

工程测绘技术在水利水电项目全周期中的应用

何富献

鸿儒勘测设计有限公司广西分公司 广西 南宁 530031

【摘要】：水利水电工程建设工程量巨大、投资高、工程建设周期长，工程测绘技术是贯穿项目全过程的重要技术手段，在勘测设计、施工建设、运营维护等各个环节发挥着无可替代的作用，本文从水利水电工程建设实际需要出发，论述工程测绘在项目各个环节的应用，重点分析“空天地一体化”协同监测体系、BIM与GIS系统平台、高精度变形监测网络等现代化测绘技术手段的技术特征和工程价值。研究发现工程测绘不仅为工程设计提供基础数据，为施工建设提供精准定位，还为工程长期安全运行提供可靠监测预警，其技术水平和数据质量直接关系到水利水电工程的建设 and 安全运行。

【关键词】：水利水电；工程测绘；全周期；数字孪生

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.074

引言

水利水电工程大多在山区或地质比较复杂的区域，工程体量大、结构多、建设环境较为复杂，测绘工作对精度、效率和可靠性要求非常高。从坝址比选到施工放样，从变形监测到库区管理，测绘始终是工程建设和运行的基础保障。近年来，随着卫星遥感、北斗导航、无人机航测、三维激光扫描、多波束测深等新技术的不断发展，工程测绘已从单点测量、人工观测向“空天地一体化”，全要素数字化建模、智能化实时监测的方向发展，现代测绘手段的应用使水利水电工程的勘测设计的方案比选更加科学、施工建设阶段的精度控制更加可靠、运营维护阶段的安全预警更加及时，全过程的质量管控水平大幅提升。

1 勘测设计阶段的测绘技术应用

1.1 地形测绘与地质勘察中的测绘技术

(1) 地形测绘技术应用：水利水电工程坝址选址需要准确地形测绘作为基础，常规的全站仪断面测绘工作量大，效率低，受地形影响明显，而航空摄影测量与激光雷达的应用大大提高了工作效率：云南曲靖某新能源项目中，搭载倾斜摄影和LiDAR的无人机2天就可以完成常规方法半个月工作量，形成三维实景模型、DEM等三维实景成果，节约80%砍伐树木。水库库区测绘方面，乌东德和白鹤滩水电站水文泥沙监测包括593个固定断面，8km坝区地形等。面对高山峡谷的复杂地形条件，作业组利用机载激光雷达和移动SLAM相结合的方案，航飞适宜区利用激光雷达快速大范围扫描；禁飞区及高陡边坡利用移动SLAM自主定位和实时建模，有效打破作业盲区，大大提升采集效率和安全风险，实现全面直观的监测数据展示。

(2) 地质勘察中的测绘支撑：地质勘察是水利水电工程

的选址与设计的另一项重要工作，测绘提供了地质调查、构造识别和岩土体评价的空间定位及三维形貌信息。长距离输水工程地质复杂性更需要测绘，珠江三角洲水资源配置工程全长113.2公里，选用埋设于地下40~60米深的深埋盾构方式开建输水管道，工程穿越高铁4座、地铁8座、高速公路12座、江河湖海16处，是穿越“地质博物馆”的工程。工程全生命周期BIM+GIS系统平台的应用为工程建设者提供了“CT机”般的透视能力——打开带有地理信息数据的盾构专题场景，可以看到盾构机在地下的掘进过程，盾构机走到哪里，上部结构和地表样貌的变化可以在系统平台上直观显示。这种将测绘数据与工程BIM模型无缝融合的方式，解决了地下工程“看不见、摸不着”的勘察设计难题。在库区高程控制测量上，上游局组织内外业30余人组成4个作业组，历时60余天完成了乌东德和向家坝水电站库区高程控制测量。向家坝水电站坝址控制流域面积45.88万km²，水库正常蓄水位380m，总库容51.63亿m³，其高程控制网建设为后续地质勘察、工程设计提供基准。

1.2 数字地形模型与BIM+GIS集成技术

(1) 数字地形模型构建：在获取到高精度的地形数据后，搭建数字地形模型是勘测设计阶段测绘数据价值实现的必要步骤，数字地形模型可以将测绘数据建模为可计算、可分析、可观察的三维数字空间，为工程设计提供场地条件输入。数字地形模型包含地表高程信息，可结合地质分层、水文条件、植被覆盖等，搭建工程基础信息平台。在水库库容计算、坝址比选、料场规划、施工道路设计等方面，能够实现多种方案的快速比选和优化，例如孟底沟水电站边坡开挖设计中，根据数字地形模型开挖体型可准确再现至厘米级，设计人员提前发现存在的地形冲突与安全隐患，大大减少了现场设计变更。现代数字地形模型可以从单一的DEM发展到结合实景三维模型、真正射影像、点云数据等等，倾斜摄影测量所生成的三维实景模型可以准确还原出地表的纹理与几何形态，给设计人员提供沉浸式的场地感知。三维激光扫描点云数据可以准确表达复杂地

