

无人设备应用于物流基础设施水下检测的研究现状及热点

——基于CiteSpace的可视化分析

冯飞宇, 吴志强

福建理工大学交通运输学院, 福建 福州

收稿日期: 2026年9月13日; 录用日期: 2026年10月4日; 发布日期: 2026年10月16日

摘要

随着港口、航道、桥梁等物流基础设施持续运行, 其水下结构状态直接影响物流运输安全与运行效率。传统人工水下检测存在作业风险高、效率有限、成本较高等问题, 无人船、水下机器人等无人设备逐渐应用于基础设施检测。本文基于中国知网和万方数据库2002~2024年相关文献, 运用CiteSpace对512篇有效文献进行可视化分析, 从年度发文、作者与机构合作、关键词共现及聚类等方面梳理研究现状与热点。研究发现, 无人船、传感器、深度学习、目标识别和水下检测是主要研究方向, 研究正由单一设备应用向多传感器融合、智能识别和自主作业发展。从物流视角看, 无人化水下检测可为港口、航道及桥梁等基础设施的状态感知、风险预警和预防性维护提供技术支撑, 从而保障物流运输的连续性与安全性。

关键词

CiteSpace, 无人设备, 物流基础设施, 水下检测, 基础设施运维

Current Status and Hotspots in the Application of Unmanned Equipment for Underwater Inspection of Logistics Infrastructure

—A Visualization Analysis Based on CiteSpace

Feiyu Feng, Zhiqiang Wu

School of Transportation, Fujian University of Science and Technology, Fuzhou Fujian

Received: September 13, 2026; accepted: October 4, 2026; published: October 16, 2026

文章引用: 冯飞宇, 吴志强. 无人设备应用于物流基础设施水下检测的研究现状及热点[J]. 统计学与应用, 2026, 15(10): 65-74. DOI: 10.12677/sa.2026.1510228

Abstract

With the continuous operation of logistics infrastructure such as ports, waterways, and bridges, the condition of their underwater structures directly affects the safety and efficiency of logistics transportation. Traditional manual underwater inspection involves high operational risks, limited efficiency, and relatively high costs. Unmanned vessels and underwater robots have therefore been increasingly applied to infrastructure inspection. Based on relevant literature from the CNKI and Wanfang databases from 2002 to 2024, this study uses CiteSpace to conduct a visual analysis of 512 valid publications, examining the research status and hotspots from the perspectives of annual publications, author and institutional collaboration, keyword co-occurrence, and clustering. The results show that unmanned vessels, sensors, deep learning, target recognition, and underwater inspection are the major research directions, with research developing from single-device applications toward multi-sensor fusion, intelligent recognition, and autonomous operations. From a logistics perspective, unmanned underwater inspection can provide technical support for condition monitoring, risk warning, and preventive maintenance of ports, waterways, and bridges, thereby helping ensure the continuity and safety of logistics transportation.

Keywords

CiteSpace, Unmanned Equipment, Logistics Infrastructure, Underwater Inspection, Infrastructure Operation and Maintenance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

物流系统的稳定运行不仅取决于运输工具、运输组织和信息系统,还依赖港口、航道、桥梁等基础设施形成的运输网络。对于水运物流和跨区域综合运输而言,港口码头承担货物集疏运和装卸转换功能,航道承担水上运输通行功能,跨江跨海桥梁则连接不同区域的公路、铁路及其他运输网络。这些设施长期处于水流冲刷、腐蚀以及复杂水文环境中,水下结构一旦发生裂缝、冲刷、变形等病害,可能影响设施正常运行,进而增加物流运输的不确定性[1]。因此,物流基础设施水下检测不仅是工程安全问题,也是保障物流运输网络稳定运行的重要环节。

