

基于路径形态学和正弦函数族匹配的电成像测井缝洞自动识别与分离方法研究

王磊^{1,2}, 沈金松^{1,2*}, 衡海亮^{1,2}, 魏帅帅^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, shenjinsongcup@163.com

收稿日期: 2021-05-21

中国石油天然气股份有限公司重大科技专项项目(2017E-15)资助

摘要 针对碳酸盐岩缝洞型含油储层, 电成像测井方法可以探测得到高分辨率井壁缝洞分布图像, 但由于岩性变化、井孔介质非均质性等的干扰以及裂缝间的互相缠绕、黏连使得对裂缝和溶蚀孔洞信息的有效提取仍存在较大阻碍。不完备路径开算法和容忍路径算子对直线或者轻微弯曲结构有良好的适应性, 该适应性与结构元素形状的选取无关, 而正弦函数族对弯曲结构的匹配度较好。文中将多尺度不完备路径形态学方法和正弦函数族、二阶矩椭圆拟合算法应用于电成像测井电导率图像的处理, 提出采用不完备路径形态学算法和正弦函数族智能匹配的裂缝和溶蚀孔洞自动识别和分离方法。首先采用数学形态学中的开闭变换, 消除电成像测井图像的干扰; 其次, 进行不完备路径形态学、密度聚类算法的公式推导和分析, 并融合多方向的形态学路径算子、容忍路径算子、含噪的基于密度聚类方法追踪并提取连续或间断的弯曲线状结构; 再次, 对提取的弯曲线状结构进行改进的Hough变换和正弦函数族匹配, 发现Hough变换仅对低角度裂缝的匹配效果较好, 而正弦函数族对高角度裂缝及完整度较低的残缝有更高的精确度; 还有, 使用正弦函数族计算裂缝的相位、振幅和井壁的深度位置信息; 最后, 对于剩下的溶蚀孔洞, 采用二阶矩等效椭圆函数方法进行拟合, 获得了孔洞的纵横比。为验证文中提出的算法, 对几个数值模型和某油田的碳酸盐岩井的电成像资料进行了处理, 成功完成对缠绕的裂缝和孔洞的分离过程, 验证了所提出算法的有效性和适应性, 为碳酸盐岩缝洞型含油储层的精细评价提供了实用方法, 有助于提高对储层缝洞分布特点的认识水平。

关键词 电成像测井; 缝洞识别与分离; 不完备路径开运算; 正弦函数族; 密度聚类; 二阶矩椭圆拟合

Automatic fractured-vuggy identification and extraction from electric imaging logging data based on an incomplete path opening operation and a sinusoidal database

WANG Lei^{1,2}, SHEN Jinsong^{1,2}, HENG Hailiang^{1,2}, WEI Shuaishuai^{1,2}

引用格式: 王磊, 沈金松, 衡海亮, 魏帅帅. 基于路径形态学和正弦函数族匹配的电成像测井缝洞自动识别与分离方法研究. 石油科学通报, 2021, 03: 380-395

WANG Lei, SHEN Jinsong, HENG Hailiang, WEI Shuaishuai. Automatic fractured-vuggy identification and extraction from electric imaging logging data based on an incomplete path opening operation and a sinusoidal database. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 380-395. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.031

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract By applying electric imaging logging equipment for different kinds of fractured-vuggy carbonate oil reservoirs, we can get high resolution images of the borehole wall. However, it is hard to acquire the information of the fractures, solution pores and cavities accurately on the account of the lithology distribution randomness, the media heterogeneity around the borehole and the intertwining and adhesion of fractures. Based on the incomplete path opening and tolerance operators that remain flexible enough to fit rectilinear and slightly curved structures since they do not depend on the choice of a structural element shape and the advantage of a sinusoidal database that can fit the fractures precisely, this paper proposes a new method to intelligently identify and extract discontinuous fractures solution pores and cavities from the original electric logging image data by using multi-scale incomplete path opening and tolerance operators, a sinusoidal database and a second-order moment ellipse fitting method. First, the opening and closing operation of mathematical morphology is adopted to eliminate the noise of the electric imaging logging data. Then formulas of incomplete path opening and a density clustering method are deduced and analyzed. The incomplete path opening parameter sets and tolerance operators in different directions are applied to trace and separate fractures and the density-based clustering of applications with noise is introduced to classify these separated parts of fractures that are in continuous or intermittent bending linear structures. After the comparison of results of bending linear structures fitting in a Hough transform and a sinusoidal database, we find that the Hough transform is only appropriate to match the low angle fractures while the sinusoidal database method is more accurate for high angle fractures or in fragmentary condition. Apart from that, we can get the phase, amplitude and depth information of these fractures by the sinusoidal database method. Finally, the second-order moment method is used to determine the equivalent ellipse of the remaining vugs and the vertical-horizontal ratios of vugs are obtained. In order to illustrate the application of the proposed method, examples of numerical simulation data and oil well field data have been tested. According to the result, intertwining fractures and vugs are separated successfully, which demonstrates the effectiveness and adaptability of our method in application of electric imaging logging data. So the proposed method offers practical support for the precise evaluation of fractured-vuggy carbonate oil reservoirs and helps to raise the level of recognition to the distribution of fractures and vugs of the target layers.

Keywords electric imaging logging; identification and separation of fractures and vugs; incomplete path opening operation; sinusoidal database; DBSCAN; second moment ellipse fitting

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.031

0 引言

碳酸岩盐储层在各种类型的岩性储层中的占比较大,从已公布数据来看,碳酸岩盐储层的开采产出可达全球范围内油气产出的六成左右^[1-4]。该类型油气藏裂缝较发育,因此对缝洞型碳酸盐岩储层的研究至关重要。该类型储层的油气主要存在交错的裂缝、经风化腐蚀和流体经过形成的孔洞之中,其构成成分有原生基质孔隙及次生裂缝、溶孔、溶洞^[5]。孔隙型、溶洞型、裂缝型为基本储集类型,孔洞型、缝洞型、孔缝型、孔缝洞复合型为过渡类型^[5-6]。正是由于缝洞型储层的复杂性,缝洞的测井识别与评价仍存在多方面的难题,例如,缺乏储层类型准确识别和划分有效方法,缺少储集空间定量表征的高精度方法。因此,实际生产亟需研究缝洞自动识别与分离算法。

缝洞型储层并非今天才进入人们的视线。李瑞、陆云龙等通过井口直径的计算方法结合RLLD/RLLS理论,归纳出裂缝出现的可能性的值,并以此作为储层含油性评价的标准^[7-8]。杨辉廷等利用测井及钻井数据对塔里木盆地裂缝和溶蚀孔洞信息进行了较为准确

的计算,对与水平地层呈不同角度的裂缝进行了提取,对孔洞饱和油、气、水的分类通过自然伽马算法进行了划分^[9]。陈科贵等从岩层内电流经过缝洞和非缝洞部分的串并特征进行分析,试图以此来计算岩层的渗透率,并认为岩层的渗透率不是一成不变的^[10]。

电成像测井对碳酸盐岩缝洞型储层的评价作用在油气业界逐渐获得越来越多的关注,国内外学者和油气服务公司发表了许多成果。为了将裂缝和孔洞从基质中区分开来并计算获得参数,斯伦贝谢公司的Delhomme首先发表了成像的阈值法,这可以将缝洞的外形显示出来,同时指出裂缝所在深度段^[11];Hall等尝试使用Hough变换计算正弦型的裂缝信息和地质走向数据,就符合正弦分布的连续裂缝取得了较好效果^[12]。景建恩等针对塔河油田碳酸盐岩储层的裂缝,通过对FMI测井图像数据使用R型聚类算法,建立了裂缝指标数据集,并对裂缝出现可能性做出了客观评价^[13]。李曦宁、李振苓和沈金松等提出了基于二值图的完备路径形态学算法,用于分离地层层理与裂缝^[14-15]。除此之外,人工智能算法在测井领域的应用实例也越来越多^[16-22]。针对电成像测井,XUE

Yongchao等^[19]利用遗传算法与神经网络结合对多种测井资料进行处理进而实现裂缝识别。Azim^[20]提出一种鲁棒性高的神经网络算法(ANN),利用Fortran语言建立以后向传播为基础的训练过程,引入5口井的微电阻率成像及传统测井曲线数据的80%作为训练集,20%作为测试集,以此来估计裂缝密度和分形两个维度上的裂缝性质,预测储层段井壁附近的三维裂缝分布图。李冰涛等^[21]提出基于TensorFlow的图像语义分割模型DeepLabv3+来对经由Labelme工具标定后的裂缝数据进行像素分割和提取,效果较好。邹文波对人工智能在岩性识别、低电阻率油层识别、储层参数评价、储层裂缝孔洞识别等4个测井重点方向的研究现状进行了分析和总结^[22]。然而,由于受复杂地质环境和井孔干扰的影响,电导率图像的缝洞自动识别和定量评价仍存在诸多困难,例如受地层或极板切割的裂缝或孔洞因为其不连续性,对其进行定量评价仍较为困难。

本文根据数学形态学基本理论和不完备路径算子适应于弯曲线性结构追踪以及对间断有较强容忍度的特点,将不完备路径形态学算法、正弦函数族算法和二阶矩椭圆拟合算法应用于电导率测井图像,通过给定长度的路径算子、容忍算子和正弦函数族数据集完成对裂缝参数的准确计算,形成了一种不完备路径形态学算法与正弦函数族结合计算裂缝参数信息以及用二阶矩自动对溶蚀孔洞进行椭圆拟合并计算孔洞参数信息的方法。为测试和验证该方法的有效性和适应性,将所研究方法应用于某油田多口井的实测电成像数据,初步证实了算法的高精度和有效性。

1 用于电导率图像基质和缝洞电导率异常自动分离的 Otsu 算法

在这一部分,应用大津法(Otsu)从井壁采集获得的FMI图像中自动分离裂缝和孔洞^[23]。Otsu算法的基本思想是指定一个阈值,该阈值可以参考图像灰度图的像素分布柱状图以便将图像分成两部分,且两部分的方差达到最大。

如图1所示,设计了一个图像 G ,它是 $Q \times R$ 像素大小的图像,

$$G = \{g(x, y) \mid x \in \{1, 2, \dots, Q\}, y \in \{1, 2, \dots, R\}\} \quad (1)$$

