

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.12.015

引文格式: 汪进超, 韩增强, 王益腾, 刘厚成, 王超, 胡胜. 2025. 孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统[J]. 华东地质, 46(1): 79-88. (WANG J C, HAN Z Q, WANG Y T, LIU H C, WANG C, HU S. 2025. The detection system based on ultrasonic synthetic aperture imaging and multi-frequency scanning[J]. East China Geology, 46(1): 79-88.)

孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统

汪进超, 韩增强, 王益腾, 刘厚成, 王超, 胡胜

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 通过地下岩体的结构特征和深部空区的勘测技术研究, 查明岩体的缺陷区域及地下空间形态的精细化结构特征, 对岩溶发育区的地下工程设计及施工具有重要作用。为了进一步了解深部地下岩体的“黑匣子”结构, 攻破地下空间精细化勘探的关键技术, 文章介绍了一种孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统。该系统在钻孔内光学与声学协同作用的基础上, 建立了适用于探测复杂地质钻孔岩体结构的多频超声波扫描技术体系, 以及具有智能感知和识别能力的钻孔岩体结构综合勘测装备。此外, 该系统还能够实现复杂地质环境下钻孔岩壁、孔内溶洞和近场围岩的同步勘测, 结合其配套的分析方法, 构建了1套集“观察、测量、表征”于一体的钻孔岩体结构综合勘测体系。测试结果表明: 孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统能够沿钻孔深入到难以触及的地下空间进行360°精细探测, 能够丰富地下空间开发与建设中的岩体结构勘测数据, 具有较好的前瞻性和广泛的应用前景。

关键词: 钻孔探测; 地下空间; 超声波扫描; 孔壁成像; 信息融合

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)01-079-10

随着我国社会经济及科学技术的快速发展, 大型水利、交通、市政、矿山开采及边坡治理等重大工程建设项目越来越多, 其中很多工程项目位于地质情况复杂的山区或海域, 对工程地质条件的要求也相对较高。因此, 详细查明建设场地的工程地质特征尤为重要。裂隙、节理、层理和断层等不连续结构面是工程地质研究的重要内容, 对揭示地质构造特征以及研究岩体的工程地质条件具有重要意义。此外, 矿产资源地下开采往往会形成大量的采空区, 导致矿山开采条件恶化, 可能引发井下大面积冒落、岩移及地表塌陷, 造成严重的人员伤亡和设备破坏。岩溶的发育对油气资源的富集与运移、地下水资源的分布与径流、与岩溶相关矿产资源的发育以及工程建设等均产生了重要影响。为了掌握岩体缺陷区域和地下空间形态的精细化结构特征, 亟需开展地下岩体结

构和深部空区的勘测技术研究(何继善等, 2022; 孙平等, 2023; 王栎等, 2022; 尚鲁宁等, 2024)。

目前, 常见的地下岩体结构探测方法分为直接法和间接法。直接法包括地质探洞、钻孔取芯和钻孔摄像等; 间接法包括地质雷达法、地震波反射法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法、激发极化法、地震CT法和红外探测法等。钻探是目前使用最广泛的地质勘察手段, 利用钻探形成的钻孔可以进行多种孔内探测, 这些探测方法包括电阻率法、电磁法、地震勘探法、微重力勘探法、放射性勘探法、扫描激光法、声波测井技术和钻孔摄像技术等(林孝城等, 2012; 刘垚鑫等, 2020; 马良慧等, 2019; 张鸿等, 2023; 周黎明等, 2016)。其中, 扫描激光法对孔内溶洞形态探测的精度较高, 但对钻孔环境要求也较高, 且无法在充水的空区内进行探测; 钻孔摄像技术能够直观地探测孔

* 收稿日期: 2023-12-26 修订日期: 2024-09-25 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 湖北省重点研发计划“基于人工智能和数字孪生的井下作业实时可视化跟踪和智能控制(编号: 2023BAB099)”和武汉市城建局“超深钻孔灌注桩水下混凝土浇筑界面智能监控关键技术研究(编号: 202352)”项目联合资助。

第一作者简介: 汪进超, 1988年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩体探测技术及装备研究工作。Email: jcwang@whrsm.ac.cn。

内岩体特征并计算裂隙参数,但仍无法在浑水区和空区内进行立体探测;声波测井技术能够解决浑水区和空区内的探测问题,但目前声波测井设备存在成像精度不高、探测频率单一和探测结果不够直观等问题(Long et al., 2015; Wang et al., 2015; Zou et al., 2004)。受岩体介质的复杂性和各种方法的局限性所限,目前地下岩体结构与深部采空区的探测精度和准确度还难以满足工程的实际需求。因此,相关的探测技术需要逐步向高精度、多功能和智能化的方向发展,进一步压制干扰,提高分辨率,提取更多的有用信息,并将地质方法和物探方法相结合,提高数据处理能力以及对各类地质问题的解释推断效果(胡磊磊等, 2022a, 2022b; 张学亮等, 2023)。

针对复杂地质条件下钻孔内岩体结构精细化勘测存在的直观性差、测量精度低和解译繁琐等技术难题,本文介绍了一种孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统的研究成果,构建了多频超声波理论体系并提出了多源数据融合技术方法,形成了具有自主知识产权的成套装置并服务于国家重大工程建设。通过对该系统进行研究,形成的相应成果能够丰富地下空间开发与建设中的岩体结构勘测数据,其对应的技术方法具有较好的前瞻性和广泛的应用前景。

1 技术路线

孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统研究主要从技术方法和设备研制两方面入手,通过构建钻孔内复杂地质体的多频超声波测试方法,研发基于光-声融合的钻孔岩壁结构精细测量和可视化技术,以及钻孔内岩体结构综合成像与精细扫描一体化的智能化勘测装备,从而解决钻孔内不同尺度的岩体缺陷(如裂缝、溶洞、孔洞和破碎带等)精细化测量的技术难题。

