

工业余热锅炉压力安全监测系统设计与应用

张靖衍

河北诺聘网络科技有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]为了可以有效解决工业余热锅炉运行过程中所面临的压力参数监测滞后、安全预警不及时等问题，切实保障锅炉运行的稳定性以及生产过程中的安全性设计一套工业余热锅炉压力安全监测系统。文章研究首先对余热锅炉压力变化特性与监测需求进行了深入性的探析，构建系统总体架构，开展压力传感单元选型校准、信号调理电路设计、STM32核心控制单元开发及上位机平台搭建等关键技术研究，经调试测试，该系统可以高效实现对压力参数的精准采集，响应时间快，可以快速触发分级预警，进一步提高余热锅炉压力安全管控水平。

[关键词]工业余热锅炉；压力监测；安全预警；STM32；数据采集

DOI: 10.33142/aem.v7i12.18654 中图分类号: TK229.929 文献标识码: A

Design and Application of Pressure Safety Monitoring System for Industrial Waste Heat Boiler

ZHANG Jingyan

Hebei Nuopin Network Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In order to effectively solve the problems of pressure parameter monitoring lag and untimely safety warning faced during the operation of industrial waste heat boilers, and to effectively ensure the stability of boiler operation and the safety of production processes, a pressure safety monitoring system for industrial waste heat boilers is designed. The article first conducted an in-depth analysis of the pressure change characteristics and monitoring requirements of the waste heat boiler, constructed the overall system architecture, carried out key technical research on pressure sensing unit selection and calibration, signal conditioning circuit design, STM32 core control unit development, and upper computer platform construction. After debugging and testing, the system can efficiently achieve accurate collection of pressure parameters, with fast response time, and can quickly trigger graded warnings, further improving the pressure safety control level of the waste heat boiler.

Keywords: industrial waste heat boiler; pressure monitoring; safety warning; STM32; data collection

引言

在余热回收利用系统中工业余热锅炉作为一个核心的设备，在电力化工等多个领域中得到了广泛的应用。通过回收工业生产过程中所产生的余热资源，并借助工艺将其转化为热水或蒸汽，既可实现节能减排，又可达成能源梯级利用的重要目标。然而，余热锅炉的运行环境较为复杂，容易受水质情况、负荷、温度波动等影响，导致锅内压力出现波动，如果未及时监测到压力异常波动会增加安全事故的发生风险，不仅会导致设备损坏，生产中断，而且会造成人员伤亡。鉴于此，为了推进生产的高效进程，确保生产人员的安全，加强对余热锅炉安全监测尤为重要。目前在工业余热锅炉的应用场景中，通常使用简易的监测装置或传统的压力表对设备压力进行监测，然而常规的监测方式存在明显的短板，如缺乏主动预警机制、数据无法实时上传、测量结果的精确度不高等。随着我国工业领域自动化水平的提高，对于余热锅炉的压力安全监测也有了更为苛刻的要求，为了可以确保余热锅炉全生命周期更加安全稳定的运行，设计具有高效预警、精准分析的智能化监测系统尤为关键。

2 工业余热锅炉系统基本构成、压力监测需求分析

2.1 余热锅炉系统基本构成与原理

燃气—蒸汽联合循环电站中，燃气轮机排烟温度通常高达 500~600°C，若直接排放将造成大量热能浪费^[1]。为充分利用其排烟余热，一般采用余热锅炉回收烟气热量，产生高温高压蒸汽驱动汽轮机做功，从而有效提升机组综合效率^[2]。以 2×400MW 级 9F 燃机组为例，单台余热锅炉由低压蒸发器、低压过热器、高压蒸发器、高压过热器等受热面依次构成，串联于烟气流动方向，通过逆流传热原理，实现烟气与工质水/汽的多级换热，使锅炉出口烟温降至 120°C 以下。其中，低压蒸发受热面管束采用 SA210C 材质，高压蒸发及过热受热面管束选用 TP347H 不锈钢，耐高温且抗腐蚀性能优异^[3]。在控制系统层面，余热锅炉运行工况复杂多变，需实时监测汽包水位、蒸汽温压、烟气参数等，并根据负荷需求与燃机运行状态实施协调控制，以保证锅炉安全稳定运行^[4]。

