

# 基于双锥面镜成像的钻孔摄像系统研究

王川婴, 邹先坚, 韩增强

(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)

**摘要:** 为了突破以往钻孔成像技术的基本假设(钻孔孔壁是圆柱面)和平面成像问题, 从而实现钻孔内岩体结构的真三维成像, 自主研发了一套基于双锥面镜成像的钻孔摄像系统。该系统主要由组合式双锥面镜、罗盘、光源、遮光罩、摄像装置和透明玻璃等部件组成, 并给出了孔内双锥面镜立体像对成像的方法和全景像对图像的解算公式。通过系统测试与结果分析可知, 该系统可以从2个不同角度对同一孔壁结构特性进行像对成像, 并得到钻孔孔径的形态变化特征和孔壁细节的差异特征, 实现了孔内360°岩体结构的全景立体像对成像和精细化探测。该系统设计巧妙、结构简单、易于实施, 提高了对孔壁岩体细微结构的识别能力和探测的精度, 有效推动了钻孔摄像技术的发展。

**关键词:** 岩土工程; 钻孔摄像技术; 岩体结构; 双锥面镜; 立体像对成像

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2017)09-2185-09

## Study of borehole camera system based on biconical mirror imaging technology

WANG Chuanying, ZOU Xianjian, HAN Zengqiang

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

**Abstract:** In order to overcome the problems in the existing borehole imaging technology based on the assumptions of cylindrical wall surface of borehole and planar imaging, a borehole camera system based on the biconical mirror imaging technology is developed to realize the true three-dimensional imaging of rock structures around borehole. This system is mainly composed of a biconical mirror, a compass, a light source, a hood, a camera and transparent glasses. This paper gives a stereopair imaging method of double-cone mirror for the imaging of borehole wall and the solution formulas to match the panorama stereopair image. The results of system testing and analysis show that this system can obtain the morphological characteristics of borehole and the feature difference of hole-wall details from the imaging of the same borehole structures in two different directions. This system realizes the panoramic stereopair imaging and precise detection of rock features inside borehole with the vision angle up to 360°. The system is simple in structure and easy to implement.

**Key words:** geotechnical engineering; borehole camera technology; rock mass structure; double-cone mirror; stereopair imaging

## 1 引言

由于岩体遭受各种地质构造运动作用, 使得岩

体中广泛存在规模不等、产状不同、性质各异的各种结构面。国际岩石力学学会将岩体中的断层、软弱面、大多数节理、软弱节理和软弱带等各种力学成因的破裂面和破裂带定义为结构面。这些结构面

**收稿日期:** 2017-01-17; **修回日期:** 2017-03-21

**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:** 王川婴(1962-), 男, 1999年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获得博士学位, 现任研究员, 主要从事钻孔摄像技术、数字钻孔及工程应用方面的研究工作。E-mail: chywang@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0059

的空间分布与产状构成了岩体的结构,其结构特征是决定岩土工程稳定性的重要因素<sup>[1-5]</sup>。长期以来,除了通过天然露头或人工开挖获得地表结构面几何特征外,对深部岩体结构面的探测仍广泛采用钻孔岩芯测定方法<sup>[6-10]</sup>。虽然这种方法简单、方便、实用,但是对于软弱或破碎岩体,或当钻孔取芯率较低时,准确、完整地获取岩体内结构面的几何特征是比较困难的,且进行系统地描述和分析几乎也是不可能的<sup>[11]</sup>。众所周知,钻孔孔壁保持着岩体内结构面几何特征的原始状态。随着科学技术的发展以及钻孔成像技术的应用,针对钻孔孔壁的探测技术和分析方法得到了长足的进步,使得解决这一问题逐渐成为可能<sup>[12]</sup>。

钻孔成像技术依靠光学原理,使人能直接观测到钻孔的内部结构形态,是一种新型实用的孔内探测技术。到目前为止,其发展经历了4个阶段:钻孔照相、钻孔摄像、数字全景钻孔照相以及数字全景钻孔摄像。前2个阶段的技术特点是模拟方式下的定性观察、描述和评价,具有粗糙的估算能力,在一定程度上解决了孔内探测的难题,为钻孔成像技术的发展奠定了基础。而后2个阶段则是数字方式下的精确量测、定量评价和完整分析,是科学技术发展的必然产物,体现在全景技术、定位方法和数字技术的综合系统集成,克服了模拟方式下钻孔成像技术的不足,推动了孔内探测技术向可视化、数字化领域的快速发展<sup>[13-17]</sup>。

通常模拟方式下钻孔成像技术采用平面反射镜,并以钻孔中心轴线成 $45^\circ$ 布置,成像部件沿钻孔中心轴线对准平面反射镜,这时钻孔孔壁的局部经平面反射镜进入成像部件,由此获得的只是局部孔壁图像。为了得到其他部位的孔壁图像,则须调整平面反射镜的方向,使其对准相关部位。这在数字方式下的钻孔成像技术在反射成像方面取得了突破。将平面反射镜发展成为锥面反射镜,并将其布置于钻孔中心,使其轴线与钻孔中心轴线共线,成像部件沿钻孔中心轴线对准锥面反射镜,这时 $360^\circ$ 钻孔孔壁经锥面反射镜进入成像部件。由此获得了包含 $360^\circ$ 钻孔孔壁的平面图像,即全景图像。若钻孔是标准圆柱形,且孔径已知,在由定位方法获得全景图像的方向和位置后,即可建立钻孔孔壁的空间坐标系统,为数字化处理奠定了基础<sup>[18-23]</sup>。但是,不论是模拟方式还是数字方式下的钻孔成像技术,也仍然存在一些问题:(1)孔径形态基本假设的局限性,即通常钻孔孔壁被认为是圆柱面,其孔径和