该系统主要利用不同频率的超声波换能器感知目标对象的差异性响应,获取岩体结构的多元几何特征(裂隙、溶洞、孔洞和破碎带等),并融合光学影像技术和多频超声波综合分析技术,实现钻孔内不同尺度的裂缝、溶洞和孔洞的精细化测量。在复杂地质环境下的钻孔勘测中,由于勘测岩体通常具有多尺度、多形态、多成分等特征,导

致常规的光学和声学测量技术和装备难以完全胜任孔内岩体结构的精细化勘测。该系统的总体研究路线如图1所示。

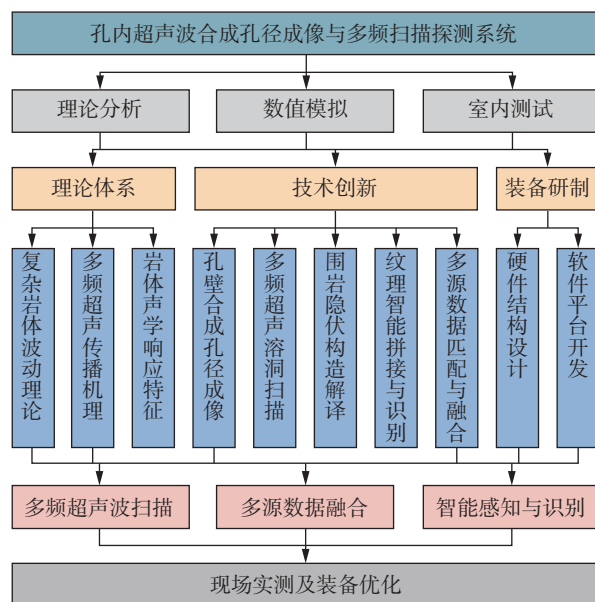


图1 孔内超声波合成孔径成像与多频扫描探测系统的研究路线框图

Fig. 1 Research route of the detection system based on ultrasonic synthetic aperture imaging and multi-frequency scanning

2 技术方法

钻孔内可能存在裂隙、溶洞、孔洞及软弱带等岩体缺陷。针对不同的研究目标,结合多频超声波传递理论,本节介绍了孔壁合成孔径成像、多频超声溶洞扫描、围岩隐伏构造解译、纹理智能拼接与识别、多源数据匹配与融合等关键技术。

2.1 孔壁合成孔径成像

为了解决钻孔内复杂传播介质环境下孔壁的声学成像问题,结合多频超声波在孔内的扫描方式,笔者提出了一种基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法(汪进超等, 2019),从而提高钻孔图像的分辨率和图像质量。首先,采用高分辨率的SAFT成像技术综合处理断面扫描回波信号,达到增强反射信号和抑制干扰信号的目的,使其对应的岩壁特征区域回波更加突显,在此基础上,提取扫描断面回波信号的声幅和声时参数。其次,综合声幅和声速参数,提出了基于相关性的超声波

钻孔图像重建原则,选择合适的成像数据点,在叠加不同深度的探测数据后,形成关注区域更加明显的钻孔重建图像,从而达到提供钻孔岩壁声学成像的目标。利用声时参数反映钻孔内壁的粗糙度和完整程度,选择声幅参数反映钻孔内壁的岩性差异。采用在钻孔成像深度 h 处的特征阈值 Q_h 进行岩性与结构差异的判断,特征阈值 Q_h 的大小根据实际情况进行选择:若岩石比较完整,则特征阈值 Q_h 选择较大,体现了岩壁的岩性差异特征;若岩石的岩性比较一致,则特征阈值 Q_h 选择较小,体现了岩壁的结构差异特征,具体表达式为

$$P_{h,j} = \begin{cases} \text{Max}F_{h,j} & |\gamma_{h,j}| \leq Q_h \\ 1 - \text{Max}T_{h,j} & |\gamma_{h,j}| > Q_h \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $P_{h,j}$ 为深度 h 处断面上的第 j 条扫描线所对应的岩壁成像点值; $\text{Max}F_{h,j}$ 为深度 h 处断面上的第 j 条扫描线所对应的岩壁声幅参数; $\text{Max}T_{h,j}$ 为深度 h 处断面上的第 j 条扫描线所对应的岩壁声时参数; $|\gamma_{h,j}|$ 为深度 h 处断面上的第 j 条扫描线与第 $j+1$ 条扫描线所对应的岩壁之间相关系数的绝对值。

2.2 多频超声溶洞扫描

为了提高溶洞轮廓的测量精度,实现溶洞几何轮廓的精细测量,研究人员提出了一种基于多频钻孔声呐的溶洞探测方法(Wang et al., 2020a),确保钻孔勘测能够同时满足探测精度和探测广度的需求。在考虑了不同频率对实际探测对象贡献程度的基础上,合成多种频率的探测数据,有效解决了探测尺度和探测精度之间的对立问题。首先,推导出探测系统的最佳频率表达式,为更大程度地体现不同频率对探测结果的影响提供基本参数,并构建频率影响因子参数来描述固有频率与最佳频率之间的偏离程度。然后,在叠加频率影响因子的基础上,综合合成多种探测频率的探测数据,采用改进的频谱测距法完成对探测对象的精确测定。最后,附加了深度和方位等信息之后,实现溶洞腔体形态的立体重建。

2.3 围岩隐伏构造解译

根据钻孔岩壁的光学和声学图像,有时难以有效判断岩体结构的延展特性,且部分围岩的构造特征并未呈现在钻孔岩壁上。因此,有学者提出了“从全方位声波脉冲反射序列数据着手,解决隐伏构造定位难题”的思路,形成了基于三维全脉

冲序列反演方法的钻孔围岩隐伏构造解译方法(Wang et al., 2020b)。针对围岩隐伏构造特征参数估算难的问题,提出了基于数值搜索的隐伏构造特征参数估算方法:通过物理模型试验发现声波换能器与岩壁之间若存在耦合层,可以利用声波信号与探测目标之间存在的相位特征关系来解决实际工程中围岩隐伏构造特征参数估算的难题。实际应用效果表明,隐伏构造特征参数估算技术可有效解决钻孔围岩结构探测的隐伏构造定位难题,尤其可实现隐伏构造位置、方位和声速的估算,进一步拓展了岩体结构探测技术的功能。

