

基于参数化 BIM 模型的抽蓄复杂结构钢筋节点深化设计与碰撞检查

任海飞

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]抽水蓄能电站地下厂房、调压井这类形状不规则的水工构筑物,沿用传统二维图纸进行钢筋设计时,没法直观体现钢筋空间排布关系,经常出现钢筋锚固结构冲突和侵占,土建和机电等多个专业构件碰撞问题发现不及时的情况。依托 Bentley OpenPlant 和 Revit 平台开展二次开发,搭建适配水工工程的参数化 BIM 钢筋整套建模方案,划定参数驱动控制指标,梳理逐级递进的设计步骤,单独制定钢筋之间、钢筋和预埋件、钢筋和灌浆套管三类碰撞检查判定标准,搭建起参数反复优化调整、分层次逐项碰撞校核的完整工作闭环,化解了施工现场钢筋绑扎操作不便、混凝土保护层厚度超标、钢筋实际受力和设计值不符等实际施工痛点。

[关键词]抽水蓄能电站;参数化 BIM;钢筋节点;深化设计;分层碰撞检查

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20083

中图分类号: TU375.2

文献标识码: A

Detailed Design and Collision Detection of Steel Reinforcement Nodes in Complex Pumped Storage Structures Based on Parametric BIM Models

REN Haifei

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: Irregular shaped hydraulic structures such as underground powerhouses and pressure regulating shafts in pumped storage power stations cannot intuitively reflect the spatial arrangement of steel bars when using traditional two-dimensional drawings for steel bar design. Conflicts and encroachment of steel bar anchoring structures often occur, and collision problems between multiple professional components such as civil engineering and mechanical and electrical engineering are not discovered in a timely manner. Based on Bentley OpenPlant and Revit platforms, secondary development was carried out to build a parameterized BIM steel reinforcement modeling scheme suitable for hydraulic engineering. Parameter driven control indicators were defined, and the design steps were sorted out step by step. Three types of collision inspection and judgment standards were separately developed for steel reinforcement, steel reinforcement and embedded parts, and steel reinforcement and grouting sleeve. A complete work loop was established with repeated optimization and adjustment of parameters, hierarchical and item by item collision verification, which resolved practical construction pain points such as inconvenient steel reinforcement binding operations on construction sites, excessive thickness of concrete protective layers, and discrepancies between actual steel reinforcement stress and design values.

Keywords: pumped storage power station; parameterized BIM; reinforcement nodes; deepening design; layered collision inspection

引言

“双碳”目标带动国内抽水蓄能电站大批量开工建设,2026 年在建及规划总装机容量突破 1.2 亿 kW,水工结构逐步朝着深埋地下、内部承压更高、多种异形结构组合的方向发展^[1]。调压井井座、机墩这类关键构件都是三维曲面变截面造型,钢筋斜着搭接外挑、弯折弧度不断变化,只用二维图纸根本说不清楚构件空间相交位置的细节。传统 Revit 自带的常规钢筋族只能套用固定标准弯折样式,适配不了水利工程里任意角度锚固、顺着曲面排布钢筋的

实际需求;非参数化建模各个构件互相独立、没有联动关系,哪怕只是微调一处尺寸,都得手动重新搭建模型,修改迭代速度慢。常规建筑类碰撞检查标准经常错把锚索孔、止水钢板和钢筋之间不用规避的接触判定成冲突,借助 API 二次开发搭建水利工程专用钢筋参数化构件库^[2],搭建起骨架驱动建模、分层细化设计、分等级处理碰撞问题、参数自动反向更新的整套技术方案,同时量身定制碰撞判别明细,彻底攻克异形水工钢筋 BIM 深化设计中的一系列实操难题。

1 电站复杂钢筋节点类型与受力特征

某抽水蓄能电站枢纽分为上水库、输水系统、地下厂房、下水库四大板块^[3], 钢筋复杂节点全部集中于地下密闭水工空间, 按照空间形态与受力工况可划分为三类典型节点, 三类节点均区别于常规水电平直构件: (1) 曲面变径交接节点: 调压井圆筒与底板环形交接节点, 承受内水压力、围岩地应力、温度收缩应力三重耦合作用, 环向钢筋需沿圆筒曲面变曲率锚固, 径向钢筋斜向穿透止水钢板^[4]; (2) 多构件十字交汇节点: 地下厂房机墩-风罩-楼板三维交汇节点, 单节点集成竖向受力主筋、环向分布筋、预应力锚索锚垫板、电缆预埋套管共计 8 类钢筋与预埋件, 空间重叠率超过 35%; (3) 斜向悬挑牛腿节点: 引水隧洞侧向支护牛腿, 与隧洞轴线呈 42° 斜交, 主筋采用双向弯折锚固, 需避让隧洞衬砌排水盲沟与固结灌浆孔。