传统人工检测通常需要潜水员或检测人员进入水下环境开展探摸和数据采集,具有安全风险较高、检测范围受限、效率不高等特点。当桥梁、港口等设施处于繁忙物流通道时,检测还可能协调作业窗口,避免对正常运输活动产生影响。随着人工智能、传感器、通信、自主控制和机器视觉等技术的发展,无人船、水下机器人等设备能够搭载声呐、摄像头等传感器进入复杂水域开展检测,在降低人工风险的同时提高数据采集能力[2]。

从物流专业视角来看,无人设备研究的最终意义并不只是提高某一项检测算法的精度,而在于通过更安全、更及时、更连续的基础设施状态感知,为物流运输安全和基础设施维护提供信息支持[3]。由此,本文以“无人设备技术-水下检测-物流基础设施-智能运维-物流运输保障”为主线,在CiteSpace分析框架的基础上,对相关研究现状、热点和发展趋势进行梳理,并讨论其在物流领域中的应用价值。

2. 数据来源及研究方法

2.1. 数据来源

本文分析的文献数据来源于中国知网(CNKI)和万方数据库。研究以“水下无人船”“水下桥墩检测”“水下图像识别技术”“无人船传感器技术”等为关键词进行高级检索,检索资源限定为学术期刊,时间范围为2002~2024年,并选取北大核心、CSSCI和CSCD收录的高质量文献。初步获得538篇文献,在剔除相关度较低及重复文献后,最终获得512篇中文文献作为研究样本。

2.2. 研究方法

本文采用CiteSpace可视化分析软件对样本文献进行分析。CiteSpace能够通过共现分析、聚类分析和突现分析等方法揭示研究领域的知识结构、研究热点及其演变趋势。本文主要分析年度发文量、作者合作网络、发文机构、关键词共现、关键词聚类以及关键词突现,并在此基础上本文新增文献共被引分析与引用分析:文献共被引通过识别同时被多篇文献引用的参考文献集合,揭示领域的核心知识基础、学术共同体与研究范式演进路径;引用分析通过统计文献被引频次,筛选高影响力奠基性文献,定位领域发展的关键拐点。

针对年度发文趋势,本文采用逻辑斯蒂增长模型替代简单线性拟合。该模型符合技术成长的S型曲线规律:

$$y = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}}$$

式中, y 为第 t 年的发文量, K 为发文量饱和上限, r 为内在增长速率, $(t-t_0)$ 为增长拐点对应的年份。通过拟合结果可定量判断领域所处的发展阶段,为研判未来走向提供更可靠的量化依据。

3. 区域物流研究现状

3.1. 年度发文量分析

研究对2002~2024年512篇文献进行了统计,相关研究总体呈现由早期缓慢增长到快速发展、随后有所下降的趋势,如图1所示。为进一步量化研判领域发展阶段,本文采用逻辑斯蒂增长模型对2002~2024年发文量进行拟合,得到拟合参数:饱和年发文量 $K \approx 102$ 篇,内在增长速率 $r = 0.21$,增长拐点 $t_0 \approx 2021$ 年,模型拟合优度 $R^2 = 0.87$,显著高于线性拟合结果,更能反映技术演进的客观规律。2002~2015年属于研究萌芽阶段,年均发文量低于饱和值的10%,研究主要集中于传统人工检测方法及无人设备的初步探索;2016~2023年发文量增速持续提升,2021年达到增长拐点后增速逐步放缓,传感器、人工智能技术的突破推动研究进入规模化应用探索阶段,2023年发文量接近饱和值;2024年发文量出现回落,标志着领域从“量的扩张”转向“质的深化”,单纯设备与算法层面的增量研究减少,面向实际场景的系统性解决方案研究将成为新的增长动力。

从物流基础设施发展的角度看,研究数量变化体现了无人设备由实验性技术向实际基础设施检测工具发展的过程。早期研究主要解决“是否能够完成水下检测”的问题,之后开始关注“如何提高检测精度、定位能力和设备可靠性”,近年来则更加关注自主作业和智能识别。对于物流而言,这意味着基础设施状态信息可以逐步从低频、人工获取向更加连续和智能的方式转变,为物流通道安全管理提供更及时的数据支持。

