文章编号：1004-4051(2024)05-0136-07 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20230325

基于三维曲面积分的矿压实测数据分析模型及应用

贾士耀
（国能神东煤炭集团有限责任公司，陕西 榆林 719000）

摘　要：针对影响综采面正常推进的异常矿压显现进行预测与防控是减少工作面顶板事故隐患的有效措施，合理有效的矿压实测数据分析方法是关键技术之一。基于三维曲面积分理论，引入 Kriging 插值算法，提出一种“寻找大显现、关注异常点”的矿压数据分析模型。以顶板压力与底板比压组建三维曲顶柱体，以液压支架与累计进尺组建二维坐标面，从而建立基于三维曲面积分的矿压实测数据分析模型，并以压力曲面向割平面投影算法实现对矿压实测数据的解析与预测分析。开展神东矿区补连塔煤矿 12514 工作面的矿压监测数据分析，获得了矿压显现明显区域、矿压三维曲面投影模型以及实时矿压云图，提取显著来压区域 8 次，指向 62 号支架～98 号支架区域 6 次，其中，显著来压区域持续平均距离 11.9 m，表明基于三维曲面积分分析模型可选取顶板运动比较剧烈的区域，相对于传统统计分析方法具有更强的针对性，验证了所提出分析模型的合理可靠性。

关键词：三维曲面积分；矿压；Kriging 插值算法；浅埋煤层工作面
中图分类号：TD822　　**文献标识码：**A

Analysis model and application of mine pressure measured data based on 3-Dimensional Surface Integral

JIA Shiyao
（*China Shendong Coal Group Co.*，*Ltd.*，*Yulin* 719000，*China*）

Abstract：Predicting and preventing abnormal mining pressure manifestations that affect the normal progress of fully mechanized mining face is an effective measure to reduce the hidden dangers of roof accidents in working face. A reasonable and effective method for analyzing measured mining pressure data is one of the key technologies. Based on the 3-Dimensional Surface Integral theory, a mining pressure data analysis model is proposed by introducing the Kriging Interpolation Algorithm to “search for large manifestations and focus on abnormal points”. A 3-dimensional curved top column is formed by comparing the pressure of the top plate and the pressure of the bottom plate, and a 2-dimensional coordinate surface is formed by the number of the support and the footage. Based on the 3-Dimensional Surface Integral, a mining pressure measurement data analysis model is established, and the pressure curve projection algorithm is used to analyze and predict the mining pressure measurement data. The analysis of mining pressure monitoring data for the 12514 working face of Bulianta Coal Mine in Shendong Mining Area is carried out, and obvious mining pressure areas, 3-dimensional surface projection models of mining pressure, and real-time mining pressure cloud maps are obtained.

收稿日期：2023-05-16　　**责任编辑：**刘硕
作者简介：贾士耀（1985—），男，汉族，陕西子洲人，高级工程师，从事生产技术工作，E-mail：10034703@chnenergy.com.cn。
引用格式：贾士耀. 基于三维曲面积分的矿压实测数据分析模型及应用[J]. 中国矿业，2024，33(5)：136-142.
JIA Shiyao. Analysis model and application of mine pressure measured data based on 3-Dimensional Surface Integral[J]. China Mining Magazine，2024，33(5)：136-142.

Significant pressure areas are extracted 8 times, pointing to the No.62 to No.98 support areas 6 times. The average continuous distance of the significant pressure areas is 11.9 meters, indicating that the 3-Dimensional Surface Integral Analysis Model can select areas with more intense roof movement, which has stronger pertinence compared to traditional statistical analysis methods. This validates the reasonable reliability of the proposed analysis model.

Keywords：3-Dimensional Surface Integral； mining pressure； Kriging Interpolation Algorithm； shallow coal seam face

0　引　言

综采工作面矿压数据实时监测是保证煤矿安全运行和减少顶板事故隐患的重要手段[1-4]。然而，由于工作面所处地质条件以及生产条件的差异性，需实时监测液压支架压力、缩量，巷道变形，煤体应力等多种数据，这就导致了种类不同、量纲不同、表达含义不同的数据很难进行统一化分析[5-6]。因此，建立合理有效的矿压实测数据分析模型，尤其是关注矿压数据的整体性，成为解决异常矿压显现预测与防控问题的关键环节。