设 $g(x, y)$ 是分布在 (x, y) 范围内的图像的灰度函数。通过在灰度图的像素值区间里测试不同的阈值来获得最优的图像分割阈值 $thresh$,该阈值可以让被分割成两

部分的方差 $\sigma^2(thresh)$ 达到最大,该算法的具体实现如图1所示。

对于二维电导率图像来说,可以把阈值 $thresh$ 作为分割的参照。高于 $thresh$ 的所有像素点设定为1,该像素点对应于井壁岩石的基质部分,低于 $thresh$ 的所有像素点设定为0,该像素点对应于井壁岩石的裂缝、溶蚀孔或洞部分。通过这一过程,灰度电导率测井图像矩阵变成了0-1二值矩阵。图2a是原始灰度缝洞成像图,图2b是基于小波变换与快速行进算法插值后的图像^[24];图2c是Otsu分割后的裂缝、溶蚀孔或洞图像。图中可以看出,裂缝、溶蚀孔或洞可以较好地与基质部分实现分离。

2 不完备路径形态学缝洞识别方法

图2所示的电成像测井电导率图像中暗色或黑色斑块或条带显示了可能存在的裂缝或溶蚀孔洞,如何从这些图像中识别和分离出该类电导率异常是电成像测井缝洞储层识别与评价的首要任务。下文首先简单介绍从电导率图像中提取高电导率异常并分离缝洞的方法原理。

2.1 基于二值图路径开的裂缝识别

路径形态学与传统的数学形态学开闭运算不同,包含了诸多与路径相关的概念。首先是带方向的临近关系的概念。设 E 是一个已知节点的集合,代表像素

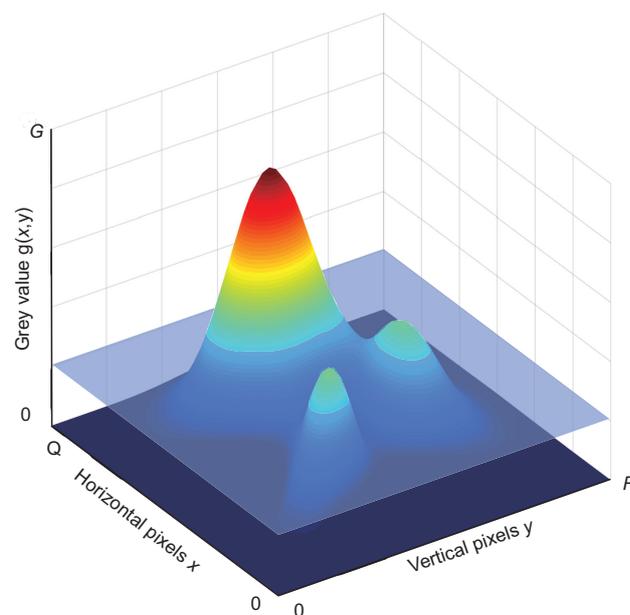


图1 Otsu算法示意图

Fig. 1 A schematic diagram of Otsu method

点的位置。使用二元的临近关系“ \mapsto ”来定义一个在这些节点之上的有向图。具体地， $x \mapsto y$ 表示存在一条从 x 到 y 的路径。如果 $x \mapsto y$ ，就称 y 是 x 的后继节点， x 是 y 的前驱节点。这个概念在图3中有展示。 $b_1、b_2、b_3$ 是 a 的前驱节点， $a_1、a_2、a_3$ 是 b 的后继节点。图3中可以看到，箭头表示的临近关系规定了节点与节点之间的继承方向是从左至右，分别为 $45^\circ、0^\circ、-45^\circ$ ，而临近关系的角度并不局限于 45° 的倍数，可以任意选择。在FMI图像中应用该方法时，通过事先定义临近关系，可以把结点间以不同的方向串连起来，提取与实际测井资料相符的图像特征。

如果存在一个空间分布结构恒定不变的二维节点图，当若干节点满足图4所示的临近关系，那么其中会包括多条不同形状的长度为 L 的路径。由于每个点

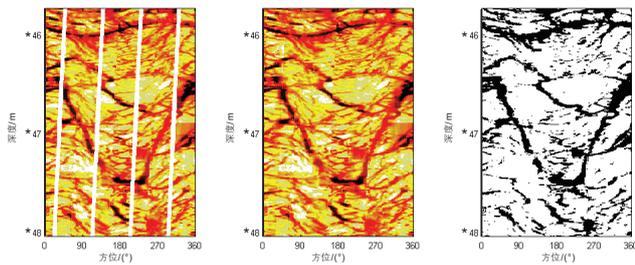


图2 (a)原始灰度缝洞成像图；(b)基于小波变换与快速行进算法插值后的图像；(c)Otsu分割后的缝洞图像

Fig. 2 (a) Original electric imaging logging image; (b) Electric imaging image interpolated by means of wavelet transform and fast matching method; (c) Fracture-vug image separated by the Otsu method

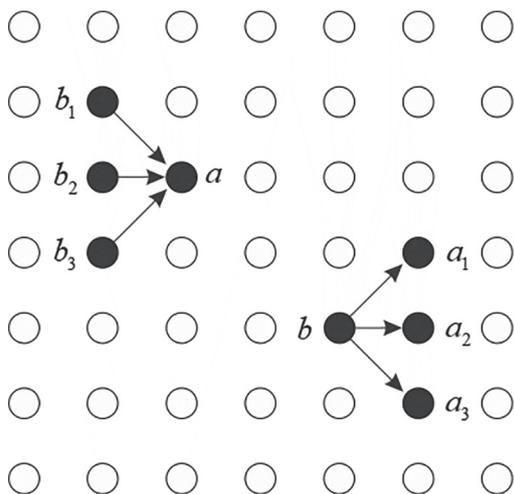


图3 邻接关系示意图， $b_1、b_2、b_3$ 是 a 的三个前驱节点， $a_1、a_2、a_3$ 是 b 的三个后继节点

Fig. 3 Adjacency relation of set a and b, where a is the successor of b_1, b_2, b_3 , and b is the predecessor of a_1, a_2, a_3 .

的前驱结点与后继结点的数量均为3个，以任一结点为起始点的长度为 L 的路径会有 3^{L-1} 种情况，因此，路径形态学算法的耗时与 L 呈指数型上升，同时对内存的要求也会逐步提高。针对这一问题，Talbot等提出了一种新的快速算法^[25-28]。假设存在东西方向的二维临近关系节点集合 E ， X 是节点图 E 中的任意子集。给定函数 b ：

$$b(x) = \begin{cases} \text{真}(x \in X) \\ \text{假}(x \notin X) \end{cases} \quad (2)$$

对于二维临近关系节点集合 E ，在每个像素点 p 存储两个值：起始点为 p 且方向为右的最长路径的长度 $\lambda^+[p]$ (该长度不包含点 p 自身)，以及起始点为 p 且方向为左的最长路径的长度 $\lambda^-[p]$ (该长度不包含点自身)，其计算公式如下：

$$\lambda^-[p] = 1 + \max(\lambda^-[p^1 + 1, p^2 - 1], \lambda^-[p^1 + 1, p^2], \lambda^-[p^1 + 1, p^2 + 1]) \quad (3)$$

$$\lambda^+[p] = 1 + \max(\lambda^+[p^1 - 1, p^2 - 1], \lambda^+[p^1 - 1, p^2], \lambda^+[p^1 - 1, p^2 + 1]) \quad (4)$$

其中， p^1, p^2 表示二维节点图中点 p 的横纵坐标。

当二维临近关系节点图满足图4(a)且 $b[p]=真$ 时，可以通过对每个符合条件的路径上的节点重复利用式(3)和(4)的关系，分别计算得到节点图中每个像素点 $p(p^1, p^2)$ 的向右最长路径节点数 $\lambda^+[p]$ 、向左最长路径节点数 $\lambda^-[p]$ ，进而根据式(5)求得包含节点 p 的最长

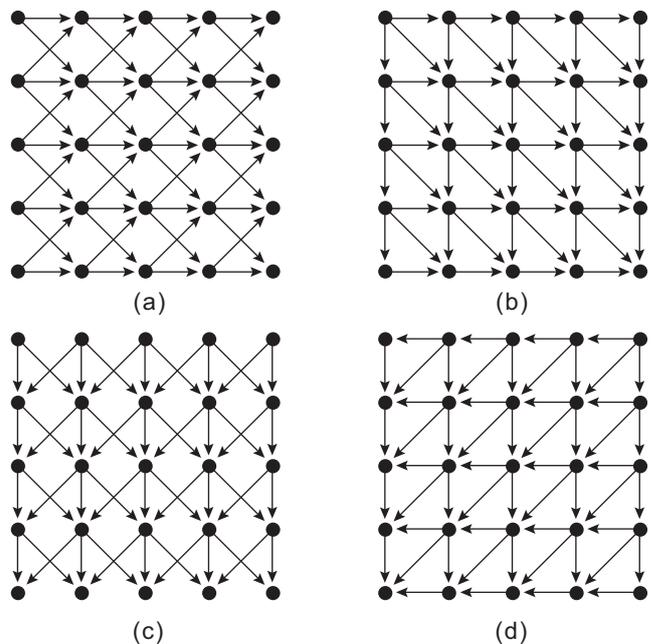


图4 四种邻接关系的组合

Fig. 4 Four kinds of adjacency relations.

