

公路桥梁水下桩基多波束声呐无损检测技术应用研究

段 翀

江苏现代蜀宁工程建设有限公司 江苏 南京 210000

摘 要:公路桥梁水下桩基作为隐蔽工程,其结构完整性和承载能力直接影响桥梁运营安全。传统检测方法受水深、浑浊度及可见性限制,难以高效、全面地获取桩基三维形态与缺陷信息。多波束声呐无损检测技术凭借其宽覆盖、高分辨率、非接触、可视化成像等优势,为水下桩基检测提供了新的技术路径。本文系统阐述多波束声呐的声学原理与系统组成,分析其在水下桩基检测中的作业流程、数据采集与处理关键环节,重点探讨声呐图像解译、缺陷识别及定量评估方法。在此基础上,总结该技术的适用条件和相对优势,同时指出现阶段在数据精度、环境适应性及标准化方面存在的挑战,并提出针对性改进方向,为公路桥梁水下桩基检测实践提供理论参考。

关键词:公路桥梁;水下桩基;多波束声呐;无损检测;声学成像

引言

公路桥梁桩基长期服役于水下环境,受水流冲刷、船舶撞击、水位变动及材料老化等因素影响,易产生缩径、露筋、蜂窝、空洞、冲刷掏空等隐蔽缺陷。一旦缺陷发展至一定程度,可能引发桩基承载力下降甚至突发性破坏,严重威胁交通运营安全。因此,定期对水下桩基进行检测评估,是桥梁管养工作中不可或缺的一环。传统水下桩基检测方法包括潜水员水下摄像、单波束测深仪扫测以及接触式探摸等。潜水员目视检查受水体透明度制约严重,在浑浊水流中几乎无法获取有效信息;单波束测深仪仅能获取有限测点的水深数据,难以形成连续的三维形貌;接触式探摸效率低且风险高,无法实现大面积普查。近年来,声学无损检测技术逐渐受到重视,其中多波束声呐系统以其高效的条带覆盖能力和精细的分辨率,在海底地形测绘、航道疏浚、水下管线探测等领域已得到成熟应用。本文旨在从技术原理出发,深入探讨多波束声呐用于水下桩基无损检测的可行性、作业方法、数据处理流程及关键解译技术,并对该技术的应用前景与现存瓶颈进行分析,以期桥梁管理部门和技术人员提供理论支撑和方法指导。

1 水下桩基检测的技术需求与传统方法局限

1.1 水下桩基的主要缺陷类型与检测需求

公路桥梁水下桩基多为钻孔灌注桩或预制打入桩,其常见缺陷包括:桩身缩径(因塌孔或混凝土离析所致)、钢筋保护层不足导致的露筋锈蚀、混凝土蜂窝麻面、内部空洞或不密实区、桩顶冲刷掏空、桩身倾斜以及表面附着物掩盖下的局部破损。上述缺陷的位置、规

模及严重程度差异较大,检测工作需解决三个核心问题:一是明确缺陷的空间位置(深度、方位);二是量化缺陷的几何尺寸和体积;三是评估缺陷对桩基承载力的影响程度。这就要求检测技术具备三维定位能力、较高分辨率和一定的穿透能力。

1.2 传统检测方法的固有缺陷

目前常用的水下桩基检测手段各有局限。水下摄影依赖于水体透明度,在长江、黄河等含沙量大的水域基本无法使用;单波束回声测深仪仅提供垂直方向水深点,对桩侧冲刷坑形态的描述非常粗略,更无法探测桩身表面缺陷;人工探摸不仅效率低下,且强水流下存在安全风险;而基于钻孔取芯的半破损方法成本高昂、抽样率低,且对桩身造成二次损伤^[1]。此外,上述方法获取的多是离散点数据,难以构建完整的桩体三维模型,不利于整体性安全评估。因而,业界迫切需要一种非接触、全覆盖、高精度的无损检测技术。

2 多波束声呐无损检测技术的原理与系统组成

2.1 声学基础与多波束测深原理

多波束声呐(MultibeamEchosounder,MBES)基于声波在水中的反射和散射特性工作。系统通过发射换能器向水下发射一定开角(如 $120^{\circ}\sim 150^{\circ}$)的扇形声脉冲,该脉冲在垂直航向方向呈窄条带,在沿航向方向呈宽指向性。声波到达桩基表面或河床后发生反射,返回的回波被接收换能器阵列接收。通过测量各波束的双程传播时间和回波角度,利用声速剖面校正,可计算出每个采样点的三维坐标(位置和水深),从而形成密集的三维点云。多波束的“多”体现在它同时发射和接收数十至数