系统自动化分析是矿压大数据分析的基础，目前在实际工程应用中广泛使用的矿压数据分析模型主要有 *P-t* 曲线法[7]、多元线性回归分析方法[8]、自适应回归分析方法[9] 和岭回归分析方法[10] 等。*P-t* 曲线法是多年来矿山压力分析通用的数据分析方法，液压支架压力自记仪或压力下缩自记仪记录的曲线包含丰富的内容，具有操作简单且需要数据量比较少等优点。然而，该方法只能对单个液压支架由点形成的线数据进行分析，而对于多个液压支架的数据如何组合分析，特别是多个液压支架曲线规律不一致的情况下如何进行分析，该种方法略显不足[11]；多元线性回归分析方法是处理多个自变量与一个因变量之间线性关系的分析预测方法[12]；自适应回归分析方法是随着地质环境变化和实测信息增加，对回归方程的参数采取递推估计，能随新信息的增加不断地修改回归方程参数以保持原有的预测精度，并反映出最新环境的变化[13]；岭回归分析方法实质上是一种改良的最小二乘估计法，由于在方差方面的减少大大补偿了所引起的偏差，其能够获得更符合实际的回归系数[14]。上述三种分析方法均属于基于线性回归的矿山压力分析方法，此类方法具有考虑问题全面、分析结果与实际的吻合度较高等优点。但是由于线性回归分析方法涉及到多种影响因素，对于不同的采煤工作面其模型与参数体系也不相同，对于多个液压支架的矿压数据、多个循环的液压数据、海量的液压数据缺乏相应的解决方法[15]。

为更好地对矿压监测数据进行准确分析，基于三维曲面积分（3-Dimensional Surface Integral, 3DSI）理论，引入 Kriging 插值算法，提出一种“寻找大显现、关注异常点”的基于 3DSI 的矿压数据分析模型，关注矿压整体数据，屏蔽少数极值数据干扰，进而开展神东矿区补连塔煤矿 12514 工作面的矿压监测数据分析。研究结果可为煤矿现场安全管理提供理论与技术指导。

1　基于 3DSI 的矿压数据分析模型

采场上覆岩层运动是面的、体的，为了实现从整体的角度分析矿山压力数据，基于 3DSI 的矿压数据分析模型（图 1），以顶板压力和底板比压组建三维曲顶柱体，以液压支架和累计进刀组建二维坐标面，以压力曲面向割平面投影算法实现对矿压实测数据的解析与预测分析。其中，规则化的网格分布、3DSI 模型的构建以及最佳割平面内矿压异常区域圈定算法是需要解决的关键技术问题。

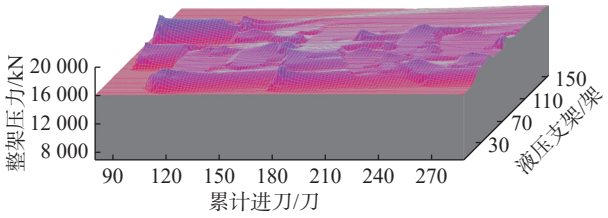

图 1　基于 3DSI 的矿压数据分析模型

Fig. 1　Analysis model of mine pressure data based on 3DSI

1.1　矿压监测数据的三维曲面 Kriging 插值算法

在实际矿山压力数据采集过程中很难做到规则化取点，采样获得的空间数据一般都是离散点，同一区域内其他未知点的取值情况需要采用空间数据插值的方法进行推测和估计来达到规则化网格分布的目的。Kriging 插值算法是对空间分布的数据求解线性最优、无偏内插估计的一种方法。该方法不仅考虑了待估点位置与已知数据位置的相互关系，还考虑了变量的空间相关性，与距离反比加权法相比，具有减弱从聚效应、严格对称性和屏蔽效应的优点。本文采用 Kriging 插值算法对矿压实测数据进行插值处理，重构曲面是连续的，没有显著的凸起部分或凹陷部分，与实际的地质层结构较为吻合，能够反映其布局结构，并且可以在数据处理后通过曲面模型来

可视化处理结果。

Kriging 插值算法采用线性、无偏性和最小方差估计，对每个采样点赋予一定的权系数，然后用加权平均法对未知量进行估计。假设 x 是研究区域 V 内任一点，$Z_V(x)$ 是该点的测量值，研究区域内共有 n 个实测点，即 $x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n$，对于任意实测值 $Z_V(x)$，其估计值 $Z_V^*(x)$ 是通过影响区域范围内的 n 个有效样本值 $Z_V(x_i)(i=1,2,\ldots,n)$ 的线性组合表示，见式(1)。

$$Z_V^*(x)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i) \tag{1}$$

式中，λ_i 为第 i 个位置处已知样本点 $Z(x_i)$ 的权重系数，是已知样本点 $Z(x_i)$ 在估计插值点 $Z_V^*(x)$ 时的影响度或贡献度。权重系数 λ_i 不仅取决于数据点间的距离、位置，还取决于所有采样点的整体空间排列，求解权重系数 λ_i 是 Kriging 插值算法的关键所在，需要满足无偏性和估计方差最小，以此来保证待插点处的估计值 $Z_V^*(x)$ 与真实值之间的误差最小。λ_i 值通过推导变差函数，建立并求解 Kriging 方程组得到。