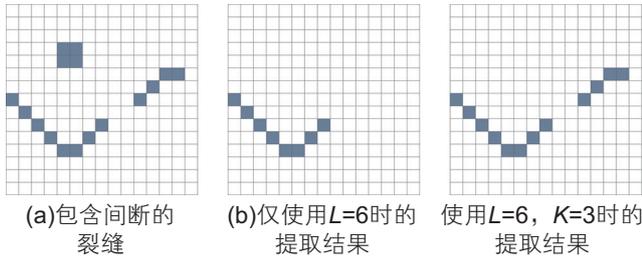


图 6 基于不完备路径的裂缝提取示意图
Fig. 6 The diagram of the fracture extraction based on the incomplete path opening method

用 $\lambda[p, k]$ 表示节点 p 在缺失路径长度为 k 即路径容忍因子 $K = k$ 情况下通过该点的最长路径长度。需要注意的是，缺失路径长度 k 表示多个连续节点的缺失，而不是某一条路径中多处缺失节点的个数之和，如图 6c 中缺失的 2 个节点必须连在一起。类似完备路径开运算的过程，不完备路径开同样是先左向逐列计算 $\lambda^-[p, k_1]$ ，再右向逐列计算 $\lambda^+[p, k_2]$ 。当 $b[p] = \text{真}$ 时， $k_1 + k_2 = k$ ；当 $b[p] = \text{假}$ 时， $k_1 + k_2 + 1 = k$ 。如果经过该节点的路径在这里存在长度为 k 的间断，需要利用上一个间断长度为 $k-1$ 的符合临近关系的最长路径来辅助计算，详细公式在下面给出。

若 $b[p] = \text{假}$ ：

$$\lambda[p] = \lambda^+[p] + \lambda^-[p] + 1 \quad (6)$$

$$\lambda^-[p, k] = 1 + \max \begin{pmatrix} \lambda^-[(p^1 + 1, p^2 - 1), k - 1] \\ \lambda^-[(p^1 + 1, p^2), k - 1] \\ \lambda^-[(p^1 + 1, p^2 + 1), k - 1] \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\lambda^+[p, k] = 1 + \max \begin{pmatrix} \lambda^+[(p^1 - 1, p^2 - 1), k - 1] \\ \lambda^+[(p^1 - 1, p^2), k - 1] \\ \lambda^+[(p^1 - 1, p^2 + 1), k - 1] \end{pmatrix} \quad (8)$$

若 $b[p] = \text{真}$ ：

$$\lambda^-[p, k] = 1 + \max \begin{pmatrix} \lambda^-[(p^1 + 1, p^2 - 1), k] \\ \lambda^-[(p^1 + 1, p^2), k] \\ \lambda^-[(p^1 + 1, p^2 + 1), k] \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\lambda^+[p, k] = 1 + \max \begin{pmatrix} \lambda^+[(p^1 - 1, p^2 - 1), k] \\ \lambda^+[(p^1 - 1, p^2), k] \\ \lambda^+[(p^1 - 1, p^2 + 1), k] \end{pmatrix} \quad (10)$$

根据公式(6)~(10)对每个节点 $p(p^1, p^2)$ 递归计算 $\lambda^-[p, k]$ 和 $\lambda^+[p, k]$ 。

2.3 不完备路径形态学对模拟含噪声电成像数据的处理分析

为了考查不完备路径形态学与 Otsu 算法对模拟含

噪声电成像数据的适应能力和处理效果，设计了含噪且溶蚀孔洞与多条相交裂缝共生的缝洞储层电成像响应模型。下文将测试不同参数对去噪和缝洞分离的效果。

如图 7a 所示，设计两条相交裂缝和两个不同尺度溶蚀孔洞的组合模型，大小是 552×314 像素。图中可以看到两个正弦裂缝均被断成了多个部分，还有两个线段表示直线型裂缝或者雁阵型诱导缝，两个椭圆表示不同直径和纵横比的孔洞，并给图像加上方差为 0.005 的二维高斯噪声。图 7b 针对图 7a 进行了彩色图转换成灰度图的操作，图 7c 利用了 Otsu 算法对图 7b 进行了二值化分割，其中白色部分像素值是 1，黑色部分是 0。可以看到图像的背景都被去掉了，仅剩裂缝、孔洞和噪声，正弦型裂缝中存在间断的最长距离小于 15 个像素长度。

图 8 是利用不同的不完备路径形态学参数组合对图 7c 两条裂缝图像提取的效果。其中，图 8a 是 $L=90, K=0$ 时的提取效果，即完备路径形态学下 $L=90$ 的效

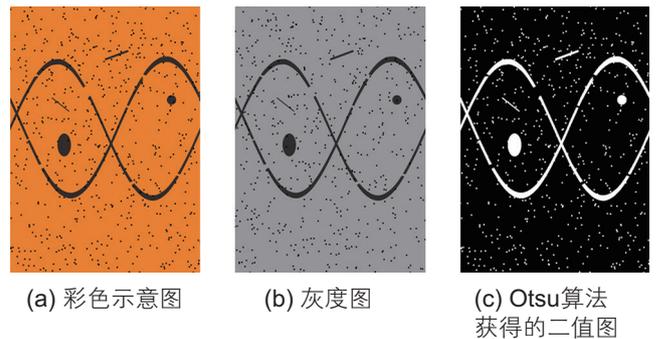


图 7 两条正弦型裂缝示意图
Fig. 7 A schematic diagram of two sinusoidal curves

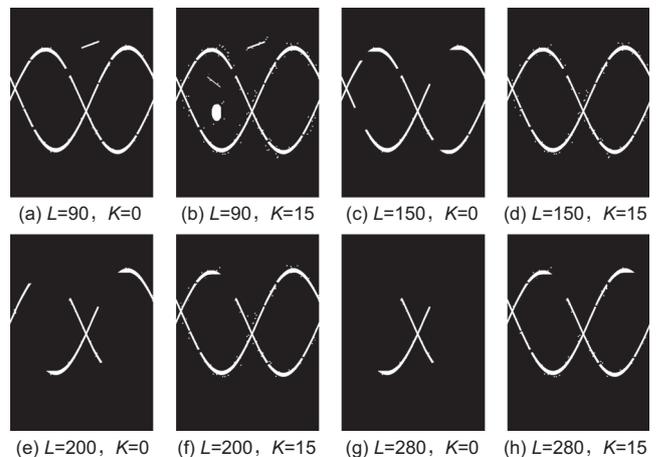


图 8 不完备路径形态学算法不同参数组合的提取效果
Fig. 8 Different extraction results of combinations of parameters by incomplete path opening operation

果。此时因为背景噪点的路径长度都小于90,所以噪点被去除了,同时被去除的还有一条直线型小裂缝和两个椭圆状孔洞。图8b是 $L=90, K=15$ 时的提取效果,此时图7c中一个较大的孔洞较长的一部分再次出现,另一个直线型小裂缝亦然。图8c是 $L=150, K=0$ 时的提取效果。此时小的直线裂缝和孔洞都被去掉了,但是因为此时是完备路径形态学提取,所以两条正弦型裂缝中间断型存在的部分就被略去了,这无法满足要求。

由于正弦型裂缝中存在间断的最长距离小于15个像素长度,所以选择容忍阈值15。图8d是 $L=150, K=15$ 时的提取效果。在增加了容忍阈值的设置后,两条正弦型裂缝被完整提取出来,对比图8c,可以看到不完备路径算法的优势。

继续增大 L ,图8e是 $L=200, K=0$ 时的提取效果,此时两条正弦型裂缝中的大部分被略去了。图8f是 $L=200, K=15$ 时的提取效果,增加容忍阈值的设置,正弦型裂缝中仍然有一小部分缺失,这表明 L 设置过大。图8g~h是 $L=280$ 时的提取效果,作为 L 设置过大的极端情况,无论 K 值是否是0,裂缝都无法被完整提取。综上,可以看出使用不完备路径形态学在参数组合 $L=150, K=15$ 的时候,两条正弦型裂缝的提取效果最好。

3 密度聚类算法以及正弦函数族算法对相交裂缝的分离

在实际的测井资料中多是如图7a那样两条甚至多条交织在一起的正弦曲线,为了把这两条正弦曲线分开,本文在使用不完备路径形态学算法的基础上结合密度聚类算法以及正弦函数族匹配的算法来完成。

3.1 密度聚类算法对多条相交裂缝的提取

图9a是对图8c使用 $L=150, K=15$ 的路径形态学算子提取的结果,之后进行去噪,采用长和宽均是4的disk型结构元素对图像进行开运算操作,即对原图像先腐蚀后膨胀,图9b是去噪后的结果,图中可以看到白色噪点被去除,而两条正弦曲线几乎没有受到破坏,去噪效果良好。下边分析对图9b进行两个方向的路径形态学分离。

仍然使用容忍阈值 $L=150, K=15$ 的不完备路径形态学算子对图9b进行提取,但不再是如图4所示的四个方向的提取,而是选取了其中的两个方向,以方便

后续讨论。图10a是算子“下-右下-右”的示意图,图10b是用该算子提取的结果;图10c是算子“上-右上-右”的示意图,图10d是用该算子提取的结果。可以看到图10b和图10d分别提取出了带有间断的裂缝的一部分。虽然在每一条裂缝上还留着与之接近垂直方向的裂缝的“刺”,但它对下一步的分离效果几乎没有影响。为了完成缠绕裂缝的分离,选用聚类方法来实现。

基于聚类的算法是机器学习中涉及对数据进行分组的一种算法,通过分析给定数据集在不同域的分布规律,可以把数据分成多组,同一组内的数据具有相同或类似的特征,而不同组之间的数据特征不一致。常见的聚类算法有K-means聚类、Mean-Shift聚类、基于密度的带噪声的空间聚类(DBSCAN)等^[29]。本文使用的是DBSCAN算法,它包含两个重要参数: ϵ (邻域距离参数)和 $\min Pts$ (邻域最少样本点参数),该算法用这两个参数来寻找数据集内各点在某一坐标域内具有较高密度的数据点的组合,并把组合划归成不同的簇,具体运算关系可以用下列式子表示:

$$\text{样本数据集 } D = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}。$$

定义以下概念:

ϵ -邻接距离

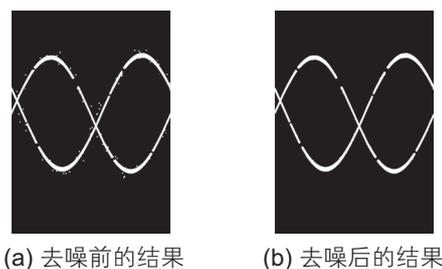


图9 开运算去噪效果图

Fig. 9 A denoising result by open mathematical morphology method

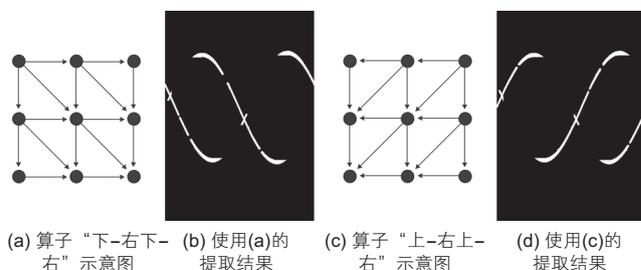


图10 使用两个不同方向的不完备路径形态参数组合提取的结果

Fig. 10 Results by using two different directions of incomplete path opening parameter combinations

