引文格式：王嘉伟,尤相骏,杨朝禹,等. 集成多波束声呐的沉井三维扫描系统设计与实践[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 98-101. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.05.021

集成多波束声呐的沉井三维扫描系统设计与实践

王嘉伟[1]，尤相骏[1]，杨朝禹[2]，王张江尧[3]，沈　蔚[2*]
（1. 浙江华展研究设计院股份有限公司，浙江 宁波 315010；2. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院，上海 201306；
3. 上海海洋大学 工程学院，上海 201306）

摘　要：针对现有的沉井下潜人工探测危险性高、测量误差较大等问题，设计了一种集成多波束测深声呐、角度传感器、机械旋转装置等设备的沉井三维扫描系统，实现了高效准确的大型沉井三维测量；并利用法线估计和匹配重构算法解决了外业测量产生的井壁点云不重合问题。工程应用表明，该系统稳定可靠，可快速准确获取沉井内部三维形态和进出水口的位置尺寸，对方形或圆形结构沉井的测量均取得了较高的精度，可为相关的城市基建施工提供准确的决策依据。

关键词：沉井探测；多波束声呐；三维扫描系统；点云处理；工程应用
中图分类号：P234.2　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0098-04

Design and Practice of Caisson 3D Scanning System Based on Multi-beam Sonar

WANG Jiawei[1], YOU Xiangjun[1], YANG Chaoyu[2], WANG Zhangjiangyao[3], SHEN Wei[2]
(1. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd., Ningbo 315010, China;
2. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In view of the high risk and big measurement errors of existing manual detection of caissons, we designed a caisson 3D scanning measurement system integrating multi-beam depth sounding sonar, angle sensor, mechanical rotation device and other equipment, which realized efficient and accurate 3D measurement of large caissons. Then, we used normal estimation and matching reconstruction algorithms to solve the mismatch problem of well wall point clouds generated by field measurement. Engineering applications show that this system is stable and reliable, and can quickly and accurately obtain the 3D internal shape of caisson and the location and size of inlet and outlet. It has achieved high accuracy in the measurements of square or circular structure caissons, which can provide accurate decision-making basis for related urban infrastructure construction.

Key words: caisson measurement, multi-beam sonar, 3D scanning system, point cloud processing, engineering application

沉井是市政工程中常见的排水设施，通常呈方或圆形筒状结构，由混凝土浇筑而成，并根据实际需要在合适位置预留进出水口[1]。在轨交施工、管线施工和智慧水务等方面，精确测量施工区域内污水沉井的口径、深度以及进出水口走向等数据对确保工程顺利进行和保护周围建筑地基安全等具有重要作用[2-3]。现有的污水沉井观测方法包括：①由潜水员水下探摸，并做定性评估，该方法无法获取定量数据，观测成果不够直观；②在污水沉井尚未通水前，利用激光测距仪、激光扫描仪等进行三维测量，但由于电磁波信号在水下衰减严重，在沉井通水后则无法使用[4]；③利用水下机器人搭载高清摄像头和探测设备进行测量，受限于测量范围，不适用于大型沉井；④利用沉井与周围土质的电阻率差异探测沉井周边的地质特性，利用二者在电场作用下的极化现象探测沉井空洞、裂缝和腐蚀区域等，但该方法很难具体展示沉井的水下三维特征。近年来国内外学者[4-11]提出了许多创新的测量思路，综合上述研究，本文提出了一种集成多波束测深系统、角度传感器模块、机械旋转装置等设备的水下三维扫描系统，以实现沉井内部高精度高效率的三维形态测量；并开发了配套的数据处理软件，利用法线估计和匹配重构算法解决因连接装置抖动造成的井壁点云不重合问

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42377453、41877283）；湖南省科技创新计划资助项目（2021RC4037、2023JJ30235）；宁波市“科创甬江2035”关键技术突破计划资助项目（2024Z263）。
第一作者简介：王嘉伟（1984—），本科，高级工程师，从事工程测量、工程变形监测及城市轨道交通工程安全风险管控等工作，E-mail：wangjiawei@whu.edu.cn。
通信作者：沈蔚（1977—），博士，教授，主要研究方向为海洋测绘、水声探测技术，E-mail：wshen@shou.edu.cn。