2.2 压力变化特性分析

工业余热锅炉的压力变化主要受锅炉负荷、余热烟气流

量、运行状况等密切相关。锅炉处于正常稳定运行状态时,锅内的压力可以维持在合理区间范围之内,尽管出现波动,幅度也维持在极小的范围内。然而,当出现余热烟气量突增、给水系统运行异常、安全阀功能故障等突发状况时,压力也会随之发生异常变化。工业余热锅的压力不仅具有突发性,而且在现场容易受到温度、振动、电池等多因素的干扰,影响压力测量数据的准确性^[5]。此外,在锅炉运行的过程中,其内部介质所涉及的介质传热、传质过程存在滞后性,在一定程度上均增加了监测与控制难度。基于此,基于安全管理要求以及余热锅炉运行的主要特点,部件的系统需要满足高精度测量、高测点覆盖、实时性传输等监测需求。

2.3 系统核心性能指标

基于上述需求分析,确定系统核心性能指标如下表所示:

表1 系统核心性能指标

性能指标	参数要求
测量范围	0~6MPa (可根据实际工况调整)
测量误差	≤±0.5%FS
响应时间	≤200ms
数据传输延迟	≤500ms
预警方式	本地声/光预警、远程短信/平台预警
预警响应时间	≤1s
工作环境温度	-20~85°C
工作环境湿度	≤95%RH (无凝露)

3 系统总体架构设计

本系统采用分层分布式架构,自上而下分五层:

数据采集层:由安装在余热锅炉关键部位的压力传感器组成,同步采集不同部位压力参数,信号为模拟信号。

信号处理层:对模拟信号调理消除干扰、放大微弱信号,再经AD转换模块转为数字信号。

数据传输层:有线(工业以太网)与无线(LoRa模块)结合,实现各层数据交互与指令传输。

监测控制层:核心部分,核心控制单元用STM32单片机,对比信号判断异常并生成预警与指令;上位机监测平台用LabVIEW开发,具多种功能。

执行层:由安全阀等执行机构组成,接收指令主动调控余热锅炉压力。

4 系统关键硬件设计

4.1 压力传感单元设计

结合余热锅炉工况,选扩散硅压力传感器采集压力,其精度高、响应快、抗干扰强、工作温度范围宽(-40~125°C)^[6]。按监测点压力范围选型:汽包用0~6MPa,过热器出口用0~4MPa,省煤器入口用0~2MPa。用标准压力源多点(0%、25%、50%、75%、100%量程)校准传感器,记录输出电压,用最小二乘法拟合校准曲线修

正误差。校准公式。校准公式如下:

$$P_{\text{真实}} = k \cdot U_{\text{输出}} + b \quad (1)$$

$P_{\text{真实}} = kU_{\text{输出}} + b$ ($P_{\text{真实}}$ 为真实压力, k 为校准系数, $U_{\text{输出}}$ 为传感器输出电压, b 为校准偏移量)。

4.2 信号调理电路设计

对于传感器输出的微弱模拟信号容易受到电池干扰,且信号强度不足的难题。设计涵盖前置放大、滤波以及二次放大三个核心功能模块的信号调理电路^[7]。在前置放大电路功能板块中,优先选用OP07,放大10倍,其低失调电压等特性保稳定精度;滤波用RC低通,截止频率10Hz,合理选参数并屏蔽接地降干扰;二次放大用LM324,放大至0~5V,放大倍数可调。

4.3 核心控制单元设计

核心控制单元选STM32F103ZET6单片机(基于ARM Cortex-M3内核,最高72MHz时钟,外设丰富),硬件电路含电源、AD转换接口、通信、预警电路等。

