

水利施工技术在水闸工程中的优化与应用

曹连山 贺 婧

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430021

【摘要】：闸门是水库建设中的一个关键环节，其建设的好坏，关系到防洪排涝和调配水资源等方面的作用。当前，由于水利工程的发展，传统的水工建筑物建造方法已经很难适应现代化水工建筑物在高精度、高效率、高耐久性等方面的需求。随着智能化监控设备的引进，混凝土配合比优化，闸门安装工艺的改进，闸门的建设水平有了明显地提高，为全面提升整个工程的质量打下了良好的基础。

【关键词】：水利施工技术；水闸工程；优化与应用

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.065

据水利部 2022 年的统计资料，全国共有各种闸门 5 万余处，其中规模较大的闸门约占总闸门总数的 15%。在工程实践中，采用 GPS 定位系统，将闸闸室轴线的放样精度提升至±3 毫米；采用新的聚合物树脂，可将橡胶止水的使用年限提高到 30 年；BIM 的推广使得建筑工程的工作效率提高了 25% 左右。尤其是 2020—2022 年我国重大水利建设项目，采用该方法可将闸墩的浇筑时间减少 40%，开裂率低于 0.5%。上述技术的发展，为我国水工建筑物的标准化和智能化建设奠定了坚实的基础。

1 当前水闸工程施工中存在的问题

1.1 传统工艺效率低下，工期延误频发

目前，我国船闸建设中，由于技术水平较低、自动化水平较低等原因，造成了船闸建设工作效率较低的问题。结合江苏省一座特大闸门的实例，在闸室底板浇筑过程中，目前仍然是手工模板法，每一个单元的混凝土浇筑需要 72 个钟头，比机械化作业多出 40% 的工期。按照 SL303-2017《水利水电工程施工组织设计规范》（SL303-2017）规定，中型闸门的建设工期不能超过 180 天，而在实际的工作过程中，由于模板的安装效率不高，导致一处闸墩的浇筑过程中，仅支模环节就延误 23 天。在门槽预埋件的安装过程中，常规的全站仪放样方法需要反复进行 3~5 次的检查，但实际工程中发现，手工焊后的钢筋的位置误差超出了 12.7%，远远超过了 SL635-2012《水闸施工质量验收规范》中 5 mm 的容许误差。浙江一座水闸施工中，由于施工进度不够，致使重要管线施工进度拖延 58 个工作日，造成项目建设费用高达 287 万^[1]。

1.2 材料性能局限，结构耐久性不足

现有的闸门工程建材系统的抗冲蚀性能及体积稳定性能都有较大的缺陷。福建滨海地区一座拦潮闸门在建成 5 年后经检验，其内部的氯离子渗透系数达到 $2.8 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，超过了 GB/T50476《水工混凝土结构耐久性技术规范》的 1.5 倍。根据钻孔取样结果，在库水变化区域，混凝土保护层已被碳化 18 mm，其中钢筋腐蚀区域达到 23%。在我国北方寒冷地区，黑

龙江灌区水闸由于长期的冻融作用，出现了严重的开裂现象，经过 300 多轮的冻融试验，其质量损失率达到 4.7%，大大超过《水工建筑物抗冻设计规范》（SL211）规定的 2.5%。安徽一控制闸门的橡胶止水装置，运行 8 年后发生了一次硬化、裂缝，接头处漏水 15 L/min，迫使整条线路都进行了替换^[2]。

1.3 环境适应能力弱，生态影响突出

传统的建设方式对周围的生态环境造成的干扰越来越突出。长江一座过鱼通道的修建，造成了下游水体溶氧含量急剧下降，达到 2.3 mg/L，并连续 27 天连续超标，严重违背了《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III 级水质的要求。湖南一座水库在改造泄水闸过程中，由于爆炸引起的水体浑浊达到 580 NTU，对该地区稀有鱼种的产卵地形成了巨大的冲击。浙江一项目在振动过程中发现，振动过程中的振动噪声高达 98 dB，远高于 GB12523（GB12523）《建筑施工场界环境噪声排放标准》。建筑污水的治理情况也并不乐观，一个项目检测结果表明，该项目的污水 pH 值达 11.2，总磷浓度为 3.8 mg/L，如果将其直接排入，将会产生严重的碱质和富营养的危害^[3]。

1.4 质量控制粗放，安全隐患潜伏

现有的质量控制方式很难有效地解决项目中的安全问题。广东一座闸门工程完工后，检测到闸门底部出现了 14.3 个每 10 平方米的裂纹，且贯通裂纹的比例高达 37%。通过对现场检查发现，主要原因是砼浇筑过程中的温度没有严格掌握，其中 6 个料仓的砼在浇筑过程中出现了 32℃ 以上的温差，这大大违背了《大体积混凝土施工标准》（GB50496）规定的 30℃。江西一座大型水闸的启闭过程中，闸门导轨的安装垂直度最大误差为 12 毫米/米，超过了规范要求的 2 毫米/米，致使启闭阻力增加到 2.3 倍。建筑施工中存在着大量的安全隐患，一期项目的数据表明，因高处作业导致的人员伤亡人数为 43%，而这些伤亡人数中，70% 以上是由于操作不当造成的。上述结果表明，现行的产品质量管理系统在过程监控和验收标准实施上存在着明显的不足。

