

数字化技术在港口与航道工程施工中的应用研究

魏玉帅

中国电建集团港航建设有限公司, 天津 300450

[摘要]港口和航道工程作业水域广、水上水下交叉、船机密集,受风、潮、浪的影响大,传统的管理方式很难及时掌握现场的态势。文章以施工阶段可以落地的数字化技术为研究重点,分析了目前的应用现状以及数据标准不统一、海上通信不足、模型滞后等问题。重点论述水上水下地形一体测量和三维建模、船舶机械实时监控和智能调度这两个技术以及设备。从现场施工精细化管理角度出发,分析远程视频+无人机巡查、物料全过程追溯、质量安全移动端闭环检查、环保在线监测这四种手段的运作逻辑,用表格的形式呈现质量安全闭环流程。进而提出以统一编码、模型轻量化共享、进度成本实时比对、竣工数字化移交为主要内容的数据贯通和协同平台方案。

[关键词]港口施工; 航道工程; 数字化; 监控调度; 数据贯通

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20356

中图分类号: U615.35

文献标识码: A

Research on the Application of Digital Technology in Port and Waterway Engineering Construction

WEI Yushuai

PowerChina Harbour Co., Ltd., Tianjin, 300450, China

Abstract: Port and waterway engineering operations have a wide water area, cross water and underwater, and are densely populated with ships and machinery. They are greatly affected by wind, tide, and waves, and traditional management methods are difficult to timely grasp the situation on site. The article focuses on digital technologies that can be implemented during the construction phase, analyzing the current application status and issues such as inconsistent data standards, insufficient maritime communication, and model lag. The focus is on the two technologies and equipment of integrated measurement and 3D modeling of underwater terrain, real-time monitoring and intelligent scheduling of ship machinery. From the perspective of refined management of on-site construction, analyze the operational logic of four methods: remote video+drone inspection, full process traceability of materials, closed-loop inspection of quality and safety on mobile devices, and online monitoring of environmental protection. Present the quality and safety closed-loop process in the form of a table. Furthermore, a data integration and collaborative platform solution is proposed, which mainly includes unified coding, lightweight model sharing, real-time comparison of schedule and cost, and digital handover of completion.

Keywords: port construction; navigation engineering; digitization; monitoring and scheduling; data interconnection

引言

港口和航道工程施工现场呈带状或者点状分布,岸线长,水上定位和水下探测受到波浪、潮汐、浑浊度等干扰较大。进度依赖日报、质量检查靠纸质表格、船机调度靠经验、信息滞后且难以追溯。BIM、物联网、无人机等技术虽然已经逐渐进入到水运建设中,但是大多只停留在展示大屏或者局部试点上,没有真正地被应用到生产指挥当中。部分项目使用了三维地质模型以及船舶定位终端,但是模型与实体之间没有建立有效的数据通路,船机数据只

能在单个设备上显示,没有形成全局视角。

1 施工数字化应用现状及实际困难

目前港口航道施工的数字化实践主要是三维场地建模、视频监控、劳务实名制等。BIM模型多用于投标展示或者前期深化设计,施工开始之后更新频率急剧下降,逐渐与现场脱离。船舶定位技术在大型抓斗船、绞吸船上已经使用,但是数据只能供船端显示,不能回传到岸上调度中心进行整合。预制场内钢筋加工、构件浇筑虽然有项目尝试二维码追溯,但是推广面窄,不同的标段编码规则、

采集粒度不统一，信息不能跨工序流转。

实际困难可以分为四个。第一，水上测量条件差。涌浪造成测量船姿态剧烈变化，多波束测深数据噪声大，卫星信号在桥区、峡谷航道经常被遮挡，实时动态差分固定解不稳定。第二，施工区域通信基础设施薄弱，远海、防波堤延伸段没有 4G 和光纤覆盖，视频回传和实时指令难以下达，只能依靠北斗短报文或者低频次卫星通信。第三，船机设备品牌混杂，控制接口封闭，挖泥船、起重船、运泥驳数据协议不开放，加装传感器防盐雾、供电改造困难。第四，一线作业人员流动性大，信息系统学习成本高，操作繁琐容易被抛弃，系统要适应人的工作节奏而不是相反。困难要求数字技术具有抗干扰、轻前端、自闭环的特性才能得以扎根。

