

水轮机调速器 PID 参数自整定策略与调节精度提升路径分析

张春磊 陈 涵

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

【摘要】：水轮机调速器 PID 参数自整定合理性与调节精度稳定性直接关乎水电系统运行效能，优化自整定策略、探索精度提升路径是保障系统安全高效运行的关键。本文明确 PID 参数自整定的核心问题与约束条件，构建工况自适应等优化策略，解析参数匹配度、外部负荷波动等精度影响因素，提出参数优化、执行机构升级等提升路径，形成控制体系协同优化方案，为调速器控制性能优化提供核心思路，助力提升水电系统运行稳定性与效能。

【关键词】：水轮机调速器；PID 参数自整定；调节精度；提升路径；控制优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.082

引言

水轮机调速器作为水电系统的核心控制设备，其 PID 参数设置直接关联机组运行的稳定性与能源转换效率，参数自整定策略的科学性与调节精度的高度直接决定水电系统的运行质量。在水电能源规模化应用与电网负荷波动加剧的背景下，传统 PID 参数整定方式存在响应滞后、适配性不足等问题，难以满足复杂工况下的精准控制需求，亟需优化自整定策略并探索高效的精度提升路径。明确 PID 参数自整定与调节精度提升的内在关联，挖掘影响控制效果的关键因素，可为调速器控制性能升级提供重要支撑，搭建起从策略优化到精度提升的完整技术逻辑框架。

1 水轮机调速器 PID 参数自整定的核心问题与约束条件

1.1 PID 参数自整定的核心问题识别与表征

PID 参数自整定的核心问题集中于整定过程与水轮机实际运行工况的适配性偏差，以及整定结果的动态稳定性不足。在整定过程中，参数初始值的选取易出现偏差，导致整定迭代过程过长，无法快速响应工况变化，进而影响调速器的即时控制效果。整定算法对工况变化的感知灵敏度不足，难以精准捕捉负荷突变、水头波动等动态场景下的参数调整需求，使得整定后的参数在复杂工况下易出现超调或震荡现象。整定过程中对调速器内部元件特性的考量不充分，可能导致整定参数与硬件性能不匹配，进一步加剧控制偏差，这些问题共同构成了自整定过程中需优先解决的核心矛盾。

1.2 水轮机运行工况对自整定的约束机制

水轮机运行工况的多样性与波动性对 PID 参数自整定形成了显著约束。不同运行负荷下，水轮机的机械特性与水力特性存在较大差异，低负荷工况下机组

转动惯量相对突出，高负荷工况下水力冲击更为明显，这就要求自整定策略能够适配不同负荷区间的特性差异，而传统整定方式往往难以实现全负荷区间的精准适配^[1]。水头变化会直接改变水轮机的出力特性，进而影响调速器的控制参数需求，水头的不稳定波动会干扰自整定算法的参数迭代过程，导致整定结果出现偏差。机组并列运行时的电网频率约束也对自整定形成限制，整定过程需兼顾电网频率稳定性要求，避免参数调整对电网频率造成冲击。

1.3 调速器硬件特性对自整定的影响分析

调速器硬件特性是影响 PID 参数自整定效果的重要基础因素，其性能参数直接决定了自整定策略的实施上限。执行机构的响应速度是关键影响因素之一，伺服电机、液压执行器等部件的响应滞后会导致自整定过程中参数调整信号无法及时传递，影响整定精度与效率。传感器的测量精度也会对自整定产生干扰，转速、负荷等关键参数的测量误差会导致自整定算法获取的基础数据失真，进而使整定参数偏离最优值。控制器的运算性能限制了自整定算法的复杂程度，运算速度不足会导致复杂整定逻辑无法高效执行，难以实现参数的精准迭代优化。

2 水轮机调速器 PID 参数自整定的优化策略构建

2.1 基于工况自适应的 PID 参数自整定策略

基于工况自适应的 PID 参数自整定策略以实时工况参数的精准感知为基础，通过构建工况识别模型实现不同运行场景的精准划分。利用转速偏差、负荷变化率、水头波动等关键工况指标，建立多维度工况特征体系，实现对稳定工况、负荷突变工况、水头波动工况等不同场景的快速识别。针对不同工况场景预设参数调整区间与迭代步长，在工况发生变化时，自整定算法可基于识别结果快速调整参数优化方向，避免

传统整定策略在工况切换时的响应滞后问题。引入工况相似度匹配机制，通过比对当前工况与历史最优工况的相似度，快速调用相近工况下的最优参数作为初始值，提升整定效率与精度。

