

水轮发电机组蜗壳穿孔分析研究

段自成

新疆维吾尔自治区塔里木河流域吉音水利枢纽管理中心, 新疆 和田 848000

[摘要]水利枢纽工程作为水资源调控与能源供应的重要载体,在区域经济社会发展中发挥着不可替代的作用。水电站作为水利工程的核心组成部分,其水轮发电机组的稳定运行直接关系到工程综合效益的持续发挥。吉音水利枢纽工程作为克里雅河流域的控制性工程,其水电站机组运行与泥沙条件密切相关,深入探究该工程水轮发电机组蜗壳的运行特性,对于理解多泥沙环境下机组部件的工作状态、提升水利工程运行可靠性具有重要参考价值。

[关键词]水轮发电机组;蜗壳;穿孔分析;泥沙影响

DOI: 10.33142/hst.v8i8.17337

中图分类号: TK73

文献标识码: A

Analysis and Study on Perforation of Spiral Shell in Hydroelectric Generator Unit

DUAN Zicheng

Xinjiang Tarim River Basin Jiyin Water Conservancy Hub Management Center, Hotan, Xinjiang, 848000, China

Abstract: As an important carrier for water resource regulation and energy supply, water conservancy hub projects play an irreplaceable role in regional economic and social development. As a core component of hydraulic engineering, the stable operation of the hydroelectric generator units in a hydropower station is directly related to the sustained comprehensive benefits of the project. The Jiyin Water Conservancy Hub Project, as a control project in the Keliya River Basin, is closely related to the operation of its hydropower units and sediment conditions. In depth exploration of the operating characteristics of the turbine generator volute in this project is of great reference value for understanding the working status of unit components in multi sediment environments and improving the reliability of hydraulic engineering operation.

Keywords: hydroelectric generator set; spiral shell; perforation analysis; influence of sediment

引言

国家水安全与经济社会发展的稳固基石离不开水利设施,水电站是清洁能源生产的核心实施主体,是能源结构变革的核心支柱,河流原生界域,泥沙系普遍水文要素,其迁移特性及分布状况对水电站机组过流部件的运作状态有显著影响,吉音水电站作为克里雅河流域的重要水利设施,其运行环境与泥沙状况紧密相扣,对其蜗壳相关运行特性的探究,对同类型工程具有借鉴价值。

1 蜗壳在水轮发电机组中的作用与运行特性

1.1 蜗壳的结构功能与能量转换价值

水轮发电机组中,蜗壳是核心流动部件的代名词,该部件的结构设计对水流能量至机械能转换效率的优劣起到决定性作用,采用螺旋形渐变流道的精湛布局,蜗壳对引水系统输送的水流进行恰当分配,确保水流以均一速度与压力比注入转轮,显著降低水流转换阶段的能量损失。该流道设计显著降低了水流的扰动幅度,抑制局部涡流及流速突变所引起的能量耗损,保障转轮稳定旋转,源源不断地输送均衡动力,以吉音水电站的混流式水轮发电机组为背景,蜗壳布局与机组运行参数形成紧密契合,通过对水流方向、流速梯度的精准调控,将引水系统输送的水流能量高效传递至转轮,进而启动发电机的动力循环,该运行状态与机组设计容量的最大化实现紧密相联,核心环节

助力电站年度发电量目标的顺利达成,是水利枢纽工程整体效益实现的关键支撑点^[1]。

1.2 混流式水轮发电机组蜗壳的运行环境特点

混流式水轮发电机组蜗壳所处环境与河流水文特征紧密绑定,动态变化属性明显,吉音水电站嵌入克里雅河干流,水流补给受季节及气候条件制约,呈现显著波动性,波动现象引发蜗壳内水流流量与流速的持续波动,鉴于河流量波动性,蜗壳需应对水头变化的动态调节需求,需在高水头工况中抵御强水压,低水头工况要求水流导引的稳定性得以维持,维持水力涡轮机在各类工况下的高效运作。这种变水头、变流量的复杂运行环境,使蜗壳的结构强度和水流适应性面临严苛考验——其抗压能力需足以抵御水流的冲击,需实施流道设计的改进措施,确保各工况下水流过渡的稳定性,蜗壳的运作状况直接映射出机组整体的工作效率,其适应性及稳定性对水电站运行之可靠性及经济效益具有决定性影响。

