

# 全景钻孔图像中结构面全自动识别方法研究

邹先坚<sup>1,2</sup>, 王川婴<sup>1</sup>, 韩增强<sup>1</sup>, 汪进超<sup>1</sup>, 王益腾<sup>1</sup>, 宋欢<sup>2</sup>

(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, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 数字全景钻孔摄像技术在实际工程上得到了广泛的应用, 获得大量的高精度实测钻孔图像。这些钻孔图像准确记录了地质特征信息, 特别是结构面的几何形态特征。然而, 这些特征信息的获取通常是由人工完成的, 工作量大, 人为因素较多。针对该问题, 提出一种针对全景钻孔图像的结构面全自动识别方法。该方法首先提出用图像灰度梯度合成信号在钻孔深度方向的投影的方法来划分结构面所在区域及其产状范围; 然后提出用标准模板正弦函数迭代匹配结构面特征量的方法来搜寻区域内结构面的所有可能正弦曲线, 并从中筛选出最优的正弦曲线作为结构面的特征曲线; 最后结合区域划分和模板函数匹配的结果, 分析特征曲线参数, 并进行再匹配和转换, 最终得到工程所需的结构面位置、倾向、倾角和隙宽等参数, 从而实现钻孔图像结构面的全自动识别。结果表明该方法能够连续快速地全自动识别整个钻孔图像内的结构面, 并获得对应的高精度几何参数, 算法稳定可靠、结构面识别率高。与传统方法相比, 该方法首次实现了整个钻孔图像中结构面的全自动识别与几何参数提取, 极大地提高了工作效率, 为钻孔图像的后期处理与信息获取提供一种实际可行的有效方法。

**关键词:** 岩石力学; 钻孔图像; 结构面; 全自动识别; 模板函数; 参数提取

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2017)08 - 1910 - 11

## Fully automatic identifying the structural planes with panoramic images of boreholes

ZOU Xianjian<sup>1,2</sup>, WANG Chuanying<sup>1</sup>, HAN Zengqiang<sup>1</sup>, WANG Jinchao<sup>1</sup>, WANG Yiteng<sup>1</sup>, SONG Huan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Panoramic digital cameras for boreholes have been widely employed in engineering practice, and a large number of high accuracy images of boreholes have been obtained. The borehole images record accurately the geological features, especially the structural features of the structural planes. However, since the acquisition of these features is usually undertaken manually, the workload is large and the results can be affected by many man made factors. To solve this problem, this paper presents a method of fully automatic identification of structural planes with the panoramic camera images of borehole. In this method, the gray level of images, the gradient and the projection method are employed to distinguish the region and the area of the structural plane occurrence. The standard sine function matching is employed to search the structural plane in the region. The optimal sine curve is screened out and adopted as the feature curve of structure plane. The parameters of the feature curve are analyzed and converted into the parameters of the structural plane required in engineering projects, such as the position, the inclination, the dip angle and the fracture width, etc. The results show that the method can automatically identify

**收稿日期:** 2017 - 01 - 10; **修回日期:** 2017 - 02 - 27

**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(Grant Nos. 41402278 and 41372317)

**作者简介:** 邹先坚(1987 -), 男, 2016 年于武汉大学无线电物理专业获博士学位, 现任助理研究员, 主要从事工程探测与数据分析处理及相关仪器设备研发方面的研究工作。E-mail: zouxianjian@whu.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0021

the structural plane with the borehole image continuously and quickly and can obtain the corresponding structural parameters accurately. The method is stable and reliable. Compared with the traditional methods, this method realizes the fully automatic identification of the whole structural planes and the extraction of geometric parameters. It improves greatly the working efficiency, and provides an effective solution for the post processing and information acquisition of the borehole image.

**Key words:** rock mechanics; borehole image; structural plane; full-automatic identification; template function; parameter extraction

## 1 引言

钻孔摄像技术已经在岩土地质工程、土木工程、采矿工程、水电工程和石油开发以及地质灾害防治工程等诸多方面取得了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。基于光学技术的数字式全景钻孔摄像系统能够同时观测 360° 钻井孔壁, 形成了大量的高精度钻孔图像。这些钻孔图像准确记录了孔壁结构面的形态特征和几何参数等重要信息<sup>[3-5]</sup>。在工程实践当中, 钻孔图像的后期处理和这些重要信息的获取常常由于缺乏快速有效的方法而耗费大量的人力物力。因此, 钻孔图像中结构面形态特征的自动化识别与几何参数的智能提取具有重要的现实意义<sup>[6-8]</sup>。

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。对于结构面的识别, 通常由人工给出图像中结构面的 3 个控制点, 进而由计算机自动拟合出标准的正弦曲线, 确定拟合曲线与结构面产状互相符合后, 再根据拟合参数重新计算出结构面的几何参数<sup>[9]</sup>; 或者统计分析图像特征点, 在图像识别的基础上进行曲线变换和拟合<sup>[10-12]</sup>。这种半自动化的操作识别往往存在较多的人为干预环节, 不仅仅工作效率低, 而且不同的操作人员会给出不同的识别结果, 造成结果的多样性, 可靠性较低。基于纹理特征和聚类分析<sup>[13]</sup>的图像目标检测与自动识别方法能够有效解决了特定钻孔图像结构面的自动识别与有关参数提取的问题, 对解决实际工程钻孔图像的全自动识别起到了先导作用。另外, 通过图像处理提取结构面的方法, 采用图像空间变换、图像滤波与增强、图像分割、Hough 变换与参数提取等步骤, 再加上模式识别等技术手段可以实现结构面参数的唯一判读<sup>[14]</sup>。然而, 这些方法仍然需要人为输入参数的加以引导和必要的人工干预, 无法实现钻孔图像结构面的全自动化判读与智能提取。特别是在深至几千米的钻孔图像中<sup>[15]</sup>, 孔壁情况多变, 结构面

复杂, 钻孔图像数据量大, 人工操作费时费力, 难以短期内连续完成, 迫切需要新的手段加以解决<sup>[16]</sup>。因此, 本文提出了一种全新的结构面自动识别与参数提取方法, 用以解决钻孔图像中结构面的全自动化判读与倾向倾角等参数的智能提取。

