

文章编号: 2095-2163(2021)04-0021-04

中图分类号: TP311

文献标志码: A

# 基于 Freeman 链码的岩心交叉裂缝分离算法

杨 胜, 滕奇志

(四川大学 电子信息学院图像信息研究所, 成都 610065)

**摘要:** 在石油地质领域中, 裂缝研究是油气勘探的重点。而且, 岩心裂缝统计参数分析的准确程度, 对油气勘探开发和提升采收率都有着一定程度的影响。由于岩心裂缝中存在大量的交叉裂缝, 会对裂缝的统计和计算裂缝的分布特征造成影响。因此, 本文在识别岩心裂缝的基础上, 通过改进 Freeman 链码直线检测算法, 对细化后的交叉裂缝骨架进行分离; 通过分离的裂缝骨架对整个交叉裂缝进行分离。实验结果证实, 该算法能较好地交叉裂缝进行分离。

**关键词:** 岩心裂缝; Freeman 链码; 直线提取; 图像骨架; 交叉裂缝分离

## Cross crack separation algorithm for core crack based on Freeman chain code

YANG Sheng, TENG Qizhi

(Institute of Image Information, School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**[Abstract]** In the field of oil geology, crack research is the focus of oil and gas exploration, and the accuracy of core crack statistical parameter analysis has a certain impact on oil and gas exploration. However, there are a large number of cross cracks in the core, which will have a great impact on the statistics and calculation of crack distribution characteristics and will affect the analysis of oil and gas exploration. In this paper, based on the identification of core cracks, the cross crack skeleton is separated by Freeman chain code linear detection algorithm, and then the whole cross crack is separated by the separated crack skeleton. The experimental results show that the proposed algorithm can separate the cross cracks well.

**[Key words]** Core crack; Freeman chain code; Linear detection; Crack skeleton; Cross crack separation

### 0 引言

随着地质石油勘探开发的逐渐深入, 石油与天然气勘探方向开始逐渐由浅转向深部、由常规油气藏转向特殊油气藏。特别是裂缝性油气藏, 成为地质石油勘探方向的主要研究目标<sup>[1]</sup>。在裂缝性油气藏中, 研究裂缝的发育程度和分布范围, 对石油和天然气开采具有重要的意义。通过图像处理技术, 对岩心 CT 图像进行处理和分析, 是研究岩心裂缝的一种较好的方法。为了计算每条裂缝的相关参数, 首先需要将裂缝进行提取, 再进行统计分析相关参数。但有些裂缝存在交叉的情况, 需要通过算法自动地将交叉裂缝分离。图 1 展示了裂缝 CT 图像经过阈值分割后, 存在交叉裂缝的情况。

从图 1(c) 看来, 单个交叉裂缝二值图像在局部上具有直线特征, 可以通过提取交叉裂缝的直线部分来将交叉裂缝进行分离。所以针对交叉裂缝分离的问题可以转换成图像直线提取的问题。20 世纪 60 年代, Freeman 提出了直线检测准则<sup>[2]</sup>。通过这个准则, 可以检测出图像中的直线部分。除此之外,

有些学者在此基础上进一步引入了直线检测方向优先级的概念<sup>[3-4]</sup>。方向优先级的引进, 提高了直线检测过程中平滑程度, 可以更有利于处理直线交叉的情况。本文基于 Freeman 链码优先级直线提取算法的思想, 对岩心二维 CT 序列图像的交叉裂缝进行分离, 并在算法基础上引进了概率优先准则, 使算法更好地适用于交叉裂缝的情况。