题，实现了高效准确的沉井三维参数提取。

1　新型沉井三维扫描系统设计

1.1　系统组成与连接

系统由多波束声呐系统、旋转机电系统、安装支架系统和相应的软件（多波束数据采集软件、维特角度采集软件、点云计算生成软件）构成。多波束声呐系统主要包括NORBIT WBMS多波束声呐及其配套控制、采集软件；旋转机电系统通过旋转电机的匀速运转，带动连接杆和声呐换能器实现360°匀速旋转，进而实现对沉井内部的全方位测量；安装支架系统连接维特智能WTGAHRS1角度传感器模块、声呐换能器和连接杆，并保证它们始终在水平位置上工作。测量工作时，通过支架将换能器放入合适的水深处，电缆将换能器采集的数据传输到声呐主机和电脑中进行处理和分析，多波束数据采集软件能实时显示声呐采集的数据和角度传感器模块的角度数据。

1.2　多波束测深系统工作原理

多波束测深系统的核心器件为收发系统和换能器。如图1所示，换能器位置已知，测量被测目标与换能器之间的角度 θ 和斜距 r 即可计算得到目标相对换能器的位置（h）。目前多波束大致分为两类：已知发射角度 θ，测量斜距 r；测量目标到多个换能器的斜距 r_i，求解角度 θ。多波束工作时，换能器向设定方向（通常为垂直向下）发射扇形声波，声波投射到水底形成条带状波束脚印，并从水底反射后由换能器接收。根据声波从换能器到水底来回的时间、声波速度以及声波发射角度可计算得到每个波束脚印的相对三维坐标。通过换能器的运动可获得面状区域的三维水深数据[12]。多波束测深系统中，发射换能器与接收换能器均具有指向性角度并呈正交的扇面，其波束脚印大小由二者指向性角度的乘积决定[13]。区别于传统的船载多波束走航式测量，本文系统通过设计的支架和连接杆，将角度传感器与声呐换能器刚性连接在一个垂直轴上，通过旋转机电系统同步旋转测量，实现水下地形的三维扫描。

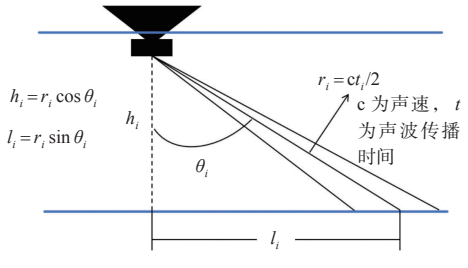


图1　多波束测深原理图

2　关键技术

2.1　多波束声呐测量技术

外业测量中，需根据现场情况对多波束采集参数进行调节。需调节的参数包括[14]：①波束开角，可通过控制软件进行调节，但波束开角过大，采集的数据质量较差、噪声较多，波束开角过小，则难以扫描完整情况，因此实际测量中采用不同波束开角进行多次测量；②波束倾角，多波束声呐换能器发射波束的整体角度可以向左或向右倾斜，测量时根据换能器与井壁的位置关系，采用不同的倾斜角度多次测量，以便扫描出井室垂壁完整信息；③声呐强度阈值，合适的阈值是降低噪声的重要步骤，只保留阈值范围内的回波数据，再通过多次冗余观测，确保获得高质量完整的井室三维点云数据。

由于井下水质差、杂物多、流量不稳定，且大型沉井中心往往与地面井盖不一致，因此声呐噪音和二次回波问题严重，滤波工作必不可少。前期滤波可通过点云软件（如CloudCompare）对点云着色后，根据声呐旋转中心与声波发散方向判断真实井壁以及井下进出水口位置，并手动剔除噪声点。为实现井口和进出水口尺寸的精确测量，系统开发了Matlab配套程序，将去噪后的点云按照不同方向进行投影着色，并测量尺寸和相关信息。

