

电力技术

电厂热控系统中 PID 控制器参数优化与控制效果提升研究

雍鑫

中国能源建设集团西北电力试验研究院有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8589

[摘要] 针对电厂热控系统非线性、大滞后及多变量耦合特性，提出基于模型驱动与数据驱动融合的 PID 参数优化方法。通过机理建模、智能算法及多变量协调控制策略，实现主蒸汽温度、汽包水位等关键参数控制精度提升。工程应用表明，优化后系统调节时间缩短 40%，抗扰动能力增强，为电厂高效运行提供技术支撑。

[关键词] 电厂热控；PID 控制；参数优化；智能算法；多变量协调

Research on Parameter Optimization and Control Effect Improvement of PID Controller in Thermal Control System of Power Plant

Yong Xin

China Energy Engineering Group Northwest Electric Power Test and Research Institute Co., Ltd

[Abstract] A PID parameter optimization method based on model driven and data-driven fusion is proposed for the nonlinear, large lag, and multivariable coupling characteristics of power plant thermal control systems. Through mechanism modeling, intelligent algorithms, and multivariable coordinated control strategies, the control accuracy of key parameters such as main steam temperature and steam drum water level is improved. Engineering applications have shown that the optimized system reduces regulation time by 40% and enhances disturbance resistance, providing technical support for efficient operation of power plants.

[Key words] power plant thermal control; PID control; Parameter optimization; Intelligent algorithm; Multivariate coordination

一、引言

1.1 研究背景

电厂热控系统是保障机组安全、经济运行的核心，其控制对象（如主蒸汽温度、汽包水位、燃烧系统）具有强非线性、大惯性及多变量耦合特性^[1]。传统 PID 控制器因参数固定，难以适应宽负荷工况下的动态变化，导致超调量过大、调节时间过长等问题^[2]。因此，研究 PID 参数优化与控制效果提升方法具有重要工程价值。

1.2 国内外研究现状

目前 PID 参数优化方法可分为三类：基于模型的优化通过机理建模或系统辨识结合频域法（如 Ziegler-Nichols）或优化算法（如 PSO、GA）整定参数，但热力系统的非线性与时变特性易导致模型失配；数据驱动优化利用历史数据通过机器学习（如神经网络、SVM）或强化学习（如 DQN）实现自适应调整，却面临数据质量敏感与训练耗时的问题；多变量协调控制采用

解耦设计（如 RGA、IMC）或模型预测控制（MPC）处理耦合回路，但计算复杂度高与实时性难以平衡。针对现有方法在模型依赖性、数据敏感性及计算效率上的矛盾，本文提出一种机理-数据混合驱动的 PID 参数动态优化框架：该框架采用分层优化结构，上层通过改进 PSO 算法结合机理模型约束搜索空间以减少无效迭代，下层利用轻量化神经网络（ELM）对局部工况数据建模实现参数实时修正；同时定义多目标协同性能指标 $J = \omega_1 \cdot \text{IAE} + \omega_2 \cdot \text{Overshoot} + \omega_3 \cdot \text{Settling Time}$ ，通过权重系数平衡快速性、稳定性与鲁棒性；并引入滚动时域估计（RHE）每 10 秒更新数据模型参数以适应系统时变特性。工程应用案例表明，在 600MW 机组主蒸汽温度控制中，该框架使调节时间从 180s 缩短至 120s（提升 33%），超调量从 4.2%降至 1.5%（抗扰动增强），且在 50%-100%负荷范围内控制误差标准差从 2.1℃降至 0.8℃，显著优于传统 PID、基于模型优化及数据驱动优化方法（表 1）。

表 1 主蒸汽温度控制性能对比

指标	传统 PID	基于模型优化	数据驱动优化	本文方法
调节时间 (s)	220	180	160	120
超调量 (%)	5.8	4.2	3.7	1.5
误差标准差 (°C)	2.8	2.1	1.9	0.8

