

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i04.23-28

亮点:

- 构建多维指标在线评价体系, 实现控制回路自动诊断与整定闭环。
- 融合内模控制与在线辨识技术, 实现宽负荷下 PID 参数自适应整定。
- 提出执行机构时滞死区补偿策略, 自动投运率达 98%, 波动降 20%。

*通讯作者邮箱:

zhanglei60@crpower.com.cn

英文引用: Zhang Lei et al., 2026. Quality Monitoring and Control Parameter Calculation for Control Loops. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 23-28.

中文引用: 张磊等., 2026. 控制回路品质监测与控制参数计算. 工程科学与实践, 2 (04), 23-28.

稿件处理节点:

接收	2026 年 10 月 17 日
修订	2026 年 10 月 24 日
接受	2026 年 10 月 25 日
发表	2026 年 10 月 25 日

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

控制回路品质监测与控制参数计算

张磊¹, 杨超超¹, 贾秀峰¹

¹ 华润电力登封有限公司, 郑州 452400

摘要 在深调及现货市场背景下, 火电机组宽负荷巡航对模拟量控制系统 (MCS) 的调节品质提出了更高要求。控制回路品质监测与控制参数计算是保障机组安全、稳定、灵活运行的关键技术。本文结合华润电力登封有限公司一期 2×330MW 亚临界燃煤机组 DCS 升级改造和宽负荷巡航控制科研项目, 提出了一套控制回路品质监测与控制参数计算方法。该方法基于泛函性能指标、误差积分、超调量、调节时间、振荡次数等指标, 对控制回路进行在线品质评价; 采用内模控制参数计算和阶跃响应曲线参数计算两种方法, 实现 PID 参数自动整定; 利用递推最小二乘法在线辨识对象模型, 结合自适应控制和安全约束, 提高参数适应性; 针对执行机构时滞性、准确性、线性度和死区, 提出评价与补偿策略。工程应用表明, 该方法可提高自动回路投运率, 降低主要参数波动幅度 20% 以上, 满足 DL/T657—2015 和属地电网“两个细则”要求。

关键词: 控制回路; 品质监测; 参数整定; 内模控制; 宽负荷巡航

Quality Monitoring and Control Parameter Calculation for Control Loops

Zhang Lei¹, Yang Chaochao¹ and Jia Xiufeng¹

¹ China Resources Power Dengfeng Co., Ltd., Zhengzhou 452400, China

Abstract Under the background of deep peak shaving and the spot market, wide-load cruising of thermal power units places higher demands on the regulation quality of the Modulating Control System (MCS). Control loop quality monitoring and control parameter calculation are key technologies for ensuring the safe, stable, and flexible operation of units. Based on the DCS upgrade and wide-load cruise control research project of the Phase I 2×330 MW subcritical coal-fired units of China Resources Power Dengfeng Co., Ltd., this paper proposes a set of methods for control loop quality monitoring and control parameter calculation. The method conducts online quality evaluation of control loops based on indicators such as functional performance index, error integral, overshoot, settling time, and number of oscillations; adopts two methods—Internal Model Control (IMC) parameter calculation and step response curve parameter calculation—to realize the automatic tuning of PID parameters; uses the recursive least squares method for online identification of the plant model, and combines adaptive control and safety constraints to improve parameter adaptability; and proposes evaluation and compensation strategies for the time lag, accuracy, linearity, and dead zone of the actuators. Engineering application shows that the method can increase the automatic loop commissioning rate and reduce the fluctuation range of main parameters by more than 20%, meeting the requirements of DL/T 657—2015 and the "Two Detailed Rules" of the local power grid.

Keywords: Control loop; quality monitoring; parameter tuning; internal model control; wide-load cruising

1. 引言

随着新能源大规模并网，火电机组需在20%Pe~40%Pe低负荷区间稳定运行并快速响应AGC指令。模拟量控制系统（MCS）作为机组闭环控制的核心，其回路品质直接决定了主汽压力、温度及水位等关键参数的调节品质。

传统DCS缺乏回路品质在线评价与参数自整定能力，运行人员依赖经验调参，难以适应宽负荷及煤质变化；同时，执行机构卡涩、死区等非线性问题难以及时定位，直接影响AGC调节性能与辅助服务收益^[1]。

