doi:10.3799/dqkx.2015.092

# 基于单个钻孔孔壁电视图像确定地下岩体 结构面产状的普适数学方法

黄达1,2,钟助2

重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400045
 重庆大学土木工程学院,重庆 400045

**摘要:** 岩体结构面产状是影响岩体力学性质及工程稳定性的重要地质因素. 从钻孔孔壁电视平展图上可较精确地提取结构面 迹线上不共线三点的相对二维坐标(*d*, *h*),再利用空间解析几何理论确定其三维空间相对坐标(*x*, *y*, *z*),并求得结构面法向 矢量. 根据钻孔孔壁与坡面及结构面产状的空间几何关系,在保持原点不变的情况下,采用空间坐标变换的方法,将三维坐标 系 *z* 轴和 *y* 轴分别转化为竖直方向 *z*<sup>'</sup>和正北地理方向 *y*<sup>'</sup>,并确定转化后坐标系空间的结构面法向矢量. 再从结构面产状的定 义出发,根据结构面法向矢量与结构面倾向、倾角的相关性,建立了一个空间几何模型,通过该模型可求得任意平直坡面上任 一钻孔内局部岩体结构面的产状.

关键词: 岩体结构面;产状;空间解析几何;钻孔电视;数学模型;坐标变换;工程地质. 中图分类号: P624 文章编号: 1000-2383(2015)06-1101-06 收稿日期: 2014-09-28

# A Universal Mathematical Method for Determining Occurrence of Underground Rock Discontinuity Based on TV Picture of Wall of a Single Borehole

Huang  $Da^{1,2}$ , Zhong  $Zhu^2$ 

1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400045, China 2. School of Civil Exclosure Changeirg, University, Changeirg, 400045, China

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Abstract: The rock mass mechanical properties and stability of rock engineering are remarkably affected by the occurrence of rock discontinuities. The relative 2D coordinates (d, h) of three non-collinear points at the discontinuity can be accurately derived from settingout sketch of TV picture of borehole wall. The relative 3D coordinates (x, y, z) of these points and the normal vector of the plane which are determined by them can be obtained using space analytic geometry method. The z-axis and y-axis are rotated toward vertical (z'-axis) and north direction (y'-axis) respectively according to the space geometric relationship of borehole wall and the occurrence of slope and discontinuity without changing the original point and using space coordinate transformation, and the new normal vector of discontinuity in transformed 3D coordinates can also be obtained. Based on the dependency of normal vector, inclination direction and dip angle of discontinuities, a 3D geometrical model can be established, by which the local discontinuity occurrence of any borehole on any flat slope can be determined efficiently.

Key words: rock discontinuity; occurrence; space analytic geometry; borehole TV; mathematical model; coordinate transformation; engineering geology.

岩体由岩块和结构面组成,结构面产状特征明 显影响着裂隙岩体的力学性质及岩体工程的稳定 性. 在进行岩体质量分级、找矿、地质勘察、岩体边坡 变形破坏、岩体地下洞室块体稳定性及岩体渗流特

基金项目:国家自然科学基金面上项目(Nos. 41172243,41472245);重庆市国土房管科技计划项目(No. CQGT-KJ-2014049). 作者简介:黄达(1976-),男,博士生导师,主要从事岩土工程和工程地质方面的教学与科研工作. E-mail: dahuang@cqu. edu. cn

**引用格式:**黄达,钟助,2015.基于单个钻孔孔壁电视图像确定地下岩体结构面产状的普适数学方法.地球科学——中国地质大学学报,40(6): 1101-1106.

性等分析时,岩体结构面的产状是必须考虑的参数 (Hudson and Harrison, 1997;郭强等,2011;狄永 军等,2012;秦亚等,2013).因此,准确确定岩体结构 面的产状是一项极为重要的基础性工程地质工作.

