水轮机调速器空载摆动缺陷现场调试优化措施

熊义刚
中国葛洲坝集团机电建设有限公司　四川　成都　610091

摘　要：针对水轮机调速器机组空载转速摆动、接力器异常抽动等常见缺陷，本文剖析故障发生机理，从电气、液压、机械三大维度梳理核心诱因，制定系统化现场排查诊断流程。通过优化PID控制参数、整治液压系统缺陷、整改机械传动故障等综合措施开展调试优化。工程应用结果表明，优化后机组空载摆动指标大幅改善，远超国标限值，有效提升机组空载运行稳定性与并网可靠性，可为同类故障治理提供参考。

关键词：水轮机调速器；空载摆动缺陷；现场调试；优化措施

引言：水轮机调速器是机组转速与负荷调节的核心设备，空载工况的运行稳定性直接决定机组并网品质与电网安全。实际电站运行中，受参数匹配不当、液压系统波动、机械配合偏差等因素影响，机组易出现空载摆动超标问题，引发并网冲击、设备磨损等隐患。为有效解决该现场难题，本文结合行业规范与现场试验，系统分析故障特征与成因，提出针对性调试优化方案，切实提升调速系统动态调节性能。

1 水轮机调速器空载摆动机理及故障特征分析

1.1 调速器空载运行工作原理

（1）空载工况下，调速器以机组频率为反馈量，与50Hz额定值比较形成频差信号，经PID运算输出开度指令，驱动接力器改变转速，形成“频差检测→PID调节→开度指令→接力器动作→转速变化”闭环，使转速趋近额定值。（2）电气控制单元（微机调节器）完成频差采样、PID运算及脉冲/PWM信号输出；液压执行单元（电液转换器、主配压阀、接力器）将电信号转为液压位移并放大功率驱动导叶。电液信号转换与功率放大的响应特性是协同工作的关键。（3）核心控制指标为转速死区（≤ 0.05%）和空载转速摆动值（≤ ±0.15%），同时要求调节时间短、超调量小，确保空载转速稳定及并网前调节平稳。

1.2 空载摆动缺陷典型特征与判定标准

（1）转速摆动、接力器抽动等典型故障现象。转速摆动表现为机组频率围绕额定值持续周期性波动，上位机显示转速来回摆动；接力器抽动表现为导叶接力器活塞频繁往复微动，油压装置频繁补油，伴有异常声响。（2）行业规范中空载摆动合格阈值与异常判定依据。依据GB/T9652.1及DL/T563，机组空载转速摆动值不允许超过±0.15%，接力器抖动幅度不应超过额定行程的0.5%，超出上述阈值且持续周期摆动即判定为异常[1]。（3）不同工况下空载摆动的差异化特征。刚开机空载时摆动幅值较大呈衰减趋稳；稳定空载时呈小幅持续摆动；低水头空载时因水头波动易诱发低频摆动；高水头空载时因水流惯性增大易出现高频小幅摆动。

1.3 空载摆动核心诱因分类分析

（1）电气因素：参数匹配不当（PID参数设置不合理导致超调或振荡）、信号干扰（PT信号受电磁干扰致频率采样波动）、元器件老化（运算放大器漂移、输出板卡零漂引起误动）。（2）液压因素：油压波动（油泵启停压力变化、蓄能器压力不足）、阀件卡涩（电液转换器阀芯卡涩、主配压阀遮盖量不均）、油路泄漏（控制油路内/外泄漏致压力波动）、死区过大（电液转换器死区过大引发极限环振荡）。（3）机械因素：传动间隙（接力器与导叶连接件磨损产生间隙，造成反馈滞后）、部件磨损（引导阀工作边磨损、衬套间隙增大）、机组共振耦合（转速脉动与机械固有频率耦合引发机械液压共振，使摆动放大）。

2 水轮机调速器空载摆动缺陷现场排查与调试诊断方法

2.1 现场调试前期准备工作

（1）设备历史运行数据与故障台账梳理分析。调取该机组近半年运行日志、故障报警记录及检修台账，重点查阅调速器频率采样值、接力器行程曲线、油压变化趋势等历史数据，比对摆动发生时段与负荷调整、油泵启停、水头变化等事件的关联性，初步判定故障是突发性还是渐发性，为后续排查方向提供依据。（2）调试仪器、工具及安全防护措施准备。备齐数字示波器、万用表、频率计、压力表（0.4级精度）、位移传感器、数据采集分析仪等检测仪器，以及扳手、内六角、密封件等常用工具。严格执行两票三制，办理调速器工作票，隔离相关油压源，悬挂警示标识，设专人监护，确保调试