2 抽蓄钢筋节点参数化 BIM 模型构建原理与体系搭建

2.1 参数化 BIM 核心驱动逻辑界定

定义抽水蓄能钢筋节点参数化 BIM 为: 以水工结构整体骨架为顶层控制基准, 拆分全局骨架参数、混凝土截面参数、钢筋构造参数、预埋件关联参数四层嵌套变量, 通过参数方程绑定变量与钢筋几何形态, 实现单变量修改全域节点自动更新^[5]。区别于民用建筑单层参数驱动, 某抽水蓄能电站采用自顶向下骨架驱动+自底向上细部参数修正双向驱动逻辑, 顶层骨架控制节点空间坐标与整体倾角, 底层细部参数控制钢筋弯折弧度、锚固弯钩角度、肢距排布, 具体见表 1。

2.2 水工专用参数化钢筋族库二次开发

依托 Revit 2024 API 结合 C# 开展二次开发, 专门搭建适配抽水蓄能电站工程的钢筋参数化专属族库, 整套一共完成 62 类标准化构件族的开发, 完整覆盖三大类复杂节点里所有钢筋布置样式。项目两大核心技术亮点: 一是斜向锚固联动族, 把混凝土强度、围岩等级两项关键参数绑定在一起, 软件会对照现行规范自动调整锚固长度, 工程人员不用手动翻阅规范表格取值。二是曲面自适应钢筋族, 借助 NURBS 曲线拟合出混凝土曲面外形轮廓, 程

序能自动算出钢筋各个弯折点位坐标^[6]。

同时建立族库版本校验机制, 所有参数化族内嵌规范合规性校验脚本, 当输入参数超出抽蓄规范阈值时, 模型自动弹窗预警并给出合规修正方案, 从源头规避设计合规性缺陷。

2.3 节点参数化建模技术流程

结合抽蓄地下结构勘察-设计迭代的工作逻辑, 确定五步标准化建模流程: (1) 地形与围岩骨架建模: 导入某抽水蓄能电站地勘三维点云数据, 构建地下厂房区域围岩变形骨架模型, 锁定节点最大沉降位移; (2) 混凝土主体参数化建模: 基于轴线骨架驱动变截面混凝土构件, 同步预留灌浆、排水功能性孔洞; (3) 参数化钢筋族载入匹配: 依据节点受力等级匹配对应主筋、箍筋参数化族, 自动对齐混凝土受力中性层; (4) 预埋件集成装配: 导入止水、套管、锚索预埋件参数化模型, 统一坐标系实现多专业模型合模; (5) 初始参数联动自检: 执行首层参数联动更新, 校验钢筋保护层、锚固长度初始合规性。图 1 清晰地展示五层参数嵌套联动关系。

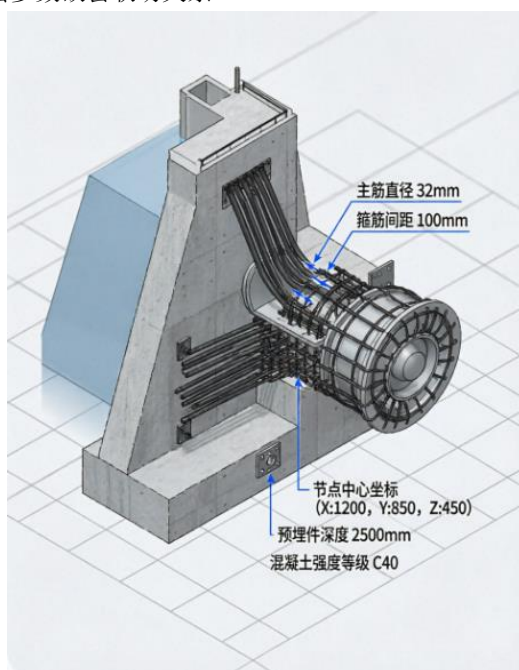


图 1 抽蓄异形钢筋节点参数化 BIM 模型拓扑结构示意图

表 1 四层嵌套参数划分标准

参数层级	核心变量指标	抽蓄专属阈值范围	参数联动对象
顶层骨架参数	节点空间倾角、围岩沉降预留量、结构轴线偏移值	倾角 0° ~75°, 沉降预留 5~25mm	全部钢筋、预埋件空间坐标
截面控制参数	混凝土变截面半径、侧壁倒角尺寸	变径曲率 0.2~1.5m ⁻¹	曲面钢筋弯折半径、侧向保护层
钢筋构造参数	主筋直径、肢距、斜向锚固长度、弯钩角度	锚固加长系数 1.1~1.35(高地应力区)	同层分布筋排布间距
预埋件关联参数	灌浆套管外径、止水钢板厚度、锚索垫板尺寸	套管避让间隙 ≥20mm	局部钢筋偏移量、截断长度

