作面高精度三维地质模型动态构建技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2021.
ZHU Mengbo. Dynamic construction of high-precision 3D geological model for coal mining panel[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.

[15] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, *et al.* New development of intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (1): 1-10.

[16] 李娟莉,姜 朔,谢嘉成,等.基于采煤机截割路径的动态三维地质模型构建方法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(5):706-712.
LI Juanli, JIANG Shuo, XIE Jiacheng, *et al.* Construction method of the dynamic 3-d geological model based on shearer cutting path[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42 (5): 706-712.

[17] 贺海涛.综采工作面智能化开采系统关键技术[J].煤炭科学技术,2021,49(S1):8-15.
HE Haitao. Key technologies of intelligent mining system for fully-mechanized mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 49 (S1): 8-15.

[18] 李首滨.智能化开采研究进展与发展趋势[J].煤炭科学技术,2019,47(10):102-110.
LI Shoubin. Progress and development trend of intelligent mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 47 (10): 102-110.

[19] 李首滨.煤炭智能化无人开采的现状与展望[J].中国煤炭,2019,45(4):5-12.
LI Shoubin. Present situation and prospect on intelligent unmanned mining at work face[J]. China Coal, 2019, 45 (4): 5-12.

[20] 石智军,姚 克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, *et al.* 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (4): 1-34.

[21] IZHAR, MITHAL, JISKANI, *et al.* Integrated 3D geological modeling of Sonda-Jherruck coal field, Pakistan[J]. Journal of Sustainable Mining, 2018, 14 (3): 111-119.