

压力钢管安装中的测量与精度控制

周松毅

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810007

摘要：压力钢管作为水利水电工程输送高压水流的核心构件，其安装精度直接关系到工程运行的安全性与经济性。本文系统探讨压力钢管安装过程中的测量技术体系与精度控制方法，分析测量准备、管节定位、轴线监测等关键环节的技术要点，结合工程实例剖析误差来源及应对策略，提出融合现代测量技术与管理措施的精度控制方案。研究表明，通过优化测量控制网、集成先进仪器设备与强化过程管理，可有效提升压力钢管安装精度，为同类工程提供理论与实践参考。

关键词：压力钢管；安装测量；精度控制；水利水电工程；三维测量

1 引言

在水利水电工程建设中，压力钢管承担着将水库水流以高压状态输送至水轮发电机组的重要功能，其安装质量直接影响机组运行效率与工程安全。随着抽水蓄能电站、高水头水电站的发展，压力钢管呈现出管径大、长度长、水头高的特点（如某抽水蓄能电站压力钢管直径8m、设计水头600m），对安装精度提出了严苛要求：轴线偏差通常需控制在3mm/m以内，管口圆度偏差不超过管径的1/1000，高程误差 $\leq \pm 5\text{mm}$ 。传统测量方法在复杂地形（如竖井、地下洞室）和高落差环境中面临精度不足、效率低下的问题，而全站仪、三维激光扫描、BIM技术的应用为精度控制提供了新的技术路径。因此，深入研究压力钢管安装的测量技术体系与精度控制策略，对保障工程安全与效益具有重要意义。

2 压力钢管安装测量的技术体系构建

2.1 测量控制网的分级构建

压力钢管安装测量需建立三级精度控制网：首级控制网基于工程区域的GPS首级网，在钢管沿线布设三等以上平面及高程控制点，平面位置中误差 $\leq 10\text{mm}$ ，高程中误差 $\leq 15\text{mm}$ ，为整个安装工程提供基准；二级控制网在厂房、竖井等关键安装区域加密布设全站仪导线点，采用边角网测量（测角中误差 $\leq 2''$ ，边长相对中误差 $\leq 1/50000$ ），并与首级网联测，实现安装区域的精度强化；三级控制网为作业面临时测点，采用强制对中基座固定，平面位置精度控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内，高程精度 $\pm 3\text{mm}$ 内，直接服务于管节定位与调整。控制网构建时需考虑温度、湿度等环境因素对测量仪器的影响，定期（每15天）对控制网进行复核，确保基准的稳定性。

2.2 管节定位测量的技术要点

管节定位采用“三维坐标法”实现空间位置精确

控制：轴向定位以设计轴线为基准，利用全站仪极坐标法测设管节轴线点，纵向偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 内，测量时需考虑钢管温度变化对长度的影响（钢材线膨胀系数 $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，温度每变化 10°C ，长度变化约 0.12mm/m ），需实时记录环境温度并修正；高程定位通过二等水准测量传递高程，采用高精度水准仪（如DS1级）配合因瓦水准尺，管口高程偏差控制在 $\leq \pm 5\text{mm}$ ；径向定位采用钢带尺配合全站仪测量管口截面特征点（每截面不少于8个测点），通过计算截面圆度误差（ $\leq D/1000$ ，D为管径），确保管节径向精度^[1]。对于大直径钢管（ $D \geq 6\text{m}$ ），可采用三维激光扫描仪对管节整体轮廓进行扫描，生成点云数据与设计模型比对，提高定位效率与精度。

2.3 轴线偏差与焊接变形的监测技术

轴线偏差测量传统方法采用钢丝投影法（钢丝直径 $\leq 0.5\text{mm}$ ，张力 $\geq 15\text{kg}$ ），现代工程多使用全站仪无棱镜测量技术：在管节内壁每隔5m布设反光片或直接测量内壁特征点，通过三维坐标计算轴线偏差，允许值为 $\leq 3\text{mm/m}$ 。焊接过程中，温度变化会导致管节产生热变形，需采用“实时监测+事后矫正”模式：预埋应变计监测焊接应力，当应变超过钢材屈服强度的70%时暂停作业；焊接后使用三维激光扫描仪（点云密度 $\geq 20\text{点}/\text{m}^2$ ）对管节进行扫描，生成变形云图，对超差部位（如直线度 $> 3\text{mm/m}$ ）采用机械校圆或火焰矫正技术处理，确保管节轴线精度。

3 安装精度控制的关键环节与误差应对

3.1 测量误差来源分析与控制措施

测量误差的产生机制复杂，主要源于仪器精度损耗、环境干扰及人为操作偏差。仪器误差控制需建立全周期检定体系：全站仪需由国家法定计量机构每年完成一次全面检定，测前须进行i角校正（误差控制在 $10''$ 以

