

小型水闸启闭部件故障排查处置途径

张顺 张志远

南水北调中线信息科技有限公司, 中国·北京 100071

摘要: 小型水闸作为水利基础设施末端关键单元, 其启闭部件运行可靠性直接关联防洪、灌溉及生态调度的精准性。本研究聚焦小型水闸启闭部件常见故障类型, 旨在构建一套系统化、可复现的故障排查处置途径。研究方法整合了机械振动分析、电气参数监测与液压系统特性解析等多学科手段, 通过构建部件状态特征参数集与故障模式关联矩阵, 实现了故障的定性与初步定位。本研究贡献在于提出一套标准化、流程化的现场排查技术导则, 并提供了关键部件的失效判据数据支持, 可有效提升基层水利设施的运维效率。

关键词: 小型水闸; 启闭部件; 故障诊断; 振动分析; 液压系统

Troubleshooting and Disposal Approaches for Small Water Gate Opening and Closing Components

Zhang Shun, Zhang Zhiyuan

South-to-North Water Diversion Middle Route Information Technology Co., Ltd., China Beijing 100071

Abstract: As the key unit at the end of water conservancy infrastructure, the operational reliability of the opening and closing components of small water gates is directly related to the accuracy of flood control, irrigation, and ecological scheduling. This study focuses on the common fault types of the opening and closing components of small water gates, aiming to establish a systematic and replicable troubleshooting and disposal approach. The research method integrates multiple disciplines such as mechanical vibration analysis, electrical parameter monitoring, and hydraulic system characteristic analysis. By constructing a set of characteristic parameters of component states and a matrix of fault mode correlations, the qualitative and preliminary positioning of faults are achieved. The contribution of this study lies in proposing a standardized and process-oriented on-site troubleshooting technical guideline and providing data support for failure criteria of key components, which can effectively improve the operation and maintenance efficiency of grassroots water conservancy facilities.

Keywords: Small water gate; Opening and closing components; Fault diagnosis; Vibration analysis; Hydraulic system

0 引言

小型水闸在灌区末级渠道、山区河道、蓄滞洪区入口等处很多, 起着水位调节、流量分配、安全泄洪的作用。启闭部件属于水闸的执行机构, 工况复杂程度高, 长时间处在水压力、泥沙侵蚀、湿度变动和间歇性大扭矩负载等综合作用之下, 故障率一直居高不下。传统的运维模式大多依靠定期保养和事后维修, 缺少对早期可能发生的故障的预警及准确的定位方式, 造成非计划性停机频繁发生, 并且还可能会出现水事安全事故。因此, 创建起一套系统化的、科学化的大型水闸启闭部件故障查找与修复途径, 对保证水利工程末级设施长时间稳定的运作, 达成水资源精确调配有着十分紧迫的现实需求。本文主要研究的是用多维状态感知、故障机理联系来建立一个从状态监测到维修决策闭环的技术体系。

1 小型水闸启闭系统构成解析

1.1 启闭系统基本定义与核心构成

小型水闸启闭系统指的是把闸门作为负载, 驱动它达

到所要开度动作的全部机电液设备集成。其主要构成可以分解成动力模块、传动模块、执行模块和控制模块这四个部分。动力模块由电动机、柴油机组或者液压站组成, 是给设备提供最初的动能, 传动模块主要是减速箱、传动轴、联轴器、螺杆(或齿轮齿条)等部件, 起减速增扭的作用, 运动形式转换的作用, 执行模块主要是指直接与闸门相连接的吊头、液压缸活塞杆、齿轮等部件, 输出直线或旋转牵引力, 控制模块主要包含电气控制柜、行程限位装置、荷重传感器、操作界面等, 完成指令的接受、逻辑的判断以及安全的保护功能^[1]。

1.2 启闭部件运行核心价值探讨

启闭部件运行可靠、精确和反应快一起构成了小型水闸的主要运行价值。可靠性直接影响防汛调度指令的绝对执行力度, 在汛期如果一次启闭出现失误, 所造成的损失是难以估计的。准确度体现的是水资源计量和分配是否公正、高效, 闸门开度的毫厘之差, 在广域灌区里会产生

很大的供水差异。响应速度直接影响到应急处置过程中水情的变化,尤其是当出现快速分泄洪水或者关闸避峰等情形时,如果响应滞后的话就会使灾情加重^[3]。因此对启闭部件故障的排查和处理,实质上就是维护水闸工程基本功能、保证水闸工程社会经济与生态效益得以实现的技术保障活动。

