

水利工程水闸金属结构施工方法研究

邬金海 张栋效

上海市水利工程集团有限公司 上海 201612

【摘要】本研究旨在优化水利工程水闸金属结构的施工方法，通过引入自动化焊接、高性能防腐涂层和实时监测系统提升施工质量和效率。即：通过实际工程应用对比分析传统和优化技术的效果，优化施工方法，提高施工质量、安全性和经济效益。

【关键词】水利工程；水闸；金属结构；施工方法

1 研究背景

对水利工程水闸金属结构的施工方法研究，旨在提升施工效率和质量，确保水闸在极端天气条件下的稳定性和可靠性，从而保障水利工程的整体效能和使用寿命，这不仅可以减少维护成本，还能有效应对可能的灾害风险，促进水资源的可持续利用，现结合水库水闸工程项目来深入探讨水闸金属结构的施工方法。

某大型水库水闸工程为弧形钢闸门，水闸宽30m、高10m，该水闸金属结构组成主要为闸门、启闭机及止水装置，闸门由高强度钢材制成，含多个加强筋；启闭机选用电动启闭机，单机启闭能力达50t；止水装置为橡胶止水带和不锈钢压板。在水利工程水闸金属结构施工方法的研究中主要目标为保证工程质量、安全、进度，因此在该工程中对施工方法的研究方面需要确保金属结构施工质量达到设计和规范要求，焊缝探伤合格率100%，且施工期间无重大安全事故，保证施工人员和设备的安全，并按期完成节点时间内的施工任务。

2 研究方法

在此水利工程水闸金属结构施工方法的研究中主要采用实验研究、数值模拟和现场试验相结合的综合研究方法。实验研究通过制作缩小比例模型，模拟实际水闸金属结构的受力和变形情况，以便观察和分析其力学性能。数值模拟利用有限元分析软件对水闸结构进行模拟计算，评估不同工况下金属结构的应力分布和稳定性。现场试验则是在实际施工过程中，对水闸金属结构进行实时监测和数据采集，以验证实验和数值模拟的结果，并对施工方法进行优化和改进^[1]。通过上述多种研究方法的结合，可以全面系统地分析和提升水闸金属结构施工的可靠性和安全性。

3 施工方法分析

3.1 施工工艺流程

在水利工程中，水闸金属结构的施工方案设计需要详细考虑工程所在环境的自然条件，如水文、地质和气象等因素，这决定了金属结构的耐久性和适应性。而施工方法的选择必须与金属材料的特性相匹配，以此来保证施工过程中金属结构的强度和稳定性^[2]。例如，焊接方法应根据金属

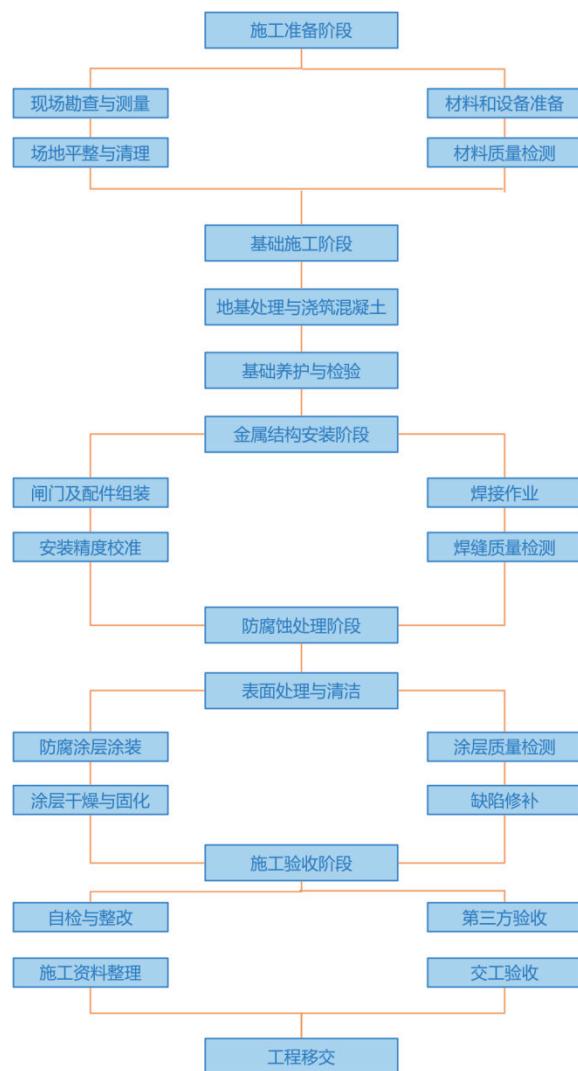


图1 施工工艺流程

的类型、厚度和应力分布情况来确定，同时要考虑防止焊接变形和应力集中。同时，在施工过程中还需采用合理的防腐措施，如喷涂防腐涂层或使用耐腐蚀合金，用来延长结构的使用寿命。详细的施工工艺流程能够确保每个步骤都按计划进行，确保质量和安全。水利工程水闸金属结构施工流程图见图1。