2.2　机电旋转支架系统

机电旋转收放系统由减速电机、轴承、连接杆、三脚架等组成，其中减速电机可实现每40 s旋转一周。当电机顺（或逆）时针旋转一周后，通过开关切换旋转方向，再次扫描一周。三脚架由多节长度为1 m的连接杆组成，连接杆一端与轴承相连，另一端与多波束换能器连接，具体长度由沉井深度和换能器的最佳测量位置决定。

2.3　位置与旋转角度测量

维特智能推出的WTGAHRS1传感器集成了高精度陀螺仪、加速度计、地磁场传感器；采用高性能的微处理器、先进的动力学解算和卡尔曼动态滤波算法快速求解模块的实时运动姿态；采用先进的数字滤波技术有效降低测量噪声、提高测量精度，其中 Z 轴航向角加入地磁传感器滤波融合，解决了6轴算法中由陀螺仪积分漂移引起的累计误差，可长期稳定输出航向角数据。沉井测量时，首先利用GPS RTK获取沉井位置中心坐标，并将其输入采集软件Qinsy中；再利用Python编程语言对WTGAHRS1输出的原始WIT协

议数据进行解码，并依据“标准格式”要求重新构造数据，使得转换后的数据能直接被Qinsy软件接入与利用[15]。为进一步提升传感器的便捷性，本文还利用PYQT框架将Python代码封装为一款可执行软件，不仅简化了传感器的配置与集成流程，还赋予了传感器模块“即插即用”的便利特性，极大地提高了工作效率与兼容性。

2.4 点云数据处理

工作站通过WBMS和Qinsy软件采集水深、姿态、定位等数据；利用多波束后处理软件对采集的多波束数据进行姿态校正、吃水改正，得到沉井水下三维点云数据；并利用CloudCompare软件去除噪点。由于测量时井内水流过快，使得连接杆抖动或偏移，进而导致往返测量井壁点云不重合，部分点云偏离整体（图2），因此本文利用法线估计算法计算得到井壁点法线，再利用广义迭代最近点算法根据法线进行点云匹配重构，重构效果见图3。

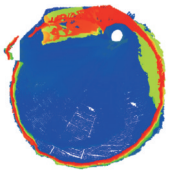


图2 圆井去噪后点云数据

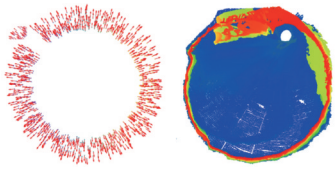


图3 匹配重构算法结果

3 工程应用实例

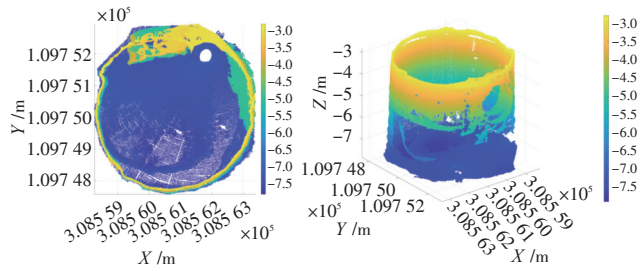
为验证本文系统在实际场景中的测量效果，选取内径为方形和圆形的两口污水沉井进行实验，利用多波束声呐系统扫描获取沉井水下三维形态，并分析进出水口位置与走向。

3.1 系统安装与数据采集

通过支架将Norbit多波束换能器与旋转机构、WTGAHRS1传感器等安装在同一轴上；再将多波束声呐和姿态数据连接到采集软件中，设置正确的端口和参数，检测系统各部分是否正常工作。具体施工步骤包括：①通过支架将多波束换能器置于井下合适位置（通常水面以下0.2~2 m）；②将角度传感器模块安置在三脚架顶端的中心处；③将所有传感器数据连接到采集软件中，检查位置信息、姿态信号等是否正常；④打开声呐采集软件，查看图像是否有严重弯曲变形等；⑤利用GPS RTK记录井中心位置坐标，输入到采集软件Qinsy的预设坐标中；⑥调节发射频率、功率、角度，获得满意的声呐图像。

