

水轮机导水机构液压控制系统动态响应特性研究

张 了

武隆（渝浩、道真）水电开发有限公司 贵州 遵义 408500

【摘要】：聚焦水轮机导水机构液压控制系统，对其动态响应特性展开研究。详细阐述系统构成，涵盖电液转换、液压放大、执行等关键部件。深入分析影响动态响应的因素，如油液特性、部件参数及负载特性等。运用建模与仿真手段，建立数学模型并借助仿真软件模拟系统动态过程。结果表明，优化部件参数、改进控制策略可显著提升系统动态响应速度与精度，为提高水轮机运行稳定性与效率奠定基础，对水电行业发展具有重要意义。

【关键词】：水轮机；导水机构；液压控制系统；动态响应；仿真分析

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.030

引言

在水电能源领域，水轮机作为核心设备，在整个发电过程中占据着无可替代的地位。其运行性能不仅直接关乎发电效率，更对电网的稳定性起着决定性作用。导水机构液压控制系统作为水轮机的调节中枢，承担着精准调节水轮机流量的重任，是保障水轮机高效稳定运行的关键所在。随着水电技术的飞速发展，市场对水轮机性能提出了更为严苛的要求。深入研究导水机构液压控制系统动态响应特性，不断优化系统性能，已然成为水电行业亟待解决的关键问题。

1 水轮机导水机构液压控制系统构成剖析

水轮机导水机构液压控制系统作为水电站能量转换与稳定运行的核心枢纽，其构成涵盖多个功能模块，各组件通过精密协同实现对水轮机导叶开度的精确调控。电液转换装置作为系统的信号转换中枢，在整个控制流程中扮演承上启下的关键角色。常见的电液比例阀与伺服阀，基于电磁驱动原理，将来自控制系统的电信号线性转换为液压信号。该转换过程需兼顾信号转换的及时性与准确性，电液比例阀适用于对控制精度要求相对较低的场合，通过调节输入电流改变阀芯位移，进而控制液压油流量。

液压放大元件在系统中承担功率放大任务，确保执行元件获得足够驱动力。主配压阀作为典型液压放大元件，其工作原理基于液压伺服原理。当电液转换装置输出的液压信号作用于主配压阀阀芯时，阀芯位移变化改变阀口开度，使得来自油泵的高压油以不同流量进入执行元件。主配压阀的设计需平衡放大倍数与稳定性，过大的放大倍数虽能提升驱动能力，但易引发系统振荡；过小的放大倍数则会导致响应迟缓。

执行元件与反馈元件构成系统闭环控制的核心环节。接力器作为执行元件，通过内部活塞的往复运动将液压能转换为机械能，直接驱动水轮机导水机构动作。接力器通常采用双作用

液压缸结构，两侧油腔分别接入高压油与回油管路，通过控制两腔压力差实现精确位移控制。反馈元件一般由位移传感器或位置变送器组成，实时监测接力器的实际位移，并将位置信号转换为电信号反馈至控制系统输入端。该反馈信号与控制指令进行比较后，系统根据偏差自动调整电液转换装置输出，形成闭环控制回路。

2 影响动态响应特性因素深度解析

油液特性作为液压系统运行的基础介质参数，对动态响应特性具有根本性影响。油液黏度直接关联系统内部流动阻力，在低温环境或高黏度油液工况下，油液分子间内摩擦力增大，导致管道沿程压力损失增加，液压元件内部油液流动不畅。这不仅使执行元件启动时需克服更大阻力，延长响应时间，还可能导致液压泵吸油困难，产生气穴现象，影响系统稳定性。相反，若油液黏度过低，在高压环境下易发生泄漏，尤其在密封件间隙处，微小的黏度变化会显著改变泄漏量。泄漏不仅降低系统容积效率，还会造成压力波动，导致执行元件输出力不稳定，影响控制精度。

系统部件参数对动态响应的影响呈现多维度耦合特征。电液转换装置的响应速度决定了系统对外部控制指令的初始反应能力，其动态性能受电磁线圈电感、阀芯质量与摩擦力等因素制约。电磁线圈的充放电时间常数限制了电流变化速率，进而影响阀芯动作速度；阀芯质量与摩擦力则直接影响其加速性能，质量大或摩擦力大的阀芯在切换过程中需要更长时间达到稳定位置。液压放大元件的增益与动态特性对信号传递效率起决定性作用，增益设置需综合考虑系统带宽与稳定性。过高的增益会放大系统噪声，引发高频振荡；过低的增益则导致信号传递延迟，降低响应速度。