百个独立波束，每条测线即可覆盖数倍于水深的宽度，显著提高了作业效率。

2.2 系统核心组成与测量模式

完整的多波束声呐系统包括声学探头（换能器阵列）、姿态传感器（提供船体横摇、纵摇、艏向及升沉数据）、定位系统（DGPS/RTK）、声速剖面仪（测量水中声速分层）以及数据采集与处理工作站。其中，高精度姿态补偿和声速修正是确保数据质量的关键。针对桩基检测，通常采用两种测量模式：一是“环绕扫测”，即测量船围绕桩基做圆周或螺旋航线，获取桩身四周的全面点云；二是“垂直剖面扫测”，沿桩长方向由顶部到底部进行纵向切片，用于分析桩身表面连续变化。两种模式结合可同时获取桩基整体形貌和局部细节。

2.3 分辨率和探测能力的技术参数

多波束声呐的分辨率取决于工作频率和波束角。高频（如 400kHz 以上）可获得厘米级分辨率，有利于识别细小缺陷，但声波衰减快，适用于浅水（< 50m）；低频（如 100kHz）探测距离远但分辨率相对较低^[2]。公路桥梁水下桩基一般位于水深几米至数十米的河流或近海，选用 200~400kHz 频率即可兼顾分辨率和作用距离。现代多波束系统的距离分辨率可达厘米级，角度分辨率可达 0.5°~1°，足以识别桩基表面的腐蚀坑、冲刷沟槽等典型缺陷。

3 多波束声呐检测的关键技术流程与数据处理

3.1 现场作业准备与数据采集要点

实施多波束检测前，必须进行细致的准备工作。首先，收集桥梁设计资料（桩位平面图、设计桩径、桩长、标高）及历年水文资料，初步确定检测重点区域。其次，进行现场踏勘，评估水流速度、通航条件及水下障碍物，设计安全的测线布设方案——环绕测线的半径应保证相邻测线重叠度不低于 20%，且测船与桩身保持安全距离（通常 5~10 米）。采集过程中，应保证姿态传感器与定位系统同步工作，并在测量前后进行声速剖面测量，以校正水体声速随深度变化。同时，注意记录水位高度，用于将测深数据统一转换至高程基准面。

3.2 原始数据预处理与误差校正

原始数据包含大量噪声和误差，须经多道预处理工序。首先是“涌浪滤波”，利用姿态数据中的升沉信息剔除波浪引起的瞬时水位波动；其次进行“声速校正”，应用声速剖面将传播时间转换为真实水深；然后是“横摇和纵摇校正”，消除船体晃动导致的点云倾斜；最后进行“导航延迟校正”，确保每个回波点对

应正确的平面位置。经过上述校正后，获得高精度三维点云数据集。需特别指出的是，若水体浑浊度极高或存在气泡幕，可能造成声波衰减和虚假回波，此时应调整发射功率或增益设置，并在后处理中实施“强度阈值滤波”剔除弱信号噪声。

3.3 桩基点云建模与形貌重建

预处理后的点云需通过聚类算法从河床背景中分离出桩基点云。由于桩基通常为圆柱形，可采用随机采样一致性（RANSAC）算法拟合圆柱面方程，初步确定桩中心轴线和直径。随后，基于桩基表面点云生成三角网格模型（TIN），并进行法向平滑处理，重建出连续的三维表面。通过该模型可精确量测桩顶高程、各截面直径、垂直度偏差及局部凹凸变化。若将不同时期的点云进行叠加对比，还能监测冲刷深度的动态发展。

3.4 缺陷识别的声学影像判读方法

多波束系统不仅记录回波到达时间，还记录回波强度（背向散射强度）。桩基表面不同材质、粗糙度和内部缺陷的回波强度呈现特征差异。完好混凝土表面反射较强且均匀，而蜂窝或空洞区域因声波散射增强、反射减弱，在声呐图像上表现为暗斑或纹理异常；冲刷坑则表现为桩周河床高程突降形成的凹陷边界。通过将三维形貌与回波强度图像叠加分析，可综合判断缺陷的性质和范围^[3]。目前，基于机器学习的目标检测算法正被引入辅助判读，通过训练样本实现缺陷自动分类，但仍需专业技术人员复核。

3.5 缺陷定量评估与报告编制

缺陷识别的最终目标是定量评价其对桩基承载力的影响程度。依据规范中的允许偏差和损伤等级标准，对检出的缩径、露筋、空洞等缺陷进行分级。例如，缩径超过设计直径 5% 且长度大于 1m 应列为显著缺陷，需进行加固或专项评估。报告中应包含：三维彩色云图、典型截面直径变化曲线、桩身垂直度偏差值、缺陷清单（位置、尺寸、类型）以及养护建议。所有成果应纳入桥梁档案数据库，以便后续比对。

