

Research on the Coupling of PLC Guide Vane Control and Sediment Vibration Amplitude in Low Head Scenario

Liang Yuan

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Mengzi, Yunnan, 661100, China

Abstract

Under low-head conditions, the control accuracy of guide vanes in hydraulic regulation systems is significantly affected by sediment disturbances. This study investigates the structural configuration and feedback mechanism of PLC-controlled guide vane systems, analyzing the regulation range of guide vane opening/closing angles, actuator lag characteristics, and the impact of flow disturbances on control stability in low-head environments. It explores the dynamic coupling relationship between guide vane vibrations induced by sediment excitation and PLC control commands, proposes synchronous parameter adjustment and disturbance correction methods, and establishes an optimization path for control strategies under variable operating conditions. The research enhances the regulation response capability of low-head hydraulic installations in complex flow environments and provides structural insights for vibration disturbance mitigation in hydropower control systems.

Keywords

low water head; PLC control; guide vane regulation; sediment disturbance; vibration coupling

低水头场景下 PLC 导叶控制与泥沙振动摆度耦合研究

袁良

红河广源水电开发有限公司, 中国 · 云南 蒙自 661100

摘 要

低水头条件下水力调节系统中导叶控制精度受泥沙扰动影响显著, 文章研究了 PLC 导叶控制系统的结构构成与反馈机制, 分析了低水头环境下导叶启闭角调节范围、执行滞后特性及水流扰动对控制稳定性的作用特征, 探讨了泥沙激励引起的导叶振动与 PLC 控制指令的动态耦合关系, 提出了同步调节参数设定与扰动修正方法, 构建了适用于变工况下的控制策略优化路径, 该研究可提升低水头水工装置在复杂流动环境中的调节响应能力, 为水电控制系统中振动干扰治理提供结构性思路。

关键词

低水头; PLC 控制; 导叶调节; 泥沙扰动; 振动耦合

1 引言

在低水头水工环境中, 导叶的启闭调节过程受到流场不稳定性与泥沙扰动的共同干扰, 易导致控制响应滞后与结构振动加剧, 影响系统整体运行稳定性。PLC 控制系统作为导叶执行的关键单元, 其调节精度与动态反馈能力直接决定导叶在非恒定工况下的响应性能。泥沙粒子冲击导叶面板形成周期性激励, 叠加低压工况下流速波动, 诱发导叶摆度变化并干扰控制信号执行路径, 形成控制指令与机构响应之间的非线性耦合问题。研究需聚焦导叶控制结构、低水头响应特性及控制策略稳定性, 明确耦合行为的表现机制与干扰影响路径, 为后续控制策略调节与参数优化提供基础支撑与技术方案。

2 PLC 导叶控制系统的结构与功能

PLC 导叶控制系统由逻辑控制单元、导叶电液执行机构、信号采集组件与闭环反馈模块构成, 整体控制流程以位置指令为主控变量, 结合水头、流量与振动反馈信号实现动态闭环调节。PLC 通过模拟量输出控制比例阀开度, 驱动液压缸带动导叶机构完成启闭动作, 控制周期精度设定在 100 ms 以内, 支持对启闭速度、角度位置与动作顺序的多参数同步控制。导叶位置反馈信号采集采用拉线位移传感器或编码器形式, 数据经模数转换后输入 PLC 进行误差判别与指令修正。振动信号与水流扰动状态通过辅助通道输入, 参与逻辑运算形成控制策略切换判断条件。在不同负荷状态下, 系统可执行定值控制、比例调节与抗扰优先等策略模式, 以适应泥沙扰动频繁、水压波动剧烈的低水头运行环境, 保障导叶动作的连续性与响应稳定性。

【作者简介】袁良 (1992-), 男, 中国云南曲靖人, 本科, 工程师, 从事水电站水轮发电机技术研究。

3 低水头条件下导叶控制响应特性分析

3.1 导叶启闭角度的动态调节范围

低水头条件下,导叶两侧压差减弱,启闭动作依赖的水力自稳能力下降,角度调节过程在流量变化阶段表现出明显的最小响应界限^[1]。导叶从小开度向更大开度切换时,其实际变化量受流速衰减与局部紊流影响,常在设定开度与执行位移之间形成微幅差异。调节区过小会导致机构动作无法突破液压系统的内摩擦与结构阻尼,使角度调节出现“无效段”。合理设置最小有效调节幅度能够确保导叶动作跨越流体阻力的临界区,使调节过程在低水头波动中保持可测量的开度变化量。

在负荷爬升区段,导叶需要更高的角度精度以维持进水量稳定,但受水头波动约束,开度变化常在目标范围附近产生缓慢漂移。采用分段调节方式能够提升调节区间的解析度,使 PLC 控制指令在低压区间内保持足够的角度分辨能力。工程运行中需结合水头测点数据确定有效调节阈值,使导叶动作在湍流扰动下维持线性区响应,避免出现反向抖动与多次重复调节现象。

