

水电隧洞开挖支护工程量计量误差控制研究

杨俊毅

中国葛洲坝集团第二工程有限公司 四川 成都 610000

摘要: 水电隧洞开挖支护工程隐蔽性强、施工工况复杂, 工程量计量易产生各类误差, 直接影响工程质量验收与结算精度。本文依托行业计量规范, 系统界定计量误差类型与量化标准, 从施工技术、测量核算、现场管理及环境地质四方面剖析误差成因。结合实际工程案例, 提出工艺优化、智能计量升级、全流程制度管控的综合控制策略, 验证了数字化技术应用的有效性, 可为同类隧洞工程精准计量与造价管控提供参考。

关键词: 水电隧洞开挖支护; 工程量计量; 误差控制

引言: 水电隧洞是水利水电工程核心输水、通行构筑物, 开挖支护施工工序繁杂、地质干扰因素多, 工程量计量是工程造价管控与质量验收的关键环节。当前工程施工中, 传统人工计量模式精度低、漏洞多, 易出现超欠挖计量偏差、资料缺失、核算失误等问题, 引发结算纠纷与质量隐患。为规范计量流程、降低误差概率, 本文系统性探究计量误差核心成因, 构建全维度误差控制体系, 助力隧洞工程计量标准化、精细化发展。

1 水电隧洞开挖支护计量基础与误差类型分析

1.1 隧洞开挖支护工程量核心内容与规范标准

(1) 开挖工程量内容: 隧洞土石方开挖按施工图纸所示轮廓尺寸计算有效自然方体积, 以立方米计量。范围包括洞身开挖、洞口明挖及出渣运输, 按设计开挖轮廓线加允许超挖量核定: 超挖为实际断面超出基准线, 欠挖为低于基准线。一般情况下地下洞室不应欠挖, 且应尽量减少超挖。其开挖半径的平均径向超挖值, 平洞不应大于200mm。(2) 支护工程量内容: 锚杆按招标设计图示尺寸的有效根数计量; 喷混凝土按设计图示范围的有效实体方体积计量, 超喷量及回弹损耗摊入单价; 钢拱架按设计图示有效重量计量; 衬砌混凝土按施工图所示尺寸以立方米计量。(3) 行业计量规范依据: 主要依据《水利水电工程工程量清单计价规范》(SL72—2013) 及设计图纸。隧洞施工质量验收规范要求: 洞室断面周边轮廓超挖值 $< 350\text{mm}$, 欠挖值 $< 150\text{mm}$ 。计量精度: 开口轮廓放样平面位置点位误差 $\leq 100\text{mm}$, 高程点位误差 $\leq 100\text{mm}$ ^[1]。

1.2 工程量计量误差的界定与量化标准

(1) 计量误差基本界定: 绝对误差为测量值与真值之差, 相对误差为绝对误差与真值的比值。系统误差源于仪器校准偏差等固定因素, 具有单向性和重复性; 偶然误差由随机波动形成, 具有相互抵偿性。隧洞工程计

量误差的判定以设计图纸、施工规范和监理验收资料为依据。(2) 误差分级量化标准: 轻微误差指偏差在规范允许范围内且不影响结构安全与工程结算的误差; 一般误差指超出允许偏差但可通过局部修正弥补的误差; 重大误差指严重偏离设计要求、影响结构安全或导致结算纠纷的误差。(3) 误差合规性判定: 规范允许范围内的施工偏差(如设计允许超挖值、放样点位误差限值等) 属合理偏差, 不计为计量误差; 超出规范允许范围的偏差则构成违规计量误差, 需在结算中予以核减或处理。

1.3 隧洞开挖支护计量误差主要类型

(1) 施工技术型误差: 包括爆破超欠挖偏差、断面成型尺寸偏差、支护结构安装位置偏差等。爆破参数不当、钻孔精度不足是超欠挖的主要技术原因。(2) 测量核算型误差: 涵盖仪器精度不足导致的测量偏差、数据记录与计算错误、计算公式选用不当、图纸与现场实际不符导致的核算误差。测量方法错误曾造成隧道中线偏差并导致较大经济损失。(3) 管理流程型误差: 包括计量台账不完善、隐蔽工程验收滞后、多方审核不规范、签证资料缺失等管理环节引发的计量偏差。(4) 环境地质型误差: 围岩地质突变、地下水扰动等客观条件导致的实际开挖量与设计量偏差, 此类误差需依据地质变更资料据实认定。

2 水电隧洞开挖支护工程量计量误差成因分析

2.1 施工技术层面误差成因

(1) 开挖施工工艺缺陷: 钻爆参数设计不合理, 包括炮眼深度、间距、装药量等关键指标未依据围岩类别进行差异化设计, 导致爆破轮廓控制效果差; 钻孔精度不足, 钻孔外插角过大或孔底偏离设计轮廓线, 造成超挖或欠挖超标, 进而引发开挖工程量计量偏差。爆破操作不规范, 如起爆顺序不当、装药结构不合理等, 进一步加剧断面成型误差。(2) 支护施工工艺偏差: 喷射混