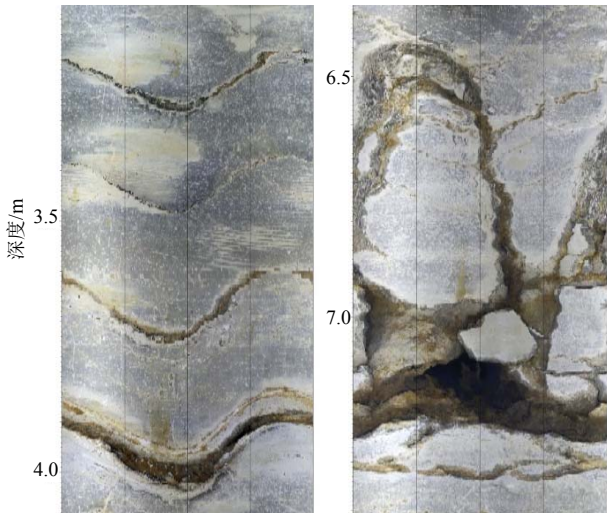
## 2 钻孔图像结构面特征分析

### 2.1 钻孔图像的组成及其光学性质

钻孔图像是钻井孔壁的间接反映, 孔壁的结构决定了钻孔图像的组成。钻孔摄像探头在钻孔内行进过程中, 微型 CCD 摄像机接收的是钻孔壁面的反射光线, 不同的岩石或充填物对入射光线造成不同的反射效果, 使结构面在图像中的明暗程度不同。若结构面被石英长石胶结, 壁面完整, 入射光线在结构面处的反射性好, 获得的图像接近孔壁的真实情况; 若结构面被泥砂碎石充填, 入射光线在此处发生漫反射, 反射性较差, 获得的图像偏暗; 若结构面张开且无充填或胶结, 入射光线经过此处时无光线反射回微型 CCD 摄像机, 则获得的钻孔图像中结构面显示为黑区, 如图 1 所示。其中, 图 1(a) 为相对独立的简单规则结构面, 图 1(b) 为交叉的复杂不规则结构面。如无特殊说明, 本文所述钻孔图像均指利用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的数字式全景钻孔摄像系统获取的圆柱孔壁图像的展开图, 结构面均指钻孔图像中类似正弦曲线的带状结构面。

### 2.2 结构面特征分析

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。在钻孔图像中, 主要表现为带状正弦曲线的颜色的深浅、形态的差异、宽度的变化以及曲线周围岩石光斑点和纹理特征的不规则<sup>[17]</sup>, 正如图 1 中的实测钻孔图像所示。由于结构面在钻井孔壁上呈三维椭圆形状, 而三维椭圆在二维图像上展开后就是一条正弦曲线<sup>[18]</sup>, 因此, 标准的结构面在钻孔图像中是一条水平方向分布的标准



(a) 相对独立的简单规则的结构面 (b) 相对交叉的复杂不规则的结构面

图1 数字钻孔摄像技术获得的钻孔图像

Fig.1 Borehole images obtained by using digital borehole camera technology

正弦曲线，非标准的结构面在钻孔图像中是一条近似于正弦曲线的曲线，在一定范围内可以当作正弦曲线处理，如图 2(a)所示。于是，钻孔图像上的结构面形态特征可以用模板正弦函数  $y(x)$  来表示，加以概括所有的钻孔图像中结构面，如下式所示：

$$y(x) = y_0 - A \sin(wx + \theta) \quad (1)$$

式中： $y_0$  为正弦函数的初始位置，对应于正弦函数中心位置在图像上的行数  $i_0$ ； $w$  为正弦函数的角频率，等于  $2\pi$  与每行扫描的像素点数  $N$  的比值； $A$  为幅值。另外，结构面可以用结构面的扫描线深度或位置  $Pos$ 、结构面最低点所对位置顺时针方向与正北方向的夹角即倾向  $\alpha$ 、结构面与水平面的夹角即倾角  $\beta$  和裂隙宽度即隙宽  $d$  四个参数来描述。这些参数反映在钻孔图像上对应的是正弦曲线的坐标位置  $i$ 、相位  $\theta$ 、幅值  $A$  和正弦曲线的波动范围。他们之间的转换关系分别如下式所示(对应关系见图 2(b))：

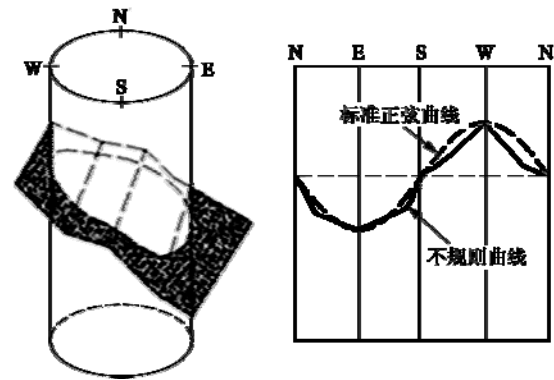
$$Pos = k(i_0 + l_0) \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{cases} \theta + 270^\circ & (0^\circ \leq \theta < 90^\circ) \\ \theta - 90^\circ & (90^\circ \leq \theta < 360^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

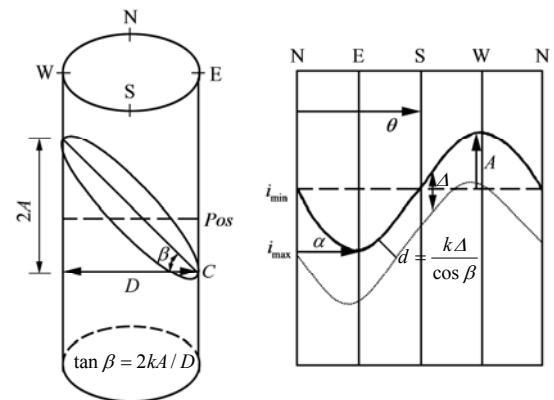
$$\beta = \arctan \frac{2kA}{D} \quad (4)$$

$$d = \frac{k\Delta}{\cos \beta} = \frac{k(i_{\max} - i_{\min})}{\cos \beta} \quad (5)$$

式中： $l_0$  为钻孔图像从整个钻孔图像中去截取出来



(a) 结构面在钻孔图像中形成的正弦曲线



(b) 结构面的几何参数关系图

图2 钻孔图像中结构面与正弦曲线的对应关系图

Fig.2 Relationship between sine curves and structural planes in the borehole image

的初始扫描线位置； $k$  为钻孔摄像仪器的设备参数，是钻孔图像深度方向的分辨率，即扫描线的线间距，中国科学院武汉岩土力学研究所研发的钻孔摄像仪器的扫描线线间距可以精确到  $0.1 \text{ mm}^{[19]}$ ，本文图像中的  $k = 3.0 \text{ mm}$ ； $D$  为钻孔孔径大小，本文所得钻孔图像的实际孔径大小均为  $91 \text{ mm}$ 。结构面在图像上对应的正弦曲线中心位置的最大偏移位置记为  $i_{\max}$ 、最小偏移位置记为  $i_{\min}$ 。

### 3 结构面全自动识别方法

由钻孔图像结构面的形态特征可知，结构面在钻孔图像上的表现形式为近似于正弦曲线的带状曲线(见图 1, 2)，故本文以结构面正弦曲线特征为基础，采用模板正弦函数来依次迭代匹配结构面及其附近的特征点，通过统计满足条件的特征点的个数来判断此时正弦函数所对应的正弦曲线是否吻合该结构面。另外，通过聚类的思想寻找新的特征量来描述结构面，用以辅助结构面区域的划分与参数选

