

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.036

基于特征函数的钻孔图像结构面识别方法

王川婴¹, 邹先坚^{1,2}, 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, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对数字全景钻孔摄像系统获取的实测图像, 提出了一种基于特征函数的钻孔图像结构面识别方法。该方法根据井壁结构面在钻孔图像中呈正弦曲线状的特征, 采用正弦函数作为特征函数来匹配识别结构面。通过改变特征函数参数来统计分析结构面及附近像素点灰度梯度的匹配情况, 然后筛选出一条匹配最优的正弦曲线作为该结构面的特征曲线, 从而实现了钻孔图像结构面的识别。该方法省略了传统方法中人工选取结构面特征点和特征点曲线拟合的过程, 其方法稳定可靠、准确率高, 为钻孔图像结构面的自动识别与工程应用提供了一种实际可行的有效途径。

关键词: 钻孔图像; 结构面; 特征函数; 迭代匹配

中图分类号: P 631.8; TB 811+.2; P 583

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 10-3062-05

Recognition of structural planes in borehole image based on characteristic function

WANG Chuan-ying¹, ZOU Xian-jian^{1,2}, HAN Zeng-qiang¹, WANG Jin-chao¹, WANG Yi-teng¹

(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: For the borehole image obtained by digital panoramic borehole camera system, a method for recognizing structural plane is described based on characteristic function. According to the sinusoidal shaped characteristics of borehole side-wall discontinuities in the image, the method adopts standard sine function as characteristic function. The recognition of borehole structural plane is realized by changing the function parameters to match the nearby pixel grey gradient distribution and by choosing the best matching sine curve as the characteristic curve of structure plane. The method ignores the traditional process of manual selecting characteristic points and fitting characteristic curve. It provides a practical and effective way for the automatic recognition of borehole structural planes in engineering application with good stability and high accuracy.

Keywords: borehole image; structural plane; characteristic function; iterative matching

1 引言

钻孔摄像技术已经在岩土工程、地质工程、土木工程、采矿工程、水电工程、石油开发和地质灾害防治工程等诸多方面取得了广泛的应用^[1-2]。基于光学成像技术的数字式全景钻孔摄像系统能够同时观测 360° 的钻井孔壁, 并得到大量的高精度数字钻孔图像^[3]。这些钻孔图像准确记录了钻井孔壁结构面的几何形态特征。这些形态特征的获取常常因为缺乏正确而有效的方法而耗费大量的人力物力^[4-6]。因此, 钻孔图像中结构面形态特征与参数的模式识

别具有重要的现实意义, 也有利于钻孔摄像技术的进一步发展与应用。

目前, 钻孔图像结构面形态特征的识别与几何参数的获取基本停留在人工操作与主观判别的基础上。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, 进而由计算机拟合出标准的正弦曲线, 人为确定拟合曲线与结构面产状特征互相符合后, 再根据拟合参数重新计算出结构面的几何参数^[7]。这种识别往往存在较多的人为干预环节, 不仅仅工作效果低, 而且会因为操作人员的不同而给出相差较大的识别结果, 造成识别结果的多样性,

收稿日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41402278, No. 41372317)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41402278, 41372317).

第一作者简介: 王川婴, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 研究方向为数字钻孔摄像与岩土工程应用。E-mail: chywang@whrsm.ac.cn

可靠性较低。另外，通过采用图像空间变换、图像滤波与增强、图像分割、Hough 变换与参数提取等步骤，可以通过程序算法实现结构面参数的惟一判读^[8-10]。然而，这些方法操作复杂，计算量大，需要输入特定的引导参数和一定程度的人工干预，在实际工程中很难推广。于是，本文提出了一种基于特征函数的钻孔图像结构面识别方法，以解决实际工程中钻孔图像自动识别问题。

2 钻孔图像结构面特征分析

在钻孔图像中，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，主要表现为结构面颜色的深浅、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^[11]。由于结构面与钻孔井壁的交线呈三维椭圆形状，而椭圆交线在平面展开图上是一条正弦曲线^[12-13]。因此，没有任何弯曲的倾斜结构面在展开的钻孔图像中是一条水平方向分布的标准正弦曲线；其他的结构面交线则分布在标准正弦曲线周围，整体上可近似为正弦曲线形状，如图 1 所示。