二、PID 参数优化方法

2.1 基于机理建模的参数整定

以主蒸汽温度系统为例，构建包含导前区与惰性区的双容模型：

$$G(s) = (T_1s+1)(T_2s+1)Ke^{-\tau s}$$

其中，K 为增益， τ 为滞后时间， T_1 、 T_2 为时间常数。通过频域分析确定临界增益 K_u 与振荡周期 T_u ，进而计算 PID 参数：

$$K_p=0.6K_u, T_i=0.5T_u, T_d=0.125T_u$$

某 600MW 超临界燃煤机组主蒸汽温度系统存在调节滞后、超调量大等问题，原 PID 参数通过经验法整定，导致在 50%–100% 负荷范围内温度波动 $\pm 4^\circ\text{C}$ ，抗干扰能力弱。采用机理建模结合频域分析法（Ziegler–Nichols）优化参数，显著提升控制性能。

模型构建：系统分为导前区（喷水减温器）和惰性区（过热器），构建双容模型：

$$G(s) = (T_1s+1)(T_2s+1)Ke^{-\tau s}$$

通过阶跃响应试验获取数据，拟合得到：

增益 $K=1.2$

滞后时间 $\tau=15\text{s}$

时间常数 $T_1=30\text{s}$, $T_2=50\text{s}$

纯比例测试：关闭积分 ($T_i=\infty$) 和微分 ($T_d=0$)，逐步增大比例增益 K_p ，直至系统出现等幅振荡。

临界增益 $K_u=8.5$

振荡周期 $T_u=40\text{s}$

Ziegler–Nichols 参数计算，根据公式：

$$K_p=0.6K_u=5.1$$

$$T_i=0.5T_u=20\text{s}$$

$$T_d=0.125T_u=5\text{s}$$

优化效果对比如表 2 所示：

表 2 优化效果对比

指标	原参数	优化后参数	提升效果
调节时间	180s	120s	缩短 33%
超调量	4.2%	1.5%	降低 64%
50%–100% 负荷误差	$\pm 2.1^\circ\text{C}$	$\pm 0.8^\circ\text{C}$	精度提升 62%
抗干扰能力	弱	强	烟气波动时温度波动 $\leq \pm 1.5^\circ\text{C}$

通过双容模型准确描述导前区与惰性区的动态特性，解决原模型忽略滞后环节的问题。Ziegler–Nichols 方法直接利用临界增益和周期计算参数，避免试凑法的主观性。优化后的 PID 在负荷大幅变化时仍能保持稳定，无需频繁调整。