设 $x_j \in D$ ，其 ε -邻接距离指的是在数据集 D 中与点 x_j 不远于 ε 的数据，用 $N_\varepsilon(x_j) = \{x_i \in D \mid dist(x_i, x_j) \leq \varepsilon\}$ 表示；

核心有效数据点

若 x_j 的邻域具有不少于 $\min Pts$ 个数据点，满足 $|N_\varepsilon(x_j)| \geq \min Pts$ 的条件，那么 x_j 被认为是核心有效数据点， $\min Pts$ 数包含了 x_j 自身。

直接接触及关系

对 x_i 与 x_j ，若 x_i 是核心有效数据点且 x_j 与 x_i 的距离不大于 ε -邻接距离，则称 x_j 由 x_i 构成直接接触及关系；

触及关系

对 x_i 与 x_j ，若存在 x_k 使得 x_i 与 x_j 均与 x_k 构成直接接触及关系，则称 x_j 由 x_i 构成触及关系；

图 11 是一个简单的算法示意图，图中 $\min Pts=3$ 。图中各个圆环表示 ε -邻接距离，核心有效数据点是 x_1 ，可以看到 x_2 、 x_4 与 x_1 均构成直接接触及关系，而 x_3 与 x_1 构成触及关系，因此 x_3 与 x_4 也构成触及关系。

从上述定义出发，基于密度的带噪声的空间聚类的应用算法给出了“簇”的定义，即一定区域内最大数目的多个互相构成触及及关系的数据点连接到一起的集合。若 x 为核心有效数据点，那么找到所有与之有触及关系的集合为 $X = \{x' \in D \mid x' \text{ 由 } x \text{ 密度可达}\}$ ， X 满足簇的连接性与最大性的性质。

按 $(\varepsilon, \min Pts)$ 参数重复上面的过程，直到数据集内所有点都被该算法扫描完毕。

对于有间断的两条正弦曲线，选用不同的聚类参数组合会得到不同的结果。图 12 是在 $\varepsilon=3$ ， $\min Pts=3$ 的情况下获得的结果。

图 12b 和 e 分别是用两条带有间隔的正弦曲线通过不完备路径形态学在图 12a 和图 12d 方向的提取结果。对图 12b 和 e 进行密度聚类，参数设定为 $\varepsilon=3$ ， $\min Pts=3$ ，这时如果 3 个及以上的像素点每两个像素点周围不大于 3，它们都会被划入同一个聚类簇，得

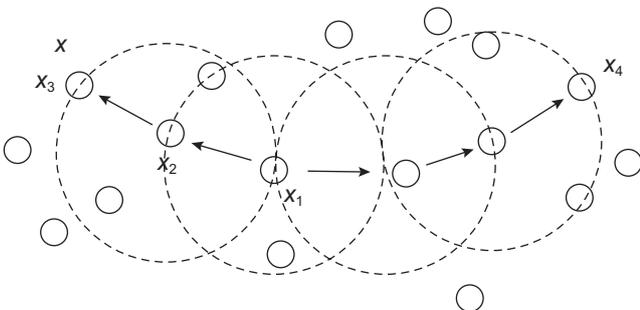


图 11 DBSCAN 算法示意图
Fig. 11 A schematic diagram of DBSCAN algorithm.

到的结果如图 12c 和 f 所示。由于间隔的存在，同一条正弦曲线中间隔都大于 3 个像素距离，可以看到图 12c 和 f 均被 DBSCAN 算法自动分成了 7 种颜色对应的 7 部分，本应该通过密度聚类算法分到一起的正弦曲线线段因为间断的存在而被分割成多个部分，这没有达到做密度聚类的初衷。

尝试使用另一组聚类参数组合。图 13 是在如果 $\varepsilon=30$ ， $\min Pts=3$ 的情况下获得的结果。

图 13b 和 e 分别是用两条带有间隔的正弦曲线通过不完备路径形态学算法在图 13a 和 d 方向上的提取结果。对图 13b 和 e 进行密度聚类，参数设定为 $\varepsilon=30$ ， $\min Pts=3$ ，这时如果 3 个及以上的像素点每两个像素点周围不大于 30，它们都会被划入同一个聚类簇，得到的结果如图 13c 和 f 所示。由于同一条正弦曲线中间隔都小于 30 个像素距离，所以可以看到图 13c 和 f 被分成了 3 种颜色对应的 3 部分，原来属于一条正弦曲线的部分被归为一类，因此密度聚类的结果是正确的。

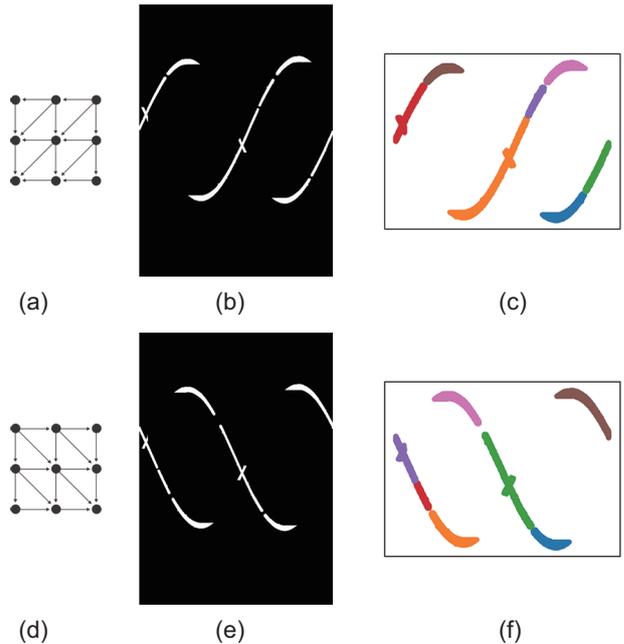


图 12 两条带有间隔的正弦曲线使用不完备路径形态学提取后密度聚类的结果。(a)不完备路径形态算子的提取方向一；(b)使用 a 获得的提取结果；(c)对图 b 的密度聚类结果；(d)不完备路径形态算子的提取方向二；(e)使用 d 获得的提取结果；(f)对图 e 的密度聚类结果

Fig. 12 Results by DBSCAN after using incomplete operation on two sinusoidal curves with several intervals. (a)First direction of incomplete path opening operator; (b)The result by using operator a; (c) The result of DBSCAN on b; (d) Second direction of incomplete path opening operator; (e) The result by using operator d; (f) The result of DBSCAN on e

3.2 基于正弦函数族的裂缝参数提取算法

由电导率图像提取和分离裂缝与溶蚀孔洞后,下一个关键任务是裂缝和溶蚀孔洞参数的定量评价。对于规则裂缝与井孔相交在电导率图像上呈一条有初始相位角的正弦曲线,非规则裂缝则呈现变形的曲线。溶蚀孔洞则在电导率图像上大多呈椭圆形,也有不规则形状。因此,根据分离的裂缝与溶蚀孔洞分别拟合,求取裂缝开度、方位倾角以及溶蚀孔洞的长短轴、纵横比和面孔率等参数。下面针对不同缝洞的组合形状,分析相应的拟合方法。

Hough变换可以针对电成像测井图像中的正弦型裂缝进行提取,方法是把图像变换到参数域后计算出裂缝的振幅和相位参数^[30]。在转换的过程中,如果图像中的裂缝曲线归属于同一个正弦曲线,那么在参数域会叠加在一点上。在测井解释中,Hough变换参数域是作为一个投票器来对图像中的各点变换后的信息

进行投票。在投票结束后,参数域中较高的那一点会分别显示出图像中对应曲线的振幅和相位。

Hough变换的优势是能快速提取微电导率测井成像中的裂缝信息,但它也有缺点。第一,噪音的存在影响了正弦曲线的提取;第二,对高角度裂缝拟合容易出现较大误差。

从前面的描述中,知道电导率测井成像中的裂缝信息可以用正弦函数来表示,因此可以尝试使用模式识别的方式来提取裂缝。在本文中,构建了一个正弦函数族来进行实际图像的裂缝提取。所有接近正弦型的裂缝理论上都可以用正弦函数族来进行拟合。拟合的原理为2-D相关算法^[11]:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (11)$$

其中, r 表示2-D相关系数, A 表示实际的裂缝成像数据, B 是正弦函数族。 \bar{A} 和 \bar{B} 分别表示 A 和 B 的平均值。

为了对比Hough变换和正弦函数族拟合提取裂缝的优势,这里分别考虑低角度和高角度的裂缝(水平裂缝和竖直裂缝也可以按照类似的方法处理)。正弦函数族的基本参数设置如下:倾角区间设为 $-75^\circ \sim 75^\circ$,相位区间设为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。在井径已知的情况下,正弦函数的振幅可以通过倾角计算出来,深度可以通过实际的FMI成像资料获得。基于这样的设定,正弦函数族就可以被建立起来。在实际的计算过程中,倾角区间和相位区间的步长应该根据测井数据的大小和粗细等情况斟酌,因为当单位步长太小时,正弦函数族的计算代价会非常高;当单位步长太大时,最后的匹配计算精度会变差,因此应寻找一个计算代价与精度的平衡点。

图14a展示了三条残缝,本节试图用不同的方法来重建原始的正弦曲线。从图14b~c重建结果和图14e轮盘的对比结果可以看到正弦函数族匹配的结果精度更高,更接近残缝原始的振幅,而使用Hough变换重建的正弦曲线振幅超过了原始模型的振幅,同时从图14d看到Hough变换域也并不是全部收敛到某一个“亮点”上。因此当原始残缝的信息不够多时,使用Hough变换提取的结果精度较低。

图15是使用正弦函数族对图13b和13e聚类后的一共6部分分别进行重建恢复的结果。文中使用了32GB的内存RAM来进行重建工作,匹配精度较高。可以看到各部分的重建裂缝与模型最初的正弦型很接