2.4 纹理智能拼接与识别

利用钻孔图像的成像和呈现特征,提出了基于前视反射的钻孔内壁图像采集模型,并完成了基于锥面反射的环带全景图展开算法分析。通过研究图像拼接的主要步骤,提出了基于 Harris 角点检测自动阈值设定的算法,能够有效地提高角点检测的效率。结合设备工作原理及缺陷区域的图像特征,构建孔壁图像矫正方法,可削弱近距离和孔壁内侧曲率对孔壁纹理成像的影响。结合梯度算子与最大类间方差法,通过锐化孔壁缺陷区域的边缘,构建了适用于钻孔复杂环境下孔壁缺陷区域的有效识别方法。此外,还提出了目标占框比、面积及长宽比和特殊形状等特征参数,形成了孔壁纹理目标缺陷区域的搜索和检测方法,实现了孔壁二值图像的缺陷精准智能识别。以重叠区域中更清晰的图像(即更靠近孔内探头一侧的孔壁图像像素单元)作为重构图像,若 f_1 表示第一幅图像, f_2 表示第二幅图像,则对 f_1 和 f_2 拼接后再进行融合。其中, f_1 和 f_2 图像存在重叠的区域,融合后图像在某一孔壁图像像素单元的灰度值 f 应为

$$f(x,y) = \begin{cases} f_1(x,y) & (x,y) \in f_1 \\ W(x,y) & (x,y) \in (f_1 \cap f_2) \\ f_2(x,y) & (x,y) \in f_2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $W(x,y)$ 为需要重构的孔壁图像像素单元。若两幅图像的重叠区域为 $[y_1, y_2]$, w_1 为 f_1 的权函数, w_2 为 f_2 的权函数,则孔壁图像像素单元 $W(x,y)$ 的表达式为

$$W(x,y) = f_1(x,y) \cdot w_1(x,y) + f_2(x,y) \cdot w_2(x,y)。 \quad (3)$$

2.5 多源数据匹配与融合

为了解决光学图像、声学图像、高-中-低频声

波扫描数据的数据预处理、归一化、匹配与融合等问题,笔者提出了孔壁光学图像重构与孔壁纹理曲线重构的方法,实现不同深度钻孔孔壁纹理图像的拼接与孔壁三维轮廓的建模。在此基础上,建立光声组合测量数据之间的映射关系与融合机制,形成了基于光声组合测量的地质钻孔三维可视化体系(汪进超等, 2023)。结合断面声学扫描特征与岩壁光学图像特征,形成钻孔岩体结构特征参数提取技术,明确了钻孔岩体结构的多元数据特征,并构建了综合考虑岩体结构差异的岩体结合度函数与岩体块度函数,从而实现岩体结构完整性的量化描述。根据岩体结合度、岩体块度以及岩体传播声速参数与岩体完整性之间的关联特征,结合模糊数学理论,将上述参数进行模糊分类,构建了基于多元数据的岩体结构完整性评价指标 $Mc(h)$ (Wang et al., 2022), 实现了基于钻孔多源数据融合与岩体完整性的综合评价。基于钻孔多元数据的岩体完整性指标函数 $M_c(h)$ 表示为

$$M_c(h) = 1 - \delta(M, M_0), \quad (4)$$

式中: M 、 M_0 为两个模糊子集, 将海明距离 δ_i 的数值按大小顺序排列。先求第 1 次最小值 $\delta_{\min(1)}$, 再求第 2 次最小值 $\delta_{\min(2)}$, 依次类推, 得到以下公式:

$$\begin{cases} \delta_{\min(1)} = \min(\delta_i, \delta_{i+1}) \\ \delta_{\min(2)} = \min(\delta_{i-1}, \delta_i) \\ \delta_{\min(n)} = \min(\delta_{i-n+1}, \delta_{i-n}) \end{cases} \quad (5)$$

