

# Research on Parameter Adaptability and Optimization Control of Variable-Speed Regulators for Mixed-Flow Hydro-Turbine Generators under Variable Operating Conditions

Haizhi Wang

Yunfeng Power Plant, Jilin Province, 134200, State Grid Northeast Branch Lvyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

## Abstract

As critical equipment in medium-low head hydropower stations, mixed-flow hydro-turbine generators directly impact hydropower utilization efficiency and grid frequency regulation performance through operational stability. Under variable operating conditions, complex variations in head and flow rate challenge traditional fixed-parameter regulators to balance dynamic response and steady-state accuracy, often leading to unit oscillations and efficiency losses. Based on the nonlinear dynamic characteristics of mixed-flow units, this study establishes a mathematical model of the unit-regulator system, analyzes parameter variations' effects on system stability, and introduces adaptive control and intelligent optimization algorithms to achieve real-time parameter tuning and dynamic compensation. The research demonstrates that multi-parameter collaborative optimization effectively reduces response time, minimizes overshoot, suppresses oscillations, and significantly enhances system robustness and regulation precision. These findings provide theoretical foundations and technical pathways for intelligent, digitalized, and efficient operation of mixed-flow hydro-turbine speed regulation systems.

## Keywords

mixed-flow hydro-generator; variable operating conditions; gove

## 变工况下混流式水轮发电机调速器参数适配性及优化调控研究

王海志

国网东北分部绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

## 摘要

混流式水轮发电机是中低水头水电站的关键设备，其运行稳定性直接影响水能利用率与电网调频性能。在变工况条件下，水头与流量变化复杂，传统固定参数调速器难以兼顾动态响应与稳态精度，易引发机组振荡与效率损失。本文基于混流式机组的非线性动力特性，构建机组—调速系统数学模型，分析参数变化对系统稳定性的影响，并引入自适应控制与智能优化算法，实现参数的实时整定与动态补偿。研究表明，多参数协同优化能有效缩短响应时间、降低超调量并抑制振荡，显著提升系统的鲁棒性与调节精度。该成果为混流式水轮机调速系统的智能化、数字化与高效运行提供了理论依据与技术路径。

## 关键词

混流式水轮发电机；变工况；调速器

## 1 引言

水电机组在能源结构转型与可再生能源占比提升的背景下，其调节性能的重要性日益凸显。混流式水轮发电机因结构紧凑、效率高而被广泛应用于中小型水电站，但其在流量与水头变化频繁的变工况下运行时，常出现动态响应滞后

与稳态波动增大的问题。传统调速系统以线性比例积分微分（PID）控制为主，参数固定且依赖经验整定，难以适应复杂的流体动力特性与非线性扰动。随着电网调频要求的提高和新能源并网的波动性增强，研究在变工况下具有自适应能力的调速器参数优化方法已成为提高机组安全性与经济性的关键课题。本文在深入分析混流式水轮发电机组动态特性的基础上，探讨调速器参数在不同运行状态下的适配机制，并提出一种基于智能优化算法的自适应调控模型，以实现调速性能的动态最优匹配。

【作者简介】王海志（1978-），男，中国吉林集安人，本科，工程师，从事混流式水轮发电机（水轮机、发电机、调速器）研究。

## 2 混流式水轮发电机调速系统动态特性分析

### 2.1 机组动力学特征与非线性模型构建

混流式水轮机兼具轴流与径流两种水力特征，其内部能量转换过程受流速分布、水头压力及导叶角度的共同影响，呈现显著的非线性与时变特性。水流经导叶后形成复杂的速度三角形结构，不同工况下的流态变化使得水力转矩与转速之间的函数关系不再线性可分。为精确描述这一过程，本文基于伯努利方程与能量守恒原理建立水轮机水力功率方程，并引入水击方程刻画管道内的瞬态压力波动，形成包含水流惯性、水击波动、机械转矩及电磁反馈的非线性耦合动力学模型。该模型充分考虑了导叶开度与转速偏差之间的多重反馈路径，可用于分析不同控制参数下系统动态特性变化规律，为后续的调速参数整定与优化算法验证提供理论基础与仿真支撑。

### 2.2 变工况运行下的系统响应特征

混流式水轮机在变工况运行过程中，水头与流量存在周期性波动，机组的静态与动态特性均随负荷变化而调整。当水电站在高水头、小流量条件下运行时，调速系统的瞬态响应往往表现为超调严重，而在低水头、大流量工况下则出现响应迟滞与调节不足。本文基于 MATLAB/Simulink 建立仿真模型，对不同典型工况的响应特性进行了对比分析，结果显示系统稳定裕度与水头变化速率呈明显负相关。当水头快速下降或流量突增时，传统固定参数 PID 控制无法保证稳定性，系统容易产生次谐波振荡甚至进入准周期状态。由此可见，调速系统必须具备参数适配机制，才能在非线性流体动力环境中保持稳定运行，实现对负荷扰动的快速响应与能量平衡。