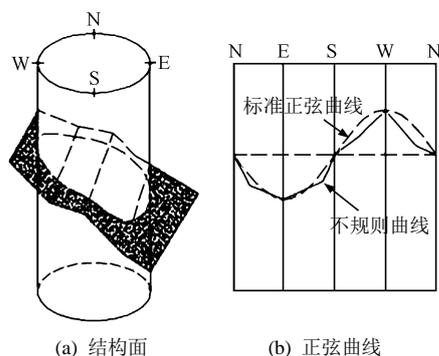


图 1 结构面与正弦曲线的关系
Fig.1 Relationships between structural plane and sine curve

于是，钻孔图像上的结构面形态特征可以用正弦函数 $y(x)$ 来表示，计算式为

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

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 ； w 为正弦函数的角频率，等于 2π 与每行总像素点数 N 的比值； θ 、 A 分别为正弦曲线的相位和幅值。

另外，结构面可以用钻孔的深度 P_{os} 和结构面的倾向 α 、倾角 β 来描述。他们之间的转换关系如下：

$$P_{os} = k(i + l_0) \quad (2)$$

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

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

式中：深度 P_{os} 对应于钻孔图像上扫描线的位置，取为结构面正弦曲线中心点的 x 坐标 i ；倾向 α 、倾角 β 分别对应于正弦曲线的相位 θ 和幅值 A ； l_0 为当前图像从整个钻孔图像中截取出来的初始扫描线位置； k 为钻孔图像深度方向的分辨率，即扫描线的线间距，为钻孔摄像系统采集参数，文中 $k=3.0 \text{ mm}$ ； D 为钻孔直径，本文所得钻孔图像的实际孔径大小均为 91 mm 。

另外，本文所述钻孔图像均指钻孔图像展开后的二维平面图。结构面几何参数与正弦函数的对应关系如图 2 所示。

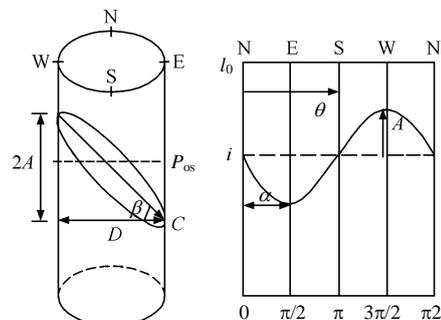


图 2 几何参数与正弦函数的关系
Fig.2 Relationships of geometric parameters between structural plane and sine function

3 结构面模式识别方法

由上可知，钻孔图像结构面可以采用正弦函数来表示。因此，本文采用正弦函数为特征函数，接着用正弦函数来迭代匹配区域内所有结构面，继而实现钻孔图像结构面的识别。该方法主要分为特征函数匹配结构面、筛选结构面特征曲线和特征曲线参数转化 3 个过程，其流程图如图 3 所示。

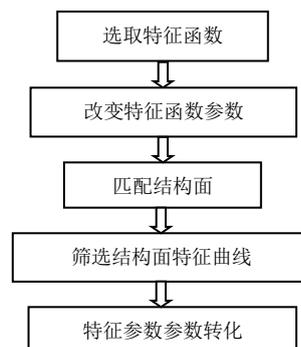


图 3 结构面识别方法流程图
Fig.3 Flow chart of structural plane recognition method

3.1 特征函数匹配结构面

根据式(2)~(4)中结构面位置、倾向、倾角与正弦曲线的位置、相位和幅值之间的关系,式(1)可变换为式(5)。

$$y(j) = i - \frac{D}{2k} \tan \beta \sin \left(j \frac{2\pi}{N} + \theta \right) \quad (5)$$

$$j \in [0, N-1), \theta \in [0, 2\pi), \beta \in [0, \pi/2)$$

式中: β 取值从 0° 到 90° ; w 等于 2π 与每行总像素点数 N 的比值 ($N=1024$); θ 取值从 0° 到 360° 。

在钻孔图像中,通过依次改变正弦函数的相位 θ 和结构面倾角 β 来实现结构面特征曲线的匹配,即:在当前行位置 i 计算正弦函数所经过区域及附近相关区域的像素点灰度值,统计满足一定条件下的匹配像素点个数;然后,选取匹配点数最大的正弦曲线作为该行的可能正弦曲线,也就是在每一行都选择一个匹配点数最大的正弦曲线;最后,在所有行的正弦曲线中重新筛选出一个最优的正弦曲线作为该区域的结构面。