1.3 蜗壳各节段的协同工作与整体稳定性意义

蜗壳由数个节段拼接组装,节段间的协作构成其功能实现的基石,是结构长期稳固的根本基石,吉音水电站蜗壳设计之关键点,在于各部分节段与锥管节段可实现连接,焊缝配置需沿水流方向实施,节段间错位布置,本设计有效降低了水流对焊缝的直接冲击强度,遏制局部磨损的加

剧势头,保障蜗壳内部水流沿螺旋形轨迹的平稳流动,降低由结构突变引起的涡流能量耗散。在制造与安装工艺上,于工厂内部对部分截面及座环执行焊接工序,标记完毕后,剩余部分被分配至电站现场进行焊接,该分段施工模式确保了关键连接部位的加工精度得以维持,也符合现场施工的实际要求,显著提升了各节段间的联结稳固性,各节段的精准配合不仅关乎水流能量的高效传递,对蜗壳整体结构的安全运行保障至关重要——任何一节段的位移或连接出现松动现象,都可能引发流道形变与水流失序,导致局部磨损可能加剧,极端情况下甚至引发结构破坏,节段间的协同作用是机组长期稳定运作的架构基础,对设备寿命延长及维护成本降低具有重大实际意义^[2]。

2 泥沙条件对水轮发电机组过流部件的影响机制

2.1 河流泥沙的时空分布特征与输移规律

河流泥沙的分布迁移规律明显,时空变化特性显著,对水电站运行环境构成直接影响,克里雅河的泥沙含量较大,经长期观测资料分析,输沙量变化规律性明显,就时间分布格局考察,特定季节成为泥沙迁移的主要集中期,该时段输沙量几乎覆盖了全年总量的绝大多数,中旬月份的泥沙输送量尤为显著,之后逐级下降。该现象表现为输沙过程的显著集聚性,使该时段水电站形成了特定的泥沙调度周期,泥沙时空分布规律是剖析过流部件运行环境的基础性要素,输移量与来水量紧密耦合,水文条件与泥沙迁移的相互作用日益凸显——来水量上升时,输沙能力随之增强,泥沙与水流相互作用,呈现出动态耦合的演变趋势,该相互作用机制显著构筑了水电站过流部件的作业条件。

2.2 高含沙水流对机组过流部件的作用特性

在泥沙携带的河流流动阶段,泥沙颗粒与过流部件表面发生持续接触,孕育特定的相互作用格局,在吉音水电站,底孔泄洪冲沙放空洞与发电引水洞平行对置,低水位运行时发电用水泥沙含量相对偏高,在泥沙颗粒流动阶段,泥沙颗粒与蜗壳等过流部件表面相互作用,因速度与角度的多样性导致持续交互。该效应的强度与泥沙粒子的物理属性紧密相关,颗粒的粗细及硬度等物理属性对部件表面作用效果有显著影响;流速之差异,直接影响泥沙颗粒动能之大小,进而加剧冲击强度;部件表面材质的性能直接影响其抵御该作用的能力,这些因素相互交织,综合铸就了高沙含量环境中过流部件的特定运行属性,是把握机组运行态势与部件磨损规律的核心关键,对于分析部件的长期运行表现具有关键意义。

2.3 汛期调度时段蜗壳过流环境的变化特性

年度泥沙调度有专门时段,该时段蜗壳过流环境变化尤为剧烈,河川来水量急剧上升,与之相伴的是输沙量的同步攀升,蜗壳内关键参数如水流速度及含沙浓度均呈现显著动态波动现象,水流速度的波动直接影响泥沙颗粒动能的变动,进而改变蜗壳表面的冲击强度;泥沙颗粒的浓

