

现代工程测量技术在水利工程建设中的应用

李俊邑

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 卫星定位、无人机摄影测量、合成孔径雷达干涉测量、三维激光扫描、测量机器人、水准测量这些技术,在水利工程施工和监测里用得挺广。多源数据经过坐标统一和联合处理之后,搭起数字孪生体的几何框架,就能实现坝体变形、岸线变化、库区淤积这些全过程动态感知。多种测量手段协同互补,水利工程建设与运行管理的精度和效率都明显提上来了。

关键词: 现代工程测量技术;水利工程;多源数据融合

引言:水利工程建设与运维,对测量精度和时效性的要求很高。卫星定位、无人机摄影测量、合成孔径雷达干涉、三维激光扫描、测量机器人、水下测深这些技术,在控制网建立、施工引导、变形监测、水下地形测量等环节已经用得很普遍了。多源数据经过坐标统一和联合处理,能搭起数字孪生体的几何框架,实现工程全生命周期的动态感知和精细化管理。多种测量手段配合着用,水利工程建设和安全运行的技术保障能力就明显提上来了。

1 卫星与航空测量技术

1.1 全球导航卫星系统

首级平面控制网的建立和维持,主要靠全球导航卫星系统静态相对定位技术。在工程区域里选地质稳定、视野开阔的位置,埋设强制对中观测墩,通过多期同步观测和高精度基线解算,搭起覆盖整个工程区的首级平面控制框架。后续定期复测和网平差处理,把基准点可能发生的位移或沉降影响消除掉,保证控制网坐标长期稳定可靠,给所有施工测量和变形监测提供一个统一的起算基准。土石方施工机械的实时定位与引导,是把卫星定位接收终端装在挖掘机、推土机、平地机这些设备上,解算出铲斗齿尖或刀板中心的瞬时三维坐标,再跟设计填筑面或开挖面的数字模型实时比对,偏差信息以图形和数值的形式显示在驾驶室终端屏幕上,帮操作人员调整作业姿态,实现无桩化精准施工。大坝填筑或混凝土浇筑过程中,在坝轴线端点、坝顶边线、不同高程分界线这些特征部位布设流动观测点,获取坝体关键特征点的三维坐标,用多台接收机同步采集,按设定时间间隔连续记录特征点的瞬时坐标,再结合后续平差处理得到动态位移序列,用来分析施工加载过程中坝体的时空变形响应规律

1.2 无人机摄影测量

施工区数字正射影像和数字表面模型的生成,先规划好无人机飞行航线,设好航向重叠和旁向重叠,然后搭载光学相机拍下覆盖整个施工区的航测像片。用空中三角测量解算出每张影像的外方位元素,再经过密集匹配生成三维点云,接着做正射校正和影像镶嵌,就能得到无缝拼接的数字正射影像图。同时从点云里提取地表高程信息,形成数字表面模型,反映出施工期地表构筑物 and 堆弃体的真实形态。料场开挖体积和填筑方量的快速计算,是基于两期或多期数字表面模型成果,把前后期的高程网格数据逐点差分运算,算出每个栅格单元的高程变化量。挖方区域和填方区域分别做栅格体积分,直接输出开挖方量和填筑方量,传统断面法那种繁琐的外业测量和内业成图工作就省掉了,土石方计量的效率明显提高^[1]。河道与库区岸线变化的周期性测量,用固定航线和相对一致的成像时段获取序列影像,从各期数字正射影像里提取水陆边界线,通过对比不同期次岸线位置的平面偏移量,定量评价河道摆动以及库区岸线侵蚀或淤积的范围和速率。

1.3 合成孔径雷达干涉测量

库区及坝址周边地基沉降的时空演化分析,用的是多时相合成孔径雷达影像的干涉处理技术,获取地表微小的垂向位移信息。对长时间序列的雷达影像做差分干涉和相位解缠,反演出沉降速率图和累计沉降量序列,就能看出沉降中心的空间分布位置,以及它随施工进度变化的时间规律,识别出自然固结、施工加载、地下水位变化这些因素诱发的地基沉降区域。施工期影响区地面形变的回溯与追踪,利用工程开工前已经存档的历史雷达影像,对施工活动开始前的地表状态做干涉处理,重建从过去到现在的形变时间序列。通过对比施工前后及施工不同阶段的地表位移速率变化,识别出施工活动引发的扰动区域,追踪形变从开始到稳定的全过程,判

