

基于热工过程控制的电厂热工自动化与仪表技术分析

李文超

广东顺控环境投资有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110034

摘 要 : 本文围绕电厂热工自动化与仪表技术展开, 涵盖热工仪表测量原理、智能仪表发展、机炉协调控制、先进控制算法应用、系统集成架构、辅机联锁控制、现场总线设备管理等内容, 并列多个工程应用案例, 强调仪表精度与控制算法融合等对提升热工自动化水平的重要性及未来发展方向。

关 键 词 : 电厂热工; 自动化技术; 仪表测量

Analysis of Thermal Automation and Instrumentation Technology in Power Plants Based on Thermal Process Control

Li Wenchao

Guangdong Shuncont Environmental Investment Co., Ltd, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This article focuses on the thermal automation and instrumentation technology of power plants, covering the principles of thermal instrument measurement, development of intelligent instruments, coordinated control of unit units, application of advanced control algorithms, system integration architecture, auxiliary interlocking control, fieldbus equipment management, and other contents. Multiple engineering application cases are listed, emphasizing the importance and future development direction of integrating instrument accuracy and control algorithms to improve the level of thermal automation.

Keywords : power plant thermal engineering; automation technology; apparatus measuring

引言

随着电力行业的发展, 电厂热工自动化与仪表技术的提升至关重要。2021 年颁布的《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》强调提升能源利用效率与系统稳定性, 这与电厂热工技术的发展方向契合。文中所述热工仪表测量技术、智能仪表系统、协调控制技术、先进控制算法等, 能提升控制精度与系统稳定性。通过硬件冗余配置、保障信息安全等措施, 可确保系统可靠运行。这些技术在实际工程中的应用, 有效提升机组运行指标, 推动电厂向高效、稳定、智能化方向发展, 助力实现政策目标。

一、电厂热工仪表技术体系解析

(一) 热工过程参数测量仪表

电厂热工仪表技术体系中的热工过程参数测量仪表, 在电厂热工过程控制里起着关键作用。温度测量常用热电偶, 其利用热电效应, 两种不同材质导体两端温度不同会产生热电势, 不过热电偶补偿导线误差影响测量精度, 补偿导线若选型或敷设不当, 会引入附加电势。压力测量常依靠压力变送器, 差压变送器的迁移校准是关键技术, 因安装位置等因素, 需对量程进行迁移校准, 保证测量准确性。流量测量原理多样, 比如节流式流量计基于伯努利方程, 通过测量节流件前后差压得到流量。物位测量则是利用静压、电容等原理确定容器内介质高度。这些仪表依据不同测量原理, 为热工过程控制提供精准参数数据^[1]。

(二) 智能仪表系统发展现状

在电厂热工仪表技术体系中, 智能仪表系统发展势头迅猛。

以 HART/FF 总线型智能变送器为例, 它具备诸多独特的功能特性, 不仅能实现高精度测量, 还拥有良好的通信能力, 可便捷地与其他设备交互数据, 极大提升了测量的准确性与系统集成度^[2]。同时, 无线传感网络在锅炉管壁温度监测方面也展现出创新应用场景。它摆脱了传统有线连接的束缚, 能够灵活布局监测点, 实现对锅炉管壁温度的实时、全面监测。然而, 无线传感网络在实际应用中也面临一些技术瓶颈, 如信号传输的稳定性易受环境干扰, 节点能源供应有限影响长期运行可靠性等, 这些问题有待进一步研究解决, 以推动智能仪表系统在电厂热工领域更广泛、更高效的应用。

二、热工过程控制策略研究

(一) 垃圾焚烧发电厂协调控制技术

垃圾焚烧发电厂协调控制在电厂热工过程控制中至关重要

要。构建机炉协调控制数学模型，是深入研究协调控制的基础。通过该模型，能够精确分析垃圾焚烧发电厂各部分在不同工况下的运行特性，为控制策略的优化提供有力支撑。直接能量平衡 (DEB) 与间接能量平衡 (IEB) 策略是垃圾焚烧发电厂协调控制的关键策略，二者在变工况下的响应特性存在差异。DEB 策略以直接测量的能量信号为基础，能更快速地响应负荷变化；而 IEB 策略则通过间接计算能量，响应相对滞后。解析这两种策略在变工况下的响应特性差异，有助于根据实际工况选择更合适的控制策略，提升机组运行的稳定性与经济性^[3]。

（二）先进控制算法工程化应用

在垃圾焚烧发电厂热工过程中，先进控制算法的工程化应用至关重要。以主汽温控制为例，模糊 PID 控制与模型预测控制展现出独特优势。模糊 PID 控制能依据系统运行状态实时调整参数，增强控制适应性；模型预测控制则通过预测未来输出，优化控制决策，提升控制精度。通过对比二者在主汽温控制中的实施路径，可深入了解其性能差异与适用场景，为实际应用提供有力参考。同时，对于大迟延系统，Smith 预估器的补偿效果不容小觑^[4]。它能提前预估迟延环节对系统的影响，有效改善控制品质，减少超调量与调节时间。对 Smith 预估器补偿效果的评估，有助于挖掘其应用潜力，进一步优化热工过程控制，提高电厂运行的稳定性与经济性。