3.2. 研究作者分析

研究对作者合作网络进行了分析,排名前十的作者发文量均在2篇以上,其中付传宝发文6篇、渠

继东发文 5 篇, 如表 1 所示。作者合作图如图 2, 整体呈现分散化、小范围合作特征。发文量大于 1 篇的高产活跃作者共发文 33 篇, 如表 1 所示, 占相关统计文献的 7.91%, 说明目前尚未形成高度集中的核心作者群。

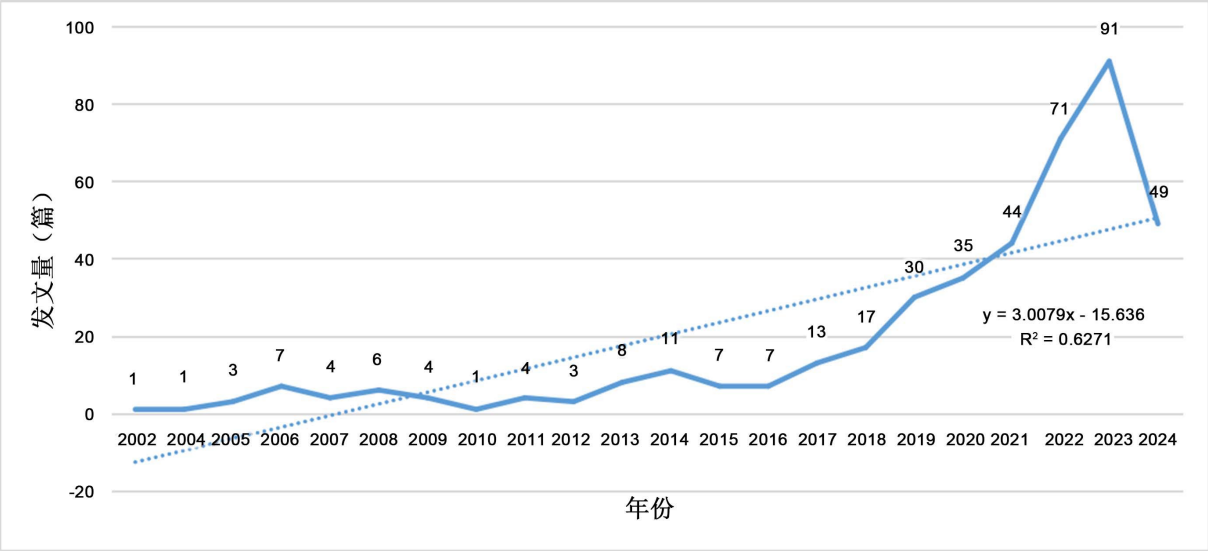


Figure 1. Annual publication trend of the literature
图 1. 文献年度发文量趋势图

Table 1. Author publication statistics for “Unmanned Equipment in Underwater Bridge Pier Inspection”
表 1. “无人设备应用于水下桥墩检测” 作者发文量表

