燃气锅炉的仪表测量及自动控制技术研究

高鹏浩
青岛市崂山区高科热力有限公司　山东　青岛　266000

摘　要：为解决燃气锅炉运行测量精度低、工况调节滞后、能耗偏高及安全稳定性不足等问题，本文围绕锅炉温度、压力、流量核心仪表测量技术展开研究，分析测量误差来源并优化精度提升方案。同时搭建PLC分布式自动控制系统，优化模糊PID控制算法，完善多重安全联锁保护机制。结合实际供热锅炉工程改造验证，该技术可有效提升测控精度与运行稳定性，降低燃气能耗与故障发生率，为燃气锅炉智能化运维提供技术参考。

关键词：燃气锅炉；仪表测量；自动控制技术

引言：燃气锅炉是集中供热领域的核心热能设备，其测控精度与自动化水平直接决定运行安全性、能耗效率与供热质量。当前多数传统燃气锅炉存在仪表测量误差大、控制算法适配性差、风燃配比不合理、安全保护响应滞后等问题，易造成热能浪费与设备故障。为改善锅炉运行工况，本文系统研究仪表测量优化技术与智能自动控制策略，通过理论分析、算法优化与工程实践验证，旨在提升锅炉测控性能，实现节能增效与安全稳定运行。

1 燃气锅炉核心仪表测量技术及误差分析

1.1 燃气锅炉关键测量参数及测量原理

（1）温度参数测量原理：涵盖出水/回水（0~150℃）、炉膛（600~1200℃）及烟气（100~600℃）。热电偶基于塞贝克效应，适用高温，热电势非线性，需冷端补偿；热电阻利用电阻率随温变特性，低温（＜500℃）线性好、精度高，用于水温和排烟。二者协同满足全温域监测。（2）压力参数测量原理：蒸汽压力（0~2.5MPa）、水压及燃气压力（5~20kPa）是安全核心。压阻或电容式变送器将压力转电信号，可远程传输与报警；弹簧管压力表就地指示。实时准确测压保障燃烧稳定，防超压。（3）流量参数测量原理：燃气进气用涡街流量计，基于卡门涡街，频率与流速正比，适中等流速气体；水循环用电磁流量计，依法拉第电磁感应，适导电液体，无压损且精度高。流量是负荷调节与能耗核算依据[1]。

1.2 核心测量仪表选型与安装规范

（1）仪表选型原则：遵循适配性（量程与工况匹配）、稳定性（长期漂移小）、抗干扰性（耐高温、防振）和经济性原则。工业级仪表侧重耐用性与防爆等级，民用级侧重成本与易用性，选型需综合权衡。（2）各类仪表选型方案：温度测量推荐带HART协议的智能热电阻/热电偶；压力测量选用智能压力变送器（精度±0.1%FS）；流量测量根据介质特性选用涡街或电磁流量计。相比传统机械仪表，智能仪表具备自诊断、数字通信和远传功能，优势显著。（3）仪表安装与调试规范：测温点应置于介质流动充分处，测压点避开涡流区，流量计前后预留直管段。安装后需进行零点校准、量程设定及信号测试，确保仪表初始状态准确，规避安装不当引入的系统偏差。

1.3 仪表测量误差来源分析

（1）设备本身误差：传感器老化、精度等级不足、元器件损耗及出厂校准偏差会引入系统误差，表现为固定偏移，可通过定期检定修正。（2）环境工况误差：锅炉运行中的高温传导、机械振动、粉尘附着、电磁干扰及湿度变化，会随机干扰测量信号，导致数据波动和噪声增大。（3）人为与运维误差：安装操作不规范、校准周期超期、日常维护缺位及数据读取偏差等人为因素，常造成非规律性误差，影响数据可信度。

1.4 测量精度优化技术措施

（1）硬件优化：升级高精度智能仪表，加装屏蔽层抑制电磁干扰，安装减震支架和隔热套，降低恶劣环境对传感单元的影响，从物理层提升稳定性。（2）软件校准：采用多点动态补偿算法校正非线性，对采样值进行数字滤波（如中值滤波、均值滤波）平滑噪声，剔除异常跳变，有效修正系统与随机误差。（3）运维优化：建立仪表定期巡检与周期校准制度，规范更换老化器件流程，强化运维人员技能培训，从管理源头减少人为差错，保障仪表长期可靠运行。