目前确定地下岩体结构面产状的方法仍主要采 用钻孔岩心测定法,包括定向取岩心法和邻近三个不 共线钻孔法(石永泉,2004;冯羽等,2011). 邻近三个 不共线钻孔法一般只能揭示规模比较大的结构面,如 断裂带或长大裂隙的产状(石永泉和代常友,2007), 而单个定向钻孔取心法受地层结构及施工水平的影 响较大,在裂隙较发育地层误差很大.石永泉等 (2000)提出了采用岩心确定结构面产状的打标记法, 利用专门的取心工具,给岩心打标记,从钻孔中取出 具有确定方向的岩心,再结合钻孔弯曲参数综合确定 地下岩体结构面产状.此方法操作简单,但仍需要3 个钻孔的岩心信息,类似于三不共线钻孔法.前人用 古地磁法对岩心进行定向,其原理是测量并分解出岩 石样品中由现代地磁场引起的剩磁分量,依其方向与 现代地磁场一致的原则,恢复岩石样品的空间方位和 产状(Hailwood and Ding, 1995; Rolph et al., 1995). 该方法不需要任何特殊孔内仪器和工艺,只需要从岩 心上取出柱状岩样,利用保存在岩石中的磁场方向进 行测量和计算,确定岩心方位,再结合钻孔弯曲参数 综合确定岩体结构面的产状,此方法只适宜于沉积岩 地层,精度较差.毛吉震(1994)提出了利用超声波井 下电视技术测量深部岩体结构面产状的方法,该方法 能够较准确地测定小规模结构面的产状,但对倾斜钻 孔不适用. 黄达等(2013)提出了采用单个竖直钻孔电 视图像确定深部岩体结构面产状的方法,该方法操作 简便目较准确,但只适应于水平地面上的竖盲钻孔.

钻孔电视技术已广泛应用于水电、矿山及国防等 地下工程或边坡工程的勘察及施工扰动评价等方面. 其主要用途是为了评价岩体结构或开挖扰动岩体的 损伤破裂特征(秦绪英和宋波涛,2002;付建伟等, 2004).它克服了普通钻孔取心将失去岩心原位、原状 及岩样在钻孔中的构造、断裂和产状等信息,以及钻 孔取心不连续,对钻孔内的裂隙、岩脉和溶洞发育等 情况无法形象感知等缺点(王川婴等,2001,2002;查 恩来,2006).本文利用钻孔电视图像深度、钻孔坡面 倾角、钻孔倾角及孔径大小等定量准确的信息,提出 了基于单个钻孔孔壁电视图像信息确定地下岩体结 构面产状的普适数学方法,即此数学模型适宜于任意 钻孔倾角(垂直、倾斜或水平)、不同的坡面工况,且特 别适宜于地下裂隙型结构面产状的确定.

# 1 确定结构面产状的数学方法

#### 1.1 坐标系及结构面三维坐标

假定在产状为  $\gamma \angle \theta$  的某坡面上钻孔,钻孔仅在 竖直平面内偏转(即钻孔的倾伏向与坡面倾向正好 相差 180°),钻孔倾角为  $\phi$ .选取某段含有结构面迹 线的孔壁圆柱筒建立三维直角坐标系如图 1 所示: 坐标原点位于此段圆柱筒上端圆面的圆心 M,以上 端圆面上的水平方向为 y 轴(即该圆面走向,取靠 近地理正 N 方向的一端为 y 轴正方向),圆面内向 下的方向为 x 轴,钻孔延伸方向为 z 轴. A、B、C 为 孔壁结构面轮廓线上任意 3 个不共线的点.

将此段钻孔孔壁电视图像平展,在平展图上建 立其钻孔深度与孔周位置的二维直角坐标系(*d*, *h*),坐标系原点为三维圆筒上端圆面的最低点 O(图 1,图 2),钻孔延伸方向为*h*轴,孔壁环向方向为*d* 轴,如图 2所示.将图 1中结构面上 3个标定点 A、 B、C标注在二维平展图上的对应位置,通过孔壁电 视图像的深度读数及孔径大小可确定这 3点的平面 坐标(图 2):A(A<sub>2</sub>,A<sub>1</sub>)、B(B<sub>2</sub>,B<sub>1</sub>)、C(C<sub>2</sub>,C<sub>1</sub>).其 中:A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>分别为A、B、C 三点的相对深度,A<sub>2</sub>、 B<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>分别为其在孔壁周边上的相应位置.