过程人员和设备安全。（3）机组空载试验工况条件确认与参数初始记录。确认机组处于稳定空载状态，上下游水位变化小于±0.2m，油压装置油压稳定在额定值±5%范围内。开机前记录导叶开度、转速、油压、油温等初始参数，并保存稳态波形作为基准对照。

2.2 分系统故障排查流程

（1）电气控制系统排查：PID参数、采样信号、控制回路检测。先检查PID参数是否与出厂整定值一致，重点检查比例系数是否过大、积分时间是否过小导致振荡；用示波器检测PT二次侧频率信号波形，排除谐波或干扰杂波；测量调节器输出信号（4~20mA或PWM）的线性度和稳定性，检查供电电源纹波及接地回路是否良好。（2）液压系统排查：油质油压、引导阀、主配阀、接力器状态检测。取样检测透平油清洁度（NAS等级），若超标则滤油处理；测量主配压阀和引导阀的遮盖量，检查是否在0.05~0.15mm标准范围内；分别测试主配阀和引导阀阶跃响应时间，判断阀芯是否卡涩或动作迟滞；测量接力器行程与开度指令对应关系，检查是否存在非线性死区[2]。（3）机械传动系统排查：传动间隙、连接部件、配合精度校验。检查接力器活塞杆与导叶连接销轴、耳柄的磨损情况，测量轴向与径向间隙是否超过设计值；用千分表检测导叶臂与连杆铰接点的配合间隙；检查各连接螺栓紧固状态，确保无松动；复核反馈钢带或位移传感器的安装位置是否偏移，确保反馈信号真实反映实际行程。

2.3 故障精准诊断与问题定位方法

（1）摆动诱因甄别：依次进行开环阶跃、频率扰动及闭环扫描试验，记录摆动频率、幅值及相位。若频率与PID穿越频率吻合，判为电气参数问题；若随油压波动变化，判为液压源问题；若与机组转动频率或叶片通过频率相关，判为机械/水力耦合因素。（2）单一与复合故障区分：采用逐级隔离法。先断开电气反馈信号，摆动消失则为电气回路故障；再切除液压放大环节，摆动消失则为液压卡涩或死区问题；最后空转机械部分。若单项隔离均无效，判为复合型故障，需综合调整，优先消除液压死区和电气干扰，再优化PID参数。（3）快速诊断技巧：频率稳定、幅值小的摆动，优先检查电液转换器死区和PID积分时间；低频大幅摆动，优先排查油压波动及蓄能器氮气压力；高频抖动，重点检查接线端子松动、屏蔽层接地不良及阀芯磨损。现场可“切换备用电液转换器”快速排查液压电液转换器故障，或“切换备用调节器”快速判定电气问题，大幅缩短停机排查时间。

3 水轮机调速器空载摆动缺陷优化调试措施及工程应用效果

3.1 电气控制参数优化调试措施

（1）PID参数精准整定与动态匹配优化方法。基于现场阶跃响应试验曲线，采用临界比例度法或衰减曲线法重新整定PID系数。针对不同水头工况，整定多组PID参数并存入参数表，实现水头自适应切换。现场调试时先调比例系数保证快速性，再调积分时间消除静差，最后调微分时间抑制超调，使幅值裕度不小于6dB、相位裕度不小于30°。（2）消除信号干扰、优化采样精度的技术手段。PT频率信号采用屏蔽双绞线单独敷设，远离动力电缆并可靠单端接地；在信号输入端加装磁环滤波器或低通有源滤波器，滤除高频谐波；采样周期由20ms缩短至10ms并增加中值平均滤波算法，有效抑制随机脉冲干扰，将频率采样精度提升至±0.002Hz以内[3]。（3）控制逻辑缺陷修正与程序优化方案。修正调节器变参数切换逻辑中的死区误判语句，增加PID输出变化率限幅保护，防止程序跑飞或误动作导致的接力器突跳；优化跟踪与PID切换逻辑，缩短跟踪保持时间至1s以内，确保并网前切换平滑无冲击。

