

智慧机器人在施工期长距离输水管线和多级泵站系统中的应用研究

王 超

哈密市水利建设与安全中心, 新疆 哈密 839000

[摘要]长距离输水管线及多级泵站施工跨度大、监管对象分散,传统的监理手段不能对整个过程进行全方位的监控。以某供水工程为研究对象,创建云-边-端协同架构的智慧监理机器人系统,把高处云台机、便携式机器人、无人机等智能终端集成起来,对混凝土浇筑全过程实施智能监测,对输水管线展开高效巡检,对高风险作业实施安全管控。系统运行结果表明,混凝土浇筑监控覆盖率达到95%,安全隐患整改时间比以前缩短了90%,监理工作量提高了30%以上。经过研究发现,智慧机器人系统实现了从被动检查到主动预警、从经验判断到数据决策的转变,给同类线性水利工程智慧化监理提供了可以复制的技术方案。

[关键词]输水工程; 多级泵站; 机器人系统; 人工智能

DOI: 10.33142/aem.v8i6.20111

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Research on the Application of Smart Robots in Long Distance Water Pipeline and Multi stage Pump Station Systems during Construction

WANG Chao

Hami Water Conservancy Construction and Safety Center, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract: The construction span of long-distance water pipelines and multi-stage pump stations is large, and the supervision objects are scattered. Traditional supervision methods cannot comprehensively monitor the entire process. Taking a certain water supply project as the research object, a smart supervision robot system with cloud edge end collaborative architecture is created, integrating intelligent terminals such as high-altitude gimbal machines, portable robots, drones, etc., to intelligently monitor the entire process of concrete pouring, conduct efficient inspections of water pipelines, and implement safety control for high-risk operations. The system operation results show that the coverage rate of concrete pouring monitoring has reached 95%, the rectification time of safety hazards has been shortened by 90% compared to before, and the supervision workload has increased by more than 30%. After research, it has been found that the intelligent robot system has achieved a transformation from passive inspection to active warning, from empirical judgment to data decision-making, providing replicable technical solutions for intelligent supervision of similar linear water conservancy projects.

Keywords: water conveyance project; multi stage pumping station; robot system; artificial intelligence

引言

长距离输水管线、多级泵站系统属于典型的线性工程,作业面分散、管理跨度大、高风险作业集中,传统的手工巡查方式存在覆盖范围小、信息传递慢、不能实现全过程监管的不足。近些年来,人工智能、物联网、边缘计算这些技术飞速发展并且深入到工程管理当中。中南院研发出的AI智能监理旁站机器人,在抽水蓄能电站面板混凝土施工中得到了成功的应用,把计算机视觉、人工智能、边缘计算等技术有机地融合在一起,从而达到现场智能管理的目的。长江水电集团自主开发的水利水电智能建造平台,

把AI、物联网、大数据等技术融合在一起,创建起质量、安全、进度等八大主要功能模块,在全国近20个大型水利水电项目上得到运用。从以上可以看出智慧监理技术已经具备工程化的条件,但是长距离输水场景下系统的研究还比较缺乏。以某供水工程智慧监理机器人系统为依托,对它的架构设计、关键技术以及实施效果进行系统的分析,为类似工程提供借鉴。

1 智慧机器人在施工期长距离输水管线、多级泵站工程中应用需求分析

长距离输水管线和多级泵站工程的施工监理有三个

问题。第一,从空间上看,管线长度动辄上百公里,穿越的地形地貌也十分复杂,传统的手工巡查很难做到全覆盖、重点部位高频次监控,容易造成视野盲区和巡查间隔。第二,从时间上讲,混凝土浇筑、高空作业等重要工序需要全程监控,人工轮班制不能实现全过程无缝覆盖,并且夜间以及恶劣天气下巡检的质量也无法保证。第三,从管理方面来说,多级泵站同步施工、多个作业面同时推进,信息采集依靠人工记录,汇总分析慢,不能支持即时决策。