取，以及相关信号的预处理和判断，再结合模板正弦函数迭代匹配的思想，从而实现了钻孔图像结构面的自动识别与几何参数的智能提取。该方法的主要实现步骤如图 3 所示。

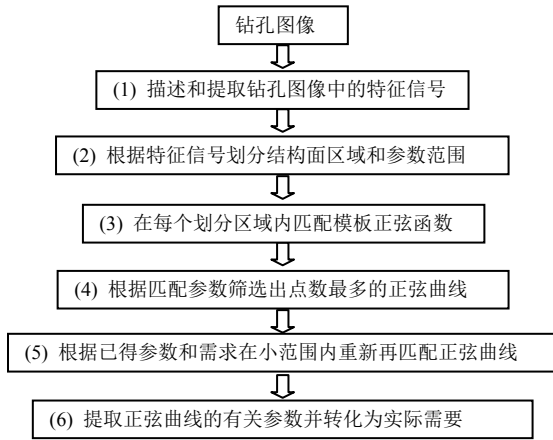


图 3 结构面全自动识别方法的步骤示意图

Fig.3 Steps of the fully automatic identification for the structural planes with the borehole image

### 3.1 描述特征信号

在钻孔图像中，结构面所表现出来的正弦曲线带相对比较明显，其像素点的灰度值像对较低或较高，分布区域也相对集中，并且在水平方向上分布相对连续。如果在垂直深度方向的进行投影，则这些孤立结构面的特征点会汇集集中到一小块区域内，并且相对独立。由于大部分结构面之间是不会重叠的并且他们的间隔相对较大，则这些垂直投影之后的小块区域就很容易地从岩石光斑点噪声中分离出来。

为了更好地凸显这些特征，避免被其他斑点噪声淹没覆盖，使结构面特征信号有效地分离出来，本文首先采用每行像素点灰度值的最小值，最大值来描述结构形态特征。记图像为  $f(x, y)$ ，选择每一行像素点的最小灰度值作为该行的最小特征值，如下式所示：

$$\text{Min}V(i) = \min\{f(i, j)\} \quad (1 \leq j \leq N) \quad (6)$$

选择每一行像素点的最大灰度值作为该行的最大特征值，如下所示：

$$\text{Max}V(i) = \max\{f(i, j)\} \quad (1 \leq j \leq N) \quad (7)$$

式中： $f(i, j)$ 为像素点在 $(i, j)$ 处的灰度值； $\text{Min}V(i)$ 为第 $i$ 行的最小像素值； $\text{Max}V(i)$ 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，在本文中 $N$ 为常数 1 024。

为了进一步描述结构面曲线带的灰度与周边光

斑点灰度的变化情况，本文采用灰度梯度来描述。在三邻域像素点内，在点 $(i, j)$ 处，水平方向( $x$ 轴)的梯度采用以下公式来描述：

$$G_x(i, j) = \frac{\partial f}{\partial x} = \sum_{k=-1}^1 [f(i+k, j+1) - f(i+k, j-1)] \quad (8)$$

式中： $G_x(i, j)$ 为像素点 $(i, j)$ 在 $x$ 方向的梯度值。

垂直方向( $y$ 轴)的梯度采用以下公式来描述：

$$G_y(i, j) = \frac{\partial f}{\partial y} = \sum_{k=-1}^1 [f(i+1, j+k) - f(i-1, j+k)] \quad (9)$$

式中： $G_y(i, j)$ 为像素点 $(i, j)$ 在 $y$ 方向的梯度值。

在大量的计算处理当中，计算机常常采用 $x, y$ 方向梯度的绝对值的和作为梯度的值，即

$$G(i, j) = \nabla f = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \approx |G_x(i, j)| + |G_y(i, j)| \quad (10)$$

式中： $G(i, j)$ 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

$$\text{Max}G(i) = \max\{G(i, j)\} \quad (1 \leq j \leq N) \quad (11)$$

式中： $\text{Max}G(i)$ 为第 $i$ 行的最大梯度值。

在钻孔图像中，每行的最小灰度值和最大灰度值代表了钻孔图像中的 2 个极点区域，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。这些极点一般分布在结构面正弦曲线带中，并且在垂直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  $\text{Max}V(i)$ 与最小值  $\text{Min}V(i)$ 的差值作为该行的基准值，再加上该行的最大梯度值  $\text{Max}G(i)$ 或者其倍数  $\lambda$  作为该行的合成信号特征值  $\text{Com}S(i)$ ，其表达式如下：

$$\text{Com}S(i) = \text{Max}V(i) - \text{Min}V(i) + \lambda \text{Max}G(i) \quad (\lambda \geq 1) \quad (12)$$

式中： $\text{Com}S(i)$ 为第 $i$ 行的特征值， $\lambda$ 在本文中可取 1。在钻孔图像的整个分析区域中，最大值信号  $\text{Max}V(i)$ 、最小值信号  $\text{Min}V(i)$ 和最大梯度值信号  $\text{Max}G(i)$ 组成了合成信号  $\text{Com}S(i)$ ，该信号用来表示钻孔图像结构面沿着深度方向的分布特征。

然而，在实际应用当中，为了滤除个别像素点的干扰，信号  $\text{Max}V(i)$ ， $\text{Min}V(i)$ ， $\text{Max}G(i)$ 和  $\text{Com}S(i)$ 分别各自进行了独立的滤波和去噪处理，图 1(a)中钻孔图像的信号处理结果如图 4 所示。由图 4 可知，

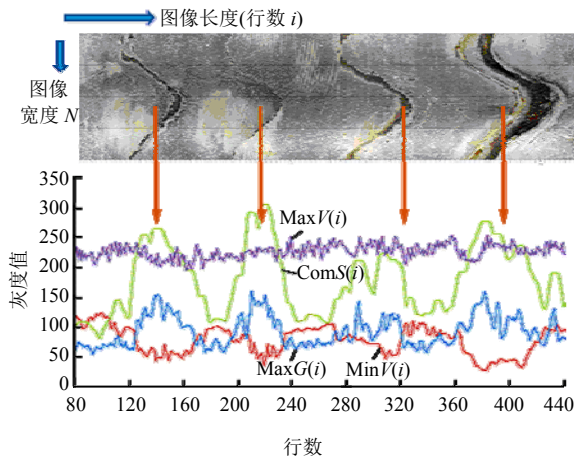


图4 特征信号与钻孔图像中结构面对应关系  
Fig.4 Corresponding relationship between characteristic signals and structural planes in the borehole image

最大梯度值信号  $MaxG(i)$ 可以有效地表达钻孔图像中结构面的分布情况，但合成信号  $ComS(i)$ 更加有效准确地凸显了图像中的结构面分布区域情况。