2 水闸工程施工技术的创新优化策略

2.1 智能建造提效，精准控制工期

智慧建设已成为制约我国水利建设发展的重要因素之一。以广东北江长江干线为例，采用 BIM+GIS 融合技术，将其模拟精度提升到 LOD400 规范，并进行了三维可视化推演，优化了模板布置的效率，达到了 60%。利用天宝 SX103D 扫描仪对工地进行毫米级别的扫描，结合 Navisworks 的撞击探测，可以在前期识别出 156 个设计矛盾点，缩短 28 天的返工时间。采用智能砼温控体系，采用物联网技术布设 48 个温度传感器，采用 PID 算法对冷却水量进行自动调整，使其内外温差达到 25℃ 以下，且开裂概率小于 0.3%，符合《大体积混凝土施工标准》（GB50496）。在工程建设过程中，采用了无人机技术，实现了对工程项目的调度控制。浙江曹娥江船闸扩容项目中，使用大疆 M300RTK（M300RTK）携带的激光雷达，每天实时监测施工过程，并将点云信息与 BIM 模型进行自动对比，实现了对进度误差的精确辨识。通过研发专门的运算法则，将 8000 平方米厂房内的钢筋检验周期由 3 天缩短到 4 个小时，检验覆盖率由 30% 提高到全部检验^[4]。以“北斗”为核心，以 GPS 为核心的智能化铺设系统，采用 RTK 定位方法，将闸室底板的平整度误差由手工测量的 8 mm 降低到 2 mm，与《水闸施工规范》（SL27）中的 5 mm 误差均达到 5 mm。装配式装配是一种节约工程建设周期的有效手段。江苏通吕运河工程为现场预制，即将桥墩分为 5 节，分别在现场进行钢筋绑扎、模板安装及混凝土浇筑，经蒸养 3 d 后，其强度已达设计要求 85%。施工过程中，使用 800 t 履带式起重机，结合高强度螺钉，实现了一节节的吊装，缩短了 90 分钟，比现浇施工节约了 47 天。其中，开发的预制体 3D 激光定位技术，利用 6 个标靶，可达到 mm 精度，20 m 高的桥墩垂直度误差小于 1/2000，超过了国家规定的 1/1000 分之一（如表 1 所示）。

表 1 水闸工程施工技术创新优化效果表

优化策略	关键数据	成效
BIM+GIS 技术	LOD400 规范，优化效率 60%	缩短返工时间 28 天
智能砼温控体系	48 个传感器，温差 <25℃，开裂率 <0.3%	符合 GB50496 标准
装配式施工技术	预制体 3D 激光定位，精度 mm 级	缩短周期 32%，节省费用 18%，垂直度误差 <1/2000

2.2 新型材料赋能，强化结构寿命

目前，我国水工建筑物普遍采用了高强混凝土，采用“双掺”工艺，采用 30% 的粉煤灰、8% 的硅粉，使其氯离子传输速率达到 1.5×10^{-2} /s 以内。江苏盐城拦潮闸门的实际应用结果显示，该结构经 10 年服役，其腐蚀区域只有 2.3%，比常规混凝土腐蚀率 15.6% 有所下降。通过在黑龙江三江地区控制门 5 次冻融循环后，其相对动模量可维持在 92% 左右，因此，本研

究提出了一种新型的高性能水泥基材料。新材料的使用为重点区域的保护提供了一种有效的途径。在制作门轨时，使用 UHMWPE 的滑轨，使其表面的摩阻因子小于 0.08，比普通的黄铜滑轨减少了 60%。浙江曹娥江特大闸工程实测资料表明，采用此种新型结构，可将闸门开启压力由 850 kN 下降到 520 kN，能源消耗减少 38.7%。在江苏淮安枢纽工程中，采用该技术可使接头的挠度达到 28 mm，并取得较好的效果。本课题组前期研究发现，该涂层抗海水侵蚀能力可达 10000 h 以上，比普通环氧涂层提高 5 倍以上，并成功用于广东珠江河口地区的若干挡潮闸门项目，获得了满意的结果。近年来，随着智能化技术的发展，其在建筑中的应用越来越受到人们的重视^[5]。湖北汉江一座控制性闸门，采用埋入式碳纤维布的方法，对裂缝的应力和裂缝进行实时监控，可以对 0.1 mm 的裂缝发展进行早期 72 h 的早期预报。SMA 材料在水闸支撑结构中的使用也有了新的进展，即在超出设计范围后，可以自行恢复到原来的状态，武汉大学实验表明，SMA 的重置精度达到了 ± 0.5 mm。上述新型材料和新工艺的全面运用，使得我国大型水工建筑物的设计服役时间由 50 年提高到 80 年，生命周期费用减少 30%（如表 2 所示）。