电源电路用AC-DC模块将220V交流转12V直流,再用LM1117转3.3V直流供电,加电容滤波稳压降噪。用单片机内置12位ADC转换信号,调理电路模拟信号经接口输入,转换精度0.00122V/LSB满足要求。通信接口有UART(MAX3232芯片,用于与上位机有线传输)和LoRa无线(SX1278芯片,433MHz频段,用于与执行层无线指令传输)。预警电路由蜂鸣器和LED指示灯组成,压力异常时单片机输出高电平控制发声闪烁,不同预警等级对应不同频率,方便现场判断。

5 系统软件设计

系统软件采用模块化设计,分下位机(基于Keil MDK用C语言开发,实现数据采集、处理、传输、预警及指令下发等功能)与上位机(基于LabVIEW图形化编程,实现数据实时显示、历史管理、阈值设置及预警等功能)两部分,通过工业以太网以Modbus-RTU协议交互,确保数据传输可靠标准化。

5.2 下位机软件设计

下位机软件含主程序及数据采集、信号处理、通信、预警判断、控制指令下发等子程序模块。系统上电先初始化配置,包括GPIO、ADC、UART、LoRa模块初始化以保正常工作。数据采集模块经ADC接口将传感器模拟信号转数字信号;信号处理模块用滑动平均滤波算法滤波,提升数据稳定性^[8]。滑动平均滤波算法公式如下:

$$P_{\text{滤波}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$P_{\text{滤波}}$ 为滤波后压力值, n 是采样点数, P_i 为第 i 次采样压力值。

预警判断模块:将滤波压力值与一、二级预警及紧急停机阈值对比,定异常等级,超不同阈值触发对应预警并下发相应控制指令,经LoRa传至执行机构调控压力。

通信模块：通过 UART 与上位机有线通信传数据，用 LoRa 与执行机构无线通信收发阈值指令、下发控制指令，以校验码确保数据完整。

5.3 上位机软件设计

上位机监测平台用 LabVIEW 开发，人机交互好、数据处理强，有数据显示、管理、阈值设置、预警提示等模块。

数据显示：以仪表盘、数值框、趋势图等实时展示各监测点压力，趋势图用波形图表绘曲线，仪表盘动态显值且异常时背景变色。

数据管理：自动存实时数据至 SQLite 数据库，可设存储周期；操作人员能按条件查询并导出为 Excel。

阈值设置：操作人员依工况设各监测点预警阈值，设好后下发至下位机存 Flash。

预警提示：压力异常时，界面弹框、蜂鸣器发声、（外接短信模块时）发短信预警。

6 系统调试与性能测试

6.1 系统调试

硬件调试：用万用表测电源电路输出电压，确保 12V 与 3.3V 稳定、误差 $\pm 0.1V$ 内；用示波器测信号调理电路输出，验证滤波与放大性能，确保信号无干扰、幅值达标；通过短接测通信接口连通性，确保 UART 与 LoRa 模块能正常传数据。

软件调试：采用分步与联调结合，先单独调试各子程序模块，如验证数据采集、预警判断子程序；再上下位机联调，确保数据传输可靠实时，上下位机指令收发准确^[9]。

6.2 性能测试

为验证系统核心性能，搭建模拟测试平台，模拟工业余热锅炉不同工况下的压力变化，对系统测量精度、响应时间、预警可靠性等指标进行测试。

6.2.1 测量精度测试

采用标准压力源为传感器提供不同压力值（覆盖各传感器测量范围），记录系统测量值与标准压力值，计算测量误差。测试结果如下表所示：

表 2 测试结果

监测点	标准压力值 (MPa)	系统测量值 (MPa)	测量误差 (MPa)	误差百分比 (%)
汽包	1.5	1.506	+0.006	0.40
	3.0	2.988	-0.012	0.40
	4.5	4.515	+0.015	0.33
	6.0	5.982	-0.018	0.30
	均值	-	-	0.36
过热器出口	1.0	1.003	+0.003	0.30
	2.0	1.994	-0.006	0.30
	3.0	3.009	+0.009	0.30
	4.0	3.988	-0.012	0.30