度差异,直接影响单位时间内与蜗壳表面碰撞的颗粒数,呈现出多样化的作用频率强度。该时段蜗壳承受的水流及泥沙作用力显著加大,与未调度时段相较,差异显著可见,形成了独有的运行态势,精辟分析该时段生态环境变化的内在机理,探究参数变动与部件作用间的相互影响,全面掌握蜗壳运作特性,精准预测潜在故障,构成制定维护策略的根基^[3]。

3 提升多泥沙河流水电站蜗壳运行可靠性的技术路径

3.1 基于泥沙调度优化的蜗壳运行环境改善

调整泥沙调度计划,是根本性提升蜗壳运行环境水平,营造有利作业环境体系的重要手段,针对克里雅河特定季节沙粒输送的集中现象,应当构筑精细化的调度模型,合理编排底孔泄洪排沙与发电引水作业的时间序列,在防洪安全与灌溉用水需求得到可靠保障之际,执行灵活调度,适时变动泄洪与引水开启时间点,绕开泥沙含量峰值期进行引水发电,极力降低泥沙携带比重。根据来水来沙的实时变化,灵活调整泄洪与引水流量配比模式,在确保水库调度目标实现的基础上,降低高含沙水流对蜗壳的连续破坏,通过根本优化策略实施,显著减轻泥沙对蜗壳过流表面的冲击压力,构建稳定的运行环境以支持蜗壳,减轻不利环境累积效应对部件的损害,显著延长设备运行周期。

3.2 蜗壳结构设计与材料选择的适应性强化

强化蜗壳结构设计与材料选择的适应性,是实现多泥沙环境运行稳定性的核心关键,在结构设计层面,必须坚持既定的焊接技术要求,节段焊缝需沿水流方向排列,同时保证节段间错落有致,显著缓解水流冲击造成的局部应力聚集现象,消除结构设计缺陷所引起的涡流侵蚀现象。探讨不同厚度铜板的结合面,执行内表面对齐的坡口切割程序,达成连接过渡的平滑效果,提升焊缝结构强度及耐磨性,在材料选择上,针对高含沙水流的侵蚀机制,以高抗磨性材料构建蜗壳主体及关键流经区,提高材料固有硬度与韧性水平,提升对泥沙颗粒长期磨损的抵抗水平,同步实施结构改良与材料升级的双重举措,显著提升蜗壳的多泥沙环境匹配性,构建坚实的物质根基以保障其稳定运作。

3.3 蜗壳运行状态监测与维护体系的完善

确立全面的蜗壳运行状态检测与维护方案,构建早期预警体系,确保持续运作的稳定性,依照既定的技术标准与规程,周期性地对蜗壳主体与座环焊接部位进行探伤检验,通过专业检测技术全面掌握结构完整性,迅速甄别细微裂纹与焊接缺陷,实施在线监控系统,对蜗壳各节段的工作参数进行持续跟踪,特别留意水流压力及振动频率等关键指标的异常波动迹象,为早期预警提供数据支撑。在此基础上,构建定制化保养方案,重点在泥沙调度时段的前后实施检查与维护,对易磨损部位进行重点防护处理,即刻对细微损伤进行修补,实施“监控-评估-维护”的闭

环管理路径,实现对蜗壳运行状态的主动掌控,将风险遏制在萌芽状态,维持其功能效能的连贯性^[4]。

4 泥沙环境下蜗壳设计与施工工艺的优化方向

4.1 蜗壳节段拼接工艺的精细化改进

整体性能的优劣与蜗壳节段拼接质量密切相关,在泥沙充斥的流域,应细化拼接工艺,以提升其可靠性,恪守焊缝沿水流方向排列并实施节段错位布置的设计原则,使水流得以顺流无阻,降低焊缝凸起与节段错位引起的局部涡流效应,大幅降低因水流冲击引起的局部磨损速度。就不同厚度铜板的接合面而言,必须实现内表坡口加工的精确对位,通过精准的坡口角度设计与焊接参数控制,保证焊缝过渡的平滑过渡,抑制局部涡流的涌现,提高焊缝的耐磨蚀水平,探讨吉音水电站蜗壳分段焊接厂内与现场结合的特定特点,务必对现场焊接各阶段实施精确工艺监管:对焊接部件进行细致的定位与编号,严格限制现场拼接过程中的位置误差至最低限度;在实施焊接作业的第9序号锥管阶段,依托专业夹具维持水平,消除因安装偏斜引起的水流不稳定性,降低泥沙颗粒局部聚集冲击,有效降低工艺磨损风险至细微层面。