针对上述问题，学术界已开展诸多研究：高志晓等提出了参数自整定自适应PID方法^[2]；闫磊指出智能算法与传统PID融合是重要方向^[3]；康东东分析了深调工况下的控制难题及预测控制优化路径^[4]；基于DCS外挂式高级控制（APC）的架构也逐步得到应用^[5]。然而，现有技术仍存在以下不足：

其一，参数自整定落地受对象时变制约。火电厂热控系统参数具有显著时变和非线性，传统固定参数难以适应，现有自整定方法往往因模型失配或策略保守，难以在全工况保持效果^[6]。

其二，执行机构非线性补偿不足。阀门、挡板等执行机构普遍存在增益、死区及滞环非线性，宽负荷下频繁动作使非线性叠加，甚至导致无法投自动。现有研究多侧重算法改进，对机构物理特性评价关注不足^[7]。

其三，宽负荷下模型辨识鲁棒性差。机组具有大迟延与大惯性，依赖单一模型难以在全工况保持品质。深调下对象大范围漂移，传统辨识方法鲁棒性不足，制约了自适应整定效果^[8]。

为此，依托相关科研项目，本文致力于解决以下三个具体工程问题：一是如何建立精确区分参数失配与机构故障的在线评价与诊断体系，解决“重评价、轻整定”的脱节问题；二是如何在对象漂移时，利用在线辨识与内模控制实现PID安全、自动整定；三是如何对机构时滞、死区与非线性进行量化评价与精准补偿，解决因物理特性恶化导致的回路无法投自动问题。本文通过构建上述闭环，以期切实提升机组深调工况下的自动投运率与调节品质。

2. 控制回路品质监测需求

在深调及现货市场背景下，控制回路品质监测需解决以下痛点：

一是自动投运率低。深调下对象特性剧烈变化，原PID可能失效，运行人员担心引发波动而长期切手动；

二是调节品质下降。负荷、煤质变化导致原参数不再适用，出现超调、振荡，如低负荷汽温超调、变负荷虚假水位等；

三是故障定位困难。传统DCS仅报警，无法判断是参数不当、机构故障还是特性变化；

四是考核压力大。回路品质不佳直接拉低AGC速率与精度，增加考核电量。

因此，需建立在线监测系统，形成“监测—评价—诊断—整定—验证”闭环。本文设计的系统总体架构如图1所示，涵盖数据预处理、在线评价、智能诊断、参数自整定以及执行机构评价与补偿五大模块，各模块数据互通。