断施工影响是不是已经波及到周边地质环境^[2]。蓄水初期库岸稳定性监测,在首次蓄水阶段持续获取库区雷达影像,重点关注水边线附近和库岸高陡地形区域的相位信息。用短基线集干涉技术捕捉快速变形过程,识别蓄水引起的库岸瞬时弹性变形以及后续的蠕滑阶段。

2 地面精密测量技术

2.1 三维激光扫描测量

坝肩边坡和岩体结构面的精细测量,用的是发射激光脉冲并接收回波信号的方式,非接触地快速获取坡面海量三维点云数据。点云先做滤波去噪,把植被和松散堆积体的影响剔除掉,然后提取岩体出露表面的节理、裂隙、断层这些结构面信息。通过点云分割和局部平面拟合算法,精确解算出每组结构面的产状要素,包括走向、倾向和倾角,同时识别出受结构面切割形成的松动岩块以及潜在不稳定区域的位置和规模,给边坡支护设计提供详细的几何参数。隧洞断面成形质量检测,是在隧洞内部沿轴线方向布设多个扫描站点,通过标靶或者特征匹配完成不同测站之间的点云拼接,得到衬砌表面完整的三维点云模型。沿洞轴线按固定间距提取任意里程桩号处的实际断面线,把实测断面和设计断面叠合在一起对比分析,就能定量算出超挖和欠挖的体积,以及它们沿洞轴的分布范围,同时还能评估洞轴线的水平偏移和径向收敛变形量值^[3]。混凝土面板和溢洪道表面平整度的分析,是利用高密度点云数据生成数字表面模型,通过计算相邻点云间的高差变化率,或者拟合局部最佳参考平面,来量化评价表面的凹凸程度、错台高度、错缝宽度这些缺陷指标。

2.2 测量机器人

大坝浇筑过程中模板和埋件的自动定位,用的是智能全站仪,它有自动照准、伺服驱动和目标识别功能。对布设在模板支撑体系、止水片以及各类金属埋件上的棱镜进行周期性观测。测量机器人按预设的观测路径自动转过去照准各个目标点,实时解算出它们的三维坐标变化,把实测坐标跟设计坐标比对,得出三维偏差分量,然后把调整量反馈到现场作业终端,指导吊装就位和加固锚固作业的精确调整,保证模板和埋件的安装精度满足设计规范要求。边坡及基坑位移的实时预警测量,在边坡马道、坡面关键部位、基坑坑壁这些位置布设监测棱镜阵列。测量机器人按设定的时间频率循环观测所有目标点,把每次观测得到的坐标跟初始基准值比一下,得出位移变化量。当位移速率或者累计位移量超过预设的预警阈值时,系统自动发出声光报警,同时把超限信息推送到监控中心,并加密观测频率,跟踪位移

发展趋势。闸门及启闭机轨道安装的精调,先对轨道中线点做毫米级平面放样,同时把轨道顶面高程基准精密传递过去。安装过程中,测量机器人持续跟踪轨道梁在焊接或锚固时的瞬时偏移和变形,实时算出各测点的平面与高程调整量,保证轨道的直线度、水平度以及相邻轨道接头处的高差能满足闸门启闭机安装验收标准。

2.3 水准测量技术

坝基与坝体垂直位移监测网的布设,得根据坝址区的地形地质条件来。在两岸稳定的基岩上埋设深层水准基准点,作为监测网的起算依据,同时在坝基垫层、坝体内部廊道、上下游坝面以及不同坝段的分缝处设置沉降测点。用闭合环线或者附和路线的形式,搭起多层级的垂直位移监测网,用精密水准仪按固定周期做往返观测,经过严密平差计算后,得到各测点的高程变化值,再算出沉降量和沉降速率,画出沉降过程曲线。不同高程基准之间的传递与统一,当坝区范围比较大或者存在多个施工标段时,不同区域可能用各自独立的高程起算面,沉降数据就不好直接对比。通过布设过渡水准点并做分段联测,建立起不同局部基准之间的转换关系和转换参数,把坝体、料场、导流设施、施工道路这些区域的沉降数据都归算到统一的高程基准框架里,保证全区域垂直位移监测成果的一致性^[4]。关键结构差异沉降的连续测量,在混凝土浇筑块之间的横缝处、坝体与岸坡的接头过渡区、防渗墙与心墙连接部位这些容易产生不均匀沉降的关键位置,布设成对或者成组的测点。