横截面形状在成孔后不变,但实际钻进后的钻孔孔壁并不能保持这种不变性,特别是在较破碎区域孔壁表面凹凸不平,这对孔壁成像质量、测量精度的准确分析带来不利的影 响;(2)准三维成像的单一性,即光学变换器件将 $360^\circ$ 孔壁成像得到的孔壁图像仍为二维平面图像,其对孔壁的观察方向始终不变,在实际钻孔中孔壁表面的起伏会遮挡这种单一方向的成像,观察效果必然受到影响<sup>[24-26]</sup>。因此,如何突破以往钻孔成像技术的基本假设和平面成像问题,实现钻孔内的真三维成像,是钻孔成像技术跨入新一代的关键,也是孔内探测技术朝着精细化发展的重要方向。

鉴于现有钻孔成像技术存在的问题,本文提出采用双锥面镜成像技术的孔内全景立体像对成像方法。通过对成像原理的分析,建立相应的像对图像解算公式,实现立体像对图像同步捕获,并研制了相应的成像系统和图像处理平台,解决了孔内真三维成像的技术难题。

## 2 双锥面镜成像原理

根据立体像对成像的基本原理,当从2个不同方向对同一区域进行拍摄时,若这2个方向的夹角大于一定的角度,则可得到具有立体效果的像对图像<sup>[27-29]</sup>。众所周知,针对孔内成像的特殊性,单锥面镜技术被广泛应用,但它仅能从一个方向对孔壁进行全景成像。因此,为了从2个不同方向对孔壁同一区域进行全景成像,获取钻孔孔壁的全景立体像对图像,笔者研制了基于双锥面镜成像的全景立体像对成像系统装置,其成像原理如图1所示。

双锥面镜由上、下2个锥面镜组成,上锥面镜截头形成截头面,下锥面镜截底形成截底面,上锥面镜底面与下锥面镜顶面的交线为公交圆。单一成像部件位于双锥面镜的上部,其镜头对准双锥面镜,且成像主光轴与双锥面镜中心线重合。钻孔的 $360^\circ$ 孔壁图像经双锥面镜反射后,成像于像平面上,如:孔壁上的一点 $P$ ,经过上、下锥面镜的反射,分别成像于像平面上的点 $P_1$ 和 $P_2$ 。位于像平面上的 $360^\circ$ 孔壁图像呈圆环带状,以公交圆在像平面上形成的圆为界限;内圆环带的图像为上锥面镜反射形成的图像,而外圆环带的图像为下锥面镜反射形成的图像,如图1所示。由于在像平面上经双锥面镜反射后形成的图像具有可分离性,使得利用单一成像部件获取钻孔全景立体像对图像成为可行。

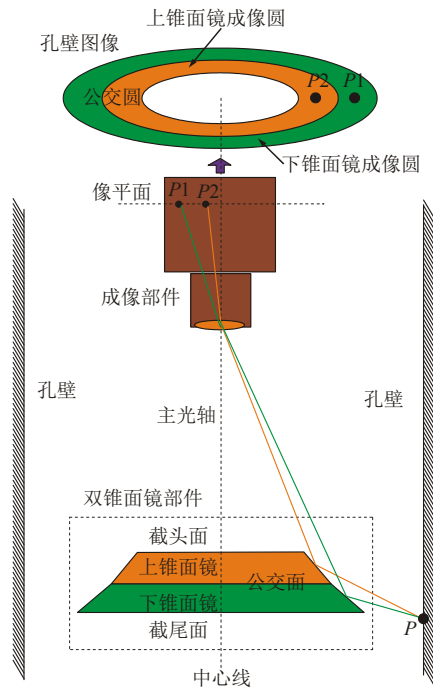


图 1 双锥面镜立体像对成像原理

Fig. 1 Stereopair imaging principle of double-cone mirror

经双锥面镜反射后形成的图像为有效像对图像的前提条件是图像中包含重叠区域，且位于截头面和截底面的高程范围以内，而经双锥面镜观测重叠区域中任一点的 2 个方向的夹角大于一定的角度，通常为  $0^\circ \sim 12^\circ$ 。因此，双锥面镜的设计至关重要。

双锥面镜的几何尺寸决定了其观测范围，即最小和最大孔径，如图 2 所示。双锥面镜的几何尺寸包含有下锥面镜的截底面直径  $D_1$ 、公交圆直径  $D_0$ 、上锥面镜的截头面直径  $D_2$ ，需满足： $D_1 > D_0$ ， $D_0 > D_2$ ，并且下锥面镜的锥顶角  $\theta_1$  和上锥面镜的锥顶角  $\theta_2$  满足  $\theta_1 > \theta_2$ 。