2 关键数字化技术与装备

2.1 水上水下地形测量与建模

水上水下地形一体测量是航道疏浚、港池开挖、基槽验收的基础。成熟的方案是把多波束测深和机载激光雷达结合起来，用无人测量船和水陆两栖无人机一起工作。测量船底部装有多波束换能器，一次扫测得到几百个水深点，同时携带惯性测量单元和全球导航卫星接收机，实时补偿船体的横摇、纵摇、升沉。岸上基准站用电台或者移动网络播发差分改正数，保证厘米级平面定位^[1]。无人机在水边线低空飞行，得到裸露滩涂、岸坡点云。将两组数据用潮位改正统一到同一个高程基准上，然后用自动滤波算法去除鱼群、气泡造成的虚假回波，得到水下地形曲面。

该曲面和地质钻孔柱状图相结合，得到三维地质模型，清楚地显示出了岩土界面以及软土夹层。疏浚施工时可以将设计断面叠加显示，实时计算超挖、欠挖方量，指导抓斗船司机调节下斗深度。该十万吨级航道拓宽工程用这种方法每天更新水下地形模型，施工员在调度室就可以判断边坡的稳定性，不需要频繁安排人工测深比对，测量效率大大提高，同时减少了测量艇在施工区穿梭的安全风险。采用具有脚本化批处理功能的点云处理软件，上午测量完毕后立即输出模型，防止由于处理延迟而失去指导意义。

2.2 船舶和机械实时监控调度

港口航道施工常常有抓斗挖泥船、耙吸船、运泥驳、起重船、打桩船等多种船机同时作业，再加上陆域土方车辆，调度不当就会出现船等卸、车等料的情况。在每艘船上安装北斗和 GPS 双模定位终端，采集主机转速、油耗、抓斗开合次数等工况参数，通过 4G 或者船载卫星终端发送到岸基平台。平台用不同的颜色图元来标识船舶的种类、是否满载、航速航向。系统预先设定电子围栏，一旦运泥

驳偏航或者抓斗船越界，就会立即向船载声光报警器和调度员发出报警信号。

挖掘机、推土机等陆上机械加装倾角传感器和回转编码器，配合机载显控终端实时显示铲尖与设计断面的三维偏差，操作手不需要反复看立尺、听哨声，根据屏幕提示就可以控制开挖深度，减少超挖。后台对每斗挖掘的轨迹和时间进行记录，用以做计量和工效分析的依据。调度算法综合考虑运距、卸泥点排队时间、潮汐窗口等各方面因素来给出运泥驳轮次的建议，用手机 APP 推送给船长。珠江口某吹填工程中使用这些方法后，运泥驳的平均等待时间减少了一半左右，避免了多艘船舶同时涌向同一个卸泥口造成堵塞的情况发生。实现监控调度时，船载终端的防护等级要达到 IP67 以上，天线和线缆接头要能承受盐雾的长时间侵蚀。平台要设置断网缓存，通信中断的时候本地保存数据，恢复之后自动补传，保证数据的完整性。

3 施工现场精细化管理手段

3.1 远程视频、无人机巡查

在预制场台座、出运码头、材料堆场及重要路口设置高清网络摄像机，夜晚使用红外或者补光保证图像可看。视频流集中接入硬盘录像机，同时推送至云平台，授权人员可以通过移动端或者 PC 端随时查看。系统自带安全穿戴识别算法，当检测到未佩戴安全帽或者救生衣的人时，现场音柱会发出语音提示，并且将该人的图像保存到违章记录中。无人机巡查使用带有 RTK 定位的多旋翼无人机，装有高像素可见光相机，按照设定航线自动起降。将拍摄到的正射影像和施工总平面图叠加在一起，从而对出土石方填筑区、临时道路占位区、材料堆场的摆放情况有直观的认识。在航道整治中，还可以用倾斜摄影技术对护岸砌块的排列、抛石理坡情况等进行倾斜摄影，得到可以量测三维实景模型，进行质量检查。无人机在海上作业应选择抗风等级不小于 6 级、机臂可以折叠的机型，机场箱内设除湿和充电恒温装置。