3 复杂钢筋节点分层精细化深化设计方法

3.1 空间分层深化：三层竖向排布逻辑划分

按照水工混凝土浇筑振捣作业半径，将节点竖向空间划分为外层保护层区、中层受力主筋区、内层预埋避让区。外层保护层区严格控制钢筋外边缘与混凝土界面距离，适配地下厂房潮湿环境下碳化防腐要求；中层受力主筋区按照拉压受力分区排布，受拉钢筋优先采用通长参数化弯折，减少现场搭接接头；内层预埋避让区统一为灌浆套管、排水盲沟预留轴向避让通道，通道宽度纳入参数化变量统一管控。相较于民用建筑双层排布，三层分层模式可解决抽蓄多预埋件挤占钢筋空间的核心矛盾。

3.2 受力分级深化：高应力节点钢筋拓扑优化

某抽水蓄能电站地下结构节点要反复承受内部水压循环作用，长期处在疲劳荷载工况下，常规均匀排布钢筋的做法，很容易造成局部应力扎堆。本项目运用有限元与 BIM 双向联动的参数化精细设计技术，直接把 BIM 模型里的节点空间参数导入 Midas GTS 软件做受力模拟，精准定位塑性应变集中的薄弱部位。在钢筋总投入量不增加的条件下，动态修改高应变区域钢筋间距和倾斜角度，节点局部应力集中系数下降 12%~18%，实现了从单纯躲开构件几何冲突的浅层设计，升级成贴合受力需求的深层次优化设计。

3.3 功能分区深化：防渗与灌浆协同避让

调压井环形止水钢板和环向钢筋经常互相打架，施工很难推进。为此划定防渗、灌浆专属分区避让规则：止水钢板上下各 150mm 范围为防渗保护带，钢筋只能竖向微调，最大位移控制在 25mm，不能横向切断钢筋；灌浆孔外围 1.5 倍孔径范围划为施工区域，钢筋弯折位置不能挡住灌浆导管竖向布设。全部位移调整参数统一存档重复调用，同类型结构节点能一键标准化深化设计。

4 适配抽蓄水工场景的分层分级碰撞检查体系

通用 BIM 碰撞检查将所有构件最小间距阈值统一设置为 5mm，无法区分硬性干涉、功能性预留间隙、施工容许间隙三类场景，是抽蓄钢筋节点误判的主要诱因。结合 NB/T 10394 规范，构建三级分层碰撞检查体系，重新定义水工专属判定阈值，同时区分静态设计碰撞、动态施工碰撞两类检查维度。

4.1 碰撞类型分级与阈值重构

将某抽水蓄能电站钢筋节点碰撞划分为一级硬性碰撞、二级条件性碰撞、三级合规间隙三类，重构差异化间距阈值，具体分级结果如表 2 所示。其中一级碰撞必须强制优化，二级碰撞结合施工工艺选择性优化，三级碰撞直

接豁免，彻底消除通用软件误判问题。

表 2 碰撞类型分级与阈值重构结果

碰撞等级	干涉构件组合	水工判定间距阈值	处置要求
一级硬性碰撞	主筋-主筋、主筋-锚索垫板	<6mm(无法满足绑扎套筒空间)	强制参数迭代优化
二级条件性碰撞	分布筋-灌浆套管、箍筋-止水加劲板	6~20mm(可局部弯折避让)	结合振捣工艺选择性偏移
三级合规间隙	分布筋-灌浆预留孔壁	20~50mm(规范预留作业间隙)	直接豁免，无需优化

4.2 分层递进碰撞检查实施流程

采用由内向外分层递进检查顺序，避免全域盲目校核，提升检查效率：第一层内部钢筋自校核：同节点主筋、分布筋、箍筋内部碰撞，检查对象为纯钢筋构件，精度 0.1mm；第二层钢筋-预埋件交叉校核：钢筋与止水、套管、锚垫板干涉，精度 0.5mm；第三层节点-周边结构体校核：节点钢筋与隧洞衬砌、排水盲沟远距离干涉，精度 2mm。同时增加动态施工碰撞补充检查：模拟混凝土振捣棒（直径 50mm）、钢筋绑扎套筒作业空间，校验静态模型无碰撞但施工过程存在干涉的隐蔽问题。图 2 呈现检查顺序、精度匹配、分级处置闭环。