假设区域变化量 $Z_V(x)$ 满足二阶平稳假设和本征假设，其数学期望为 m，协方差 $c(h)$ 及变异函数 $\gamma(h)$ 存在，即满足式(2)～式(4)。

$$E\left[Z_V(x)\right]=m \tag{2}$$

$$C(h)=E(Z(x)Z(x+h))-m^2 \tag{3}$$

$$\gamma(h)=\frac{1}{2}E\left[Z(x)-Z(x+h)\right]^2 \tag{4}$$

在求取权重系数 λ_i 时必须满足 $Z_V^*(x)$ 的估计无偏，并且使 $Z_V^*(x)$ 的估计最优，即估计 $Z_V^*(x)$ 和实际样本点 $Z(x_i)$ 之差的平方和最小。

1.2 3DSI 模型建立

以顶板压力和底板比压组建三维曲顶柱体体积求解是构建矿压数据分析模型的重要环节，其算法示意如图 2 所示，设定义在可求面积的有界闭区域 D 上的非负连续函数以曲面 $Z(x, y)$ 为顶、区域 D 为底的柱体体积为 V。

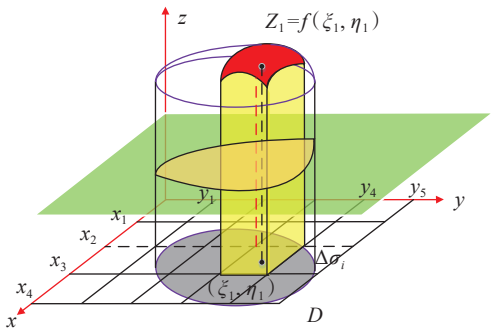

图 2 三维曲顶柱体体积算法

Fig. 2 Volume algorithm of 3-dimensional surface top column

将曲面 $Z(x, y)$ 投影到 xoy 面，记为区域 D，对区域 D 做分割 T，即把 D 分成 n 个小区域 σ_i，$i=1,2,\ldots,n$。记 $\Delta\sigma_i$ 为该区域的面积，根据这个区域分割对应地将曲顶柱体进行分割，分成 n 个小曲顶柱体 V_i，$i=1,2,\ldots,n$。因为曲面的连续性，当分割的 σ_i 的直径很小时，$Z(x, y)$ 在每个 σ_i 上变化不大，因此，可在 σ_i 上任取一点 (ξ_i,η_i) 对应的 $Z(\xi_i,\eta_i)$ 作为该曲顶柱体在这个区域的 σ_i 高。于是，以 σ_i 为底、$Z(\xi_i,\eta_i)$ 为高的小平顶柱体体积为 $\Delta V_i=Z(\xi_i,\eta_i)\Delta\sigma_i$，当分割 $\|T\|=\max\{d_i\}\to 0$ 时，可看作曲顶柱体的体积 V_i 值近似等于平顶柱体的体积 ΔV_i，其中，d_i 表示区域 σ_i 的直径。把区域 D 内的所有分割 σ_i 对应的平顶柱体的体积相加近似得到曲顶柱体的体积 V，可得式(5)。

$$V=\sum_{i=1}^{n}V_i\approx\sum_{i=1}^{n}Z(\xi_i,\eta_i)\Delta\sigma_i \tag{5}$$

1.3 最佳割平面内矿压异常区域圈定算法

基于 3DSI 的分析模型是在多年矿压分析的基础上总结而得，其主要是通过在最佳割平面“寻找大显现、关注异常点”。首先，采场顶板在一定区域内发生运动时，通过提出割平面的方式关注矿压显现重点区域，并通过长期实测数据训练寻找最佳割平面；然后，通过引入来压面积系数与压力均值系数确定异常来压区域。具体实现步骤如下所述。