4 技术适用条件、优势分析及现存挑战

4.1 相对优势及适用范围

多波束声呐检测相较传统水下目视或单波束测量，具有四项显著优势。一是“全覆盖”性，系统一次发射上百个波束，形成密集点云，可完整呈现桩身表面形貌、冲刷坑范围及护筒变形，避免点式测量的遗漏。二是“非接触”性，作业人员无需下水，规避了深水、急流等高风险环境的人身安全威胁。三是“高效性”，单

根桩基扫测时间通常不超过 30 分钟,配合无人船可日检十余根桩,适合桥梁群的大规模普查。四是“可复现性”,全部数据数字化存储,便于历史纵向比对和长期趋势分析。该技术适用范围明确:水深大于 5 m、流速低于 2 m/s 的水域效果最佳,尤其适用于桩基数量多、分布集中的公路大桥定期检测,以及在洪水、船舶撞击等灾害后的应急形变评估。

4.2 当前面临的技术瓶颈与局限性

实际应用中,多波束声呐仍受多方面制约。首先,水体环境干扰严重。高含沙量($>200\text{ mg/L}$)、气泡群或浮游生物会造成声波能量衰减和体积散射,信噪比显著下降,有效探测距离从设计的 50 m 锐减至不足 15 m,且声速剖面异常会引入桩径测量误差^[4]。其次,桩基表面附着物(藻类、贝类、垢层)改变声学反射特性,既可能掩盖真实的裂缝或剥落,也可能被误判为缺陷,增加后处理辨伪难度。第三,原理性局限无法突破——声波不能穿透混凝土或钢材,故对桩芯空洞、钢筋锈蚀、保护层厚度等内部质量问题完全无力检测,必须联合超声波跨孔法或地质雷达才能实现内外综合评定。第四,行业标准严重缺失。目前尚无针对公路桥梁水下桩基多波束检测的国家或行业规范,各单位在采集密度、滤波参数、缺陷分级和精度验证上各行其是,导致检测结果可比性差,法律效力不足,影响管养单位采信。

4.3 针对瓶颈的改进策略与发展方向

为克服上述局限,应从以下五方面协同推进。第一,硬件升级。研制适用于高浊水环境的宽频带、大功率换能器,结合脉冲压缩技术和实时声速剖面改正,提升抗干扰能力和测量精度。第二,多源数据融合。将多波束点云与水下激光扫描、声学全波形数据或磁力梯度信息融合,既补全阴影区几何,又可利用回波特征区分附着物与真实损伤,实现形貌与浅层材质同步分析。第三,加快标准制定。建议由行业主管部门牵头,尽快编制《公路桥梁水下桩基多波束声呐检测技术指南》,明确作业规程、点云处理参数、缺陷分级阈值、精度验证方法(如抽检比例不低于 10%并与水下录像比对)及报

告格式,为检测成果提供统一法定依据。第四,引入智能算法。利用深度卷积神经网络进行声呐图像的自动去噪、边界分割和缺陷识别,减少人工判读的主观性,提高一致性和处理效率。第五,建设大数据平台。将历次检测数据纳入桥梁健康监测系统,结合水位、流速等环境参数,通过趋势分析识别冲刷加速或形变累积,建立预警预测模型,为养护决策提供科学支撑。综合而言,多波束声呐虽不能替代内部探伤,但通过硬件改进、融合扩展、标准规范、智能提效和平台集成,其作为水下桩基表面普查和动态监测的核心手段将愈加成熟可靠。

5 结语

多波束声呐无损检测技术为公路桥梁水下桩基的安全评估提供了一种高效率、高精度的非接触式解决方案。通过宽覆盖三维点云成像,该技术能够清晰呈现桩基表面形貌和冲刷状态,有效识别缩径、露筋、蜂窝等典型缺陷,弥补了传统潜水员目视和单波束测深方法的不足。然而,其应用效果高度依赖作业环境、数据处理质量和判读经验,在水体浑浊、附着物干扰及内部缺陷探测方面仍存在技术瓶颈。未来应着力于硬件改进、多源融合、标准建设和智能化判读四个方向,推动该技术从“可用”走向“普适”和“可信”。公路桥梁管养部门应结合具体工程条件合理选用该技术,并配套完善检测周期和档案管理机制,以充分发挥其在保障桥梁运营安全中的支撑作用。

参考文献

- [1] 李国平,王海涛,张建.多波束声呐在桥梁水下桩基检测中的应用前景分析[J].公路交通科技,2022,39(6):88-94.
- [2] 陈勇,周明,刘洋.基于多波束三维点云的水下结构缺陷自动识别算法研究[J].测绘学报,2023,52(2):315-323.
- [3] 赵志刚,孙磊,王丽.浑浊水域多波束声呐信号衰减特性与增益控制策略[J].海洋技术学报,2024,43(1):55-62.
- [4] 刘建平,杨华,郑晓.桥梁水下桩基检测技术现状与发展趋势综述[J].桥梁建设,2023,53(4):112-118.