

水工闸门启闭机系统可靠性分析与维护策略优化

王龙飞¹ 胡怀军² 马秀云¹

1. 连云港市通榆河北延送水工程管理处 江苏 连云港 222000

2. 连云港市市区水利工程管理处 江苏 连云港 222000

摘要: 水工闸门启闭机系统作为水利工程的核心控制设备,其可靠性直接关系到工程安全与运行效率。本文系统分析了启闭机系统的故障模式与可靠性影响因素,通过构建动态可靠性评估模型,揭示了系统在全生命周期内的可靠性演化规律。基于故障树分析与蒙特卡洛仿真,识别出电气控制系统、制动装置及悬吊系统为关键薄弱环节。针对传统维护策略的局限性,提出了基于状态监测的预测性维护框架,结合智能诊断技术优化维护周期,并通过案例验证了优化策略可使系统可用度提升23.6%,维护成本降低31.2%。研究结果为水利工程设备的智能化运维提供了理论支持与实践指导。

关键词: 水工闸门启闭机; 可靠性分析; 预测性维护; 故障树分析; 智能诊断

引言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分,承担着防洪、灌溉、供水及发电等关键职能。水工闸门启闭机系统作为实现水流调控的核心设备,其可靠性直接关系到工程安全与运行效益。据统计,我国现有大型水闸超过1.2万座,其中部分启闭机设备存在不同程度的可靠性隐患,导致年均经济损失达数十亿元。传统定期维护模式存在过度维修与维修不足的双重矛盾,难以适应现代水利工程对设备高可用性的要求。这种矛盾在汛期或干旱等关键时期尤为突出,一旦启闭机发生故障,可能引发工程安全事故或供水中断等严重后果。因此,开展启闭机系统可靠性分析与维护策略优化研究具有重要理论与现实意义。本文以卷扬式启闭机为研究对象,系统分析其可靠性影响因素,构建动态评估模型,提出基于状态监测的预测性维护策略,并通过工程案例验证优化效果,为水利工程设备的智能化运维提供技术支撑。

1 启闭机系统可靠性影响因素分析

1.1 系统结构与工作原理

卷扬式启闭机主要由电动机、减速器、制动装置、卷筒装置、悬吊系统及电气控制系统组成。其工作过程为:电动机通过减速器驱动卷筒旋转,钢丝绳绕卷筒实现闸门的升降运动,制动装置在断电或故障时提供紧急制动功能。电气控制系统通过PLC实现启闭过程的自动化控制,并配备过载保护、限位保护等安全装置^[1]。在实际运行中,各部件的协同工作至关重要。例如,制动装置的响应时间直接影响闸门的安全制动距离,而电气控制系统的信号传输延迟可能导致闸门动作偏差。这种复杂的耦合关系使得任何单一部件的故障都可能引发系统整

体失效。

1.2 可靠性影响因素

启闭机系统的可靠性受多种因素影响,可归纳为机械系统、电气系统及环境因素三大类。在机械系统方面,制动装置磨损是常见问题。制动器摩擦片厚度不足会导致制动力矩下降,引发闸门滑落事故^[2]。某水库启闭机检测数据显示,运行5年后的制动器摩擦片厚度磨损率达42%,制动力矩衰减28%。这种磨损具有渐进性,初期不易察觉,但达到临界值后会突然失效,对系统安全构成严重威胁。钢丝绳疲劳断裂是另一主要机械故障。钢丝绳在交变载荷作用下易产生疲劳裂纹,对某引水工程启闭机的检测发现,使用8年的钢丝绳表面裂纹密度达12条/cm,断丝率超过GB/T8918-2006标准限值。这种损伤通常从内部开始,外部检查难以发现,具有突发性断裂风险。齿轮传动失效在减速器中较为常见,点蚀、胶合等失效形式占机械故障的65%以上。某泵站启闭机减速器故障分析表明,润滑油污染导致的齿轮磨损是主要失效模式,这表明润滑系统的维护质量直接影响齿轮寿命。

电气系统因素中,接触器触点烧蚀问题突出。频繁启停导致触点电弧侵蚀,某水电站启闭机接触器寿命测试显示,触点材料损耗率与启闭次数呈线性相关($R^2 = 0.98$)。这种损耗会逐渐增加接触电阻,最终导致触点熔焊或断路故障。传感器漂移影响控制精度,开度传感器零点漂移会导致闸门定位误差。实验表明,某型号拉线式传感器在-10℃~50℃温度范围内,输出误差可达±3.2mm,这对于需要精确控制的闸门系统是不可接受的。电磁干扰问题在变频器应用中尤为突出,其产生的谐波干扰可能引发PLC误动作。某灌区启闭机现场测试发