1)采用图 2 中某个设定矿压值的特定平面切割三维曲顶柱体，把三维曲顶柱体分为两个曲顶柱体的平面，此特定平面定义为割平面。为寻找矿压显现区域，令面积比值 μ 为式(6)。

$$\mu=s_g/s_f \tag{6}$$

式中：s_g 为三维曲面向割平面的投影面积；s_f 为三维曲面向底板投影面积。

2)通过不同的矿压值割平面重点显现矿压异常区域，如图 3 所示，其中，大部分区域为矿压显现区域。由图 3 可知，随着 μ 值增大，即设定矿压值减小，矿压显现区域投影面积随之增大，说明需要关注的异常区域面积更大。因此，为提高预测精确性，需要设定合理且有效的矿压值，寻找最佳割平面，获得符合该矿区的面积比值 μ，此值需要通过对长期实时监测数据进行分析获得。本文通过对神东矿区 27 个工作面近两年的数据训练，实现了采煤工作面的不间断监测，采集数据记录 3 600 亿条，以进尺 200 m 左右(8～10 个周期来压步距)为三维曲面模型建设，27 个工作面共建 600 个 3DSI 模型，经近 1 万个显著区域的训练，得出 $\mu\in(0.25, 0.30)$ 的最佳割平面。最佳割

平面虽然可找出矿压显现区域，但对零星显现区域并不会造成严重后果，因此，需要屏蔽少数极值数据干扰，即寻找矿压大显现区域，并关注异常点。

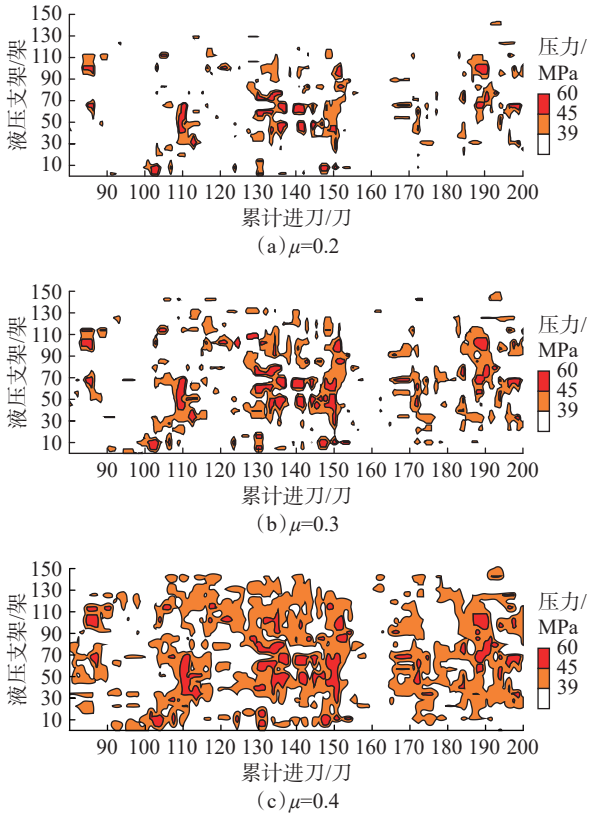

图 3　不同 μ 值下三维曲面在割平面上的投影

Fig. 3　Projection of 3-dimensional surface on cutting plane with different μ values

为实现“寻找大显现、关注异常点”，本文引入来压面积系数 T_i 与压力均值系数 P_i。来压面积系数 T_i 为来压区域面积与全部来压区域面积均值的比值，此系数可剔除局部异常极值的影响，定义为式(7)。

$$T_i = \frac{S_i}{\frac{1}{n}\sum S_i} \tag{7}$$

式中：S_i 为来压区域面积；$\Sigma S_i/n$ 为全部来压区域面积均值。

压力均值系数 P_i 为来压区域压力均值与全部来压区域压力均值的比值，此系数可进一步消除局部矿压异常极值，凸显矿压大显现区域，定义为式(8)。

$$P_i = \frac{\bar{P}_i}{\frac{1}{n}\sum \bar{P}_i} \tag{8}$$

式中：$\bar{P}_i$为来压区域压力均值；$\Sigma\bar{P}_i/n$为全部来压区域压力均值。

3)通过寻找 T_i 与 P_i 的最佳系数，确定某工作面的矿压显现异常区域，并对异常来压区域进行重点防控，预防安全事故的发生。T_i 与 P_i 的最佳系数也需要不同矿区通过对长期实时监测数据的分析获得。通过上述数据训练，得出 $T_i \geqslant 1.15$与 $P_i \geqslant 1.15$的来压区域为异常来压区域。如图 4 所示，μ=0.3 割平面时，T_i 与 P_i 都大于 1.15 的来压区域(圈出区域)。