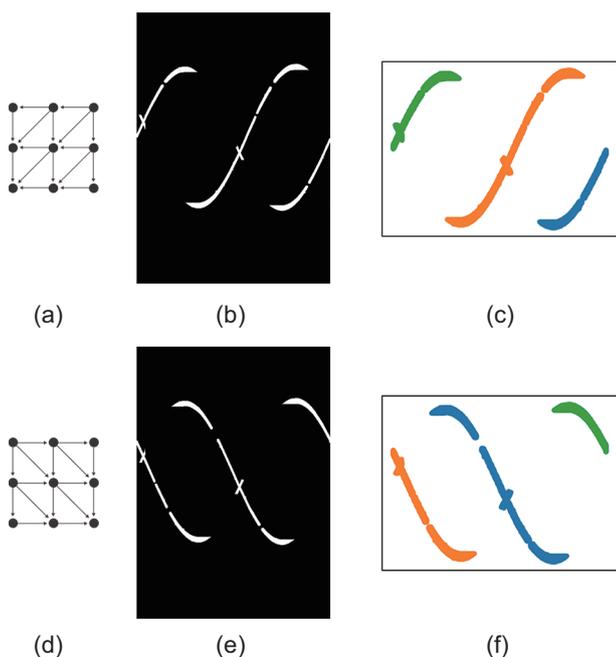


图13 两条带有间隔的正弦曲线使用不完备路径形态学提取后密度聚类的结果(a)不完备路径形态算子的提取方向一;(b)使用a获得的提取结果;(c)对图b的密度聚类结果;(d)不完备路径形态算子的提取方向二;(e)使用d获得的提取结果;(f)对图e的密度聚类结果

Fig. 13 Results by DBSCAN after using incomplete operation on two sinusoidal curves with several intervals (a) First direction of incomplete path opening operator; (b) The result by using operator a; (c) The result of DBSCAN on b; (d) Second direction of incomplete path opening operator; (e) The result by using operator d; (f) The result of DBSCAN on e

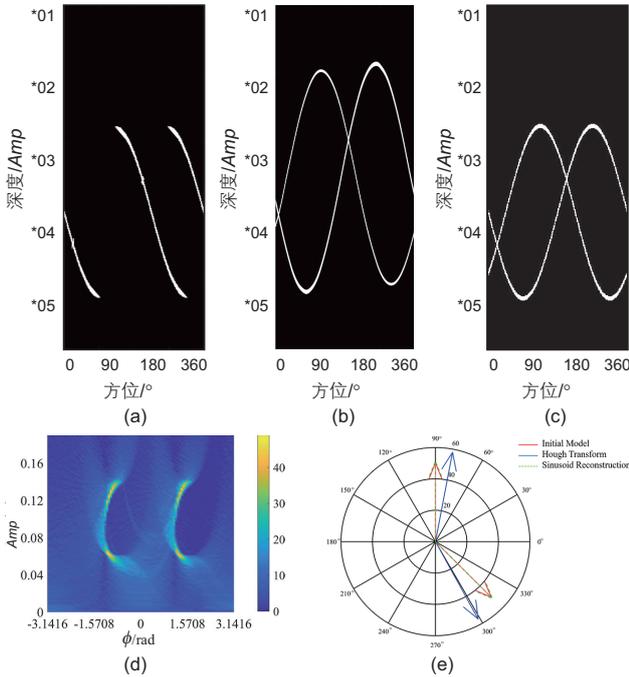


图 14 (a)三条不完整的裂缝；(b)使用 Hough 变换重建的裂缝；(c)使用正弦函数族重建的裂缝；(d)Hough 变换的函数域；(e)Hough 变换和正弦函数族重建的结果对比
 Fig. 14 (a)Three incomplete fractures; (b)The reconstruction fractures using Hough transform; (c)The reconstruction fractures using the cluster of sinusoid; (d)The parameter space of Hough transform; (e)The comparison of Hough transform and the cluster of sinusoid results

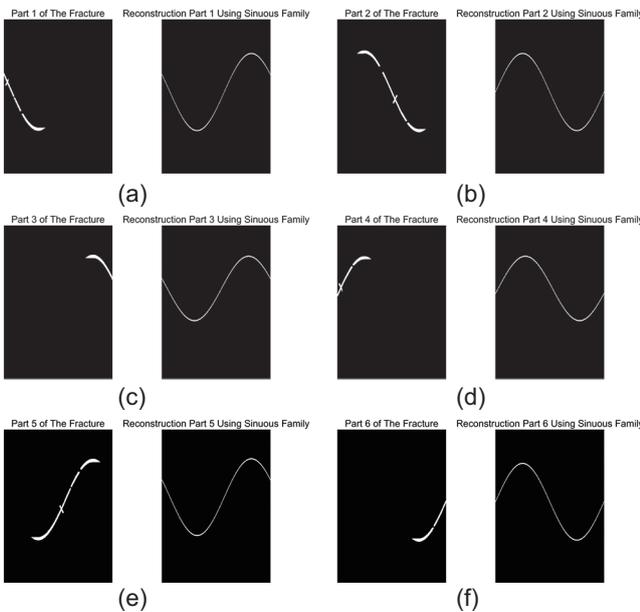


图 15 使用正弦函数族对图 13b 和图 13e 聚类后的各部分分别进行重建恢复的结果
 Fig. 15 The reconstruction results of every part after DBSCAN in Fig. 13b and Fig. 13e

近,但有一些振幅出现了偏差,这是由于残缝提供的信息太少导致的。该匹配过程可以在更高内存的工作站上使用相位、振幅和深度间隔步长更小的正弦函数族来进行匹配,精度更高,但会花费更多的时间和内存计算成本。

接下来对恢复重建的正弦函数进行归类,假定恢复后的两个正弦函数的相位差及深度差满足:

- (1) $\varphi_i - \varphi_j < \pi/4, 1 \leq i \leq 6, 1 \leq j \leq 6$ 且 $i \neq j$;
- (2) $Depth_i - Depth_j < 0.2, 1 \leq i \leq 6, 1 \leq j \leq 6$ 且 $i \neq j$ 。

即可以认定这两个正弦函数属于同一条裂缝,那么它们对应的原来的残缝也隶属于同一条裂缝。这是因为在实际地层中,深度间隔小于 0.2 m 的任意两条残缝的相位如果小于 $\pi/4$,那通常是由于地层挤压或拉伸造成同一个地层发生了错位导致的。基于该思想,把图 15a~f 中所有隶属于一条裂缝的残缝叠加到一起,可以得到如图 16 的结果,图中可以看到,两条正弦曲线被较好地分离开来。

4 基于二阶中心矩的溶蚀孔洞拟合与参数提取算法

上一节对碳酸盐岩缝洞型储层的电导率图像利用不完备路径形态学和正弦函数族算法实现了缠绕裂缝的分离,但仅分离了裂缝,为了后续测井处理时计算渗透率、饱和度,同深度段的溶蚀孔洞信息需要被进一步计算,例如孔隙纵横比、准确的深度分布等。本节将围绕该主题,使用基于二阶中心矩椭圆的孔洞拟合和参数提取算法得到溶蚀孔洞在空间上的分布及特征。本节先对二阶矩拟合算法进行公式推导,然后展示模型数据的计算结果。

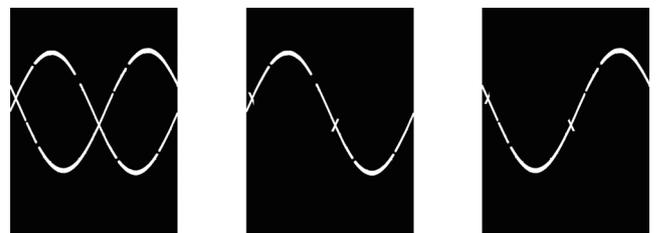


图 16 (a)使用形态学算法去噪后的电导率测井图像；(b)从 a 中分离出来的第一条裂缝；(c)从 a 中分离出来的第二条裂缝
 Fig. 16 (a)The electric imaging logging image after denoising by mathematical morphology; (b)The first separated fracture from a; (c) The second separated fracture from a

4.1 二阶中心矩溶蚀孔洞椭圆拟合算法

传统文献关于椭圆拟合的思路分为两个路线：最小平方拟合^[31]和聚类算法^[32]。与传统的基于散点图的椭圆拟合不同，孔洞在图像上是一块区域，不是多个边缘散落点的组合，提取更为复杂，涉及的参数也更多，且孔洞结构的复杂性又增大了其参数提取的难度。为了便于实际应用，文中用不同尺度与偏心率的二阶矩椭圆形函数来拟合孔洞。

一般来说，可以对一个实际物体在任意维度上通过定义一个矩来获取它的有效信息。对实际物体可以认为它有一个总的质心，这对应的是一阶矩。在图像中，二阶矩可以被用来决定与该物体对应的椭圆，从中可以找出长轴和短轴的长度及方向。

图像的矩通过图像中像素的密集程度来定义。在一个像素密度为 $I(i, j)$ 的灰度图中，简单的二维 $(p+q)$ 矩 $M_{p,q}$ 按如下给出：

$$M_{p,q} = \sum_i \sum_j i^p j^q I(i, j) \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

在下面的讨论中，灰度图像矩的计算对图像的局部对比度有较强依赖，因此处理起来更加困难。所以在进行计算前，先把图像变成二值图，即图像中物体的像素值变成1，而背景值变成0。对于一个二值图， (p, q) 矩 $M_{p,q}$ 可以被定义如下：

$$M_{p,q} = \sum_{i,j \in Obj} i^p j^q \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

零阶矩 $M_{0,0}$ 给出了物体的总像素点数，可以理解为其面积。一阶矩 $M_{1,0}$ 和 $M_{0,1}$ 可以理解成该物体分别在水平和垂直方向的重心：

$$\bar{x} = \frac{M_{1,0}}{M_{0,0}}, \quad \bar{y} = \frac{M_{0,1}}{M_{0,0}} \quad (14)$$

从这里开始，算法就变得复杂起来，从二阶矩 $M_{2,0}$ 、 $M_{1,0}$ 和 $M_{0,2}$ 中提取等效椭圆的参数不是最简便的方法，因为必须使用二阶中心矩，这与计算物体的刚度二阶矩不同。它们的表达式如下：

$$\mu_{2,0} = \frac{M_{2,0}}{M_{0,0}} - \bar{x}^2, \quad \mu_{1,1} = \frac{M_{1,1}}{M_{0,0}} - \bar{x}\bar{y}, \quad \mu_{0,2} = \frac{M_{0,2}}{M_{0,0}} - \bar{y}^2 \quad (15)$$

