

水利工程测量中误差分析与控制策略研究

赵会会

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 河北 石家庄 050081

摘要: 水利工程测量中误差分析与控制对保障工程质量意义重大。本文阐述了误差基本概念、传播定律与精度评定方法,分析了仪器、观测、环境及数据处理等误差来源。针对各类误差,提出了仪器选型与维护、标准化观测操作、环境监测与补偿、优化数据处理模型等控制策略。通过这些措施,可有效减小测量误差,提高测量成果的精度与可靠性,为水利工程规划、设计与施工提供准确数据支持,推动水利工程高质量发展。

关键词: 水利工程测量; 误差分析; 误差控制策略

引言: 水利工程作为国民经济基础产业,其建设质量关乎民生福祉与经济发展。测量工作贯穿水利工程全生命周期,为工程规划、设计、施工及运营管理提供关键数据支撑。然而,受仪器、观测、环境及数据处理等多因素影响,测量结果存在误差。若误差未有效控制,可能导致工程设计偏差、施工质量问题,甚至引发安全事故。深入研究水利工程测量误差分析与控制策略,对提高测量精度、保障工程质量、降低风险,提高测量精度、保障工程质量、降低工程风险,具有重要意义。

1 水利工程测量误差基础理论

1.1 误差的基本概念

在水利工程测量领域,真值是被测量对象客观存在的准确数值,由于测量条件和技术手段限制,真值通常无法直接获取。观测值是借助测量仪器和方法获得的数值,与真值存在差异,这个差值即为误差。误差按性质可分为系统误差、偶然误差和粗差三类。系统误差具有重复性和规律性特征。在相同观测条件下,其大小和符号保持恒定,或随某一因素变化呈现特定规律。例如,测量仪器校准不准确导致的偏差,或因测量方法固有缺陷产生的误差。系统误差可通过改进测量方法、校准仪器设备等方式识别与消除。偶然误差呈现随机性,单次观测中其大小和符号无规律可循,但在大量重复观测时,服从统计规律。这类误差具有抵偿性,数值较小的误差出现频率高于数值较大的误差,可通过增加观测次数取平均值来减小影响。粗差属于错误观测结果,多由测量人员疏忽、操作不当或外界突发干扰导致,如记录错误、照准偏差等,严重影响测量结果可靠性,需通过严格的数据检核和观测流程予以剔除。

1.2 误差传播定律

误差传播定律描述测量值误差与函数值误差之间的关系。对于线性函数,其误差传播遵循特定规律:函数

的中误差等于各变量中误差与对应系数乘积的平方和的算术平方根。当函数呈现非线性特征时,需先进行线性化近似处理,再依据线性函数的误差传播规律来计算。在实际测量工作中,测量成果常由多个观测值综合计算得出,此时需运用误差合成原理,按特定规则组合各观测值误差,以确定最终测量结果的总误差。而误差分配原理则是在总允许误差已知的前提下,将其合理分配至各观测值,为测量方案设计与仪器选型提供指导。

1.3 测量精度评定方法

中误差、相对误差和极限误差是评定测量精度的重要指标。中误差通过计算观测值与算术平均值之差的平方和的平均值再开方得到,反映了一组观测值的离散程度,中误差越小,观测精度越高。相对误差是中误差与观测值之比,用于衡量精度要求较高的测量成果,更能体现误差的相对大小。极限误差通常取中误差的三倍,在一定概率意义下,观测误差不会超出该范围,可用于判断观测值是否含有粗差^[1]。对测量数据可信度的评估,需综合考虑上述精度指标。通过计算中误差、相对误差和极限误差,结合测量任务的精度要求,判断测量成果是否满足工程需求。还可利用误差分布特性、统计检验方法等,进一步分析测量数据的可靠性。例如,当一组测量数据的中误差较小且符合正态分布特征时,表明该组数据具有较高的可信度;若存在异常大的误差值超出极限误差范围,则需对该数据进行重新观测或剔除处理,以确保测量成果的准确性和可靠性。

2 水利工程测量误差来源分析

2.1 仪器误差

仪器结构缺陷与校准不足直接影响测量结果的准确性。部分测量仪器在设计制造环节存在固有缺陷,如水准尺的分划误差、全站仪的视准轴与横轴不垂直等,这些结构问题会导致测量值系统性偏离真实值。若仪器

