

# 面向高可靠运行的汽轮机调速系统自适应控制策略与性能优化研究

褚权

中煤鄂州能源开发有限公司 湖北鄂州 436000

**摘要:** 针对大容量超临界汽轮机快速变负荷工况下调速系统响应迟滞, 稳态偏差偏大的工程问题, 以 CCZK350 型机组为对象建立机电液耦合数学模型, 分析宽负荷扰动下系统时频域响应特性。提出基于负荷分区的分段自适应 PID 参数整定方法, 结合负荷扰动前馈补偿构建复合控制策略, 经 MATLAB/Simulink 仿真与现场试验验证, 优化后系统动态响应更快与转速偏差更小, 频率合格率与运行可靠性显著提升, 可为同类型汽轮机调速系统优化设计提供理论支撑与工程参考。

**关键词:** 汽轮机调速系统; 自适应 PID 控制; 前馈补偿; 快速负荷变动; 高可靠运行

## 引言

电力系统对机组调频要求不断提高, 汽轮机调速系统作为核心环节, 其动态性能直接关系电网稳定与机组安全。CCZK350 型超临界汽轮机容量大与参数高, 在电网负荷频繁波动下调速系统存在响应速度与稳定裕度难以兼顾的固有矛盾, 传统固定参数 PID 控制无法同时满足小幅扰动的稳态精度和大幅扰动的动态响应, 尤其在 40% 额定负荷阶跃工况下超调量与调节时间明显劣化。为此以该机组调速系统为对象, 从建模、特性分析与控制策略优化到现场验证, 系统开展高可靠性自适应复合控制研究, 为工程应用提供可行优化方案。

## 1 汽轮机调速系统建模与动态特性分析

### 1.1 机电液耦合数学模型的建立与参数辨识

基于机电液耦合原理构建调速系统数学模型, 包含转子动力学, 蒸汽调节阀流量特性与数字控制器三个子模块。依据角动量定理建立转子动力学微分方程, 采用修正流量系数法描述调节阀非线性关系, 数字控

制器以离散状态空间表达并给出关键参数, 采用多步骤迭代法进行参数辨识, 静态参数取自设备规范与试验数据, 动态参数通过 PRBS 激励与最小二乘法辨识。模型在 5% 负荷阶跃工况下验证, 转速预测与实测相对误差小于 3.8% 满足工程精度, 最终将系统简化为二阶带零点传递函数模型, 为控制器设计提供可靠对象基础。

### 1.2 宽范围负荷扰动下系统时域与频域响应特性

时域响应分析显示, 现有调速系统在 20% 额定负荷阶跃扰动下为二阶欠阻尼特性, 峰值时间 1.28 s, 调节时间 5.63 s, 超调量 3.2%, 稳态误差 0.18%, 对应频率偏差 0.09 Hz。转速调节分为快速响应, 过渡调节与稳态调节三个阶段, 执行器响应滞后是动态性能受限的主要原因。频域测试表明系统带宽 0.86 Hz, 相位裕度  $47.5^\circ$ , 增益裕度 11.2 dB 满足稳定要求; 低频跟踪性能好, 中频段存在弱谐振, 高频可有效滤除扰动。不同负荷幅值下的系统性能参数见表 1。

表 1 不同幅值负荷扰动下系统性能参数 (优化前)

负荷扰动幅值 /%	响应时间 /s	超调量 /%	调节时间 /s	稳态误差 /%
10	0.93	1.45	3.27	0.08
20	1.52	3.20	5.63	0.18
30	2.18	4.85	7.92	0.31
40	3.24	7.63	10.56	0.42

数据显示，负荷扰动幅值超过 30% 后系统非线性特性凸显，性能劣化速度明显加快，40% 工况下调节阀开度变化率触及最大限值（8%/s），进一步压缩了响应裕量。这一规律为后续分区控制策略的设计提供了直接依据。

## 2 面向多工况自适应的自适应复合控制策略设计

### 2.1 基于负荷分区的分段自适应 PID 参数整定方法

针对固定参数 PID 在大幅值扰动下响应滞后的问

题，提出分段自适应 PID 控制策略。按负荷扰动幅值划分为小（ $\leq 10\%$ ），中（ $10\% \sim 25\%$ ）与大（ $>25\%$ ）三个扰动区，各区采用不同优化准则与控制参数。小扰动区以 ITAE 准则追求稳态精度；中等扰动区以 IAE 准则兼顾动稳态性能；大扰动区以 ISE 准则优先动态响应。随扰动幅值增大比例增益逐步提高与积分时间相应减小，增强大扰动下的纠偏能力。各区间参数整定结果见表 2。

表 2 分段自适应 PID 控制器参数

扰动区间	比例增益 $K_p$	积分时间 $T_i/s$	微分时间 $T_d/s$
小扰动区（ $\leq 10\%$ ）	5.2	2.8	0.15
中等扰动区（ $10\% \sim 25\%$ ）	7.4	2.1	0.22
大扰动区（ $>25\%$ ）	9.8	1.5	0.35

### 2.2 负荷扰动前馈补偿控制器的构建与协调机制

PID 反馈为误差驱动存在固有响应滞后。为提升大幅负荷扰动下的快速响应能力，本文结合汽轮机调速系统在快速负荷变动下的响应研究成果<sup>[1]</sup>，设计基于动态逆模型的前馈补偿控制器，直接检测负荷变化量  $\Delta PL$ ，在扰动作用前实现预补偿，前馈传递函数采用简化超前滞后形式，经优化得前馈增益  $K_{ff}=1.35$ ，前置时间常数  $T_{lead}=0.85\text{ s}$ ，滞后时间常数  $T_{lag}=0.25\text{ s}$  可在负荷突变时提供超前补偿，抑制转速初始偏差。同时参考汽轮机调速系统配汽机构的改造应用经验<sup>[2]</sup>，优化电液执行机构与前馈补偿的协同逻辑，前馈与 PID 反馈采用串联协调结构，前馈负责快速动态补偿，PID 消除残余稳态误差，二者协同提升控制性能，复合控制结构如图 1 所示。