作者	发文量	作者	发文量
付传宝	6	朱炜	2
渠继东	5	张际春	2
刘愉强	4	赵勤勇	2
叶家玮	4	唐旭东	2
周念福	4	王慧芳	2

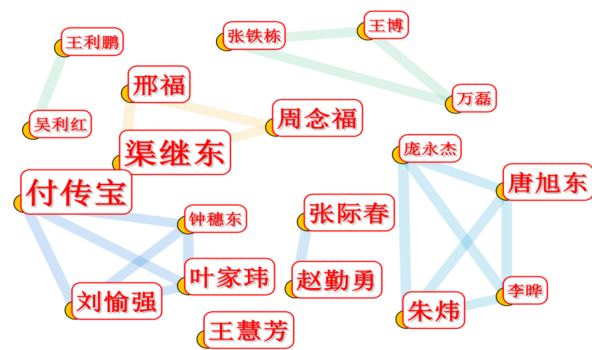


Figure 2. Author collaboration network
图 2. 作者合作网络图谱

从物流应用角度来看, 无人设备水下检测本身具有明显的交叉学科属性。一方面需要船舶、水下机器人、传感器、人工智能等技术; 另一方面又需要交通运输、物流管理、基础设施管理等专业对实际应用场景提出需求。如果研究主体长期分散在单一技术方向, 就可能出现设备性能较强但物流应用不足的问题。因此, 未来应加强技术研发人员与港口、航运、桥梁管理以及物流企业之间的合作, 将检测效率、识别精度等技术指标进一步转化为运输安全、维护效率和物流运行连续性等应用指标。

3.3. 发文机构分析

表 2 显示, 哈尔滨工程大学、中国船舶科学研究中心、大连海事大学、福州大学、华南理工大学等机构在相关研究中较为活跃。图三所示, 高校与交通企业、科研机构、物流企业及基础设施管理单位之间存在不同程度的合作。整体而言, 研究机构合作具有多元化特点, 但机构合作网络密度仅为 0.0041, 跨机构协同仍有较大提升空间。

对于物流领域而言, 产学研协同尤其重要。高校和科研机构能够提供无人船自主导航、传感器、机器视觉、深度学习等技术, 而港口、航运和物流企业则能够提供真实的作业环境、检测需求和运营数据。双方结合后, 可以形成“实际物流需求 - 无人设备检测 - 数据分析 - 基础设施维护 - 物流运行反馈”的闭环。因此, 未来研究应进一步从设备研发向真实物流场景应用延伸(图 3)。

Table 2. Ranking of institutions by publication quantity for “Unmanned Equipment in Underwater Bridge Pier Inspection”
表 2. “无人设备应用于水下桥墩检测” 发文机构发文量排名

序号	发文机构	发文量(篇)
1	哈尔滨工程大学	5
2	中国船舶科学研究中心	4
3	大连海事大学	3
4	福州大学	3
5	华南理工大学	3
6	东南大学	3
7	广西大学	3
8	国家海洋局第一海洋研究所	2
9	山东交通学院	2
10	中国人民解放军海军工程大学	2

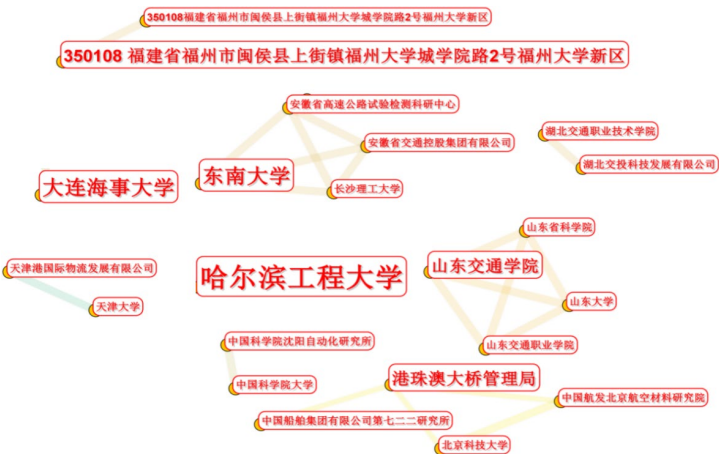


Figure 3. Institution collaboration network
图 3. 发文机构合作网络图谱

4. 物流基础设施水下无人检测：热点与演变趋势

4.1. 关键词共现热点分析

原研究的关键词共现网络包含 220 个节点和 345 条连线，网络密度为 0.0143。图 4 和表 3 所示，高频关键词主要包括无人设备、无人船、深度学习、传感器、水质检测、路径规划、水下检测和目标识别等。其中无人船出现 47 次，中介中心度为 0.79；深度学习出现 11 次，中心度为 0.20；传感器出现 10 次，中心度为 0.24；无人机出现 9 次；水下检测和目标识别分别出现 7 次。