在使用正弦函数来匹配结构面时,为了判断特征函数所经过区域以及附近的像素点是否属于该结构面或满足于设定条件,本文采用了一个阈值来进行判定。该阈值利用邻近区域内像素点的基本灰度值与上下列梯度值的和表达该区域的基本特征,其平均值用来判断正弦函数所经过的像素点是否为结构面上的点。记图像为 $f(x, y)$, $f(i, y(j))$ 表示像素点在 $(i, y(j))$ 处的灰度值。该阈值的计算公式为

$$T_g(i) = \frac{1}{mn} \sum_{i=i_0}^{i_0+m} \sum_{j=j_0}^{j_0+n} [f(i, y(j)) + |f(i+1, y(j)) - f(i-1, y(j))|] \quad (6)$$

式中: m 为该区域的行数; n 为该区域的列数; i_0 为该区域的起始行; j_0 为该区域的起始列; T_g 为判断阈值。

在使用特征函数 $y(j)$ 进行像素点匹配时,需要统计满足阈值条件 T_g 的总像素点匹配点数,每行的匹配点数记为函数 $\max N(i)$ 。为了使统计的匹配点数更加合理真实,本文采用邻域的概念,把匹配点附近 3×3 领域的像素点都进行匹配,只要其中一个像素点满足条件即可计数,并针对不同位置、不同匹配数给予不同匹配权值以实现匹配点数的有效统计,最后根据匹配点数筛选出一个最优最符合实际情况的结构面特征曲线。

3.2 筛选结构面特征曲线

由上可知,在每一个特定区域内,每一行都找

到了一个匹配点数最大正弦曲线。在这些正弦曲线中,最符合该区域结构面的正弦曲线就在这其中。很明显,匹配点数最大的正弦曲线就是最满足结构面特征的正弦曲线。

在复杂的钻孔图像中,结构面的破裂或交叉等不确定因素,有可能使一个区域内产生多条裂隙或多个不确定的结构面,故匹配点次数大或匹配点数变化最快的地方也有可能存在结构面。因此,根据结构面正弦曲线行数 i 、相位 θ 和幅值 A 所对应的结构面位置 P_{os} 、倾向 α 和倾角 β 的差异来筛选结构面正弦曲线,也就是根据匹配点数的记录函数 $\max N(i)$ 的信号值变化规律来筛选对应的正弦曲线。本文采用 $\max N(i)$ 的最大值或其他极值点所对应的正弦曲线作为结构面的特征曲线,从而得到一条或多条最适合的结构面正弦曲线。

以杭州湾 1 号钻孔数据中的一段钻孔图像原图为例,并对钻孔图像中存在的 4 个结构面进行编号为 No.1~No.4,如图 4 所示。

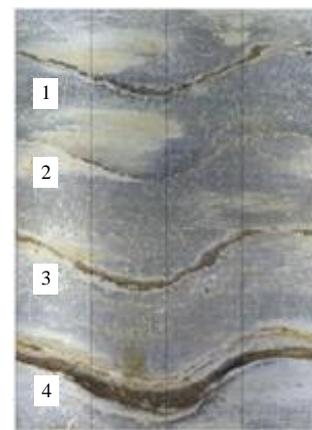


图 4 一段实测钻孔图像
Fig.4 An actual borehole image

采用上述方法,对图 4 的原始钻孔图像进行了特征函数匹配结构面分析,统计分析每一行的匹配点数得到 $\max N(i)$ 函数。该函数记录了匹配点数沿着行坐标的分布情况,如图 5 所示。图 4 中编号为 No.1~No.4 的结构面区域分别与图 5 中编号为 1~4 的区域相对应。