根据平展图像的二维坐标与三维坐标的关系, 可求得如图1所示三维坐标系下A、B、C3点的空间相对坐标:

 $\begin{cases} A(x,y,z) = A(R\sin(A_2/R), R\cos(A_2/R), -A_1), \\ B(x,y,z) = B(R\sin(B_2/R), R\cos(B_2/R), -B_1), \\ B(x,y,z) = C(R\sin(C_2/R), R\cos(C_2/R), -C_1), \end{cases}$ (1)



图 1 含结构面孔壁及三维直角坐标系 Fig. 1 Borehole wall including discontinuity and its 3D rectangular coordinates





Fig. 2 Setting-out TV image of borehole wall and its twodimensional rectangular coordinates

公式(1)中R为钻孔孔径.将其三维坐标记为:

 $\begin{cases} A(a_1, a_2, a_3) \\ B(b_1, b_2, b_3) \\ C(c_1, c_2, c_3) \end{cases}$ (2)

### 1.2 确定结构面法向矢量

由公式(2)求得向量AB、AC的坐标为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{B}(b_{1}-a_{1},b_{2}-a_{2},b_{3}-a_{3}) \\ \mathbf{A}\mathbf{C}(c_{1}-a_{1},c_{2}-a_{2},c_{3}-a_{3}) \end{cases}$$
(3)

根据空间向量几何理论,结构面在三维坐标系 Mxyz下的法向量 $\vec{n}(n_1, n_2, n_3)$ (图1)为向量 $\vec{AB} \times \vec{AC}$ ,可确定法向量各分量为:

$$\begin{cases} n_1 = (b_2 - a_2)(c_3 - a_3) - (b_3 - a_3)(c_2 - a_2), \\ n_2 = (b_3 - a_3)(c_1 - a_1) - (b_1 - a_1)(c_3 - a_3), \\ n_3 = (b_1 - a_1)(c_2 - a_2) - (b_2 - a_2)(c_1 - a_1). \end{cases}$$
(4)

倾向是结构面上与走向线垂直并沿斜面向下的 倾斜线在水平面上的投影方向,且为相对于正北方向 顺时针旋转的方位角.故利用坐标变换方法将在 Mxyz坐标系下的 $\hat{n}(n_1,n_2,n_3)$ 转化为以正北地理方 向为y'方向,竖直方向为z'方向且原点不变的坐标系 Mx'y'z'下的坐标.孔口坡面的产状为 $\gamma \angle \theta$ ,由于钻孔 方向仅在竖直平面内偏转,故任意一段含结构面的钻 孔孔壁圆筒(图 1)上端圆面的走向与孔口坡面的走 向相同,均为 $\gamma \pm \pi/2$ ,由于选取的y轴靠近正 N 方 向,故取较小角度 $\gamma - \pi/2$ 为y轴方位,如图 3 所示.

为了方便地求得结构面产状,需要将坐标系变换至 z 轴为竖直方向 z', y 轴正方向指向正北方向 y'的新坐标系 Mx'y'z'.保持原点 M 不变,由坐标系 Mxyz 转换成坐标系 Mx'y'z'可通过两次坐标旋转 完成(图 4):首先固定 y 轴,将 xMz 平面绕 y 轴旋转到 z 轴成竖直方向, x 轴成水平方向;然后固定 z 轴,将 xMy平面绕 z 轴旋转到 y 轴指向正北方向.





Fig. 3 Relationship of borehole wall including discontinuity and drilling slope



图 4 坐标变换过程示意 Fig. 4 Sketch of coordinates transformation

### 根据笛卡尔坐标系下的坐标变换理论:

$$\begin{bmatrix} x'\\ y'\\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{xx'} & \lambda_{yx'} & \lambda_{zx'} \\ \lambda_{xy'} & \lambda_{yy'} & \lambda_{zy'} \\ \lambda_{xz'} & \lambda_{yz'} & \lambda_{zz'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{yz} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

记坐标变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{xx'} & \lambda_{yx'} & \lambda_{zx'} \\ \lambda_{xy'} & \lambda_{yy'} & \lambda_{zy'} \\ \lambda_{xz'} & \lambda_{yz'} & \lambda_{zz'} \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

式中:x'、y'、z'分别表示坐标系 Mx'y'z'下的横、纵、竖向坐标; $\lambda_{xx'}$ 表示 x 与 x'夹角的余弦值,其余类推.