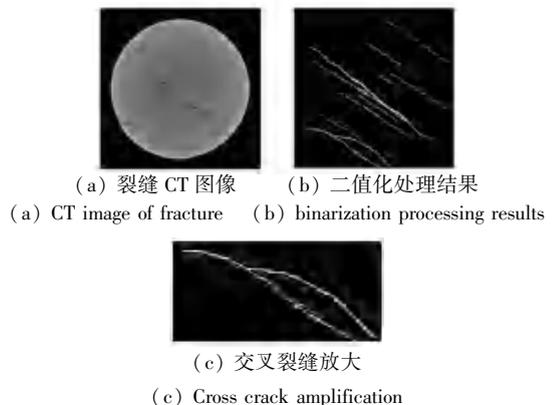


图 1 二值化处理裂缝 CT 图像

Fig. 1 Crack CT image for binarization

**作者简介:** 杨 胜(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 模式识别与智能系统; 滕奇志(1961-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 图像处理、模式识别。

**通讯作者:** 滕奇志 Email: qzteng@scu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-28

## 1 Freeman 链码交叉裂缝分割算法描述

Freeman 链码直线提取算法,主要是检测图像的直线部分。首先需要对裂缝二值图进行细化处理,得到裂缝骨架<sup>[5-6]</sup>。理想情况下,经过图像细化后得到的骨架是单像素宽度的,单像素宽的裂缝骨架更有利于裂缝骨架的特征提取<sup>[7-8]</sup>。但在实际情况中,在骨架的转折处或者交点处,并不能完全实现单像素。所以,要先对骨架图像进行单像素处理<sup>[9]</sup>,然后再对裂缝骨架进行 Freeman 链码直线提

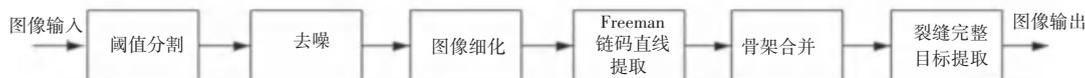


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

### 1.1 Freeman 链码直线提取

Freeman 链码是用线段的起点加上由八个方向符所构成的一组数列,数列中的值代表着八邻域中两像素的相对位置。对于每个像素点来说,其相邻的点都可以用八方向符中某一个值表示。八方向链码如图 3 所示。由此可知,裂缝骨架图像中,任何一组骨架曲线都可以由一组链码串表示。Freeman 直线提取算法,从裂缝骨架的一个点跟踪到另一个点,一定会对应一组链码序列。

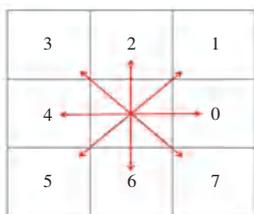


图 3 八邻域链码

Fig. 3 Chain code of eight neighborhood

Freeman 根据直线在离散平面的特性,提出了直线在离散平面时链码应该遵循的三条准则<sup>[2]</sup>(简称 Freeman 准则):

- (1) 链码中至多只有 2 个方向码,其中一个为主方向,且其值相差 1。
- (2) 若有两个方向码,则次级方向码必单个出现,不能连续出现。
- (3) 次级方向码总是尽可能均匀地出现在链码中。

由于裂缝骨架在局部上才完全符合直线特征,故完全依照 Freeman 准则来提取裂缝是不可行的。本文算法根据裂缝骨架特征,对 Freeman 准则做出

取。由于岩心裂缝只在局部上具有直线特征,因此在对裂缝骨架进行 Freeman 链码直线提取后,会造成裂缝骨架的断开。

本文在提取裂缝骨架直线的基础上,考虑了裂缝骨架端点附近的梯度信息。根据骨架端点附近的梯度信息,可以使得断裂的骨架直线合并。合并后便可以得到一条完整的裂缝骨架直线,由此便可以将交叉裂缝中单个裂缝的骨架分别提取出来。得到裂缝的骨架数据后,可以通过骨架平移操作,将完整的裂缝目标提取出来。具体算法流程如图 2 所示。

的部分改进如下:

裂缝在全球上的趋势走向并不像纯粹的直线那样单调,2 个方向码并不能很好地表征一个裂缝在全球上的趋势走向,故本文算法在 Freeman 准则基础上的至多两个方向码,额外增加了一个方向码。其中一个为主方向且另两个方向码和主方向的值相差 1。另外,在此基础上增加了每个方向码出现的概率信息,在对裂缝骨架每个点进行迭代时,更新目前链码中所有方向码的概率。