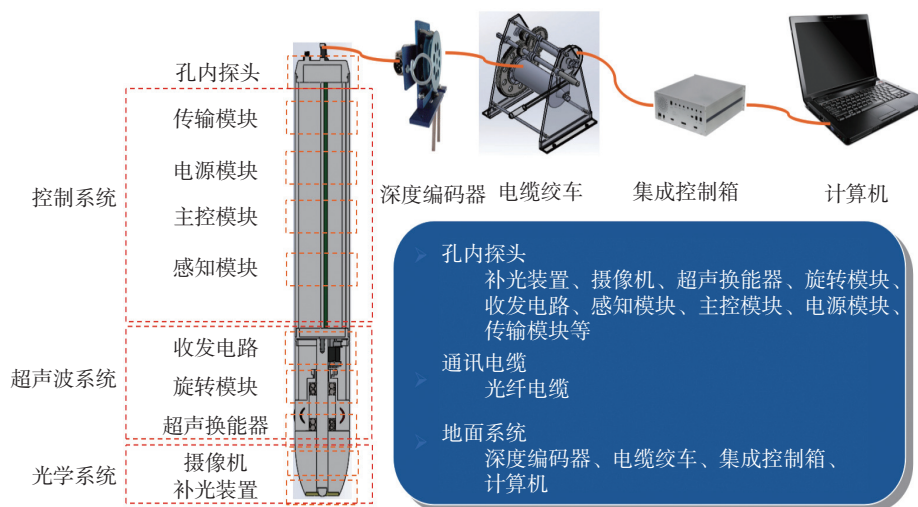


图2 硬件结构设计框图

Fig. 2 Design of hardware structure

3 装备系统研究

3.1 硬件系统研制

在硬件系统研制中,针对声波探测范围与声波衰减强弱之间的矛盾问题,研究提出了采用多个频率进行探测的方法,扩大探测范围并提高探测精度来适应不同尺寸的空区探测。通过 ARM 机识别反馈信号,判断信号的强弱来控制 PLC 单片机,采用 PLC 单片机控制各频率发射电路的电源信号,从而实现各频率之间的自动切换。同时,在周向机械扫描部件的驱动下,实现钻孔 360°全方位声波扫描。在获取井下数据的同时,取得了上位机叠加探头所处位置的深度与方位信息,实现全钻孔的全深度与全方位数据采集。此外,为了减少探测成本,提高工程效率,系统采用了声波反射板,以达到优化探头直径尺寸的目的。在高温、高压等恶劣条件下,为了保护探头并减少测量误差,装置采用全封闭式设计,并使用与水密度接近的 ABS 材料作为透声窗。另外,为了提高系统探测的准确性,在探头上安装了多个温度传感器,实时监测探头和外界温度的变化。硬件结构设计过程如图 2 所示。

3.2 软件平台开发

软件平台主要包括系统采集软件和系统分析软件。系统采集软件能够实时采集钻孔内光学和声波扫描信息,主要功能是实现对光学影像的实时采集、声学反射信号的实时监测和钻孔内环境

介质的参数采集等,通过多源数据融合显示岩壁图像和断面轮廓的实时动态。系统分析软件实现了多频超声数字信息的可视化处理及光学影像的图片化处理,适用于钻孔岩体结构和孔内溶洞光

学与声学数据的读取、查询和修正。通过相应的软件处理与算法分析,可实现钻孔岩壁和岩体结构的多维度数字图像和轮廓可视化。部分软件平台界面如图 3 所示。

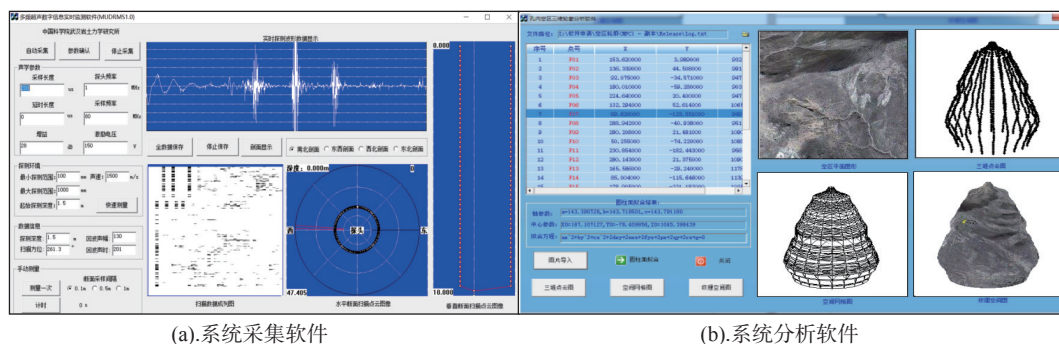


图3 部分软件平台界面

Fig. 3 Part of software platform interface

4 应用案例

在西南地区的某岩溶工程勘察项目中,前期勘察时发现该区域岩溶较发育,存在可溶岩及较大规模的破碎带。研究区地层主要为第四系覆盖层和上石炭统基岩,岩性主要为中风化白云质灰岩,中厚层构造,围岩节理、裂隙较发育。为了进一步了解该区域的岩体结构特征,查明地质结构与地下空间形态特征,将该系统应用其中,并完成了多个钻孔的测试工作。系统设备实物如图 4 所示。本次测试时系统采用的多频超声信号频率主要依托高频(1 MHz)、中频(250 KHz)和低频(20 KHz)3 种超声波换能器。本节选取具有代表性的钻孔数据解译结果进行分析。



图4 系统设备实物图

Fig. 4 System equipment

4.1 钻孔岩壁成像

针对光学成像难以反映岩壁结构特征的区域,可以利用孔壁合成孔径成像方法来实现较高分辨率的孔壁声学成像。以钻孔深度 111.5~112.0 m 处的钻孔图像为例,由于钻孔在该深度的水体较

浑浊,采用光学成像获取的图像如图 5(a)所示,其质量难以获取钻孔岩壁的岩体结构信息。当采用合成孔径成像方式对声波扫描数据进行分析时,形成图 5(b)的图像。为了对其成像方式进行对比,对钻孔深度 x m 处的声波扫描数据以声幅的形式呈现,结果如图 5(c)所示。通过对比图 5(b)和图 5(c)可以看出,采用孔壁合成孔径成像的方式来处理孔壁声波扫描数据,能够获得更高质量的钻孔岩壁声学图像。

4.2 钻孔贯穿溶洞的轮廓测量

针对光学成像与声学成像难以反映岩壁空洞特征的区域,可以利用多频超声溶洞扫描方法来实现钻孔的贯穿溶洞几何轮廓测量。以钻孔深度 137.2~138.7 m 处的图像为例,由于钻孔在该深度的位置利用成像技术无法获取有效的图像信息(图 6(a)、(b)),同时在钻孔过程中该深度出现过掉钻的现象,据此判断该深度的钻孔存在疑似溶洞。利用多频超声溶洞扫描方法形成溶洞的几何轮廓,为了更直观地呈现溶洞特征,在轮廓上映射光学钻孔图像(图 6(c))。由图 6(c)可以看出溶洞的大致分布形态,可为该区域的溶洞治理提供重要的数据支撑。

4.3 钻孔围岩隐伏结构探测

采用钻孔岩壁成像技术只能反映其表面的结构信息,而钻孔壁表面与其孔壁周围的岩体结构并非完全一致,对于岩体结构精细探测来说,则需要进一步探索孔壁周围的岩体结构特征。针对孔

