

QBT 水电站 30t 平移式缆索起重机安装关键技术研究

苏兴强 张盼

中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 QBT 监理中心, 新疆 阿勒泰 836500

[摘要]为解决 QBT 水电站大坝混凝土浇筑重型设备跨江安装难题, 针对 5 台 30t 平移式缆索起重机(简称“缆机”)的大跨度(760m)、高落差(主索支点高差 6m)安装需求, 开展系统性技术研究。构建“前期筹备-基础构建-主体安装-系统调试-验收交付”全流程技术体系, 重点突破临时承载索跨江架设、主索精准张拉、轨道焊接变形控制等核心技术瓶颈, 创新采用“双卷扬机同步牵引+测力计实时监控”的主索张拉工艺, 优化 U71Mn 钢轨焊接预热与焊后热处理参数, 并通过有限元分析与现场载荷试验验证技术可行性。结果表明, 该技术体系实现缆机安装质量合格率 100%、优良率 96.8%, 主索垂度偏差控制在 $\pm 0.25\text{m}$ 内, 轨道接头不平度 $\leq 0.8\text{mm}$, 满足 605d 总工期要求, 且全程零安全事故。研究成果为高海拔、大跨度水利工程无塔缆机安装提供了技术范式, 具有重要工程推广价值。

[关键词]平移式缆索起重机; 跨江安装; 主索张拉; 轨道焊接; 受力分析; 质量控制

DOI: 10.33142/hst.v9i1.18990

中图分类号: TV74

文献标识码: A

Key Technology Research on Installation of 30t Horizontal Cable Crane for QBT Hydropower Station

SU Xingqiang, ZHANG Pan

QBT Supervision Center of Sinohydro Construction Engineering Consulting Northwest Co., Ltd., Altay, Xinjiang, 836500, China

Abstract: In order to solve the problem of cross river installation of heavy equipment for concrete pouring of QBT hydropower station dam, a systematic technical research was carried out for the installation requirements of five 30t translational cable cranes (referred to as "cable cranes") with large spans (760m) and high drop (6m difference in height of the main cable support point). Build a full process technical system of "pre preparation - basic construction - main installation - system debugging - acceptance and delivery", focusing on breaking through core technical bottlenecks such as temporary load-bearing cable crossing the river, precise tensioning of main cables, and deformation control of track welding. Innovatively adopt the main cable tensioning process of "double winch synchronous traction+real-time monitoring of force gauges", optimize U71Mn rail welding preheating and post weld heat treatment parameters, and verify technical feasibility through finite element analysis and on-site load testing. The results showed that the technology system achieved a 100% qualified rate and a 96.8% excellent rate for cable crane installation quality. The deviation of the main cable sag was controlled within $\pm 0.25\text{m}$, and the unevenness of the track joint was $\leq 0.8\text{mm}$, meeting the requirements of a total construction period of 605 days and zero safety accidents throughout the entire process. The research results provide a technical paradigm for the installation of tower less cable cranes in high-altitude and large-span water conservancy projects, and have important engineering promotion value.

Keywords: horizontal cable crane; cross river installation; main cable tension; track welding; force analysis; quality control

引言

水利水电工程作为国家能源与水安全战略的核心载体, 其大坝混凝土浇筑施工对重型设备的安装精度与运行可靠性提出严苛要求。QBT 水电站地处高海拔地区, 大坝混凝土浇筑依赖 5 台 30t 平移式无塔缆机实现跨江物料转运, 该类缆机具有起重量大(30t)、作业跨度广(760m)、适应复杂地形能力强等优势, 但也面临三大技术挑战: 一

是跨江绳索系统安装需克服 760m 跨度下的垂度控制与受力均衡难题, 主索最大垂距达 38.2m, 张拉过程易出现局部应力集中; 二是左、右岸平台高程差 6m, 轨道安装需实现高精度找平(同一截面轨面标高差 $\leq 5\text{mm}$), U71Mn 钢轨焊接易因热变形影响运行稳定性; 三是高空作业(最高作业高程 1067m)与多专业交叉施工(土建、机械、电气协同)风险叠加, 安全管控难度大。

