

DOI:10.11784/tdxbz201612015

钻孔图像特征分析与结构面区域划分方法

邹先坚^{1,2}, 王川婴¹, 韩增强¹, 汪进超¹, 王益腾¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 数字式全景钻孔摄像系统在实践中获得了大量的高精度钻孔图像, 这些钻孔图像数据往往需要人为进行分段处理和信息加工预处理, 工作量大并且具有盲目性。针对该问题, 本文进行了钻孔图像特性分析, 并提出了一种对钻孔图像进行结构面区域划分的方法。该方法利用井壁中岩体结构成像灰度梯度纵向投影的极值特征来组成新的合成信号和便于计算机处理的区域划分信号, 从而实现了钻孔图像的区域划分以及结构面产状范围的初步限定。该方法能够连续快速地对整个钻孔图像内所有的结构面进行区域划分, 无需人为干预, 为结构面的全自动识别与参数提取奠定了基础, 也为深孔钻井工程中图像数据的分块处理提供了一种有效的解决方案。

关键词: 钻孔图像; 结构面; 区域划分; 纵向投影; 灰度梯度

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2018)01-0088-07

Borehole Image Characteristic Analysis and Structural Planes Partitioning Method

Zou Xianjian^{1,2}, Wang Chuanying¹, Han Zengqiang¹, Wang Jinchao¹, Wang Yiteng¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Digital panoramic borehole camera system can obtain abundant high-precision borehole images from the drilling operations. These images usually need to be divided into many segments and require pretreatment for later information processing, which is time-consuming, aimless and tedious work by manual operation. To deal with this problem, a method of structural planes' region partition in a whole borehole image is proposed after the analysis of characteristic signals in the image. This method uses the extreme eigenvalues of gray gradient signals from the imaging of borehole rock mass in vertical projection to compose a new signal and a partitioning signal which is convenient for computer processing. It realizes the region division of structural planes in the whole borehole image and the primary limitation of joints occurrence in rock mass. This method can partition all the structural planes from the whole borehole image in rapid succession without human intervention. It lays a foundation for the full-automatic recognition and parameter extraction of structural planes in borehole image, and also provides an effective way of borehole image region division for drilling operations of a deep hole.

Keywords: borehole image; structural plane; region division; vertical projection; gray gradient

钻孔摄像技术依靠光学成像原理, 使人能直接观测到钻孔井壁岩体结构的内部情况, 并将钻孔视频图像进行有效拼接缝合, 从而得到高分辨率的数字钻孔图像。这些钻孔图像准确记录了地下岩体的结构面

信息^[1-4]。在实际钻探工程当中, 由于钻孔很深, 图像数据量也很大, 钻孔图像的分段处理和结构面的分块提取主要依靠人为判断和随意切分。这常常导致结构面信号的破坏和丢失, 而且没有很好的解决方法^[5]。

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-08-30.

作者简介: 邹先坚(1987—), 男, 博士, 助理研究员.

通讯作者: 邹先坚, xjzou@whrsm.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402278, 41372317).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 41402278 and No. 41372317).

目前,钻孔图像结构面形态特征的判读与几何参数的提取基本上停留在人工操作与主观识别的基础上^[6-7].对于钻孔结构面的分割分块处理主要是人工完成,工作效果差,人为因素较重.在深至几千米的钻孔图像中,钻孔图像数据量非常庞大,岩体结构复杂,人工操作费时费力,难以短期内进行正确有效的分割分块处理^[8],迫切需要一种有效方法加以解决.

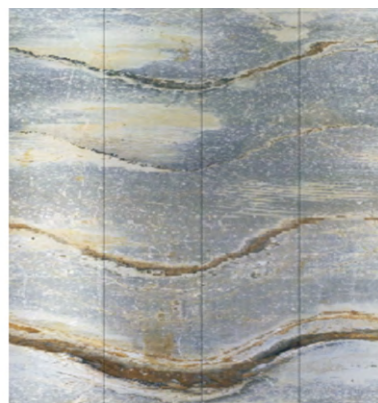
因此,本文通过分析钻孔图像特征,寻找出新的特征信号来描述钻孔图像中的结构面信息,合成一种新的便于计算机处理的分块信号,用于实现结构面的区域划分.本文针对利用数字式全景钻孔摄像系统获取的钻孔图像^[9],充分利用图像本身的灰度梯度在纵向投影的极值特征及其分布特性,分别提取每行的最大最小灰度值和最大梯度变化值^[10],并合成全新的特征量信号,实现了钻孔图像结构面的区域划分与参数范围的限定,为钻孔图像结构面的全自动识别与参数提取奠定了基础.

