

5G 技术赋能水利工程智能化现场管控研究

苏仕文 周亚媛 井广波

连云港市通榆河北延送水工程管理处 江苏 连云港 222002

摘要：水利工程建设环境复杂、作业面分散、参建主体多元，传统现场管控手段在信息采集时效性、数据传输可靠性及决策响应敏捷性等方面存在显著短板。第五代移动通信技术（5G）以其高速率、低时延、大连接和网络切片等核心优势，为水利工程现场管控的智能化升级提供了关键使能技术。本文系统分析水利工程现场管控面临的现实困境，阐述 5G 技术赋能智能化管控的内在机理与技术架构，从感知层、网络层、平台层和应用层构建智能化管控体系，深入探讨安全风险预警、质量实时追溯、设备远程协同、环境动态监测及人员精准定位等典型应用场景。在此基础上，剖析网络覆盖、建设成本、数据安全、标准规范及人才储备等制约因素，并提出统筹规划、分步实施、政企协同、安全优先等系统性推进策略，旨在为 5G 技术在水利工程智慧建造中的深度应用提供理论参考。

关键词：5G 技术；水利工程；智能化管控；现场管理；智慧建造；物联网

引言

近年来，随着数字中国战略的深入实施，水利部明确提出推进智慧水利建设，将新一代信息技术与水利工程建设管理深度融合作为高质量发展的重要抓手。然而，当前水利工程现场管控仍大量依赖人工巡查、纸质记录和点对点通信，信息采集手段单一、传输时效性差、决策协同效率低下，难以适应大型水利工程对精细化、实时化、智能化管控的迫切需求。第五代移动通信技术（5G）具备峰值速率达 Gbps 级别、空口时延低至毫秒级、每平方公里百万级连接密度以及端到端网络切片等能力，能够有效破解传统通信技术在带宽、时延和连接数方面的瓶颈。将 5G 技术引入水利工程现场，可构建覆盖全工地的高速信息传输网络，支撑海量物联网设备实时在线、高清视频无延时回传、远程操控精准响应，从而为智能化管控体系奠定坚实的通信底座。本文立足于水利工程现场管控的现实痛点，系统研究 5G 技术的赋能路径、应用架构及推进策略，以期为行业数字化转型提供有价值的参考。

1 水利工程现场管控现状与智能化需求分析

1.1 传统管控模式的主要短板

水利工程施工现场通常位于河谷、山区等偏远地带，地理环境复杂，公网覆盖薄弱，有线网络敷设困难，导致信息孤岛现象普遍。在感知层面，现有监测以人工巡检和固定传感器为主，布点稀疏、采集频率低，难以实时捕捉高边坡位移、围堰渗流、大型机械运行状态等动态风险信息。在传输层面，依赖 Wi-Fi、4G 或光

纤等传统方式，带宽有限且抗干扰能力差，多路高清视频同时回传时极易拥塞，关键数据丢包时有发生。在决策层面，进度、质量、安全、物资等业务数据分散在不同系统，缺乏统一的数据融合平台，管理人员需要手动汇总各类报表，决策响应周期长达数小时甚至数天，与施工快速变化的需求严重脱节。

1.2 智能化管控的核心需求

面向现代水利工程“安全、高效、绿色、智慧”的建设目标，现场管控亟需实现四个方面的能力跃升。第一是全域感知能力，要求对大坝浇筑、隧洞开挖、边坡支护等关键工序进行全天候、多维度的实时监测，覆盖人员、设备、材料、环境全要素^[1]。第二是高速传输能力，要求将海量现场数据（包括超高清视频、三维激光点云、传感器时序数据等）以极低延迟上传至中心平台，确保信息的鲜活性与完整性。第三是即时决策能力，要求通过边缘计算与云端协同，在本地快速处理数据并输出预警或控制指令，缩短从感知到行动的响应链条。第四是协同联动能力，要求建设单位、设计单位、监理单位、施工班组以及后方指挥部之间实现信息共享和业务联动，打破部门壁垒和空间阻隔。这些需求的满足，离不开新一代通信技术的底层支撑。

2 5G 技术赋能水利现场管控的关键能力

2.1 增强型移动宽带支撑高清视觉感知

5G 网络的增强型移动宽带特性可提供 100Mbps 至 1Gbps 的用户体验速率，能够同时承载数十路 4K/8K 超高清视频流、全景影像和红外热成像数据的实时传输。

在水利工程现场,这一能力使得布设于塔吊、高边坡、围堰、隧洞掌子面等高风险区域的固定摄像头和无人机挂载摄像设备,可以将施工细节、裂缝发展、渗水变化等以像素级清晰度回传至监控中心,结合 AI 图像识别算法,自动识别未戴安全帽、违规操作、护坡变形等异常状况,极大提升了远程可视化监管的精度和广度。