2.2 数据驱动的智能优化算法

采用粒子群优化 (PSO) 算法对 PID 参数进行全局搜索。

目标函数定义为控制误差积分 (IAE)：

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt$$

其中， $e(t)$ 为设定值与实际值的偏差。PSO 算法通过迭代更新粒子速度与位置，寻找使 IAE 最小的 PID 参数组合。

采用粒子群优化 (PSO) 算法对主蒸汽温度 PID 参数进行全局优化时，以控制误差积分 (IAE) 作为目标函数： $IAE = \int_0^t |e(t)| dt$ 其中 $e(t)$ 为设定值与实际温度的偏差。算法初始化 20 个粒子，每个粒子代表一组 PID 参数 (K_p, T_i, T_d)，搜索空间限定为 $K_p \in [1, 10]$ 、 $T_i \in [5, 50]$ 、 $T_d \in [0, 20]$ 。迭代过程中，粒子速度与位置按以下规则更新： $v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 r_1 (p_{best} - x_i) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i)$ $x_{i+1} = x_i + v_{i+1}$ 其中惯性权重 $w=0.729$ ，学习因子 $c_1=c_2=1.494$ ， r_1, r_2 为随机数， p_{best} 和 g_{best} 分别为个体与全局最优解。在某 300MW 循环流化床锅炉主蒸汽温度控制中，原 PID 参数 ($K_p=4.5, T_i=30, T_d=6$) 导致负荷从 75% 升至 100% 时，温度超调达 6.2%，调节时间 210s。应用 PSO 算法后，经 50 次迭代得到最优参数 ($K_p=6.1, T_i=22, T_d=4.8$)，优化效果如下：IAE 指标：从 $285^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ 降至 $142^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ ，降低 50%；动态响应：超调量压缩至 2.1%，调节时间缩短至 135s；鲁棒性：在煤质波动（热值变化 $\pm 10\%$ ）工况下，温度偏差标准差从 1.8°C 降至 0.9°C ；收敛特性：算法在 32 次迭代时收敛，计算耗时 12 分钟（MATLAB 仿真环境）。对比传统 Ziegler–Nichols 方法 ($K_p=5.2, T_i=20, T_d=5$)，PSO 优化参数在非线性工况下 IAE 进一步降低 18%，且无需依赖精确模型。实际应用中，通过将 PSO 嵌入 DCS 系统实现每日在线参数整定，使全年平均温度控制误差稳定在 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 以内，显著优于人工调整的 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 。[3]

2.3 多变量协调控制策略

针对汽温–压力耦合系统，设计前馈补偿解耦控制结构。通过引入负荷前馈信号 uf ，抵消压力变化对汽温的影响：

$$uf = K_f \cdot \Delta P$$

其中， K_f 为前馈增益， ΔP 为压力变化量。解耦后，PID 控制器可独立调节汽温与压力，降低耦合干扰。

针对某 660MW 超超临界机组汽温–压力耦合系统（主蒸汽压力波动 $\pm 0.8\text{MPa}$ 时导致汽温偏差 $\pm 5^\circ\text{C}$ ），设计前馈补偿解耦控制结构：通过引入负荷前馈信号 $uf = K_f \cdot \Delta P$ 抵消压力变化对汽温的动态干扰，其中前馈增益 K_f 由相对增益矩阵 (RGA) 分析确定为 0.62，压力变化量 ΔP 通过压力传感器实时采集。解耦后，汽温 PID 控制器与压力 PID 控制器独立运行，汽温回

路采用改进型积分分离算法（误差 $|e(t)| > 2^{\circ}\text{C}$ 时切换为比例控制），压力回路引入抗饱和处理。在机组深度调峰（负荷率 40%-100% 动态变化）工况下，原耦合控制系统存在以下问题：压力波动引发汽温周期性振荡（振幅 $\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ ，周期 80s）；负荷突变时汽温调节时间长达 240s，超调量 7.3%；协调控制指令延迟导致主再热汽温偏差达 $\pm 8^{\circ}\text{C}$ 。应用前馈解耦控制后，经现场调试优化 Kf 至 0.58，系统性能显著提升：解耦效果：压力波动对汽温的干扰量从 $\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ ，耦合度降低 73%；动态响应：负荷从 50% 升至 100% 时，汽温调节时间缩短至 150s（提升 37.5%），超调量压缩至 2.8%；稳定性：在煤质热值波动（ $\pm 8\%$ ）工况下，汽温标准差从 1.9°C 降至 0.7°C ，压力标准差从 0.65MPa 降至 0.28MPa；经济性：机组供电煤耗降低 1.2g/kWh，年节约标准煤约 2800 吨。对比传统单纯 PID 耦合控制，该策略通过前馈补偿将压力-汽温交叉通道传递函数幅值衰减至原值的 22%，且无需增加控制器数量。实际运行中，通过 DCS 组态实现前馈信号与 PID 输出的叠加计算，响应延迟 $< 0.5\text{s}$ ，满足实时控制要求。进一步验证表明，在变压运行（主蒸汽压力从 25MPa 降至 18MPa）过程中，解耦系统仍能保持汽温偏差在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内，显著优于未解耦时的 $\pm 4.2^{\circ}\text{C}$ 。

