

泵站机组自动控制技术响应速度优化

郑 旭¹ 冯恩泽¹ 温庆斌² 汪 波¹ 闫家鹏¹

1. 杭州南泵流体机械有限公司 浙江 杭州 311100

2. 南方泵业股份有限公司 浙江 杭州 311100

摘 要:为解决泵站机组自动控制系统响应滞后、调控精度不足、复杂工况适应性弱等问题,本文从硬件、控制算法、信号传输与工况调控四个维度分析响应延迟成因,制定系统化优化方案。通过更换高精度硬件、改进自适应PID算法、精简传输与程序逻辑、搭建多工况调控策略,全面提升系统响应性能。经仿真测试验证,优化后系统响应速度、控制精度、运行稳定性显著提升,有效降低机组能耗,可为泵站自动化控制升级提供参考。

关键词: 泵站机组; 自动控制技术; 响应速度优化

引言:泵站是水利输水、排涝供水的关键设施,其自动控制响应速度直接影响管网稳压效果与机组运行安全。现阶段多数泵站控制系统存在硬件响应滞后、控制算法固化、信号传输损耗大等问题,在流量波动、负荷突变、多机组联动场景中易出现调控迟缓、参数振荡等缺陷。为改善泵站运行控制品质,本文开展机组自动控制响应速度优化研究,通过仿真验证优化成效,助力泵站实现高效、稳定、智能化运行。

1 泵站机组自动控制及响应速度理论基础

1.1 泵站机组自动控制系统组成与工作原理

(1) 控制系统硬件架构:系统核心由传感器、控制器、执行机构三部分构成。传感器负责实时采集泵站水压、流量、机组转速、温度等运行参数,将物理信号转化为电信号;控制器作为核心运算单元,接收采集信号并按照预设程序运算分析;执行机构依据控制指令完成阀门开合、机组启停、转速调节等实操动作,形成完整闭环控制硬件体系。(2) 控制系统软件逻辑与自动调控流程:软件以闭环调控逻辑为核心,具备数据采集、逻辑判断、指令输出、故障自检等功能。整体流程为传感器实时采样、软件滤波处理、参数比对分析、生成调控指令、设备执行反馈,同时搭载实时监控程序,实现全天候自动化循环调控。(3) 机组启停、调速、稳压核心控制机制:启停控制依托预设阈值实现全自动启停切换;调速机制根据输水负荷动态调整机组运行转速;稳压控制通过实时压力监测与动态微调,抵消管网压力波动,保障输水压力持续稳定^[1]。

1.2 控制响应速度核心内涵与评价指标

(1) 响应延迟、上升时间、调节稳定时间定义:响应延迟为信号采集到指令输出的间隔时长;上升时间是参数从初始值调整至标准区间的时间;调节稳定时间指

系统完成调控、参数彻底稳定无波动的总时长。(2) 响应速度精准度、稳定性评价标准:精准度以实际调控参数与理论标准参数的偏差值判定;稳定性依据参数波动幅度、振荡次数判定,波动越小、无反复振荡则控制稳定性越优。(3) 复杂工况下响应性能综合评估体系:结合负荷突变、管网波动、多机组联动等复杂场景,整合响应时效、调控精度、运行稳定性等维度,形成多指标综合评估体系,全面判定系统适配复杂工况的能力。

1.3 泵站机组控制响应延迟核心成因

(1) 硬件层面:传感器存在采集精度局限,数据采样存在固定延时,执行机构机械传动、部件动作存在惯性延迟,硬件老化、磨损会进一步加剧延迟问题。(2) 软件层面:控制算法运算迭代存在耗时,部分程序逻辑冗余、运算步骤繁琐,同时多任务并行处理时的资源占用,会导致指令生成出现延迟。(3) 传输层面:设备间信号通信存在链路损耗,数据交互过程中受信道干扰、传输协议限制,出现数据丢包、延时传输问题,拖累整体响应速度。

2 泵站机组自动控制响应速度优化方案设计

2.1 控制系统硬件优化设计

(1) 高精度、高响应传感器选型与布局优化。针对传统传感器采样滞后、精度不足导致的响应延迟问题,优选高频采样、低延时的智能数字化传感器,替代传统模拟量传感器,提升压力、流量、转速等关键参数的采集精度与采样速率。同时优化传感器布局位置,避开管路湍流、设备振动干扰区域,依据泵站输水管道结构与机组运行工况,合理调整安装点位,保证采集数据真实贴合设备实际运行状态,从源头减少数据采集误差与采集延迟,为系统快速精准调控提供可靠数据支撑。(2) 高速执行机构替换与驱动模块升级。原有执行机构存在