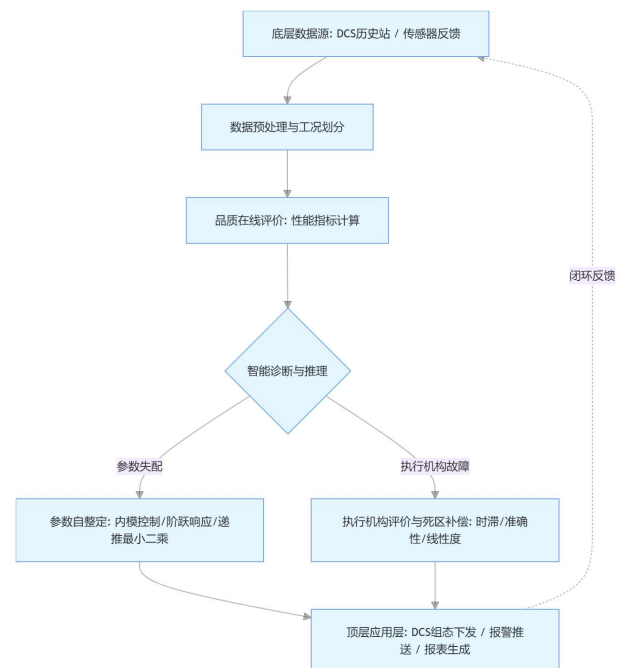


图1 控制回路品质监测与参数自整定闭环架构

3. 控制回路品质监测方法

按照图1架构，本节重点介绍评价指标、数据预处理及诊断逻辑。

3.1. 性能指标

为使评价具备学术严谨性，统一定义如下：

(1) 时域响应指标

1) 超调量 (σ)：指动态过程中被调量最大偏差与稳态值之比的百分数，反映系统阻尼程度。

2) 衰减率 (ψ)：指动态过程中相邻两个同向波峰之比，反映振荡衰减速度。

3) 调节时间 (t_s)：指从扰动发生起，到被调量进入并始终保持在允许误差带内的时间。本文统一取±2% 稳态带。

4) 振荡次数 (N)：指在调节时间 t_s 内，被调量穿越设定值（稳态值）的总次数。

(2) 误差积分指标

误差积分指标用于综合衡量系统动态过程中的偏差累积大小，定义如下：

1) 绝对误差积分 (IAE)：

$$J_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1)$$

适用于一般控制回路评价；

2) 平方误差积分 (ISE)：

$$J_{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2)$$

对大误差敏感，侧重于抑制大偏差；

3) 时间加权绝对误差积分 (ITAE)：

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3)$$

侧重强调调节后期的残余误差与调节时间；

4) 时间加权平方误差积分 (ITSE)：

$$J_{ITSE} = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (4)$$

兼顾了大误差惩罚与快速性要求。

(3) 泛函性能指标（二次型）

为综合平衡偏差抑制与执行机构动作幅度，采用二次型性能指标：

$$J = \int_0^{\infty} [e^2(t) + \rho u^2(t)] dt \quad (5)$$

其中， $e(t)$ 为被调量偏差； $u(t)$ 为控制量输出； ρ 为控制量加权系数 ($\rho > 0$)。 ρ 的取值直接决定了系统对控制能量消耗的惩罚力度。工程建议 ρ 取 0.01-1.0。 ρ 越小系统越注重快速消偏（动作剧烈）， ρ 越大越注重平缓动作（防磨损）。

针对定值扰动和负荷扰动，系统将结合汽温、负荷、水位等不同对象的特性，对上述指标分别设定差异化的评价权重。例如，汽温回路要求超调量小、ITAE 权重高；负荷回路要求响应快、ISE 权重高；水位回路要求无静差、IAE 权重高。

3.2. 数据预处理与工况划分

从 DCS 采集数据后需进行清洗：剔除异常坏点、停运及手动状态数据；按负荷区间（如<50%Pe、50%~70%Pe、70%~100%Pe）划分工况以消除特性差异；自动识别稳态段（评价误差与振荡）与动态段（计算超调与调节时间）。算法上采用低通滤波与滑动窗口法，窗口长度设为对象时间常数的 3~5 倍。

3.3. 品质评价模块

系统依据综合评分（≥90 优，80~89 良，60~79 合格，<60 不合格）定级，并通过交叉比对控制输出、被调量与机构反馈进行特征提取与根源区分：若周期性等幅振荡且输出与反馈同步无卡涩，判定为 PID 参数不当；若相同工况下响应变长或偏差增大且伴随煤质/负荷变化，判定为对象特性漂移（模型失配）；若指令大幅变化而反馈滞后、停滞或呈显著滞环，判定为执行机构故障。

针对症结自动生成建议（重整 PID、查机构、改前馈或加死区补偿），结果实时推送。模块支持定期或手动触发，数据存入历史库供迭代优化。

4. 控制参数计算与自整定

4.1. 基于内模的控制参数计算

内模控制 (IMC) [9] 具有整定 [10] 直观、鲁棒性好的优点。其滤波时间常数越大响应越平稳，越小则越快但鲁棒性下降，工程初值通常取纯延迟时间的一半。但在宽负荷运行中，若辨识模型与实际对象失配（预测残差超限），系统将触发滤波时间常数的自适应调整：失配越严重，自动增大时间常数以牺牲快速性换取闭环稳定；待模型收敛后再恢复，实现性能与鲁棒性的动态平衡。该方法适用于汽温、水位等大延迟对象。

对于二阶惯性对象，其 PID 比例与积分参数亦可由特性参数和滤波常数直接算出。因 IMC 依赖模型准确性，须结合在线辨识更新模型。

4.2. 基于阶跃响应曲线的参数计算

对于无法准确建模的回路，可通过阶跃扰动试验获取过渡过程曲线，计算对象增益、时间常数和纯延迟，然后采用 Ziegler-Nichols 法、Cohen-Coon 法或经验公式计算 PID 参数^[11]。为杜绝无依据的经验参数，本文优先采用内模控制与辨识结果，经验公式仅作极端工况参考。