这些关键词能够形成完整的水下检测技术链条：无人船或水下机器人作为移动作业平台，传感器负责采集水下环境和基础设施结构信息，自主导航和路径规划负责控制设备按照既定区域开展作业，机器视觉和深度学习负责识别裂缝等结构目标，最终将检测结果用于设施状态判断[4]。

其中，无人船与物流的关联尤其突出。港口和航道本身就是物流运输的重要节点和通道，无人船能够在不直接安排人员下水的情况下完成部分水下数据采集。因此，无人船不仅是一种检测设备，也可以被视为物流基础设施智能运维中的移动数据采集平台[5]。其检测结果进一步进入维护管理系统后，可以帮助管理者掌握设施状态，并为检修安排提供依据。

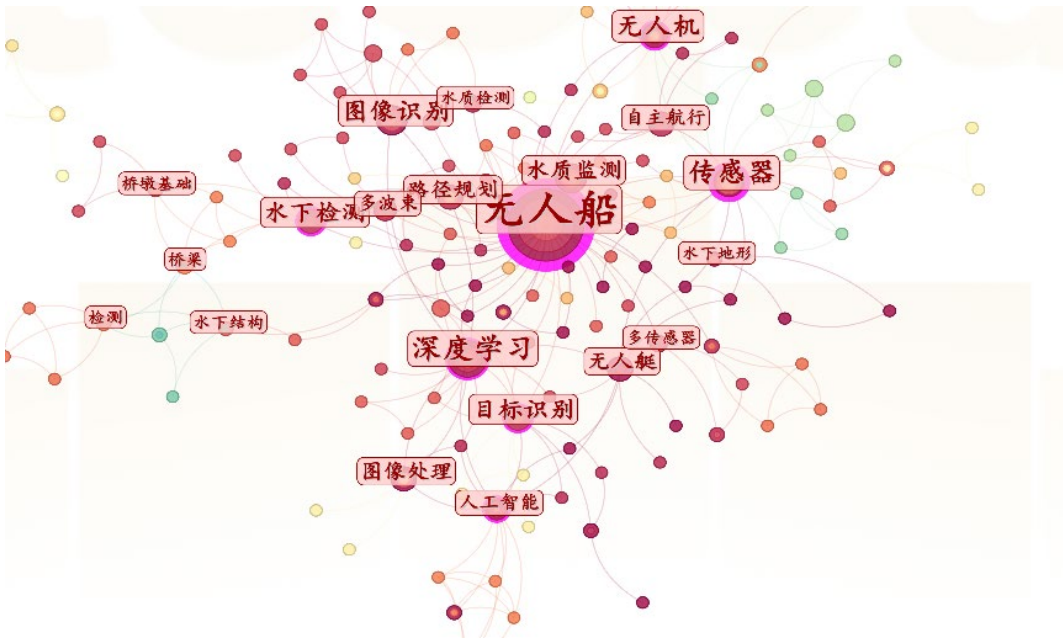


Figure 4. Keyword co-occurrence network for “Unmanned Equipment in Underwater Bridge Pier Inspection”
图 4. “无人设备应用于水下桥墩检测” 关键词共现图谱

Table 3. Ranking of keywords by frequency for “Unmanned Equipment in Underwater Bridge Pier Inspection”
表 3. “无人设备应用于水下桥墩检测” 关键词频次排名

序号	词频	中心度	关键词
1	47	0.79	无人船
2	11	0.2	深度学习
3	10	0.24	传感器
4	9	0.14	无人机

续表

5	8	0.04	图像识别
6	7	0.17	水下检测
7	7	0.15	目标识别
8	6	0.01	水质监测
9	5	0.03	路径规划
10	5	0.08	无人艇

4.2. 关键词聚类热点分析

研究采用 LLR 算法进行关键词聚类, 得到图 5 等主要聚类结果。聚类模块值 $Q=0.765$, 平均轮廓值 $S=0.9357$, 表明聚类结构较为显著。结合物流基础设施应用需求, 可以将这些研究热点归纳为环境感知与自主作业、检测硬件与数据采集、智能识别与决策支持三个层面。