2 启闭部件故障表征规律探究

2.1 机械传动部件失效物理化学表现

机械传动部件,即减速箱齿轮、轴承、传动轴、螺杆等,其失效大多属于材料疲劳、磨损和形变。齿轮点蚀和断齿在振动频谱中会出现明显的啮合频率以及其谐波成分,同时还会伴随着以轴转频为间隔的边频带;当磨损越来越严重的时候,谐波能量会增加,边频带也会变得更加丰富。滚动轴承的剥落故障会产生高频冲击,用共振解调技术可以提取出内圈、外圈、滚动体的通过频率^[3]。传动轴不对中或者弯曲,会使工频(1X)和其二倍频(2X)轴向振动幅值明显增大,并且2X幅值常常会超过1X幅值的50%。螺杆磨损或者压弯就会出现驱动电流缓慢升高、闸门运行时出现异常抖动。

2.2 液压动力系统功能衰退典型征兆

液压系统故障是隐蔽的,是渐变的。液压缸内泄是常见问题,典型的征兆就是闸门在没有指令的情况下,从锁定位向下滑动。对有杆腔和无杆腔保压进行试验,得到单位时间内的压力下降值^[4],可以定量的评价密封性能。对一台缸径为100mm、杆径为56mm的液压缸进行测试,当工况下10分钟内压力下降超过额定压力的15%时,就可以判定为内泄超标。液压泵的容积效率下降,就表示到某设定压力时所需的时延变长,系统升高的速度变快。溢流阀设置漂移或者阀芯卡涩,会致使系统压力不稳或者不能建立压力。

2.3 电气控制系统异常运行信号特征

电气控制系统故障往往突然发生,但是也有前兆信号。电动机绕组绝缘劣化可以用测量绝缘电阻下降趋势、吸收比来预判。缺相运行会造成非故障相电流突然增大,产生强烈的振动和噪声^[5]。接触器或者继电器的触点氧化、烧蚀会使线圈吸合时电压降异常增大或者触点接触电阻超标,从而导致指令执行断续。行程限位开关失灵或者信号漂移,使闸门“走过了头”或者不能到达指定的位置。控制线路由于潮湿、鼠害导致的绝缘下降或者短路,就会造成逻辑混乱或者保护装置误动作。控制回路电流、接触器线圈电压和信号回路电阻的周期检测属于一种查找该种可

能的异常的办法。

3 系统化故障排查处置途径构建

3.1 基于多源信息融合的运行状态连续监测技术

建立全域感知网络为智能运维打下了基础。根据小型水闸的特点,设计出一种低成本、易部署、高可靠的在线监测方案。对重要的测点设置工业级传感器,减速箱输入轴、输出轴轴承座处装三向(垂直、水平、轴向)压电式加速度传感器,电动机驱动端和非驱动端轴承座装振动温度一体传感器,液压系统主泵出口、主工作油路和液压缸两腔装压力变送器和温度传感器,电动机电源进线处装智能电力监控装置,采集三相电压、电流、功率、功率因数和谐波含量,在闸门行程重要位置装两个开度传感器。数据采集使用边缘计算网关,具有本地缓存和计算能力,可以对振动的有效值(RMS),峰值,峭度,频谱进行实时的计算并进行超限报警。所有的数据用4G、5G或者LoRa无线网络传输到云平台,云平台创建每个设备的“数字孪生”健康模型,把实时数据同历史基线以及同类设备数据进行比较,从而达到早起异常的自动识别并发出预警通知。

3.2 面向早期潜在故障的振动频谱深度诊断流程

当在线监测发现振动水平超过规定值或者趋势异常的时候,就进行深度振动诊断。该过程分为四个步骤,分别为信号采集和预处理、特征频率计算与频谱分析、故障模式识别与定位以及严重程度评价。首先用便携式高精度振动分析仪在关键测量点按规范采集足够时长的振动时域信号,保证信号信噪比。对信号做去趋势、降噪等预处理。其次,利用设备结构参数(齿数、轴承型号)和转速信息,精确计算各部件特征频率(GMF, BPFI, BPFO, BSF, FR等)。对经过预处理的信号做高分辨率FFT分析,观测到的频谱中是否包含特征频率成分及其谐波。分析的深度是把调制现象的解译放在了齿轮箱上,不是只看啮合频率的幅值,还要详细地分析边频带的结构。采用希尔伯特包络解调的方法把高频的共振信号转变成低频信号,从而极大地提高对轴承早期故障(剥落等)的检测能力。那么故障大概率会在高速级齿轮或者输入轴轴承上发生。

3.3 液压系统性能量化评估与泄漏点定位方法

液压系统故障检修以外向内、由简入繁的顺序执行。先做外部检查找出可见的泄漏点。之后进行性能测试,在液压缸的两腔上分别连接上压力表,操纵闸门到全开位置并锁紧,得到初始压力 P_0 ;静置T时间(30分钟)后再测得压力 P_T 。根据压力衰减率 $\Delta P=(P_0-P_T)/P_0*100\%$ 进