可以看到，式中在计算过程中引入了中心点坐标项： \bar{x}^2 、 $\bar{x}\bar{y}$ 、 \bar{y}^2 ，而计算刚度二阶矩时不需要引入这三项，这就是“二阶中心矩”的名称来源。

经过上述计算，二值图像中物体的协方差矩阵变成

$$covariance(Obj) = \begin{bmatrix} \mu_{2,0} & \mu_{1,1} \\ \mu_{1,1} & \mu_{0,2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

该协方差矩阵的特征向量对应了物体等效椭圆的长轴和短轴方向。如图17所示，等效椭圆度的长轴与 x 轴的夹角 θ 、长轴长度 l 和短轴长度 w 的最终形式为：

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{2\mu_{1,1}}{\mu_{2,0} - \mu_{0,2}} \right) \quad (17)$$

$$l = \sqrt{8 \left(\mu_{2,0} + \mu_{0,2} + \sqrt{4\mu_{1,1}^2 + (\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2} \right)} \quad (18)$$

$$w = \sqrt{8 \left(\mu_{2,0} + \mu_{0,2} - \sqrt{4\mu_{1,1}^2 + (\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2} \right)} \quad (19)$$

确定椭圆中心位置后，还需统计目标区椭圆的面积，以便定量计算面孔率。椭圆面积计算公式为：

$$S = \pi \times a \times b \quad (20)$$

椭圆对应的三维空间的椭球体积计算公式为：

$$V = 4/3 \times \pi \times a \times b \times b \quad (21)$$

其中， a 、 b 分别对应了椭圆的长、短轴长度的一半。

椭圆的纵横比计算公式为：

$$R_{\text{ellipse}} = b/a \quad (22)$$

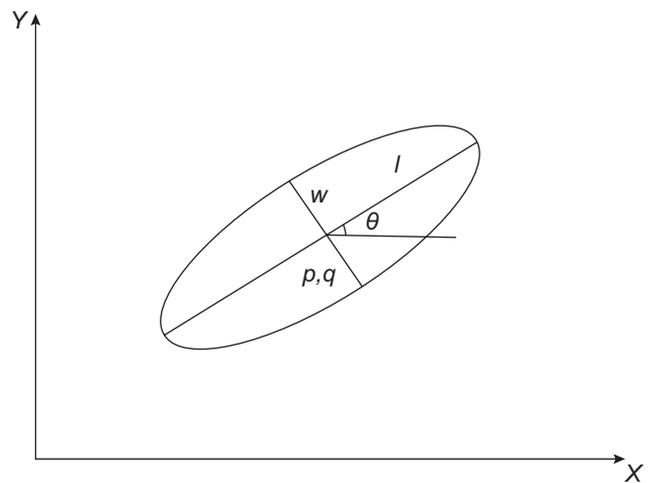


图17 拟合后的椭圆示意图

Fig. 17 The schematic diagram of ellipse approximation

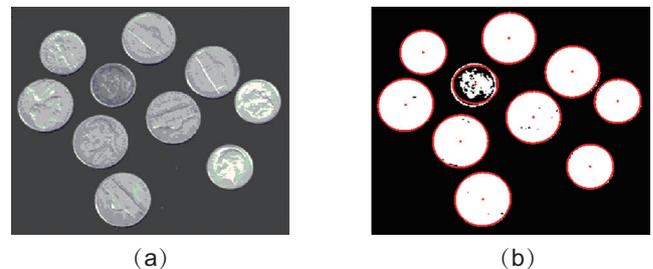


图18 (a)原始硬币图像；(b)用二阶中心矩拟合各硬币的椭圆

Fig. 18 (a)The original images of coins; (b)Enclosing ellipses of these coins based on the second-order centric moments method

4.2 模拟数据测试

为了测试前文椭圆拟合算法的有效性，本文选取了散列的硬币图像进行二阶矩椭圆拟合，并给出了椭圆的中心点，效果如图 18 所示，可以看到二值图中每枚硬币使用二阶中心矩椭圆拟合后找到了对应的椭圆及中心。

5 测井数据计算与缝洞储层评价应用

5.1 不完备路径形态学和正弦函数族算法在提取裂缝参数过程中的应用

图 19 是对正弦函数族方法与改进的 Hough 变换方法在实际电成像测井资料中的效果进行比较。

图 19a 中包含三条断裂的裂缝，其中上下两条缝

发育较好，但中间的裂缝被岩层的基质切断。图 19b 是使用不完备路径形态学算子 $L=40, K=5$ 对二值化后的图像提取的结果，基质、孔洞等被剔除，只剩下三条较大的裂缝。图 19c 是用改进的 Hough 变换重建的裂缝，图中上下两条裂缝被较好重建出来，但中间的裂缝由于原来电导率图像中只有部分信息，因此用 Hough 变换重建出现了错误。图 19d 是用正弦函数族进行模式识别的结果，可以看到三条裂缝都获得了较好的恢复效果，中间残缝的重建结果与原电导率图像吻合。图 19e 为实际电成像测井资料用两种方法得到的参数的罗盘图，可以清晰看到正弦函数族得到的参数和模型参数基本吻合，而 Hough 变换则存在较大误差。因此可以断定，当初始模型有效信息较少，裂缝不完整的情况下，正弦函数族提取的裂缝参数比 Hough 变换得到的结果更准确。

接下来使用正弦函数族与不完备路径形态学方法

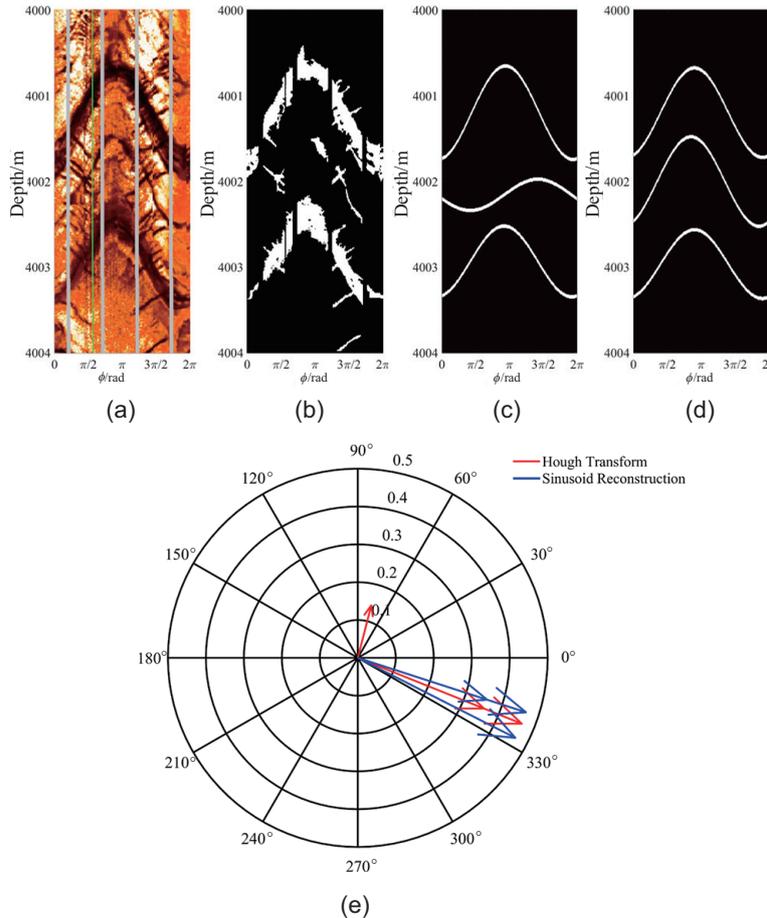


图 19 (a)原始的电导率测井图像；(b)使用不完备路径形态学算子 $L=40, K=5$ 提取的空白条带插值后的结果；(c)使用 Hough 变换重建的裂缝；(d)使用正弦函数族重建的裂缝；(e)Hough 变换和正弦函数族重建的结果对比

Fig. 19 (a) The original electric imaging logging data; (b) The extraction by incomplete path opening operation with $L=40$ and $K=5$ of the blank area interpolated data; (c) The reconstruction fractures using Hough transform; (d) The reconstruction fractures using the cluster of sinusoid; (e) The comparison of Hough transform and the cluster of sinusoid results

结合,对实际的微电导率成像中存在缠绕现象的裂缝进行分离。

首先使用不完备路径形态学路径算子和容忍算子来进行裂缝的提取。

图 20a 是原图,大小是 735×441 ,图中可以看到有两条相交裂缝,在裂缝周围分布着各种溶蚀孔洞。图 20b 是原图先使用 Otsu 算法进行二值化之后用开运算处理的结果。图 20c 是 $L=30$ $K=5$ 的提取效果,可以看出因为路径长度因子较小,且容忍因子 K 非 0,所以一部分溶蚀孔洞仍然得以保留。图 20d 是 $L=56$, $K=0$ 的提取效果,可以看出路径长度因子变大使一部分溶蚀孔洞被剔除,但构成裂缝的长度较短的部分由于容忍因子为 0,没有被提取出来。图 20e 是 $L=56$, $K=5$ 时的提取效果,可以看出连通图 20d 遗漏部分的两条裂缝被较好提取出来。图 20f 是 $L=56$, $K=15$ 时的提取效果,由于容忍因子 K 过大,导致裂缝周边的孔洞信息重新出现。综上,提取目标裂缝最好的参数是