坐标变换矩阵的各参数表达式为:

$$\begin{cases} \lambda_{xx'} = \cos(x, x') = \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \operatorname{sinysin\phi}, \\ \lambda_{yx'} = \cos(y, x') = \cos\left[-\frac{\pi}{2} - \left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)\right] = -\cos\gamma, \\ \lambda_{zx'} = \cos(z, x') = \cos\phi\cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) = \cos\phi\sin\gamma, \\ \lambda_{xy'} = \cos(x, y') = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)\cos\left[-\frac{\pi}{2} + \left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)\right] = \sin\phi\cos\gamma, \\ \lambda_{yy'} = \cos(y, y') = \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) = \sin\gamma, \\ \lambda_{yy'} = \cos(z, y') = \cos\phi\cos\left[-\frac{\pi}{2} + \left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)\right] = \cos\phi\cos\gamma, \\ \lambda_{zz'} = \cos(x, z') = \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} - \phi\right) = -\cos\phi, \\ \lambda_{yz'} = \cos(y, z') = 0, \\ \lambda_{zz'} = \cos(z, z') = \cos\left(-\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \sin\phi. \end{cases}$$

故  $M_{xyz}$  坐标系下结构面法向量  $\vec{n}(n_1, n_2, n_3)$ 变 换为  $M_{x'y'z'}$ 坐标系下的法向量  $\vec{n}'(n_1', n_2', n_3')$ 为:

$$\begin{cases} n_1' \\ n_2' \\ n_3' \end{cases} = [\lambda] \begin{cases} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} \lambda_{xx'} & \lambda_{yx'} & \lambda_{zx'} \\ \lambda_{xy'} & \lambda_{yy'} & \lambda_{zy'} \\ \lambda_{xz'} & \lambda_{yz'} & \lambda_{zz'} \end{bmatrix} \begin{cases} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{cases}.$$
(8)

#### 1.3 确定结构面产状

由结构面产状的定义可知,产状可由其法向矢 量确定.结构面倾角即为该结构面与水平面所成的 二面角 α(取锐角)为:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{(0,0,1)(n_1', n_2', n_3')}{|0,0,1||n_1', n_2', n_3'|}.$$
 (9)

结构面倾向即为法向量  $\vec{n}'(n_1', n_2', n_3')$ 在  $x'My'平面的投影向量<math>\vec{n}_{x'y'}(n_1', n_2', 0)$ 与y'轴正方 向(正北方向)的夹角 $\beta$ (图 5),由于倾向的唯一性, 当 $n_3'$ 为负值时,法向量方向为垂直于结构面向里, 则取垂直于结构面向外的法向量 $\vec{n}'(n_1', n_2', n_3')$ . 结构面的倾向可表示为:

$$\beta = \begin{cases} \frac{\pi}{2}(m-1) + \arctan\left|\frac{n_{1}'}{n_{2}'}\right| \\ (\stackrel{}{}_{2} \stackrel{}{=} \left\{ \begin{array}{l} (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2}(m-1) + \arctan\left|\frac{n_{2}'}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2}(m-1) + \arctan\left|\frac{n_{2}'}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}'}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}'}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{n_{2}}{n_{1}'}\right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right| \\ (\stackrel{}{=} \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{arctan}\left|\frac{\pi}{2} \right|$$

式中:m 表示向量 $(n_1', n_2')$ 所在的象限数 1、2、3、4 (图 5),如若 $(n_1', n_2')$ 在第 1 象限,m=1.