凝土施工中未严格按设计厚度分层施喷,一次喷射厚度过大导致回弹率增高、实际附着厚度不足;锚杆钻孔角度偏差超出允许范围,锚杆有效锚固深度不达标;钢拱架安装垂直度偏差、连接板错位等引发支护结构实际工程量与设计量不符,造成支护工程量统计失真。(3)施工工艺适配性不足:在穿越断层破碎带、岩层分界线等复杂地质段时,未及时动态调整钻孔排距、单孔装药量等爆破参数,仍沿用常规段施工参数,导致超欠挖形态发生显著变化,产生持续性计量误差累积。

2.2 测量与核算层面误差成因

(1)测量设备与操作问题:测量仪器未按检定周期定期校验,导致系统误差持续引入;全站仪、水准仪等设备精度等级无法满足隧洞高精度断面测量要求;测量人员操作不规范、数据处理方法错误,造成现场断面采集数据偏差,且此类误差难以在后续复核中完全消除。

(2)计量核算方法滞后:仍以传统人工查图、手工核算为主,三维激光扫描、BIM等数字化计量手段应用不足,隐蔽工程数据采集不全面,断面面积、体积计算中采用近似公式简化处理,无法适配精细化计量要求,导致核算成果偏离实际工程量^[2]。(3)图纸与现场数据偏差:施工图纸标注尺寸模糊或局部大样图缺失,设计变更通知单传递不及时,现场施工调整后未形成有效书面记录,计量依据与实际施工情况产生偏差,引发竣工结算阶段的计量争议。

2.3 现场管理层面误差成因

(1)人员专业素养不足:施工及计量人员对《水利水电工程工程量清单计价规范》等计量规定掌握不扎实,对超挖、欠挖的处理原则理解偏差,责任意识薄弱,现场数据采集环节易出现漏记、错记、重复计量等人为失误。(2)计量管理制度不完善:缺乏从开挖到支护全流程的计量管控机制,隐蔽工程验收未在覆盖前完成实测实量,多级复核制度执行不到位,施工日志与计量台账相互脱节,问题数据难以及时发现和纠偏。(3)资料台账管理混乱:施工原始记录、监理验收资料、设计变更签证等单据分类归档不完整,纸质资料与电子数据不同步,数据追溯性差,后期结算阶段工程量核对缺乏完整依据链,引发计量误差。

2.4 环境与客观条件成因

(1)地质条件复杂性:隧洞穿越区域围岩等级频繁变化,岩体完整性不均,局部发育断层破碎带或软弱夹层,开挖后实际揭示地质条件与设计勘察成果存在差异,导致设计工程量与实际施工工程量偏离,计量预判难度大。(2)施工环境局限性:隧洞内部空间狭窄、光

线照度不足、粉尘浓度高、通风条件受限,测量通视条件差,断面采集和尺寸标定作业难度增大,现场测量数据采集频次和覆盖密度不足,诱发计量误差。(3)施工动态干扰因素:开挖、支护、衬砌等多工序交叉作业,施工工期紧张,局部塌方或变形超限引发返工处理,现场工程量统计工作难以同步跟进,造成阶段计量滞后或漏计,累积形成最终结算误差。

3 水电隧洞开挖支护工程量计量误差控制策略与工程应用

3.1 施工技术优化,从源头控制工艺型误差

(1)优化隧洞开挖施工工艺。精细化设计钻爆参数,针对不同围岩类别差异化确定炮眼深度、间距及装药量等指标,采用精准钻孔与微差爆破技术。引入全电脑智能多臂凿岩台车,通过程序自动定位炮孔并控制钻孔深度,钻孔误差可控制在5mm以内。实施光面爆破,严格控制超欠挖量。惠州中洞项目通过优化爆破参数,平均径向超挖控制在4.1cm以内,最大超挖不超过11.6cm,有效减少了开挖工程量偏差。(2)规范支护标准化施工。制定锚杆、喷射混凝土、钢拱架支护标准流程,明确各工序操作规范与验收标准。喷射混凝土按设计厚度分层施喷,锚杆钻孔角度与深度控制在允许偏差范围内,钢拱架安装确保垂直度与连接密实度,严控施工尺寸,保障支护工程量精准可控^[3]。(3)动态适配地质施工方案。施工前强化地质勘察与超前预报,施工中实时监测围岩变化。针对断层破碎带等复杂地质段,及时调整钻孔排距、单孔装药量等参数。复杂地质条件下进行围岩稳定性监测,依据结果动态确定支护参数,从源头减少计量误差累积。