机械惯性大、动作滞后、响应迟缓等问题,是制约系统调控速度的关键硬件瓶颈。本次优化更换高动态响应的电动执行器与调速装置,缩短阀门调节、机组变速的机械动作时长。同步升级配套驱动模块,替换老旧驱动芯片与控制单元,提升驱动信号的接收与执行效率,增强执行机构的瞬时响应能力,降低机械传动与信号驱动带来的响应滞后问题^[2]。(3)硬件线路精简与抗干扰优化改造。泵站现场电气设备密集,线路繁杂、电磁干扰严重,易造成信号传输延迟与数据失真。通过精简冗余线路、规整设备接线,缩短信号传输链路长度,减少线路信号损耗。同时加装屏蔽线缆、接地保护装置与滤波设备,强化硬件系统抗电磁干扰能力,避免外界工况干扰导致的信号波动、传输卡顿,保障硬件信号传输的稳定性与快速性。

2.2 控制算法优化与改进

(1)传统PID控制算法响应延迟缺陷分析。传统PID算法凭借结构简单、稳定性强的特点广泛应用于泵站控制,但在复杂工况下存在明显缺陷。该算法参数固定,依赖人工整定,动态适配性差,在机组负荷突变、流量波动场景下,存在调节滞后、响应速度慢的问题。同时算法积分饱和、微分滞后问题突出,易出现调控不及时、参数振荡等情况,无法满足泵站快速动态调控的运行需求。(2)改进型自适应PID快速响应控制算法设计。针对传统算法缺陷,设计改进型自适应PID控制算法。在基础PID算法框架上引入动态误差反馈机制,实时采集工况偏差数据,自动修正控制输出量。通过优化比例、积分、微分调节逻辑,弱化积分饱和和影响,提升算法对工况变化的敏感度,缩短算法识别、运算、输出指令的时长,实现参数偏差的快速修正,提升系统动态响应速度与调控精度。(3)算法参数动态整定与快速迭代优化策略。摒弃传统人工静态参数整定方式,建立算法参数动态整定机制。结合泵站不同水位、流量、负荷工况,搭建参数迭代优化模型,依托历史运行数据与实时工况数据,自动完成PID参数的动态调整与迭代更新。通过持续的参数优化校准,让算法始终适配实时运行工况,避免固定参数导致的调控滞后,提升全工况下的快速响应性能^[3]。

2.3 信号传输与软件系统优化

(1)通信协议优化与数据传输延时压缩。原有通信协议传输速率低、数据交互效率差,是数据传输延迟的主要原因。通过优化现场总线通信协议,精简数据传输帧结构,剔除无效传输数据,缩短单周期数据传输时长。同时优化数据传输频率,针对核心运行参数提高传

输频次,非核心参数降低传输占用资源,合理分配通信信道资源,有效压缩整体数据传输延时。(2)控制程序冗余代码精简与逻辑优化。原有控制程序存在代码冗余、逻辑繁琐、重复运算等问题,增加系统运算负荷,拖慢指令输出速度。通过全面梳理控制程序代码,删减无效冗余代码,合并重复运算逻辑,简化机组启停、调速、稳压等核心控制流程。优化程序运行优先级,将核心调控程序设为高优先级运行,保障关键控制指令优先运算、优先输出^[4]。(3)实时数据预处理机制搭建,降低运算延迟。为减少控制器实时运算压力,搭建实时数据预处理机制。对传感器采集的原始数据进行提前滤波、降噪、筛选处理,剔除异常干扰数据,将预处理后的有效数据传入核心控制算法。有效减少控制器的运算工作量,缩短算法运算耗时,避免海量原始数据运算导致的系统卡顿、响应延迟问题。

2.4 多工况自适应响应调控策略设计

(1)不同水位、流量工况下响应参数适配规则。根据泵站高低水位、大小流量等常规运行工况,划分多级运行工况区间,制定对应的响应参数适配规则。针对低水位小流量稳态工况,优化微调响应参数,保障运行稳定;针对高水位大流量重载工况,调高系统响应灵敏度,加快调控速度。实现不同稳态工况下控制参数的精准适配,兼顾运行稳定性与响应快速性。(2)机组负荷突变场景快速响应调控方案。针对机组启停、管网流量骤变、多机组联动切换等负荷突变场景,设计专项快速响应调控方案。预设负荷突变应急调控逻辑,当系统检测到负荷异常波动时,自动触发快速响应机制,提前预置调控参数,缩短系统识别工况、运算调控指令的时间,快速平衡机组负荷与管网压力,抑制工况波动,规避响应滞后引发的运行隐患^[5]。