未按规定周期进行校准,内部参数会随使用时间发生变化,如测距仪的棱镜常数偏差、GPS接收机的时钟误差等,使得测量结果出现偏差且难以察觉。此外,仪器零部件的磨损、老化也会降低其精度,如仪器微动螺旋的间隙增大,导致瞄准过程中产生额外误差。仪器使用环境对测量精度干扰显著。温度变化会引起仪器材料的热胀冷缩,改变仪器内部结构尺寸和部件相对位置,影响测量基准。例如,高温环境下水准尺长度增加,导致读数偏大;低温环境中电子元件性能下降,影响仪器的测量稳定性。湿度对仪器的影响同样不容忽视,高湿度环境易造成仪器内部电路受潮,导致电子元件短路或性能下降,使测量数据出现波动。气压变化会影响大气密度,在高程测量中,气压误差会导致大气折光系数改变,进而影响水准测量和三角高程测量的精度。

2.2 观测误差

人为操作因素是观测误差的重要来源。读数误差常见于水准测量和角度测量中,测量人员估读毫米位数值时因经验和习惯不同会产生差异,且长时间观测导致视觉疲劳也会加大读数偏差^[2]。瞄准误差在使用经纬仪、全站仪等仪器时尤为明显,若未能准确瞄准目标特征点,或十字丝与目标未精确重合,会使角度和距离测量结果产生误差。仪器架设过程中,对中整平不精确,导致仪器基准面与大地水准面不平行,同样会引入观测误差。观测条件限制也会降低测量精度。光线条件不佳时,如夜间或阴天环境,测量人员难以清晰分辨目标,容易出现瞄准偏差;强光直射仪器,会导致目镜反光,影响读数准确性。能见度低的情况下,如大雾、沙尘天气,会使目标模糊,增加照准难度,大气透明度降低会影响电磁波测距的精度。风力较大时,仪器容易产生晃动,导致观测过程中目标不稳定,影响测量结果的准确性。

2.3 环境误差

自然环境因素对水利工程测量产生多方面干扰。复杂地形会影响测量通视条件,如高山峡谷地区,控制点之间难以直接通视,需增加转点或采用特殊测量方法,这不仅增加测量工作量,还会引入额外误差。植被覆盖会遮挡测量目标,导致无法直接观测,需要清理植被或调整测量方案。水流环境对水下地形测量影响显著,水流速度和流向的变化会使测量船或测量设备发生位移,导致测点位置不准确。电磁场、大气折射等物理因素也会造成测量误差。在高压输电线路、变电站等强电磁环境附近,测量仪器的电子元件会受到电磁干扰,导致测量数据出现异常波动。大气折射会使光线传播路径发生弯曲,在长距离水准测量和角度测量中,大气折光误差会随距离

增加而累积,严重影响测量精度。大气湍流会使目标影像产生跳动,增加瞄准难度,降低测量的准确性。

2.4 数据处理误差

计算模型误差与算法近似误差在数据处理中难以避免。在测量数据计算过程中,常采用简化模型或近似算法,如在水准测量平差计算中,假设地球表面为平面,忽略地球曲率影响,这种简化在短距离测量中误差较小,但在长距离测量中会产生明显偏差。数值计算过程中的舍入误差,如在三角函数计算、开方运算中对结果进行取舍,也会导致计算结果偏离真实值。此外,采用的平差模型与实际测量情况不符,会使平差结果不能真实反映测量精度。数据传输与存储中的信息丢失同样会引入误差^[3]。在数据传输过程中,可能因网络故障、信号干扰等原因导致数据丢失或错误。存储介质的损坏、格式转换错误也会造成数据信息缺失或失真。例如,存储设备出现坏道,会导致部分数据无法读取;不同软件之间的数据格式不兼容,在数据导入导出过程中可能丢失部分信息,影响测量成果的完整性和准确性。

3 水利工程测量误差控制策略

3.1 仪器误差控制

仪器选型与精度匹配原则是误差控制的基础。水利工程测量涵盖大坝变形监测、河道地形测绘等多种场景,不同任务对测量精度要求各异。高程控制测量需选用每公里往返测高差中数中误差小于1mm的水准仪;平面控制测量应配置测角精度达0.5"、测距精度 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ 的全站仪。选型时不仅要考虑仪器标称精度,还需结合作业环境选择适配设备,如在潮湿环境选用防水防尘等级达IP67的仪器,高温区域采用耐高温型设备,确保仪器性能与工程需求相契合。定期校准与维护管理机制保障仪器性能稳定。建立严格的仪器校准周期,全站仪、GPS接收机等核心设备每年至少校准一次,校准工作由具备资质的专业机构执行,并留存校准证书与数据记录。日常维护执行三级保养制度:作业后进行清洁除尘,清除仪器表面污垢与光学部件灰尘;每月检查仪器部件连接紧固性,确保螺丝无松动、转轴无卡顿;每季度对仪器电路、电池续航能力进行专项检测,及时更换老化部件。