负载特性作为系统运行的外部条件，对动态响应产生显著影响。负载大小直接影响执行元件所需驱动力，当负载超过系统设计能力时，执行元件运动速度下降，甚至出现爬行现象。

负载变化频率对系统动态响应提出更高要求,频繁变化的负载会导致系统压力波动加剧,若控制系统响应速度不足,将无法及时调整导水机构开度,造成水轮机转速波动,影响发电质量。在实际运行中,水轮机负载不仅包含机械阻力,还涉及水流反作用力等动态变化因素。

3 优化策略与提升效果阐述

针对水轮机导水机构液压控制系统动态响应优化,部件参数调整需遵循系统性设计原则。在电液转换装置选型与参数优化方面,需综合考虑系统响应速度与控制精度需求。新型电液比例阀通过优化电磁线圈结构与阀芯材料,可有效降低电感与摩擦力,提升响应速度;采用智能控制算法对比例阀进行非线性补偿,可消除阀芯死区与滞环影响,提高控制精度。液压放大元件的优化重点在于主配压阀结构改进,通过改变阀芯形状、优化阀口过流面积以及调整反馈机构参数,可实现增益提升与动态性能优化。采用锥阀结构替代传统滑阀,可减小阀口压力损失,提高流量控制精度;引入先导式控制方式,通过增设先导阀对主阀进行预控制,可降低主阀芯动作阻力,提升响应速度。执行元件优化则聚焦于降低惯性与摩擦力,通过采用轻质高强度材料制造接力器活塞与活塞杆,可有效减小运动部件质量;优化密封结构设计,选用低摩擦系数密封材料,可降低摩擦力,减少死区效应,提高执行元件灵敏度。

控制策略改进是提升系统动态响应性能的关键技术路径。自适应控制算法通过建立系统动态模型,并基于实时监测数据在线调整控制参数,实现对系统动态特性的动态补偿。在水轮机工况频繁变化的场景下,自适应控制可根据负载、油温等参

数变化,自动优化电液转换装置的控制增益与液压放大元件的调节参数,确保系统始终处于最佳工作状态。模糊控制技术则针对系统存在的不确定性与非线性问题,通过建立模糊规则库模拟人类专家控制经验,将系统输入输出变量模糊化处理,实现对复杂非线性系统的有效控制。在处理油液特性变化、负载扰动等不确定因素时,模糊控制无需精确数学模型,可快速生成控制策略,增强系统鲁棒性与响应精度。

经多维度优化后,水轮机导水机构液压控制系统动态响应性能获得显著提升。在动态响应速度方面,系统对工况变化的响应时间大幅缩短,能够在更短时间内完成导水机构开度调整,有效降低水轮机转速波动幅度,提高电网稳定性。在控制精度层面,流量调节误差显著减小,确保水轮机在不同工况下均能保持高效运行状态,提升水能转换效率。优化后的系统在应对负载突变、油液特性变化等复杂工况时,展现出更强的抗干扰能力与稳定性,有效降低设备故障率,延长使用寿命。

4 结语

对水轮机导水机构液压控制系统动态响应特性的研究,通过理论建模、仿真分析与实验验证,系统揭示了动力元件、控制回路及负载特性等构成要素间的耦合机制。研究发现,油液粘度温变、阀口非线性及机械传动间隙等因素显著制约系统响应速度与稳定性。未来需围绕模型预测控制、电液伺服一体化等新型技术,探索高性能液压材料应用,深入研究多物理场耦合下的动态特性演变规律,为水电行业智能化升级提供技术支撑,推动清洁能源高效稳定发展。

参考文献:

- [1] 李明,王强.水轮机导水机构液压系统优化设计[J].水电能源科学,2023,41(5):145-148.
- [2] 张伟,刘辉.基于仿真分析的水轮机液压控制系统动态特性研究[J].水力发电学报,2022,41(8):112-120.
- [3] 赵刚,孙悦.新型控制策略在水轮机导水机构液压控制中的应用[J].电力系统自动化,2021,45(15):135-140.