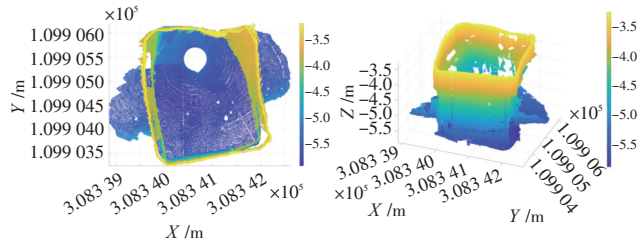
3.2 测量结果

在Matlab中对各要素进行投影，两口污水沉井的三维透视图和几何尺寸信息见图4、5。经数据处理降采样后圆形井室剩余1 036 995个点，井室呈圆形，半径约为4.95 m；从三维点云中可识别出两个疑似进出口。经数据处理降采样后方形井室剩余725 832个点，井室呈方形，南北约长2.76 m，东西约宽2.39 m；从三维点云中可识别出两个疑似进出口。经过一系列数据处理后，沉井的三维图像及其进出口均清晰可见，结果见表1，可以看出，本文系统获取的沉井内径和进出水口内径数据与沉井的实际数据一致，具有较高的测量精度。实验结果表明，本文系统可以准确获取沉井的水下三维形态数据，为城市基建施工提供决策依据。



a 俯视图 b 进出口

图4 圆形井室三维点云透视图



a 俯视图 b 进出口

图5 方形井室三维点云透视图

表1 测量数据与实际数据对比表/m

数据类型	圆井内径	圆井进出水口1口径	圆井进出水口2口径	方井内径	方井进出水口1口径	方井进出水口2口径
测量数据	9.9	1.56	1.82	2.76×2.39	1.60	1.43
实际数据	10	1.70	1.70	2.50×2.50	1.50	1.50

4 结 语

本文设计了一种基于多波束声呐的沉井三维扫描系统，并将其应用于实际工程，有效提高了地下沉井测量的精度与效率。

1）多波束换能器与角度传感器共轴安装后，通过设计的旋转机电装置可40 s完成一周沉井扫描，获取的点云精度高，测量效率高，解决了传统人工探摸的效率和精度问题，降低了现场测量风险。

2）系统具有轻巧、便捷、快速等优点，通常两人

操作10 min即可完成一口大型沉井的现场测量，大幅降低了外业测量的难度和强度。与DAS、BV5000等其他声呐系统相比，其安装和测量时间短、点云密度大，整体效益更高[4-5]。

3）当井下水流流速过高时，连接杆将发生抖动或偏移，导致往返测量的井壁点云出现偏差或不能完全重合，利用本文开发的法线估计和匹配重构算法可有效解该问题，确保获得完整的井室三维数据。

本文的研究方法和成果具有简便、高效、准确等特点，是各类涉水空间三维形态测量的新型手段之一，具备工程推广应用的潜力。

参考文献

[1] 黄胜兵. 沉井施工技术在市政地下工程中的应用[J]. 建筑科技,2024,8(4):71-74

[2] 唐庆. 自动测量技术在沉井下沉姿态测量中的研究及应用[J]. 山西建筑,2024,50(9):161-166

[3] 田宇航. 不排水沉井施工技术在市政工程中的应用分析[J]. 现代物业(中旬刊),2020(6):126-127

[4] 葛文,徐长虹. 双轴扫描声呐技术在污水沉井测量中的应用研究[J]. 城市勘测,2021(1):185-189

[5] 马鑫程,张旭东,贾旭. 基于三维声纳点云的水下沉井地形探测技术[J]. 海洋测绘,2021,41(6):44-48

[6] 芦云峰,谭德宝,刘勇,等. 深水大型沉井内部地形探测方法与实践[J]. 长江科学院院报,2019,36(12):157-163

[7] 吴立柱,游斌,何超,等. 水下三维声呐在锚碇沉井施工中的应用[J]. 中国港湾建设,2018,38(11):65-67

[8] 张云霞,吴嵩,李翅,等. 声呐检测系统在排水管道淤积调查中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(8):216-218