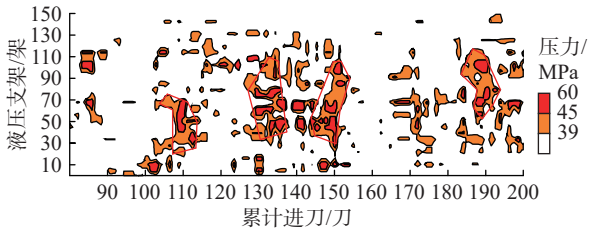

图 4　μ=0.3 割平面 T_i 与 P_i 都大于 1.15 时来压区域

Fig. 4　Pressure region when T_i and P_i greater than 1.15 in the μ=0.3 cutting plane

1.4　基于 3DSI 分析模型的实施条件

基于 3DSI 分析模型开展实时矿压数据分析时，需要满足以下五个实施条件。

1)假设采煤工作面矿压数据构成的数据序列是基于时间轴连续的，即可以采集到变化的数据。

2)假设工作面倾斜方向等距离采集压力数据，即液压支架的支架间隔相等，比如间隔 5 架，需采集 5 号支架、10 号支架、15 号支架、20 号支架…。

3)假设工作面矿压数据分析以进刀为基本参照点，即在数据分析中，必须设定以哪一个支架的进刀标识作为整个工作面进刀的基本参照。

4)矿压显现判定以超过某一特定值为参考，在一次选定开采区间分析中，该参考值无法改变。工作面推进过程中，顶底板岩性变化较大的采煤工作面，液压支架压力值变化较大，部分区域压力值普遍偏低或偏高，因此，需要缩小数据分析进刀数，即在选定分析区间内认为顶底板条件相对稳定。

5)“寻找大显现、关注异常点”矿压显现分析要有一定的数据对照区间，最小进刀区间最好选择在 50 刀以上。

2　神东矿区矿压显现分析

神东矿区地表广泛覆盖着现代风积沙及第四系黄土，含煤地层为中下侏罗统延安组，煤层埋藏浅、倾角小，是典型的浅埋深、薄基岩、厚松散层的覆岩顶板。该类顶板的特点是在顶板稳定运动阶段顶板压力较小，液压支架只需较小的阻抗力就能满足安全推进的要求；在顶板显著来压阶段，顶板运动剧烈，压力增速较大，工作面有时会出现切顶与台阶下沉的现象，对液压支架的阻力与缩量提出严峻的考验，时有发生异常压架与冒顶事故。另外，矿区地表起伏较大，且上覆岩层存在历史遗留老空区及房式煤

柱，加剧了覆岩矿压显现的力度，对采煤工作面的安全影响较大。

神东矿区的矿压显现与国内其他矿区相比，并不特别严重，但是神东矿区的矿压也具有其他矿区所不具有的特殊性，主要可以概括为“四大三小二多”，见表 1。神东矿区一般产生条件下的矿山压力基本不影响综采面正常推进，然而，集中煤柱区，以及冲刷带、沟谷区等厚硬顶板区矿压显现异常，同时，综采面非计划停产后果严重，因此，对影响综采面正常推进的异常矿压显现预警与防控意义重大。

表 1 神东矿区矿压显现特征

Table 1 Characteristics of mining pressure behavior in Shendong Mining Area

特征	特殊性	特点	矿压显现特征
四大	采煤工作面尺寸大	面长 200～340 m，推进 2～6 km	矿压显现变化大
	液压支架阻力大	一般 15 000 kN，最大 26 000 kN	支架矿压显现不明显
	开采强度大	日推进 15～20 刀，进尺 12～18 m	顶板运动幅度较大
	煤岩体强度大	上覆岩层砂岩较多，煤体 $f \geqslant 2$	巷道矿压显现不明显
三小	埋藏深度小	最小 40 m，最深 400 m，平均 150 m	矿压静载小
	基岩厚度小	最小 5 m，最大 200 m，平均 70 m	裂断拱基本不存在
	受断层、陷落柱等地质构造影响小	—	构造对矿压影响小
二多	下组煤开采受上组煤影响多	14 个矿井面临下组煤开采	矿压显现复杂，规律性差
	受冲刷带、沟谷区影响多	地表起伏大，沟谷多	矿压静载变化大

3 补连塔煤矿 12514 工作面应用分析

3.1 工作面概况

神东矿区补连塔煤矿 12514 工作面位于 12 煤层五盘区。工作面为 12 煤层五盘区第八个综采工作面，南侧为 12513 采空区；东侧为 12 煤层五盘区三条大巷和 12 煤层四盘区采空区；北侧为正在准备的 12515 综采工作面；西侧为规划的 12518 综采工作面。工作面基本信息见表 2。