现场施加 2%~5% 阶跃扰动须满足严格安全约束：仅在负荷平稳、无剧烈波动且无辅机切换时触发；幅值根据负荷率与对象增益动态限制；内置“一键中止”及超限回退机制。对于汽包水位等不允许主动扰动的回路，采用历史数据挖掘技术，利用日常变负荷或泵切换产生的“天然扰动”作为激励信号，结合闭环辨识提取特征，在不干扰运行的前提下完成计算。

4.3. 递推最小二乘在线辨识

为适应时变，采用递推最小二乘法^[12]在线辨识。将动态过程表示为当前与历史被调量、控制量的线性差分关系，纯延迟由滞后步数决定，实时更新增益、时间和延迟。当特性变化超阈值时触发重整。

选取连续变负荷数据拟合，如图 2 所示，即便在负荷快速变动区间，模型预测仍能紧紧跟踪实际反馈，拟合度>95%，证明了该算法能有效捕捉时变特性。

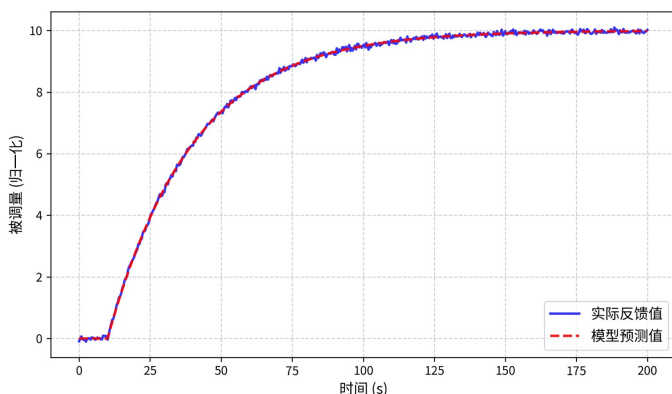


图 2 递推最小二乘在线辨识模型预测拟合曲线

4.4. 自适应 PID 与安全约束

自适应 PID 根据负荷、偏差及变化率动态调整：偏差大时增强比例，偏差小时增强积分，变化率大时减弱比例防超调；接近限幅时抑制积分饱和。

同时引入多重安全约束：通过 PID 输出限幅与速率限制防过载；完善无扰切换与跟踪（手/自动切换及设定值跟踪无扰动）；故障（传感、机构或通信）时自动切手动并报警。在 DCS 中常采用增益调度表或结合模糊规则按负荷段调整参数。

5. 执行机构特性评价与死区补偿

5.1. 执行机构特性评价与死区补偿

执行机构特性直接影响响应速度与稳态精度。在时滞方面，比对指令阶跃与反馈起始时刻计算时滞（如图 3(b)），若超过对象纯延迟 $1/3$ ^[13]，说明存在卡涩或气源不足，会导致响应迟缓甚至振荡。在准确性方面，若指令与反馈偏差持续超限（如满量程 1%~2%），说明定位不准，需查定位器与传感器。

针对全行程试验暴露的死区、回差或非线性（如图 3(a)），需进行死区补偿^[14-15]。常采用叠加死区补偿量、分段线性化修正或修改流量特性曲线，使等效特性接近线性。补偿可提高精度并减小稳态误差，但须合理设置以防振荡。

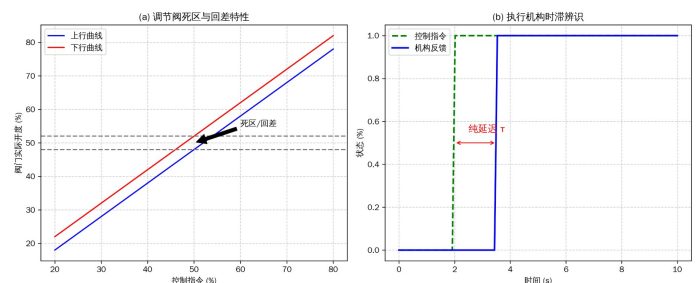


图 3 执行机构死区、时滞辨识示例 (a) 死区与回差特性 (b) 时滞辨识

5.2. 故障诊断与保护机制

当机构出现异常时，判定条件包括：指令变但反馈不变（卡涩）；动作时间超限（超时）；指令反馈偏差持续超标（偏差大）；反馈超量程或变化率异常（坏点）。触发后将自动报警并强切手动，记录时间、类型及快照，供后续排查与优化。