3.2 升级计量技术,提升测量核算精准度

(1)规范测量设备管理与操作。建立仪器定期校验维护制度,确保全站仪等设备精度满足要求。强化测量人员培训考核,统一现场测量标准。松阳项目采用换手测量消除误差,平差后精度控制在 $\pm 20\text{mm}$ 以内,测量数据经“双签认”后交班至班组,确保掘进与支护参数零误差执行。(2)引入智能化计量技术。应用三维激光扫描技术采集隧洞开挖断面数据,处理点云后计算超欠挖量、面积及方量等数据。构建隧洞施工数字化系统,利用扫描仪采集各阶段点云数据,实现质量要素统计分析。三维移动扫描技术使作业效率提升约60%,精度达毫米级。结合BIM建模,实现工程量数字化精准核算,替代传统人工模式^[4]。(3)建立数据动态更新机制。及时同步设计变更与现场施工数据,确保图纸、测量数据、计量台账三者统一。基于点云数据监控施工进度与强度,系统自动生成

质量分析报告及验评表单,实现计量全过程可追溯。

3.3 完善管理制度,构建全流程管控体系

(1)健全人员培训与考核机制:定期开展计量规范、实操技能培训,重点强化《水利水电工程工程量清单计价规范》等规定的学习与理解。建立计量工作考核制度与责任追究机制,将计量准确率纳入绩效考核指标,提升工作人员专业能力与责任意识,杜绝数据漏记、错记、重复计量等人为失误。(2)完善多级计量审核制度:严格落实施工单位自检、监理复核、建设单位终审的三级审核流程。隐蔽工程在覆盖前完成实测实量并形成验收记录,每循环开挖进尺在贯通前进行测量旁站。对超挖、欠挖等关键计量项目实行专项复核,杜绝计量漏洞^[5]。(3)规范台账与资料管理:建立电子化计量台账,完整留存施工原始记录、监理验收资料、设计变更签证等全套资料。实行纸质资料与电子数据同步归档,确保数据追溯性。推行闭环管理机制,测量结果经确认后及时交底至施工班组,实现工程量计量全过程可追溯、可验证。

3.4 工程案例应用与效果验证

(1)工程概况:以某抽水蓄能电站进厂交通洞工程为例。该隧洞穿越区域围岩等级变化频繁,局部发育断层破碎带,地质条件复杂,施工空间狭窄,测量通视条件差,开挖支护工程量计量管控难度大。施工采用钻爆法开挖与锚喷支护相结合的工艺方案。(2)误差控制方案落地:将本文提出的技术与管理管控策略系统应用于实际工程。施工技术层面,针对不同围岩类别优化钻爆参数,引入智能凿岩台车控制钻孔精度,实施动态地质监测与参数调整。计量技术层面,采用三维激光扫描仪采集隧洞开挖、支护各阶段点云数据,结合隧洞设计参数进行超欠挖、支护体型偏差、喷射混凝土厚度等质量要素的统计分析。管理层面,落实测量数据“双签认”制度与三级审核流程,建立电子化计量台账。(3)应用效果分析:数字化计量系统应用后,隧洞超欠挖检测精度达到毫米级。系统基于三维点云数据实现开挖及支护

工程量的自动化计量,并自动生成施工质量分析报告及验评表单。对比管控前后,断面超欠挖控制水平显著提升,喷射混凝土超耗率明显降低,工程量计量误差率大幅下降,造价偏差得到有效控制,为工程结算提供了精准可靠的数据支撑。(4)工程应用总结:实践表明,三维激光扫描与BIM等数字化计量技术是提升隧洞工程量计量精度的有效手段,能够从根本上解决传统人工核算方式精度不足、效率低下的问题。但同时也应认识到,架站式三维激光扫描设备成本较高、操作复杂,后期数据拼接过程易引入误差,在常规项目中大规模推广仍面临一定制约。后续应进一步优化扫描设备便携性与数据处理算法,降低技术应用门槛,推动数字化计量技术在水电隧洞工程中的普及应用。

结束语

本文全面梳理了水电隧洞开挖支护计量误差的类型与成因,针对性提出技术、设备、管理三位一体的误差控制方案。工程实践证明,智能施工设备与数字化计量技术可大幅提升计量精度,全流程管控体系能有效规避人为与管理误差。同时,研究发现数字化设备推广存在成本高、操作复杂等短板。后续可优化智能计量算法与设备性能,降低应用门槛,进一步完善隧洞工程计量误差管控体系。

参考文献

- [1]王亮,陈凯.水电隧洞开挖超欠挖对工程量计量精度的影响及控制措施[J].工程造价管理,2025,36(01):81-87.
- [2]詹双桥,杜兴武.基于数字化图像的引水隧洞超欠挖检测及其应用技术研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(05):105-110.
- [3]宋日辉,张冰.钻爆法隧洞开挖及初期支护施工控制与计量优化[J].山西水利科技,2023,16(02):29-32.
- [4]孙秀艳.水利隧洞工程概预算计量误差成因及精细化管控对策[J].水利技术监督,2023,28(04):183-187.
- [5]李昊,赵建军.基于三维激光扫描的隧洞支护工程量精准计量技术[J].人民长江,2024,55(09):192-197.