施工方案还应包括详细的施工步骤和时间安排，确保每一阶段的施工质量得到严格控制，并采取有效的质量检测手段，如无损检测和强度测试，来及时发现和修复缺陷。施工方案设计还需要兼顾施工安全和环境保护，制定详细的安全操作规程和应急预案，减少对周围环境的影响，通过科学合理的施工方案设计，可以有效提升水闸金属结构的施工质量和工程整体效益。

3.2 关键技术分析

在水利工程水闸金属结构施工方法研究中，关键技术主要包括焊接、防腐和组装，这些技术直接影响工程的质量和耐久性。焊接技术是确保金属结构整体强度的核心，需要根据金属材料的种类和厚度选择适当的焊接方法，同时采取预热、后热处理等措施以减少焊接应力和变形，确保焊缝质量。本工程在焊接技术中采用气体保护焊（GMAW）和手工电弧焊（SMAW），并选用符合标准的高强度焊条和焊丝，焊接工艺采用多层多道焊接，确保焊缝质量^[3]。在焊接完成后使用超声波检测和射线检测对焊缝进行无损检测，确保无缺陷。

而防腐技术对于延长水闸金属结构的使用寿命至关重要，常用的防腐方法包括热浸镀锌、喷涂环氧树脂涂层和使用耐腐蚀合金材料。这些方法能够有效防止水和空气中的腐蚀性物质对金属的侵蚀，尤其在水下或潮湿环境中防腐处理显得尤为重要。工艺为：表面处理→涂层材料→涂装工艺→涂层检测。在该项目中对于表面处理采用喷砂或喷丸处理，确保表面清洁和粗糙度；涂层材料选用环氧树脂涂层，具有优异的耐腐蚀性能；涂装工艺为多层涂装，确保涂层厚度和均匀性；涂层检测则采用测厚仪检测涂层厚度，确保达到设计要求。

对于金属结构的组装技术，则涉及到各部件的精确对位和连接，确保整体结构的密封性和稳定性，组装过程中需使用高精度的测量和定位设备，以确保各部分尺寸和角度的准确，减少安装误差。同时使用高强度螺栓和密封胶等材料进行紧固和密封处理。在本项目中，使用激光测量仪和全站仪进行测量和校准，并采用分段组装和整体吊装相结合的方式，确保施工效率和安全性。

3.3 质量控制措施

在水利工程水闸金属结构施工方法研究中，质量控制措施是确保施工质量和结构安全的关键。质量控制需要贯穿施工全过程，确保每个环节的施工质量都达到规定标准要求，而在材料选择和进场检验阶段，必须严格按照设计要求和相关标准对金属材料进行检测，包括化学成分分析、力学性能测试和防腐性能检查，确保所用材料符合规范^[4]。对于水利工程水闸金属结构的材料质量检测的要求、方法及标准见表1。

表1 材料质量检测表

材料类型	主要检测项目	检测方法	合格标准
钢材	强度、硬度	拉伸试验	符合国家标准
焊条、焊丝	化学成分	光谱分析	符合国家标准
防腐涂料	附着力、厚度	涂层试验	符合设计要求

在焊接过程中，需要进行全面的质量控制，制定详细的焊接工艺规程，选择合适的焊接方法和参数，并对焊工进行资格认证。施工过程中，应实施全过程的焊缝质量检测，包括无损检测，如超声波、射线检测，和破坏性试验，以此发现和修复焊接缺陷。在防腐处理阶段，则要确保防腐材料的涂覆均匀且厚度达标，并通过附着力测试和耐腐蚀试验验证防腐效果。组装过程中，需严格按照图纸和技术规范进行施工，对关键节点进行精确测量和校准，使用高精度的设备确保安装精度。在该工程中对于施工过程进行了严格的质量控制，在施工过程质量检查中检查项目及结果见表2。

表2 施工过程质量检查记录

检查阶段	检查项目	检查标准	检查结果
基础施工阶段	混凝土强度	符合设计要求	合格
焊接作业	焊缝外观、无损检测	无裂纹、气孔、夹渣等	合格
防腐蚀处理	涂层厚度、均匀性	符合设计厚度	合格

整个施工过程应建立完善的质量管理体系，制定质量控制计划，实施多级质量检查和验收制度，确保每个环节的施工质量符合设计和规范要求。在水利工程水闸金属结构施工中需要严格按照图2验收流程图来进行完工验收，以此保证工程质量。