表 2 12514 工作面基本信息

Table 2 Basic information of 12514 working face

信息种类	名称/单位	数值
采煤工作面信息	采煤高度/m	7.4
	采煤方式	综采
	平均埋深/m	277
	倾斜长度/m	327.2
	走向长度/m	3 088.8
中间液压支架信息	液压支架型号	ZY21000/36.5/80D
	立柱数量/个	2
	中心距/m	2.05
	控顶距/m	6.7
	初撑力/MPa	35

综采面回采范围内地表沟谷较为发育，第四系黄土、残堆积层、冲洪积层等分布于山梁、山坡及沟谷地带，显示侵蚀性丘陵地貌特征。根据邻面回采经验，顶板有一层 0.3～0.5 m 伪顶或夹矸层，来压时易垮落，顶板管控难度较大，对回采造成很大影响。煤层顶底板岩性特征见表 3。

3.2 基于 3DSI 的矿压数据分析

以补连塔煤矿 12514 工作面进尺 1 244～1 405 m 液压支架压力数据展开 3DSI 分析，该区间共采煤 200 刀（数据标注刀数为 280～480 刀），推进 165 m。该工作面综采支架 160 架，一条数据约 5 s，分析数据总量近 1 075 万条。

由于 12514 工作面平均埋深 100 m，采用工作阻力 21 000 kN 的液压支架，其顶板日常来压对采煤工作面安全威胁较小，以“寻找大显现、关注异常点”的 3DSI 分析理念，利用式（5）的最佳割平面寻找方法，发现压力 42 MPa 割平面形成的投影面积与总面积的比值为 0.28，为此确定本次数据分析的最佳割平面为 42 MPa 割平面。把三维压力曲面向 42 MPa 割平面投影，形成二维投影应力云图如图 5 所示。

对图 5 中投影面积与压力强度均小于 1 的区域进行过滤，共提取顶板明显运动区域 29 处，其三维曲面如图 6 中箭头标注所示。

根据式（6）计算可得，29 处明显运动区域来压强度均值为 2.4，以大于均值 1.15 倍数值为 2.7 的强度均值进行判断，确定显著来压区域 8 处，见表 4。将表 4 中 8 处数据在图 6 内标注，绘制图 7，圆圈箭头标注为显著来压区域 8 处。

为了进行对比分析，采用统计学分析方法（基于现场踏勘采集数据）对选定区间内所有液压支架的压力数据进行分析，为体现顶板分段来压特征，统计分析从倾斜方向按液压支架编号分 5 段（1 号～26 号、27 号～61 号、62 号～98 号、99 号～133 号、134 号～160 号）进行单独分析。其中，第三区间（62 号～98 号）的分析结果见表 5。

表 3　煤层顶底板岩性特征

Table 3　Rock characteristics of roof and floor of coal seam

顶底板	岩石名称	厚度/m（平均厚度/m）	岩性特征
基本顶	细粒砂岩	2.49～17.00（6.85）	灰白色，泥质胶结，水平层理，斜层理，参差状断口，断面见暗色矿物，主要成分以砂岩长石为主
直接顶	粉砂岩为主、砂质泥岩次之	1.57～25.65（8.86）	浅灰色，粉砂质结构，水平层理，含有植物枝叶化石
直接底	砂质泥岩	0.79～8.44（3.09）	灰白色，水平层理，平坦状断口，胶结较致密，断面见滑面

表 4　12514 工作面 3DSI 矿压数据

Table 4　3DSI mining pressure data of 12514 working face

序号	开始进尺/m	结束进尺/m	起始支架编号	结束支架编号	面积系数	综合系数
1	1 227	1 233	106	144	3.50	4.07
2	1 228	1 246	58	103	3.72	4.11
3	1 277	1 286	83	102	2.20	2.54
4	1 272	1 289	57	70	2.62	3.19
5	1 335	1 343	61	124	4.45	5.43
6	1 346	1 357	79	129	5.83	6.64
7	1 369	1 381	130	152	2.89	3.40
8	1 369	1 380	53	103	6.08	7.00