1 钻孔图像结构面特征分析

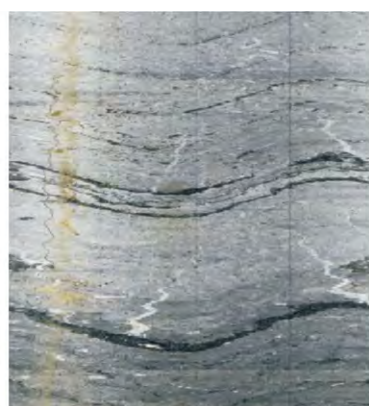
钻孔图像是钻孔井壁的间接反应,孔壁的岩体结构决定了钻孔图像的组成.因此,钻孔图像由两部分组成:一部分为岩石,另一部分为破裂的或不连续的结构面.由于岩体固有属性的差异,导致不同岩石不同结构面在图像上颜色和明暗程度的差异.深色岩石(煌斑岩)或矿物(黑云母、角闪石和辉石等)吸光性强反光性差,图像较为暗淡;浅色岩石或矿物(长石、石英和白云母)吸光性差反光性强,图像较为明亮.破裂的岩石或不连续面在钻孔图像中形成较暗的区域,或者形成颜色明暗程度不一样的曲线带,使结构面在图像中有所不同.不同的结构面由于形态特征和物理特性的不同而呈现出一定的差异,主要表现在钻孔图像中类似于正弦曲线的带状曲线的形状、宽度、颜色、交错关系以及曲线周围岩石光斑点和纹理曲线带^[11].由中国科学院武汉岩土力学研究所研发的数字式全景钻孔摄像系统^[9]在工程钻孔中采集到的钻孔图像如图1所示.其中,图1(a)为间距相对较大的规则结构面,图1(b)为大小间距相间的规则结构面,图1(c)为交叉破裂的不规则结构面.

岩体结构面在钻孔井壁上呈椭圆形状,立体空间结构是椭圆状,而采集到的二维钻孔图像中椭圆结构面展开后就是一条水平方向分布的正弦曲线带.理想状态下的标准完整的结构面在钻孔图像中是一条水平方向分布的标准正弦曲线带;非理想状态下的结构面在钻孔图像中在一定范围内也类似于正弦曲线

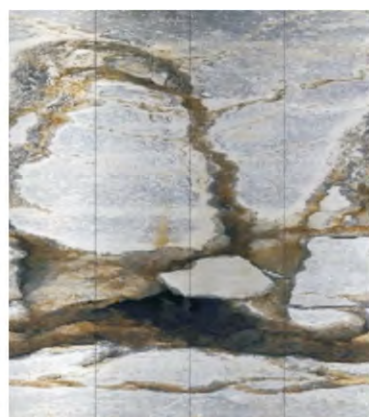
带.如图1所示,结构面在展开的钻孔图像中基本上均为水平方向延伸的正弦曲线带,岩体结构面在垂直方向(钻井深度方向)分布相对独立.



(a) 大间距的规则结构面



(b) 大小间距相间的规则结构面



(c) 交叉破裂的不规则结构面

图1 数字式全景钻孔摄像系统获得的钻孔图像

Fig.1 Borehole images taken by digital panoramic borehole camera system

2 结构面区域划分方法

由于大部分规则的结构面在钻井深度方向的分布是相对独立的,故本文从此出发寻找一种重新描述

岩体结构面的特征量. 在钻孔图像中, 结构面所表现出来的正弦曲线带相对突出、比较明显, 记为目标区域, 如图 1 所示. 在非目标区域, 由于孔壁的不平整和岩石特性的差异, 图像中不可避免地存在许多明暗不一、大小不均的孤立光斑点或特征区域. 这些光斑点和特征区域在很大程度上影响了目标区域的定位与识别. 但是, 在目标区域中结构面曲线带的灰度值基本上呈现出相对连续的最黑或者相对连续的最亮, 并且分布区域相对集中. 如果采用聚类思想的 Fisher 准则^[12-13], 在垂直深度方向进行纵向投影, 则这些结构面的特征点会汇集到一小块区域内, 并且相对独立. 在实际钻井中, 大部分结构面之间不会交叉重叠并且间隔相对较大, 则这些投影之后的小块区域就很容易地从钻孔图像中凸显出来. 即使存在一些个别破碎岩体造成的干扰信号, 在经过一些信号滤波与处理^[14-16]之后, 结构面的分布区域特征就会得到进一步的显示.