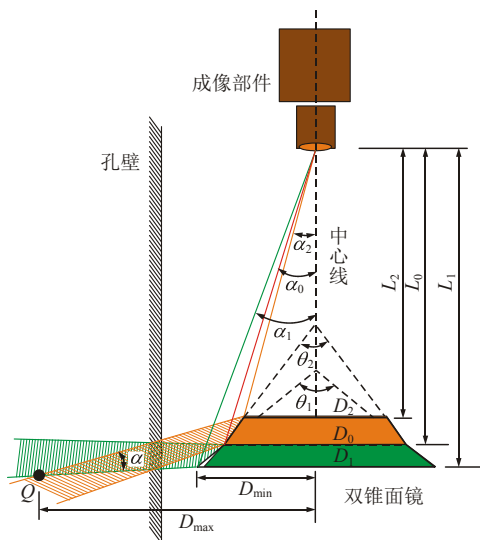


图 2 双锥面镜成像的孔径范围

Fig. 2 Borehole diameter range of double-cone mirror imaging

下锥面镜的截底面直径限定了最小钻孔孔径  $D_{min}$ ，而经过下锥面镜的底端和上锥面镜的顶端反射进入镜头中心的二条光线之交点  $Q$  对应于最大钻孔孔径  $D_{max}$ 。这二条光线的夹角  $\alpha$  主要由双锥面镜的 2 个锥顶角 ( $\theta_1$  和  $\theta_2$ ) 决定。根据实际钻孔的孔径大小和大致的成像范围， $\alpha$  需设计为大于  $6^\circ$ 。因此，双锥面镜的几何尺寸共同限定了钻孔孔径的有效范围和有效像对成像的基本要求。

针对目标部件和实际尺寸等多方面的考虑，本文开展了孔内全景像对成像的系统设计和技术分析：(1) 地质钻孔是首选目标，其孔径变化范围较大，为此需选择一个适当的范围。在这里，可考虑最常用的孔径范围，即  $76 \sim 150 \text{ mm}$ 。(2) 深度测量采用轮式滚动测量方法，而定位方法采用电子罗盘。(3) 单一成像部件可采用 CCD(电荷耦合部件)和定焦镜头。

假定镜头焦距为  $f$ ，纵向视场角为  $\lambda$ ，设镜头中心到截底面的距离为  $L_1$ ，当截底面完全处于镜头的纵向视场范围内时，则有： $\lambda > 2 \arctan(D_1 / 2L_1)$ 。因此，由纵向视场角大小的范围即可选择出成像装置和镜头。例如：距离  $L_1$  为截底面直径  $D_1$  的 3 倍时，镜头的纵向视场角  $\lambda$  需大于  $19^\circ$ ，故可选择 1/3 CCD 成像部件和 8 mm 镜头。

设镜头中心到公交圆和截头面的距离分别为  $L_0$  和  $L_2$ ，而经下锥面镜的底端、公交圆和上锥面镜的顶端进入镜头中心的光线与中心轴线的夹角分别为  $\alpha_1$ ， $\alpha_0$  和  $\alpha_2$ ，可由下面的公式求得

$$\alpha_1 = \arctan(D_1 / (2L_1)) \tag{1}$$

$$\alpha_0 = \arctan(D_0 / (2L_0)) \tag{2}$$

$$\alpha_2 = \arctan(D_2 / (2L_2)) \tag{3}$$

还可进一步求得

$$\alpha = (\theta_1 - \theta_2) - (\alpha_1 - \alpha_2) \tag{4}$$

$$\beta = -(90^\circ + \alpha_1 - \theta_1) \tag{5}$$

$$\Delta h = (D_{max} - D_1 / 2) \tan \beta \tag{6}$$

式中： $\beta$  为点  $Q$  到下锥面镜底端的光线与下锥面镜底面的夹角， $\Delta h$  为点  $Q$  到下锥面镜底面的距离。值得注意的是：(1) 只有当  $\beta$  为正时， $\Delta h$  大于 0，即满足像对点位于截头面和截底面高程范围以内的条件，而此时， $\theta_1$  须大于  $(90^\circ + \alpha_1)$ ，因此，下锥面镜的锥顶角  $\theta_1$  一定大于  $90^\circ$ ；(2) 由于  $\alpha$  需大于最佳像对成像的角度，即  $\alpha = (\theta_1 - \theta_2) - (\alpha_1 - \alpha_2) > 6^\circ$ ，而由  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的定义可知  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  为正数，因此， $(\theta_1 - \theta_2)$  需大于  $6^\circ$ ；(3)  $(\theta_1 - \theta_2)$  的值越大，立体效果越佳，但探测范围越小(即适用的孔径范围越小)。

### 3 全景像对图像解算方法

为了求得孔壁上任一点到成像中心轴线的距离，需要获得该点在统一坐标系下的像对图像上的不同位置坐标。单一成像部件所摄的一幅图像中包含可分离的像对图像，因此，在该幅图像上建立坐标系，即为像对图像的统一坐标系。

以像平面和成像中心轴线的交点为原点，由定位信息确定的正北向为  $Y$  轴的正向，而  $X$  轴与  $Y$  轴垂直，且  $X$  与  $Y$  轴构成右手坐标系。在像平面上全景像对图像呈圆环带状，如图 3 所示。圆环带的外圆  $C_1$ 、中圆  $C_0$  和内圆  $C_2$  分别为截底面外圆、公交圆和截面外圆图像。

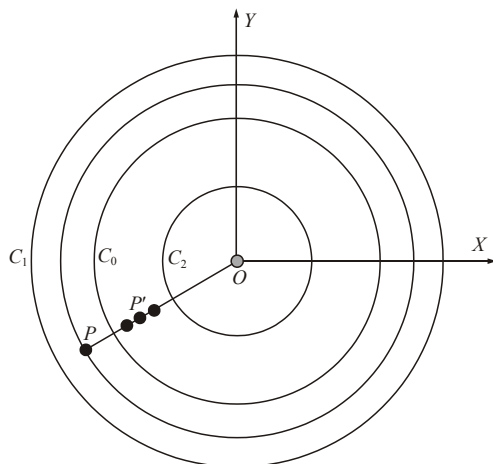


图 3 双锥面镜反射成像后的像平面  
Fig.3 The image plane after borehole reflection imaging of double-cone mirror