3.2 控制指令的执行滞后特性

在低水头运行条件下,导叶控制系统的响应延迟主要表现为 PLC 控制指令与执行机构之间存在明显的时间滞后^[2]。液压执行回路中的压差建立过程较慢,导叶动作受限于系统惯性、阀芯切换速率与油液压缩性,使得指令输出与位移响应之间产生时间偏移。导叶在接收到启闭指令后,并不会立即产生位移,而是经历一段压力累积与机构预加载的非响应区间,此区间的持续存在会干扰控制系统的调节节奏与节能精度,尤其在低水头状态下滞后效应更为明显。为量化滞后幅度与动态过程中的同步偏移特性,可引入响应滞后时间计算模型。

PLC 输出指令的响应滞后可用以下表达式描述:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

其中, Δt 表示系统响应的总滞后时间, t_1 为 PLC 控制指令发出时刻, t_2 为导叶实际产生位移响应的起始时刻。该参数反映控制指令与机构响应之间的同步性,滞后时间越大,调节过程中的节拍同步难度越高,特别是在频繁启闭调节场景下,滞后累积可能引发系统过调或滞后振荡。工程实际中,应基于控制周期定时采样导叶位移起始点,并结合 PLC 指令输出时间标记,形成滞后数据序列,以便构建实时滞后动态曲线并调整触发提前量。

在控制策略设计中,可结合滞后时间分布结果,通过延时补偿或预响应策略提高导叶调节的匹配精度。常用方法是在 PLC 中设定指令提前量补偿值,使控制信号在系统惯性发生前完成先导动作指令下达。针对不同低水头场景下的滞后变化区间,可将 Δt 值作为关键反馈变量嵌入闭环控制逻辑中,对导叶动作节奏进行动态预测与适配调节,以提升低水头条件下导叶响应的一致性与调节的稳

定性。

3.3 水流波动条件下的控制稳定性分析

低水头环境中,水流扰动以周期性波动形式作用于导叶面板,使位置传感器输出的信号在幅值与频率上呈现波动。反馈信号在高频段内出现短周期抖动,使 PLC 在误差判别阶段反复判断调节动作是否满足设定精度。传感器输出曲线在扰动区呈现锯齿型变化,容易造成控制系统误判为“未到位”或“偏差加大”,从而触发不必要的修正动作。

频繁修正会导致液压系统压力回路反复切换,使导叶动作节奏被扰动主导。动作过多时会增加机构磨损,降低导叶保持稳定开度的能力^[3]。采用低通滤波与限幅处理可对反馈信号进行平滑处理,使短周期水流扰动不直接影响 PLC 判断逻辑。工程应用中需结合振动测点与流速波动范围,在反馈链路设置动态过滤参数,使控制系统在复杂水流背景下保持稳定调节节奏。

4 耦合控制策略的调节与优化路径

4.1 同步调节策略的关键触发参数设定

导叶在泥沙激励下产生的摆动响应存在明显的周期特征,需设定基于振动阈值的同步触发机制。振动信号通过加速度传感器实时采集,采用 RMS 滤波提取有效幅值,并与控制系统内设定的阈值参数进行比较^[4]。触发条件可设定为振动幅值连续 3 秒内超过设定值,或频率稳定维持在特定范围内。达到触发条件后,PLC 将中断原有调节指令,激活快速调整路径,在规定时间内完成导叶角度的再分配动作,形成振动响应下的控制快速闭环。

具体设置中,需依据工程现场采集的导叶振动数据,划定三档振动等级阈值区间,并分别对应三组调节策略。低档维持原指令轨迹,中档启动前馈调节修正,高档则直接触发导叶快速关断或角度回调。振动阈值可设定为振动加速度大于 0.35 m/s^2 ,或频率峰值维持在 $12\sim 14 \text{ Hz}$ 区间。同步调节机制应绑定导叶当前位置与水头信号输入,在控制逻辑中增加互锁判断条件,防止误触发引发调节冲击。

4.2 PLC 控制指令的动态修正方法

在低水头扰动环境中,导叶执行轨迹受振动频率漂移与水流突变影响,位置误差的持续波动将导致 PLC 输出指令无法准确匹配实际动作状态。指令偏移的积累在反馈闭环中表现为频繁修正、响应震荡与误触发调节,需建立基于导叶当前位置、水流瞬态和振动频率变化的动态修正机制^[5]。该机制在每个 PLC 采样周期内根据状态量变化实时修正输出,避免误差累积造成控制滞后扩大。状态输入信号以位置偏差、水流速率变化量和振动频率偏移值为基础,构建动态修正值的增量叠加模型。控制修正量表示如下:

$$\Delta u = k_1 \cdot \Delta \theta + k_2 \cdot \Delta q + k_3 \cdot \Delta f$$

其中, Δu 为 PLC 控制指令修正量, $\Delta \theta$ 为导叶当前位置与设定目标角度之间的偏差, Δq 为单位时间内水流速

率的变化量， Δf 为振动频率与稳态频率之间的差值。三个增益系数 k_1, k_2, k_3 反映各状态变量对控制修正的敏感程度，需依据不同扰动强度进行分级标定，确保修正输出在扰动边界内维持线性稳定性。