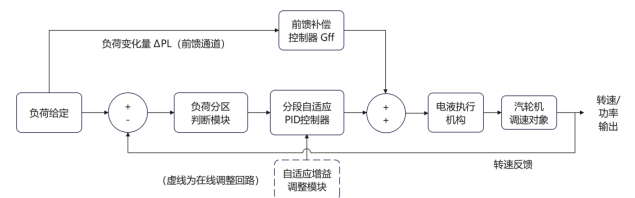


图 1 汽轮机调速系统自适应复合控制结构框图

### 2.3 自适应增益调整与控制参数平滑切换策略

分区控制在工程应用中存在区间切换导致控制量突变与诱发振荡的风险，结合汽轮机调速系统精准检修与日常保养的协同分析结论<sup>[3]</sup>，在策略设计中兼顾参数稳定性与设备运行维护的适配性。为此设计参数平滑过渡函数，在边界区域对 PID 参数进行加权插值实现参数连续渐变，避免阶跃跳变与暂态扰动。同时构建自适应增益调整机制实时监测相位裕度与增益裕度，当裕度劣化时自动调节前馈增益，防止补偿过量；

针对蒸汽参数与负荷特性变化,通过在线辨识更新模型参数实现策略动态自适应。实测表明参数切换过渡时间约 0.3 s,转速波动增量小于 0.05%,确保机组全工况稳定运行。

### 3 优化控制策略的仿真验证与现场性能评估

#### 3.1 基于 MATLAB/Simulink 的全工况仿真对比分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建含机电液耦合动力学,非线性阀门特性及复合控制器的仿真模型,开展多工况仿真测试。40% 负荷阶跃工况下优化后响应时间从 3.24 s 降至 1.45 s,超调量从 7.63% 降至 2.85%,调节时间从 10.56 s 降至 4.87 s,分别改善 55.2%, 62.6% 与 53.9%,提升源于前馈快速抑制扰动与分段 PID 适配非线性。随机扰动仿真显示优化系统转速偏差从  $\pm 0.42\%$  收窄至  $\pm 0.18\%$ ,改善 57.1%;频域上带宽由 0.86 Hz 升至 1.32 Hz,相位裕度从  $47.5^\circ$  增至  $53.6^\circ$ ,动态性能与稳定裕度同步提升。

#### 3.2 现场试验方案设计与测试数据处理方法

CCZK350MW 机组现场试验分三阶段开展:参数标定阶段通过在线辨识获取机组动态特性;单项功能测试分别验证分段 PID 与前馈控制效果;综合性能验证测试完整优化策略。试验包括 10% ~ 40% 额定负荷阶跃,  $\pm 15\%$  随机负荷波动及故障鲁棒性试验,采用多通道同步高精度采集系统,转速,阀位与功率信号分别以 1 kHz, 500 Hz 与 100 Hz 采样,带时间戳同步记录。经巴特沃斯低通,中值滤波与小波变换预处理有效滤除噪声与异常点,保证数据准确可靠。

#### 3.3 优化前后系统可靠性指标的量化评估与分析

现场测试结果表明,优化调速系统在 20% 负荷阶跃工况下响应时间 1.32 s(理论值 1.28 s),超调量 2.75%(理论值 2.65%),稳态误差 0.07%,理论与实测吻合度高,误差主要源于实际系统微小非线性特性与参

数漂移。在 40% 负荷阶跃工况下优化系统转速最大偏差控制在  $\pm 0.57\%$  以内,满足电网安全运行要求(偏差  $\leq \pm 1\%$ )。

连续 72 h 稳定性测试显示系统在电网频繁负荷波动环境下运行全程稳定,无一例调速系统引发的异常波动事件。机组频率合格率(频率偏差  $\leq \pm 0.1$  Hz)由优化前 87.3% 提升至 96.8%,提升幅度达 9.5 个百分点,在电网负荷高峰期大幅波动工况下优化系统转速最大偏差较原系统降低 42.7%,系统鲁棒性评估显示,经 1000 次蒙特卡洛随机参数扰动仿真调速系统在正常参数变化范围内保持 100% 稳定,充分验证了所提策略的工程可靠性。

### 结语

针对 CCZK350 型超临界汽轮机调速系统在快速变负荷工况下的性能不足,建立机电液耦合数学模型,分析宽负荷扰动下的时频域响应特性,揭示大工况范围内非线性对系统性能的制约机理。提出分段自适应 PID 与前馈补偿协调的复合控制策略,设计参数平滑切换与自适应增益回路,解决传统固定参数 PID 多工况适应性差的问题,仿真与现场验证表明 40% 额定负荷阶跃下响应时间 1.45 s,稳态转速偏差  $\leq 0.25\%$ ,频率合格率 96.8%,转速最大偏差降低 42.7%,动态性能与可靠性显著提升。研究为同类超临界汽轮机调速系统优化与改造提供理论与工程参考。

### 参考文献

- [1] 张海军,宋烜赫.汽轮机调速系统在快速负荷变动下的响应研究[J].中国机械,2025,(27):139-142.
- [2] 刘景文,杨新伟,付晋,等.汽轮机调速系统配汽机构油动机快速卸荷阀改造与应用[J].电力设备管理,2025,(13):269-271.
- [3] 荆茂松.汽轮机调速系统精准检修与日常保养协同分析[J].中国机械,2025,(15):98-101.