2.1 描述特征信号

为了更好地凸显这些结构面的特征, 避免被其他无关像素点淹没覆盖, 使结构面特征信号有效地分离出来, 本文在钻孔图像中, 寻找新的特征点来描述结构面, 并组成新的特征信号, 用以实现结构面的区域划分. 首先, 采用每行像素点的灰度最小最大值来描述结构形态特征. 设图像中左上角为像素坐标的起点, 像素点坐标从上往下从左往右依次增加. 记图像为 $f(i, j)$, 表示像素点在 (i, j) 处的灰度值. 然后, 选择每一行像素点的最小灰度值作为该行的最小特征值, 表达式为式(1). 选择每一行像素点的最大灰度值作为该行的最大特征值, 表达式为式(2).

$$\min V(i) = \min \{f(i, 0), f(i, 1), f(i, 2), \dots, f(i, j), \dots, f(i, N-1)\} \quad (1)$$

$$\max V(i) = \max \{f(i, 0), f(i, 1), f(i, 2), \dots, f(i, j), \dots, f(i, N-1)\} \quad (2)$$

式中: $\min V(i)$ 为第 i 行的最小像素值; $\max V(i)$ 为第 i 行的最大像素值; N 为钻孔图像的宽度, 是一个常数值, 本文取 1 024.

另外, 本文采用灰度梯度来进一步描述结构面曲线带的灰度值与周边像素点的变化情况. 在 3 像素 \times 3 像素的邻域内, 在点 (i, j) 处, 水平方向(x 轴)的梯度如式(3)所示, 垂直方向(y 轴)的梯度如式(4)所示. 在大量的计算处理当中, 计算机常常采用 x 方向梯度、 y 方向梯度的绝对值的和作为梯度的值, 如式(5)所示.

$$G_x(i, j) = \frac{\partial f}{\partial x} = \sum_{k=-1}^1 [f(i+1, j+k) - f(i-1, j+k)] \quad (3)$$

$$G_y(i, j) = \frac{\partial f}{\partial y} = \sum_{k=-1}^1 [f(i+k, j+1) - f(i+k, j-1)] \quad (4)$$

$$G(i, j) = \nabla f \approx |G_x(i, j)| + |G_y(i, j)| \quad (5)$$

式中: $G_x(i, j)$ 为像素点 (i, j) 在 x 方向的梯度值; $G_y(i, j)$ 为像素点 (i, j) 在 y 方向的梯度值; $G(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的梯度值.

于是, 每一行像素点的最大梯度值可以表示为式(6), 其中 $\max G(i)$ 为第 i 行的最大梯度值.

$$\max G(i) = \max \{G(i, 0), G(i, 1), G(i, 2), \dots, G(i, j), \dots, G(i, N-1)\} \quad (6)$$

2.2 特征信号处理

在钻孔图像中, 每行的最小灰度值和最大灰度值代表了图像特征的两个极点, 而结构面正弦曲线带就是由这些极点(钻孔图像中的黑点和亮点)组成的. 这些极点主要分布在结构面正弦曲线带中, 并且在垂直深度方向的投影相对集中(正弦曲线是水平分布的). 为了避免这些极点被非目标区域的光斑点淹没, 使它们进一步突显出来, 本文采用每行的最大值 $\max V(i)$ 的均值与最小值 $\min V(i)$ 的差值作为该行的基准值, 再加上该行的最大梯度值 $\max G(i)$ 或者其倍数作为该行的合成信号特征值 $\text{ComS}(i)$, 其表达式如式(7)所示.

$$\text{ComS}(i) = \frac{\overline{\max V(i)} - \min V(i) + \lambda \max G(i) + V_0}{\lambda} \quad (7)$$

