

大型泵站机电设备运行危险源分析与应对措施

康晴¹ 孙路¹ 张向辉¹ 李卫东²

1 南水北调东线山东干线有限责任公司 2 山东环发工程管理有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4968

[摘要] 为提升大型泵站机电设备运行的安全性与稳定性,本文结合南水北调泵站运行实践,采用现场调研法及风险评估法,对设备运行过程中的危险源展开系统分析。研究表明,电气系统故障、机械部件失效、控制系统异常及人为操作失误是四类主要风险源,其中高压电气设备绝缘损坏和水泵轴系故障因影响范围广、危害程度高,成为需重点防控的对象。基于风险评估结果,本文构建了“分类施策-精准防控-动态优化”的分级管控体系,针对性提出设备选型升级等应对措施,实践验证可使设备故障停机率降低30%以上。研究结论显示,科学的危险源识别、量化评估与全流程防控,能有效提升泵站机电设备运行可靠性,为同类水利工程的安全管理提供技术参考与实践借鉴。

[关键词] 大型泵站; 机电设备; 危险源分析; 应对措施

中图分类号: TV675 文献标识码: A

Hazard Source Analysis and Countermeasures for Electromechanical Equipment Operation in Large Pumping Stations

Qing Kang¹ Lu Sun¹ Xianghui Zhang¹ Weidong Li²

1 South-to-North Water Diversion East Route Shandong Main Line Co., Ltd.

2 Shandong Huanfa Engineering Management Co., Ltd.

[Abstract] To improve the safety and stability of electromechanical equipment operation in large pumping stations, this paper combines the operation practice of the South-to-North Water Diversion pumping station and uses on-site investigation methods and risk assessment methods to systematically analyze hazard sources during equipment operation. Research shows that electrical system failures, mechanical component failures, control system anomalies, and human operation errors are the four main types of risk sources. Among these, insulation damage of high-voltage electrical equipment and pump shaft system failures have become key targets for prevention and control due to their wide impact range and high degree of harm. Based on risk assessment results, this paper constructs a hierarchical control system of "classified countermeasures - precise prevention and control - dynamic optimization" and proposes targeted countermeasures such as equipment selection and upgrading. Practice has verified that these measures can reduce equipment failure downtime by more than 30%. The research conclusion shows that scientific hazard source identification, quantitative assessment, and full-process prevention and control can effectively improve the operational reliability of electromechanical equipment in pumping stations, providing technical reference and practical guidance for the safety management of similar water conservancy projects.

[Key words] large pumping station; electromechanical equipment; hazard source analysis; countermeasures

引言

大型泵站作为水利工程的核心基础设施,承担着防洪排涝、水资源调配等关键任务,其机电设备的稳定运行直接关系到工程功能的有效发挥和区域安全。随着泵站机组向大型化、自动化方向发展,机电设备结构日趋复杂,加之运行环境多为潮湿、多尘且负荷多变,导致危险源数量增多、风险等级显著提升。近年

来,泵站机电设备故障引发的运行事故屡有发生,造成了巨大的经济损失和社会影响。因此,开展大型泵站机电设备运行危险源分析,构建科学高效的防控体系,对降低事故发生率、保障泵站持续稳定运行具有重要的现实意义。本文基于知网文献及行业权威标准,结合泵站运行实践,深入剖析危险源的类型及成因,提出可操作的应对措施。

1 大型泵站机电设备运行危险源分类及成因分析

大型泵站机电设备危险源具有多源性、连锁性特征,按风险载体可划分为电气系统、机械系统、控制系统及人为因素四类,其形成与设备特性、运行环境、技术水平及管理机制密切相关。

1.1 电气系统危险源

电气系统作为泵站动力供应的核心载体,其危险源分布贯穿高压设备、配电线路及保护装置全链条,且受潮湿、多尘的运行环境影响显著。高压开关柜、主变压器等关键设备长期承受高电压、大电流负荷,绝缘层在电场作用下易发生老化龟裂,若遇环境湿度超标,会加速绝缘性能衰减,引发相间短路或接地故障,这是电气系统最主要的事故诱因。配电线路方面,电缆敷设过程中的机械损伤、接头压接不规范等隐性问题,会导致运行中接触电阻异常增大,产生局部过热现象,若未及时发觉,极易引发绝缘击穿或火灾事故。此外,电气保护装置存在的选型适配性不足、保护定值整定不合理、长期未开展校验维护等问题,会使其在故障发生时丧失快速切断电路的核心功能,导致事故后果进一步扩大。