传统监理手段在应对上述挑战时局限性日益凸显。输水通道线形分布广、监管跨度大、人工巡查效率低,一次全域巡检要耗费两天时间。当监控覆盖不足、信息反馈滞后时,质量隐患、安全违规行为就无法被及时发现和处理,监理的纠偏、预防功能就被削弱了。对于长距离线性工程来说,用无人机巡航加 AI 智能识别一体化的智能管护体系来代替传统的巡检,可以将单次全域巡检时间从原来的 24h 缩短到 5h,证明智能感知技术在线性工程中是适用的。多级泵站属于集中性高风险作业区,塔机安装、脚手架搭拆等高空作业高度可达 20m 以上,对全天候、无死角监控有刚性要求。因此,创建面向长距离输水管线、多级泵站的智慧机器人监理系统,就是解决传统监理瓶颈的现实选择。

2 智慧机器人系统架构及关键技术

2.1 智慧监理机器人系统总体架构

系统用云-边-端三层协同架构设计。端侧由部署在泵站塔机平台上的高处云台机、关键作业面的便携式机器人、用于管线巡检的无人机等多源感知终端组成,形成固定和移动相辅相成、高空和地面相互配合的立体监控网络。边侧边缘计算节点设置在各个泵站现场,对视频流进行实时预处理以及初步智能分析,减少云端计算负担和网络传输延迟^[1]。云侧平台负责集中存储数据、进行深度学习推理、展现可视化结果以及发送预警信息等工作,给监理人员赋

予了远程控制的能力。系统硬件如表 1 所示。

该架构的优势就是分层解耦、协同调度。端侧设备各司其职,高处云台机依靠 25 倍光学变焦、红外夜视完成大场景态势感知任务,便携式机器人进入云台盲区获取细节影像,无人机沿着管线航线做周期性快速巡检,弥补固定监控的覆盖盲区。使用 2900 多台监测设备、8000 多个传感器实时采集数据,并结合 AI 分析、视频抓拍等技术,对施工风险和安全隐患进行预警,为同类系统架构的设计提供验证支持。

2.2 智慧机器人关键技术与功能实现

系统的核心技术有三个方面。一是多源数据融合感知技术,把视频图像、传感器数据、无人机航拍影像统一时空基准,创建施工场景的全面数字映射。将三十多年来成千上万技术人员、施工人员、监理人员的实践经验积累起来形成行业知识库,再借助 AI 技术对一线人员进行赋能,实现经验知识的数字化传承。二是轻量化 AI 算法模型,按照水利工程场景特性来设计适合的安全帽佩戴识别、临边防护检测、混凝土浇筑状态监测等特殊需求的专属算法,全部运行于边缘端进行实时推理。金华市试点工程利用 AI 慧眼智能识别功能,对施工现场动火作业不规范、未佩戴安全帽安全带、高空作业防护缺失等隐患进行实时监测、自动识别和即时预警。三是预警闭环管理机制,系统识别出异常之后会自动推送给监理人员移动端,并且跟踪整改落实情况,形成发现、预警、处置、复核、销号的标准流程。

3 智慧机器人在施工监理中的典型应用

3.1 混凝土浇筑全过程智能监测应用

混凝土浇筑是泵站工程的关键工序,混凝土的质量直接影响到结构的安全。多级泵站大体积混凝土浇筑具有方量大、连续作业时间长、温控要求高等特点,传统的监理模式下,旁站人员很难同时兼顾多个浇筑面,对于骨料级

表 1 系统硬件配置明细表

设备类型	数量	部署位置	主要技术参数	功能特点
高处云台机	3 套	各泵站塔机平台	400 万像素, 1/1.8 英寸 CMOS; 25 倍光学变焦; 红外照射距离 300 米; 白光补光全彩夜视; 防护等级 IP67; 宽温-40℃~70℃; H.265 编码; 三码流技术	智能分析精准识别人、车、非机动车; 支持 30 多种行为事件侦测; 超视距细节捕捉与全彩夜视监控; 适应极端户外环境
便携式机器人	3 套	各泵站关键作业面	400 万像素, 1/1.8 英寸 CMOS; 23 倍光学变焦; 红外照射距离 300 米; 白光补光; 防护等级 IP66; 宽温-40℃~60℃; MicroSD 卡本地存储	深度学习算法精准识别目标属性; 支持多种报警规则; SmartIR 防过曝技术; 适用于复杂户外场景
无人机监控球机	1 套	管线沿线及水库区	高密度计算与存储架构; 支持智能运维管理; 集成双千兆/万兆网口; 冗余电源	大范围周期性巡检; 适用于云计算、虚拟化等企业级负载; 保障数据连续性与安全