2.2 超低时延可靠通信赋能远程精准操控

5G 的空口时延可低至 1 毫秒,端到端时延控制在 10 毫秒以内,可靠性达到 99.999%,为水利工程中大型机械(如塔吊、门机、缆机、挖掘机、混凝土泵车等)的远程操控提供了技术前提。在传统模式中,操作人员必须处于驾驶室内,面临粉尘、噪音和高空坠落风险。借助 5G 低时延特性,操作人员可在远离施工现场的集中控制室内,通过多视角视频和力反馈手柄实时操控设备,指令传输与动作反馈近乎同步,不仅保障了人员安全,还能实现多台设备协同作业,有效提升施工效率。

2.3 大规模机器通信实现万物互联感知

水利工程现场需监测的节点数以万计,包括混凝土温度传感器、钢筋应力计、渗压计、测斜仪、雨量计、风速仪等。5G 支持每平方公里百万级连接密度,远高于 4G 的十万级,能够满足密集部署的物联网设备同时接入需求。通过 5G 窄带物联网(NB-IoT)和 RedCap 技术,各类低功耗传感器可长期在线,以分钟级频率上报数据,形成全方位、立体化的“感知一张网”^[2]。这些数据流汇聚至平台后,可与 BIM 模型关联,实现工程实体与数字孪生模型的实时映射。

2.4 网络切片构建差异化的业务保障

水利工程现场存在多种业务并发的场景,不同业务对网络性能要求各异。例如,远程操控需要超低时延,视频监控需要大带宽,传感器数据需要高连接数,而语音调度需要稳定连接。5G 网络切片技术能够在一张物理网络上切分出多个逻辑隔离的虚拟子网,为不同业务提供定制化的服务质量保障,互不干扰。这为水利工程现场的多业务融合提供了灵活、安全的网络治理手段,确保关键业务即使在网络拥堵时也能获得优先资源。

3 基于 5G 的智能化现场管控体系架构

3.1 总体架构设计

基于 5G 的水利工程智能化现场管控体系可采用“端一边一管一云一用”五层架构。端侧包括各类智能终端(摄像头、无人机、机器人、传感器、智能安全帽、手持终端等),负责现场数据采集与执行控制。边侧为部署于工地现场的多接入边缘计算节点,负责数据就近处

理、实时分析和低时延响应,减轻云端负载。管侧即 5G 网络,承载端边之间的数据流动,通过核心网实现灵活路由和切片管理。云侧为云端数据中心,汇聚所有历史数据和模型,开展大数据挖掘、AI 训练和全局优化。用侧则为面向不同业务场景的应用系统,包括安全管控、质量管理、进度调度、设备管理、环境监测等模块。

3.2 数据融合与数字孪生机制

该架构的核心在于构建现场物理空间与信息空间的双向映射。通过 5G 实时传输各感知节点的数据,在云端或边缘侧建立工程实体的数字孪生模型,该模型不仅反映几何尺寸和空间位置,还动态更新材料属性、应力状态、温度场等物理参数。当现场数据出现偏差时,孪生模型能够自动预警,并通过仿真推演预测未来发展趋势,辅助管理人员做出超前决策。这种数据驱动的管控模式,将传统事后被动应对转变为事前主动预防,显著提升了安全与质量保障水平。

3.3 系统集成的标准化考量

为实现不同厂商设备和系统的互联互通,体系架构设计需遵循统一的接口标准、数据格式和通信协议。建议参照工业互联网平台架构和《水利水电工程信息模型应用标准》等既有规范,结合 5G 应用特点,制定水利工程现场物联感知设备接入规范、视频流传输协议和边缘计算接口标准,确保系统的可扩展性和可复制性。

4 5G 赋能的主要应用场景

4.1 施工安全智能预警与风险管控

安全是水利工程的首要目标。依托 5G 网络,可将部署于高边坡、深基坑、围堰、洞室等高风险区域的多类型传感器(位移计、应变计、渗流计、微震监测等)接入边缘计算平台,结合高清视频监控的 AI 分析,实现风险隐患的自动识别与实时预警。当监测数值超过阈值或视频识别到异常行为时,系统在毫秒级内触发声光报警,并将预警信息推送至现场管理人员和安全帽内置的定位终端,确保人员及时撤离^[3]。同时,通过无人机搭载热成像和可见光双模相机,定期对高陡边坡和导流建筑物进行巡检,5G 实时回传影像,快速生成三维模型进行稳定性比对,大幅提升了传统人工巡查的覆盖范围和响应速度。