第一, 环境感知与自主作业。无人设备需要在复杂水流、弱光和浑水环境下保持稳定运动, 因此声呐、摄像头等多传感器融合以及 SLAM、路径规划和自主导航成为重要研究方向[6]。研究表明, 相关研究已经开始使用强化学习等方法改善复杂水域中的自主控制能力。对于物流基础设施而言, 这类技术能够减少人工参与程度, 并提高桥梁、港口等设施状态数据的获取效率。

第二, 检测硬件与数据采集。水下高压、腐蚀和复杂水文环境对设备提出较高要求, 因此耐压舱、模块化机械臂、低功耗传感器以及抗干扰声呐等成为重要方向[7]。物流基础设施往往需要长期运行, 检测设备只有具备较好的环境适应性和稳定性, 才能形成连续的基础设施状态数据。

第三, 智能识别与决策支持。深度学习、机器视觉和目标识别技术能够从大量检测数据中自动提取异常信息, 减少完全依赖人工判读的情况[8]。从物流角度看, 智能识别的意义在于缩短从“采集数据”到“发现风险”的时间, 并为基础设施维护优先级安排提供支持。如果未来进一步结合基础设施历史数据, 就有可能形成状态预测和预防性维护机制。

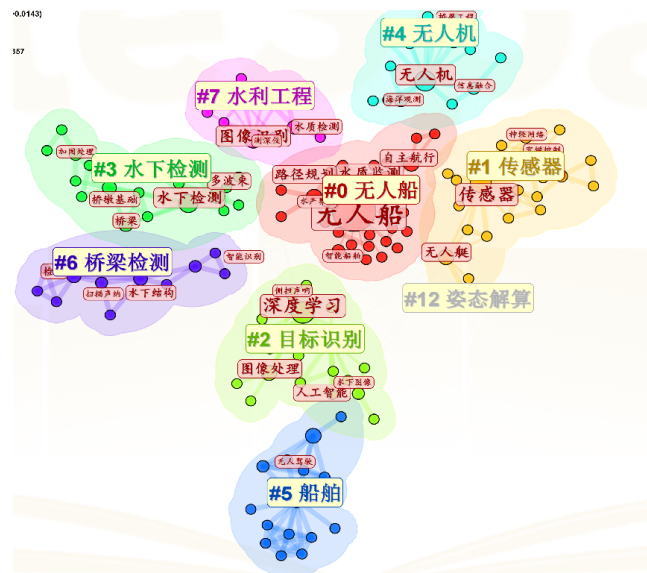


Figure 5. Keyword clustering map for “Unmanned Equipment in Underwater Bridge Pier Inspection”

图 5. “无人设备应用于水下桥墩检测” 关键词聚类图谱

4.3. 演变趋势分析

根据研究的关键词突现分析，如图 6 所示，相关研究可以划分为技术探索、系统集成和智能化发展三个阶段。早期研究以扫描声呐等技术为重点，主要解决水下目标探测问题；2005~2018 年逐步出现声呐与光学传感器融合，研究开始关注定位和数据融合；2019~2024 年“水下检测”成为重要研究方向，深度学习、机器视觉和强化学习等方法推动检测准确性和自主性提升。

从物流视角看，这一过程实际上对应基础设施管理能力的升级。第一阶段解决“看得见”，即获取水下结构信息；第二阶段解决“看得准”，即利用多传感器融合提高定位和检测质量；第三阶段进一步解决“用得上”，即把检测结果转化为基础设施状态信息，并服务于维护和物流运行决策。

未来研究的重要方向之一，是将无人设备形成的检测数据与物流基础设施管理平台连接起来。例如，针对港口、桥梁或航道建立长期检测数据库，根据不同设施的风险水平确定巡检周期；当系统识别出异常状态时，可以提前安排维修，并结合物流运输计划选择合适的作业窗口。这样能够在保障设施安全的同时，尽可能减少维护活动对物流运输的影响。