2 燃气锅炉自动控制系统及核心控制技术

2.1 自动控制系统整体架构与功能

（1）系统整体架构：构建以可编程逻辑控制器（PLC）为核心控制器的分布式控制系统，自下而上划

分为数据采集层（温度/压力/流量仪表及变送器）、控制运算层（PLC逻辑运算与算法执行）、执行输出层（燃气调节阀、风门执行器、水泵变频器等）及监控管理层（上位机组态界面与数据服务器）。各层级通过工业以太网及现场总线实现互联，保障数据实时交互与控制指令可靠下发。（2）核心控制功能：系统需实现出水/回水温度闭环调节、蒸汽/水系统压力恒压控制、燃气流量与助燃空气量自动配比优化、锅炉按设定曲线自动启停，以及超温、超压、熄火、燃气泄漏等故障工况下的联锁保护与声光报警，全面覆盖锅炉运行全流程[2]。（3）系统运行逻辑：仪表层以毫秒级周期采集现场信号，经模数转换后送入PLC；控制器将实测值与设定值比较得到偏差，依据内置控制算法运算生成输出指令，驱动调节阀开度、变频器频率等执行机构动作；执行效果经仪表反馈至控制器，形成“测量—比较—调节—再测量”的闭环控制，实现锅炉参数的实时动态平衡。

2.2 锅炉核心参数自动控制策略

（1）温度自动控制：针对锅炉出水温度和炉膛温度具有大惯性、纯滞后（数十秒至数分钟）的特性，设计分级调节策略——粗调级快速响应大幅偏差，细调级消除静态余差，并引入前馈补偿，提前预判负荷扰动对温度的影响，有效抑制超调与振荡，确保温度稳定在目标值±2℃以内。（2）压力自动控制：基于压力安全阈值设定多级控制区间，采用PID调节器实时比对蒸汽压力与设定值，动态调整燃气调节阀开度以改变燃烧强度，同时协同变频水泵调节循环水量，双通道快速响应压力波动。当压力接近报警阈值时，控制系统自动触发降负荷或停机保护，杜绝超压运行风险。（3）风燃配比自动控制：根据锅炉负荷需求计算目标燃气流量，依据最佳空燃比（通常为10:1至12:1）同步调节助燃风机转速及风门开度，并在烟气出口安装氧含量传感器作为校正信号，对空燃比进行闭环修正，确保燃气充分燃烧，将排烟热损失降至最低，热效率提升1%~3%[3]。

2.3 主流自动控制算法应用与优化

（1）传统PID控制算法：常规PID控制器基于偏差的比例（P）、积分（I）、微分（D）线性组合输出控制量，在锅炉稳态运行阶段具有结构简单、参数整定成熟、无静差等优点；但其参数固定，面对负荷频繁波动及强干扰工况时，动态响应滞后明显，超调量增大，抗扰能力不足。（2）模糊PID控制算法优化：引入模糊控制推理机制，以偏差和偏差变化率为输入，通过隶属度函数和预设模糊规则动态调整PID三个参数（Kp、Ki、Kd），实现参数自整定。该算法融合了模糊控制对复杂工况适应性强的优势和PID高精度稳态性能，能有效应对锅炉负荷骤变等非线性工况，显著提升响应速度和鲁棒性。（3）算法仿真对比分析：在MATLAB/Simulink环境下搭建锅炉温度控制仿真模型，分别加载传统PID与模糊PID进行阶跃响应测试。仿真结果表明：模糊PID算法平均调节时间缩短约30%，超调量由传统PID的12%降至5%以内，抗干扰恢复时间减少40%，验证了优化算法在动态稳定性与控制精度上的明显优势。

2.4 自动控制系统安全保护技术

（1）常规故障联锁保护：针对锅炉超温（温度超上限）、超压（压力超上限）、缺水（水位低于低限）、熄火（火焰检测信号丢失）及燃气泄漏（浓度超标）等常见故障，系统配置硬接线继电器联锁回路与PLC软件联锁双重保护机制，故障触发后1秒内自动切断燃气电磁阀、停止风机、输出声光报警，确保危险工况下快速安全停机。（2）过载与异常工况保护：设置多级负荷预警门限，当锅炉持续超出额定负荷110%以上或参数波动率超过设定阈值时，系统自动执行降负荷指令，逐步削减燃气输入至安全区间，同时启动参数异常诊断，防止设备长时间过载运行造成机械疲劳或材料损伤[4]。（3）系统容错与应急控制：关键传感器（压力、水位）采用冗余配置，主通道故障时无扰切换至备用通道；控制器内置看门狗与程序自复位功能，短暂故障时可自动恢复并延续前态输出；极端情况下（控制器死机或通信全断），执行机构按预设安全位置（如燃气阀全关、风机关闭）自锁保持，避免突发停机引发二次事故，最大限度保障系统安全。