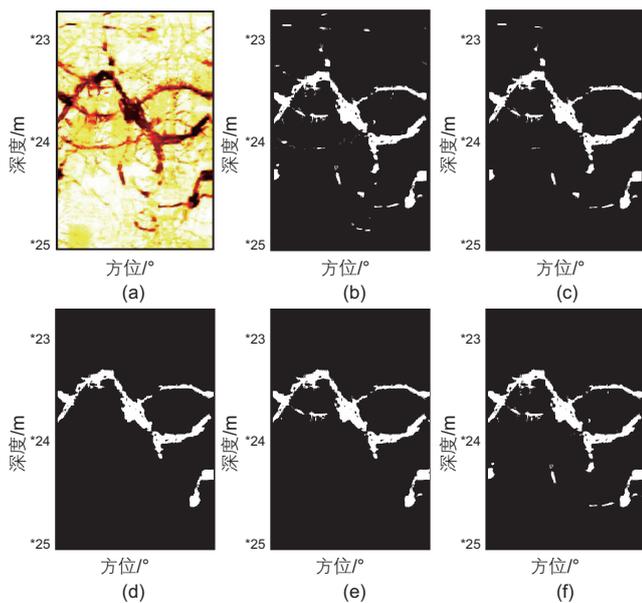


图 20 (a)原始电阻率测井图像;(b)使用 Otsu 算法二值化后的图像;(c) $L=30$ $K=5$ 的不完备路径形态学提取结果;(d) $L=56$ $K=0$ 的不完备路径形态学提取结果;(e) $L=56$ $K=5$ 的不完备路径形态学提取结果;(f) $L=56$ $K=15$ 的不完备路径形态学提取结果

Fig. 20 (a) The original electric imaging logging image; (b) The binary image after using Otsu method; (c) The extraction result by incomplete path opening operation with $L=30$ and $K=5$; (d) The extraction result by incomplete path opening operation with $L=56$ and $K=0$; (e) The extraction result by incomplete path opening operation with $L=56$ and $K=5$; (f) The extraction result by incomplete path opening operation with $L=56$ and $K=15$

图 20c 中的 $L=56$, $K=5$ 。

下面分别使用“下-右下-右”方向的路径形态学算子和“上-右上-右”方向的路径形态学算子对图 20c 采用 $L=56$, $K=5$ 的参数进行提取,得到如图 21(b) 和 21(d) 的结果,然后对这两图使用 $\epsilon=30$, $\min Pts=3$ 的密度聚类参数组合,可以获得图 21c 和 21e 的聚类分组,图中可以看到,对用两个方向的路径形态学算子提取的数据分别进行聚类后,数据被分成了 4 部分,每部分用不同的颜色表示,其中两图右下角的部分是无效数据。

对图 21c 和 21e 有效数据使用正弦函数族进行提取和拟合。每部分对应的正弦曲线如图 22 所示,且每部分对应的正弦曲线的参数列在表 1 中。

上文中在对恢复重建的正弦函数进行归类时,假定两个正弦函数的相位差和深度差满足一定条件即可以认定这两个正弦函数属于同一条裂缝,那么它们对

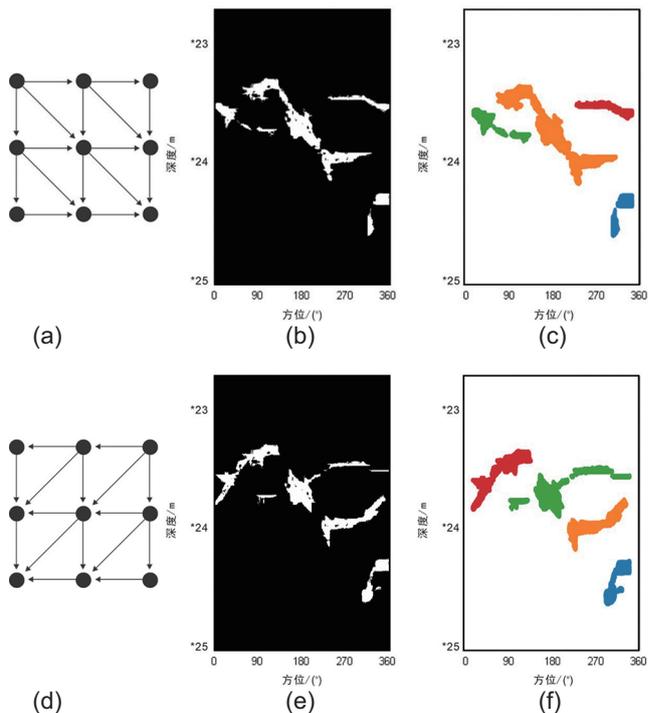


图 21 两条裂缝使用不完备路径形态学提取后密度聚类的结果 (a)不完备路径形态算子的提取方向一;(b)使用 a 获得的提取结果;(c)图 b 的密度聚类结果;(d)不完备路径形态算子的提取方向二;(e)使用 d 获得的提取结果;(f)图 e 的密度聚类结果

Fig; 21 Results by DBSCAN after using incomplete operation on two fractures (a)First direction of incomplete path opening operator; (b)The result by using operator a; (c) The result of DBSCAN on b; (d) Second direction of incomplete path opening operator; (e)The result by using operator d; (f) The result of DBSCAN on e

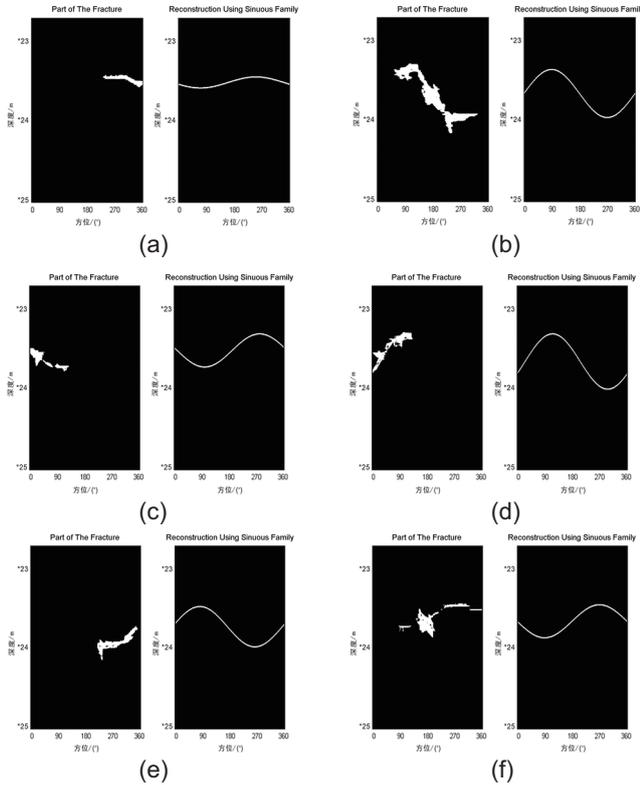


图 22 使用正弦函数族对图 21b 和图 21e 聚类后的各部分分别进行重建恢复的结果

Fig. 22 The reconstruction results of every part after DBSCAN in Fig. 21b and Fig.21e

表 1 6 条拟合得到的正弦曲线的参数

Table 1 The parameters of 6 sine curves.

正弦曲线名称	深度/m	振幅/m	相位/°
正弦曲线图 22a	*23.51	0.07	176
正弦曲线图 22b	*23.66	0.31	358
正弦曲线图 22c	*23.49	0.24	199
正弦曲线图 22d	*23.71	0.48	26
正弦曲线图 22e	*23.74	0.23	352
正弦曲线图 22f	*23.81	0.22	179

应的原来的残缝也隶属于同一条裂缝。基于该假设，把六部分残缝进行叠加，获得图 23 的结果。图中可以看到，两条裂缝被较好地分离开来，且两条裂缝的深度、振幅及相位如表 2 所示。

5.2 二阶矩椭圆拟合算法在提取裂缝参数过程中的应用

对上节中图 21a 的微电导率测井图像，使用不完备路径形态学、密度聚类和正弦函数族算法分离出裂缝后，对剩余的孔洞部分使用二阶矩椭圆拟合算法，效果分别如图 24 所示。

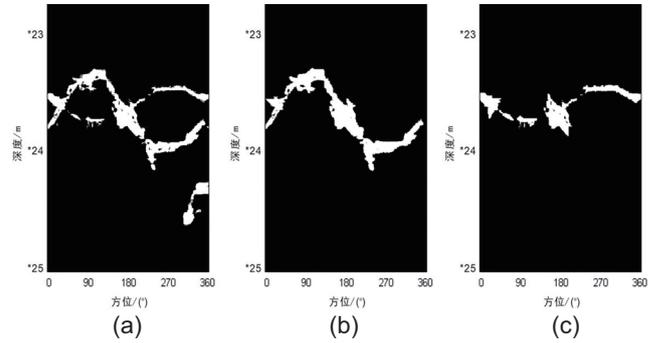


图 23 (a) 使用不完备路径形态学提取结果; (b) 从 a 中分离出来的第一条裂缝; (c) 从 a 中分离出来的第二条裂缝

Fig. 23 (a) The extraction result by incomplete path opening operation; (b) The first separated fracture from a; (c) The second separated fracture from a

表 2 两条分离后的裂缝参数

Table 2 The parameters of 20 separated fractures.