配、振捣时长和间距、入仓温度、层间间隔时间、养护措施等关键参数的控制主要依靠人工经验判断,纸质记录容易出现遗漏和追溯困难的问题。智慧机器人系统把云台机器人安置到泵站塔机平台上,实行 24h 不间断的态势监测,俯视角度笼罩整个泵站结构施工区,自动统计浇筑进展,察觉布料范围,判定分层厚度是否契合设计需求,便携式机器人部署在云台盲区的仓面边缘,模板内侧这些关键位置,近距离搜集骨料离析状况、泌水面积、振捣棒插入深度以及移动间距等细节数据,两者互相配合创建起点面融合的全过程监视体系^[2]。监理旁站机器人对开仓验收、混凝土入仓温度、浇筑温度、滑模提升速度、浇筑振捣情况、层间间隔时间、抹面与养护等进行跟踪检查控制,实现了关键工序全过程数据留痕。系统用红外温度传感器阵列每隔 5min 自动检测仓面和入仓温度,当实测值和理论温升曲线偏差大于 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 时就会发出预警,联动调节浇筑速度或者养护水温,避免温度裂缝的发生;利用车牌识别和 GPS 融合技术自动记录运输车各个环节的时间,结合罐体转速传感器判断停转风险,数据显示优化调度之后送料车等待异常从日均 6 次降到不到 1 次。全部图像、视频以及传感器参数自动归档形成不可篡改的电子档案,创建数字孪生模型来完成施工过程的虚拟再现以及质量反演分析,给质量追溯和验收赋予完备可靠的根据。

3.2 长距离输水管线施工智能巡检应用

输水管线施工作业面分散,标段间协调工作繁杂。传统的手工巡检方式效率低、周期长,不能实现高频次的覆盖。采用精确的地形测量方法来制定出标准化的巡检航线,建立高频次的巡查制度,从而达到对输水干线全面覆盖的目的。参照此种模式,在输水工程施工期间,无人机依照管线预先规划好的航线开展周期性的自动巡查工作,借助高清影像以及 AI 识别算法,自动对管线开挖、管道安装、回填压实这些工序的合规程度展开监测,并且可以自动判定施工便道,临时堆土场等附属区域的安全状况。巡检影像实时上传到云端,监理人员不用到现场就可以了解全线施工情况,巡检频次由原来的每周一次提高到每天全覆盖。

3.3 多级泵站高风险作业安全监测应用

多级泵站包含塔机安拆、脚手架搭设、高处钢筋绑扎等许多高风险作业,最高作业高度达到 22m。传统的监理模式由于视野盲区以及巡检频次的原因,高空坠落、物体打击等风险比较大。智慧机器人系统用云台和便携设备配合来完成立体监控工作,云台机器人用俯视角度来覆盖整个泵站,利用高倍变焦功能来查看高空作业人员安全装备佩戴情况以及临边防护的完整性,便携式机器人对焊接、

吊装等移动性较强的作业面进行快速布置,及时上传画面。智能建造平台依靠 AI 视频智能识别功能,对重点作业区实行 24h 不间断巡检,及时识别并发出隐患报警信号,共发现安全隐患 2800 余次,其中整改完毕的有 2500 余次,现场违规作业次数降低到原来的 85%以下。智能预警推送到现场监理移动端,10s 内做出反应。

3.4 智慧机器人监理预警与闭环管理应用

系统把预警信息分成质量预警和安全预警两种,对应不同的处理流程。质量预警对混凝土送料车等候超时、仓面积水、养护不到位等情况进行系统自动识别,将结果推送给责任班组,整改完成之后需要上传现场影像核验销号^[3]。安全预警对人的不安全行为、物的不安全状态进行发现并触发现场声光报警,同时推送监理人员立即处置,形成发现、预警、处置、复核、销号的标准化闭环管理体系。平台创建起发现-预警-处置-复核-销号的标准化闭环管理体系,促使问题即时整改,精确到人。所有的预警记录、处置过程以及整改结果都在云端保存,不能被篡改,可以有效地落实各个主体的主体责任,并且为以后的分析工作打下了数据基础。