6. 工程应用

6.1. 系统概况

华润电力登封一期 $2 \times 330\text{MW}$ 亚临界机组 DCS 采用上海新华 VCAN6.0。MCS 系统包含锅炉主控、燃

料主控、风烟及水位等回路。在改造中，逐页核查原 ABB 逻辑，重点解决函数块、脉冲时间、模拟量参数、惯性及设定值跟踪等问题^[16-18]。整改后经多轮复核，确保组态 100%准确。

6.2. 回路品质监测与参数整定

对风烟、水位等关键回路开展监测与整定。在风烟及燃料控制方面，一次风压阶跃时双风机迅速响应并于 8 分钟内稳定，经内模重整后调节时间缩短约 30%，改造前后对比曲线如图 4 所示，消除了原 PID 的迟滞与振荡；负压调节中经时滞评价发现 A 引风机气源不足并处理，品质改善；燃料主控增加断煤修正脉冲，抑制了断煤波动。

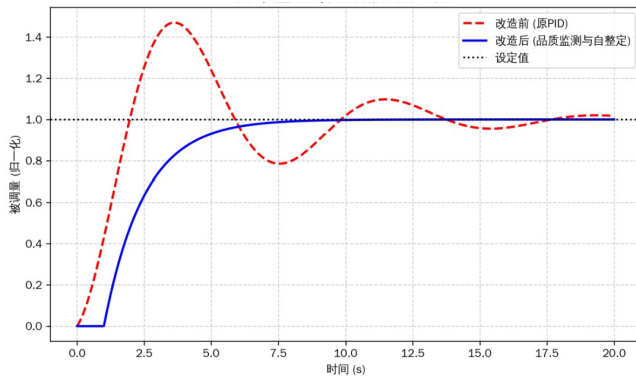


图 4 典型回路（一次风压）改造前后阶跃响应对比

在水位及汽温控制方面，除氧器及高低加疏水阀引入死区补偿，稳态误差减小；#1 高加重整后超调降低约 50%；汽包水位采用三冲量并针对虚假水位增加变负荷前馈，波动由 $\pm 100\text{mm}$ 降至 $\pm 60\text{mm}$ ，对比曲线如图 5 所示。

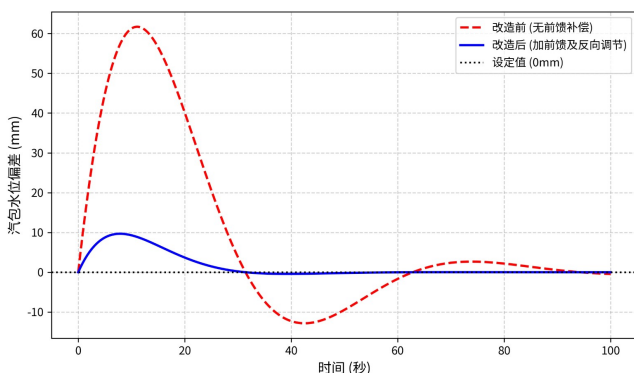


图 5 汽包水位回路整定前后动态响应对比曲线

四次 AGC 升降负荷试验中，负荷精准跟随，关键参数均受控（响应 $<20\text{s}$ ，偏差 $<0.5\%$ ）。此外，为严格落实闭环机制，系统在参数下发后自动进入 24 小时闭环验证期。若新参数综合评分 ≥ 80 分且指标优于

原参数，则归档更新；若引发振荡或评分下降，自动触发回退机制，无缝恢复历史最优参数并推送失败原因，确保整定过程不影响机组安全。

6.3. 应用效果

改造前后主要指标对比如表 1 所示。

表 1 控制系统改造前后主要运行指标对比

指标类别	具体指标	改造前实测	考核要求	改造后实测
自动化水平	自动回路投运率	85.0%	/	98.5%
调节品质	主汽压力波动幅度	$\pm 0.6\text{MPa}$	/	$\pm 0.4\text{MPa}$
	汽包水位波动幅度	$\pm 100\text{mm}$	/	$\pm 60\text{mm}$
	主汽温度动态偏差	$\pm 8^\circ\text{C}$	/	$\pm 5^\circ\text{C}$
机组调节能力	AGC 响应时间	35s	$<20\text{s}$	15s
	负荷控制偏差	0.8%	$<0.5\%$	0.3%
	常规负荷段变负荷率	1.2%Pe/min	$>1.5\text{Pe}/\text{min}$	1.8%Pe/min
	深调区域变负荷率	0.8%Pe/min	$\geq 1.2\text{Pe}/\text{min}$	1.3%Pe/min
	AGC 月度可用率	98.0%	$\geq 99.5\%$	99.7%