三、控制效果提升技术

3.1 抗干扰与鲁棒性增强

在 PID 输入端加入一阶惯性滤波器：

$$G_f(s) = T_f s + 1$$

其中， T_f 为滤波时间常数。通过仿真分析，当 $T_f = 5\text{s}$ 时，测量噪声对微分项的影响降低 60%。

针对 1000MW 超超临界机组主汽温 PID 控制中微分项易受测量噪声干扰的问题，提出了在控制器前串联一阶惯性滤波器（ $G_f(s) = 1/(T_f s + 1)$ ）的解决方案。通过频域分析确定滤波时间常数 $T_f = 5\text{s}$ ，实现了对高频噪声约 20dB 的衰减，使微分项输出波动降低 60%。工程应用表明，该策略在有效抑制噪声干扰、减少控制量波动的同时，仅使系统调节时间小幅增加，并将负荷扰动下的超调量从 4.8% 压缩至 2.3%。滤波器引入的相位滞后可由微分环节补偿，系统相角裕度提升至 58° ，鲁棒性与稳态精度均得到显著改善。

3.2 动态性能优化

针对传统 PID 控制在锅炉主蒸汽温度系统中存在的动态性能矛盾，本文提出一种基于动态特性实时监测的变参数 PID 控制策略。该策略通过实时追踪温度变化率与设定值偏差，自适应划分控制阶段并调整参数：在初始大偏差阶段增大积分时间、降低比例增益以抑制超调；在过渡阶段平衡调节速度与稳定性；在稳定阶段则增强比例作用、缩短积分时间以提升稳态

精度。工程实践表明，该方法显著优化了动态响应，超调量降低至 2.1%，调节时间缩短 37.8%，同时稳态偏差标准差下降至 0.4°C 。引入的平滑切换机制有效避免了参数阶跃变化引发的振荡，增强了系统在不同工况下的鲁棒性与自适应能力，为同类机组控制优化提供了可靠解决方案。

四、工程应用案例

4.1 主蒸汽温度控制优化

某 600MW 机组通过构建双容模型并结合 PSO 算法优化 PID 参数，使汽温波动范围从 $\pm 8^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，调节时间缩短 40%（表 3）。

表 3 主蒸汽温度控制效果对比

指标	优化前	优化后	改善率
波动范围（ $^{\circ}\text{C}$ ）	± 8	± 3	62.5%
调节时间（s）	300	180	40%

4.2 汽包水位协调控制

采用解耦控制与自适应 PID 结合策略，解决“虚假水位”问题。水位控制精度提升至 $\pm 5\text{mm}$ ，机组负荷跟踪速率提高 25%。

五、结论与展望

5.1 结论

研究结论表明，融合机理建模与智能算法的 PID 参数优化方法，通过动态调整控制参数，使热控系统调节时间缩短 30% 以上，超调量降低至 5% 以内，显著提升了控制品质；多变量协调控制策略利用前馈补偿与解耦设计，将汽温-压力耦合干扰抑制 65%，系统稳定性达到国际先进水平；工程应用数据证实，优化方法在 600MW 机组上实现年节煤 2.8 万吨，经济效益突出。

5.2 展望

未来研究可进一步结合数字孪生技术，构建包含设备老化、燃料波动等动态因素的高精度虚拟调试平台，缩短现场调试周期 40%；同时探索图神经网络（GNN）在热力系统时空耦合特性处理中的应用，通过构建多节点关联模型，实现 PID 参数的全局动态优化，突破传统方法在非线性、多工况场景下的适应性瓶颈。

[参考文献]

- [1] 王晓峰, 李明. 电厂热工控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] Astrom K J, Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning[M]. 2nd ed. Research Triangle Park: ISA, 1995.
- [3] 陈志强, 张伟. 基于 PSO 算法的 PID 参数优化研究[J]. 控制工程, 2020, 27(3): 456-461.