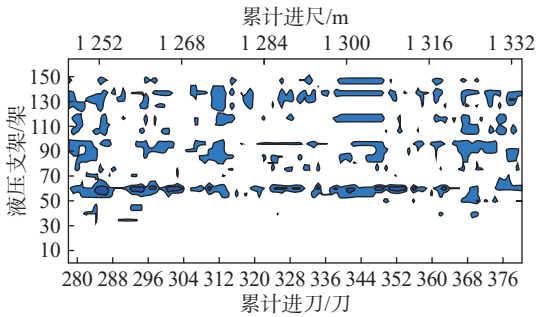

图 5　42 MPa 割平面二维投影云图

Fig. 5　2-dimensional projection on a 42 MPa cutting plane

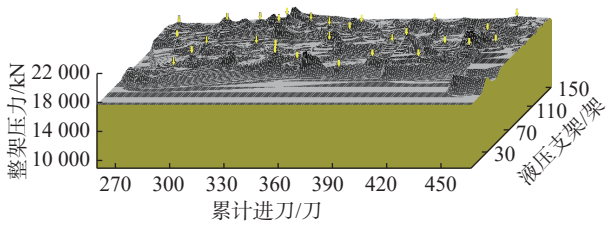

图 6　最佳割平面明显运动区域

Fig. 6　Obvious motion areas of optimal cutting plane

由表 5 可知，提取来压比较明显的区域 13 处，平均来压步距 10.5 m，显著来压平均步距 4.5 m；由表 4 可知，基于 3DSI 分析模型提取来压明显区间 8 次，指向 62 号～98 号支架区域 6 次，其来压区域显著持续平均距离 11.9 m。上述结果表明，传统统计学与基于 3DSI 分析模型都能对来压比较明显的区间进行提取与分析，但是由于传统统计学分析仅是对采煤工作面中间区域进行分析，其数据的提取有局部性与片面性，而基于 3DSI 分析模型相对比较全面。另外，基于 3DSI 分析模型选取是顶板运动比较剧烈的区域，也说明该分析模型相对传统统计分析方法具有更强的针对性。

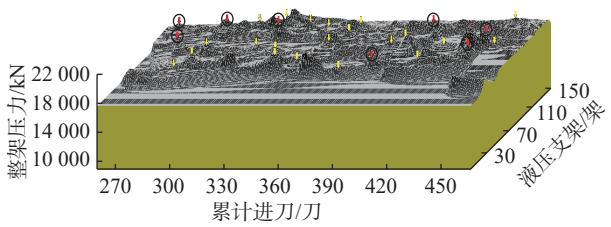

图 7　最佳割平面显著来压区域

Fig. 7　Significant movement areas of optimal cutting plane

4　结　论

根据矿压整体数据及监测数据差异性，提出基于 3DSI 的矿压实测数据分析模型，并结合神东矿区补连塔煤矿 12514 工作面开展了矿压实时监测数据分析研究，主要结论如下所述。

1）基于 3DSI 分析模型，对顶板周期性运动的寻找其针对性不强，该方法从系统的角度看待顶板运动，以“寻找大显现、关注异常点”的思想寻找顶板异常区域，具有较强针对性，比较符合神东矿区浅埋深、大阻力液压支架使用工况。

2）基于 3DSI 分析模型的矿压分析系统，具有制图直观、可操作性强以及数据客观等特点，具有工程实用价值。

表 5 12514 工作面 62 号～98 号支架统计数据

Table 5 Statistical data of No.62 to No.98 support in 12514 working face

序号	开始		结束		间隔距离/m
	进刀/刀	进尺/m	进刀/刀	进尺/m	
1	282	1 246	300	1 261	15.3
2	301	1 262	308	1 268	6.1
3	309	1 269	323	1 281	12.2
4	324	1 282	333	1 290	7.8
5	334	1 291	341	1 297	6.1
6	342	1 298	356	1 310	12.2
7	357	1 311	381	1 332	20.9
8	382	1 333	393	1 342	9.6
9	394	1 343	401	1 349	6.1
10	402	1 350	423	1 368	18.3
11	424	1 369	430	1 374	5.2
12	431	1 375	442	1 385	9.6
13	443	1 386	457	2 398	6.9

3)基于采场上覆岩层运动是面的、体的特征,从整体的角度分析矿压数据,屏蔽少数极值数据干扰,解决了传统依靠部分支架数据进行矿压分析的局限性问题。

4)基于 3DSI 分析模型关注采场来压整体受力,目前神东矿区液压支架阻力普遍较大,从采场顶板控制及液压支架工况分析的角度看,该模型提出的来压区域对煤矿安全管理的指导意义更大。

参考文献(References):

[1] 伍永平,武永强,解盘石,等.煤矸互层顶板大倾角大采高工作面覆岩活动规律相似模拟研究[J].煤炭工程,2018,50(1):73-76,80.
WU Yongping, WU Yongqiang, XIE Panshi, et al. Similar simulation on movement behavior of overlying strata in working face with large dip angle and large mining height under the roof of interbedded coal gangue[J]. Coal Engineering, 2018, 50(1): 73-76, 80.