内), 确保水平轴与垂直轴的垂直度; 水准尺分划误差需定期校验, 每米误差不得超过1mm, 避免累积偏差。环境误差管理需构建动态修正模型: 温度变化对钢材尺寸影响显著(线膨胀系数 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$), 测量时需同步记录环境温度, 对长度测量值按公式 $\Delta L = 1.2 \times 10^{-5} \times L \times \Delta T$ 进行实时修正^[2]; 当风力超过5级(风速 $\geq 8.0\text{m/s}$)时, 全站仪测角误差会增大2"~3", 需立即停止露天作业; 雨天、强光等恶劣天气需为仪器加装防雨雪罩与遮光板, 减少光学系统折射误差。人为误差防控需落实资质认证与操作规范: 测量人员必须持有测绘地理信息职业资格证书, 关键工序实行“双人双机复测”制度——两人使用不同仪器独立测量, 当平面位置偏差 $\leq 2\text{mm}$ 、高程偏差 $\leq 1.5\text{mm}$ 时数据方可确认, 杜绝人为操作失误。

3.2 安装过程的精度控制实施要点

管节运输与吊装需构建全过程防变形体系: 运输时采用型钢焊接的专用支架, 支点间距严格控制在4m以内, 支架与管节接触部位衬垫橡胶板防止磕碰; 吊装作业使用四点平衡吊具, 通过拉力传感器实时监测各吊点受力均衡性, 起吊角度控制在 60° 以内, 避免管节产生塑性变形(残余变形量需 $\leq L/1000$, L为管节长度)。接口对接需建立三维微调机制: 采用“三向千斤顶+定位销”系统, 轴向错边量控制在板厚的15%且 $\leq 3\text{mm}$, 径向间隙 $\leq 2\text{mm}$, 每500mm圆周用塞尺检测1点, 合格率需达100%; 使用激光准直仪校准接口轴线, 偏差超过1.5mm/m时需重新调整。伸缩节安装需预留动态补偿量: 按设计温差计算热胀量(通常20~50mm), 轴向间隙偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$, 垂直度用0.1mm/m精度的电子水平仪检测, 超差时通过调节支座螺栓校正; 安装后需进行预拉伸/压缩试验, 验证伸缩性能^[3]。焊接工序需实施应力-变形双控: 定位焊采用对称施焊法, 焊点长度 $\geq 50\text{mm}$ 、间距 $\leq 300\text{mm}$; 正式焊接时采用多层多道焊(层间温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$), 每焊完3层进行一次锤击消应力处理; 焊后24小时内完成UT/RT无损检测, 并使用三维激光扫描仪(扫描间距 $\leq 50\text{mm}$)生成变形云图, 对直线度超3mm/m的部位采用液压校圆机矫正。

3.3 特殊工况下的精度控制策略

竖井与地下洞室安装需突破通视限制: 采用“铅垂仪+陀螺全站仪”组合技术, 在竖井顶部布设强制对中控制点, 通过精度1/10000的铅垂仪投点, 结合洞内导线测量(测角中误差 $\leq 1.5''$)形成闭合控制网; 对于长距离洞室, 每50m设置一个反光片监测点, 使用无棱镜全站仪(测距精度1mm+1ppm)进行三维坐标测量, 轴线偏差超过2mm/m时需分段矫正。高落差压力钢管高程测量需引

入地球曲率修正: 当水头超过500m时, 采用三角高程测量必须加入球气差改正($f = 0.43D^2/R$), 其中地球半径R取6371km, 测距 $D \geq 100\text{m}$ 时需按此公式计算改正值; 同时采用二等水准测量进行校核, 高程中误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。钢管分叉段安装需发挥数字技术优势: 基于Revit建立三维BIM模型, 导入管节实测数据进行预拼装模拟, 提前识别接口干涉部位(如支管与主管夹角偏差 $> 0.5^{\circ}$ 时), 通过模型优化生成切割余量参数^[4]; 现场采用便携式三维扫描仪(点云密度 $\geq 50\text{点}/\text{m}^2$)实时扫描分叉段轮廓, 与BIM模型比对后进行微调, 确保接口错边量 $\leq 2\text{mm}$ 、间隙 $\leq 1.5\text{mm}$ 。