式中: $\text{ComS}(i)$ 为第 i 行的特征值; λ 在本文中取值 1; $\overline{\max V(i)}$ 为最大值 $\max v(i)$ 的均值; V_0 是一个基准值, 为了方便数据对比, 本文设定为常数 -80. 在钻孔图像的整个分析区域中, 最大值信号 $\max V(i)$ 的均值、最小值信号 $\min V(i)$ 和最大梯度值信号 $\max G(i)$ 构成了合成信号 $\text{ComS}(i)$. 在实际应用中, 这些信号均进行了独立的信号滤波去噪处理. 合成信号 $\text{ComS}(i)$ 根据式(7)计算后也进行了滤波去噪, 随后用来表示该行像素点的灰度特征. $\min V(i)$ 、 $\max V(i)$ 、 $\max G(i)$ 、 $\text{ComS}(i)$ 这些特征信号有效地表达了图像中的结构面分布信息.

2.3 结构面区域划分

由图 2 可知, 合成信号 $\text{ComS}(i)$ 初步有效地表达了结构面正弦曲线的分布区域和相对中心位置. 为了更好地方便计算机的分析处理, 有必要对合成信号

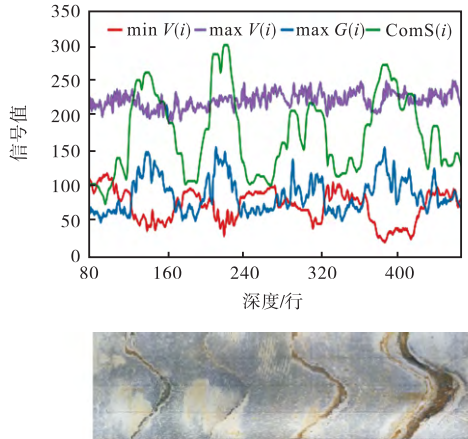


图2 结构面特征信号与钻孔图像结构面对应关系

Fig.2 Corresponding relationships between characteristic signals and structural planes in the borehole image

进行阈值分割和二值化处理,以精确表达结构面的位置.在实际钻孔图像当中,由于钻孔深至几千米,岩石结构会发生变化从而导致钻孔图像本身的背景条件发生很大变化,故图像中的阈值选取往往需要兼顾局部与整体,用以自适应钻孔图像的整体变化.合成信号的整体阈值取整个分析区域的平均值,如式(8)所示.另外,再取合成信号在当前分析区域中10~100行的均值作为该区域的局部阈值,比如取50,如式(9)所示.

$$\overline{\text{ComT}}_{\text{global}} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \text{ComS}(i) \quad (8)$$

$$\overline{\text{ComT}}_{\text{local}} = \frac{1}{2w} \sum_{k=i-w}^{i+w} \text{ComS}(k) \quad w \in [10,100] \quad (9)$$

式中: M 为整个合成信号的个数,也就是整个分析区域的行数; $\overline{\text{ComT}}_{\text{global}}$ 为合成信号的整体阈值; w 为该行上下偏移的一个宽度,一般取20行即可; $\overline{\text{ComT}}_{\text{local}}$ 为合成信号的局部阈值.于是合成信号的二值化方法如式(10)所示,式中 $\text{ComT}(i)$ 信号为分块信号.该信号是合成信号的二值化结果.

$$\text{ComT}(i) = \begin{cases} 1 & \text{ComS}(i) \geq (\overline{\text{ComT}}_{\text{global}} + \overline{\text{ComT}}_{\text{local}}) / 2 \\ 0 & \text{ComS}(i) < (\overline{\text{ComT}}_{\text{global}} + \overline{\text{ComT}}_{\text{local}}) / 2 \end{cases} \quad (10)$$

计算机根据分块信号 $\text{ComT}(i)$ 可以很方便地实现结构面正弦曲线的定位与分析.当分块信号 $\text{ComT}(i)$ 非0时,记为结构面存在的区域.实际当中分块信号可能会存在一些狭小的区域,为了避免丢失一些可能存在的结构面,这些狭小区域可以合并到邻近相对较大的区域当中.