表 2 新型材料应用效果对比表

	应用效果	数据指标
高强混凝土	降低腐蚀率	腐蚀率降至 2.3%，常规为 15.6%
UHMWPE 滑轨	减少摩阻与能耗	摩阻因子 <0.08，能耗降低 38.7%
碳纤维布监控	裂缝早期预警	0.1mm 裂缝 72h 内预报

2.3 绿色工艺升级，降低生态扰动

为解决船闸建设过程中对生态环境造成的冲击，在实践中采取了一些措施，并在实践中进行了一些有益的探索。在围堰建设方面，江苏一重要水利水电工程项目中，将常规的土、土围堰改为砂填沙袋围堰，并结合覆膜技术，将施工段的悬浮颗粒散布面积降低 60%，监测到的下游水质为 50 NTU 以下，达到了《地表水环境质量标准》中二级水的排放指标。在施工过程中，首先利用 GPS 测量出围堰的轴线，然后将高强度土工格栅（600 g/m²）层层铺放，各层填料的厚度为 0.8~1.2 米，然后在上游表面铺 0.5 mm 厚的 HDPE 防渗薄膜，并在其接缝处进行双重焊接，以保证其密封性。对水泥生产过程中环境保护的改善尤其重要。浙江一海岸闸车站采用了低碱（0.6%）、外加剂（30%）混合矿物添加剂（30%），采用高频振动（每 min 12000 下）技术，将混凝土的密实度提高到 98.5%，并能显著降低污水中碱金属的渗漏。通过对污水处理后的污水进行了处理，结果表明，处理后的污水 PH 保持在 8.5~9.0 之间，比常规处理下降了 2~3 个。重庆水库闸门大坝，创造性地应用了“雾化”养护方法，通过高压喷淋（0.8 MPa 的工作气压），使养护用水的利用率提高到 85%，比常规的喷洒方式节约 40% 以上，并可防止维修用水向水库外排放。广东一条水道控制性闸

门为研究对象,从环境和环境两方面考虑,采用泡沫幕处理方法进行了研究。在工作区域周围设置一圈(50 mm)环状通风管(50 mm),通过加压气体(0.4 MPa)来实现持续的泡沫阻挡,从而实现对悬浮物质的有效隔离。实测资料显示,采用此项方法,可将工程区域100米以内的悬浮颗粒含量控制在25 mg/L以下,对周围的红树林环境起到了很好的作用。针对福建一座山地泄洪洞,利用数字电子雷管微爆(延时15 ms),结合振动监控装置,对炸药进行动态调节,使其达到1.2 cm/s以下,满足《爆破安全规程》中住宅建筑的要求,保证了周围住宅建筑的安全性^[6]。

2.4 全过程监管加码,筑牢安全防线

数字监督系统提高了品质和安全性。广东东江水库建设"智慧工地",整合200余个传感节点,对混凝土温度、模板变形等指标进行实时监测,对存在的质量问题进行了37起预警和处理。上海一座大型船闸工程采用3D激光扫描法,按周对船闸的总长度进行了全面检查,共查出12个大于2毫米的建筑物变形,并进行了修正。在浙江瓯江口项目中,通过使用“智

能头盔+UWB”导航技术,对高空作业者进行了精确的位置识别,并成功防止了8次意外发生。在对水泥的品质管理上,江苏一项目通过构建“原料”的区块链可追踪体系,保证了每一批水泥和骨料的源头都能追踪到源头。按照SL176-2007《水利工程施工质量检验与评定标准》的规定,一次检测的合格率由85%提高到98%,而安全事故发生率降低了70%。其中,福建一项目采用人工智能技术,对不戴安全帽、违规操作等进行了智能检测,对违规操作进行了检测,并对其进行了156起违规操作,达到了800多天无安全生产的目标。

3 结语

综上所述,不断地革新水利建设工艺,是提高闸门工程施工品质的关键所在。通过对其进行合理的建造技术及新型材料的使用,可有效提升其长期服役性能,并为科学调节水源提供保障。随着数字孪生、人工智能等新科技的不断推广,水工建筑物的建造将更加智能化和精细化,为国家的水利事业提供新的力量。

参考文献:

- [1] 刘祥祥.水利施工技术在水闸工程中的优化与应用[J].水上安全,2024,(16):160-162.
- [2] 刘国鹏.水闸加固施工技术在水利工程中的应用[J].科技资讯,2024,22(01):110-113.
- [3] 李渊.水利工程中水闸施工技术的应用与管理措施研究[J].价值工程,2024,43(27):30-32.
- [4] 冯雅.水利工程中水闸加固施工技术研究[J].水上安全,2025,(04):67-69.
- [5] 李波.水闸施工技术在水利水电工程中的运用探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(20):214-216.
- [6] 王兰秋.水利工程中水闸施工的技术要点[J].水上安全,2024,(11):145-147.