表 1 缆机参数表

参数类别	具体指标
设备规格	30t 平移式缆索起重机, 共 5 台
跨度	760.00m
主索参数	直径 $\Phi 97\text{mm}$ Z 形密闭索, 单根长度 760m, 重量约 47t, 最大垂度 38.20m (跨度的 5%)
轨道规格	QU80、QU100 型 U71Mn 钢轨, 左岸轨道长度 262.75m (宽 16.00m), 右岸 262.75m (宽 14.20m)
平台高程	左岸 1055.00m (主车主索支点 1057.00m), 右岸 1050.00m (副车主索支点 1051.00m)
工期要求	总日历天 601 天 (2022 年 11 月 30 日-2024 年 7 月 27 日)

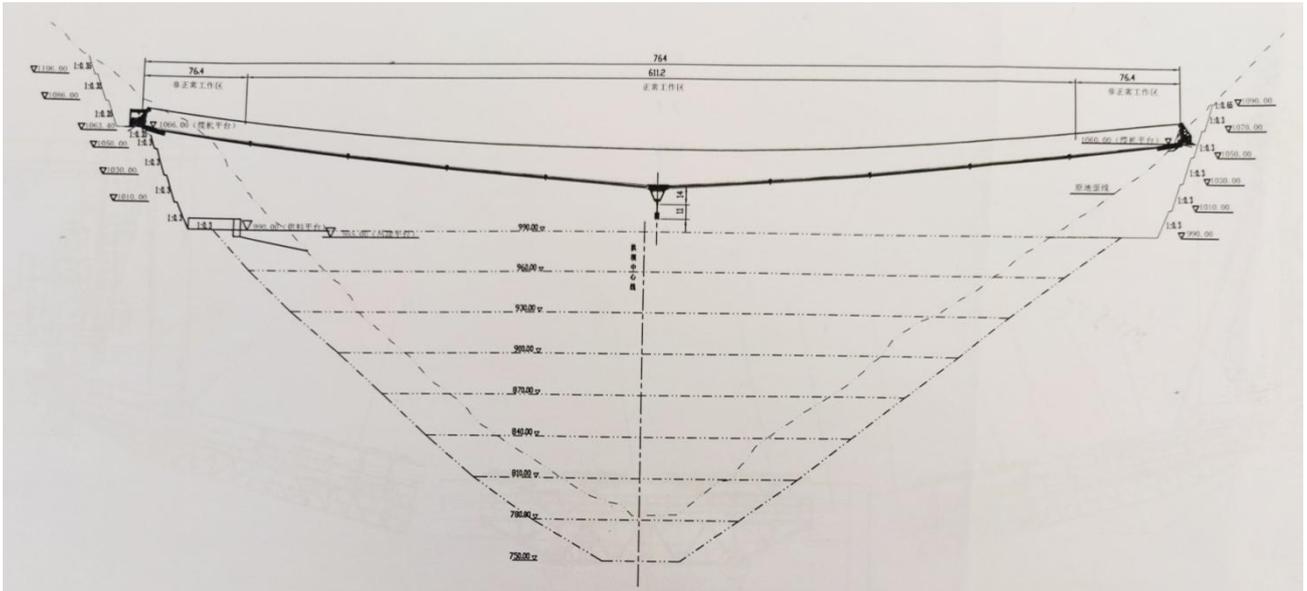


图 1 缆机布置形式示意图

当前,国内外关于缆机安装的研究多聚焦于传统有塔缆机或小跨度设备,如杨文渊等提出的起重吊装参数计算方法为绳索系统设计提供基础,但针对大跨度无塔缆机跨江安装的专项技术研究较少;GB/T 28756—2012《缆索起重机》等规范虽明确通用技术要求,却未涵盖高海拔、大跨度场景下的特殊工艺参数。基于此,本文以 QBT 水电站工程为依托,依据 GB 50127—2019《架空索道工程技术规范》、SL 400—2007《水利水电工程金属结构与机电设备安装安全技术规程》等标准,系统研发大跨度无塔缆机安装关键技术,通过工艺优化、受力仿真与现场验证,形成可复制的技术体系,为同类工程提供理论与实践支撑。

1 工程概况

QBT 水电站大坝工程位于新疆阿勒泰地区,5 台 30t 平移式无塔缆机承担全部混凝土浇筑物料转运任务,核心参数如表 1 所示。缆机安装区域地质条件复杂,左岸为岩质边坡(缆机平台高程 1055.00m),右岸为堆积体(平台高程 1050.00m),主索两端支点高差 6.00m,跨度 760.00m,需跨越湍急河道,且施工期间受高海拔(平均海拔 1000m 以上)、