[2] 原国政.矿压监测在顶板安全管理中的应用[J].煤炭工程,2006,38(12):54-55.
YUAN Guozheng. Application of mining pressure monitoring in roof safety management[J]. Coal Engineering, 2006, 38(12): 54-55.

[3] 于健浩,毛德兵.我国煤矿顶板管理现状及防治对策[J].煤炭科学技术,2017,45(5):65-70.
YU Jianhao, MAO Debing. Status and countermeasures of roof management in China coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 65-70.

[4] 高林生,张尔辉,朱权洁,等.大倾角特厚煤层综放面矿压显现规律[J].西安科技大学学报,2020,40(4):615-620,657.
GAO Linsheng, ZHANG Erhui, ZHU Quanjie, et al. Strata-pressure behavior in fully mechanized caving face with large dip angle and extra-large thickness[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(4): 615-620, 657.

[5] 吕情绪,卢振龙,王子升,等.神东矿区矿压大数据云平台建设及应用[J].煤矿机械,2020,41(11):170-173.
LYU Qingxu, LU Zhenlong, WANG Zisheng, et al. Construction and application of mine pressure big data cloud platform in Shendong Mining Area[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(11): 170-173.

[6] 张科利,陈洋.RPAnalysis 矿山压力可视化分析系统应用研究[J].煤炭科技,2015(4):9-12.
ZHANG Keli, CHEN Yang. Application of RPAnalysis mine pressure visualization analysis system[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2015(4): 9-12.

[7] 肖家平,刘帅,池小楼.近距离采空区下大倾角俯伪斜工作面矿压显现特征研究[J].煤炭工程,2019,51(6):93-98.
XIAO Jiaping, LIU Shuai, CHI Xiaolou. Characteristics of strata behavior in large inclined angular pseudo-inclined face under complicated conditions[J]. Coal Engineering, 2019, 51(6): 93-98.

[8] 邢平伟,宋选民,付玉平,等.神东大采高超长工作面矿压显现强度预测研究[J].中国煤炭,2009,35(8):43-47.
XING Pingwei, SONG Xuanmin, FU Yuping, et al. Study on prediction of underground pressure Intensities in mining face of great-height and ultra-length of Shendong[J]. China Coal, 2009, 35(8): 43-47.

[9] 屈世甲,李鹏.基于支架工作阻力大数据的工作面顶板矿压预测技术研究[J].矿业安全与环保,2019,46(2):92-97.
QU Shijia, LI Peng. Research on prediction technology of roof mining pressure based on big data of support resistance[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(2): 92-97.

[10] 齐冲冲,杨星雨,李桂臣.新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望[J].煤炭学报,2021,46(2):688-700.
QI Chongchong, YANG Xingyu, LI Guichen. Research status and perspectives of the application of artificial intelligence in mine backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 688-700.

[11] 薛吉胜,陈法兵,赵铁林,等.基于微震事件特性的大倾角煤层覆岩破坏规律研究[J].煤炭工程,2021,53(8):121-124.
XUE Jisheng, CHEN Fabing, ZHAO Tielin, et al. Analysis on overburden failure law of large-dip coal seam based on features of microseismic events[J]. Coal Engineering, 2021, 53(8): 121-124.

[12] 张浩,伍永平.大倾角大采高工作面覆岩移动及力学分布规律研究[J].煤炭工程,2018,50(4):84-87.
ZHANG Hao, WU Yongping. Overburden movement and mechanical distribution law of high-cutting face in steeply dipping coal seam[J]. Coal Engineering, 2018, 50(4): 84-87.

[13] 黄清锋,康书生,何兴义,等.大倾角俯斜综放开采覆岩运动规律研究[J].煤炭技术,2019,38(5):39-43.
HUANG Qingfeng, KANG Shusheng, HE Xingyi, et al. Over-burden rock motion research of large angle inclined mining[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 39-43.

[14] 章黎明.王家山煤矿大倾角厚煤层综放采场矿压规律研究[J].煤炭科学技术,2007,35(12):22-26.
ZHANG Liming. Research on ground behavior law of fully mechanized caving mining face in deep inclined seam of Wangjiashan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(12): 22-26.

[15] 李增禄.汾源煤业 5-101 工作面矿压显现规律及支架适应性分析[J].煤矿现代化,2021,30(5):112-115.
LI Zenglu. Fenyuan Coal Industry 5-101 face rock pressure behavior law and support adaptability analysis[J]. Coal Mine Modernization, 2021, 30(5): 112-115.