3 结果分析与讨论

3.1 结构面区域划分结果与分析

针对图1(a)和图2,结构面区域划分的分块信号 $\text{ComT}(i)$ 如图3(a)所示,区域划分的结果如图3(b)所示,对应的特征量 J values分布情况如图3(c)所示

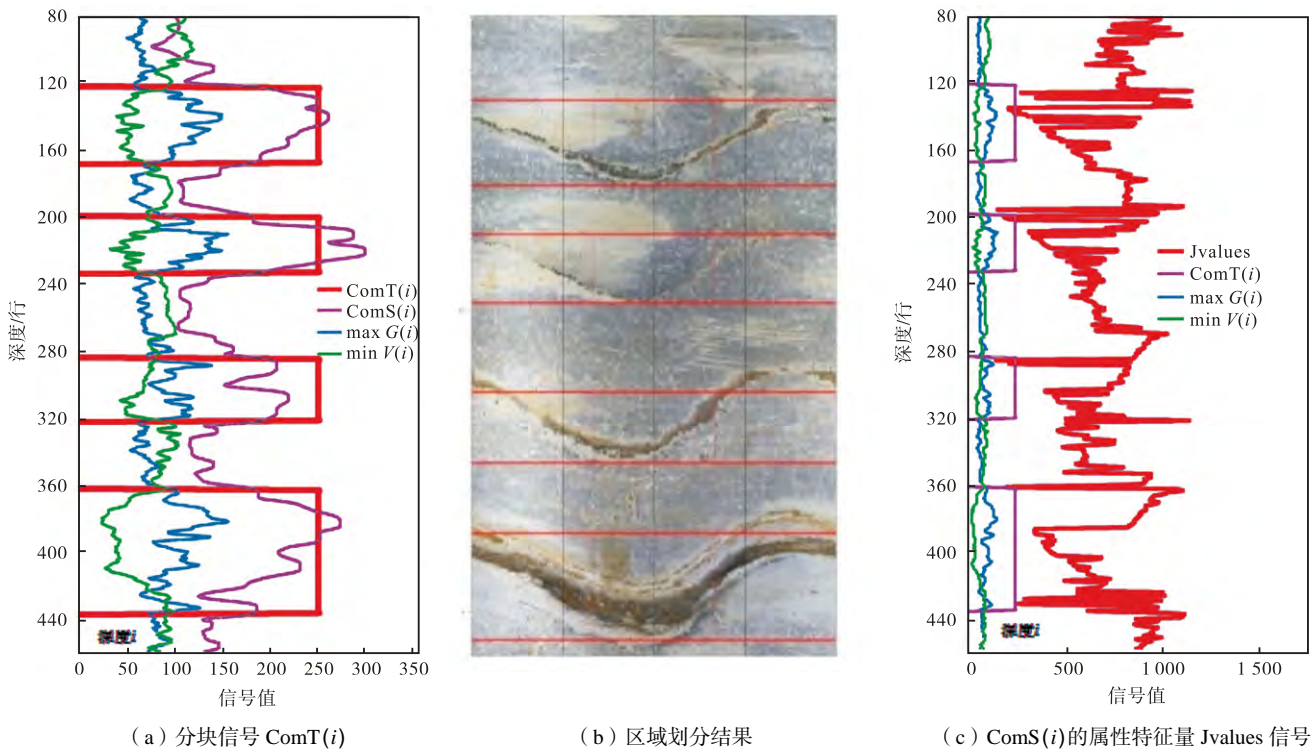


图3 结构面区域划分结果及有关信号分布情况

Fig.3 Partitioning result of structural planes and the analysis of related signals' distribution

示. 其中, 合成信号 $ComS(i)$ 的特征量来源于最大梯度特征信号 $\max G(i)$ 对应像素点的纵坐标 (y 坐标 $Jvalues$), 特征量 $Jvalues$ 是分块信号 $ComT(i)$ 的一个附加属性值. 由图 3 可知, 合成信号 $ComS(i)$ 的 4 个极大值点区域对应着分块信号 $ComT(i)$ 的 4 个分块区域, 实现了结构面的区域划分. 图 3(b) 表明该方法有效地划分了图 1(a) 中每个结构面所在区域, 钻孔图像中区域划分结果较好.