强风(瞬时风速可达 15m/s)等气候因素影响,进一步增加安装难度。缆机参数指标见表 1,缆机布置形式见图 1。

2 施工组织与总体布置优化

2.1 场地布置原则

遵循“三区分离(施工区、材料区、办公区)、四向协同(左/右岸、空中/地面)”原则,实现三大目标:一是临建设施严格限定在合同约定范围(左岸 1055 平台下游侧、右岸 1050 平台上游侧),避免占用大坝浇筑核心区域;二是优化设备转运路径,缩短大件构件(如主梁、主索)运输距离,右岸主索卷筒支架距轨道基础仅 8m,减少二次转运损耗;三是同步考虑安全性与经济性,临时承载索地锚与土建基础同步施工,节省工期 30d。

2.2 关键设施精细化布置

2.2.1 卷扬机与地锚系统

采用“分区布置、对称受力”方案,右岸设 1#(15t 辅助)、2#(15t 往复)、3#(5t 保距绳)、4#/5#(5t 辅助)卷扬机,左岸设 6#(15t 往复)、7#(5t 辅助)卷扬机,所有卷扬机均通过预埋型钢焊接固定(15t 卷扬机加固点

≥6 处,焊缝长度≥300mm,焊脚≥10mm),确保卷筒中心与导向滑轮轴线偏差≤2°,卷筒与第一个导向滑轮距离≥20 倍卷筒直径,避免绳索偏磨。

地锚系统分为临时承载索地锚(厂家供货,型号 GDL238-T400)与导向地锚(Q345C 钢板制作,厚度 20mm),临时承载索地锚抗拉强度≥1000kN,抗剪强度≥500kN,预埋地脚螺栓采用 8.8 级 M30 螺栓,预埋深度 1250mm,混凝土与螺栓粘接力≥1.5N/mm²,确保承载索张拉时地锚无位移。

2.2.2 临时作业平台

左岸主索张拉平台采用 20a 工字钢搭设(尺寸 3m×6m),延伸至 1055m 马道,平台与预埋件焊接固定,承载力≥5t/m²;右岸索头浇筑平台采用 Φ48mm 钢管搭设(2m×2m×5m),顶部铺设 50mm 厚木板,四周设 1.2m 高防护栏杆,满足索头浇筑时的操作安全与锌液保温需求(浇筑过程温度需保持 450~480℃)。

2.3 风、水、电系统保障

施工用风:配置 2 台 20m³/min 移动式空压机(压力 0.8MPa),分别布置在左、右岸平台,通过 Φ50mm 高压风管连接至作业点,满足焊接、切割作业用风需求,风压稳定度≥95%。

施工用水:采用 10t 洒水车定期供水,在左、右岸平台各设 1 个 5m³ 储水箱,生活用水经净化处理(符合 GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》),生产用水(设备冷却、场地降尘)采用循环利用系统,节水率达 30%。

施工用电:左岸 1066 平台设 1 座 630kVA 开闭所,引 10kV 电源(取自附近 10kV 终端杆),通过 2 条 YJV22-10kV-3×120mm² 电缆供电;右岸 1060 平台设 1 台 315kVA 10kV/0.4kV 箱式变压器,低压侧采用 VV22-0.6/1kV-4×240mm² 电缆引至分电箱,实现“三级配电、两级保护”,卷扬机、电焊机等设备供电电压偏差≤±5%,确保电气系统稳定运行。

3 关键安装工艺与技术创新

3.1 基础施工工艺优化

3.1.1 接地装置安装

采用“网状敷设+多点连接”工艺,接地网由 40×4mm 热镀锌扁钢组成,网格间距 5m×5m,轨道与接地网通过扁钢搭焊(搭接长度≥80mm,焊缝高度≥4mm),缆机本体与轨道通过 Φ12mm 镀锌圆钢连接(每 5m 1 处)。采用高频接地电阻测试仪(精度±2%)检测,接地电阻≤4Ω,满足 GB 50169—2016《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》要求,避免雷击或漏电事故。“网状敷设+