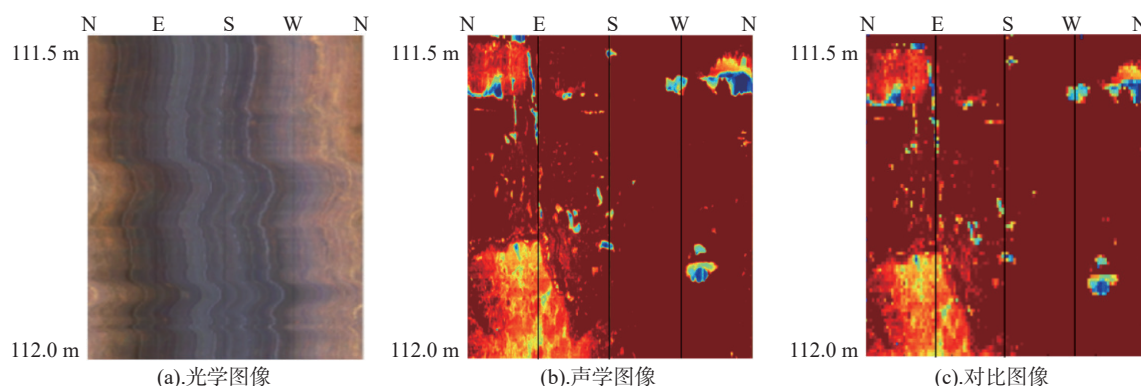


图5 钻孔岩壁成像图

Fig. 5 Borehole rock wall images

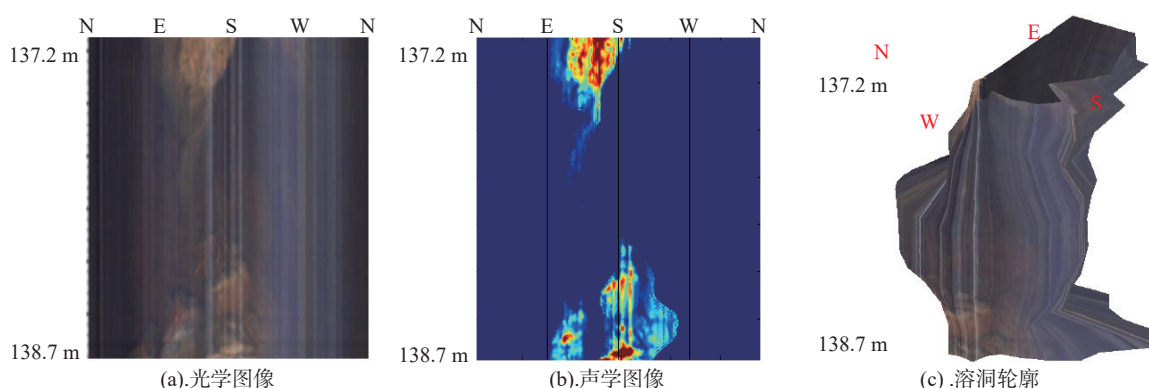


图6 钻孔贯穿溶洞特征图

Fig. 6 Characteristic images of borehole through karst caves

壁周围岩体结构的精细探测,采用该系统的围岩隐伏构造解译方法,能够对孔壁周围的岩体结构进行解译与可视化处理。以钻孔深度 111.5~112.0 m 处的钻孔段为例,通过声波成像能够反映钻孔表面的结构特征,利用围岩隐伏构造解译方法对声波低频扫描数据进行处理,形成孔壁周围岩体的特征区域图(图 7(a))。对其解译结果进行可视化处理,生成孔壁周围岩体可视化图(图 7(b))。为了验证其结果的可靠性,利用钻孔孔径更大的钻头对该区域的钻孔进行取芯,其实物如图 7(c)所示。由图 7(c)中可以看出,钻孔孔壁与孔周的岩体结构存在较大差异,特别是溶蚀空洞的分布、尺寸与数量存在差异。同时,将岩芯的孔周图像与图 7(b)进行对比,可以看出二者典型特征基本一致,进一步验证了围岩隐伏构造解译方法的可行性与优越性。

4.4 纹理智能拼接与识别

纹理智能拼接与识别主要针对孔壁光学图像中不同深度的图像进行拼接与结构特征的识别。针对钻孔图像的成像和呈现特征,采用该系统的

纹理智能拼接与识别方法,实现图像的高质量拼接,同时有效地识别和区分孔壁结构特征。以钻孔深度 146.1~146.6 m 处的钻孔段为例,利用系统光学图像采集部件获取钻孔孔壁的影像数据,再通过数字信号处理直接按照传统的方位和深度数据进行拼接,其孔壁光学展开图像如图 8(a)所示,采用本文介绍的系统方法获取的孔壁光学展开图像如图 8(b)所示。结合对应的识别方法,对图 8(b)中的图像进行结构特征识别,结果如图 8(c)所示。由图 8(c)中可以看出,钻孔深度 146.1~146.6 m 处主要存在 12 处结构特征,与图 8(b)反映的结构特征基本一致。由图 8 可知,采用该系统对应的纹理智能拼接与识别方法,能够实现图像的快速和高质量拼接,在二值化的过程中,也能有效保留典型的关键结构特征。