三、热工自动化系统集成架构

（一）DCS 系统功能模块设计

1. 控制站硬件冗余配置

在热工自动化系统集成架构的 DCS 系统功能模块设计中，控制站硬件冗余配置对提升系统可用性至关重要。控制器双机热备机制是关键一环，两台控制器同时运行，主控制器负责实时控制任务，从控制器同步数据并处于热备状态。一旦主控制器出现故障，从控制器能迅速无缝接管，确保控制过程不间断，极大提高系统的可靠性^[5]。同时，I/O 模块容错设计也发挥着重要作用，通过采用冗余 I/O 通道，当某一通道发生故障时，备用通道能及时投入使用，保证信号的准确采集与指令的正常输出。这种硬件冗余配置，从控制器和 I/O 模块两方面共同提升了系统在热工过程控制中的可用性，减少因硬件故障导致的系统停机风险，保障电厂热工自动化系统稳定运行。

2. 人机交互系统信息安全

在热工自动化系统集成架构中，人机交互系统的信息安全至关重要。随着电厂智能化发展，大量数据交互使得系统面临诸多安全威胁。基于此，研究 OPC UA 协议在 SIS 与 MIS 系统数据交换中的应用具有重要意义。OPC UA 协议以其安全可靠的通信机制，能有效保障数据在不同系统间准确传输，降低数据泄露风险^[6]。同时，构建工业防火墙的纵深防御体系必不可少。通过多层次、多角度的防护策略，工业防火墙能抵御外部网络攻击，防止恶意软件入侵，确保人机交互系统与外部网络交互时的信息安全，为热工自动化系统稳定运行提供坚实保障，进而提升电厂热

工过程控制的安全性及可靠性。

（二）智能前端设备集成方案

1. PLC 在辅机联锁控制中的实现

在电厂热工自动化系统中，PLC 在辅机联锁控制实现方面发挥着关键作用。PLC 通过对各类传感器信号的精准采集，获取辅机运行的实时状态参数，如温度、压力、流量等。依据预先设定的逻辑规则，这些参数被分析处理，以判断辅机是否正常运行。当某一辅机出现异常状况时，PLC 能迅速做出反应，依据故障安全 (Fail - Safe) 设计原则^[7]，及时触发联锁控制，保障整个系统的安全稳定运行。例如在给水泵组顺控逻辑组态方面，PLC 实现启动、停止以及运行过程中的联锁保护等功能。通过合理的逻辑组态，确保给水泵组在不同工况下准确响应，避免因设备故障或误操作引发安全事故，提升热工自动化系统对辅机联锁控制的可靠性与有效性。

2. 现场总线设备管理系统

构建 PROFIBUS-PA 设备管理系统框架，是现场总线设备管理系统的关键环节。该框架需涵盖设备的配置、监控与维护等功能模块。设备配置模块用于设置设备参数，确保其符合热工过程控制要求；监控模块实时获取设备运行状态信息，及时察觉异常；维护模块则为设备维护提供支持。在此基础上，研究设备诊断信息与 CMMS (计算机化维护管理系统) 的集成方法^[8]。通过将设备诊断数据接入 CMMS，实现诊断信息的集中管理与分析，使维护人员能基于全面准确的信息制定维护策略，优化设备维护流程，提升设备运行可靠性与维护效率，最终保障电厂热工自动化系统稳定、高效运行，满足热工过程控制需求。

四、典型工程应用案例分析

（一）垃圾焚烧发电厂控制优化

1. 主蒸汽压力控制品质提升

在垃圾焚烧发电厂工程应用中，为提升主蒸汽压力控制品质，运用基于热工过程控制的电厂热工自动化与仪表技术，借助历史数据挖掘来优化 PID 参数整定规则。通过对大量机组运行历史数据的深入分析，精准找出与主蒸汽压力控制紧密相关的变量及特征，据此对 PID 参数整定规则进行针对性优化。优化后，主蒸汽压力波动范围显著缩减 40%，有效提升了机组运行的稳定性与安全性^[9]。这不仅避免了因压力波动过大导致的设备磨损与故障风险，还提高了机组的发电效率，为电厂带来了良好的经济效益与运行效益，充分彰显了基于热工过程控制的自动化与仪表技术在超超临界机组主蒸汽压力控制优化中的重要价值。

2. 脱硝系统喷氨优化控制

以垃圾焚烧发电厂为例，在脱硝系统喷氨控制方面，通过应用前馈 - 串级控制策略，成功实现了 NH_3 逃逸量 $\leq 3\text{ppm}$ 的经济运行目标^[10]。在实际运行中，该策略依据机组负荷、烟气流量、 NO_x 浓度等多种参数变化，前馈环节快速响应，初步调整喷氨量，串级控制的主副回路紧密配合，精确修正喷氨量，有效克服了脱硝过程的大迟延、大惯性以及干扰因素的影响。经长期运行