1.4 特殊工况处理

(1)在水平面上垂直或倾斜钻孔,由于孔口处坡



#### 图 5 结构面法向量在水平面投影示意

Fig. 5 Projection of normal vector of discontinuity in the horizontal plane

面为水平面,故其倾角 $\theta=0^{\circ}$ ,此时可将y轴正方向 定为地理正北方位,即y轴的地理方位角为 $0^{\circ}$ ,即  $\gamma-\pi/2=0^{\circ}$ ,故此时坡面倾向为 $\gamma\pi/2$ ,将 $\gamma$ 和 $\phi$ 值 代入公式(7)求出[ $\lambda$ ].

(2)若在竖直边墙上水平或倾斜钻孔,则竖直面的倾向可为2个方向(即垂直竖直面向外和向里). 此时,为了保持竖直边墙倾向取法与倾斜坡面倾向 取法相同,取向外的方向为倾向.

# 2 实例应用

由上述推导可知,最后求出的结构面产状只与 钻孔倾角、孔径、开孔面产状及电视图上结构面迹线 上任意3个不共线点的二维相对坐标有关,故水平、 竖直和倾斜钻孔的结构面产状计算方法均相同.下 面以西南某水电站倾斜坡面上倾斜钻孔和地下厂房 竖直边墙的倾斜钻孔为例来阐述其具体的计 算过程.

#### 2.1 倾斜坡面上的倾斜钻孔电视图像

某钻孔在竖直平面内倾斜,倾角  $\phi = 15^{\circ}$ ,钻孔 深度 12 m,孔径为 130 mm,钻孔口斜坡产状为 241° $\angle$ 35°.含有结构面的钻孔电视图像平展图如图 6 所示,读取图像中结构面不共线的三点的二维坐 标为(单位:m):A(0,0.229),B(0.244,0.406), C(0.362,0.271).将以上数据代入公式(1),得A、 B、C 三点的空间直角坐标:A(x, y, z) = A(0,0.0650, - 0.229 0),B(x, y, z) = B(-0.0374,-0.0532,-0.4060),C(x,y,z) = C(-0.0426,0.0491,-0.2710).将以上数据代入 公式(4),得结构面法向矢量  $\hat{n}$ (2.150×10<sup>-3</sup>, 5.969×10<sup>-3</sup>,-4.441×10<sup>-3</sup>).钻孔倾角  $\phi = 15^{\circ}$ , 钻孔孔口所在坡面的倾向  $\gamma = 241^{\circ}$ ,将其代入公式 (7)得坐标转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.226 & 0.485 & -0.845 \\ -0.125 & -0.875 & -0.468 \\ -0.966 & 0 & 0.259 \end{bmatrix}.$$
 (11)

将  $\vec{n}$  和[ $\lambda$ ]代人公式(8),得坐标变换后结构面 法向矢量  $\vec{n}'$ (6.076×10<sup>-3</sup>, -3.413×10<sup>-3</sup>, -3.227×10<sup>-3</sup>),将其代人公式(9),得到结构面的 倾角  $\alpha$  为 65.2°. $\vec{n}'$ 在 x'My'平面上的投影向量为  $\vec{n}_{x'y'}$ (-6.076×10<sup>-3</sup>,3.413×10<sup>-3</sup>,0),该向量位于第4象 限,m=4,代人公式(10),得结构面倾向为 299.3°.故 如图 6 所示结构面的产状为 299.3°\_65.2°.