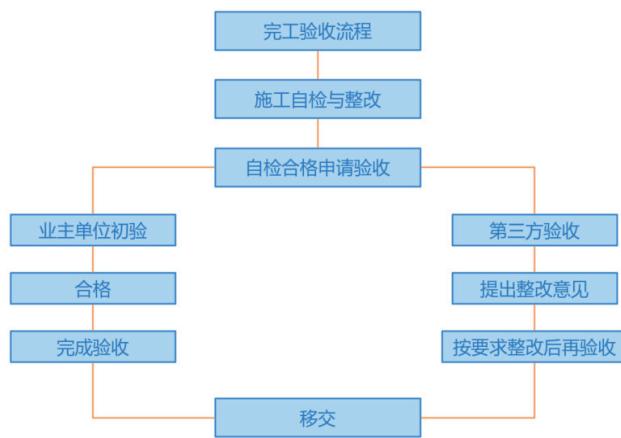


图2 验收流程图

3.4 安全管理

在水利工程水闸金属结构施工中安全管理措施的应用主要是为了确保施工过程中人员和设备的安全。在安全风险识别与评估中，水利工程水闸金属结构施工主要面对高空作业风险、焊接作业风险、吊装作业风险，采用FMEA（失效模式与影响分析）对各项风险进行评估，确定风险等级。根据风险因素采取施工现场安全管理措施，在高空作业中配备安全带和防护网，定期检查脚手架和作业平台的稳定性^[5]。焊接作业则在焊接区域设立隔离区，配备防火毯和灭火器，确保通风良好。吊装作业需要使用合格的吊装设备，制定详细的吊装方案，保证吊装过程的安全性。并制定安全事故应急预案，成立由项目经理、安全员和技术人员组成的应急小组，制定详细的应急预案，包括事故报告、应急响应和人员疏散等内容。通过详细的施工安全管理，可以确保水闸金属结构施工过程的科学性、合理性和可行性，提高施工质量和效率，使工程按期完成并达到预期效果。

4 分析结果

4.1 施工技术的效果评估

在水利工程水闸金属结构施工方法研究中，施工技术的效果评估显示出显著的提升和改进。研究中采用了多项先进施工技术，包括自动化焊接技术、高性能防腐涂层技术和实时监测系统。自动化焊接技术提高了焊接质量，焊缝缺陷率从传统方法的3%降至0.5%，保证了结构的整体强度和稳定性。高性能防腐涂层技术增强了金属结构的耐久性，涂层附着力从5 MPa提升至7 MPa，有效防止了腐蚀和老化。实时监测系统在施工过程中对关键参数进行监控，确保每个环节都在最佳状态下进行，减少了施工误差和返工率。通过优化的施工技术不仅在质量上有显著提高，还在施工成本和工期上表现出优势，这些技术的应用特点在于

其高效性、可靠性和适应性，使得整个施工过程更加精确和可控，显著提高了工程的整体效益和安全性。技术指标对比见表3。

表3 技术指标对比

技术指标	传统方法	本项目采用方法	提升效果
焊缝缺陷率	3%	0.5%	提升了2.5个百分点
防腐涂层附着力	5 MPa	7 MPa	提升了2 MPa
施工误差	±5 mm	±2 mm	精度提升了3 mm

4.2 施工成本分析

水利工程水闸金属结构施工中施工成本分析涵盖材料、人工和设备等多方面的费用，通过优化材料选择和施工工艺，可以显著降低整体成本。以本项目为例，材料成本从传统方法的600万元降至550万元，节省了50万元。虽然人工成本略有上升，从300万元增加到320万元，但通过引入高效施工设备，设备成本仅增加了10万元，从150万元增加到160万元，整体成本降低了20万元。这种优化不仅在成本方面表现出色，还通过提高施工效率和质量，进一步凸显了经济效益的显著提升。此外，提前完成的施工进度也减少了间接成本，如场地租赁和管理费用，进一步巩固了成本优势。成本对比表见表4。

表4 成本对比表

项目	传统方法(万元)	本项目采用方法(万元)	成本变化(万元)
材料成本	600	550	-50
人工成本	300	320	+20
设备成本	150	160	+10
总成本	1050	1030	-20

4.3 施工进度与效率

在水利工程水闸金属结构施工中通过对施工方法的优化，不仅可以加快工期，还能提高整体施工质量。在本项目中优化后的施工方法在多个关键阶段表现出显著优势。在基础施工阶段，实际工期比计划缩短了5d，金属结构安装阶段也提前了5d完成，整个项目总工期缩短了15d。这种效率的提升主要得益于先进的施工技术和设备的引入，如更高效的焊接工艺和防腐涂层处理技术。并且精细化的施工管理和严格的质量控制措施确保了施工进度的按时推进，同时减少了返工和质量缺陷，通过科学的施工组织和