[9] Zdravkovic S K,Tsiampousi A. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering [C]. International Conference on Geotechnical Engineering Education,2020

[10] Williams B,Suryasentana S,Perry M,et al. Artificial Intelligence (AI) Driven 3D Point Scanner for Monitoring Soil Plug Hazards During the Installation of Suction Caisson Foundations[C]. 9th International Sut Osig Conference,2023:1-8

[11] Alice B,Chiara C,Emanuele F,et al. Non-invasive Methodological Approach to Detect and Characterize High-risk Sinkholes in Urban Cover Evaporite Karst: Integrated Reflection Seismics, PS-InSAR, Leveling, 3D-GPR and Ancillary Data: A NE Italian Case Study[J]. Remote Sensing, 2020,12(22):3 814

[12] 赵保成,徐健,徐坚,等. 基于无人船的多波束系统水下地形测量应用[J]. 地理空间信息,2023,21(9):65-68

[13] 苏涛. 多波束底质分类技术的研究与软件实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014

[14] 毕继鑫,刘强,吴文超,等. 利用无人船测量系统检测钱塘江护岸工程水下块石[J]. 测绘通报,2022(10):118-123

[15] 刘兆权,孙阳阳,锁旭宏,等. SPS361代替光纤罗经的可行性[J]. 中国港湾建设,2016,36(7):12-14

（上接第97页）

[7] Senyurek V, Lei F, Boyd D, et al. Evaluations of Machine Learning-based CYGNSS Soil Moisture Estimates Against SMAP Observations[J]. Remote Sensing,2020,12(21):3 503

[8] 贾燕,金双根,严清赟,等. 基于人工智能算法的CYGNSS数据土壤水分反演[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2021,13(6):645-652

[9] Eroglu O, Kurum M, Boyd D, et al. High Spatio-temporal Resolution CYGNSS Soil Moisture Estimates Using Artificial Neural Networks[J]. Remote Sensing , 2019 , 11(19):2 272

[10] Chew C,Shah R,Zuffada C,et al. Demonstrating Soil Moisture Remote Sensing with Observations from the UK Tech DemoSat-1 Satellite Mission[J]. Geophysical Research Letters,2016,43(7):3 317-3 324

[11] Chew C, Small E. Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture[J]. Geophysical Research Letters,2018, 45(9): 4 049-4 057

[12] Clarizia M , Pierdicca N , Costantini F , et al. Analysis of CYGNSS Data for Soil Moisture Retrieval[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2019,12(7):2 227-2 235

[13] Zhu Y, Guo F, Zhang X. Effect of Surface Temperature on Soil Moisture Retrieval Using CYGNSS[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022,112:102 929

[14] 李金超,张晖,马卫春,等. 基于支持向量机的星载GNSS-R土壤湿度反演方法[J]. 地球物理学进展,2023,38(5):1 960-1 966

[15] 郭斐,董桂芳,朱逸凡,等. 一种土地类型标签精细化的GNSS-R土壤湿度反演方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(1):47-55

[16] 陶庭叶,李江洋,朱勇超,等. 阶段模型修正的星载GNSS-R土壤湿度反演方法[J]. 测绘学报,2022,51(9):1 942-1 950

[17] 王迎强,严卫,符养,等. 机载GPS反射信号土壤湿度测量技术[J]. 遥感学报,2009,13(4):678-685

[18] Senyurek V, Lei F, Boyd D, et al. Machine Learning-based CYGNSS Soil Moisture Estimates over ISMN Sites in CONUS[J]. Remote Sensing,2020,12(7):1 168

[19] Viterbo P, Beljaars A C M. An Improved Land Surface Parameterization Scheme in the ECMWF Model and Its Validation[J]. Journal of Climate,1995,8(11):2 716-2 748