3 泵站机组自动控制技术响应速度优化方案仿真验证与效果分析

3.1 仿真实验平台搭建

(1)泵站机组控制系统仿真模型构建。基于MATLAB/Simulink搭建完整泵站机组控制仿真模型,涵盖机组泵体、管网输水、传感器采集、PID控制、信号传输五大模块,还原真实泵站输水动态特性。模型精准复刻原有控制系统硬件延迟、软件运算滞后及信号传输损耗问题,确保仿真环境与实际运行场景高度契合,为优化方案验证提供可靠模型支撑。(2)仿真参数设置与实验工况设定。结合泵站实际运行数据设定基础仿真参数,机组额定转速1480r/min,额定输水流量800m³/h,管网额定压力0.35MPa。实验划分三类工况:常规稳态

工况、流量 $\pm 20\%$ 突变扰动工况、多机组联动交替运行工况,覆盖泵站日常运行绝大部分场景,保证实验数据全面有效。(3)响应性能测试评价指标设定。本次仿真以量化指标判定优化效果,核心指标包含响应延迟时间、上升时间、调节稳定时间、压力控制精度、流量波动幅度及机组运行能耗,同时增设多机组协同偏差值,全方位评估系统响应速度、控制精度、稳定性及适配性。

3.2 优化前后响应性能对比仿真实验

(1)常规工况下控制响应速度对比测试。在额定工况下开展对照实验,分别采用传统控制方案与优化方案进行稳压、调速调控测试,记录两组系统响应耗时、参数波动数据,对比分析稳态工况下响应延迟与调控精度的提升幅度。(2)变工况、扰动工况下响应性能对比测试。通过人为设置流量骤增、骤减及管网压力扰动等工况,模拟实际输水过程中的负荷波动,测试两种控制方案在动态扰动下的抗干扰能力与快速调节能力,重点记录工况突变后的参数恢复时长与波动误差。(3)多机组联动控制响应协同性测试。搭建四机组联动仿真场景,测试机组启停切换、负荷分配过程中的响应同步性,统计各机组响应时差、负荷分配偏差,验证优化方案对多机组协同调控的优化效果。

3.3 仿真结果数据分析与效果评价

(1)响应延迟、稳定时间优化量化分析。仿真数据显示,优化后系统响应延迟由原28ms降至11ms,缩减60.7%;工况扰动后调节稳定时间由2.1s缩短至0.8s,大幅解决了传统系统调控滞后、收敛缓慢的问题,动态响应效率提升显著。(2)控制精度与运行稳定性提升效果分析。优化后管网压力控制误差由 $\pm 0.025\text{MPa}$ 降至 $\pm 0.008\text{MPa}$,流量控制精度提升18.6%,工况波动下参数振荡次数减少90%以上,有效杜绝了传统控制的超调、反复波动问题,运行稳定性大幅提升。(3)优化方案节能增效、安全运行优势分析。依托精准快速的动态调控,机组无效运转时长减少,仿真周期内整体能耗降低7.3%,输水效率提升6.8%。同时快速响应机制可有效抵

消工况突变冲击,规避管网超压、机组过载风险,提升泵站安全运维水平。

3.4 优化方案局限性与改进方向

(1)复杂极端工况下优化方案存在的短板。该优化方案在极端洪水、管网突发堵塞等超大幅扰动工况下,仍存在小幅调控超调问题,算法动态极限适配能力不足,极端工况下响应精度相较于常规工况略有下降。

(2)长期运行工况下系统稳定性优化改进方向。长期运行后硬件老化会产生固定延时误差,现有算法未设置长效误差补偿机制。后续可增设硬件老化自适应补偿模块,实现长期运行过程中误差的动态修正,保障系统长效稳定响应。(3)多场景适配性技术升级思路。后续可引入机器学习算法,搭建工况智能识别预判模型,实现工况变化的提前预判与前置调控,进一步提升系统对特殊、复杂工况的自适应能力,拓宽优化方案的适用场景。

结束语

本文围绕泵站机组自动控制响应速度短板,完成机理分析、方案设计与仿真验证,通过软硬件协同优化,有效缩短系统响应延迟,提升调控精度与工况适配能力,降低设备运行能耗,解决了传统控制模式的诸多弊端。同时梳理出优化方案在极端工况适配、长期运行误差补偿方面的不足,后续将依托智能算法迭代升级,进一步提升泵站控制系统的综合运行性能。

参考文献

- [1]余梦龙,张进朝,文豪.改进PSO-BPNN供水泵站变频恒压PID控制[J].电子测量技术,2023,46(17):64-70.
- [2]王成荣,李栋,于亚龙.粒子群优化PID的供水电机调速系统研究[J].自动化应用,2024,65(15):82-85.
- [3]晏毅,赖喜德,陈小明.基于改进粒子群算法的泵站优化运行研究[J].中国农村水利水电,2024,26(8):156-160.
- [4]刘占威.智慧泵站一体化平台在水利工程中的应用研究[J].水电水利,2023,7(6):130-132.
- [5]赵晶晶.基于PLC的泵站自动化控制系统响应性能优化[J].南方农机,2024,55(6):90-92.