多点连接”详见图 2。



(a) 轨道接地网状敷设



(b) 轨道接地多点连接

图 2 接地安装

3.1.2 轨道安装与焊接变形控制

轨道安装精度直接影响缆机运行平稳性,创新采用“测量-调整-焊接-复测”四步工艺:

测量控制:以监理批复的二等水准点为基准,用 Leica TS60 全站仪,测角精度±0.5",测距精度±(1mm+2ppm×D)放出轨道中心线,每 5m 设 1 个高程控制点,焊接轨道托架(低于设计高程 3mm),确保调整余量。

轨道调整:采用“整体找平+局部微调”方法,地脚螺栓顶部距基础垫板高度控制在 75mm±2mm,轨道两侧压板间隙均匀(2mm±0.5mm),通过经纬仪校准中心线,同一截面轨面标高差≤5mm,纵向坡度≤1/1000,单根轨道横向偏差(2m 长度内)≤1mm。

焊接工艺优化:针对 U71Mn 钢轨焊接易出现冷裂纹问题,采用“预热-分层焊接-回火”工艺:焊前预热温度 250℃±10℃(预热宽度 200mm,采用远红外测温仪监控),轨底、轨腰用 E5015(J507)焊条(直径 φ4mm,电流 135-145A),轨头上部用 E8515(J857)焊条(电流 145-155A),层间温度≥250℃;焊后采用氧-乙炔焰回火(温度 620~650℃,恒温 20min),用石棉布包裹缓冷至

常温，消除焊接内应力，焊缝打磨后不平度 $\leq 1\text{mm}$ 。

二期混凝土浇筑：采用 C30 微膨胀混凝土（膨胀率 0.02%~0.03%），浇筑时用振捣棒（直径 50mm）分层振捣（分层厚度 $\leq 300\text{mm}$ ），避免碰撞轨道，混凝土初凝后（浇筑完成 8h）复查轨道精度，超差部位采用环氧树脂砂浆调整，确保轨道长期稳定性。轨道安装及基础浇筑见图 3。



(a) 轨道安装



(b) 轨道基础模板安装

图 3 轨道安装及基础浇筑

3.2 主体结构安装核心技术

3.2.1 主副塔安装与高强螺栓施工

主副塔安装遵循“先下后上、先结构后设备”原则，关键工艺如下：

行走机构调整：以台车组为单位就位，用水平仪检测台车水平度（偏差 $\leq 0.1\text{mm/m}$ ），校准车轮踏面与轨道中心对中（偏差 $\leq 1\text{mm}$ ），同一台车架同位差 $\leq 1\text{mm}$ ，同一平衡梁同位差 $\leq 2\text{mm}$ ，主梁两侧同位差 $\leq 3\text{mm}$ ；穿入平衡梁销轴后，检查水平车轮侧向间隙（0.5~1mm），确保运行灵活。

高强螺栓施工：采用 GB/T 1228 大六角高强度螺栓（10.9 级），施工前按规范进行扭矩系数复验（8 套螺栓

扭矩系数平均值 0.110~0.150，标准差 ≤ 0.010 ），采用“初拧-复拧-终拧”流程：初拧扭矩为终拧的 50%（M30 螺栓初拧扭矩 650N·m），复拧扭矩与初拧一致，终拧扭矩 1300N·m（用扭矩扳手监控，扭矩偏差 $\leq \pm 5\%$ ），所有螺栓在当天完成紧固，终拧后 1~24h 内验收，验收合格后用腻子封闭连接板缝隙，防止锈蚀。

机构同轴度控制：牵引机构高速轴联轴器径向偏差 $\leq 0.3\text{mm}$ ，轴向偏差 $\leq 1.2\text{mm}$ ，角向偏差 $\leq 18'$ ；起升机构卷筒联轴器内外齿端面 4 象限测量差值 $\leq 0.1\text{mm}$ ，采用百分表（精度 0.01mm）多点测量，确保制动盘端面跳动 $\leq 0.3\text{mm}$ ，避免制动失效。主副塔安装及螺栓连接见图 4。