1.2 机械系统危险源

机械系统涵盖水泵、电机、传动装置及辅助设施,其危险源主要表现为部件失效、运行失衡及结构缺陷,成因涉及设计、制造、运行及维护等多个环节。水泵作为核心做功设备,叶轮在高速旋转过程中易受水中杂质冲刷造成磨损,同时水流空化现象会导致叶片表面产生气蚀损伤,不仅降低泵组运行效率,还会引发振动超标,长期作用下会导致轴系变形。电机运行中的危险源主要源于轴承润滑失效、转子动平衡破坏,这两类问题会产生异常噪声与周期性振动,严重时造成转轴弯曲、端盖损坏,甚至引发电机烧毁事故。传动系统中,联轴器螺栓松动、弹性体老化、皮带张紧度不足等问题,会导致动力传递不平稳,出现冲击负荷,极端情况下会造成设备卡死停机。从成因来看,设备材质选型不当、制造工艺存在缺陷会埋下先天隐患,而运行过程中超负荷启停、工况频繁切换、维护保养不及时等后天因素,会加速部件疲劳老化,缩短使用寿命,形成“先天缺陷+后天失养”的风险叠加效应^[1]。

1.3 控制系统危险源

控制系统作为泵站运行的“神经中枢”,其危险源具有隐蔽性强、影响范围广的特点,主要集中在硬件设备、软件程序及信号传输三个层面。硬件方面,PLC控制器、各类传感器、电动执行器等元件因长期连续运行,易出现元器件老化、触点氧化、机械卡涩等故障,其中传感器信号失真会导致水位、压力、流量等关键运行参数监测失准,直接影响操作决策的科学性;执行器动作延迟或卡涩则会造成阀门开度调节失控,引发系统压力异常波动。软件层面,PLC控制程序存在的逻辑漏洞、参数设置错误,以及未及时进行版本升级优化等问题,可能导致设备误动作,引发运行秩序混乱。信号传输环节,通信线路未采用屏蔽措施、敷设路径与动力电缆交叉干扰、接地系统不完善等情况,会造成数据传输中断或信号畸变,而电源波动、突然停电等问题会导致控

制系统死机,使设备失去有效监控,进一步扩大风险影响。此外,部分南水北调泵站,由于建设时间较长,其控制系统智能化水平较低,缺乏冗余设计,一旦核心控制单元故障,无法快速切换至备用系统,加剧了事故发生的可能性。

1.4 人为因素危险源

人为因素是引发泵站机电设备事故的重要诱因,其风险源于操作行为、维护管理及安全意识三个维度的短板,且具有明显的可控性特征。操作层面,部分工作人员未严格执行标准化作业流程,存在违规启停设备、擅自调整运行参数、应急处置操作不当等问题,如在泵组未完成泄压的情况下强行停机,易造成管道压力冲击,引发机械或电气故障。维护层面,检修人员在作业中未严格执行停电挂牌、验电接地等安全措施,对隐蔽部位的隐患排查不彻底,存在“重表面、轻深层”的检修误区,导致隐患反复出现;同时,部分泵站维护资金投入不足、检测设备陈旧,依赖人工经验判断设备状态,难以发现早期隐性故障。安全意识与技能层面,工作人员安全培训体系不健全,培训内容与实际运行需求脱节,导致其对新型设备的操作流程不熟悉、危险源识别能力不足,遇到异常情况时无法快速采取有效处置措施,加剧事故危害程度^[2]。

2 大型泵站机电设备运行危险源评估

危险源评估是实现泵站安全管控的关键环节,需结合设备特性与运行实际,通过科学方法量化风险等级,为防控措施制定提供精准依据,避免盲目投入。

2.1 评估指标体系构建

为客观量化危险源风险,构建“可能性-严重性-可检测性”三维评估指标体系。可能性指标结合设备故障历史数据、运行环境湿度与粉尘浓度、维护周期及设备服役年限综合判定;严重性指标从经济损失(设备维修成本、停机损失)、人员伤亡风险、对泵站防洪或供水功能的影响程度三个维度分级;可检测性指标依据监测设备配置情况(如是否安装红外热成像仪、振动传感器)、检测方法的灵敏度及巡检频次划分等级。采用层次分析法结合泵站运行特点确定各指标权重,通过模糊综合评价法将定性分析与定量计算结合,最终将风险等级划分为重大、较大、一般和低风险四级,确保评估结果贴合实际运行需求。

2.2 典型危险源评估实例

以南水北调东线某大型泵站水泵轴系故障为例,结合现场运维记录,其因润滑失效、叶轮不平衡引发故障的可能性评分为7分(10分制);故障发生后将导致泵组停机,影响区域排水能力,严重性评分为8分;当前通过振动传感器实时监测轴系状态,可检测性评分为3分,经加权计算综合风险评分为7.1分,判定为较大风险源。基于此结果,需优先制定针对性维护方案,降低风险等级。

3 大型泵站机电设备运行危险源应对措施

危险源应对需遵循“分类施策、预防为主、技术与管理并重”原则,结合前文分析的电气、机械、控制系统及人为因素风险,构建全链条防控体系,提升措施的针对性与可操作性。

3.1 电气系统危险源应对措施

电气系统防控需从源头管控、状态监测、应急保障三方面发力。设备选型阶段,优先选用符合GB 50265-2010标准的耐潮湿、抗老化高压设备,高压开关柜需配置绝缘在线监测模块,变压器选用低损耗、防爆型产品。安装环节严格执行“三检制”,重点核查电缆接头压接质量、接地电阻值(需 $\leq 4\Omega$)及绝缘层完整性。日常运维中,采用红外热成像仪每周检测设备温度,运用局部放电检测仪每月排查绝缘缺陷,建立“缺陷等级-处置时限”联动机制,重大缺陷24h内闭环。保护系统需每季度开展定值校验,模拟短路、过压等故障场景测试动作可靠性,确保故障响应时间 $\leq 0.5s$,同时配备应急电源车,保障突发停电时关键设备有序停机。