### 3.2 划分结构面区域

由图4可知，合成信号  $ComS(i)$ 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。为了更好地进行计算机处理和分析，有必要对合成信号进行阈值分割和二值化处理，精确表达结构面位置。在实际钻孔图像中当中，由于钻孔深至几千米，岩石结构复杂并且岩体本身会发生变化从而导致获得的钻孔图像的背景条件会发生变化，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变化。合成信号的整体阈值取整个分析区域的平均值，如下所示：

$$\overline{ComT}_{global} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} ComS(i) \quad (13)$$

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； $\overline{ComT}_{global}$ 为合成信号的整体阈值。

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，本文本次运算可以取 50，如下所示：

$$\overline{ComT}_{local} = \frac{1}{2w} \sum_{k=i-w}^{k+w} ComS(k) \quad (14)$$

式中： $w$ 为该行上下偏移的一个宽度，一般取 20 行即可； $\overline{ComT}_{local}$ 为合成信号的局部阈值。于是合成信号的二值化方法如下所示：

$$ComT(i) = \begin{cases} 1 & (ComS(i) \geq (\overline{ComT}_{global} + \overline{ComT}_{local})/2) \\ 0 & (ComS(i) < (\overline{ComT}_{global} + \overline{ComT}_{local})/2) \end{cases} \quad (15)$$

式中： $ComT(i)$ 信号为分块信号，该信号是合成信号的二值化结果。

根据分块信号  $ComT(i)$ 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  $ComT(i)$ 非 0 时，记为结构面存在的区域。实际当中可能会存在一些狭小的区域，为了避免丢失一些可能存在信息，这些区域可以合并到邻近相对较大的区域当中。于是，钻孔图像区域划分的结果如图5所示，其中红色区域线为分块结果的起始和终止标志线。

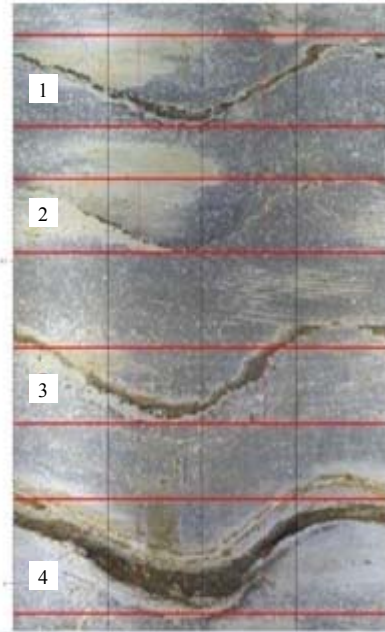


图5 钻孔图像结构面区域划分结果  
Fig.5 Results of region partition of structural planes in the borehole image

### 3.3 匹配模板正弦函数

由上文可知，结构面在钻孔图像中的形态近似于正弦曲线，故本文直接采取正弦函数为结构面的模板曲线函数，并在钻孔图像中依次进行迭代匹配。主要步骤为：

- (1) 对每个区域内的每一行，依次改变结构面的倾向 $\alpha(0^\circ \sim 360^\circ)$ 和倾角 $\beta(0^\circ \sim 90^\circ)$ ，变化步长设为  $StepL_1(StepL_1 \geq 1^\circ)$ ，本文取值  $1^\circ$ ；
- (2) 根据式(3)和(4)转化为对应的相位 $\theta$ 和幅值 $A$ ，即  $A = (\tan \beta)D/(2k)$  代入正弦函数中，依次计算正弦函数所经过的区域的像素点灰度值以及该区域附近的像素点灰度值；
- (3) 统计满足该正弦函数阈值的像素点个数；
- (4) 选取像素点个数最大的正弦曲线作为该行的可能正弦曲线，即在每一行都选择出一个匹配个数最大的正弦曲线。

根据分块信号  $ComT(i)$ ，结构面所在区域的分块宽度  $W$  大小可以限定结构面的最大倾角  $\beta$ ，从而限定了正弦函数的幅值  $A$  变化范围；根据结构面所在的中心位置和特征量极值点的  $y$  坐标所在区域可以初步划分出正弦曲线的谷值的初步位置，从而得出结构面倾向  $\alpha$  的大致范围，也就是得到了模板正弦函数中相位角  $\theta$  的大致范围。于是，模板正弦函数由式(1)变成：

$$y(i) = i - \frac{D}{2k} \tan \beta \sin \left( j \frac{2\pi}{N} + \theta \right)$$

$$\left( j \in [0, N-1], \theta \in (\theta_1, \theta_2), \beta \in \left[ 0, \frac{kW}{D} \right] \right) \quad (16)$$

式中： $\theta$  为正弦函数的相位角， $\beta$  为结构面的倾角。相位  $\theta$  的估算方法为：分块区域内  $ComT(i)$  信号极值点中  $y$  坐标最大的点和最小的点所对应的  $x$  坐标之和的平均值所对应的相位角记为上限值  $\theta_1$ ；它们之间的距离的  $1/2$  与最大值坐标的和所对应的相位角记为下限值  $\theta_2$ ，即

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N} \left| x_1|_{y_{\min}} + x_2|_{y_{\max}} \right| \quad (17)$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi}{N} \left( x_2|_{y_{\max}} + \frac{1}{2} \left| x_1|_{y_{\min}} - x_2|_{y_{\max}} \right| \right) \quad (18)$$

式中： $y_{\min}$ ， $y_{\max}$  分别为极值点  $y$  坐标值最小和最大时对应的  $x$  坐标取值。

在使用模板正弦函数来匹配结构面时，为了判断模板函数所经过区域以及附近的像素点是否属于该结构面，本文采用了一个阈值来划分。该阈值利用本区域像素点灰度值的平均值来表达该区域的特征，用来判断模板正弦函数所经过的像素点是否为结构面上的点，如下所示：

$$T_{\text{gray}}(i) = \frac{1}{mn} \sum_{i=i_0}^{i_0+m} \sum_{j=j_0}^{j_0+n} f(i, j) \quad (19)$$

式中： $m$  为该分块区域的行数， $n$  为该分块区域的列数， $i_0$  为该分块区域的起始行， $j_0$  为该分块区域的起始列， $T_{\text{gray}}(i)$  为判断阈值。

在实际当中，为了充分利用结构面中像素点的灰度特征。该方法给灰度值划分了几个等级，并给予了不同的权值。在统计匹配模板正弦函数像素点个数的時候，不同等级灰度值的像素点数加权的权值也不一样。像素点数的加权值函数如下所示：

$$Q_{\text{point}}(i, j) = \begin{cases} 0 & (f(i, j) > T_{\text{gray}}) \\ 1 & (T_{\text{gray}} \geq f(i, j) > T_{\text{gray}}/2) \\ 2 & (T_{\text{gray}}/2 \geq f(i, j) > T_{\text{gray}}/4) \\ 4 & (f(i, j) \leq T_{\text{gray}}/4) \end{cases} \quad (20)$$