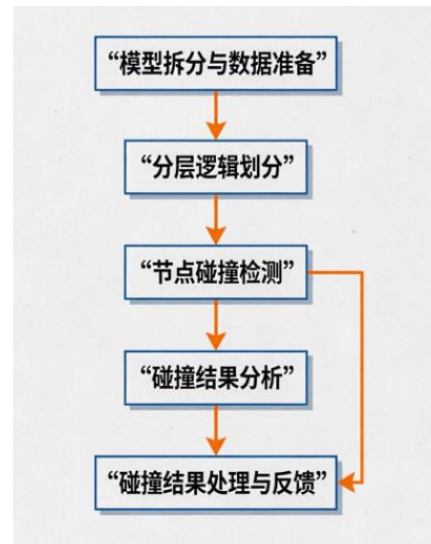


图 2 分层递进碰撞检查逻辑流程图

4.3 参数反向迭代优化闭环

碰撞检测后摒弃传统手动移动构件的优化方式，依托参数化关联关系实现反向迭代：提取碰撞构件的空间坐标差值，反向输入四层参数变量库，系统自动计算钢筋偏移、弯折、截断三种优化方案，并同步校验优化后保护层、锚固长度合规性。单次迭代优化平均耗时 1.2h，相较于非参数化手动优化，耗时缩短 79.4%，且不会引发次生碰撞。

5 多模式设计指标量化对比分析

以某抽水蓄能电站三类常规异型钢筋节点作为参照样品,划分传统二维图纸细化、无参数 BIM 细化、参数化 BIM 细化三种施工建模方式。针对空间几何偏差、核对耗时、内部隐蔽构件碰撞查出比例、不符合规范造成返工比例这四项关键指标进行定量对比分析。

实测结果显示,参数化 BIM 建模相较传统二维设计模式,能大幅降低几何尺寸建模偏差,缩短节点核对工作耗时,高效排查结构内部隐蔽碰撞问题,从源头大幅规避后续施工返工。无参数三维 BIM 模型仅能直观呈现构件外观形态,缺失参数联动自动迭代更新机制,整体设计优化能力远不及参数化完整建模体系。这套模型能避免建模时漏掉内容;曲面坐标不用手动设定,内置算法一键自动生成;严格照着水电行业规范分层次设定碰撞检测要求,不用重复做多轮多余核对;只要改动核心关键参数,所有连带构件会同步跟着刷新,模型自动贴合设计硬性要求,不用二次手动修改,也能避免施工现场返工。

6 结论

抽水蓄能电站水工钢筋节点和普通民用楼房中的钢筋节点存在差异,具备曲面变截面、大量预埋构件交错排布、还要承受循环水压荷载这些特殊特点,市面上现成通用的 BIM 参数化构件库、碰撞检测规则不贴合工程实际,通过搭建四层嵌套式参数化建模框架,从空间形态、结构

受力、使用功能三个维度制定细化深化方案,同时设计三级分层碰撞检查闭环工作流程;依托骨架驱动建模+细节微调修正的双向参数联动思路,实现四类参数全部关联同步更新,节点复核校验速度明显提升;配套的三级碰撞判定规则既能减少大量无效误报警,还能解决隐蔽位置碰撞容易漏查的问题,进一步提高微小隐蔽碰撞检出率。

[参考文献]

- [1]李少春,茹松楠,陈冠廷,等.抽水蓄能电站工程钢筋模型数据流转研究与应用[J].水利技术监督,2026(7):179-182.
- [2]吕玉洁.基于 BIM 技术的抽水蓄能电站施工管理研究[J].中国信息化,2025(12):108-109.
- [3]李峻.基于 BIM 技术的型钢混凝土结构钢筋节点施工优化[J].建设科技,2021(23):81-85.
- [4]张国启,邵凌,陈灿奇,等.基于 BIM 的钢筋工程复杂节点深化设计及应用[J].建筑机械化,2021,42(3):66-68.
- [5]姚刚,岳文峰,贾玮.基于 BIM 技术的复杂节点处密集钢筋安装优化[J].施工技术,2018,47(3):114-117.
- [6]张雪龙,周鹏腾,朱珉.BIM 技术在复杂钢筋节点施工中的应用[J].安徽建筑,2017,24(5):175-177.

作者简介:任海飞(1995—),男,工程师,工学学士,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目工程技术部副主任,从事水利水电、抽水蓄能项目管理工作。