

或锚索注浆时,应同步预留承压释水孔,孔径约 $\phi 32\text{mm}$,深度与锚杆一致,孔口设置阀门控制排放,以释放锚固区高压水头,防止水压力集中^[5]。排水构造的布置位置、方向与间距应以开挖前水文地质勘察结果为依据,综合地下水位、渗透系数与裂隙分布确定。体系运行期应配置孔隙水压力计、渗流计等监测仪器,以实时掌握水头变化与渗流特征。施工过程中须建立排水维护制度,定期检查排水平沟和集水管通畅性,清理淤积、修复破损部位;当监测值显示孔隙水压力上升或排水量减小,应及时增设辅助排压孔或调整排水坡度,确保边坡支护体系在长期运行中维持稳定的消压与渗排效果。

4.4 边坡振动扰动与施工荷载响应机制支护

针对边坡振动扰动与施工荷载响应机制,支护设计应从以下几方面细化落实:首先,在地质勘察阶段,应对边坡体内发育的薄弱结构带、节理、裂隙集中区进行系统识别,并基于岩体—构造面力学参数及初始应力状态开展数值分析,从而量化施工机械设备(包括钻爆、岩石破碎机、挖掘机、运输车辆)传递至坡体的振动频率范围、峰值加速度及持续时间范围。此类分析宜采用现场爆破振动速度监测及加速度传感器布置方法,并结合岩体剩余应力释放模型判断裂隙扩展或滑移诱发条件,从而为支护锚固方案提供振动扰动边界条件。其次,在锚杆/锚索预应力支护体系及喷射混凝土附层的构造中,应将扰动作用纳入设计载荷。具体做法包括:锚杆布置时,锚固段长度宜为潜在滑移面以上超滑移面1.5倍以上,并在张拉后保留余张10%至15%以应对施工扰动引起的微动变形;喷射混凝土面层与钢筋网应设置预埋变形缝或裂缝诱导带,其间距宜根据机械荷载作用估算微动变形幅值确定(例如每3m~5m设一裂缝诱导带),以允许裂隙在可控区域开展且防止裂缝沿支护层蔓延。再次,在临近大型机械作业区域(如重型运输车辆停放、爆破准备区)

宜增设局部刚性横撑或临时钢支架,构建支护结构对施工荷载迁移、边坡卸载或再加载的补偿路径;具体配置可根据车辆动态荷载、振动传播路径及支护结构刚度比拟分析确定横撑位置及截面,以在扰动荷载作用期间实现偏位限制、锚杆受力再分配、边坡卸荷缓冲。最后,应制定施工荷载扰动防控程序:在重型设备驶近支护边坡区域前应控制其行驶速度及路径,并在爆破结束后设定至少一振动衰减缓冲期(例如30至60分钟),期间不得立即进行支护安装作业,同时布设实时振动监测装置(振动速度、加速度计)进行实时响应检测,若检测到振动峰值超过设计限值,则暂停支护安装或机械作业,直至边坡位移及应力回复至允许状态。

5 结语

综上所述,本文围绕我国水利水电工程中边坡支护技术展开,从边坡支护的含义与体系入手,进一步分析其在水利水电施工过程中的战略地位,然后提出了开挖前地质评价、锚喷结构构造、排水消压体系布设与施工监测反馈管理四项关键技术要点。通过上述技术措施为水利水电工程实施中支护结构设计与施工提供实务路径,并可为类似工程提供技术参考。

参考文献

- [1] 郭建,王蒙,赵杰.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术运用策略研究[C]//人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.2025.
- [2] 马建.水利水电工程施工中高边坡开挖支护技术探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2023.
- [3] 王学忠.水利水电工程边坡开挖与支护施工技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(012):000.
- [4] 张璐.水利工程施工中高边坡开挖爆破与支护技术的应用[J].石材,2023(8):28-29.
- [5] 廖维荣.试论水利水电工程施工中边坡开挖支护技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023.

The Impact of extreme sea conditions on seawater intake at offshore converter stations and countermeasures

Huiqing Qi Jingqin Han Lei Wang Jicheng Li BaoZhou Du

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

Abstract

This paper analyzes the impact of extreme sea conditions on the seawater intake system of offshore converter stations, focusing on three core issues: physical shock and sediment accumulation at the intake and pipelines, overload shutdown and corrosion of pump sets and power systems, and sudden increase in turbidity and parameter fluctuations in water quality and pretreatment systems. Based on this, technical measures such as adjustable water intake ports, multi-stage filtration, intelligent monitoring, and cathodic protection are proposed from three aspects: structural optimization of the water intake system, protection of pump sets and power, and corrosion protection and material upgrading. The research provides support for enhancing the disaster resistance capacity of the water intake system and ensures the safety of offshore wind power.