3.2 物料进场及使用全过程记录

大宗物料进场管理一直依靠人工点数和纸质磅单，容易出现错记、漏记的情况，并且事后很难进行追溯。改造路径为钢筋以捆为单位，出厂时由供应商粘贴抗撕裂 RFID 标签或者激光刻印二维码，内容包括炉批号、规格、重量。进场时地磅系统用车牌识别关联供货单，地磅员核对重量并用手持终端确认收货，数据实时进入物料管理模块。混凝土供应采用电子小票，搅拌站发料时产生唯一的编号，运输车到达现场扫码签收，系统记录到达时间、浇筑部位和方量，杜绝签单涂改^[2]。预制构件沉箱、方块、

梁板在浇筑前预埋抗金属 RFID 芯片, 写入构件编号和设计坐标, 养护、张拉、吊运等环节用手持机扫描记录时间、责任人, 形成连续的生命周期日志。构件出现质量问题时, 可以逆向查找原因, 即通过原材料的批号、搅拌记录来确定问题的影响范围。此做法需要在堆场外侧搭建无线读写网络或者使用长距离手持终端, 不能增加作业强度。

3.3 质量安全移动端检查与闭环

现场质量检查表多、责任不明、闭合证据不充分。移动端检查系统把分项工程检查标准作为电子清单, 沉箱安装垂直度偏差、混凝土裂缝宽度、模板拼缝错台量等都包含在内。检查人员携带工业手机或者平板, 一项一项地核对并拍照。对不合格项系统自动生成整改通知单, 规定整改期限和责任人, 用企业微信或者短信推送。责任人接到任务后现场处理, 用同一个 APP 拍整改后的照片并填写处理措施。检查人员复核时将原始问题照片和整改照片同时显示出来, 核对无误后点击闭合。所有的记录都带有时间戳和地理坐标水印, 不能事后补录。数据累积可以得到质量安全状态分布图, 找出高频次的缺陷以及薄弱班组。表 1 给出了该闭环的流程节点以及数字化记录方式。

3.4 施工环保在线监测

疏浚及陆域施工所造成的悬浮物、噪声、扬尘等属于环保管控的重中之重。在绞吸船和抓斗船作业区周围设置浮标式多参数水质监测站, 连续测量浊度、pH 值、溶解氧, 采样间隔可以设为 5 分钟。数据通过 LoRa 无线组网汇集到岸边采集器, 再经 4G 上传到平台。设定浊度阈值, 当浓度突然上升时, 平台会自动给施工船舶和项目部发出警报, 联动防污帘的收放或者提示停止作业。陆域施工区安装一体式噪声扬尘监测终端, 与围挡喷淋系统联动, 扬尘超标就启动喷雾降尘并录制短视频留存证据。监测数据通过标准接口推送到地方生态环境监管平台, 防止因为缺少数据而进行处罚。为了防止传感器被海上生物附着造成漂移, 浮标要定期清洗并且设置双传感器互校, 保证数据的可信度。

4 数据贯通与协同工作平台

4.1 数据统一编码与接入

多源异构系统协同运作之前要先确定统一的数据身份。工程分解结构编码是贯通的骨架, 覆盖单位工程、分

部工程、分项工程、构件等各个层次, 可以映射到合同清单项、进度计划任务上。构件编码是由标段号、部位码、专业码、顺序号组成。船机终端、环境传感器、视频摄像头等都具有唯一的编码, 且和空间位置或者所属构件相关联。数据接入层使用物联网消息队列遥测传输协议做轻量级上报, 适合于海上窄带通信。平台侧创建数据字典, 对字段的名称、类型、单位以及取值范围做出规定, 所有的第三方系统根据此规定来改造接口。该项工作应在项目前期以纪要的形式确定下来, 并列入分包合同的技术条款中。

4.2 施工模型轻量化和共享

设计阶段的多专业合成 BIM 模型体量大, 无法在普通移动终端和网页端流畅加载。需要把模型转换成 3D 瓦片或者索引化的三维场景流格式, 压缩几何信息, 保留属性参数, 上传到云端。用户不需要安装专业的建模软件, 在浏览器中就可以对模型进行旋转、剖切操作, 并可以查询构件的信息。模型权限分层共享, 监理工程师可在页面上用红线标注出质量通病, 并将标注内容同步到项目管理人员的视图里。模型版本同步管理, 每次根据设计变更或者实测数据进行更新后, 归档旧版本, 并且记录变更内容及批准人, 避免现场多版本混用。轻量化模型是各方讨论技术问题的共同基础, 可以有效地减少由于图纸理解不同而造成的返工。