形和人工构筑物的细节特征,多种数字地形产品构成了勘测设计阶段的空间数据基础。

(2) BIM+GIS 集成平台应用: BIM 和 GIS 是水利水电勘测设计最高水平的应用,黄河古贤水利枢纽数字化设计交付平台面向全生命周期,采用数字孪生、Ai 技术,实现规划、勘测、设计、施工、运维数据的交换共享,已提交 34 套 BIM 模型、31 套施工图纸、57 套技术文档,并实现了在线协同审查、基于 MBD 的 PMI 标注及全生命周期 BIM 编码等突破。孟底沟水电站(装机 240 万千瓦,坝高 201 米)采用数字孪生技术,组织“1+1+3+1”智能建设体系,从勘测设计到运行移交,工程指挥中心同步运行,边坡开挖体型复现到厘米级,导流洞水流实时更新,变形数据动态显示。勘测设计阶段的测绘数据是后面各个阶段精度基础,完整准确的标准化数据是水利水电工程质量控制的第一道关卡。

2 施工建设阶段的测绘技术应用

2.1 施工控制网与高精度定位测量

(1) 施工控制网布设与复测: 施工控制网是水利水电工程施工测量的主要手段,施工控制网精度直接影响大坝、厂房、隧洞等主体结构物的最终定位。黄河古贤水利枢纽工程施工控制网复测面临自然条件复杂、河谷深切、地形起伏大、流域昼夜温差大、降水时空分异等自然条件极为复杂的情况。测量人员采用光学测微法完成跨河水准测量、平面 GNSS 观测,严谨操作尽可能避免人为误差,守好数据。施工控制网需要综合考虑工程规模、地形、施工分期以及精度要求。对于高坝大库工程一般需要建设分级控制网,首级控制网包含工程区域,次级控制网为大坝、厂房等重点建筑物加密。由于在施工过程中控制网点可能会受到爆破、开挖、堆载等因素的影响,需要定期复测和校核。向家坝水电站高程控制网建设时间为 60 多天,投入 30 多人,严格作业流程为后续的施工测量和变形监测奠定了基础。

(2) 高精度定位测量技术: 北斗卫星导航系统重塑水利水电工程定位保障体系。澜沧江上游水电站是水电行业第一个流域北斗规模化应用工程,布设 22 座北斗连续运行参考站,形成高海拔地区首个全天候地基增强系统,为流域电站安全建设、高效运营提供全天候、高精度时空信息支撑。桃源水电站“测量机器人+北斗静态网”的技术融合使得北斗定位精度比 GPS 高 25%,强遮挡仍保持毫米级定位,北斗首次加入机器视觉识别变形监测,“数字图像+AI”重构监测模式提高 30%以上。水下地形测量是施工建设的重中之重,向家坝电站近坝区采用 1:500 大比例尺测量,包括控制测量、水上下地形测量及淤积测量,工期 974 天。高精度的水下地形测绘对库容计算、淤积监测及水下结构施工具有重要意义。多波束测深系统实现

条带式全覆盖“面”测量,比单波束“点线”测量效率提高 5 倍以上。

2.2 施工过程中的动态监测与质量管控

(1) 施工动态监测技术: 施工中,测绘技术不仅能够做到放样定位,还能通过实时监测进行施工质量的监控。地下厂房等洞室群的开挖过程中,三维激光扫描仪会不定期扫描地下厂房,并与数字模型进行比对,实现对开挖轮廓的厘米级控制。边坡开挖过程中,装设在重点部位的 GNSS 监测设备及倾角加速度传感器可以实时了解边坡位移及变形情况,在超过预警值时会发出报警。在孟底沟水电站大坝边坡上,遍布各个位置的数千套智能传感设备会不断的将位移、形变等监测数据传输到平台上,利用 ai 对于海量数据进行自动判断以及预警,加强了对施工期边坡稳定的控制。动态监测数据可以与 BIM 建立实时联系,使得工程管理人员能在三维可视化环境中清楚地了解各部位施工情况及变形情况,实现由“事后监督”变为“过程控制”。

(2) 施工质量管控与进度管理: 在施工进度管理方面,全生命周期 BIM+GIS 系统平台发挥了关键作用。在孟底沟水电站大江截流过程中,工程师们使用数字孪生平台预先模拟了 32 种水文工况,预测了合龙时间,误差为 15s,为截流提供了关键决策依据。基于测绘数据和数字模型的预演方法,将复杂施工过程在虚拟环境中先验证,大大降低了施工风险。在太平水库,项目团队将以“BIM+GIS”为核心,打造了覆盖全生命周期的智慧工地业务系统,为项目提供从进度预测、风险预警到质量溯源的全套解决方案,实现了工程“一张网”式管理,实现了 30%的工程效率提升。在施工阶段积累的测绘数据还直接帮助工程档案建设。丹江口水库实现了工程设计、建设、运行等全生命周期的数字档案全覆盖,通过电子档案系统对工程全过程进行管理,为工程安全运行提供历史数据支撑。基于建设期的测绘数据,为后期运行维护阶段的安全评价及设施管理提供基础。