Keywords

Extreme sea conditions; Offshore converter station; Seawater intake

极端海况对海上换流站海水取水的影响及应对措施

齐慧卿 韩敬钦 王磊 李继承 杜保周

山东电力工程咨询院有限公司, 中国·山东 济南 250013

摘要

本文分析极端海况对海上换流站海水取水系统的影响, 聚焦取水口及管道的物理冲击与泥沙淤积、泵组及动力系统的过载停机与腐蚀、水质及预处理系统的浊度骤升与参数波动三大核心问题。在此基础上, 从取水系统结构优化、泵组与动力防护、腐蚀防护与材料升级三方面, 提出可升降取水口、多级过滤、智能监控、阴极保护等技术措施。研究为提升取水系统抗灾能力提供支撑, 保障海上风电安全。

关键词

极端海况; 海上换流站; 海水取水

1 引言

传统化石能源储量有限, 且燃烧时会释放大量的污染物, 是导致全球气候变暖的重要因素。随着全球能源向清洁低碳转型, 海上风电进入大规模开发阶段。我国是海上风电的领跑者, 2024年, 累计新增海上风电装机容量 4038 兆瓦。海上换流站作为风电并网核心枢纽, 负责交直流转换与远距离输送, 而海水取水系统是其“生命线”, 为核心设备冷却及工艺用水提供水源, 运行稳定性直接决定换流站安全。海上环境复杂多变, 台风、巨浪等极端海况频发, 易导致取水系统出现取水口损毁、泵组停机等问题, 造成经济损失并影响风电供电。因此, 分析极端海况影响机制、提出应对措施, 对提升换流站抗灾能力、保障风电并网安全具有重要意义。

【作者简介】齐慧卿(1982-), 女, 中国山东昌邑人, 高级工程师, 硕士, 从事电厂给排水系统研究。

2 极端海况对海上换流站海水取水的影响

2.1 对取水口及管道的影响

极端海况下, 取水口及管道直接承受海洋动力作用, 是故障高发部位, 核心威胁为物理冲击与泥沙淤积的叠加。物理冲击源于巨浪流体动力与漂浮物撞击, 巨浪冲击分瞬时压力与周期性脉动压力, 前者易导致固定式取水口格栅变形、螺栓断裂, 后者会使可调节取水口升降机构失效, 无法避开高冲击区域。管道方面, 强海流冲刷导致海底埋管悬空共振, 焊缝应力骤升易开裂。架空管道受失控重物撞击, 可能出现凹陷或贯穿损伤。泥沙淤积由极端海况打破泥沙平衡引发, 风暴潮强海流形成“泥沙云团”, 使海水浊度大幅升高。含沙海水流经滤网时形成滤饼层, 高浊度下反冲洗难以清除。泥沙还会在管道弯头、阀门处淤积, 过流面积减少导致泵组进口压力不足。同时, 泥沙黏土颗粒与海水腐蚀形成泥沙/腐蚀耦合损伤, 缩短管道寿命, 泥沙有机物分解产生的硫化氢还会加剧应力腐蚀开裂。

2.2 对泵组及动力系统的影响

泵组及动力系统是取水系统“动力心脏”，极端海况通过改变流场、破坏密封，引发过载停机与设备腐蚀，且故障修复难度大。过载停机源于海流异常导致的工况偏离。极端海况下，取水口附近形成漩涡、回流，使泵组进口偏流，叶轮受力不均，振动加速度远超轴承耐受极限。同时，含沙海水密度升高，泵组轴功率显著增加，部分换流站泵组曾因功率超标触发过热停机。此外，高海流速度可能引发取水口空化，气泡破裂冲击叶轮导致点蚀、剥蚀，最终造成叶轮报废。电网电压波动还会加剧电机转速异常，形成流场畸变、负载突变、供电不稳恶性循环。海水倒灌与腐蚀由极端水位变化引发。风暴潮导致水位超设计高程，海水通过泵组密封薄弱环节倒灌，破坏机械密封液膜，加速密封件老化。海水高腐蚀性使金属部件电化学腐蚀加剧，电机绕组绝缘电阻骤降引发短路。倒灌海水在动力系统缝隙形成滞留区，蒸发后高盐雾环境加剧点蚀，极端低温下结冰还会破坏泵组壳体与阀门结构。