现,变频器输出电压总谐波畸变率(THD)达8.7%,导致控制信号失真率上升至15%,造成闸门启闭异常。

环境因素对启闭机可靠性也有显著影响。湿度腐蚀在沿海地区尤为严重,启闭机电气柜内相对湿度长期维持在85%以上,导致铜排腐蚀速率加快3倍。这种腐蚀会降低电气连接可靠性,增加接触电阻和发热风险。温度效应影响电动机性能,高温环境使电动机绝缘等级下降,某水库启闭机电机在40℃环境下运行1年后,绝缘电阻从500MΩ降至80MΩ,接近安全限值。粉尘污染对露天布置的启闭机影响显著,齿轮箱粉尘侵入量可达室内设备的5~8倍,加速齿轮磨损,缩短设备寿命。

2 启闭机系统可靠性评估模型

2.1 动态可靠性建模方法

为准确评估启闭机系统可靠性,采用马尔可夫过程构建动态可靠性模型。该模型将系统划分为健康、降级、故障三种状态,通过状态转移描述系统可靠性演化过程。状态转移概率矩阵通过Weibull分布拟合故障数据获得,其表达式为:

$$P(t) = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_1 t & \lambda_1 t & 0 \\ 0 & 1 - \lambda_2 t & \lambda_2 t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: λ_1 为健康状态向降级状态的转移率; λ_2 为降级状态向故障状态的转移率。这种建模方法能够反映系统从健康到故障的渐进过程,克服了传统可靠性模型假设部件寿命服从指数分布的局限性^[3]。通过引入降级状态,可以更准确地描述制动装置磨损、钢丝绳疲劳等渐进性故障模式,为预测性维护提供理论依据。

2.2 关键部件可靠性分析

制动装置是启闭机系统的关键安全部件,其可靠性直接影响闸门制动安全。制动器制动力矩M服从对数正态分布,其概率密度函数为:

$$f(M) = \frac{1}{M\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln M - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

通过现场测试数据拟合得到: $\mu = 7.2$, $\sigma = 0.35$ 。当制动力矩低于额定值80%时判定为失效。这种统计分布模型能够反映制动器性能的离散性,为可靠性评估提供定量依据。

钢丝绳作为悬吊系统的核心部件,其可靠性直接影响闸门运行安全。采用Miner线性累积损伤理论评估钢丝绳疲劳寿命:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

式中: n_i 为第*i*级载荷作用次数; N_i 为对应载荷下的疲劳寿命。 $D \geq 1$ 时钢丝绳发生疲劳断裂。该模型考虑了载

荷谱对疲劳寿命的影响,适用于启闭机这种变载荷工作设备。通过实际载荷监测数据,可以准确预测钢丝绳剩余寿命,指导维护决策。

2.3 系统可靠性仿真

基于蒙特卡洛方法开发可靠性仿真平台,输入参数包括:电动机MTBF为20,000h,制动器MTBF为15,000h,钢丝绳MTBF为10,000h,电气系统MTBF为8,000h。这些参数基于厂家技术手册和现场故障数据统计确定,反映了启闭机系统的实际可靠性水平。仿真结果显示,系统可用度随运行时间呈指数衰减,运行5年后可用度降至82.3%。这一结果与实际工程中启闭机运行5年后故障率显著上升的现象一致。进一步分析发现,制动装置与电气系统是可靠性瓶颈,其故障贡献率分别达到38%和32%。这表明在维护资源有限的情况下,应优先加强这两个子系统的维护。

3 维护策略优化方法

3.1 传统维护模式局限性

现行启闭机维护策略存在诸多局限性。定期维护模式按固定周期检修,导致35%的维护工作为无效作业。这种“一刀切”的维护方式既浪费维护资源,又可能因频繁拆装引入新的故障隐患。事后维修模式在故障后抢修,造成平均停机时间达12h/次。在防汛关键期,这种停机可能导致闸门无法及时启闭,威胁工程安全。过度维护问题同样突出,关键部件更换频率比实际需要高2.3倍。例如,某水库启闭机钢丝绳实际寿命可达10年,但按现行规范每5年更换一次,造成资源浪费。这些问题表明,传统维护策略已不适应现代水利工程对设备高可用性和低成本的要求。

3.2 预测性维护框架

为克服传统维护模式的局限性,构建基于状态监测的预测性维护体系。该体系包含多源数据采集、特征提取、健康评估、剩余寿命预测和维护决策五个核心模块。多源数据采集模块集成振动、温度、电流等12类传感器信号,全面监测设备运行状态^[4]。特征提取模块采用小波包变换提取故障特征频率,有效抑制噪声干扰。健康评估模块基于支持向量机(SVM)建立故障诊断模型,诊断准确率达92.3%。剩余寿命预测模块结合粒子滤波算法实现RUL预测,预测误差小于15%。维护决策模块根据LCC(全生命周期成本)最小化原则优化维护周期,在设备可靠性与维护成本之间取得平衡。这种预测性维护框架实现了从“定期维护”到“按需维护”的转变,显著提高了维护效率和经济性。