为了对像对图像进行配准，在  $C_1$  和  $C_0$  或者  $C_0$  和  $C_2$  之间的圆环带中任取一点  $P$ ，其方位线  $OP$  为该点与圆心的连线。然后，沿着  $OP$  在另一圆环带(即  $C_0$  和  $C_2$  或者  $C_1$  和  $C_0$  之间的圆环带)中搜索与点  $P$  相同的点  $P'$ ，即配准点，并计算出配准点  $P'$  的图像坐标。

根据配准后像对点的图像坐标、双锥面镜的几何尺寸以及成像装置的光学参数，通过严格的数学推导，建立像对图像解算公式，获得孔壁上任一点到中心轴线的距离，结合深度坐标和方位信息，可得到该点的三维坐标。

为了建立像对图像解算公式，首先对基本参数进行定义，如图 4 所示，下锥面镜锥顶角  $\theta_1$ ，上锥面镜锥顶角  $\theta_2$ ，公交圆半径  $R_0$  和镜头焦距  $f$ 。由此可得

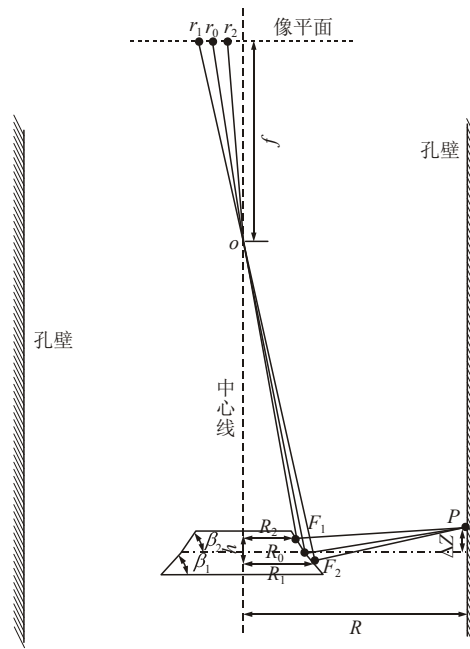


图 4 像对图像解算示意图  
Fig. 4 The diagram of stereopair imaging process

$$\beta_1 = 90^\circ - \theta_1 / 2 \tag{7}$$

$$\beta_2 = 90^\circ - \theta_2 / 2 \tag{8}$$

式中： $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为下、上锥面镜的底面内角。

另外，在像平面上设定：公交圆图像半径  $r_0$ ，点  $P$  图像到坐标中心的距离  $r_1$  以及点  $P'$  图像到坐标中心的距离  $r_2$ 。通过获得的点  $P$  和  $P'$  的图像坐标，可直接求得距离  $r_1$  和  $r_2$ ，而  $r_0$  为常数。由此可求得

$$\alpha_0 = \arctan(r_0 / f) \tag{9}$$

$$\alpha_1 = \arctan(r_1 / f) \tag{10}$$

$$\alpha_2 = \arctan(r_2 / f) \tag{11}$$

式中： $\alpha_0$  为公交圆上的点进入镜头中心的光线与主光轴夹角， $\alpha_1$  为点  $P$  经过下锥面镜上的点  $F_1$  反射后进入镜头中心的光线与主光轴的夹角， $\alpha_2$  为点  $P'$  经过上锥面镜上的点  $F_2$  反射后进入镜头中心的光线与主光轴的夹角。

又设： $R_1$  为点  $P$  在下锥面镜上的反射点  $F_1$  到主光轴的距离； $R_2$  为点  $P$  在上锥面镜上的反射点  $F_2$  到主光轴的距离； $h$  为反射点  $F_1$  和反射点  $F_2$  的高程差。然后，经过推导、化简过程，可得到：

$$R_1 = \left[ 1 + \frac{(r_1 - r_0) \cos \alpha_1 \cos \beta_1}{r_0 \cos(\alpha_1 + \beta_1)} \right] R_0 \tag{12}$$

$$R_2 = \left[ 1 - \frac{(r_0 - r_2) \cos \alpha_2 \cos \beta_2}{r_0 \cos(\alpha_2 + \beta_2)} \right] R_0 \tag{13}$$

$$h = \left[ \frac{(r_1 - r_0) \cos \alpha_1 \sin \beta_1}{r_0 \cos(\alpha_1 + \beta_1)} + \frac{(r_0 - r_2) \cos \alpha_2 \sin \beta_2}{r_0 \cos(\alpha_2 + \beta_2)} \right] R_0 \tag{14}$$

于是可得

$$R = \frac{h \tan(\alpha_1 + 2\beta_1) \tan(\alpha_2 + 2\beta_2)}{\tan(\alpha_2 + 2\beta_2) - \tan(\alpha_1 + 2\beta_1)} + \frac{R_1 \tan(\alpha_2 + 2\beta_2) - R_2 \tan(\alpha_1 + 2\beta_1)}{\tan(\alpha_2 + 2\beta_2) - \tan(\alpha_1 + 2\beta_1)} \quad (15)$$

$$\Delta Z = \frac{R - R_1}{\tan(\alpha_1 + 2\beta_1)} - (R_1 - R_0) \tan \beta_1 \quad (16)$$