3.2 液压系统稳定性优化调试措施

（1）液压死区、接力器反应时间参数优化调整。调整引导阀遮盖量至0.05~0.08mm，减小电液转换器死区至±0.5mA以内，消除由死区过大引发的极限环振荡；优化主配压阀缓冲行程，通过调节缓冲活塞间隙和节流孔径，将接力器反应时间从0.3s调整至0.15~0.2s，兼顾响应速度与系统稳定裕度，确保动作灵敏而不产生超调振荡。（2）阀件检修、油路优化与油压稳定控制措施。拆卸清洗主配压阀、引导阀，研磨阀芯阀套配合面至粗糙度Ra ≤ 0.2μm，更换磨损超标件，确保阀芯动作灵活无卡涩；清洗并校验溢流阀，将油压波动范围从±10%压缩至±3%；更换老化蓄能器胶囊并补充氮气至额定压力，增强系统油压缓冲能力；在压油槽至调速器之间增加精细滤油器（过滤精度 ≤ 10μm），保证油质清洁度维持在NAS7级以内[4]。（3）液压系统阻尼匹配优化调试方法。通过调节主配压阀节流孔板孔径及缓冲活塞间隙，调整液压系统阻尼比至0.6~0.8的最佳范围。现场采用在引导阀至主配压阀之间加装可调阻尼节流器的方式，依据阶跃响应曲线微调阻尼系数，使接力器动作呈轻微过阻尼状态，有效抑制液压振荡，使系统从欠阻尼状态优化为最佳阻尼匹配状态。

3.3 机械结构缺陷整改与优化措施

（1）传动间隙消除与磨损部件修复更换方案。全

面检查并更换磨损严重的连接销轴、铜套和耳柄，采用缩孔再加工工艺将销轴配合间隙由0.30mm缩减至0.05~0.10mm标准范围内；对接力器缸体拉伤部位进行珩磨修复，更换老化变形的密封圈，确保接力器动作平稳无内泄漏；对磨损的反馈钢带进行更换或重新张紧。（2）机械配合精度调整与结构紧固优化措施。重新调整导叶臂与连杆铰接点配合间隙，采用压铅法精确测量并紧固各连接螺栓至规定力矩值；校准反馈位移传感器安装基准，确保传感器零点与接力器实际零位一致，位移测量误差小于±0.1mm；检查并紧固调速器机柜及液压阀组底座螺栓，防止因机械松动引起的附加振动[5]。（3）机组共振耦合抑制的辅助优化手段。现场测试机组振动频谱，识别振动峰值频率，若摆动频率接近转频或叶片通过频率，通过调整转速死区设定值避开共振转速区；在接力器支架与基础连接处加装高阻尼橡胶减振垫，削弱机械振动向液压系统的反向力传递；调整导叶分段关闭装置的开启速率，减少水力脉动对机械结构的激励强度。

3.4 优化效果验证与运行稳定性分析

（1）优化前后空载摆动指标对比测试。优化前机组空载转速摆动值为±0.22%，接力器抽动幅度为0.8%行程，超出国标限值；采取综合优化措施后，转速摆动值降至±0.05%，接力器抽动幅度降至0.2%行程，各项指标均远优于国标限值（±0.15%），摆动幅值综合降幅达75%以上，调速器调节品质显著提升。（2）不同工况下机组空载运行稳定性验证。分别在20%、50%、80%额定转速及40m、60m、80m不同水头条件下进行空载稳定性全面测试，各工况下转速摆动均稳定在±0.08%以内，接力器动作平稳无抽动，频率波动曲线平滑，调速器调节品质满足并网前各项技术要求。（3）优化方案的长效性与工程适用性分析。经连续3个月运行跟踪，各项指标保持稳定，未出现摆动复发。所采用的逐级隔离诊断法和参数逐项整定法适用于同类型水轮机调速器空载摆动治理，该综合优化方案已在相似电站推广应用中取得良好效果，具有显著的工程实用价值和推广前景。

结束语

本文通过机理分析、故障排查、现场调试的完整流程，完成了调速器空载摆动缺陷的综合治理，有效解决了机组空载运行不稳定问题。经多工况测试与长期运行验证，优化方案可显著降低转速摆动与接力器抽动幅度，调节品质提升效果显著。本次采用的分层诊断、分项优化的调试思路实用性强，适配性广，可为同类型水电站调速器故障整改与稳定优化提供可靠的工程借鉴。

参考文献

[1]王斌.基于改进豪猪优化算法的冲击式水轮机调速系统串级控制[J].中国农村水利水电,2026(05):185-190.

[2]邓太亮,于朋,刘道源,等.基于MATLAB的某水电站调速器PID参数优化探究[J].四川水力发电,2023,42(03):112-115.

[3]屈靖杰.基于乌鸦算法的水轮机调速器参数优化研究[J].大众标准化,2022(19):43-45.

[4]李洋,张军,王浩.水轮机调速器空载转速摆动故障分析及调试优化[J].水电站机电技术,2024,47(08):56-58.

[5]陈鹏.高水电占比电网水电机组一次调频功能优化实践[J].中国农村水利水电,2023(02):148-152.