4.2 蜗壳与相关部件连接结构的适配性提升

蜗壳与座环、导流环等配合部件的连接质量,直接影响设备在多泥沙环境中的作业稳定性。为此,需实施专项改进措施,以提升各部件协同作业效率。厂内已率先开展第10C断面蜗壳与座环的焊接工序。焊接过程严格遵循技术要求,焊后对焊缝进行全面无损检查,确保焊接部位无缺陷,具备足够结构强度以承受水头压力,且密封性能达到无懈可击的程度。此举可减少因缝隙引发的泥沙沉积及局部侵蚀现象。在蜗壳与转轮连接的关键环节,导流环发挥核心作用。工厂内部对直环进行精确焊接,采用电脑三维模拟技术预演装配流程,将尺寸偏差严格控制在既定标准范围内。设备运至电站后,通过对称焊接法实现与蜗壳的紧密连接,保障流道过渡顺畅,避免连接处产生涡流,从而有效降低泥沙在此处堆积与撞击部件的风险,减少部件磨损加剧的可能性。通过改进组件连接结构及组装精度,能够使蜗壳内水流保持稳定有序流动。结合流场优化技术,可大幅减轻泥沙对过流部件的侵蚀作用。

4.3 蜗壳材质与防腐耐磨技术的升级应用

基于克里雅河沙粒密集的水流属性,执行材料升级与

科技突破,增强蜗壳的耐磨损结构完整性,就初始材料的选择而言,实施力学性能显著的高强度铜质板片选取,增强材料硬度与延展性,增强对泥沙颗粒持续冲蚀的防护等级,显著提高蜗壳的寿命。针对蜗壳过流面尤其是水流转向处等易磨损部位,实施表面硬化工艺,采用激光熔覆及等离子喷焊工艺,形成高硬度合金层;同步实施陶瓷基耐磨涂层喷涂程序,依托于涂层的高耐磨性及低摩擦系数,减少表面与泥沙颗粒间的摩擦磨损,面对泥沙密集环境中的腐蚀威胁,加强厂内焊接及现场焊接后蜗壳的防腐作业效果:施焊完毕后,对工件表面实施喷砂去锈处理,剥除氧化层与杂质;实施重防腐涂料的多层涂覆作业,构建紧密的防护壳体,抵御水质及泥沙中腐蚀性成分对材料的腐蚀侵害,抑制锈蚀引起的材料强度降低,减缓穿孔风险加剧趋势,采用新型材料与防腐蚀耐磨技术的融合,全面提升蜗壳在泥沙环境中的耐久性等级,提供机组长期稳定运作的稳固支撑。

5 结语

综上所述,水轮发电机组蜗壳在多泥沙河流水电站的运行中具有不可替代的作用,其运行特性与泥沙条件密切相关。通过明确蜗壳的结构功能与运行环境特点、把握泥沙条件的影响机制、实施优化调度、强化设计与完善监测维护等技术路径,可显著提升蜗壳的运行可靠性。这一研究不仅为吉音水电站的持续稳定运行提供了参考,也为同类多泥沙河流水电站的设备管理与维护提供了有益借鉴,对于推动水利工程高质量发展具有积极意义。

【参考文献】

- [1]王雨川,王集.某卧式水轮发电机重大缺陷分析及处理[J].水电站机电技术,2025,48(6):83-85.
- [2]马志巍.叶片穿孔对离心泵空化特性影响研究[D].南昌:南昌工程学院,2024.
- [3]尹宁.水轮发电机组推力冷却器锈蚀穿孔分析及治理[J].水电站机电技术,2023,46(9):5-7.
- [4]潘绪伟.叶片穿孔对离心泵空化性能的影响研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.

作者简介:段自成(1989.9—),毕业院校:新疆大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位名称:新疆维吾尔自治区塔里木河流域吉音水利枢纽管理中心,职称级别:水利工程 副高。