式中： $R$  为点  $P$  到成像中心轴线的距离， $\Delta Z$  为点  $P$  和公交圆的高程差。

### 4 孔内全景像对成像系统

根据双锥面镜的成像原理，结合孔内全景像对成像的技术特点，通过系统的结构设计，实现了内置光源、组合式双锥面镜和单部摄像机的成像系统研制，并以全景像对图像解算方法为基础，针对涉及到的解算过程和步骤，开发出相应的图像处理和解算算法的系统软件。

#### 4.1 全景像对成像装置

如图 5 所示，全景像对成像装置由组合式双锥面镜、罗盘、光源、遮光罩、摄像装置、透明玻璃件、下部连接件和上部连接件组成。然而，透明玻璃件、下部连接件和上部连接件构成了密封外壳，组合式双锥面镜、罗盘、光源、遮光罩和摄像装置位于其中。考虑到不同材料膨胀系数存在差异，透明玻璃件与上、下部连接件之间采用软性胶的方式黏接，其间需留有足够的伸缩缝。

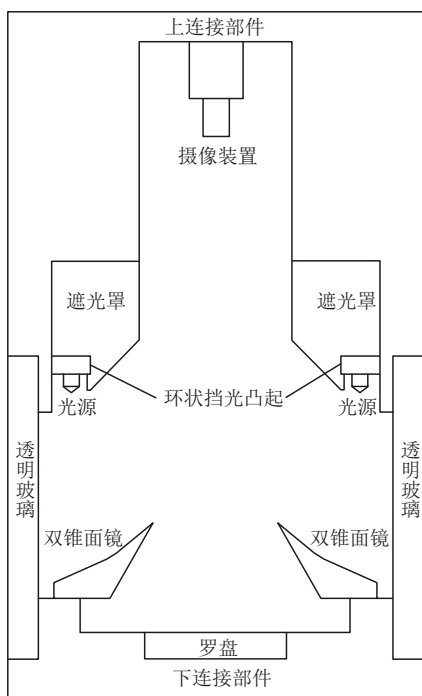


图 5 全景像对成像装置剖面图

Fig.5 The profile map of panoramic stereopair imaging device

通过丝扣(即螺纹)将上、下锥面镜固定于一体，构成组合式双锥面镜，并确保其满足同轴的要求。组合式双锥面镜固定于下部连接件上。为了对组合式双锥面镜进行研磨加工，可分拆后逐个加工处理，然后再组装成一体摄像装置固定于上部连接件的中央。其中心轴线与组合式双锥面镜的轴线共线，摄像装置的镜头对准组合式双锥面镜，摄像装置摄取组合式双锥面镜反射形成的孔壁像对图像。光源固定于遮光罩的外缘，而遮光罩则固定于上部连接件上。遮光罩的下缘要略为延长，遮住光源直射到摄像装置的光线。

#### 4.2 像对图像处理过程及算法实现

通过成像装置获得的包含方位和深度信息的全景像对图像具有从 2 个不同方向对孔壁成像的特点，因此，形成从这 2 个方向观察孔壁的全孔图像成为首要目标。

根据在像平面上以公交圆为界限的内、外圆环带图像的定义，可分别在其中一个圆作为扫描线圆，由定位信息确定正北向，并以此为初始(或基准)方位，分别展开扫描线圆上的图像，再按深度累积所有的扫描线圆上的展开图像，形成从这 2 个方向观察孔壁的全孔展开图像，其处理流程如图 6 所示。

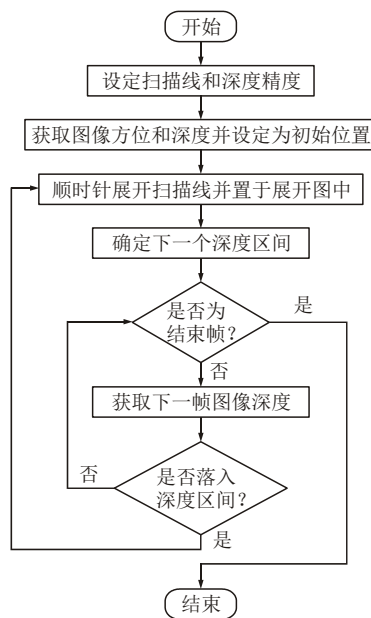


图 6 扫描线展开流程图

Fig.6 The processing flowchart of scan-line annular ribbon

为了解算出孔壁上任一点到成像中心轴线的距离，须对全景像对图像进行配准处理。为此，可在外圆环带内选择一个扫描线圆为基准，对于该扫描线圆上的任一点  $P$ ，搜索在该点与圆心的连线上内

圆环带区间内的与点  $P$  一致的点为配准点  $P'$ ，并计算出配准点  $P'$  的图像坐标。针对基准扫描线圆上的每一点进行配准，即可获得所有配准点对应的图像坐标，再利用像对图像解算式(15)和(16)，即可获得钻孔孔壁上任一点的三维坐标。其处理和算解流程如图 7 所示。

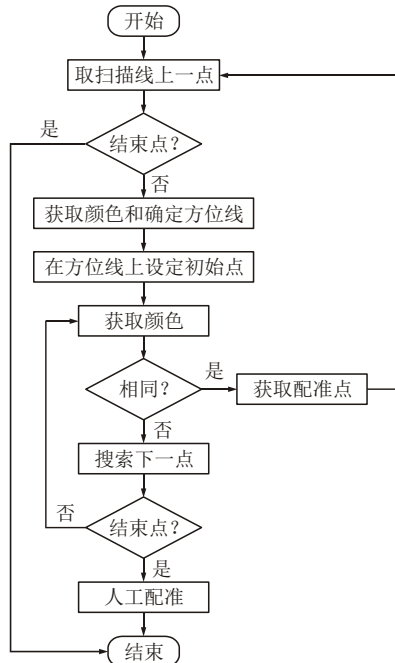


图 7 像对图像配准流程框图

Fig.7 The flowchart of matching stereopair image among the annual ribbons and image registration