式中： $Q_{\text{point}}(i, j)$  为像素点  $(i, j)$  处的加权值。

在使用模板正弦函数  $y(x)$  进行像素点灰度值匹配时，需要统计满足阈值条件的总加权像素点个数。统计方法如下所示：

$$\text{Temp}N_{\text{point}}(i) = \sum_{j=0}^{N-1} Q_{\text{point}}(i, j) \quad (21)$$

式中： $\text{Temp}N_{\text{point}}(i)$  为图像中第  $i$  行中某个倾向倾角状态下的模板正弦函数匹配到的总加权像素点个数。

由式(21)可以得到每个模板正弦函数在每一行中的总加权像素点个数的匹配情况，选择总加权像素点个数最大的一个模板正弦函数所对应的正弦曲线作为该行的正弦曲线，并记录该正弦曲线所对应结构面的倾向、倾角、位置以及总加权像素点个数等参数。该正弦曲线下的总加权像素点个数随着图像长度(行数  $i$ )的变化关系记为函数  $\text{Max}N(i)$ 。

### 3.4 筛选正弦曲线

函数  $\text{Max}N(i)$  记录了分块区域内每行模板正弦曲线的总加权像素点数(记为匹配点数)的最大值。在分块区域内，每一行基本上都找到了一个匹配个数最多的结构面正弦曲线。在这些正弦曲线中，最符合结构面的正弦曲线就在其中。在复杂的钻孔图像中，结构面的破裂和交差等不确定因素，有可能使一个区域内产生多条裂隙或多个结构面，故匹配点次数大和变化最快的地方也有可能存在结构面。因此，根据正弦曲线倾向倾角或位置的差异而选择  $\text{Max}N(j)$  匹配点数的最大值或极值点所对应的正弦曲线作为结构面的正弦曲线。据此可以筛选出最适合的正弦曲线来代表当前的结构面。比如图 1(a)中的  $\text{Max}N(j)$  信号如图 6 所示，根据  $\text{Max}N(j)$  信号匹配点数可以看出该段图像存在 4 个区域块，每块只有一个极值点。

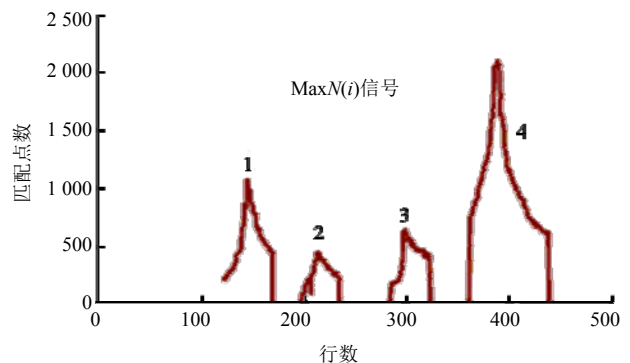


图 6 匹配点数  $\text{Max}N(i)$  的分布情况  
Fig.6 The distribution of function  $\text{Max}N(i)$  signals (matching points)

选出图 6 中极值点所对应的正弦曲线作为该区域的结构面的正弦曲线。该段分析区域的筛选结果表 1 所示。表 1 中编号为 1 的一行是图 5 中分块区域 1 内结构面的筛选结果，以此类推。

表 1 初步识别有关结构面参数  
Table 1 Related parameters of structural planes during the process of initial identification

结构面编号	行位置	倾向/(°)	倾角/(°)	匹配点数
1	145	108	6	1 026
2	213	111	6	437
3	298	119	6	636
4	387	118	8	2 083

### 3.5 再匹配与精确化

在上述过程中，匹配步长  $StepL_1$  越大，迭代匹配计算的次数就越小。为了减少计算量加快节 3.3 的匹配过程(步骤 3)，步长  $StepL_1$  不宜取值过大，故上述得到的结构面参数的精度有限。为了使结构面参数更加精确，有必要在上述已得条件的基础上，进一步缩小范围进行再一次匹配。根据已获得的结构面位置、倾向、倾角，在当前位置、倾向、倾角的基础上分别增减一个常量值作为新的上下限范围，比如假设正弦曲线的坐标像素位置的波动范围为  $(i-a, i+a)$ ，结构面的倾向的波动范围为  $(\alpha-b, \alpha+b)$ ，结构面的倾角的波动范围为  $(\beta-c, \beta+c)$ ，其中  $a, b, c$  为常量，可分别取参数为 10, 3, 2。然后，再以  $StepL_2$  ( $StepL_1 > StepL_2 > 0$ ) 度为步长，依次改变其位置、倾向、倾角。按照以上步骤，再一次迭代匹配正弦曲线，统计加权像素点个数，得到更优的结构面正弦曲线及其位置、倾向和倾角。

再匹配的步长  $StepL_2$  可以以实际精度为基础，比如实际精度要精确到 0.1 度，那么本实例中  $StepL_2$  就以 0.1 度为单位，取  $StepL_2 = 0.1$ ，依次以  $StepL_2$  为步长再次迭代匹配结构面特征点。按照以上步骤(步骤 3, 4)，再一次迭代匹配正弦曲线，统计加权像素点个数，筛选结构面正弦曲线，使得到的结果参数更加精确化，以满足实际要求。

本文对图 5 的上述过程进行了一次再匹配与精确化操作，最后得到的结果面参数如表 2 所示。根据匹配参数最后画出来的结构面正弦曲线如图 7 所示，其中每条红色的正弦曲线与各自的结构面匹配吻合。

### 3.6 参数提取与转化

经过以上过程中，最后得到的像素坐标位置是

表 2 再匹配与筛选结果数据

Table 2 Results of rematching and filtrating

结构面编号	行位置	倾向/(°)	倾角/(°)	匹配点数
1	145	108.7	5.9	1 064
2	213	111.2	6.1	471
3	298	119.4	6.4	673
4	387	117.8	8.6	2 194