3 工程应用与技术效果验证

3.1 工程应用项目概况

（1）项目基本参数：本次优化测控技术应用于某市集中供热站两台14MW燃气热水锅炉（型号WNS14-1.25-Y/Q），额定出水温度95℃，回水温度70℃，额定压力1.25MPa，燃气消耗量约1600Nm³/h，供热覆盖面积约50万平方米，为居民社区及周边工业企业提供冬季供暖热源。（2）原有设备存在问题：改造前测量仪表以传统机械式为主，温度测量误差达±3℃，压力变送器精度仅为±0.5%FS，且无智能自诊断功能；控制系统采用常规PID算法，负荷波动时温度超调量达15%以上，调节恢复时间超过15分钟；年均能耗偏高，不完全燃烧导致排烟CO浓度超标，且安全联锁保护响应迟缓，故障停机率较高。（3）技术改造方案：全面更换高精度智能仪表（精度±0.1%FS），引入模糊PID控制算法升级原有PLC控制程序，加装烟气含氧量闭环校正模块优化风燃配比，同

步完善超温、超压、熄火等多重联锁保护机制。改造分三个阶段实施：前期完成仪表替换与线路铺设，中期完成控制器程序升级与单机调试，后期进行系统联调与试运行验证，总工期45天。

3.2 测控系统安装与调试

（1）硬件设备安装：完成2台智能压力变送器、6支铂热电阻（Pt100）、2台涡街流量计、4套电动调节阀及1台上位监控工控机的现场安装，按规范敷设屏蔽信号线缆并完成接地处理，经72小时带电老化测试，确认硬件运行稳定无异常。（2）控制系统程序调试：编写模糊PID控制算法程序模块，完成参数初始化与隶属度函数设定；逐项调试联锁保护逻辑（熄火响应时间 ≤ 1s、超压自动切气等），并通过模拟输入信号进行全流程仿真测试，排查并修复程序逻辑漏洞3处，确保程序运行可靠。（3）系统整体联调：依次进行冷态空载试运行（24小时）和热态带负荷联动调试（72小时），校验仪表检测值与标准器比对误差，测试控制指令从发出到执行机构动作的延迟时间（＜200ms），并对超温、超压故障进行模拟触发试验，确认保护动作灵敏可靠，满足设计要求[5]。

3.3 应用效果数据对比分析

（1）测量精度对比：改造后出水温度测量误差由±3℃收窄至±0.3℃，蒸汽压力误差由±0.02MPa降至±0.002MPa，燃气流量计量偏差由±2.5%降至±0.8%，各参数测量精度等级显著提升，为精准控制提供了可靠数据基础。（2）控制性能对比：改造后锅炉出水温度在负荷阶跃扰动下超调量由改造前的15.6%降至4.2%，调节恢复时间由16分钟缩短至6分钟，稳态误差控制在±0.5℃以内，各负荷区间均能维持稳定运行，控制品质明显改善。（3）节能与安全效果对比：经整个采暖季统计，燃气消耗量同比降低6.8%，节省天然气约12.5万Nm^3，排烟CO浓度由280ppm降至65ppm，故障停机次数由改造前年均6次降至1次，实现了良好的节能效益与运行安全性。

3.4 应用存在的问题与改进方向

（1）实际应用现存问题：长期运行（超过8个月）后，部分智能仪表出现零点漂移现象，精度有所下降；此外，模糊PID控制在极端低温工况（环境温度低于-15℃）下的参数适配性有待加强，偶有小幅振荡现象出现。（2）后续技术改进方向：下一步计划引入物联网（IoT）技术，通过4G/5G网络将锅炉运行数据上传至云平台，结合大数据分析建立仪表性能衰退模型，实现测量偏差的预测性补偿；同时探索基于深度学习（LSTM神经网络）的自适应控制算法，使系统具备工况识别与参数自优化能力，逐步向智能化、无人值守方向升级。

结束语

本文完成了燃气锅炉仪表测量技术优化、自动控制系统设计及控制算法改良，经工程应用证实，优化方案显著提升了锅炉参数测控精度与动态调节能力，有效降低能耗与故障概率。研究明确了智能测控技术在燃气锅炉运行中的应用价值，同时指出设备长期运行漂移、极端工况适配性等现存问题。后续可结合物联网与深度学习算法优化系统，推动燃气锅炉向智能监测、自适应调控、无人值守的智慧化方向发展。

参考文献

[1]陈云峰.燃气锅炉热工仪表精准测量及自动化控制优化[J].机电工程技术,2024,53(18):156-159.

[2]张越.基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊PID温度控制[J].工业仪表与自动化装置,2024,25(05):89-94.

[3]王鹏,刘勇.燃气锅炉热工仪表误差分析与自控系统优化设计[J].热能动力工程,2023,38(08):112-118.

[4]李浩然,陈峰.燃气锅炉空燃比智能检测与自动调控技术研究[J].自动化技术与应用,2022,41(11):134-138.

[5]崔健.自适应控制技术在燃气锅炉燃烧系统中的应用[J].自动化应用,2025,66(17):121-124.