### 5 系统测试与分析

#### 5.1 试验系统组成与功能特点

根据双锥面镜成像原理研制出的孔内全景像对成像系统的硬件部分包括：全景像对摄像探头、集成控制箱、深度编码器、电缆及绞车等，主要部件双锥面镜如图 8 所示。整个测试过程有准备、测试和回收 3 个阶段，其中，在准备阶段的工作有：(1) 在孔口布设绞车；(2) 安装深度编码器；(3) 将探头连接到电缆的前端；(4) 通过信号连接线将集成控制箱与绞车连接；(5) 接通电源进行系统调校。在测试阶段有：(1) 设置初始深度；(2) 开机录像；(3) 匀速下降探头；(4) 屏幕上实时监控。在回收阶段的工作有：(1) 保存数据；(2) 关闭电源；(3) 回收探头。

系统软件包括采集和分析两部分软件，实际测试效果如图 9 所示。采集软件包含有钻孔和系统参数，与硬件相关，而分析软件的数据来自于采集软件的结果，与硬件无关。针对测试后获得的图像，首先应用采集软件进行图像处理，包括：(1) 钻孔



图 8 双锥面镜

Fig.8 The double-cone mirror

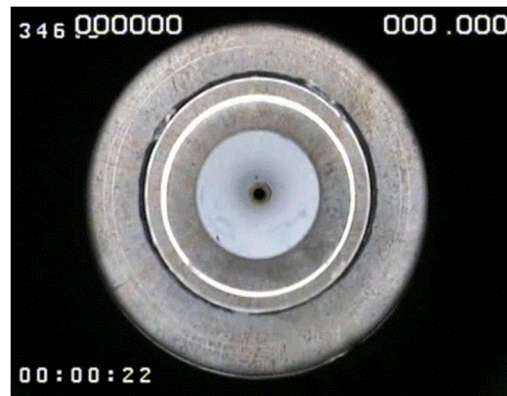


图 9 软件系统测试效果

Fig.9 The testing result of software system

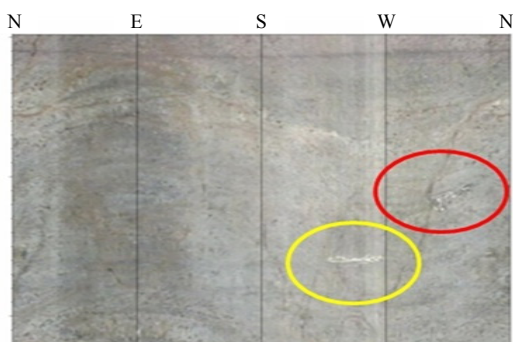
参数设定；(2) 图像区域设定；(3) 扫描线设定；(4) 方位与深度识别；(5) 全孔展开图像形成；(6) 图像配准；(7) 位置解算。其次应用分析软件进行图像生成、数据提取和分析，包括：(1) 二幅全孔或分段图像；(2) 二幅图像的差异图像；(3) 断面形态图；(4) 结构面几何参数；(5) 特征点位置测量；(6) 三维形态构造；(7) 数据统计分析。

#### 5.2 系统功能测试与分析

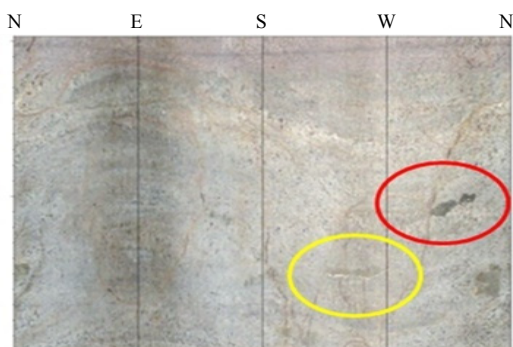
孔内全景像对成像系统与数字全景钻孔摄像系统的最主要区别在于，前者采用的是双锥面镜(不同于后者的单锥面镜)，获得的是全景像对图像，除了具有后者的所有功能外，更能体现自身特点的是：(1) 形成从二个不同方向观测全孔孔壁的立体像对图像以及其差异图像，为孔壁上精细或隐性结构识别创造了条件；(2) 形成钻孔孔径大小的变化图，为孔壁三维形态测量奠定了基础。针对这个 2 个特点，本文开展了室内测试工作，包括：(1) 孔壁结

构特征的精细识别；(2) 孔径断面形态大小的测量。

为了实现精细结构特征的有效识别，在浇灌的水泥石块上钻孔，孔径为 76 mm，并进行测试。利用孔内全景像对成像系统，获得了该钻孔的孔壁像对图像，并从中可以识别分析孔壁上的裂隙及其几何特征参数。双锥面镜立体像对成像系统可以形成不同视角的两幅孔壁图像，其中一组像对图像如图 10 所示。从图 10 可以发现岩体结构微小差异以及这些差异出现的位置和形态特征，反映了原始孔壁在不同视角下的形态特征存在的差异。该系统突出并刻画了这种差异性，从而实现了孔壁结构的精细识别，也验证了该系统的独特性。