4 工程实例与精度控制效果分析

4.1 某抽水蓄能电站压力钢管安装实践

该工程压力钢管直径8m, 安装长度1200m, 设计水头600m, 采用“全站仪+BIM+三维激光扫描”技术体系控制精度: 测量方案在竖井段每20m布设1个控制断面, 使用Leica TS60全站仪(测角0.5", 测距1mm+1ppm)进行管节定位, 结合Revit软件建立三维模型, 模拟安装过程; 精度控制结果显示, 轴线累计偏差18mm(允许值36mm), 管口圆度最大偏差6mm(允许值8mm), 焊接后管节直线度0.8mm/m(允许值3mm/m), 各项指标均优于设计要求。工程中创新应用自动化监测系统, 在钢管关键节点布设GNSS接收机(采样频率1Hz), 实时监测安装过程中的位移变化, 预警阈值设为5mm, 有效预防了安装偏差的累积。

4.2 精度控制技术的应用成效与创新

通过多技术集成应用, 该工程管节对接效率提升40%, 返工率降低70%, 测量误差控制在允许值的50%以内。技术创新点包括: BIM模型预拼装技术提前发现并解决3处接口干涉问题, 减少现场调整时间; 三维激光扫描竣工测量(使用Trimble X7扫描仪, 扫描速度100万点/秒)实现点云数据与设计模型比对偏差 $\leq 2\text{mm}$, 提高验收效率; 建立测量数据管理系统, 对每道工序的测量数据编号存档, 实现误差链追溯(如通过数据追溯发现焊接温度导致的12mm偏差, 及时调整焊接工艺)。这些技术应用为高水头、大直径压力钢管安装提供了可复制的精度控制模式。

5 精度控制的优化策略与发展趋势

5.1 技术层面的优化路径

未来压力钢管安装测量需推进多技术融合: 构建“全站仪+三维激光扫描+智能传感器”的多元测量体系, 实现静态定位与动态监测的结合; 开发基于BIM的测量数据管理平台, 将设计模型、测量数据、施工记录集

成于统一平台,形成“测量-建模-分析-调整”的闭环控制流程;应用智能测量机器人(如TrimbleX7)进行自动化扫描,通过AI算法自动识别管节特征点,提高测量效率与精度;引入分布式光纤传感技术,对钢管安装全过程进行应力-应变监测,为精度控制提供实时数据支撑。

5.2 管理层面的系统提升

完善质量管控体系,实行“三检制+监理复测”:施工单位班组自检、技术质检、项目部终检,监理单位按30%比例抽检关键工序,重要节点100%复测;建立误差溯源机制,通过测量数据管理系统对误差来源进行分类统计(如仪器误差占比15%、环境误差占比25%、人为误差占比10%、工艺误差占比50%),针对性优化控制措施;加强测量人员培训,定期开展新技术(如三维扫描、BIM应用)培训与技能考核,提升人员专业素养;制定应急预案,针对突发误差(如控制网破坏、仪器故障)建立快速响应机制,确保安装精度不受意外因素影响。

5.3 行业发展的未来趋势

随着水利水电工程向智能化、数字化方向发展,压力钢管安装测量将呈现三大趋势:智能化测量装备广泛应用,如无人机航测用于露天钢管安装基准建立,机器人测量系统用于地下洞室钢管检测;数字化管控平台普及,通过物联网技术实现测量数据实时传输与分析,构建全生命周期的精度管控体系;绿色测量技术发展,推广低能耗、高效率的测量方法(如太阳能供电的自动化监测站),减少工程建设对环境的影响。这些趋势将推动压

力钢管安装精度控制向更高效、更可靠的方向迈进。

6 结论

压力钢管安装精度控制是一项融合测量技术、工程工艺与管理科学的系统工程。研究表明,通过构建分级控制网、采用先进测量仪器(如0.5"级全站仪、三维激光扫描仪),结合BIM技术与自动化监测系统,可将安装偏差控制在设计允许值的50%以内;强化焊接工艺控制、温度修正、应力监测等措施,能有效降低环境与工艺误差对精度的影响;某抽水蓄能电站工程实例证明,多技术集成应用可提升安装效率40%以上,降低返工率70%,为高参数压力钢管安装提供了技术范式。未来,随着智能传感器、AI算法与数字孪生技术的发展,压力钢管安装测量将实现从“事后检测”向“实时管控”的转变,为水利水电工程的安全高效运行提供更强的技术保障。

参考文献

- [1]吕俊,陈维波,纪宇,翟文辉,高树林.小半径竖弯段引水隧洞施工及测量精度控制[J].云南水力发电,2019,35(S2):114-117.
- [2]陈博.超深引水竖井压力钢管安装技术[J].东北水利水电,2016,34(04):13-14+40+71.
- [3]伊哲,熊宜斌.浅谈水电站大直径压力钢管凑合节的整体安装技术[J].低碳世界,2016,(02):77-78.
- [4]于旭阳.三峡超大型引水压力钢管施工测量控制研究[J].水电自动化与大坝监测,2014,38(05):34-36.