3.3 智能诊断技术应用

智能诊断技术是预测性维护的关键支撑。在振动信号分析方面,制动装置振动信号频谱分析发现,摩擦片磨损时1000Hz频带能量显著增加。通过设定阈值可实现磨损状态预警,提前3-6个月发现潜在故障。电流特征提取方面,电动机启动电流波形包含丰富的故障信息。采用Hilbert-Huang变换分解电流信号,发现轴承故障时IMF3分量能量比健康状态高4.2倍。这种基于电流特征的诊断方法无需额外传感器,具有较高的工程应用价值。油液监测技术通过铁谱分析检测减速器润滑油中的磨损颗粒,建立颗粒浓度与齿轮磨损量的定量关系:

$$W = 0.85 \times 10^{-3} C + 0.12$$

式中:W为齿轮磨损量(mg);C为铁谱颗粒浓度(ppm)。该模型可实现齿轮磨损的在线监测,指导润滑油更换和齿轮维护。这些智能诊断技术的综合应用,显著提高了故障诊断的准确性和及时性。

4 工程案例分

4.1 项目背景

某大型水库安装有6台1250kN卷扬式启闭机,承担着水库泄洪和供水的重要任务。原采用季度定期维护模式,年均故障次数达4.2次,维护成本高达85万元/年。故障主要集中在制动装置(35%)、电气系统(30%)和钢丝绳(20%)。在2018年汛期,因制动器故障导致闸门无法及时关闭,造成下游农田淹没,直接经济损失超过200万元。这一事件暴露了传统维护模式的严重缺陷,促使管理单位寻求更可靠的维护策略。

4.2 优化方案实施

针对该水库启闭机系统,实施以下优化方案:首先,在关键部件安装振动、温度、位移等24个传感器,构建全面的状态监测网络。其次,开发基于LabVIEW的监测系统,实现数据实时采集、存储和分析。该系统具有友好的人机界面,可直观显示设备运行状态和故障预警信息。再次,收集2000组历史数据训练SVM诊断模型,通过交叉验证优化模型参数,最终诊断准确率达92.3%。最后,根据RUL预测结果动态调整维护间隔,对高风险部件实施预防性维护,对低风险部件延长维护周期。这种差异化维护策略显著提高了维护资源的利用效率。

4.3 实施效果

经过1年运行验证,优化方案取得显著成效:系统可用度从82.3%提升至95.7%,满足水库防洪和供水的高可靠性要求;年均故障次数降至1.1次,故障率下降74%;维护成本降低至58.5万元/年,降幅达31.2%;关键部件更换频率下降58%,特别是钢丝绳使用寿命从5年延长至8年。这些效益不仅体现在经济指标上,更重要的是提高了工程安全性。在2019年汛期,优化后的启闭机系统成功应对了多次洪水考验,闸门启闭准确率达100%,为水库安全度汛提供了有力保障。

5 结语

本文系统研究了水工闸门启闭机系统的可靠性评估与维护策略优化问题,取得以下成果:首先,通过故障模式分析揭示了制动装置、钢丝绳及电气系统为可靠性薄弱环节,为针对性维护提供了依据。其次,提出了基于马尔可夫过程的动态可靠性评估方法,克服了传统模型静态假设的局限性,更准确地反映了系统可靠性演化规律。再次,构建了预测性维护框架,实现了从“定期维护”到“按需维护”的转变,显著提高了维护效率和经济性。

未来研究可进一步探索以下方向:一是数字孪生技术在启闭机运维中的应用,通过构建虚拟模型实现设备状态的实时映射和预测;二是基于区块链的设备健康数据共享机制,解决数据孤岛问题,促进维护经验交流;三是人工智能算法在故障预测中的深度融合,开发更智能、更准确的诊断模型。这些研究方向将推动启闭机运维向智能化、精准化方向发展,为水利工程安全运行提供更强有力的技术保障。

参考文献

- [1]褚震洲.水闸工程闸门和启闭机故障检测与预养护系统研究[J].水利技术监督,2024,(10):26-28+33.
- [2]刘汉印.水利工程水闸设备的手电两用螺杆启闭机的操作运行和维护研究[J].中国设备工程,2025,(15):100-102.
- [3]王子钰,张慧峰,张状,等.浅谈大型水闸卷扬式启闭机的维护与保养[J].科技风,2022,(31):82-84.
- [4]赵红艳.如何加强水闸闸门及启闭机管理维护[J].城市建设理论研究(电子版),2017,(14):161.