4.3 进度成本实时比对与纠偏

进度和成本控制要将计划值、实际完成值、挣值放在同一个时间轴上进行比较。将进度计划加载到模型构件中, 对每一个任务输入它的计划开始时间、计划结束时间和预算成本。现场采用移动端报工、船机终端自动记录实际时间的方式, 模型相应改变显示颜色, 滞后区段用红色高亮表示。成本数据来源于物料验收系统、分包计量、船机台班统计等, 及时汇总到相应的工程项下。平台自带赢得值算法, 可以计算进度偏差、成本偏差, 画出 S 曲线。当某项成本差异连续两周大于一个阈值的时候, 系统就会发出警报, 提醒是否出现了船机效率下降、材料超耗等情况。经过对比发现北方某港区建设期间基床抛石工序成本偏高, 经查实是由于部分石料规格太大导致二次破碎量增大造成的, 及时调整了采石场筛分标准后成本得到了控制。数据驱动的纠偏比月底报表式的管理更具有时效性。

表 1 质量安全移动端闭环流程以及数字化记录方式

流程节点	责任角色	数字化工具与数据	时限要求
问题发现	检查员	移动端 APP 拍照、勾选检查项, 记录时间、GPS 位置、问题描述与等级	巡检发现即时录入
通知整改	系统自动	生成任务单推送至责任人, 包含整改要求与期限	5 分钟内发出
现场整改	施工班组长	接收任务, 整改后拍照, 填写措施和材料使用情况	一般问题 2 小时, 严重项 4 小时
复核验证	检查员	APP 调取历史记录, 对比原状与整改照片, 填写复核意见	整改完成后 24 小时内
统计分析	质量安全部	BI 看板按分包队、问题类型、时间段分析, 生成趋势图和整改率	每周自动更新

4.4 竣工数字化移交

竣工验收阶段的传统移交是以纸质档案、竣工图为主,查阅不方便、容易丢失。数字化移交的核心就是交付一个和实际完工状态一致的竣工信息模型和结构化数据库。竣工模型应以施工模型为基础,根据现场实测点云及设计变更进行修正,使空间位置、几何尺寸真实地反映实体^[3]。将设备铭牌参数、检验批电子文档、隐蔽工程影像、主要材料合格证等同模型构件关联起来。数据存储使用开放式的数据库格式,并且带有数据字典说明,方便运维单位进行检索、统计以及二次开发。移交前组织监理、施工、业主三方对模型与实体一致性进行检查,抽检合格后才予以签认。

5 结束语

港口与航道工程施工数字化不是把通用智慧工地方案简单地搬过来,而是要回答水上水下测量、海上通信、盐雾腐蚀、船机调度等各方面的特殊限制。文章从一线可操作的角度出发,对地形测量建模、船机监控调度、现场精细化管理、数据贯通平台等做了具体的介绍。从经验上

看,先做好统一编码、模型轻量化共享的工作,再逐步接入物联感知终端,追求单点闭环而不是大而全的系统上线,成功率会更高。进一步的工作应该从智能调度算法和实测数据的深度融合入手,从低轨卫星通信普及后实时控制的角度出发,加快培养具有水运施工知识和数据处理能力的复合型人才,使数字化技术真正融入施工生产流程中,成为不可替代的基本能力。

[参考文献]

- [1]殷艺箴,冷吉涛,刘勇.基于 BIM 的数字化施工技术在航道工程中的研究与应用[J].水上安全,2023(3):28-30.
 - [2]钟梓鑫.BIM 技术在港口航道施工中的综合管控分析[J].运输经理世界,2025(30):148-150.
 - [3]朱凯枫,梁海港,徐兴威.多式联运背景下港口航道工程设计优化研究[J].运输经理世界,2025(23):146-148.
- 作者简介:魏玉帅(1989—),男,汉族,山东省莒南县人,中级工程师,本科,山东交通学院港口航道与海岸工程专业,现从事工程技术质量管理工作,水运工程技术资料、质量质检验收、现场施工管理等。