图 6 斜坡上倾斜钻孔电视孔壁平展图





图 7 竖直边墙上倾斜钻孔电视孔壁平展图

Fig. 7 Setting-out TV image of inclined borehole wall of vertical slope

### 2.2 竖直边墙倾斜钻孔电视图像

在某竖直边墙上倾斜钻孔,竖直边墙的产状为 125.6° / 90° (垂直竖直面向外)或 305.6° / 90° (垂 直竖直面向里),钻孔倾角 a=15°,钻孔深度为 12 m,孔径为130 mm,含有结构面的钻孔电视图像 平展图如图 7 所示,读取图像中结构面不共线的三 点的二维坐标为(单位:m):A(0,0.345),B(0.284, 0.206),C(0.348,0.325).将以上数据代入公式 (1),得A、B、C三点的空间直角坐标:A(x, y, z) =A(0, 0, 065 0, -0.345 0), B(x, y, z) =B(-0.0605, -0.0237, -0.2060), C(x, y, z) =C(-0.0521,0.0389,-0.3250). 将以上数据代入 公式(4),得结构面法向矢量: $\vec{n}$ (1.854×10<sup>-3</sup>, -6.030×10<sup>-3</sup>,-3.040×10<sup>-3</sup>). 钻孔倾角为  $\phi$ = 15°,竖直面的倾向可为2个方向(即垂直竖直面向 外或向里),为了保持其与倾斜坡面的倾向取法一 致,选取向外的方向为倾向,即 $\gamma = 125.6^{\circ}$ ,将以上 数据代入公式(7)得坐标转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.210 & 0.582 & -0.785 \\ -0.151 & 0.813 & -0.562 \\ -0.966 & 0 & 0.259 \end{bmatrix}.$$
 (12)

将  $\hat{n}$  和[ $\lambda$ ]代人公式(8),得坐标变换后结构面 法向矢量  $\hat{n}'$ (5.506×10<sup>-3</sup>,3.474×10<sup>-3</sup>,2.578× 10<sup>-3</sup>),将其代入式(9),得到结构面的倾角  $\alpha$  为 68. 4°.  $\vec{n}'$ 在 x' My'平面上的投影向量为  $\vec{n}_{x'y'}$ (5. 506×10<sup>-3</sup>, 3. 474×10<sup>-3</sup>, 0),该向量位于第1象 限,m=1,代入公式(10),得结构面倾向为 57. 8°.故 如图 7 所示结构面的产状为 57. 8°之68. 4°.

## 3 结论

(1)本文提出了一种利用单个钻孔孔壁电视图 像确定岩体结构面产状的数学方法,适应于任一开 孔坡面上的竖直、水平、倾斜钻孔,不受钻孔及坡面 倾角的限制,具有普适性.该方法通过孔壁电视图像 上结构面的不共线三点的二维坐标,采用空间坐标 变换求出其三维坐标的空间法向量,根据公式(9)和 公式(10)可分别准确地确定结构面的倾角和倾向.

(2)由该方法的推导可知,只要钻孔方向不在水 平方向偏转,已知钻孔倾角、孔径、坡面产状及电视 图像结构面上任意3个不共线点的二维相对坐标, 就可以确定该结构面的产状.故可很好地编写成程 序,通过简单地输入上述参数,就可得到结构面的产 状,具有较强的适用性和推广性.

#### References

- Di, Y. J., Zhang, D., Wu, G. G., et al., 2012. Strata Hosted Makeng Type Iron Deposits and Prospecting Orientation in the Wuyishan Covered Region. *Earth Science*— *Journal of China University of Geosciences*, 37(6): 1232-1242 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y., Ma, F. S., Gong, C. C., et al., 2011. Data Analysis Method for Optimized and Dominant Orientations of Joints in Rock Mass. *Journal of Engineering Geology*, 19(6):887-892 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J, W., Xiao, L. Z., Zhang, Y. Z., 2004. Status and Developing Trend of Acoustical and Electrical Well Logging Tools. *Progress in Geophysics*, 19(4): 730-738 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Q., Ge, X. R., Che, A. L., 2011. Analysis on Discontinuities Connection Basing on Borehole Photography Method. Journal of Shanghai Jiaotong University, 45(5):733-737 (in Chinese with English abstract).
- Hailwood, E. A., Ding, F., 1995. Palaeomagnetic Reorientation of Cores and the Magnetic Fabric of Hydrocarbon Reservoir Sands. *Geological Society*, London, Special Publications, 98(1): 245-258. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1995.098.01.15
- Huang, D., Zhang, Y. X., Jin, H. H., et al., 2013. A Method for Determining the Occurrence of Deep Rock Mass

第40卷

Discontinuity Based on TV Picture of Wall of a Single Vertical Borehole (Patent). China, ZL201110216593. 1 (in Chinese).