经过进一步分析可知, 分块信号 $ComT(i)$ 的位置和所占区域的大小意味着结构面所在的位置和最大倾角, 于是可以根据图 3(a) 分块信号中每个分块区域的宽度 W 大小, 初步判定结构面倾角 β 的最大范围, 即 $\beta < kW/D$ (D 为钻井孔径大小, k 为钻孔图像深度方向的分辨率, 也为扫描线的线间距). 合成信号 $ComS(i)$ 附加属性特征量 $Jvalues$ 所在区域内的中心位置也就意味着结构面正弦曲线波谷的相对位置, 于是可以根据图 3(c) 中 $Jvalues$ 的分布情况可以判定结构面倾向的初步范围, 即根据每个分块区域内 $Jvalues$ 分布的中心位置确定结构面正弦曲线波谷位置. 由于钻孔结构面的复杂性, 取 $\pm 10^\circ$ 的波动范围, 继而得出结构面倾向 α 的大致范围为正弦曲线波谷所对应倾向角的 $\pm 10^\circ$ 范围, 具体计算方法为: 取 $Jvalue$ 分布的中值点作为分块区域内结构面正弦曲线的波峰波谷值点, 求出正弦曲线波谷点所对应的倾向角, 再在该倾向角的基础上波动 $\pm 10^\circ$ 作为结构面倾向 α 的大致范围.

由图 3 可知, 本文所述方法根据合成信号的分布特征得出了便于计算机处理的分块信号以及有关结构面位置、倾向、倾角的参数信息. 这些信息的提取与利用, 为目标区域内结构面特征曲线(正弦曲线)的识别与分析提供了判断依据, 为钻孔图像结构面的全自动识别与参数提取打下坚实的基础. 该方法有效地划分了每个结构面所在区域, 也初步得到了很多与结构面相关的参数信息.

3.2 不规则结构面信号处理结果

在实际钻孔工程中, 实测的钻孔图像中往往存在部分结构面不连续或者断裂破裂的情况, 从而导致结构面信号的部分丢失. 在钻孔图像进行纵向投影分割分块时, 结构面也存在部分结构面交叉或相对平行连在一起. 由此在合成信号 $ComS(j)$ 和分块信号 $ComT(j)$ 中存在个别孤立的小特征区域, 如图 4(a) 所示. 这些小的相对孤立的区域一般都是岩石比较小的孔洞造成的, 但也不排除确实是结构面的断裂而造成的信号断续. 为了尽可能少地减少结构面的丢失, 这些小的孤立特征区域有必要进行保留, 而不应该被

信号滤波当作噪声去掉. 本文采取就近原则的处理方法^[17], 具体实施措施为: 对每个子块的长度大小进行统计划分, 然后远小于子块长度均值的定义为孤立的干扰小块, 再对其附近子块的长度大小进行比较, 将该孤立的小块划分到距离最近的一个长度较大的子块当中去, 与之重新连成一片成为一个整体变成一个子块, 以免结构面的破坏, 进而保证结构面信号的完整性, 其中一个实例的区域划分结果如图 4(b) 所示.

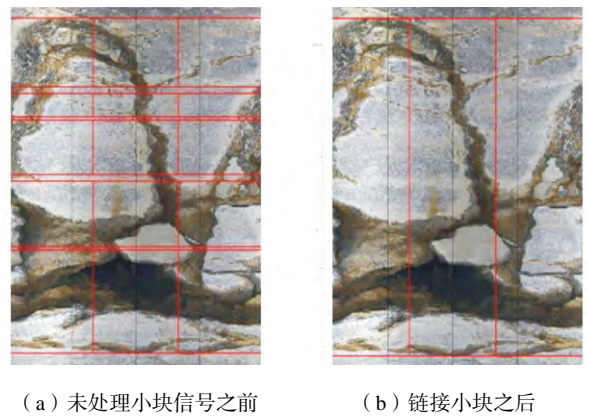


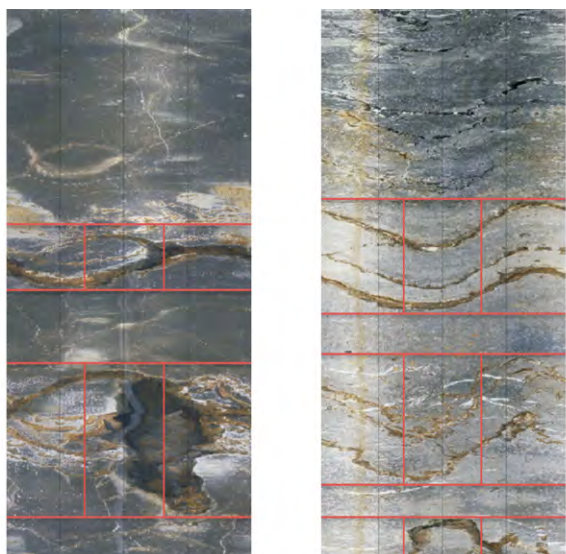
图 4 孤立小块对结构面分块结果的影响

Fig.4 Influence of isolated small blocks on the partitioning of structural planes

钻孔图像分块信号的完整性定义为钻孔图像中结构面信息的独立性和主要结构面信息的完整性, 划分的原则是宁可把几个相近结构面划分为一个整体, 也要保证钻孔图像中的单个结构面不能被分割为几小块.