3 运营维护阶段的测绘技术应用

3.1 大坝及库区安全监测

大坝安全监测是运营维护阶段测绘技术的关键领域,从点式人工观测到全天候、多维度自动化监测,密云水库在 7 座大坝和 2 座溢洪道上安装 194 套 GNSS 设备 24 小时监测变形及时预警;在易滑坡点安装倾角加速度传感器,实时诊断滑坡风险。数字孪生系统已收集结构化数据超过 1 亿条,实现“流域—库区—工程—站点”多层次数字化映射。三门峡水利枢纽 2025 年大坝安全监测资料整编分析覆盖变形、渗流、环境量等项目,利用统计特征值、过程线、相关性分析对全年监测信

息进行全流程整编,结果显示大坝变形、渗流、温度等变化规律与往年基本一致,且变化幅度可控,表明大坝结构稳定、运行良好。卡拉贝利水利枢纽实现“天-空-地-水”协同监测体系,包含INSAR、无人机航测、GNSS静态定位、智能全站仪、电子水准仪、多波束测深等技术。自2020年9月开始运行,近4年完成6期高精度变形监测:二等水准测量超150公里、GNSS静态定位200点次、边角交会80点次,Sentinel-1A影像99景,结合无人机倾斜摄影和水中多波束数据,建立约11km²的水陆一体化实景三维模型。

大坝安全监测资料整编分析是掌握运行状态、排查隐患、保障长期安全的重要技术依据。下表列出我国部分大型水利水电工程安全监测系统的主要配置情况:

表1 部分大型水利水电工程安全监测系统配置统计

工程名称	监测设备数量/配置	数据规模/项目规模	主要监测技术
密云水库	194套GNSS变形监测设备	结构化数据超1亿条	GNSS自动化监测、倾角加速度传感器、物联网感知
卡拉贝利水利枢纽	二等水准150km、GNSS 200点次	影像处理99景、三维模型11km ²	InSAR、无人机航测、GNSS静态定位、多波束测深
桃源水电站	北斗静态网+机器视觉系统	定位精度提升25%、监测精度提升30%以上	北斗定位、机器视觉识别、测量机器人

数据来源:密云水库监测数据来源于北京市密云水库管理处数字孪生项目统计;卡拉贝利水库数据来源于新疆水利水电

勘测设计研究院项目统计;桃源水电站数据来源于电建水电开发公司系统验收数据。

3.2 库区动态演变与水下地形监测

水库蓄水后库区地形处于不断演化状态,泥沙淤积、岸坡塌岸、水下地形变化等动态过程将对水库有效库容和运行效益产生不同程度的影响。乌东德和白鹤滩水电站库区水文泥沙在不间断进行测绘监测,包括593个固定断面测量、8千米坝区地形测量、7条支流口门淤积等内容,为两座世界水电站的安全稳定运行提供重要的参考数据。向家坝水电站2025—2027年度近坝区域水下地形测量主要用于了解坝前泥沙淤积和下游冲刷及其对水工建筑物的影响,为锚泊区回淤研究与防治、航道泥沙淤积疏浚、枢纽河段河床演变研究等提供基础数据和图件。水下地形测量是水库库容计算、淤积监测和安全管理的的基础工作。传统水下测量在高山峡谷地形中存在着效率低、精度差、安全风险高等问题,多波束测深系统和无人船技术的结合具有很大的优势,效率提高了5倍以上。

4 结语

总而言之,工程测绘为水利水电工程勘测设计、施工建设、运营维护的保障提供了重要的、先导的技术支撑。勘测设计阶段,以测绘数据对坝址选址、工程布局进行解决,BIM与GIS相结合提高了设计方案可视化和参数化水平;施工建设阶段,以北斗定位、三维激光扫描、数字孪生等提高了放样精度与过程控制能力,使工程由经验驱动向数据驱动转变;运营维护阶段,多源感知协同的自动化安全监测体系构成工程长期运行的“智慧防线”。近年来,“空天地一体化”协同监测等新一代测绘技术,推进水电测绘由单一手段、离散作业转向多源融合、全要素感知、全生命周期服务等转变,提高了工程的效率和精度,强化了测绘数据对工程全过程的支撑。真实规范完整的数据是工程的质量和安全的保障。随着数字孪生、人工智能等技术的发展,数字孪生在水利水电领域应用将会更加广泛,为建设安全、高效、智慧的工程体系提供技术支撑。

参考文献:

[1] 冯传江.数字化测绘技术在水利水电工程中的价值探究[J].中国设备工程,2026,(07):245-247.
 [2] 罗红梅.水利工程全生命周期中测绘工程技术的应用与实践研究[J].数字农业与智能农机,2026,(02):72-74.
 [3] 耿凯业.水利工程测绘中无人机航测技术的创新应用与验证[J].无人机,2026,(02):19-21.
 [4] 徐小兴.水利工程测量中数字化测绘技术的应用研究[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(03):220-222.
 [5] 高雨.浅析GPS技术在水利水电工程测绘中的应用[J].地下水,2018,40(03):168-169.