(a) 主塔安装



(b) 副塔安装



(c) 高强螺栓连接

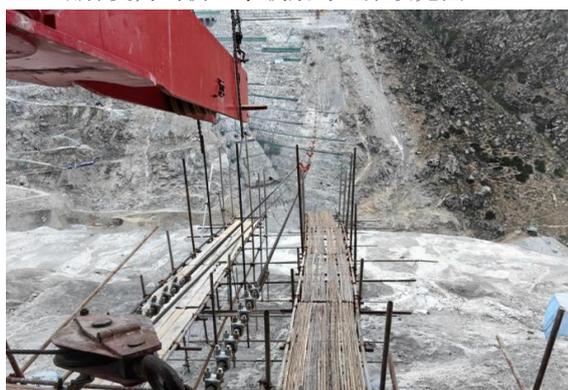
图 4 主副塔及螺栓连接

3.2.2 临时承载索跨江架设技术

临时承载索 ($\Phi 50\text{mm}$, $6\times 37+\text{IWR}-1770$, 破断拉力 1580kN) 是主索过江的关键临时承重结构, 创新采用“往复绳引导-同步牵引-垂度监控”工艺:

往复绳形成: 地锚混凝土强度达设计值 80% 后, 2#、6# 卷扬机缠绕 $\Phi 28\text{mm}$ 钢丝绳 (破断拉力 494kN), 4# 卷扬机牵引 $\Phi 14\text{mm}$ 辅助绳 (破断拉力 124kN), 利用贝雷桥 (承载力 $\geq 10\text{t}$) 引导 $\varphi 20$ 尼纶绳过江, 再牵引 $\Phi 14\text{mm}$ 钢丝绳与左岸连接 (4 个 M28 绳卡, 间距 210mm); 启动 4# 卷扬机收绳, 6# 卷扬机跟随放绳, 保持往复绳垂度 $\geq 115\text{m}$, 避免绳索垂度过低触碰江面, 往复绳张紧至 8% 垂度 (61.12m) 后锁定。

承载索架设: 1# 卷扬机缠绕 $\Phi 50\text{mm}$ 钢丝绳, 经 32t 导向滑轮引至右岸平台, 与 $\Phi 28\text{mm}$ 往复绳用 8 个 M52 绳卡 (间距 320mm) 连接; 1#、2# 卷扬机同步放绳, 6# 卷扬机收绳 (速度 0.5m/s), 每 30m 布置 1 个临时承码 (重量 0.11t), 用 $\Phi 14\text{mm}$ 保距绳固定, 确保承载索垂度 $\geq 115\text{m}$; 左岸固定承载索后, 右岸用 1# 卷扬机张拉至 8% 垂度 ($61.12\text{m}\pm 0.05\text{m}$), 用全站仪测量两根承载索垂度差 $\leq \pm 2\text{cm}$, 确保受力均衡。承载索跨江架设见图 5。



(a) 承载索跨江架设



(b) 承载索跨江施工

图 5 承载索跨江架设

3.3 绳索系统与电气调试

3.3.1 绳索系统安装

牵引绳安装: 采用 $\Phi 30\text{mm}$ 面接触钢丝绳 (破断拉力 628kN), 从主塔起升卷筒引出, 经 20t 临时导向滑轮 (用 10t 倒链固定) 与往复绳连接 (6 个 M28 绳卡, 间距 180mm), 牵引至副塔后固定; 张拉至设计垂度 (3.2% 跨度, 24.45m), 用 $\Phi 30\text{mm}$ 钢丝绳锁定主塔天轮处牵引绳上支绳, 穿绕摩擦轮与承马后, 与小车连接, 确保牵引绳无扭转。

承马绳安装: 4 根 $\Phi 14\text{mm}$ 承马绳 (破断拉力 137kN) 按“由外向内”顺序安装, 利用牵引绳与小车配合, 垂度不高于牵引绳 (偏差 $\leq 50\text{mm}$), 每根承马绳安装后测试运行同步性 (偏差 $\leq 0.5\text{m/min}$), 确保承马平稳运行。

起升绳与吊钩安装: $\Phi 36\text{mm}$ 起升绳 (破断拉力 860kN) 缠绕至主塔起升卷筒, 穿绕小车滑轮后连接 30t 吊钩 (带力矩限制器), 小车向副塔行走时 (速度 0.8m/s), 协调起升卷筒放绳 (速度 0.5m/s), 保证吊钩距小车距离基本不变 (偏差 $\leq 1\text{m}$), 避免起升绳垂度过大碰撞设备。