由图 4 和图 5 可知, 狭小区域信号采用就近原则的方法可以有效地防止信号缺失, 保证了一个显而大的结构面不被分割为几个小块, 从而进一步提高了钻孔图像区域划分结果的准确性, 保证了钻孔图像结构面信号的完整性. 在后续的图像信号处理^[18], 针对每个分块区域重新进行分析, 即把同一个区域内的一个或多个结构面信号进行进一步的分割与提取, 从而实现每个分块区域里钻孔图像结构面的自动识别与参数提取. 例如, 在针对图 5 进行区域划分之后, 采样钻孔图像结构面自动识别方法方便有效地实现了全井钻孔图像结构面的全自动识别与参数提取, 结构面自动识别结构如图 6 所示.

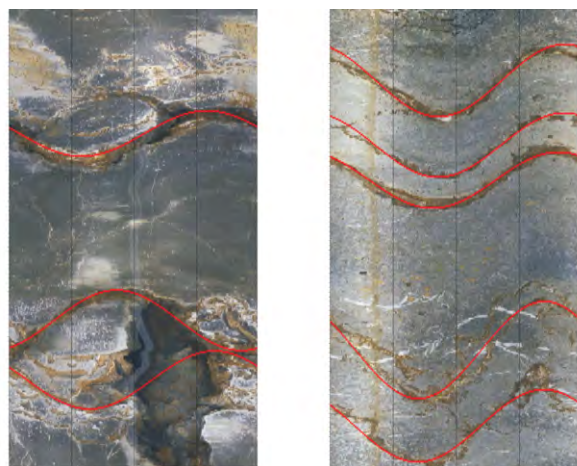
因此, 采用本文所述的钻孔图像结构面区域划分方法, 有效地解决了全井钻孔图像有目的进行信息加工与预处理, 实现了全井钻孔图像结构面信息的区域划分, 有效地保证了全孔结构面信息在进行区域划分之后的完整性和有效性, 为钻孔图像进行自动识别等



(a) 带有孔洞的结构面区域 (b) 相对平行的结构面区域

图5 钻孔图像结构面区域划分结果

Fig.5 Partitioning results of structural planes in the borehole images



(a) 带有孔洞的结构面区域 (b) 相对平行的结构面区域

图6 钻孔图像区域划分后的结构面自动识别

Fig.6 Automatic recognition of structural planes after borehole image region partition

后期处理与信息提取打下了坚实的基础(如图6所示)。另外,本文采用局部均值与整个均值的均值作为匹配阈值,可以有效地自适应钻孔图像的变化,很好地实现结构面形态特征的区域划分与特征参数的估计,实践结果较好,为结构面的后续处理奠定了基础,也满足了实际工程项目的需求。