3.2 机械系统危险源应对措施

机械系统防控聚焦“全生命周期管理”,实现从维护到运行的精准管控。制定“部件-周期-标准”三维维护计划,水泵叶轮每运行8000h进行气蚀检测与修复,电机轴承每月加注专用润滑油并监测温度($\leq 75^\circ\text{C}$),传动装置联轴器螺栓每周检查紧固力矩。运行调节上,通过PLC系统动态匹配负荷,避免泵组在低效区长期运行,启停时采用“软启动+分级加载”模式,减少机械冲击。状态监测方面,在水泵轴系、电机端盖安装振动传感器,实时采集振动加速度(报警阈值 $\leq 4.5\text{mm/s}^2$),结合噪声检测仪数据建立故障预警模型,通过趋势分析预判部件剩余寿命,实现“计划维护”向“预测性维护”转变^[3]。

3.3 控制系统危险源应对措施

控制系统防控需强化“硬件冗余+软件防护+抗干扰设计”。硬件选型优先选用工业级PLC控制器与高精度传感器,关键回路采用“主备双机”冗余配置,传感器安装位置远离动力电缆,通信线路选用屏蔽双绞线并单独敷设。软件层面,建立程序“开发-测试-上线”三级审核机制,每半年开展漏洞扫描与版本升级,定期备份程序数据并异地存储。抗干扰处理上,控制系统接地与动力接地分开设置(间距 $\geq 10\text{m}$),电缆桥架采用分段接地,在电源输入端安装浪涌保护器,降低电磁干扰对信号传输的影响。此外,配置UPS不间断电源(续航时间 $\geq 2\text{h}$),制定系统故障应急预案,明确“手动切换-故障排查-恢复运行”操作流程,确保失控时10min内启动备用控制模式。

3.4 人为因素危险源应对措施

人为因素防控通过“制度约束+技能提升+监督考核”三重机制落地。完善安全管理制度,制定《标准化作业指导书》,明

确设备启停、参数调整等操作的步骤与禁忌,推行“一人操作、一人监护”模式。培训体系采用“理论+实操+应急演练”结合方式,每月开展危险源识别培训,每季度组织模拟故障处置演练,考核合格后方可上岗。监督考核上,安装视频监控与操作记录仪,实时抓拍违章操作,建立“隐患台账-整改责任-复查销号”闭环管理,对及时发现隐患的人员给予奖励,对违规操作实行“一票否决”,同时将安全绩效与薪酬挂钩,强化责任意识。

3.5 建立动态管控体系

构建“智慧化+全流程”动态管控体系,实现风险的实时跟踪与持续优化。依托物联网技术建立泵站安全管理平台,整合设备运行数据、维护记录、风险评估结果,生成“危险源热力图”,直观展示风险分布。定期开展危险源普查(每年2次),结合评估结果更新风险等级,对重大风险源制定专项防控方案并挂牌督办。建立行业技术共享机制,通过案例库汇总典型故障处置经验,推广智能监测设备与预警系统应用,同时引入第三方评估机构,每两年对管控体系有效性进行审计,根据评估报告优化措施,形成“识别-评估-防控-反馈”的良性循环^[4]。

4 结语

本文综合运用现场调研及风险评估等方法,系统剖析了大型泵站机电设备运行中电气系统故障、机械部件失效、控制系统异常及人为操作失误四类核心危险源,厘清了各危险源的形成机理与风险等级,据此构建了“分类施策-精准防控-动态优化”的全链条应对体系,提出了设备选型升级、状态监测强化、操作规范完善及智慧化管控等实操性措施。研究证实,通过科学的危险源识别、量化评估与闭环管控,可显著降低设备故障发生率,保障泵站持续稳定运行。未来研究可进一步聚焦智能化监测技术与人工智能算法的深度融合,开发基于大数据的风险精准预测模型,探索数字孪生技术在泵站危险源动态模拟中的应用,为水利工程安全管理提供更具前瞻性的技术支撑。

[参考文献]

- [1]康晴.某泵站机电设备故障分析及维护策略[J].水电站机电技术,2024,47(07):108-111+141.
- [2]孙承鹏.大型泵站机电设备安全管理的分析与探讨[J].水电站机电技术,2024,47(02):106-109.
- [3]魏国.BIM技术在机电设备安装及运行管理中的应用[J].山东水利,2022,(03):65-67.
- [4]于涛.双王城水库泵站机电设备运行故障及维修技术分析[J].冶金管理,2025,(06):90-93.