（注：波动幅度采用峰峰值计算，统计时长为 24h，覆盖 50%~100%Pe；“投运率”与“可用率”按月度时间占比统计；“/”为无考核要求。）

由表 1 可知，各项指标均达标。投运率由 85.0%升至 98.5%；主汽压力与水位波动降幅约 33%和 40%，汽温偏差缩减 37.5%；响应时间缩至 15s，偏差降至 0.3%，变负荷率远超底线，全面满足了规程与细则要求，降低了考核电量并提高了辅助服务收益。

7. 结论

本文提出了一套集在线评价、参数自整定与机构特性补偿于一体的控制优化体系。构建了多维指标在线评价机制，实现了回路健康状态的自动诊断；结合内模、阶跃响应与递推最小二乘，解决了复杂

工况下 PID 参数难以适应时变的难题；针对机构时滞、死区等提出了评价补偿策略，形成了完整闭环。

工程应用表明，该方法克服了宽负荷下对象剧烈变化与机构非线性的影响，投运率大幅提升，主要参数波动降 20%以上，AGC 响应 $<20\text{s}$ 且偏差 $<0.5\%$ ，满足了考核要求。未来将进一步推动 LSTM、K-means 等 AI 算法与现有体系的融合，提升极端工况下的超前预警与全局寻优能力，并探索多回路协同与长期可靠性验证，推动热工控制向更高水平智能化迈进。

参考文献

- [1] 国家能源局. 火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程: DL/T 657—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 高志晓, 张亚辉. 基于自适应控制的电厂锅炉温度调节系统研究[J]. 中国设备工程, 2026(6): 103-106.
- [3] 闫磊. 大型火力发电厂过热汽温自动控制探讨[J]. 中国设备工程, 2026(6): 214-216.
- [4] 康东东. 火电厂深度调峰下主再热汽温优化控制研究[J]. 中国设备工程, 2026(6): 98-100.
- [5] 马宝成, 等. 基于锅炉 DCS 系统外挂式 APC 优化燃烧控制系统的架构及实际应用效果浅析[J]. 工业锅炉, 2025.
- [6] 李健. 基于 PID 参数自整定的火电厂热控系统自动控制研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(17): 22-24.
- [7] 孟昊, 田亮. 执行机构非线性特性在线补偿方法研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 98-105.
- [8] 张晓东, 王鹏飞, 刘乐. 基于多变量广义预测控制算法的脱硝优化研究及应用[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 178-184.
- [9] 周彤, 朱倩, 张奎奎, 等. 基于 PSO 算法的 IMC-PID 加热炉温度控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(3): 38-42.
- [10] 冯悦昕, 张鹏辉, 邹晋彬, 等. 磁浮球系统辨识与 IMC-PID 参数整定方法研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(10): 66-75.
- [11] 黄天豪, 樊响, 崔益寒, 等. 脱硝系统 PID 控制器工程整定方法对比研究[J]. 自动化应用, 2026, 67(11): 40-43.
- [12] 周明怡, 等. 基于数据驱动的燃气轮机性能退化下转速自适应控制[J]. 海军航空大学学报, 2025.
- [13] 苏洋, 陈远野, 刘亚娟. 重型燃气轮机控制回路时延稳定性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 110-116.
- [14] 王航. 基于阀门非线性补偿的亚临界机组主蒸汽温度控制[J]. 科技与创新, 2024, (7): 85-88.
- [15] 吉隆基. DCS 控制阀非线性补偿技术在压力调节中的应用研究[J]. 机械管理开发, 2025, 40(10): 254-257.
- [16] 国家能源局. 火力发电厂分散控制系统验收测试规程: DL/T 659—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [17] 国家能源局. 火力发电厂热工自动化系统检修运行维护规程: DL/T 774—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [18] 国家能源局. 火力发电建设工程机组调试技术规范: DL/T 5294—2023[S]. 北京: 中国电力出版社, 2023.