统计链码中每个方向码的概率的好处是:

- (1) 由于裂缝趋势走向的不确定性,链码的主方向在每次迭代过程都可能会改变,利用概率信息可以快速得到当前迭代时的主方向。
- (2) 当链码有 3 个方向码时,在某一轮的迭代跟踪过程中,发现 3 个方向码都存在目标点,这时选择继续跟踪概率最大的那个方向码,保证跟踪过程尽可能平滑。

如对某个直线  $L$  进行跟踪。当搜索到直线  $L$  的第一个像素点时,按照以下方式进行迭代:

- (1) 当前链码为空时,则按照 0~7 的方向,逆时针搜索第一个链码值,如图 4(a) 所示。
- (2) 当前链码中只有一个方向  $D1$  时,先判断  $D1$  方向是否可以继续跟踪。若不能,则寻找另一个链码方向  $D2$ ,如图 4(b) 所示。
- (3) 当前的链码中有两个方向  $D1$  和  $D2$  时,首先跟踪概率较大的方向,若失败则继续跟踪另一个方向,若两个方向全部跟踪失败,寻找新的方向  $D3$ ,如图 4(c) 所示。
- (4) 当前的链码中有 3 个方向  $D1$ 、 $D2$  和  $D3$  时,

按照从大到小的概率依次跟踪,如图4(d)所示。

图中虚线的含义是,当实线的方向全部不能继续跟踪时可以选择的新方向。

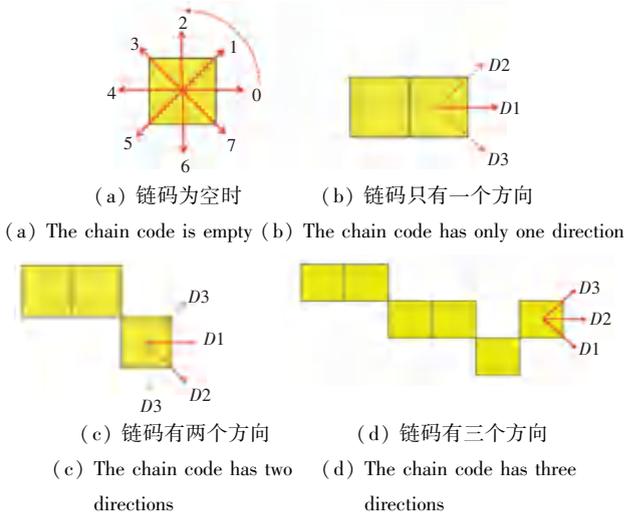


图4 跟踪示意图

Fig. 4 Tracing diagram

若图像中分布有很多噪声, Freeman 直线检测算法在跟踪的过程中,也可以直接去除图像中的毛刺和噪声<sup>[10]</sup>。通过设置一个链码阈值长度,一轮迭代完成后,判断当前链码串的长度是否大于该阈值长度,大于阈值长度则说明该链码串是合格的链码串,而小于阈值长度,则说明这个链码串是噪声应当舍弃,继续扫描下一个骨架点,开始下一个链码串的跟踪过程。每次迭代完成后,都记录已跟踪过的点,若重新跟踪到标记跟踪过的点则直接跳过,直至所有的骨架点都扫描完毕,结束本次跟踪过程。实验结果如图5所示。

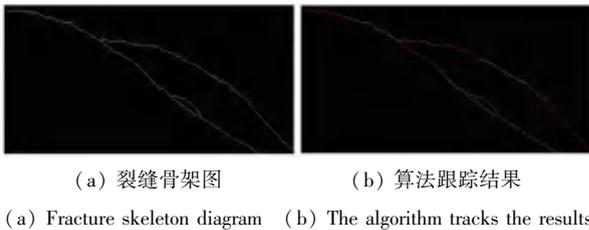


图5 Freeman 链码直线提取

Fig. 5 Line extraction for Freeman chain code

### 1.2 裂缝骨架合并

由上述可知,在对裂缝骨架进行链码跟踪之后,会出现裂缝骨架断裂的情况,这时需进行骨架合并计算。裂缝骨架是否可以合并和裂缝骨架端点之间的距离及骨架的偏转角有关。设第  $L_k$  条骨架的首尾端点为  $L_k(x_1, y_1), L_k(x_m, y_m)$ , 根据公式(1):