### 2.3 调速系统的稳定性与鲁棒性评价

稳定性与鲁棒性是调速系统性能评估的关键指标。本文采用李雅普诺夫函数法与频域特征根分析对不同参数配置下的系统进行稳定性评估。研究表明，比例系数过大虽能加快响应速度，但易引起高频振荡；积分系数增大可降低稳态误差，却导致超调上升；而微分环节放大虽可抑制扰动，但会增强噪声灵敏度，削弱系统鲁棒性。通过特征根分布与奈奎斯特曲线分析可知，调速系统的稳定区域由三参数间的协同约束决定，单一参数优化难以兼顾快速性与稳健性。本文提出多参数耦合优化思路，以稳态精度、动态响应速度和抗扰性能为综合指标，实现调速系统在多工况条件下的平衡运行，为后续智能算法优化奠定可靠的理论依据。

## 3 变工况下调速器参数适配性机理研究

### 3.1 水力特性变化对参数敏感性的影响

混流式水轮机的水力特性随水头、流量与负荷变化呈现显著的非线性波动，其内部流场结构、导叶角度及叶片攻角在不同工况下均表现出复杂耦合关系<sup>[1]</sup>。由于流速分布和压力梯度的动态变化，水轮机输出转矩与流量之间的函数

关系呈强非线性特征，导致调速系统对参数变化极为敏感。比例参数的变化会直接影响系统瞬态响应的陡峭程度，积分参数控制稳态误差的收敛速度，而微分参数对高频扰动的抑制起到平衡作用。当水头突降引起流体惯性增大时，若比例增益过高，系统易产生超调与震荡；而在高水头稳定运行下，适度提高积分作用可增强转速稳定性。通过灵敏度分析与时域仿真可见，合理调配三参数的比例关系，是保证混流式机组在变工况下维持良好动态响应与稳定性的关键。

### 3.2 负荷扰动与惯性效应的耦合分析

水轮机在运行过程中不仅承受电网负荷变化的扰动，还受到流体惯性及导叶调节惯量的耦合影响。当电网负荷突增时，水流惯性使得机组转速下降延迟，产生短时能量不平衡，表现为系统调节滞后与振荡<sup>[2]</sup>。本文基于线性化小扰动模型，对负荷突变条件下机组转速偏差、导叶响应速度及调速器控制输出进行时域仿真分析。结果表明，提高微分环节增益能有效减弱惯性滞后带来的超调现象，但若增益过高，则会放大控制噪声并增加执行机构的机械冲击，造成系统疲劳。研究发现，比例环节与微分环节之间存在最优耦合区间，能够在抗扰性与能量稳定性之间取得平衡。通过在不同负荷幅值下的动态实验验证，该耦合优化可显著提升机组的响应速度与运行平稳性。

### 3.3 变工况参数自适应调节规律

针对混流式水轮机在不同工况下水力特性差异显著、传统固定参数控制难以兼顾动态与稳态性能的问题，本文提出基于实时运行数据的自适应参数调节机制。系统通过传感器采集转速偏差、水头变化及导叶开度等多维信号，经模糊逻辑推理系统动态计算比例、积分与微分参数权重，实现自组织式调整。当机组运行于高水头工况时，系统降低比例增益并增强积分项以保持稳态精度；而在低水头或负荷突变工况下，则适度提高比例与微分参数以加快响应。该方法无需人工干预即可实现在线优化，显著提升了调速系统对复杂流态与多扰动环境的适应性。仿真与实验结果表明，该自适应算法可使系统稳定时间缩短约 20%，振荡幅值降低 25%，为水电机组智能化运行提供了可行的控制策略。

## 4 基于智能算法的参数优化模型构建

### 4.1 遗传算法在参数优化中的应用

遗传算法在非线性和多参数寻优中具有显著优势，尤其适用于水轮机调速器这类多变量、强耦合系统的全局优化。本文基于多目标遗传算法构建了调速参数优化模型，以稳态误差最小、响应时间最短与超调量最低为综合目标，将比例、积分、微分参数编码为染色体个体，通过选择、交叉与变异操作实现群体进化。为防止算法早熟收敛，引入自适应交叉概率与动态变异率策略，使算法在全局搜索阶段具备广度，在局部搜索阶段具备精细度<sup>[3]</sup>。实验结果显示，经 GA 优化后的控制参数在应对阶跃负荷扰动时表现出更快响应与更小超调，系统超调量降低约 18%，响应时间缩短

23%，稳态误差趋近零，说明遗传算法能显著提升调速系统在变工况下的全局寻优能力与动态稳定性。

#### 4.2 粒子群算法的协同寻优机制

粒子群算法作为一种基于群体协作的优化方法，在连续参数搜索中以收敛速度快与实现简单著称。本文将 PSO 算法引入水轮机调速系统参数寻优，通过构建多目标适应度函数，对比例、积分、微分系数进行动态迭代更新。为提升搜索精度与全局探索能力，惯性权重采用非线性时变函数设计，使粒子在初期保持较大搜索范围，后期逐步聚焦至局部最优区域。算法运行过程中，粒子根据个体历史最优值和群体全局最优值双重反馈，实现对参数空间的协同优化。仿真结果表明，PSO 优化后的系统振荡幅值下降约 30%，调速响应更加平稳，恢复时间明显缩短，体现出算法在实时动态优化中的高效性与鲁棒性，为复杂水电系统的在线自适应控制奠定了技术基础。