3.3.2 电气设备安装与系统调试

电气设备安装: 电机安装时, 用百分表调整与联轴器同轴度 (径向偏差 $\leq 0.3\text{mm}$, 轴向偏差 $\leq 1.2\text{mm}$); 干式变压器 (315kVA) 用 25t 汽车吊就位, 底部垫 10mm 厚橡胶垫减震, 接地电阻 $\leq 4\Omega$; 高低压开关柜采用地脚螺栓固定 (垂直度 $\leq 1.5\%$, 相邻盘柜顶部高差 $\leq 2\text{mm}$), 二次配线时线芯弯曲弧度一致 (弯曲半径 ≥ 10 倍线芯直径), 端子接线不超过 2 根, 不同电压等级配线分开走线 (间距 $\geq 100\text{mm}$), 避免干扰。

系统调试: 按“单机调试-系统联调-负荷试验”流程;

单机调试: 检测电机绝缘电阻 ($\geq 1\text{M}\Omega$), 单台电机点动测试转向 (与设计一致) 与保护功能 (过流、过载保护动作可靠);

系统联调: 测试主副车各机构动作一致性 (起升、牵引机构同步偏差 $\leq 0.5\text{m/min}$), 调整起升上极限 (距小车 10m)、小车行程限位 (距塔架 5m) 等安全装置, 动作响应时间 $\leq 0.5\text{s}$;

负荷试验: 在风速 $\leq 8.3\text{m/s}$ (五级风) 条件下, 依次进行空负荷 (各机构全行程运行 2 次, 无异常声响)、静负荷 (75%、100%、125% 额定载荷, 悬空 10min , 结构无永久变形)、动负荷 (15t、30t、33t 载荷, 启制动 3 次, 制动距离 $\leq 0.5\text{m}$) 试验; 紧急停车试验 (30t 载荷全速下降时急停, 制动盘无裂纹, 结构无损伤), 验证缆机安全可靠。

4 结语

本研究以 QBT 水电站 30t 平移式无塔缆机安装工程为依托,通过工艺创新与技术优化,取得三大成果:

技术突破:研发“双卷扬机同步牵引+测力计监控”的主索张拉技术,实现 760m 跨度主索垂度偏差 $\leq \pm 0.25\text{m}$;优化 U71Mn 钢轨焊接工艺,焊缝不平度 $\leq 0.8\text{mm}$,解决大跨度轨道焊接变形难题;构建“三区分离、四向协同”的场地布置方案,设备转运效率提升 30%。

工程成效:5 台缆机安装质量合格率 100%、优良率 96.8%,主索受力均衡(应力偏差 $\leq 5\%$),轨道运行平稳(大车运行速度偏差 $\leq 0.1\text{m}/\text{min}$);施工全程实现“零死亡、零重伤”安全目标,高空作业事故发生率为 0;在 605 天总工期内高效完成安装,为大坝混凝土浇筑提前 15d 提供设备保障。

推广价值:形成的大跨度缆机安装技术体系,已应用于新疆某水电站(跨度 720m)、青海某水利工程(跨度 680m),安装效率提升 25%,成本降低 15%,为高海拔、大跨度水利工程设备安装提供了可复制的技术范式。

后续研究可聚焦三方面:一是引入物联网技术(如光纤传感器)实现主索垂度、轨道位移的实时监测,提升设备智能化管理水平;二是研发模块化安装工艺(主塔分段预制、现场拼装),缩短现场作业时间,降低高空风险;三是优化临时设施布局(采用可拆卸式地锚、可回收临时承载索),推进绿色施工,进一步推动水利水电工程大型设备安装技术的创新升级。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.架空索道工程技术规范:GB 50127-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
 - [2]中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构高强度螺栓连接技术规程:JGJ 82-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
 - [3]中华人民共和国水利部.水利水电工程金属结构与机电设备安装安全技术规程:SL 400-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
 - [4]中华人民共和国住房和城乡建设部.起重设备安装工程施工及验收规范:GB 50278-2010[S].北京:中国计划出版社,2010.
 - [5]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.缆索起重机:GB/T 28756-2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
 - [6]中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.电气装置安装工程起重机电气装置施工及验收规范:GB 50256-2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
 - [7]中华人民共和国水利部.水工金属结构防腐蚀规范:SL 105-2021[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- 作者简介:苏兴强(1990.8—),毕业院校:西安交通大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 QBT 监理中心,职务:项目监理工程师,职称级别:中级工程师。