4.5 多源数据匹配与融合

多源数据匹配与融合主要是针对钻孔壁三维可视化中的光声组合测量数据之间的映射与融合,利用断面声学扫描特征与岩壁光学图像特征,综

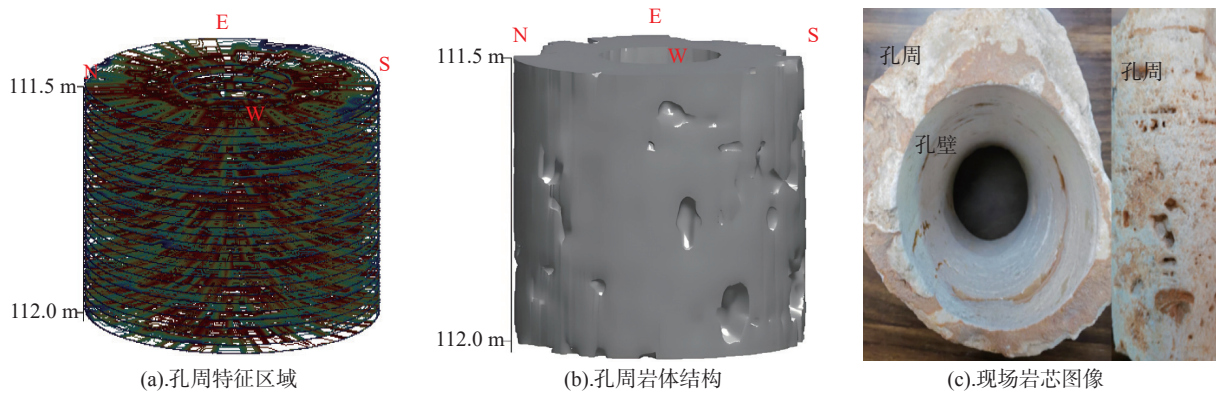


图7 钻孔孔周岩体结构特征图

Fig. 7 Structural characteristics of rock mass around borehole

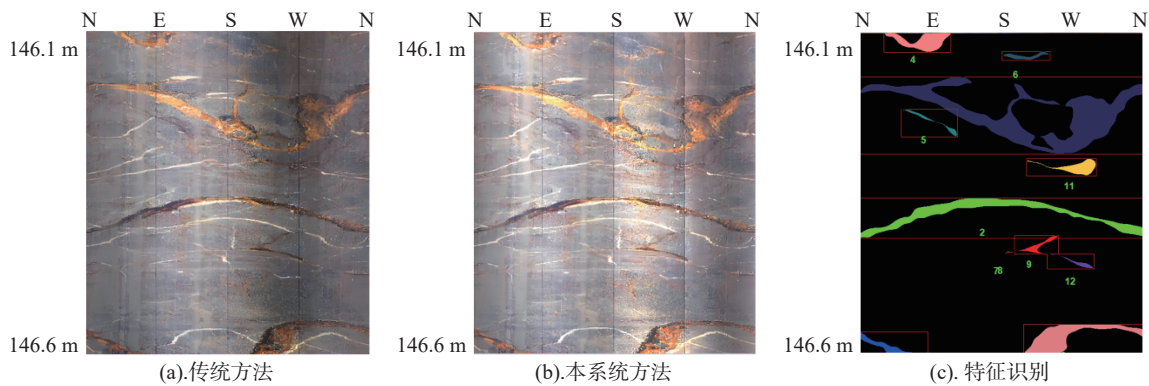


图8 钻孔图像拼接与特征识别

Fig. 8 Borehole images stitching and feature recognition

合考虑岩体结构差异的结合度函数与岩体块度函数,实现岩体结构的完整性分析。以钻孔深度146.1~146.6 m处的钻孔段为例进行地质钻孔三维可视化处理,该处光学成像数据重构的孔壁光学图像如图8(b)所示。利用钻孔深度146.1~146.6 m处的孔壁光学图像生成三维虚拟岩芯图(图9(a))。利用光学图像数据与声波扫描数据实现钻孔的三维网格化后形成如图9(b)所示的三维图像,将光学图像数据与声波扫描数据融合后形成的钻孔三维可视化图像如图9(c)所示。由图9可以看出,常规虚拟三维岩芯的钻孔轮廓为规则圆柱体,而声波扫描获取的钻孔轮廓为非规则圆柱体,这是因为较破碎的岩体可能存在掉块、破碎以及孔隙等地质特征,说明本文利用的方法通过融合孔壁光学成像与钻孔周向轮廓信息能够更加准确地掌握钻孔岩壁的真实地质特征。

由于系统能够获得钻孔周围的多源信息,可以充分利用这些信息实现钻孔岩体结构的完整性评价。以钻孔深度100.0~150.0 m处的钻孔段为

例,通过分析孔壁图像与岩体声波特征,结合钻孔岩体结构特征参数的提取方法,实现钻孔深度100.0~150.0 m处的岩体结合度、岩体块度以及岩体传播声速参数的计算。为了验证结果的可靠性,将按照本系统方法计算的完整性结果与现场的取芯率以及基于钻孔摄像技术的完整性评价方法——RMDI法进行对比(图10)。由图10可以看出,采用系统方法计算的岩体完整性指标函数 $M_c(h)$ 值与取芯率以及基于钻孔摄像技术的完整性评价方法的结果起伏趋势基本一致,系统方法中的岩体完整性指标函数 $M_c(h)$ 值略低于取芯率,这是由于现场的取芯率在计算过程中包含了破碎或者断裂的岩石尺寸,从而导致整体的取芯率偏高。系统方法中的岩体完整性指标函数 $M_c(h)$ 值的最大值略低于RMDI法的值, $M_c(h)$ 值的最小值略高于RMDI法的值,这是由于本系统方法在考虑了钻孔壁岩体完整性的同时,增加了对钻孔围岩的完整性分析,削弱了钻孔壁结构对完整性评价的影响,对钻孔的完整性评价更加全面。