2.3 对水质及预处理系统的影响

水质及预处理系统保障用水达标，极端海况通过改变水质指标，使其超出处理能力，影响换流站核心设备运行。海水浊度骤升是最显著变化，巨浪与风暴潮扰动海底沉积层，卷入海面污染物形成复合杂质，悬浮颗粒浓度大幅升高。高浊度海水快速堵塞前置粗滤滤网，反冲洗效率下降，反冲洗频率激增；混凝沉淀单元负荷骤升，需大幅增加混凝剂投加量，沉淀时间延长仍难使出水浊度达标。未去除的悬浮颗粒进入冷却系统，会在换热器管壁结垢，降低换热效率并加剧磨损。水温及盐度异常波动影响深远。寒潮使海水温度短时间大幅下降，黏度增加导致混凝剂水解减慢、絮体强度降低，沉淀效率下降，同时微生物活性减弱，需提高消毒单元有效氯浓度；风暴潮引发的盐度骤降或骤升，会分别降低电化消毒效果、缓蚀效率，或加剧海水腐蚀性，引发换热器局部腐蚀。此外，水温与盐度耦合形成密度流，增加预处理系统调节难度。

3 应对极端海况的措施

3.1 优化取水系统结构

极端海况下，取水口、管道冲击、淤积问题高发，对海水取水带来了极大的挑战。对此，可从抗冲击设计方面，优化取水系统结构，降低系统损伤风险，保障海上换流站的平稳运行。

抗冲击设计方面，双相不锈钢屈服强度与耐腐蚀性优于传统碳钢，可用于取水口主体材料，格栅用钛合金激光焊接，可抵御巨浪冲击。结构设计借鉴鲸鳍流线型，提升波浪绕流效率，降低脉动压力。外围设弧形防冲击护板，内置聚氨酯缓冲层，大幅吸收撞击能量。管道系统中，海底埋管采用混凝土配重、沙袋包裹方案，并随海流调整配重厚度，弯

头用厚壁加强设计并加装抗冲击钢套，减少焊缝开裂。

3.2 强化过滤和预处理

针对极端海况下海水浊度骤升、水质波动大的问题，需通过多级过滤分级拦截杂质、应急调节模块快速控制，构建常规处理、应急保障的双重防护体系，确保出水水质达标。

多级过滤系统采用三级过滤模式，并结合智能反冲洗技术，提升杂质去除效率。第一级为前置粗滤，选用精度符合设计要求的自清洁网式过滤器，并配备旋转式刮污装置和高压反冲洗喷头，当进出口压差达到设定值时，系统自动启动反冲洗。第二级为中滤，采用过滤精度更高的叠片式过滤器，通过螺栓压紧形成过滤通道，将杂质截留于叠片间隙。第三级为精滤，采用膜孔径极小的超滤膜组件，去除绝大多数悬浮颗粒和微生物，保障出水浊度达到目标值以下。

应急水质调节模块为多级过滤的补充，由应急混凝、活性炭吸附和水质监测预警三大单元构成，能在水质突变时快速干预。应急混凝单元配备全自动药剂投加系统，当监测到进水浊度超过设定值时，系统根据浊度数据自动调整药剂投加量，通过静态混合器实现药剂与海水的快速混合。活性炭吸附单元采用颗粒活性炭滤罐，活性炭粒径和比表面积符合设计要求，可快速吸附海水中的有机物、重金属和部分污染物，当监测到化学需氧量超过设定值时，系统自动切换至活性炭过滤模式，吸附饱和后可通过热再生技术恢复性能。水质监测预警单元部署多参数水质分析仪，实时监测浊度、化学需氧量、pH值等多项指标，数据采集频率高，当指标超标时，立即触发声光报警并自动启动应急模块，同时将数据上传至远程监控中心。

3.3 提高泵组和动力系统防护能力

极端海况下，泵组易出现过载停机、动力中断、海水倒灌等问题。通过智能监控精准调控运行状态、冗余配置提升可靠性，构建预测、调控、应急、的全链条防护体系。

智能监控与自适应控制系统通过实时感知运行参数、动态调整运行模式，从根本上降低泵组过载风险。感知层部署全方位监测设备：取水口附近安装声学多普勒海流计，实时监测海流速度和方向。泵组进出口安装压力传感器、流量传感器，电机配备振动传感器和温度传感器，实现运行参数的全面采集。

数据处理层采用边缘计算节点，结合历史数据，利用人工智能算法，如LSTM模型，分析、预测海流变化趋势，当预测负载超过额定值的一定比例时，系统自动启动自适应调节。针对过载停机问题，在系统中设定泵组振动加速度、点击温度阈值，当监测值大于阈值时，立即触发降载程序，若参数持续超标则自动切换至备用泵组，避免设备损坏。

冗余动力配置采用多泵并联、应急储能的双重保障方案，确保极端工况下连续供水。泵组配置遵循“N+2”冗余原则，即运行泵数量之外额外配备两台备用泵，备用泵组