- Hudson, J. A., Harrison, J. P., 1997. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. Pergamon Press, New York.
- Mao, J. Z., 1994. Ultrasonic Imaging Borehole TV and Its Application to Rock Engineering, *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 13(3):247–260 (in Chinese with English abstract).
- Qin, X. Y., Song, B. T., 2002. Present Situation and Prospect of Logging Technology. *Progress in Exploration Geophysics*, 25(1):26-34 (in Chinese).
- Qin, Y., Liang, Y. H., Hu, Z. C., et al., 2013. Confirmation of Aluminous A-Type Granite Emplacement and Its Tectonic Significance during Early Cretaceous in the Laoling Area, South of Jilin Province. *Earth Science*— *Journal of China University of Geosciences*, 38(4): 677-688 (in Chinese with English abstract).
- Rolph, T. C., Shaw, J., Harper, T. R., et al., 1995. Viscous Remanent Magnetization: A Tool for Orientation of Drill Cores. *Geological Society*, *London*, *Special Publications*, 98(1):239-243. doi:10.1144/GSL. SP. 1995. 098.01.14
- Shi, Y. Q., 2004. The Technology Problem of Core Orientation. *Geology and Prospecting*, 40(6):92-94 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. Q., Dai, C. Y., 2007. Directly Determining the Occurrence of Rock Mass Structural Plane Using Drilling Method. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 18(1):120-123 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. Q., Wu, G. L., Xu, J. H., et al., 2000. Type SDQ-91 Core Orientation Survey Instrument with Drilling. *Journal of Chengdu University of Technology*, 27(4): 398-401 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Ge, X. R., Bai, S. W., 2001. The Digital Panoramic Borehole Camera System and Its Application. *Rock and Soil Mechanics*, 22(4):522-525 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Ge, X. R., Bai, S. W., 2002. Study of the Digital Panoramic Borehole Camera System. *Chinese Journal*

of Rock Mechanics and Engineering, 21(3): 398-403 (in Chinese with English abstract).

Zha, E. L. ,2006. Research on Application of Television Imaging Log Technique in the Engineering Test Borehole (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 狄永军,张达,吴淦国,等,2012.武夷山覆盖区马坑式铁矿层 位及找矿方向.地球科学——中国地质大学学报,37 (6):1232-1242.
- 冯羽,马凤山,巩城城,等,2011.节理岩体结构面优势产状确 定方法研究.工程地质学报,19(6):887-892.
- 付建伟,肖立志,张元中,2004. 井下声电成像测井仪的现状 与发展趋势. 地球物理学进展,19(4):730-738.
- 郭强,葛修润,车爱兰,2011. 基于钻孔摄影方法的岩体中结构面连通性分析. 上海交通大学学报,45(5): 733-737.
- 黄达,张永兴,金华辉,等,2013.一种利用单个竖直钻孔电视 图像确定深部岩体结构面产状的方法(发明专利).中 国,ZL201110216593.1.
- 毛吉震,1994. 超声波成像钻孔电视及其在岩石工程中的应 用. 岩石力学与工程学报,13 (3): 247-260.
- 秦绪英,宋波涛,2002.测井技术现状与展望.勘探地球物理 进展,25(1):26-34.
- 秦亚,梁一鸿,胡兆初,等,2013. 吉南老岭地区早白垩世铝质 A型花岗岩的厘定及其构造意义. 地球科学——中国 地质大学学报,38(4):677-688.
- 石永泉,2004. 岩芯定向技术问题. 地质与勘探,40(6): 92-94.
- 石永泉,代常友,2007.钻探方法确定岩体结构面产状.中国 地质灾害与防治学报,18(1):120-123.
- 石永泉,吴光琳,胥建华,等,2000. SDQ-91 型随钻岩芯定向 测量仪的研制.成都理工学院学报,27(4):398-401.
- 王川婴,葛修润,白世伟,2001.数字式全景钻孔摄像系统及 应用.岩土力学,22(4):522-525.
- 王川婴,葛修润,白世伟,2002.数字式全景钻孔摄像系统研 究.岩石力学与工程学报,21(3):398-403.
- 查恩来,2006.钻孔电视成像技术在工程探测中的应用研究 (博士学位论文).长春:吉林大学.