4 结 语

本文提出了一种采用灰度梯度合成信号来划分结构面区域的方法。该方法利用钻孔图像在纵向投影的极值特征来组成全新的特性信号,即采用每行的

最大、最小灰度值和最大梯度值来组成合成信号和分块信号,从而实现了钻孔图像结构面的区域划分与有关参数范围的限定,有效辅助了钻孔图像结构面的后期处理与信息提取(比如钻孔图像结构面的全自动识别与参数提取)。同时,该方法可以有效避免可能存在的重要结构面的丢失,为钻孔图像结构面的全自动识别和岩体结构面产状的精确分析打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统及应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 522-525.
Wang Chuanying, Ge Xiurun, Bai Shiwei. The digital panoramic borehole camera system and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 522-525(in Chinese).
- [2] 杨天鸿, 于庆磊, 陈仕阔, 等. 范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2482-2489.
Yang Tianhong, Yu Qinglei, Chen Shikuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fangezhuang coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2482-2489(in Chinese).
- [3] Schepers R, Rafat G, Gelbke C, et al. Application of borehole logging, core imaging and tomography to geotechnical exploration[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(6): 867-876.
- [4] 钟 声, 王川婴, 吴立新, 等. 钻孔雷达与数字摄像在地质勘探中的综合应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 335-341.
Zhong Sheng, Wang Chuanying, Wu Lixin, et al. Integrated application of borehole GPR and borehole imaging to geological surveys[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(1): 335-341(in Chinese).
- [5] Zheng J, Deng J H, Zhang G Q, et al. Validation of Monte Carlo simulation for discontinuity locations in space[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 67: 103-109.
- [6] Assous S, Elkington P, Clark S, et al. Automated detection of planar geologic features in borehole images[J]. *Geophysics*, 2014, 79(1): 11-19.
- [7] 汪进超, 王川婴, 韩增强, 等. 基于钻孔摄像技术的珊瑚礁完整性评价分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(5): 1619-1624.

- Wang Jinchao, Wang Chuanying, Han Zengqiang, et al. Analysis of coral reef integrity based on borehole camera technology [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(5): 1619-1624(in Chinese).
- [8] Deltombe J L, Schepers R. New developments in real-time processing of full waveform acoustic televiewer data [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 55(1/2): 161-172.
- [9] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(3): 398-403.
Wang Chuanying, Ge Xiurun, Bai Shiwei, et al. Study of the digital panoramic borehole camera system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 398-403(in Chinese).
- [10] 宋欢, 王川婴, 邹先坚, 等. 基于 B 超图像的水下模型地形提取方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(2): 225-232.
Song Huan, Wang Chuanying, Zou Xianjian, et al. An extracting method of underwater model topography based on B-mode ultrasound images[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(2): 225-232(in Chinese).
- [11] 曹洋兵, 晏鄂川, 胡德新, 等. 岩体结构面产状测量的钻孔摄像技术及其可靠性[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2014, 39(4): 473-480.
Cao Yangbing, Yan Echuan, Hu Dexin, et al. Calculation methods of rock mass discontinuity orientation measured by borehole camera technology and technology reliability [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geoscience*, 2014, 39(4): 473-480(in Chinese).
- [12] 张雪丹, 姜益强, 姚杨, 等. 岩土热响应试验不确定性研究及敏感性分析[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2017, 50(3): 306-312.
Zhang Xuedan, Jiang Yiqiang, Yao Yang, et al. Uncertainty study and sensitivity analysis of soil-rock thermal response test[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2017, 50(3): 306-312(in Chinese).
- [13] Zheng J, Deng J H, Yang X J, et al. An improved Monte Carlo simulation method for discontinuity orientations based on Fisher distribution and its program implementation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 61(3): 266-276.
- [14] 蒋志勇, 秦前清, 陈晓玲, 等. 基于形态重构的图像去噪方法研究[J]. *测绘信息与工程*, 2006, 31(5): 6-7.
Jiang Zhiyong, Qin Qianqing, Chen Xiaoling, et al. Image noise reduction based on morphological reconstruction [J]. *Journal of Geomatics*, 2006, 31(5): 6-7(in Chinese).
- [15] 朱万成, 杨天鸿, 霍中刚, 等. 基于数字图像处理技术的煤层瓦斯渗流过程数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2009(1): 18-23.
Zhu Wancheng, Yang Tianhong, Huo Zhonggang, et al. Numerical simulation on gas flow through coal seam based on digital image-based technique [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009(1): 18-23(in Chinese).
- [16] 刘杰, 王忠海, 邵立国. 组合桩承载力的试验研究[J]. *天津大学学报*, 2003, 36(1): 115-119.
Liu Jie, Wang Zhonghai, Shao Liguang, et al. Experimental study on the bearing capacity of composite pile [J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(1): 115-119(in Chinese).
- [17] Malone T, Hubbard B, Merton-Lyn D, et al. Borehole and ice feature annotation tool(BIFAT): A program for the automatic and manual annotation of glacier borehole images[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 51(12): 381-389.
- [18] Chai Hua, Li Ning, Xiao Chengwen, et al. Automatic discrimination of sedimentary facies and lithologies in reef-bank reservoirs using borehole image logs [J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(1): 17-29.

(责任编辑: 王晓燕)