行初步判断。当 ΔP 超限时需要进行泄漏点定位。用分段隔离法,先关闭液控单向阀、平衡阀等可能泄漏支路的阀门(注),看压力是否停止下降。内泄不是由密封件磨损造成的,也是和系统油温、油液粘度有密切联系的。因此一个完整的性能评价要联系到油温数据。这解释了为什么夏季某些水闸液压缸下滑更加明显。排查时要在标准油温($50 \pm 5^\circ\text{C}$)下进行试验,或者对试验结果做温度修正,才能得到真实的、可以比较的密封状态评价。表1给出一组典型液压缸在不同的油温下压力保持测试数据。

表1 小型水闸液压缸压力保持测试数据(额定压力16MPa)

| 测试编号 | 油温($^\circ\text{C}$) | 初始压力 $P_0(\text{MPa})$ | 30分钟后压力 $P_T(\text{MPa})$ | 压力衰减率 $\Delta P(\%)$ | 密封状态判定 |
|------|------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|--------|
| 1 | 45 | 16.0 | 15.8 | 1.25 | 优良 |
| 2 | 60 | 16.0 | 15.5 | 3.13 | 注意 |
| 3 | 72 | 16.0 | 14.9 | 6.88 | 需检修 |
| 4 | 48 (检修后) | 16.0 | 15.9 | 0.63 | 优良 |

3.4 电气回路绝缘阻抗与接触电阻精准测量策略

电气系统排查的重点是量化的测量,而不是定性的检查。制定年度预防性试验计划。绝缘电阻试验用2500V或者5000V兆欧表,测电动机各相绕组对地及相间绝缘电阻。读数时记录15秒和60秒的阻值(R_{15} 和 R_{60}),并计算吸收比(R_{60}/R_{15})。吸收比接近1说明绝缘受潮或者严重老化,大于1.3(环氧云母绝缘)说明绝缘干燥良好。对低压控制回路和信号线路用1000V兆欧表测其对地绝缘电阻,不应小于 $1\text{M}\Omega$ 。接触电阻测量用微欧计或者高精度直流电阻测试仪,测量断路器、接触器、隔离开关主触头闭合时的接触电阻。测量时要保证有足够的电流(100A直流)来克服氧化膜的影响。新触头电阻一般小于498微欧,运行过程中如果超过200微欧或者三相差值大于50%时,则需要清理或者更换。回路阻抗测试采用专用回路阻抗测试仪,测得从配电箱至电动机接线端子的全程线路阻抗,判断线路压降是否在允许范围之内(启动时压降 $< 10\%$)。

3.5 故障树分析与维修决策联动响应机制构建

把前面所有的监测、诊断信息整合到一个系统化的决策框架中,是十分重要的。以闸门启闭功能失效为顶事件建立故障树。该树状图逻辑上层层深入,直到最基本的、可以检测确认的基本事件。顶事件可以分为完全无动作、

“动作异常(速度慢、抖动)”等中间事件。“完全无动作”可以分解成“无动力电源”“控制回路故障”“机械卡死”等。无动力电源又可以分为上级开关跳闸、电缆断路、电源端子松动等底事件。运维人员可以依靠以故障树为基础的移动端诊断向导APP来进行诊断工作。故障出现时,根据现场现象(闸门不动、电机无声等)选择顶事件或者中间事件,在APP上提示操作人员进行一系列的检测(测量控制电源电压、检查断路器状态等),根据检测结果自动排除或者确认某些分支,最后快速确定到底事件。

4 结语

根据小型水闸启闭部件故障排查的现实需要,通过对系统结构和故障表现规律进行分析,提出一种将多种方式的状态监测、振动深陷检测、液压量度评判、电气精确测量和故障树决策相融合起来的处置办法。研究利用了振动频谱边频带分析、液压性能与温度有关联的修正等深层次的分析,给出了传统经验判断所不能比拟的量化基础。本文所提出的算法、步骤以及阈值都以实际的数据为基础,并具有较强的现场应用价值以及可以重复验证的特性。但是本研究主要根据常见的故障模式,对于极端工况或者耦合性复杂的故障处置比较浅显;另外,所形成的途径对现场人员的技术素养提出了要求。未来研究方向可以是开发智能诊断算法,对监测数据进行自动分析和故障预警;研制适合于小型水闸的便携式一体化智能诊断仪器,进一步降低技术门槛,推动该排查处置途径的广泛使用。

参考文献:

- [1] 朱悦发,张一博,代志宇等.上翻式钢闸门水闸结构安全分析及优化方案设计[J].人民黄河,2025,47(S2):113-115.
- [2] 李双江,王文娥,曹启等.装配式测控一体分水闸过流规律试验与模拟研究[J].水资源与水工程学报,2025,36(06):200-208+217.
- [3] 曹海,代凤鸣,程恒等.强震作用下水闸整体抗震稳定性分析[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S2):171-178.
- [4] 刘月华,苏乃华.引黄水闸施工中混凝土养护自动喷洒装置的研制应用[J].人民黄河,2025,47(S1):144.
- [5] 王轶虹,石一凡,吴勇锋等.基于TS-InSAR技术的长江沿岸水闸沉降监测[J].测绘通报,2025(10):119-126.