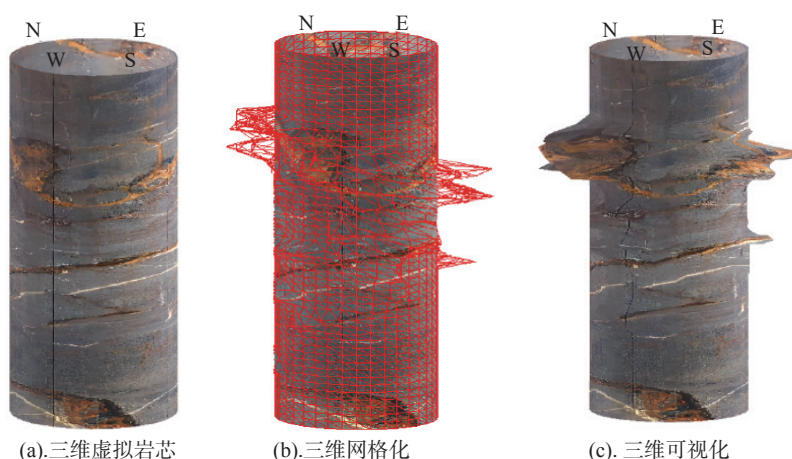


图9 钻孔孔壁的三维可视化图

Fig. 9 3D visualization of borehole wall

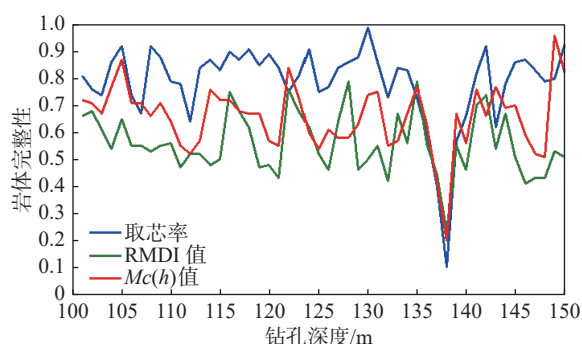


图10 钻孔岩体完整性分析

Fig. 10 Integrity analysis of borehole rock mass

5 结论

(1) 针对浑水或有贯穿溶洞孔壁的复杂探测环境, 采用孔壁超声成像与声波扫描的方式能够克服传统光学探测技术的不足。该系统利用合成孔径成像与多频超声扫描技术, 能够更好地提高孔壁成像质量与溶洞探测能力, 改善因光学影像质量欠佳而导致的数据丢失等问题, 能够适用于复杂的地质结构和勘测环境下的钻孔综合勘测。

(2) 针对钻孔孔壁与孔周岩体结构的精细探测要求, 采用光学成像技术与孔周扫描技术能够分别获得孔壁与孔周 360° 的异常结构扫描信息。该系统利用孔壁的光学图像数据与声波扫描数据, 结合围岩隐伏构造解译、纹理智能拼接与识别、多源数据匹配与融合, 可为钻孔的三维可视化和钻孔的完整性评价提供数据支撑。

(3) 该系统能够实现深部地下空间及岩体结构的快速勘测, 特别是钻孔岩壁、孔内溶洞和近

场围岩的同步勘测, 具备高精度的多元信息综合勘测能力, 能够实现多形态结构和多尺度溶洞轮廓的同步勘测与智能识别。通过对数据结果进行解译和分析, 证实该系统能够为区域钻孔及钻孔周围的岩溶发育情况提供参考数据, 未来具有广阔的应用前景。

References

- HE J S, LI D Q, HU Y F, LING F, WANG J H. 2022. Geophysical exploration methods for strong interference urban underground space[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 19(5): 559-567 (in Chinese with English abstract).
- HU L L, HUANG D J, HE H, YANG R. 2022a. Application of comprehensive geophysical exploration method in geological disaster of karst collapse in Northwest Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 36(1): 165-171 (in Chinese with English abstract).
- HU L L, HUANG D J, XIE S B, ZENG X Y, YANG R. 2022b. Application of comprehensive geophysical exploration technology on karst cave detection at a limestone mine: an example of Dingxiangshan limestone mine in Guigang city of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 36(6): 1182-1189 (in Chinese with English abstract).
- LIN X C, SU W S, CHEN Z G. 2012. Acoustic borehole televiewer and its application to the site investigation of underground building[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 9(3): 263-268 (in Chinese with English abstract).
- LIU Y X, GAO M S, ZHAO H S, HE S L, LI Z G, ZHANG Z C. 2020. Detection of overlying rock structure and identification of key stratum by drilling and logging technology[J]. Journal of Mining and Strata Control Engi-

- neering, 2(2): 81-89 (in Chinese with English abstract).
- LONG X, SUN Z Y, ZHOU A G, LIU D L. 2015. Hydrogeochemical and isotopic evidence for flow paths of karst waters collected in the Heshang Cave, Central China[J]. *Journal of Earth Science*, 26(1): 149-156.
- MA L H, ZHAO H S, YIN Y L, WANG Y L, HE S L, LI B W. 2019. Lithological identification and rock structure analysis based on axial acceleration logging of inclined boreholes[J]. *China Metal Bulletin*, (10): 201-203 (in Chinese with English abstract).
- SHANG L N, PAN J, CAO R, ZHOU Q C, KONG X H. 2024. Structural characteristics of the Binhai Fault Zone in Jiangsu offshore -implications from gravity and magnetic data[J]. *East China Geology*, 45(1): 101-114 (in Chinese with English abstract).
- SUN P, WANG Q, WANG C Y, LIU J B, CHEN F, ZHANG J. 2023. Application of geophysical method in the interface exploration between backfill soil rock and bedrock of the mine pit[J]. *East China Geology*, 44(4): 439-447 (in Chinese with English abstract).
- WANG L, CHEN Y, YU D Y, HU J P, XU Y H, YANG W, WANG T. 2022. Seismic airgun-the key technology of future urban underground space exploration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(12): 4750-4759 (in Chinese with English abstract).
- WANG L F, LIU H S, TONG S Y, YIN Y X, XING L, ZOU Z H, XU X G. 2015. Retrieving drill bit seismic signals using surface seismometers[J]. *Journal of Earth Science*, 26(4): 567-576.
- WANG J C, TAO D X, HUANG Y Q, WANG C Y, HAN Z Q, HU S. 2019. Borehole imaging method based on ultrasonic synthetic aperture technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40(S1): 557-564 (in Chinese with English abstract).
- WANG J C, WANG C Y, DU Q, LUO P, HUANG J F. 2023. Research on 3D visualization of geological boreholes based on photo-acoustic combination measurement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(3): 649-660 (in Chinese with English abstract).
- WANG J C, WANG C Y, HAN Z Q. 2020a. Multi-frequency ultrasonic underground cavity scanning detection technology in borehole[J]. *Measurement*, 161: 107889.
- WANG J C, WANG C Y, HAN Z Q, JIAO Y Y, ZOU J P. 2020b. Study of hidden structure detection for tunnel surrounding rock with pulse reflection method[J]. *Measurement*, 159: 107791.
- WANG J C, XU H H, CHEN W, WANG C Y, HAN Z Q. 2022. Evaluation method for rock mass structure integrity based on borehole multivariate data[J]. *International Journal of Geomechanics*, 22(1): 04021248.
- ZHANG X L, XIE T, ZHOU W, GAO H, DENG D, QU J Y. 2023. The application of the opposing coils transient electromagnetic method and microtremor survey method in shallow karst detection[J]. *Coal Geology & Exploration*, 51(12): 157-166 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG H, ZHOU Q P, JIANG Y H, JIN Y, CHEN Z, JIA Z Y, MEI S J. 2023. Sublacustrine sedimentary topography detection and analysis of Poyang Lake based on sub-bottom profiler[J]. *East China Geology*, 44(3): 313-322 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU L M, WANG F G, XIAO G Q, FU D G, LUO R. 2016. Experimental investigations of rock mass for south bank expansion project of Kariba power station by comprehensive logging[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 33(12): 109-112 (in Chinese with English abstract).
- ZOU C C, SHI G, PAN L Z. 2004. Acoustic borehole images for fracture extraction and analysis in second pre-pilot Drill-hole of CCSD[J]. *Journal of Earth Science*, 15(1): 123-127.