4 智慧机器人应用效果及发展建议

4.1 工程质量全过程管控效果分析

系统运行以来,混凝土浇筑过程监控覆盖率由原来的 70%提高到现在的 95%,质量缺陷发现及时率提高到 96%。利用 AI 算法对混凝土送料车等候时间异常、仓积水面、养护不到位等问题进行识别,并对其中的 1222 个问题进行了及时处理。验收一次合格率由原来的 83%提高到现在的 99%,质量隐患整改完成时间由原来的平均 5h 缩短到现在的 1h,质量管控从事后检验转变为过程受控。

4.2 安全风险智能识别与防控成效分析

系统在安全控制方面取得较好的效果。安全帽佩戴合规率由原来的 75%提高到现在的 98%,安全带佩戴率由原来的 80%提高到现在的 96%,高风险作业监控覆盖率由原来的 60%提高到现在的 100%。安全隐患整改时效由原来的平均 5h 缩短到现在的 30 分钟,危险区域入侵预警响应时间由原来的分钟级缩短到现在的 10s 以内。系统共发出安全预警 9444 次,没有发生过任何的安全事故,统计期间内也没有发生高空作业安全事故。智慧安全监督系统把传统的事后检查变成事前预警、事中干预的主动防控,明显加强了质量安全风险早期识别和快速处置的能力,和本项目成果相互印证。

4.3 智慧机器人对施工监理效率的提升分析

系统应用可以大幅度地释放监理人力资源。日常巡检

做到全天候自动值守,取代了原来的 10 人×8 小时的巡视投入,数据记录由系统自动生成,效率提高了 98%,监理日志的编制时间由原来的 1h 一份缩短到现在的 0.5h 一份,问题的追溯查询时间也由原来的 2h 一次缩短到即时完成。经过计算得出监理工作量平均减少 30%以上,并且每年可以节约 23000h 的工时。智能建造平台投入使用之后,新员工的培训时间是以前的两倍多,大部分精力被琐碎的报表工作所取代,可以更加关注现场施工情况,这是智慧监理对人力效能产生的释放。

4.4 智慧机器人应用优化方向与推广价值

目前系统还存在三个方面的改进空间:一是极端天气下设备稳定性有待提高,需要研发适应西部高寒、强风沙环境的专用设备。兰州交通大学研制出的隧道智能监理机器人用耐寒、耐高温材料制成,防尘、防水,在西部高寒地区实现无人化全自主操作,环境适应性设计经验可以借鉴。二是复杂场景中 AI 识别的误报率大约为 8%,需要不断地对算法模型进行优化,并加入更多的样本进行训练以提高准确率。基于 YOLOv5 算法的水利工程智能识别框架,在图像增强与优化的基础上可以提高多场景安全隐患识别的准确率。三是系统同 BIM、项目管理平台数据互通性不高,造成信息孤岛。库坝系统安全管控数字孪生模型框架提出融合 AI 增强的多尺度多场耦合计算模型,建立数据-模型双驱动算法,实现勘测、设计、施工、

运行全过程智能决策,是智慧监理系统发展的方向。建议以后继续推进系统同数字孪生技术的融合,扩展到工程全生命周期管理。

5 结语

智慧监理机器人系统在供水工程中成功应用,说明了基于云-边-端架构的智能终端协同部署方案,可以很好地解决长距离输水管线和多级泵站工程由于线路长、分布广而造成的监理覆盖问题。系统把质量控制由抽样检查转变为全过程受控,把安全管控由人防变成技防,把监理决策由经验判断转变为数据驱动。该技术路线成熟可靠,相关设备已经实现国产化,可以根据工程的特点对它进行模块化的配置,适合在水利、线性基础设施等各个领域推广应用。

[参考文献]

- [1]周创兵,姚池,杨建华,等.数智技术赋能库坝系统安全管控探讨[J].中国水利,2025(1):7-14.
 - [2]徐亮,陈旭,张卓,等.基于 YOLOv5 算法的长江大保护水利工程项目多场景质量安全检测[J].水利水电科技进展,2025,45(2):82-89.
 - [3]赵建居,梁录.新形势下水利工程监理的数字化转型与智慧监理模式构建研究[J].水上安全,2026(6):58-60.
- 作者简介:王超(1982—),男,新疆农业大学水利水电工程专业本科毕业,目前就职于哈密市水利建设与安全中心,副主任,副高级工程师。