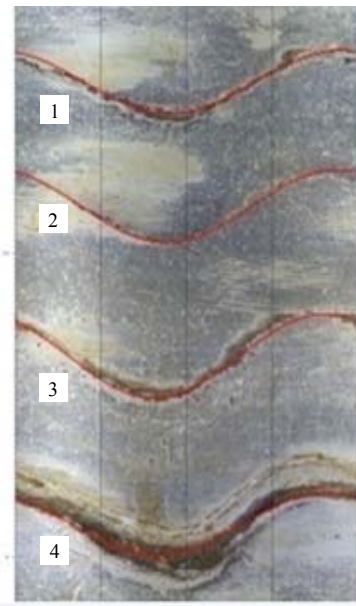


图 7 正弦曲线与结构面的匹配结果

Fig.7 Matching results of sine curves and structural planes

当前分析区域正弦曲线所在位置的行坐标  $i$ 。再根据式(2)转化为结构面实际深度位置  $Pos$ 。同样，最后得到的倾角  $\beta$  即为结构面的倾角  $\beta$ 。该结构面的倾角  $\beta$  与正弦曲线幅值  $A$  的转化关系如式(4)所示。结构面的倾角为正弦曲线的波峰所对应的边长(幅度  $A$ )与半径的夹角，如图 2(b)所示。结构面的倾向  $\alpha$  是以正弦曲线波谷所对应的顺时针方向与正北方向夹角，倾向  $\alpha$  与正弦曲线相位  $\theta$  之间的关系如式(3)所示。在实际过程应用中，结构面的倾向  $\alpha$  可以进一步转化为地质学上便于理解接受的倾向角  $\phi$ ，转换公式如下所示：

$$\phi = \begin{cases} \text{NE: } \alpha & (0^\circ \leq \alpha < 90^\circ) \\ \text{SE: } 180^\circ - \alpha & (90^\circ \leq \alpha < 180^\circ) \\ \text{SW: } \alpha - 180^\circ & (180^\circ \leq \alpha < 270^\circ) \\ \text{NW: } 360^\circ - \alpha & (270^\circ \leq \alpha < 360^\circ) \end{cases} \quad (22)$$

结构面几何参数隙宽  $d$  的计算方法为：在每个区域内，上下移动选择出来的结构面正弦曲线，当

正弦曲线与结构面的上边界交汇时得到正弦曲线的行坐标最小偏移位置记为  $i_{\min}$ ，当正弦曲线与结构面的下边界交汇时得到正弦曲线的行坐标最大偏移位置记为  $i_{\max}$ 。结构面的裂隙宽度与正弦曲线在图像上的波动范围相关。隙宽的计算方法如式(5)所示，并由此可以得到表 2 中编号 1~4 的结构面裂隙宽度分别如表 3 所示。于是最终得到的结构面几何参数信息如位置、倾向、倾角和隙宽等，经式(2)~(5)转化后并把数据同时保存在数据库和有关数据表格中以方便查阅，满足了实际工程的需要。针对本文所述图 1(a)这段图钻孔图像，本文所示方法最后得到的结构面参数如表 3 所示。

表 3 结构面自动识别最终参数

Table 3 Final parameters of automatic identification results for structural planes

结构面编号	深度/m	位置	点数	倾向/(°)	倾角/(°)	隙宽/mm
1	3.218	145	1 064	161.3	47.8	9.2
2	3.423	213	471	157.5	49.3	2.7
3	3.678	298	673	150.2	51.7	12.5
4	3.979	387	2 194	152.6	56.4	23.8

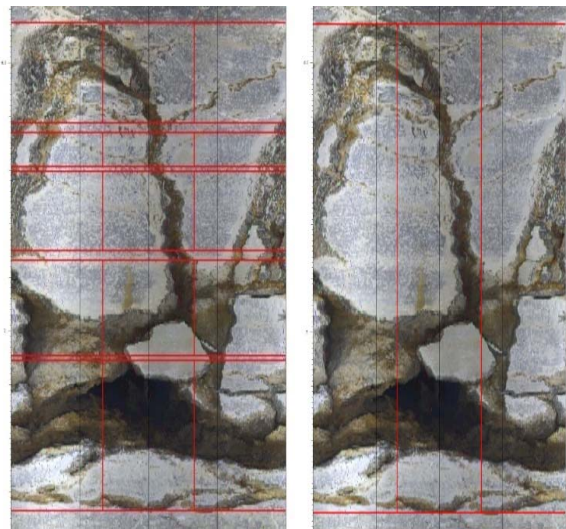
## 4 结果分析与讨论

### 4.1 结构面区域划分信号分析

以往的钻孔图像识别方法一般都是人工选定一个预期可以实现的特定区域进行识别和对比。这样的方法通常难以自适应实际工程项目的需要，需要工作人员先验知识和人为干预。本文所述方法最大的优点之一是通过提取整个钻孔图像的特征信息，进行有效的结构面信息提取，从而实现结构面的区域划分和有关信息的收集处理，进而为下一步的结构面正弦曲线的精确配对做好充分准备。为了有效地凸显出灰度值较低的目标特征区域，该方法从每一行中选出一个灰度值最小的像素点来代表目标特征区域，选出一个灰度值最大的像素点来代表图像的主体部分，选出灰度变化最快的像素点也就是梯度最大的像素点来代表可能的结构面。由于岩石和结构面的复杂多样性，钻孔图像中存在大量的噪声信号。这些噪声在一定程度上也影响了提取出来的特征信号，故适当的信号滤波与平滑处理能够更加正确地抓住钻孔图像中结构面的主要特征，从而实现结构面的高效率划分。

然而，在实测的钻孔图像中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  $ComS(i)$ 和分块信号  $ComT(i)$ 中存在个别孤立的小特征区域，如图 8(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着噪声去掉。本文把这些孤立块划分到距离最近的上一块或下一块当中去，并与之连成一片成为一个整体，从而保证信号的完整性，如图 8(b)所示。



(a) 链接孤立小块之前 (b) 链接孤立小块之后

图 8 分块信号中孤立小块对结构面分块结果的影响  
Fig.8 The effect of small isolated parts among partitioning signals on the region partition results of structural planes

另外，由于实际钻孔工程情况复杂，钻孔摄像系统难免会采集到一些非常不合格的钻孔图像，因此有必要对钻孔图像进行预处理以实现后续的正确处理。比如，钻孔图像出现的从上往下的垂直带状线条，这些垂直线是由于钻孔镜头被碎石泥浆污染而导致的，故在预处理阶段进行有目标地清除或者对某些结构面区域进行适当地增强处理<sup>[20-22]</sup>。在预处理后，为了实现结构面区域的自动划分，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准确识别与参数提取，实践结果较好，满足了实际工程项目的需求。结构面区域的有效划分和特征信息的拾取，极大地提高了匹配效率，减少了盲目无效的匹配时间。



### 4.2 正弦曲线筛选策略

利用模板正弦函数依次匹配结构面特征点时，每个分块区域内的每一行都选择出了一个最大匹配个数的正弦曲线。这些正弦曲线需要进一步筛选，并从中选出一个最优最适合该区域结构面的正弦曲线。然而，现实中的钻孔图像中存在很多紧密跟随的平行结构面或者破碎面，也存在不少互相交叉的结构面。这些紧密联系在一起的结构面，在进行结构面区域划分时，无法将他们一一单独分离，这就造成了划分的个别区域块内存在多个结构面的情况。于是，从一个区域块内单独选出一个匹配个数最大的正弦曲线来代表该区域内的一个结构面，这样就造成了该区域内其他相对不明显的结构面的丢失。