3.2 观测误差控制

标准化操作流程与人员培训提升观测规范性。编制涵盖仪器架设、瞄准、读数全流程的操作手册,明确各环节技术标准:仪器架设要求对中误差小于2mm、整平气泡偏移不超过半格;瞄准目标需使十字丝精确对准特征点;水准测量读数需进行前后视距差控制,差值不超

过5m。针对新入职人员开展“理论+实操”双轨培训，理论课程覆盖测量原理、规范标准，实操训练通过模拟场景掌握仪器操作技巧。建立考核认证体系，操作人员需通过理论笔试与现场实操考核方可上岗，定期开展复训确保技能更新。多观测值取中数法与重复观测法减小偶然误差影响。在水准测量中，对同一测站进行偶数次观测，取前后视读数的平均值作为观测值，利用误差抵偿性削弱偶然误差。地形测量时，对关键地物点采用三次独立观测，剔除异常值后计算算术平均值。针对高精度测量任务，采用往返观测、不同仪器比对观测等方式，通过多组数据相互验证提高观测可靠性。如大坝位移监测中，同时使用全站仪极坐标法与GNSS测量法获取坐标，对比两组数据差异，当差值超过限差时重新观测。

3.3 环境误差控制

观测时段选择与现场环境监测规避不利因素。根据气象条件制定测量窗口期：水准测量选择气温稳定、无风的清晨或傍晚，避免温度变化导致水准尺热胀冷缩；角度测量避开正午强光时段，减少大气湍流对目标成像的干扰。建立现场环境监测机制，在测量区域布设温湿度传感器、风速仪等设备，实时采集环境数据。当风速超过5m/s、相对湿度大于85%时暂停测量，待环境条件改善后恢复作业，降低环境因素对测量精度的影响^[4]。补偿算法与物理模型修正量化误差影响。针对大气折光误差，引入基于气象参数的修正模型，根据实时测量的气温、气压、湿度数据计算折光系数，对水准测量和三角高程测量结果进行修正。在电磁干扰区域，采用屏蔽技术结合数据滤波算法，通过加装电磁屏蔽罩降低干扰强度，利用卡尔曼滤波算法对测量数据进行平滑处理，消除信号波动影响。对于地形起伏导致的高差测量误差，建立数字高程模型（DEM），通过模型计算进行高差改正，提升测量结果准确性。

3.4 数据处理误差控制

优化计算模型与算法精度提升处理准确性。在平差计算中，采用严密平差模型替代近似模型，针对边角网测量数据，运用条件平差或间接平差法进行整体解算，确保误差分配合理。改进数值计算方法，采用高精度数值积分算法和迭代收敛准则，减少计算过程中的舍入误差。在GPS数据处理中，选用双差模型消除卫星钟差、接收机钟差等系统性误差，通过载波相位差分技术提高定位精度。数据质量检查与异常值剔除技术保障成果可靠性。建立三级数据检查机制：作业人员进行原始数据完整性检查，确保记录无缺漏；项目负责人核查数据逻辑关系，检查超限数据；技术总工采用统计检验方法，利用 3σ 准则识别粗差，当数据偏离均值超过三倍中误差时视为异常值予以剔除。针对可疑数据，通过重测验证或多源数据比对确认，确保最终用于工程的测量数据真实可靠。

结束语

水利工程测量误差分析与控制是系统性工程，涉及多环节与因素。本文阐述误差基础理论、分析误差来源并提出控制策略，为测量工作提供理论指导与实践参考。测量人员应充分认识误差客观性，严格遵循规范与流程，综合运用控制策略提高精度。随着测量技术发展，未来还需探索新分析方法与控制技术，以适应更高要求，推动测量事业进步。

参考文献

- [1]苏有军.水利工程测量中误差分析与控制策略研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(09):122-125.
- [2]周康健,马万泉,仇青青.水利工程中引水隧洞施工控制测量的研究[J].城镇建设,2025(2):208-210.
- [3]陈佳佳.无人机在水利工程测量中的应用研究[J].水利科学与寒区工程,2023,6(10):109-111.
- [4]田晓杰,向旭东.无人机航测技术在水利工程测量中的应用[J].百科论坛电子杂志,2022(13):119-121.