$$\theta_{L_k} = \arctan \frac{y_m - y_1}{x_m - x_1} \quad (1)$$

可获得裂缝骨架的偏转角  $\theta_{L_k}$ 。判断骨架  $L_k$  和  $L_{k+i}$  是否可以合并的充要条件是:偏转角满足公式(2),骨架端点间的距离满足公式(3):

$$|\theta_{L_k} - \theta_{L_{k+i}}| \leq \alpha, \quad (2)$$

$$\min(\text{dist}(L_k(x_1, y_1), L_{k+i}(x_1, y_1)), \text{dist}(L_k(x_1, y_1), L_{k+i}(x_m, y_m))) \leq \beta. \quad (3)$$

其中,  $\text{dist}$  函数代表两坐标点间的距离,  $\alpha, \beta$  分别代表骨架偏转角阈值和骨架端点距离阈值。当裂缝骨架经过跟踪算法处理后的两条裂缝骨架满足裂缝合并的充要条件时,便可将二者进行合并,具体算法如下:

(1) 搜索到还未处理过的裂缝骨架  $L_k$ , 转步骤(2);若检测到全部裂缝骨架已经处理,则转到步骤(3)。

(2) 判断裂缝骨架  $L_k$  和  $L_{k+i}$  是否满足合并的充要条件。若满足,则将两条裂缝骨架合并为一条裂缝骨架  $L_k$ , 并将  $L_{k+i}$  设置为另一条未处理过的裂缝骨架,重复步骤(2),否则转到步骤(1)。

(3) 结束裂缝骨架合并算法。

在上节裂缝骨架完成 Freeman 链码直线提取的基础上,进行骨架合并。实验结果如图6所示。



图6 骨架合并

Fig. 6 Skeleton merging

### 1.3 裂缝完整目标提取

由图6结果可知,最终得到是一条线性单像素宽度的裂缝骨架,并不能完全覆盖真实的裂缝区域。所以,需要通过一定的算法提取整个裂缝目标。通过对裂缝骨架平移后,与裂缝二值图像求交集操作,可以将完整的裂缝目标提取出来。裂缝骨架平移方向上的选择和裂缝骨架链码的主方向呈  $90^\circ$  关系,并且由于细化的裂缝骨架处于裂缝二值图的中轴,所以骨架的平移方向是两个互补的方向。算法实现过程如下:

(1) 将方向平移间隔变量  $n_1$  和  $n_2$  初始化为1。

(2) 扫描一条裂缝骨架  $L_k$ , 将  $L_k$  的坐标数据拷贝到  $P$ 。根据裂缝骨架链码的主方向求出平移方向,转到步骤(3),若完成所有裂缝骨架平移后,转到步骤(5)。

(3) 将  $P$  所有坐标拷贝后,向平移方向平移  $n_1$  个

间隔,并且与裂缝细化之前的二值图相比较。若重合度达 80%,则将平移后的坐标数据更新到裂缝骨架  $L_k$  中,  $n_1$  自加 1,重复步骤(3),否则转到步骤(4)。

(4)将  $P$  中所有坐标拷贝后,向另一方向平移  $n_2$  个间隔,并与裂缝二值图相比较。若重合度达 80%,将平移后的坐标数据更新到裂缝骨架  $L_k$ ,  $n_2$  自加 1,重复步骤(4),否则转到步骤(1)。