为了解决一个区域内的多个平行或交叉结构面的问题，本文采用该区域内分块信号  $MaxN(i)$  的最大值或极值点所对应的正弦曲线作为结构面的正弦曲线，再结合  $MaxN(i)$  的最大值或极值点所对应正弦曲线的位置、相位和幅值的差异来区分多个结构面。当  $MaxN(i)$  的最大值及其附近几个极大值或次最大值所对应的正弦曲线的相位和幅值相近而位置偏差较大时，说明该区域内存在几个相对平行的结构面；当  $MaxN(i)$  的最大值及其附近几个极大值或次最大值所对应的正弦曲线的位置、相位和幅值相差较大时，说明该区域内存在几个交叉的结构面。同一个分块区域内交叉结构面的处理结果及其对应的  $MaxN(i)$  信号如图 9(a) 所示；同一个分块区域内平行结构面的处理结果及其对应的  $MaxN(i)$  信号如图 9(b) 所示。

与图 9(a) 对应的匹配点数  $MaxN(i)$  信号如图 10 中曲线  $MaxN(i)_a$  所示，分块信号  $ComT(i)$  信号如图 10 中曲线  $ComT(i)_a$  所示。图 10 中显示曲线  $ComT(i)_a$  存在一个分块，该分块下的匹配点数  $MaxN(i)$  信号存在 4 个极值点(曲线  $MaxN(i)_a$ )，该极值点所对应的正弦曲线的有关参数分别如表 4 中序号为 a1~a4 的正弦曲线参数表所示。与图 9(b) 对应的匹配点数  $MaxN(i)$  信号如图 10 中曲线  $MaxN(i)_b$  所示，分块信号  $ComT(i)$  信号如图 10 中曲线  $ComT(i)_b$  所示。图 10 中显示曲线  $ComT(i)_b$  存在一个分块，该分块下的匹配点数  $MaxN(i)$  信号存在 5 个极值点(曲线  $MaxN(i)_b$ )，该极值点所对应的正弦曲线的有关参数分别如表 4 中序号为 b1~b5 的正弦曲线参数表所示。

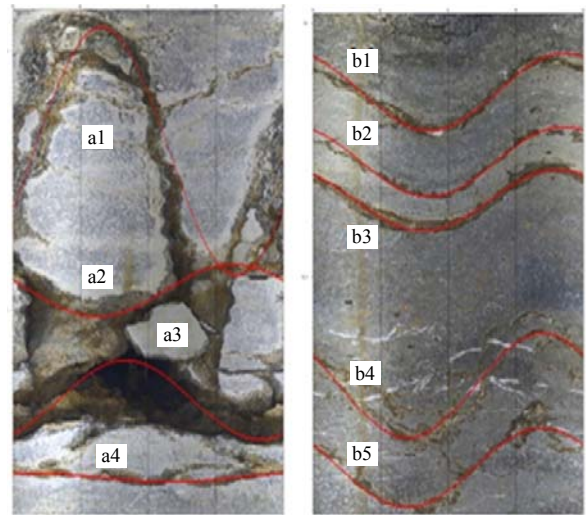


图 9 同一分块区域内多个结构面的自动识别结果

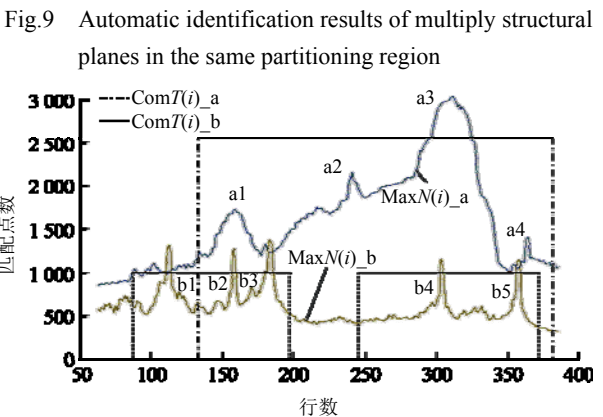


图 10 平行交叉结构面中匹配点数  $MaxN(i)$  与分块信号  $ComT(i)$  的分布情况

Fig.10 Distributions of matching signals  $MaxN(i)$  and partitioning signals  $ComT(i)$  in the crossed and paralleled structural planes

表 4 不同结构面的自动识别结果

Table 4 Automatic identification results for different structural planes

结构面编号	深度/m	匹配点数	倾向/(°)	倾角/(°)	隙宽/mm
a1	-6.695	1 721	332.4	79.2	22.6
a2	-6.955	2 143	157.3	47.5	20.3
a3	-7.164	3 022	300.6	59.6	98.5
a4	-7.320	1 392	62.2	10.3	9.2
b1	-32.141	1 315	115.7	58.4	13.4
b2	-32.276	1 270	116.8	57.2	8.3
b3	-32.351	1 370	124.1	55.8	24.8
b4	-32.715	1 151	114.6	65.6	7.6
b5	-32.876	1 149	145.3	60.7	8.5

由图 10 和表 4 可知，在同一个分块区域内，

$\text{Max}N(i)$ 信号几个极值点所在位置都对应于一个匹配到可能结构面。结合这些极值点所对应的结构面参数,可以有效地从中筛选出最优最可能的结构面。从图 9 中也可以看出,该方法自动识别到的红色曲线正弦曲线与结构面基本吻合,提取出来的几何参数也满足了实际工程的基本需求。

### 4.3 自动识别结果讨论

由上述可知,本文所述方法可以一次性连续自动识别整个钻孔图像中的结构面形态特征,并得到结构面位置、倾向、倾角和隙宽等重要参数。为了进一步说明自动识别结果的精确性,本文采用传统的人工识别方法进行对比分析。人工手动识别方法即为:由人工在图像中给出结构面的 3 个控制点,接着由计算机自动拟合出标准的正弦曲线,再由判定该拟合曲线是否与结构面产状互相符合,若符合后则由计算机计算出结构面的位置、倾向、倾角和隙宽等几何参数。针对同一段钻孔图像中,如图 9 中 2 段图像,手动识别的结果如表 5 所示。

表 5 结构面人工判读结果

Table 5 Manual interpretation results for structural planes

编号	深度/m	倾向/(°)	倾角/(°)	隙宽/mm
a1	-6.664	331.7	79.4	21.4
a2	-6.969	157.5	46.9	18.9
a3	-7.171	301.1	58.7	99.3
a4	-7.320	61.3	10.3	10.9
b1	-32.183	116.5	57.6	14.1
b2	-32.276	117.2	56.9	8.7
b3	-32.344	124.3	55.8	24.5
b4	-32.702	114.5	65.7	9.4
b5	-32.881	144.8	61.1	9.8