(a) 上锥面镜成像的部分图像



(b) 同一位置下锥面镜的成像图像

图 10 岩体结构立体像对成像的微小差异图像

Fig.10 Some small differences of tiny structures of rock mass in the stereopair images

为了实现孔径断面形态特征的量测，采用预制孔壁形态的石块进行，石块内壁某处预留一处凹陷。利用该系统进行测试，根据式(15)获得了该石块内部孔壁孔径大小的断面形态特征。分别取基准深度之上 60, 180 和 300 mm 处的 3 个断面实时孔径，形成了断面孔径变化图，如图 11 所示。图中蓝色虚线为标准 76 mm 孔径的圆，红色实线为实际孔径情况。由图 11 可知，基准深度之上 60 mm 处的断面孔壁不是圆形的，而是类似于椭圆的，最小孔径接近 80 mm，最小孔径接近 98 mm，见图 11(a)；基准深度之上 180 mm 的孔径变化图出现在孔壁的凹陷

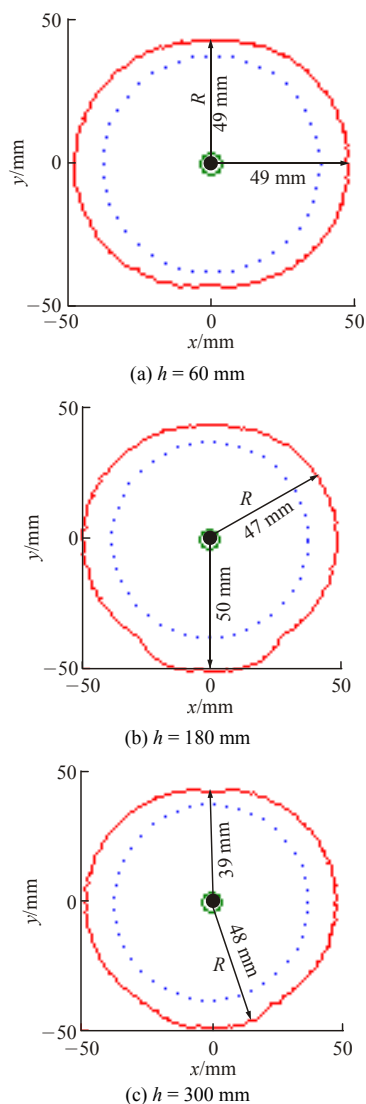


图 11 钻孔孔壁断面的孔径变化图

Fig.11 The diameter variation of borehole

处，真实反映了该处孔壁的凹陷 5 mm (相对于实测孔径 90 mm)以上，见图 11(b)；另外，可以观测到该凹陷部分在基准深度上的 300 mm 处，凹陷的范围逐渐变小，凹陷的深度也逐渐变浅，见图 11(c)。由此可以看出，实际断面孔径大小的变化过程，从而反映实际钻孔孔径大小的形态特征，也验证了孔径断面形态的测量。

因此，通过实际钻孔测试试验，对比以往的全景成像系统，不难发现基于双锥面镜成像的钻孔摄像系统可以实现孔壁结构特征的精细识别和断面孔径形态的测量。

### 6 结 论

本文通过对双锥面镜成像原理的深入分析和立体像对图像解算算法的理论推导，设计并研制了一

套基于双锥面镜成像的钻孔摄像系统。该系统是具有自主知识产权的原创性系统,可以实现孔壁结构特征的精细识别和断面孔径形态的测量,并通过钻孔测试试验,验证了该系统的可行性和实用性。本文获得的主要结论如下:(1)利用双锥面镜和像对成像基本原理可以实现孔内孔壁结构的立体像对成像;(2)基于双锥面镜成像的钻孔摄像系统可以在不同视角下构造出孔壁结构的差异性,使孔壁结构的精细识别或隐性结构的探测成为可能;(3)突破了以往钻孔摄像系统仅能获得孔壁二维图像和孔壁为圆柱面的局限性,实现了实际钻孔孔壁断面形态的测量分析,为孔内勘察分析提供了新的技术手段。