监测，不仅显著降低了 NH_3 逃逸量，减少了对环境的污染和对后续设备的腐蚀，还提升了脱硝效率，实现了氨耗与脱硝效果的良好平衡，为机组的高效、环保运行提供了有力保障，在同类机组脱硝系统喷氨优化控制方面具有借鉴意义。

（二）汽轮机—锅炉联合循环控制

1. 负荷快速跟踪控制策略

在垃圾焚烧发电厂工程应用中，为实现负荷快速跟踪，着重研究汽轮机与锅炉的联合响应特性。通过对机组运行数据的实时监测与深度分析，精确掌握汽轮机出力变化对锅炉蒸汽参数的影响规律。在此基础上，采用先进的控制算法，优化汽轮机与锅炉的协同控制。经过一系列调试与优化，成功实现了 $\pm 2\%$ 的负荷跟随精度。该控制策略不仅有效提升了机组对负荷变化的响应速度，还确保了机组运行的稳定性与高效性，为电厂在复杂多变的电力市场环境下灵活运行提供了有力保障，为同类机组的负荷快速跟踪控制提供了宝贵的实践经验。

2. 热力参数软测量技术应用

在垃圾焚烧发电厂控制中，热力参数软测量技术发挥着重要作用。以某电厂为例，基于 LSSVM 算法建立排烟温度预估模型用于替代故障测温元件。由于实际运行中，排烟温度直接影响机组热效率与安全性，传统测温元件易出现故障导致数据不准确或缺失。借助该算法建立的模型，能依据机组其他可测参数，如蒸汽流量、垃圾成分等，准确预估排烟温度。通过大量历史运行数据对模型进行训练与优化，使其预估精度满足工程要求。此应用不仅保证了热力参数的实时准确监测，还避免了因测温元件故障停机维修带来的损失，提升了汽轮机与锅炉运行的稳定性与经济性。

（三）智慧电厂数字化转型

1. 数字孪生系统架构设计

在某大型火力发电厂的改造工程中，成功构建基于热工过程控制的锅炉数字孪生系统。其物理实体层涵盖锅炉本体及各类热

工设备，如实反映锅炉运行的实际状态。数据模型层收集温度、压力、流量等多维度实时数据，通过先进算法建立精确模型，实现对设备性能、运行趋势的模拟与预测。服务应用层则依据数据模型分析结果，为运行人员提供优化的操作建议，助力实现智能燃烧调整、故障预警诊断等功能。该案例中，锅炉数字孪生系统三层架构有效提升了电厂热工自动化水平，优化仪表技术应用，降低能耗，提高生产效率与安全性，为智慧电厂数字化转型提供了典型示范。

2. 大数据平台预警功能开发

在某智慧电厂的数字化转型实践中，大数据平台预警功能开发取得显著成效。该电厂运用 LSTM 神经网络对汽轮机振动情况进行分析预测。通过收集大量汽轮机运行过程中的热工数据，包括温度、压力、转速等参数，作为 LSTM 神经网络的训练样本。经模型不断学习与优化，实现了对汽轮机振动趋势的有效预测，能提前 72 小时发出预警，预警率高达 85%。这一成果极大提升了电厂运行的安全性与稳定性，减少了因汽轮机突发故障导致的停机损失，为智慧电厂基于热工过程控制的热工自动化与仪表技术升级，提供了极具价值的应用范例。

五、总结

仪表精度提升与先进控制算法的融合，为电厂热工自动化注入了强大动力，使得热工过程的控制更为精准和高效。而 5G 通信与 AI 技术的深度融合，正孕育着新一代自主控制系统，有望彻底变革电厂热工自动化的运作模式，带来前所未有的智能化体验。在未来的研究中，建立数字孪生基准测试平台具有重要意义，它将为热工自动化与仪表技术的发展提供更为可靠的评估与优化依据。通过这一系列技术的协同发展，电厂热工自动化与仪表技术将不断突破创新，为电力行业的高效、稳定、智能化运行提供坚实保障，推动整个行业向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 牟延杰. 基于分散模糊推理的热工过程预测控制 [D]. 重庆大学, 2022.
- [2] 吴铮. 基于混合模型的热工过程报警数据过滤 [D]. 华北电力大学 (保定), 2021.
- [3] 任振华. 大惯性、非线性热工过程的模型辨识与优化控制 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 孙明. 火电机组热工过程自抗扰控制的研究与应用 [D]. 华北电力大学 (北京), 2021.
- [5] 何康. 基于字典学习的热工过程建模及诊断方法研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [6] 高洋. 火电厂热工仪表自动化技术的应用与发展 [J]. 中国高科技, 2021, (14): 121-122+125.
- [7] 张宝松. 先进控制方法在电厂热工过程控制中的应用 [J]. 光源与照明, 2021, (12): 142-144.
- [8] 梁馨月. 电厂热工自动化系统改造技术分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(01): 245-246+252.
- [9] 李伟. 电厂热工过程控制中智能 PID 控制器的应用探讨 [J]. 应用能源技术, 2022, (06): 9-11.
- [10] 冯小龙, 霍明鑫. 电力系统热工仪表自动化技术的应用 [J]. 化工管理, 2022, (20): 97-99.