由测试结果可知，系统各监测点的压力测量误差百分比均 $\leq 0.5\% FS$ ，满足系统设计的测量精度要求。

通过标准压力源测试：快速改变压力值测系统响应时间，10 次测试平均为 156ms，满足实时性要求；模拟不同等级压力异常，50 次测试预警准确率 100% 且响应时间 $\leq 1s$ ，满足可靠性要求；模拟工业环境（50°C、85%RH）连续运行 72h，系统稳定，压力测量波动 $\leq 0.02\text{MPa}$ ，长期稳定性良好。

本系统实时精准监测并主动调控工业余热锅炉关键部位压力参数，提升其安全稳定性，应用效益显著，实时监测、分级预警，提前发现隐患，降低事故风险。压力异常时自动调控，减少生产中断。便于故障追溯，减少排查时间，降低设备磨损，延长寿命。提升余热回收效率，减少浪费，创造经济与社会效益。

7 提升锅炉设备管理水平措施

(1) 完善并执行锅炉管理规程。编制全面的锅炉操作、维护、检测和应急处理规程，确保每位操作人员都能熟知并严格遵循这些规程^[10]。(2) 实施专业培训计划。定期对锅炉操作及维护人员进行专业知识和技能培训，涵盖安全操作、故障诊断和应急响应等方面，确保人员具备相应的资质证书。(3) 落实定期检查与维护制度。对锅炉及其配套设施进行定期的内外部检查、清洁和保养，详细记录检查与维护情况，便于后续追踪和审查。

(4) 配置安全防护设备。安装必需的安全防护装置，如压力控制器、安全阀、水位报警器等，并定期对这些装置进行检测，确保其正常工作。(5) 开展风险评估与应急演练。定期进行锅炉运行风险评估，识别潜在风险点。制定相应的应急预案，并定期组织应急演练，提高应对突发事件的能力。

8 结论与展望

本研究设计工业余热锅炉压力安全监测系统，采用分层分布式架构，完成压力传感单元选型校准、信号调理电路设计等关键工作。系统调试显示，其测量精度高（误差 $\leq \pm 0.5\% FS$ ）、响应快（ $\leq 200\text{ms}$ ）、预警可靠（准确率 100%）、运行稳定，能满足监测需求，提升运行安全性、稳定性，降低运维成本。未来可引入 AI 算法预测压力异常趋势；拓展监测温度等参数；用 5G 优化无线通信；开发移动端 APP 提升操作便捷性。

[参考文献]

- [1] 徐国望,易彬.催化裂化余热炉主体设备腐蚀成因分析与对策[J].长炼科技,2018,11(4):45-48.
- [2] 陈阳.催化裂化装置高温烟气管道焊缝开裂原因分析及应对措施[J].石油化工设备,2024,53(4):74-77.
- [3] 黄修行,麻克栋,韦文业,等.某供热锅炉腐蚀结垢原因分析及化学清洗[J].化学工程与装备,2024,11(8):89-93.
- [4] 张世东.浅析锅炉省煤器泄露事故[J].内蒙古石油化

- 工,2015,41(11):68-70.
- [5]林张新,姚锐,韦士波.燃气轮机分布式能源技术在导热油余热锅炉项目中的应用[J].今日制造与升级,2024,12(1):127-129.
- [6]崔新房,尤德峰,赵宇龙,等.上置式烧结余热锅炉在环冷机余热回收利用实践[J].冶金动力,2023(5):114-118.
- [7]陈嵩涛,朱德力,刘军,等.焚烧炉—余热锅炉系统不同负荷下运行能效与分析[J].锅炉技术,2023,54(5):61-65.
- [8]魏铭毅,张暄博,杜伟,等.余热锅炉汽水系统泄漏分析及特征提取[J].科技与创新,2023,21(16):70-72.
- [9]刘永明.某水泥厂余热发电系统用风测试及分析[J].建材技术与应用,2023,11(1):39-41.
- [10]唐寅,闫城,朱静,等.基于传热性能变化的余热锅炉故障诊断及应用[J].热能动力工程,2022,37(10):156-161.
- 作者简介: 张靖衍 (1988.5—), 毕业院校: 河北联合大学轻工学院, 所学专业: 热能与动力工程, 当前就职单位: 河北诺聘网络科技有限公司, 职务: 职员, 职称级别: 中级。