(5)结束裂缝骨架平移算法。

通过上节的裂缝骨架提取裂缝,完整目标结果如图 7 所示。

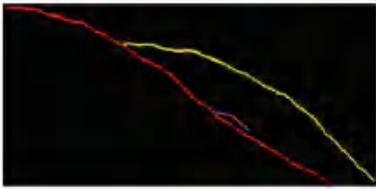
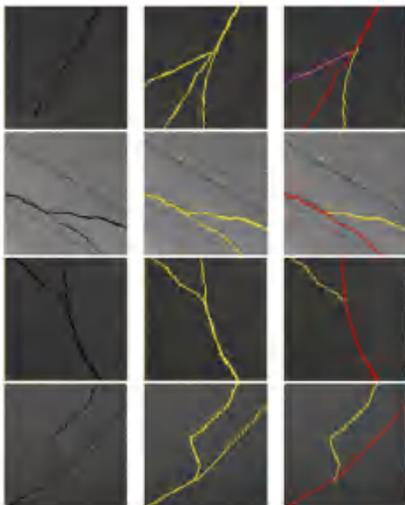


图 7 裂缝完整目标提取

Fig. 7 Extraction of crack complete target

## 2 实验结果

为了验证本文算法的正确性,取 4 组真实的岩心 CT 图像作为实验数据,实验结果如图 8 所示。其中图 8(a)表示在真实环境下存在交叉裂缝的岩心 CT 图像;图 8(b)是将图 8(a)经过阈值分割、去噪等形态学操作提取裂缝的结果;图 8(c)是由本文算法对图 8(b)处理的结果。



(a) 裂缝 CT 图 (b) 裂缝提取 (c) 算法处理  
(a) CT image of fracture (b) Fracture extraction (c) Algorithm processing

图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental result

由上述实验结果可知,本文算法能够在不影响裂缝本身特征的情况下将交叉裂缝进行分离,并且分离结果符合现实预期结果,为后续裂缝统计参数分析提供更可靠的数据支撑。

## 3 结束语

传统裂缝提取算法在遇到交叉裂缝的情况下,无法进行有效的处理。为此本文提出了一种基于 Freeman 链码的交叉裂缝分离算法。该算法加入了概率统计的因素,使追踪裂缝的过程更加平滑;使用距离约束达到去除图像噪声的效果;对分割错误的裂缝进行了合并处理,减少了过分割情况的出现。实验结果表明,基于 Freeman 链码的交叉裂缝算法对交叉裂缝的分割有着良好的效果,且算法计算量小、抗噪性强,适于图像的实时处理,并为岩心地质裂缝的参数计算提供了更加精密的计算方式。

## 参考文献

- [1] 薛亮, 吴雨娟, 刘倩君, 等. 裂缝性油气藏数值模拟与自动历史拟合研究进展[J]. 石油科学通报, 2019, (4): 335-346.
- [2] FREEMAN H. Boundary Encoding and Processing [C]// Proceedings of picture Processing and Psychopictorics. New York: Academic Press, 1970: 241-266.
- [3] 赵丽科, 宋伟东, 王竞雪. Freeman 链码优先级直线提取算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(1): 42-46, 122.
- [4] 靳秋霞, 张彩霞. 基于 Freeman 链码的二维曲线匹配[J]. 计算机应用, 2015, 35(S1): 247-251.
- [5] QU Z, GUO Y, JU F R, et al. The algorithm of accelerated cracks detection and extracting skeleton by direction chain code in concrete surface image[J]. The Imaging Science Journal, 2016, 64(3).
- [6] LIDAYOVA K, FRIMMEL H, WANG C, et al. Fast vascular skeleton extraction algorithm [J]. Pattern Recognition Letters, 2016, 76(1): 67-75.
- [7] Bag, Soumen, Harit, Gaurav. A medial axis based thinning strategy and structural feature extraction of character images. [J]. 2010.
- [8] Bataineh, Bilal. An Iterative Thinning Algorithm for Binary Images Based on Sequential and Parallel Approaches [J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2018, 28(1): 34-43.
- [9] 瞿中, 蒋玉萍, 文倩云. 一种方向链码扫描与跟踪的图像细化后期处理算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(2): 292-295.
- [10] 王要峰, 崔艳. 基于方向链码去除骨架图像毛刺算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 193-194, 198.