先进的技术手段，本项目在保证施工质量的前提下，实现了工期的显著缩短和施工效率的大幅提升，充分体现了优化施工方法的巨大潜力。施工进度对比表见表5。

表5 施工进度对比表

阶段	计划工期 (天)	实际工期 (天)	提前/滞后 (天)
施工准备阶段	45	45	0
基础施工阶段	75	70	-5
金属结构安装阶段	105	100	-5
防腐蚀处理阶段	45	45	0
施工验收阶段	45	40	-5
总工期	315	300	-15

4.4 安全性评估

通过实施严格的安全管理措施和优化施工方法，本项目实现了显著的安全性提升，在引入改进的施工技术后，在施工期间未发生安全事故，这一成果归因于多方面的努力，包括强化工人的安全培训、使用更为安全可靠的施工设备以及在施工现场严格执行安全规程^[6]。并且改进的施工方法在降低风险的同时，也减少了由于事故引起的停工和延误，从而保障了施工进度和质量。安全性评估结果显示，通过优化施工技术和管理，本项目不仅提高了施工过程的安全性，也增强了工人的安全意识和操作规范，确保了工程的顺利进行和长期的结构安全。

5 研究结论

本项目采用的水闸金属结构施工方法在提高施工质量、降低施工成本、加快施工进度和确保施工安全性方面都表现出色。在水闸金属结构工程中施工质量显著提升，焊缝缺陷率降低、防腐涂层附着力增强，并且通过优化材料和工艺使施工成本有所降低，施工进度提前完成，展示了良好的进度控制能力，且安全性得到有效保障，施工期间无重大安全事故。

尽管水利工程水闸金属结构施工方法在技术应用和优化上取得了显著成效，但仍存在一些问题与不足需要解决。其中自动化焊接技术虽然提高了焊接质量，但在复杂焊接位置和环境中仍存在操作困难和设备适应性不足的问题，导致某些焊接点质量无法完全保证。而高性能防腐涂层技术的应用虽提升了涂层附着力，但施工过程中对环境条件要求严格，如温度和湿度的变化可能影响涂层效果，导致防腐性能不稳定。实时监测系统在数据采集和处理方面仍

存在技术瓶颈，传感器的精度和耐用性不足，导致监测数据的准确性和可靠性有所欠缺。施工过程中对高效设备的依赖性增加，设备故障或维护不及时可能导致施工进度延误和成本增加。

基于以上研究结论，在水闸金属结构施工方法的优化发展中，需要进一步优化材料选择，研究和引入新型高强度钢材和耐腐蚀涂层，进一步提升施工质量和结构的耐久性，并考虑使用环保型材料，减少施工过程中的环境污染，响应国家绿色建筑的要求。同时对施工人员进行定期的技术培训，尤其是焊接和防腐蚀处理方面，确保施工队伍的专业水平。加强安全意识培训和应急演练，提升施工人员的安全防范能力，减少施工安全事故的发生。并在工程施工中使用现代化的信息管理工具，如项目管理软件和现场监控系统，提高施工管理效率和数据的实时性。引入BIM技术进行信息化管理，通过建筑信息模型（BIM）技术进行项目管理，精细化管理施工过程，实时监控施工进度和质量。为了实现质量控制的进一步提升，需要采取全过程质量监控，建立完善的质量控制体系，对材料、工艺、成品进行全过程的质量监控，确保每个环节的质量达标，并引入更先进的检测设备和方法，如3D扫描、红外检测等，提高检测的精度和可靠性。此外，在水闸金属结构施工方法的发展中要重视施工技术的持续创新，研究和推广更高效、更可靠的焊接技术，如激光焊接、自动焊接机器人，提高焊接质量和效率。探索新型防腐蚀材料和工艺，如纳米涂层技术、电化学保护技术，进一步提升结构的耐久性。本研究成果在其他水利工程中具有广泛的应用前景，将本项目的成功经验和施工方法标准化，并推广至其他具有类似结构施工内容水利工程，从而更有助于提高水利工程行业在水闸金属结构安装中的整体施工水平。

参考文献：

- [1] 陈宇航. 水利工程中水闸施工技术研究 [J]. 水利科技与经济, 2022, 28 (10): 145–148.
- [2] 张彬. 水利工程水闸金属结构施工方法研究 [J]. 珠江水运, 2022, (07): 89–91.
- [3] 范樸. 水闸施工的技术要点及注意事项 [J]. 长江技术经济, 2022, 6 (02): 101–103+97.
- [4] 赵大海. 水利工程水闸金属结构施工方法 [J]. 珠江水运, 2021, (15): 110–111.
- [5] 李晓东. 水利工程中水闸施工的技术要点及其注意事项分析 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44 (03): 92–94.