由图 5 可以看出,图 4 所示的一段钻孔图像存在 4 个结构面区域,每个区域的 $\max N(i)$ 信号分布情况与之对应,并且每个区域都存在有一个极值点。故在图 5 中选出 $\max N(i)$ 极大值点所对应的正弦曲线作为该区域的结构面的特征曲线,并把这些极大值点所对应的正弦曲线有关参数列出来即可。图 5 中 $\max N(i)$ 信号的 4 个极值点所对应的特征曲线

(正弦曲线) 有关参数如表 1 所示。

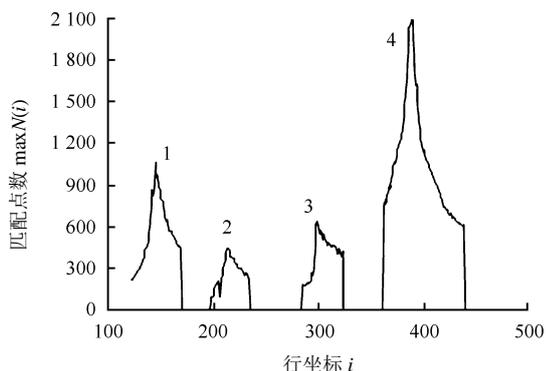


图 5 匹配点数 $\max N(i)$ 信号
Fig.5 Matching signal $\max N(i)$

表 1 筛选出来的特征曲线有关参数
Table 1 Related parameters of characteristic curve selected

编号	匹配点数	行位置 i	相位 $\theta/(^\circ)$	倾角 $\beta/(^\circ)$
1	1 064	145	108.7	47.8
2	471	213	111.2	49.3
3	673	298	119.4	51.7
4	2 194	387	117.8	56.4

3.3 特征曲线参数转化

经过以上过程中，最后得到的行位置是当前分析区域内正弦曲线所在位置的行坐标 i 。根据式 (2) 可以转化为结构面实际深度位置 P_{os} 。结构面的倾向 α 是按照顺时针方向以正弦曲线波谷与正北方向的夹角， α 与正弦曲线相位 θ 之间的关系如图 2 所示，按照式 (3) 转化即可。同样，结构面的倾角 β 是正弦曲线的波峰所对应的边长 (幅度 A) 与钻孔半径的夹角， β 与正弦曲线 A 之间的关系如图 2 所示，他们的转化关系如式 (4) 所示。在正弦函数迭代匹配结构面的过程中，由于正弦函数的 A 每次都是通过改变 β ，并计算出值 A 代入正弦函数中计算的，故 β 不需要再转化，最后得到的 β 即为结构面的 β 。因此，表 1 中的数据经过转化之后最后得到的结构面参数如表 2 所示。

4 结果分析

本文采用上述方法对图 4 的原始钻孔图像进行了以上几个步骤的处理，把最后得到的结果参数 (如表 2 所示) 代入特征函数正弦函数中，在图 4 中重新绘制出得到的结构面特征曲线，结果如图 6 所示。图中红色的正弦曲线为结构面模式识别的结果，也是结构面特征参数重新绘制出来的结果。从图中可以看出，基于特征函数的模式识别方法得到的红色

正弦曲线与结构面吻合较好，提取出来的结构面特征参数 (即表 2 中的深度、倾向和倾角) 是惟一的，精度也较高。

表 2 参数转化后得到的结构面有关参数
Table 2 Related parameters of structural planes after transforming

编号	匹配点数	深度/m	倾向 $\alpha/(^\circ)$	倾角 $\beta/(^\circ)$
1	1 064	-3.218	161.3	47.8
2	471	-3.423	157.5	49.3
3	673	-3.678	150.2	51.7
4	2 194	-3.979	152.6	56.4

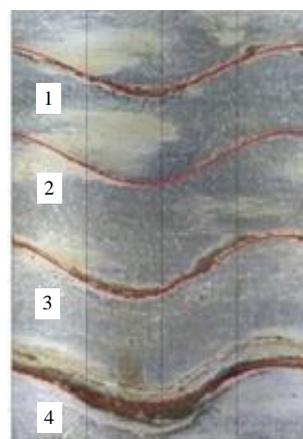


图 6 结构面特征曲线模式识别结果
Fig.6 Recognition result of characteristic curves from structural planes