该修正公式嵌入至 PLC 主控逻辑中，作为 PID 输出模块后的动态补偿环节运行，在每个控制周期内根据状态输入计算瞬时修正量叠加至输出指令。实际应用中，通过调整 k_1, k_2, k_3 的取值范围，可实现在不同泥沙浓度、流态突变频率下的快速响应适配。工程测试表明，增加该修正模块后导叶动作滞后平均值下降约 70 ms，控制误差范围收敛速度提升，振动扰动下的控制稳定性明显增强。

4.3 持续扰动条件下的控制稳定性验证

泥沙浓度升高与流态扰动增强条件下，导叶系统面临反馈信息延迟、误判频繁与动作失控风险。导叶位置传感器输出在流场非均匀激励作用下出现延迟累积与瞬态突跳，造成 PLC 控制逻辑与机构响应间形成非同步状态。为提升系统在非稳态环境中的闭环协调能力，应构建基于反馈时间戳的响应滞后补偿模块，记录控制输出与导叶动作间的平均延迟周期，并根据当前振动状态量动态调整预测控制输出。预测量依据扰动频率变化曲线计算延迟增量，并插值修正当前控制指令，减小滞后区间内的偏差输出。

系统稳定性还受到调节信号幅度连续变化的影响，在持续扰动中导叶响应易被瞬态过大指令强制激活，形成高频开闭动作，对液压执行机构造成连续负载冲击。为抑制该行为，应在控制输出端植入增益限制逻辑模块，设定角度变化最大步长与单位时间内动作次数上限。该模块基于滑动时间窗分析控制输出曲线斜率变化趋势，判断动作趋势是否处于非理性爬升状态，在阈值触发时执行输出限制逻辑或指令冻结操作。

下表 1 展示了不同泥沙浓度与水头扰动组合下，控制系统的角度波动幅度、动作次数与指令滞后响应情况。

泥沙浓度与水头波动增大时，导叶角度波动和动作次数同步增加，指令滞后也呈扩大趋势，说明高扰动工况下控制稳定性明显下降，需加强滞后补偿与输出限幅以维持调节

连续性。

表 1 不同工况下导叶控制系统稳定性实测对比表

泥沙浓度 (g/m³)	水头波动幅 度 (m)	导叶角度波 动幅度 (°)	导叶动作次 数 (10 分钟)	指令滞后平 均值 (ms)
180	0.35	1.4	9	120
260	0.42	2.7	16	190
310	0.55	3.3	23	270
340	0.63	4.1	31	340

5 结语

研究明确了低水头工况下 PLC 导叶控制系统的结构组成与响应机制，揭示了水压波动与泥沙激励共同作用下导叶启闭角调节范围收窄、动作滞后加剧与控制指令同步偏移的问题表现。导叶振动幅值与频率变化对控制系统输出形成扰动耦合，需在 PLC 逻辑中设置基于振动阈值的同步触发参数与动态修正模块，以实现非稳态流场中的快速响应控制。数据验证表明，反馈滞后补偿与增益限制策略可有效抑制高扰动背景下的动作频繁性与指令延迟，提升控制路径的稳定性与指令匹配精度。研究结果可为低水头水工系统中导叶控制策略设计、复杂扰动下系统结构修正与闭环调节参数优化提供工程化支撑。未来可结合导叶结构振型特征与水流扰动模态构建振动预测模型，提升控制系统的前馈调节能力与抗扰性能。

参考文献

[1] 陈弘毅,邓达明,马丙周,等. 基于极度梯度提升的发动机导叶伺服系统延时估计与补偿控制[J/OL].推进技术,1-11[2025-11-27].

[2] 郑业爽,彭琛越,胡允格,等. 基于PLC的水电机组圆筒阀同步控制系统设计[J].水电站机电技术,2024,47(06):9-12.

[3] 周灵桂. PLC在小型水电站自动化控制中的应用设计分析[J].小水电,2023,(05):59-62+70.

[4] 郭俊勋,周大庆,陈会向,等. 导叶波动对抽蓄机组低水头空载稳定影响分析[J].中国电机工程学报,2022,42(15):5587-5595.

[5] 姜开林. 变频器与入口导叶联合调节控制二氧化硫风机的生产实践[J].硫酸工业,2021,(05):42-45.