### 参考文献(References):

- [1] BARTHELEMY J, MARTIN L G, DANIEL J. Estimates of fracture density and uncertainties from well data[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 590 - 603.
- [2] 刘才华, 陈从新. 地震作用下岩质边坡块体倾覆破坏分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 1): 3 193 - 3 198.(LIU Caihua, CHEN Congxin. Analysis of toppling failure of rock slopes due to earthquakes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp.1): 3 193 - 3 198.(in Chinese))
- [3] 陈从新, 刘秀敏, 刘才华. 数字图像技术在岩石细观力学研究中的应用[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增 1): 53 - 61.(CHEN Congxin, LIU Xiumin, LIU Caihua. Application of digital image processing to rock mesomechanics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Supp.1): 53 - 61.(in Chinese))
- [4] ZHANG Q, ZUO J, MAO L. The study of relationship between rock crack ct image tensor representation sign and its destruction features[C]// 2nd International Conference on Civil Engineering and Transportation(IC CET 2012). Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd., 2013: 402 - 409.
- [5] 查恩来, 丁 凯. 成像测井新技术在水利工程中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 290 - 295.(CHA Enlai, DING Kai. Imaging Log technique and its application in water conservancy engineering[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1): 290 - 295.(in Chinese))
- [6] 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 Tim. Review of borehole camera technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 42 - 50.(in Chinese))
- [7] LI S J, FENG X T, LI Z H, et al. In-situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station[J]. *Engineering Geology*, 2012, 137: 85 - 96.
- [8] 吴立新, 吴育华, 钟 声, 等. 岩石撞击的热红外成像探测研究进展与方向[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(11): 2 180 - 2 186.(WU Lixin, WU Yuhua, ZHONG Sheng, et al. Research progresses and directions of detection on rock impaction with thermal infrared imaging[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(11): 2 180 - 2 186.(in Chinese))
- [9] WATTERS W A, GROTZINGER J P, BELL J, et al. Origin of the structure and planform of small impact craters in fractured targets: Endurance crater at Meridiani Planum, Mars[J]. *Icarus*, 2011, 211(1): 472 - 497.
- [10] 张连明, 周 峰, 张兆坤. 地下岩层裂隙的几种勘察研究方法[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(4): 111 - 114.(ZHANG Lianming, ZHOU Feng, ZHANG Zhaokun. Several methods for investigating crack in underground rock stratum[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(4): 111 - 114.(in Chinese))
- [11] 刘子侠. 基于数字近景摄影测量的岩体结构面信息快速采集的研究应用[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2009.(LIU Zixia. Research and application of rapid acquiring discontinuities information in rock mass based on digital close range photogrammetry[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2009.(in Chinese))
- [12] 孙卫春, 王川婴, 闵 弘. 数字钻孔摄像与钻孔 CT 层析成像测试试验[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(8): 104 - 108.(SUN Weichun, WANG Chuanying, MIN Hong. Test of digital borehole camera and borehole computed tomography imaging[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(8): 104 - 108.(in Chinese))
- [13] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 前视全景钻孔电视及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增 1): 1 687 - 1 691.(WANG Chuanying, GE Xiurun, BAI Shiwei. Axial view panoramic borehole TV and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Supp.1): 1 687 - 1 691.(in Chinese))
- [14] CHEN G, LI Q, ZHANG H. Panoramic image system design in the nearly dark environment[C]// International Conference on Intelligent Materials and Mechatronics(IMM 2013). Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd., 2014: 304 - 309.
- [15] 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))
- [16] RONCELLA R, FORLANI G, REMONDINO F. Photogrammetry for geological applications: automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes[C]// BERALDIN J A, ELHAKIM S F, GRUEN A, et al ed. Conference Videometrics VIII. USA: SPIE-INT SOC Optical Engineering, 2005: 17 - 27.
- [17] 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))
- [18] 王川婴, 韩增强, 汪进超, 等. 平面应力状态下的圆孔形态特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增1): 2 836 - 2 842.(WANG Chuanying, HAN Zengqiang, WANG Jinchao, et al. Study of borehole geometric shape features under plane stress state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.1): 2 836 - 2 842.(in Chinese))
- [19] BRIEF J, EDINGER D, HASSFELD S, et al. Accuracy of image-guided implantology[J]. Clinical Oral Implants Research, 2005, 16(4): 495 - 501.
- [20] 王川婴, 韩增强, 王玉山. 钻孔灌注桩沉渣厚度检测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 1 212 - 1 215.(WANG Chuanying, HAN Zengqiang, WANG Yushan. Detection method for bottom sediment thickness of bored piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 35(Supp.2): 1 212 - 1 215.(in Chinese))
- [21] HE G, JIANG C S, LEI Y C, et al. Study on unloading relaxation characteristics for rock masses under high geostress[C]// 3rd International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering(ICCAHE). Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2014: 594 - 600.
- [22] 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): 1 326 - 1 330.(WANG Chuanying, HU Peiliang, SUN Weichun. Method for evaluating rock mass integrity based on borehole camera technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1 326 - 1 330.(in Chinese))
- [23] 王川婴, 钟 声, 孙卫春. 基于数字钻孔图像的结构面连通性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 405 - 2 410.(WANG Chuanying, ZHONG Sheng, SUN Weichun. Study of connectivity of discontinuities of borehole based on digital borehole images[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 405 - 2 410.(in Chinese))
- [24] 吴晓军, 郭亚雪. 一种圆柱物体 360° 全景成像装置设计方法[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 295 - 305.(WU Xiaojun, GUO Yaxue. An 360° panoramic imaging design method for cylindrical object[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 295 - 305.(in Chinese))
- [25] 左承林, 王炜, 张茂军, 等. 一种针对拍摄物体三维重建的全视角立体成像方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(11): 1 899 - 1 904.(ZUO Chenglin, WANG Wei, ZHANG Maojun, et al. A complete-view stereo imaging method for three-dimensional reconstruction of objects[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2010, 22(11): 1 899 - 1 904.(in Chinese))
- [26] NIU C, ZHONG F, XU S, et al. Cylindrical panoramic mosaicing from a pipeline video through MRF based optimization[J]. Visual Computer, 2013, 29(4): 253 - 263.
- [27] 季顺平, 史 云. 多镜头组合型全景相机两种成像模型的定位精度比较[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1 252 - 1 258.(JI Shunping, SHI Yun. Comparison of two sensor models for multi-camera rig system in measurements[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1 252 - 1 258.(in Chinese))
- [28] MAH J, SAMSON C, MCKINNON S D. 3D laser imaging for joint orientation analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 932 - 941.
- [29] 王胜春, 罗四维, 黄雅平, 等. 移动车载视频的立体全景图生成方法[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 210 - 218.(WANG Shengchun, LUO Siwei, HUANG Yaping, et al. Stereo panorama generation from the train-borne video[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 210 - 218.(in Chinese))