2.2 融合动态特性的 PID 参数自整定逻辑优化

融合动态特性的 PID 参数自整定逻辑优化重点关注水轮机调速系统的动态响应规律，通过深入分析系统的阶跃响应、频率响应等动态特性，构建更为精准的控制对象模型。在整定逻辑中引入动态权重调整机制，根据系统动态响应指标如超调量、调节时间、稳态误差等的实时变化，动态调整比例、积分、微分环节的权重系数，使参数整定更贴合系统动态特性需求^[2]。针对系统存在的非线性特性，采用分段整定逻辑，在不同动态响应阶段采用不同的整定规则，避免单一整定逻辑对非线性系统的适配不足问题。通过引入预测控制思想，提前预判工况变化趋势，使参数调整更具前瞻性，提升系统的动态控制效果。

2.3 自整定策略的鲁棒性强化设计

自整定策略的鲁棒性强化设计旨在提升策略在外部干扰与内部参数波动下的稳定性。通过引入干扰观测器，实时监测并补偿负荷波动、电网干扰等外部不确定因素对整定过程的影响，减少干扰导致的参数整定偏差。在整定算法中融入参数鲁棒性约束条件，确保整定后的参数在一定范围内的硬件参数波动或工况偏差下，仍能维持系统的稳定运行。采用多算法融合的整定逻辑，结合遗传算法、粒子群算法等智能优化算法的优势，提升算法对复杂场景的适应能力，避免单一算法在极端工况下的整定失效问题。通过增加整定结果的验证环节，对整定后的参数进行动态仿真验证，确保参数的可靠性与鲁棒性。

3 水轮机调速器调节精度的核心影响因素解析

3.1 PID 参数匹配度对调节精度的直接影响

PID 参数匹配度是决定水轮机调速器调节精度的核心因素，比例、积分、微分三个环节的参数设置直接影响调速系统的控制效果。比例参数过大易导致系统响应过快但超调量增大，参数过小则会使调节速度缓慢，无法及时跟踪工况变化，两者均会降低调节精度。积分参数的设置与系统稳态误差密切相关，积分参数过小难以有效消除稳态误差，参数过大则可能导致系统震荡，影响调节稳定性。微分参数能够改善系统的动态响应速度，增强系统的抗干扰能力，但参数过大易放大高频噪声，导致调节精度下降，过小则无法充分发挥微分作用，难以抑制系统超调。

3.2 外部负荷波动对调节精度的干扰机制

外部负荷波动通过改变水轮机的出力需求，对调速器调节精度产生直接干扰。电网负荷的随机波动会导致水轮机的负荷指令频繁变化，调速器需不断调整导叶开度或桨叶角度以适应负荷变化，若调整速度滞后于负荷波动速度，就会出现转速偏差，降低调节精度^[3]。大规模工业负荷的启停会造成负荷的突变，这种突变会对调速系统产生强烈冲击，导致系统出现瞬时超调或转速跌落，即使后续进行参数调整，也可能因动态响应不足而无法快速恢复至额定转速，进一步影响调节精度。区域电网内多台机组的协同运行也会导致负荷分布变化，间接干扰单台水轮机的调节过程。

3.3 调速器执行机构特性对精度的制约作用

调速器执行机构的机械特性与动作性能对调节精度形成直接制约。执行机构的死区特性是影响精度的重要因素，当控制信号的变化量小于死区阈值时，执行机构无法产生动作，导致调速器对微小工况变化的响应不敏感，出现调节滞后。执行机构的动作速度与输出力矩不足会导致导叶或桨叶的调整无法快速匹配负荷变化需求，尤其是在负荷突变工况下，易出现调整不及时的问题，影响调节精度。执行机构的磨损、卡涩等故障会导致其动作稳定性下降，出现动作抖动或定位偏差，使调速器的实际调节效果偏离控制指令，进一步降低调节精度。

4 水轮机调速器调节精度的高效提升路径实施

4.1 基于参数优化的调节精度提升路径

基于参数优化的调节精度提升路径以 PID 参数的精准匹配为核心，通过精细化的参数调校实现调节精度的提升。采用分段参数优化方式，针对不同运行负荷区间、不同水头条件分别确定最优 PID 参数组合，构建参数优化数据库，确保在各类工况下均能实现精准调节。引入参数自适应修正机制，实时监测系统的调节误差与动态响应指标，根据监测结果对 PID 参数进行小幅修正，避免参数漂移导致的精度下降。结合系统辨识技术，定期对调速系统的动态特性进行重新辨识，更新控制对象模型，基于更新后的模型重新优化 PID 参数，使参数设置始终贴合系统实际特性。

4.2 结合执行机构优化的精度提升方案

结合执行机构优化的精度提升方案从硬件性能改善入手，通过提升执行机构的动作性能增强调节精度。对执行机构进行升级改造，采用响应速度更快、定位精度更高的伺服电机或液压执行器，减少动作滞后与定位偏差^[4]。针对执行机构的死区特性，采用死区补