为了进一步理解手动识别与本文所述方法的自动识别之间的差别,采用表 5 与 4 的相对偏差来说明自动识别的准确度,如表 6 所示。

由于手动识别的人为因素较大,各种因素把握不定,无法做到统一客观的识别,故只好采取多次重复识别,然后再去平均值。表 5 中手动识别的结果参数均为多次平均之后的大家较为认可的结果,与实际钻探工程情况较为一致,在一定程度上取得了共识,可以认定为标准参数。故表 5 中手动识别结果与本文所述方法的自动识别结果的对比偏差,在一定程度上表现了该方法的识别率和精度。由表 6 中对比分析结果可知:该方法可以识别人工判

表 6 自动识别与人工判读的对比分析

Table 6 Comparative analysis between automatic identification results and manual interpretation results

编号	深度/m	倾向/(°)	倾角/(°)	隙宽/mm
a1	-0.031	-0.7	0.2	-1.2
a2	0.014	0.2	-0.6	-1.4
a3	0.007	0.5	-0.9	0.8
a4	0.000	-0.9	0.4	1.3
b1	-0.042	0.8	-0.8	1.5
b2	-0.008	0.4	-0.3	0.4
b3	0.007	0.2	0.0	-0.3
b4	-0.013	-0.1	0.1	1.8
b5	0.005	-0.5	0.4	1.3

读存在的所有结构面,自动识别结果的识别率可以达到 100%,自动识别结果与真实结构面吻合较好;在获得的结构面参数中,深度绝对偏差小于 0.05 m,倾向绝对偏差小于 1°,倾角绝对偏差小于 1°,隙宽绝对偏差小于 2 mm。由此可以表明,结构面参数的提取结果达到实际探测工程的需求。

另外,由于该方法可以一次性全自动识别整个钻孔图像,并提取了高精度的结构面有关参数数据。该方法无需人工分段分步地手动识别或半自动识别,在工作效率上该方法取得了突破性进展,解决了人工值守与人为干预问题,使得到的结构面参数更加客观真实,为实际工程提高了真实可靠的准确数据。

## 5 结 论

本文提出了针对整个钻孔图像的结构面全自动连续识别与参数提取方法。该方法采用沿着钻孔图像深度方向进行投影分析的方式,实现了整个钻孔图像的结构面区域划分与信息提取;然后,采用模板正弦函数来进行迭代匹配结构面,实现了结构面的自动识别。通过优化区域划分和匹配结果筛选方法,该方法高效有序地实现了结构面的全自动化识别与几何参数的智能提取,自动识别结果与钻孔图像吻合较好,获得的结构面参数精度高。全景钻孔图像中结构面的全自动识别方法突破了以往需要人工干预和技术的技术难题,实现了钻孔图像结构面信息的智能分析处理。该方法结果稳定可靠,识别率高,极大地提高了钻孔图像分析处理的工作效率,为钻孔图像数据的后期处理与应用提供了一种简单易行可靠的有效方法,推动了钻孔摄像技术的

发展。

## 参考文献(References):

- [1] ZOHREH M, JUNIN R, JEFFREYS P. Evaluate the borehole condition to reduce drilling risk and avoid potential well bore damages by using image logs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 122: 318 - 330.
- [2] JOHN H W, CAROLE D J. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 55(1): 151 - 159.
- [3] 王川婴, LAWK T. 钻孔摄像技术的发展与现状[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(19): 42 - 50.(WANG Chuanying, LAWK T. Review of borehole camera technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 42 - 50.(in Chinese))
- [4] 康红普, 司林坡, 苏波. 煤岩体钻孔结构观测方法及应用[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 1 949 - 1 956.(KANG Hongpi, SI Linpo, SU Bo, et al. Borehole observation methods in coal and rock mass and their applications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 1 949 - 1 956.(in Chinese))
- [5] 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. Study of the digital panoramic borehole camera system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 398 - 403.(in Chinese))
- [6] 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.
- [7] LOFI J, PEZARD P, LOGGIA D, et al. Geological discontinuities, main flow path and chemical alteration in a marly hill prone to slope instability: assessment from petrophysical measurements and borehole image analysis[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(14): 2 071 - 2 084.
- [8] 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 and Geosciences*, 2013, 51: 381 - 389.
- [9] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统及应用[J]. *岩石力学*, 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))
- [10] BHASKAR B T, PAUL H, KENZI K. Semi-automatic analysis of rock fracture orientations from borehole wall images[J]. *Geophysics*, 1997, 62(1): 129 - 137.
- [11] ZOU X J, MA Z M, HU W B, et al. B-mode ultrasound imaging measurement and 3D reconstruction of submerged topography in sediment-laden flow[J]. *Measurement*, 2015, 72: 20 - 31.
- [12] 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))
- [13] AL-SIT W, AL-NUAIMY W, MARELLI M, et al. Visual texture for automated characterization of geological features in borehole televiewer imagery[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 119: 139 - 146.
- [14] 吴剑, 冯少孔, 李宏阶. 钻孔成像中结构面自动判读技术研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 951 - 957.(WU Jian, FENG Shaokong, LI Hongjie. Study of automatically extracting structural plane parameters from borehole images[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 951 - 957.(in Chinese))
- [15] 杨举, 晏鄂川, 季惠彬, 等. 基于数字钻孔影像的深部结构面类型识别及发育特征研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(3): 332 - 337.(YANG Ju, YAN Echuan, JI Huibin, et al. Digital drillhole images based identification of discontinuity classification and development in deep rocks[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(3): 332 - 337.(in Chinese))
- [16] OZKAYA S I. KINKFOLD-an autoLISP program for construction of geological cross-sections using borehole image data[J]. *Computers and Geosciences*, 2002, 28(3): 409 - 420.
- [17] 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]. *Journal of China University of Geosciences: Earth Science*, 2014, 39(4): 473 - 480.(in Chinese))
- [18] GLOSSOP K, LISBOA P J G, RUSSELL P C, et al. An implementation of the Hough transformation for the identification and labeling of fixed period sinusoidal curves[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, 74(1): 96 - 100.
- [19] 葛修润, 王川婴. 数字式全景钻孔摄像技术与数字钻孔[J]. *地下空间*, 2001, 21(4): 254 - 261.(GE Xiurun, WANG Chuanying. Digital panoramic borehole camera technique and digital borehole[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 21(4): 254 - 261.(in Chinese))
- [20] ZOU X J, SONG H, WANG C Y, et al. Relationships between B-mode ultrasound imaging signals and suspended sediment concentrations[J]. *Measurement*, 2016, 92: 34 - 41.
- [21] 路志英, 刘海, 贾惠珍, 等. 基于雷达反射率图像特征的冰雹暴雨识别[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 485 - 496.(LU Zhiying, LIU Hai, JIA Huizhen, et al. Recognition of hail and rainstorm based on the radar reflectivity image features[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 485 - 496.(in Chinese))
- [22] ZOU X J, WANG C Y, SONG H, et al. Experimental measurements of sediment incipient velocity by using B-scan ultrasound imaging device in the water channel[J]. *Measurement*, 2017, 98: 228 - 236.