3 水下测量技术

坝址前水下原始地形的高密度覆盖测量,用的是多波束测深系统,来获取坝址前方河床的连续水深数据。这个系统通过换能器向水底发射宽扇区的声学脉冲,并接收大量波束的回波信号,形成垂直于航迹的高密度条带式测深覆盖。结合实时动态定位和船体姿态补偿技术,把每个测深点精确归算到统一的平面坐标和高程基准。经过数据处理后,生成高分辨率的数字水深模型,这个模型能完整反映出坝轴线前方水下地形的起伏特征、基岩出露位置以及深槽分布状况,给后续的筑坝施工和基础处理提供基础地形资料。围堰及导流设施基础冲刷深度的探测,在围堰上下游一定范围内以及导流建筑物周边布设水下测线,用单波束或多波束测深系统沿预定航线连续采集水深数据。把实测水深跟原始建基面高程做差分对比,就能定量算出局部冲刷坑的深度、展布范围和冲刷体积。对那些水流流速比较高、回淤速度又快的重点区域,用多次重复测量的方式,获取冲刷深度随时间的动态发展过程。根据探测结果画出冲刷等值

线图,给抛石防护或者混凝土回填这些加固措施提供精确的断面数据支撑。库区淤积形态与容积变化的定量获取,通过对比不同时期的水下地形测量成果,生成淤积厚度分布图和等深线变化图^[5]。把实测水深数据网格化处理后,跟原始库床高程或者前期测量高程做逐点栅格相减运算,得到各分区单元的淤积量以及整个库区的总淤积体积。同时提取主河道深泓线的变化趋势和典型横断面的形态演变过程,定量判断淤积物往坝前推进的速度以及它的空间堆积形态。

4 多源测量数据融合与信息模型构建

4.1 多源测量数据的坐标统一与联合处理

不同测量技术获取的数据,坐标系统要统一。先布设覆盖整个工程区的高等级控制网,定好统一的平面和高程基准框架。把全球导航卫星系统测出来的空间直角坐标、三维激光扫描仪获取的独立坐标系点云,还有无人机摄影测量生成的影像外方位元素,通过七参数转换或者网格拟合这些方法,都归算到同一个坐标参考系里。水下地形数据这块,还得另外建立跟陆域高程系统的严密转换关系,把不同测量手段之间的系统偏差消除掉,保证各类空间数据在叠合分析时位置能对得上。点云、影像和矢量数据的联合处理,用迭代最近点算法对多站扫描点云做配准,形成完整的工程区点云模型。把点云和数字正射影像做纹理映射,让每个点都带上真实的色彩信息。同时把测量机器人获取的离散监测点矢量数据,跟连续面状的点云融合在一起,用点云插值去填补监测点之间的空白区域,用监测点数据去校核点云的局部形变。

4.2 水利工程数字孪生体的几何框架建立

水利工程数字孪生体的几何框架,是基于多源测量

数据的统一成果建起来的,构建出一个跟物理实体一一对应的数字化几何结构。坝体、坝肩、边坡、隧洞、闸门、导流设施这些组成部分,都按照它们实际的空间位置和几何形态做三维重构。用边界表示和体素表示相结合的方式,既把结构表面的细节保留下来,比如面板错台、岩体裂隙这些,又能形成一个可以拿去做有限元剖分的水工结构实体模型。框架里还要建立不同构件之间的拓扑关系,把接触面和约束边界条件明确好。同时把这个几何框架设计成可更新的层级结构,新的测量数据能按时间戳接进来,替换对应部位的几何形态,这样几何模型就有了随时间动态演化的能力。

结束语:卫星定位、无人机摄影测量、雷达干涉、三维激光扫描、测量机器人、水下测深这些技术,已经全面覆盖了水利工程从施工放样到变形监测的各个环节。多源数据经过坐标统一和联合处理之后,搭起数字孪生体的几何框架,实现工程全生命周期的动态感知和精细管控。各类技术优势互补、协同配合,给水利工程建设质量和运行安全提供了扎实的测量技术保障。

参考文献

- [1]闫志港,李雪莲.现代工程测量技术在水利工程建设中的应用[J].灌溉排水学报,2023,42(6):后插3.
- [2]曹洪玲,周敏.现代工程测量技术在水利工程建设中的应用[J].城镇建设,2023(24):168-170.
- [3]柳鑫,曹辉.现代工程测量技术在水利工程建设中的应用[J].电脑爱好者(电子刊),2021(9):2537-2538.
- [4]刘梦巧.现代工程测量技术在水利工程建设中的应用[J].新发现,2025(3):73-75.
- [5]张帅.现代工程测量技术在水利工程中的应用分析[J].水上安全,2025(1):109-111.