偿技术,通过检测控制信号与执行机构实际动作的偏差,建立死区补偿模型,对控制信号进行修正,消除死区对调节精度的影响。加强执行机构的日常维护与检修,定期检查部件磨损、润滑状况,及时更换老化部件,确保执行机构的动作稳定性,从硬件层面为调节精度提升提供保障。

4.3 抗干扰能力强化下的精度保障路径

抗干扰能力强化下的精度保障路径通过构建多层次抗干扰体系,减少外部干扰对调节精度的影响。在信号采集环节,采用屏蔽电缆、信号滤波等技术,减少电磁干扰对转速、负荷等关键参数测量信号的影响,确保采集数据的准确性。在控制算法层面,引入自适应滤波算法,对采集到的信号进行实时滤波处理,剔除干扰噪声,提升信号质量。建立负荷波动预测机制,通过分析历史负荷数据与电网运行趋势,提前预判负荷波动情况,在干扰发生前调整控制策略,增强系统对干扰的抵御能力。优化调速器与电网的协同控制逻辑,减少电网波动对调速系统的干扰。

5 水轮机调速器PID控制体系的协同优化与效能巩固

5.1 自整定策略与精度提升路径的协同适配

自整定策略与精度提升路径的协同适配强调两者的有机融合,形成相互支撑的控制体系。将精度提升目标融入自整定策略的优化目标中,使自整定过程不仅追求参数的快速收敛,更注重整定后参数对调节精度的提升效果。建立自整定策略与精度提升路径的联动机制,当通过精度监测发现调节精度下降时,自动触发自整定策略的优化迭代,根据精度偏差方向调整参数整定逻辑。针对不同的精度提升路径,优化自整定策略的适配逻辑,如在执行机构优化后,及时调整自整定算法中的参数约束条件,确保自整定参数与优化后的硬件性能相匹配,实现两者的协同增效。

参考文献:

- [1] 李仕日,杨志荣.孤立电网调速器运行调节参数的选择[J].小水电,2025,(06):21-25.
- [2] 罗计.基于大数据自学习算法在水轮机调速器控制中的应用[J].电力设备管理,2025,(19):178-180.
- [3] 杜清扬.面向水轮机调速系统的数字孪生建模与控制优化研究[D].哈尔滨工程大学,2025.
- [4] 于亚雄,王瑞清,杨铭轩,等.超低频振荡的水轮机调速器参数多目标优化[J].水电与新能源,2025,39(06):9-11+62.
- [5] 杨铭轩,刘钰琦,于亚雄,等.考虑风电不确定性扰动的水轮机调速器参数优化研究[J].水电站机电技术,2025,48(06):26-32.

5.2 控制体系的动态适配与迭代优化

控制体系的动态适配与迭代优化旨在使PID控制体系能够持续适配水轮机运行工况与系统特性的变化。构建控制体系动态监测指标体系,实时跟踪系统的调节精度、动态响应速度、稳定性等关键指标,根据指标变化判断控制体系的适配性^[5]。建立迭代优化机制,定期收集运行数据,对控制对象模型进行更新优化,基于更新后的模型调整自整定策略与精度提升路径。针对水电系统的长期运行变化,如机组老化、工况范围拓展等,提前制定控制体系适配调整方案,通过逐步迭代优化,确保控制体系始终处于最优运行状态,维持稳定的调节效能。

5.3 复杂工况下控制效能的巩固措施

复杂工况下控制效能的巩固措施聚焦于极端工况、多干扰叠加等复杂场景,确保调节精度与系统稳定性。建立复杂工况识别与分级响应机制,通过实时监测工况参数变化,快速识别复杂工况类型,根据工况等级启动对应的强化控制策略。针对极端负荷突变、大幅水头波动等复杂工况,预设应急控制参数与调整预案,在工况突变时快速切换至应急控制模式,避免系统出现大幅波动。加强控制体系的冗余设计,增加备用控制通道与应急调节机制,当主控制链路出现异常时,备用机制能够快速介入,保障调节功能的连续性。通过仿真模拟与现场试验相结合的方式,验证复杂工况下控制措施的有效性,不断优化巩固方案。

6 结语

本文围绕水轮机调速器PID参数自整定策略与调节精度提升路径展开分析,明确了自整定核心问题与约束条件,构建优化策略并解析精度影响因素,提出提升路径及控制体系协同优化方案。相关研究思路为解决调速器控制适配性与精度问题提供技术支撑,对提升水电系统运行效能具有实践价值,可为后续工程应用与技术优化提供参考。