裂缝名称	深度/m	振幅/m	相位/°
裂缝图 24b	*23.71	0.34	5.3
裂缝图 24c	*23.61	0.18	184.7

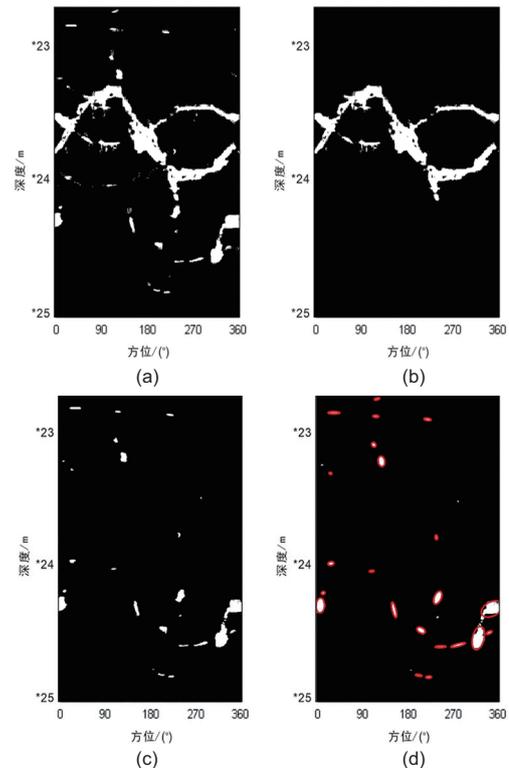


图 24 (a) 对图 19a 使用 Otsu 算法二值化后的图像; (b) 从 a 中分离出来的裂缝; (c) 从 a 中分离出来的孔洞; (d) 孔洞基于二阶矩椭圆拟合的结果

Fig. 24 (a) The binary image to Fig. 19 after using Otsu method; (b) Fracture separated from a; (c) Vugs separated from a; (d) The equivalent ellipses of the vugs based on the second-order moments method

对图 24 中的缝洞参数进行纵横比和面积(像素意义)统计,得到的结果显示在表 3 中。

表 3 图 23 孔洞参数统计

Table 3 The parameter statistics of vugs in Fig. 23

面积	纵横比		
	>0.6	0.3-0.6	<0.3
0-100	22.3%	29.6%	7.4%
100-200	3.7%	3.7%	7.4%
>200	7.4%	14.8%	3.7%

6 结论

本文提出了一种基于不完备路径形态学、正弦函数族和二阶矩椭圆拟合算法由电成像测井电导率图像自动提取和分离裂缝和溶蚀孔洞的方法,通过缝洞模型的模拟数据和实测数据初步验证了方法的有效性,并得到了如下认识:

(1) 路径形态学算法应用于电成像测井电导率图像

的去噪、缝洞边缘点检测与分离,可有效地提取裂缝和溶蚀孔洞的信息,实现缝洞自动识别、分离和定量表征。

(2) 文中研究的不完备路径形态学处理算法完全由数据驱动,算法自身具有去噪能力,可以通过扫描路径算子长度和容忍度参数,构造适合处理数据体噪声特点的路径算子,从而可直接对有噪声的成像测井资料进行处理,检测缝洞发育带;对孔洞区域进行二阶矩椭圆拟合的算法可以获得孔洞在像素意义下的面积和纵横比,可以为后续估计对应深度段的孔洞的孔隙度和连通性、渗透率提供支撑,且有助于估计目的层段的含油储量。

(3) 文中算法在成像测井资料处理中的应用仍处于探索阶段,例如,不同形态和尺度的缝洞,在边缘检测时要用不同的路径算子尺度和容忍度。因此,如何在成像测井资料处理中根据地质特征自适应确定合理的算子长度与容忍度参数,仍是一个需要深入研究的课题。

参考文献

- [1] HALBOUTY M T. AAPG Memoir 78: Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999[M]. Tulsa: AAPG, 2003.
- [2] 贾将,柯式镇,张冰,等. 螺旋环式随钻电阻率成像测井仪发射技术研究[J]. 石油科学通报, 2018, 3(4): 399-409. [JIA J, KE S Z, ZHANG B, et al. Research on transmitting technology of a LWD resistivity imaging tool with annular solenoid excitation [J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(4): 399-409.]
- [3] 蔡亚琳,柯式镇,康正明,等. 随钻电阻率成像测井在裂缝地层中的响应模拟[J]. 石油科学通报, 2020, 5(3): 327-336. [CAI Y L, KE S Z, KANG Z M, et al. Logging response simulation of a LWD resistivity imaging tool in fractured formations [J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(3): 327-336.]
- [4] 刘俊东,蒲秀刚,常静春,等. 闭塞湖盆页岩油储层测井岩性综合评价技术[J]. 石油科学通报, 2021, 6(1): 58-66. [LIU J D, PU C X, CHANG J C, et al. Logging of a shale oil reservoir in a closed lake basin: A comprehensive lithology evaluation technique [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(1): 58-66.]
- [5] 刘国全,祝文亮,邓荣敬,等. 碳酸盐岩储层特征测井评价[J]. 特种油气藏, 2001, 8(4): 26-29. [LIU G Q, ZHU W L, DENG R J, et al. Logging evaluation of carbonate reservoir characteristics [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 8(4): 26-29.]
- [6] 杜金虎,王招明,李启明,等. 塔里木盆地寒武-奥陶系碳酸盐岩油气勘探[M]. 北京:石油工业出版社, 2010: 1-4. [DU J H, WANG Z M, LI Q M, et al. Oil and gas exploration of Cambrian-Ordovician carbonate in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1-4.]
- [7] 李瑞,朱介寿,李能根. 古潜山火成岩裂缝带划分和孔隙度计算[J]. 物探化探计算技术, 1996, 18 (2): 167-170. [LI R, ZHU J S, LI N G. Classification of fracture belts and calculation of porosities in the paleo-mountain igneous rock [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 18 (2): 167-170.]
- [8] 陆云龙,崔云江,李瑞娟,等. 基于多孔介质模型的储层裂缝孔隙度计算方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 67-74. [LU Y L, CUI Y J, LI R J, et al. A method for calculating reservoir fracture porosity based on the porous media model [J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2019, 41(5): 67-74.]
- [9] 杨辉廷,邢玉忠,周拥军. 缝洞型碳酸盐岩储层定量评价研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 028(003): 5-7, 13. [YANG H T, XING Y Z, ZHOU Y J. A quantitative evaluation of fractured and cavernous carbonate reservoirs [J]. Natural Gas Exploration And Development, 2005, 028(003): 5-7, 13.]
- [10] 陈科贵,穆曙光,魏彩茹,等. 一种评价碳酸盐岩储层裂缝参数的测井新模型[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2003, 25(1): 6-8. [CHEN K G, MU S G, WEI C R, et al. A new well logging interpretation model evaluating fracture parameter of carbonate

- reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2003, 25(1): 6–8.]
- [11] DELHOMME J P. A quantitative characterization of formation heterogeneities based on borehole image analysis[C]//SPWLA 33rd Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1992.
- [12] HALL J, PONZI M, GONFALINI M, et al. Automatic extraction and characterization of geological features and textures from borehole images and core photoimages[C]. 37th SPWLA Annual Logging Symposium. 1996; Paper, CCC.
- [13] 景建恩, 魏文博, 梅忠武, 等. 裂缝型碳酸盐岩储层测井评价方法——以塔河油田为例[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(1): 78–82. [JING J E, WEI W B, MEI Z W, et al. Method of Well-logging interpretation for fracture reservoirs of carbonate rock-A case study in Tahe oil-field [J]. *Progress In Geophysics*, 2005, 20(1): 78–82.]
- [14] LI X N, SHEN J S, YANG W Y et al. Automatic fractured-vuggy identification and extraction from electric imaging logging data based on path morphology[J]. *Petroleum Science*. 2019, 16(1): 58–76.
- [15] 李振苓, 沈金松, 李曦宁, 等. 用形态学滤波从电导率图像中提取缝洞孔隙度谱[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(4): 1295–1307. [LI Z L, SHEN J S, LI X N, et al. Estimating porosity spectrum of fracture and karst cave from conductivity image by morphological filtering [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2017, 47(4): 1295–1307.]
- [16] 段友祥, 李根田. 联合神经网络在储层参数预测中的研究与应用[J]. *测井技术*, 2017, 41(2): 176–182. [DUAN YX, LI B T. Research on committee neural network model for reservoir physical parameter prediction[J]. *Well Logging Technology*, 2017, 41(2): 176–182.]
- [17] 杨柳青, 陈伟, 查蓓. 利用卷积神经网络对储层孔隙度的预测研究与应用[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1548–1555. [YANG L Q, CHEN W, ZHA B. Prediction and application of reservoir porosity by convolutional neural network[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1548–1555.]
- [18] 安鹏, 曹丹平, 赵宝银, 等. 基于LSTM循环神经网络的储层物性参数预测方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(5): 1849–1858. [AN P, CAO D P, ZHAO B Y, et al. Reservoir physical parameters prediction based on LSTM recurrent neural network[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(5): 1849–1858.]
- [19] XUE Y C, CHENG L S, MOU J Y, et al. A new fracture prediction method by combining genetic algorithm with neural network in low-permeability reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014(121): 159–166.
- [20] AZIM R A. Estimation of reservoirs fracture network properties using an artificial intelligence technique[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, 12(15): 5345–5350.
- [21] 李冰涛, 王志章, 孔垂显, 等. 基于成像测井的裂缝智能识别新方法[J]. *测井技术*, 2019, 43(3): 257–262. DOI: 10.16489/j.issn.1004–1338.2019.03.007. [LI B T, WANG Z Z, KONG C X, et al. A new intelligent method of fracture recognition based on imaging logging[J]. *Well Logging Technology*, 2019, 43(3): 257–262. DOI: 10.16489/j.issn.1004–1338.2019.03.007.]
- [22] 邹文波. 人工智能研究现状及其在测井领域的应用[J]. *测井技术*, 2020, 44(4): 323–328. DOI: 10.16489/j.issn.1004–1338.2020.04.001. [ZOU W B. Artificial intelligence research status and applications in well logging[J]. *Well Logging Technology*, 2020, 44(4): 323–328. DOI: 10.16489/j.issn.1004–1338.2020.04.001.]
- [23] OTSU, NOBUYUKI. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62–66.
- [24] 王磊, 沈金松, 苏朝阳, 等. 基于小波变换与快速行进算法的电成像数据空白带填充和响应畸变修复[J]. *工程地球物理学报*, 2020, 17(5): 531–540. [WANG L, SHEN J S, SU C Y, et al. Blank block interpolation and distorted response restoration of the electric image based on wavelet transforming and fast marching method [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2020, 17(5): 531–540.]
- [25] HEIJMANS H, BUCKLEY M, TALBOT H. Path openings and closings[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2005, 22(2–3): 107–119.
- [26] TALBOT H, APPLETON B. Efficient complete and incomplete path openings and closings[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(4): 416–425.
- [27] APPLETON B, TALBOT H. Efficient path openings and closings[M]//*Mathematical Morphology: 40 Years On*. Springer, Dordrecht, 2005.
- [28] 王国志. 基于路径形态学的道路裂缝提取[D]. 湖北: 武汉大学, 2018. [WANG G Z. Pavement crack extraction based on path morphology[D]. Hubei Province: Wuhan University.]
- [29] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A, et al. Deep learning[M]. Cambridge: MIT press, 2016.
- [30] ILLINGWORTH J, KITTLER J. A survey of the Hough transform[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 44(1): 87–116.
- [31] TAUBIN G. Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1991 (11): 1115–1138.
- [32] LEAVERS V F. Shape detection in computer vision using the Hough transform[M]. London: Springer-Verlag, 1992.