另外，在钻孔图像中，利用上述步骤可以自动识别特定区域内钻孔图像中结构面的形态特征，并得到结构面位置、倾向和倾角等重要参数。比如针对图 4 的结构面识别结果如图 6 所示，有关参数提取结果如表 2 所示。对比图 6 和表 2 可知，该方法对钻孔图像结构面的识别率高达 100%，提取的结构面特征参数也细致精确，位置误差可准确到毫米级，倾向倾角误差可准确 0.1°。基于特征函数的结构面模式识别方法，通过不断迭代匹配的方式遍历了结构面特征曲线的所有可能方式得到最后匹配最优的正弦曲线，方法稳定可靠，明显优于人工判读，满足了实践工程需要。

其次，在复杂的钻孔图像中，结构面的分布可能更加不规则化和多样化。然而，本文所述方法也能准确识别出绝大多数确定存在的结构面。进一步查看那些无法识别或者识别错误的结构面区域发现，那些区域本身就存在一定的歧义性，人工反复判读校对有时也很难给出一个很好的判读结果。由此可见，本文所述方法对钻孔图像结构面的模式识

别与参数提取是非常可行、可靠的,该方法为钻孔图像的信号获取与工程应用提供了一种方便快捷的实用解决方案。

5 结 语

根据钻孔井壁结构面在钻孔图像呈现的正弦曲线带状特征,本文提出了一种基于特征函数的钻孔图像结构面识别方法。通过分析钻孔图像中结构面及其附近的灰度梯度分布情况得出通过改变特征函数参数用来匹配结构面,并从中筛选最优出匹配的正弦曲线作为结构面特征曲线的方法,从而实现了钻孔图像结构面的模式识别与参数提取。该方法稳定可靠、准确率高,突破了以往钻孔图像结构面识别需要人工干预和判别的技术难题,极大地提高了钻孔图像在工程应用中的可靠性,推动了钻孔图像模式识别与工程应用技术的发展。

参 考 文 献

- [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] WILLIAMS J H, JOHNSON C D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2004, 55(1—2): 151—159.
- [3] 王川婴, LAW K Tim. 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): 3440—3448.
WANG Chuan-ying, LAW K Tim. Review of borehole camera technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3440—3448.
- [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): 1949—1956.
KANG Hong-pu, SI Lin-po, SU Bo. Borehole observation methods in coal and rock mass and their applications[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(12): 1949—1956.
- [5] 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.
- [6] 杨天鸿, 师文豪, 于庆磊, 等. 巷道围岩渗流场和应力场各向异性特征分析及应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1815—1822.
YANG Tian-hong, SHI Wen-hao, YU Qing-lei, et al. The anisotropic properties analysis of the rock mass surrounding the roadway's in seepage and stress field[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(11): 1815—1822.
- [7] 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 Chuan-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. The digital panoramic borehole camera system and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 522—525.
- [8] 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 Shao-kong, LI Hong-jie. Study of automatically extracting structural plane parameters from borehole images[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 951—957.
- [9] AL-SIT W, AL-NUAIMY W, MARELLI M, et al. Visual texture for automated characterisation of geological features in borehole televiewer imagery[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2015, 119: 139—146.
- [10] ASSOUS S, ELKINGTON P, CLARK S, et al. Automated detection of planar geologic features in borehole images[J]. **Geophysics**, 2014, 79(1): 11—19.
- [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 Yang-bing, YAN E-chuan, HU De-xin, 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 Geosciences**, 2014, 39(4): 473—480.
- [12] THAPA B B, HUGHETT P, KARASAKI K. Semi-automatic analysis of rock fracture orientations from borehole wall images[J]. **Geophysics**, 1997, 62(1): 129—137.
- [13] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1326—1330.
WANG Chuan-ying, HU Pei-liang, SUN Wei-chun. Method for evaluating rock mass integrity based on borehole camera technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1326—1330.