4.2 施工质量全过程实时追溯

水利工程混凝土浇筑、基础处理、金属结构安装等关键工序的质量管控要求极高。利用 5G 连接遍布于模板、仓面、输水管道内的温度、湿度、压力、振捣频率等传感器,实时采集施工参数并与设计标准进行自动比

对,一旦出现异常即刻报警。例如,在大体积混凝土浇筑过程中,温度控制是防止裂缝的关键,通过预埋在坝体内的数百个温度传感器,5G网络以秒级频率将数据传至温控平台,平台自动计算温差梯度,若超标则联动冷却水管阀门的控制系统,自动调节通水流量,实现智能化温控。所有检测数据与施工部位、时间、操作人员信息绑定,形成不可篡改的质量电子档案,为后期验收和运维提供完整的数据支撑。

4.3 大型设备远程操控与协同调度

水利工程中的塔吊、缆机、门机、挖掘机、推土机等大型设备数量多、交叉作业频繁。通过5G低时延网络,可将设备的控制信号、视频画面和工况参数集成至远程操控台,操作人员在现场附近的“智能操控中心”即可同时操控多台设备,视野更开阔、操作更舒适,也避免了高空作业和粉尘侵害^[4]。同时,系统实时采集每台设备的运行状态(载荷、幅度、速度、油温等),结合BIM和施工进度计划,自动规划设备的最优调度路径,避免相互干扰和窝工,提升综合利用率。

4.4 水文气象与生态环境动态监测

水利工程施工受河流水位、流量、降水、大风等自然条件影响显著。在工地上下游布设水文监测站,通过5G上传水位、流速、含沙量等数据,结合气象雷达云图,建立施工期洪水预警模型,及时发出停工和人员设备转移指令。此外,环保部门要求施工期间需对水质、扬尘、噪声等进行连续监测,5G支持的大量传感器可布设在施工影响区域内,数据实时上传至环保监管平台,为绿色施工提供量化依据。

4.5 人员精准定位与智能调度

水利工程参建人员众多,工种复杂。为每位进场人员配备集成5G通信模块、北斗定位和健康监测功能的智能安全帽,可实现厘米级室内外融合定位。系统可实时显示各作业面人员分布,当人员进入高风险区域或发生坠落、静止超时等异常时,自动向周边人员发送求救信号。同时,结合施工进度计划,平台可动态生成人员调度指令,通过语音播报直接传达至个人,提高班组间协同效率。

5 推进5G赋能面临的主要挑战与对策

推进5G赋能水利工程面临五大挑战及对策:一是网

络覆盖难题。针对偏远山区信号弱、遮挡多问题,采取“公网结合”策略,利用公网广域覆盖,在关键作业区部署移动微基站补盲,并附挂天线于输电塔等设施以降低成本。二是成本高昂与投资回报不确定。建议政府将5G建设纳入概算,运营商提供“以租代建”服务;企业分阶段部署,优先在高价值场景应用以形成示范。三是数据安全与网络安全风险。构建纵深防御体系,通过专网切片隔离业务,实施终端认证及管理审计,定期开展攻防演练。四是标准规范缺失与互联互通障碍。加快制定行业技术导则和数据接口规范,统一数据格式,建立评估体系并发布典型案例。五是专业人才短缺。深化校企合作,在高校增设相关课程,对在职人员开展常态化技能培训,并引入企业工程师驻场指导,提升队伍数字化素养。

结束语

5G技术为水利工程现场管控的智能化转型提供了前所未有的机遇。本文从水利工程传统管控模式痛点出发,系统阐述了5G在增强视频感知、低时延控制、万物互联和差异化保障等方面的赋能机理,构建了“端一边一管一云一用”一体化智能化管控体系,并梳理了安全预警、质量追溯、远程操控、环境监测和人员调度等关键应用场景。同时,清醒认识到网络覆盖、成本、安全、标准和人才等方面的现实阻碍,提出了针对性推进策略。随着5G技术的持续演进和行业应用生态的逐步成熟,其在水利工程中的渗透将不断加深,最终实现从“单点示范”向“全面落地”的跨越。未来,还应持续关注5G-A(5.5G)及6G前沿技术动态,探索空天地一体通信、通感算智融合等新能力在水利工程中的创新应用,为筑牢国家水安全屏障提供更为坚实的科技支撑。

参考文献

- [1] 张建云,王建华,刘九夫.智慧水利关键技术与发展展望[J].水利学报,2024,55(1):1-12.
- [2] 李华,赵刚,陈思远.5G专网在基础设施建设工程中的应用研究综述[J].通信学报,2023,44(8):189-201.
- [3] 王浩,王芳,严登华.数字孪生流域建设框架与关键技术[J].水科学进展,2023,34(4):497-508.
- [4] 刘毅,钟登华,任炳昱.水利工程智能建造技术体系与实现路径[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2025,58(2):111-123.