Top 12 Keywords with the Strongest Citation Bursts

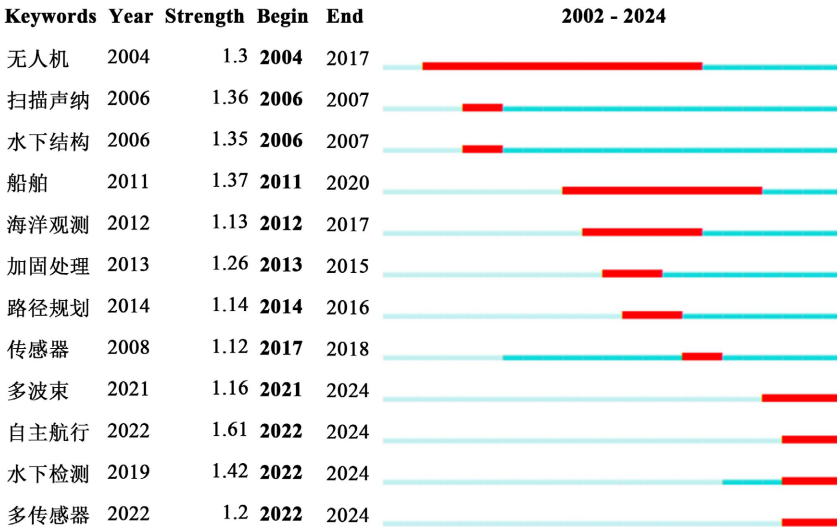


Figure 6. Keyword burst map for “Unmanned Equipment in Underwater Bridge Pier Inspection”
图 6. “无人设备应用于水下桥墩检测” 关键词突现图谱

5. 无人设备应用于物流基础设施水下检测的核心障碍与挑战

现有研究多聚焦于技术层面的优化升级，对落地应用中的系统性障碍关注不足。结合港口、航道、桥梁等物流基础设施的行业特性与实际运维场景，无人设备水下检测的规模化应用仍面临技术、经济、制度三重维度的挑战。

5.1. 关键技术瓶颈

面向物流基础设施的复杂水下环境，无人设备的作业能力仍存在明显短板。一是复杂水文环境下的可靠性不足，内河航道与近岸港口普遍存在水流湍急、水体浑浊、水下障碍物密集等问题，会导致声呐成像干扰、光学能见度不足、平台姿态控制难度陡增，极端工况下甚至存在设备失联、损毁风险；二是病害识别精度与泛化能力不足，现有深度学习模型多基于标准数据集训练，面对真实场景中裂缝、冲刷、

淤积等多样化病害形态, 以及不同水体环境下的成像差异, 识别准确率会出现明显衰减, 且难以区分结构性病害与非危害性附着物; 三是自主作业能力不足, 多数无人设备仍需人工远程操控, 复杂场景下的路径规划、避障、病害自主研判能力有限, 难以实现全流程无人化巡检, 限制了物流基础设施大范围、高频次巡检的落地。

5.2. 经济可行性与投入产出困境

从物流基础设施运维的视角看, 无人设备检测的经济性价比仍未形成显著优势。一是设备购置与运维成本高, 搭载高精度多波束声呐、光学成像系统、自主导航系统的专业水下检测无人船与水下机器人, 单台购置成本可达数十万至数百万元, 且水下设备损耗率高, 定期校准、维修、升级的持续投入较大; 二是应用场景的规模效应不足, 我国物流基础设施分散在不同区域、不同管理主体, 单个港口或桥梁的水下检测里程有限, 设备复用率低, 难以摊薄固定成本, 导致单次检测成本仍高于传统人工检测; 三是效益量化难度大, 无人设备检测带来的安全性提升、风险预警价值、物流运输中断损失减少等间接效益难以货币化核算, 使得基础设施管理单位的投入动力不足, 尤其是中小港口与地方航道管理部门更倾向于选择成本更低的人工检测方案。