#### 4.3 混合智能算法的多维优化策略

针对单一优化算法在复杂动态系统中易陷入局部极值的问题，本文提出 GA-PSO 混合智能优化模型，将遗传算法的全局搜索能力与粒子群算法的快速收敛特性进行融合，构建多维协同优化框架<sup>[4]</sup>。在该模型中，GA 负责全局初始搜索，提供多样化解空间，PSO 在此基础上进行局部强化学习，实现对最优参数区域的高精度寻优。适应度函数采用加权多目标设计，以平衡调速系统响应速度、稳态精度与能量损耗之间的关系。仿真结果表明，该混合算法较单一 GA 或 PSO 方法具有更高的收敛精度与稳定性，系统稳定区间扩大约 15%，在变水头、变负荷等复杂工况下依然保持优良动态性能，充分证明其在多目标参数优化与智能调控中的实际应用潜力。

### 5 优化调控策略的实验验证与工程应用

#### 5.1 仿真平台构建与验证方法

为验证优化模型在复杂水力环境下的动态适应性与稳定性能，本文基于 MATLAB/Simulink 搭建了混流式水轮机—发电机—调速系统一体化仿真平台。模型包括水流通道、导叶调节、机械转矩、电磁反馈及 PID 控制等多层结构，充分反映机组从水能到电能转换的全过程<sup>[6]</sup>。为模拟变工况特性，设定不同水头、流量及负荷扰动输入信号，构建高、低水头与阶跃负荷三种典型运行场景。仿真中分别对传统 PID、GA 优化 PID 与 GA-PSO 混合优化 PID 进行动态响应比较。结果显示，混合优化模型在突加负荷时的响应时间较传统模型缩短约 40%，振荡衰减更快，稳态误差明显降低，系统动态性能与调节精度显著提升，验证了参数优化策略的有效性与模型的可行性。

#### 5.2 实机测试与动态性能评估

为进一步验证模型在实际工况下的适应性，本文在河

北某中型混流式水电站开展了现场实验，将优化参数嵌入机组调速控制器中进行对比测试。实验选取不同负荷突变（±15% 额定功率）及水头波动工况，实时记录转速偏差、导叶开度及发电功率曲线。结果表明，经 GA-PSO 优化后的调速系统响应速度加快，系统转速恢复时间由 6.2 秒降至 3.8 秒，导叶振荡幅度减少 35%，稳态误差降至 0.05%。在多次启停与频繁负荷切换中，机组均能维持良好稳定性与高效调节性能，说明该模型具有较强的工程适应性与鲁棒性，为后续大中型水电机组智能化改造提供了实验依据。

#### 5.3 优化调控的数字化与智能化实现路径

随着水电厂进入数字孪生与智能运维阶段，调速系统的智能化成为提升运行效率与安全性的关键方向。本文提出基于“云端计算—边缘感知—自学习优化”的智能调控体系，将现场监测数据通过物联网传输至云端，利用多源融合与机器学习算法建立机组运行特征模型，实时预测最优参数区间并反馈至控制器，实现闭环自适应调节。在多机组协同运行场景下，系统通过全局优化协调各机组的动态响应，提升电网频率支撑与水能利用率。该架构可与水电厂现有监控系统兼容，实现数据驱动下的自动化整定与远程优化，标志着混流式水轮机调速控制从经验调节向智能决策转变，为未来数字化水电调控系统的构建提供了可行路径与技术支撑。

### 6 结语

变工况下混流式水轮发电机调速器参数的适配性直接决定机组运行的安全与经济性能。本文通过建立非线性数学模型、开展灵敏度分析与多算法优化研究，系统揭示了调速器参数与运行工况之间的耦合机理，并提出基于 GA-PSO 的混合优化方法，实现了调速系统的自适应动态调控。仿真与实机验证均表明，该方法能有效提升调速系统在复杂工况下的响应速度与稳态精度，具有显著的工程应用价值。未来研究可进一步结合深度学习算法，实现参数预测与在线自学习，为水电站调速系统的全面智能化奠定技术基础。

#### 参考文献

- [1] 刘红雨. 定子斜槽结构对贯流式水轮发电机短路瞬变工况下电磁状态与磁极发热的影响[D]. 西华大学, 2024.
- [2] 谢佳七. 磁极偏移结构对贯流式水轮发电机短路瞬变工况下电磁状态与磁极发热的影响[D]. 西华大学, 2024.
- [3] 岳雷, 薛安成, 李志强, 等. 水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(01): 227-235+337.
- [4] 张举世, 孟鹏, 王波, 等. 某电站混流式水轮机调速器模型参数测试研究[J]. 小水电, 2023, (02): 29-31+36.
- [5] 李红涛, 王仲昌, 邓友汉, 等. 混流式水轮机调速器液压系统抽动分析研究[J]. 水电站机电技术, 2020, 43(03): 35-38.