附中文参考文献

- 何继善, 李帝铨, 胡艳芳, 凌帆, 王金海. 2022. 城市强干扰环境地下空间探测技术与应用[J]. *工程地球物理学报*, 19(5): 559-567.
- 胡磊磊, 黄德军, 何辉, 杨荣. 2022a. 综合物探在桂西北岩溶塌陷地质灾害中的应用[J]. *矿产与地质*, 36(1): 165-171.
- 胡磊磊, 黄德军, 谢绍彬, 曾宣源, 杨荣. 2022b. 综合物探技术在石灰石矿山溶洞探测的应用研究——以广西贵港市定祥山石灰石矿山为例[J]. *矿产与地质*, 36(6): 1182-1189.
- 林孝城, 苏文生, 陈宗刚. 2012. 声学钻孔电视及在地下建筑物选址调查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 9(3): 263-268.
- 刘垚鑫, 高明仕, 赵华山, 何双龙, 李振国, 张志聪. 2020. 钻孔测井技术探测覆岩结构及其关键层判识[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2(2): 81-89.
- 马良慧, 赵华山, 尹杨林, 王言龙, 何双龙, 李笔文. 2019. 基于仰斜钻孔轴向加速度测井的岩性识别与岩体结构分析[J]. *中国金属通报*, (10): 201-203.
- 尚鲁宁, 潘军, 曹瑞, 周青春, 孔祥淮. 2024. 基于重磁数据研究江苏岸外滨海断裂带及邻区构造特征[J]. *华东地质*, 45(1): 101-114.
- 孙平, 王谦, 王重阳, 刘俊伯, 陈峰, 张建. 2023. 物探方法在采矿坑回填土石与基岩分界面勘探中的应用[J]. *华东地质*, 44(4): 439-447.
- 王栎, 陈颢, 于大勇, 胡久鹏, 徐逸鹤, 杨微, 王涛. 2022. 未来城市地下空间探测的关键技术——大陆气枪震源[J]. *地*

- 球物理学报, 65(12): 4750-4759.
- 汪进超, 陶东新, 黄燕庆, 王川婴, 韩增强, 胡胜. 2019. 基于超声波合成孔径技术的钻孔成像方法[J]. 岩土力学, 40(S1): 557-564.
- 汪进超, 王川婴, 杜琦, 罗鹏, 黄俊峰. 2023. 基于光声组合测量的地质钻孔三维可视化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 42(3): 649-660.
- 张学亮, 谢涛, 周炜, 高辉, 邓冬, 曲靖祎. 2023. 等值反磁通瞬变电磁和微动勘探在浅部岩溶探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 51(12): 157-166.
- 张鸿, 周权平, 姜月华, 金阳, 陈孜, 贾正阳, 梅世嘉. 2023. 基于浅地层剖面仪的鄱阳湖水下沉积地形探测与分析[J]. 华东地质, 44(3): 313-322.
- 周黎明, 王法刚, 肖国强, 付代光, 罗荣. 2016. 卡里巴电站南岸扩机工程岩体特性综合测井试验[J]. 长江科学院院报, 33(12): 109-112.

The detection system based on ultrasonic synthetic aperture imaging and multi-frequency scanning

WANG Jinchao, HAN Zengqiang, WANG Yiteng, LIU Houcheng, WANG Chao, HU Sheng
(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: It is particularly important for the underground engineering design and construction in karst development areas to identify the refined structure of hollow areas and underground morphology based on the structural characteristics of underground rock mass and survey techniques in deep voids. In order to further understand the “black box” structure of deep underground rock mass and master key technology of accurate exploration in underground space, this article introduces a detection system by borehole ultrasonic synthetic aperture imaging and multi-frequency scanning. According to the synergistic effect of optics and acoustics inside the borehole, this system derived a multi-frequency ultrasonic scanning technology suitable for detecting complex geological borehole rock mass, and designed a comprehensive survey equipment for borehole rock mass structure with intelligent perception and recognition capabilities. In addition, the system can synchronously survey borehole rock walls, caves inside the borehole, and near-field surrounding rocks in complex geological environments. Combined with its supporting analysis methods, we have constructed a comprehensive survey system for borehole rock mass structure integrating “observation, measurement, and characterization”. The test results show that the ultrasonic synthetic aperture imaging and multi-frequency scanning detection inside the borehole can perform 360° precise detection by going into inaccessible underground spaces along the borehole, enriching the survey data of rock structure in underground space development and construction, which has forward-looking and wide application prospects.

Key words: borehole detection; underground space; ultrasonic scanning; borehole wall imaging; information fusion