5.3. 行业标准规范与准入机制缺失

当前无人设备水下检测领域尚未形成完善的行业标准体系, 制约了技术的规模化推广与规范化应用。一是检测技术标准缺失, 针对港口、航道、桥梁等不同类型物流基础设施的水下检测, 尚无统一的设备性能要求、检测作业流程、数据精度规范与病害评定标准, 不同厂商设备的检测结果可比性差, 难以作为基础设施运维决策的权威依据; 二是市场准入与资质管理空白, 无人设备水下检测作业的单位与人员缺乏明确的资质要求, 作业安全规范、数据保密规范、应急处置机制不完善, 存在作业安全与数据安全隐患; 三是与现有基建运维体系的衔接不足, 传统基础设施检测与养护制度仍以人工检测为核心制定, 无人设备检测的结果认可度不足, 无法直接纳入基础设施健康档案与养护管理流程, 限制了技术的应用空间。

6. 结论

本文基于 CiteSpace 对 2002~2024 年相关文献进行可视化分析, 并从物流基础设施运行保障角度重新梳理无人设备水下检测研究。研究发现, 相关研究经历了由技术探索到系统集成再到智能化发展的过程, 研究热点逐渐从扫描声呐等单项检测技术向无人船、传感器、目标识别、深度学习、自主导航和多传感器融合发展。作者与机构合作具有一定多元性, 但整体协同程度仍有提升空间。

从物流专业角度来看, 无人设备水下检测的核心价值主要体现在三个方面: 一是降低人工水下检测的作业风险, 提高物流基础设施巡检安全性; 二是提高基础设施状态信息获取的效率和及时性, 为港口、桥梁和航道等物流基础设施安全运行提供支持; 三是通过检测数据与智能运维体系结合, 为预防性维护和物流运输连续性提供信息基础。

同时也要看到, 无人设备在物流基础设施水下检测中的规模化应用仍面临技术可靠性不足、经济性价比不高、行业标准缺失等多重障碍。因此, 未来研究不应只关注无人设备本身的技术性能, 还应进一步研究其在物流基础设施运营中的实际价值, 形成“物流需求-无人巡检-智能识别-风险评估-维护决策-运输保障”的完整闭环。具体而言, 一是突破复杂水文环境下的精准检测与自主作业技术瓶颈, 提升设备环境适应性; 二是探索共享检测、第三方检测等商业模式创新, 降低应用成本, 提升经济可行性; 三是推动建立分场景的检测标准与行业规范, 促进检测结果与基础设施运维体系的衔接。只有实现

技术能力与物流运营需求的深度结合, 无人设备水下检测才能从单纯的工程检测技术进一步发展为物流基础设施智能运维的重要组成部分。

参考文献

- [1] 欧阳奕波, 刘晗, 栗天星, 等. 特大桥水下基础检测的技术应用研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(3): 201-205.
- [2] 杨晓明, 韦国志, 查庆, 等. 桥墩基础病害水下检测方法的对比与应用[J]. 公路与汽运, 2019(5): 128-132.
- [3] 刘晓阳, 杨润贤, 高宁. 水下机器人发展现状与发展趋势探究[J]. 科技创新与生产力, 2018(6): 19-20.
- [4] 肖乃贵. 基于多传感器数据融合的水下机器人定位方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [5] 黄明祥, 张健钦, 杨毅, 等. 1989-2022 年生态环境中人工智能应用的研究综述——基于 Citespace 的知识图谱分析[J]. 环境保护科学, 2024, 50(2): 8-16.
- [6] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [7] 崔庆宏, 王广斌, 刘潇, 等. 2008-2017 年国内 BIM 技术研究热点与演进趋势[J]. 科技管理研究, 2019, 39(4): 197-205.
- [8] 杨硕. 一种桥梁水下检测无人船[P]. 中国专利, CN202123373529.2. 2022-04-19.