

燃气轮机燃烧脉动压力采集监测系统设计

李明¹, 吴文逸^{2,3,4}, 丁阳¹, 谢大幸¹,
刘勇^{2,3,4}, 刘媛^{2,3,4}, 沈春章^{2,3,4}

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

3. 装备全寿命周期状态监测与健康管理技术与应用国家地方联合工程研究中心, 北京 100041;

4. 北京市高速交通工具智能诊断与健康管理重点实验室, 北京 100041)

摘要: 燃气轮机作为一种高效、清洁的动力设备, 在电力生产、船舶推进和航空航天等领域得到了广泛应用; 然而, 燃气轮机的燃烧过程极为复杂, 燃烧不稳定会导致一系列问题, 严重时甚至可能引发安全事故, 对燃烧过程产生的脉动压力进行监测是保障燃气轮机稳定和安全工作的前提; 为实现燃气轮机燃烧过程中脉动压力的实时监测以保障其安全稳定运行, 设计了一套国产化燃烧脉动压力采集监测系统; 通过高温压力传感器实时采集燃烧室动态压力信号, 结合时域分析和频域分析, 提取信号特征参数并与预设健康阈值进行比对, 实现燃烧状态的实时监控、趋势预测及异常预警; 系统采用国产龙芯处理器、高精度同步采集模块及自主开发的 QT/C++ 软件架构, 支持动态数据预处理、特征提取、长期存储及可视化展示; 实验验证表明, 系统可稳定采集高温工况下的脉动压力信号, 显著提升了燃烧效率与安全性; 该系统已应用于燃气轮机发电机组, 满足实时监测需求, 并为其它高温燃烧设备的状态监测提供了技术参考。

关键词: 燃气轮机; 脉动压力; 数据采集; 状态监测; 系统设计

Design of Collection and Monitoring System for Combustion Pulsation Pressure for Gas Turbines

LI Ming¹, WU Wenyi^{2,3,4}, DING Yang¹, XIE Daxing¹, LIU Yong^{2,3,4},
LIU Yuan^{2,3,4}, SHEN Chunzhang^{2,3,4}

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;

3. Beijing Key Laboratory of Intelligent Diagnosis and Health Management of High-speed
Vehicles, Beijing 100041, China;

4. National and Local Joint Engineering Research Center of Equipment Life Cycle PHM, Beijing 100041, China)

Abstract: As a highly efficient and clean power generation device, gas turbines are widely utilized in electricity production, marine propulsion, aerospace, and other fields. However, a gas turbine has extremely complex combustion process, and its combustion instability may lead to critical issues and potential safety hazards in severe cases. Monitoring the pulsating pressure generated during its combustion is essential to ensure the stable and safe operation of the gas turbines. To monitor the pulsating pressure during its combustion process in real time and ensure its safe operation, a domestically developed pulsating pressure acquisition and monitoring system is designed. This system employs high-temperature pressure sensors to dynamically capture real-time pressure signals from the combustion chamber, and extract key signal features by combining time-domain analysis and frequency-domain analysis. A comparison of predefined health thresholds is made to monitor the statuses of its combustion, trend prediction, and anomaly alerts in real time. The system integrates a domestic Loongson processor,

收稿日期:2025-03-17; 修回日期:2025-06-05。

作者简介:李明(1975-),男,硕士,正高级工程师。

通讯作者:吴文逸(1993-),女,博士,工程师。

引用格式:李明,吴文逸,丁阳,等. 燃气轮机燃烧脉动压力采集监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 114-122.

high-precision synchronous acquisition modules, and a self-developed QT/C++ software architecture, which provides the dynamic data preprocessing, feature extraction, long-term storage, and visualization. Experimental results show that the system can stably acquire the pulsating pressure signals under high-temperature conditions, significantly improving combustion efficiency and operational safety. The system has been successfully applied in gas turbine power units, meeting real-time monitoring requirements and providing a technical reference for monitoring the statues of other high-temperature combustion equipment.

Keywords: gas turbine; pulsating pressure; data acquisition; condition monitoring; system design

0 引言

随着我国经济的持续发展,电力需求与环境保护的压力日益增加,这促使了对高效清洁发电技术的需求增长^[1-2]。燃气轮机发电技术因其高效的联合循环、较低的环境污染、快速启动能力以及较少的占地面积和水资源消耗,受到了更多关注^[3-4]。为了进一步提高燃气轮机的工作效率,燃烧室内的燃气初始温度也在不断提升,F级燃气轮机的燃气初始温度已经超过了1 300℃,更先进的H级燃气轮机更是达到了1 426℃^[5]。对于现代燃气轮机的大功率燃烧室,燃烧过程会在很短时间内释放出大量的能量,特别是极端条件下的燃烧过程,会使得不稳定热量释放和压力波动放大和加剧^[6]。燃烧室及其相关热部件面临着更高的故障风险,影响燃烧部件的寿命甚至损坏燃烧部件,直接影响到整个系统的性能和安全性^[7-10]。燃烧脉动压力是反映燃烧稳定性的重要指标,对燃烧脉动压力进行采集和监测可以实现燃烧状态的有效监控,确保燃气轮机的安全、稳定及高效运行,对维持燃气轮机的长期可靠运行具有至关重要的作用^[11-14]。

近年来,关于燃烧振荡的基础研究工作开展较多,甘林等对固体火箭发动机非线性不稳定压强振荡信号存在多阶模态共存现象,以及模态之间存在振荡能量的传递与演化过程进行了深度分析^[15]。田寅申等研究了甲烷燃烧室空气流量和当量比的变化对燃烧自激振荡压力波动的影响,以及燃烧发出的音频信号的特征的影响及规律^[16]。刘志敏等应用燃烧原理,介绍了燃气轮机燃烧压力脉动的产生机理,并分析了燃烧压力脉动测量的关键技术以及典型的测量流程^[17]。黄伟等为检测燃气轮机燃烧室压力的异常情况及其实时压力变化趋势,提出了一种基于主元分析法(PCA, principal component analysis)、思维进化算法(MEA, mind evolutionary algorithm)和小波神经网络(WNN, wavelet neural network)相结合的模式(即PCA—MEA—WNN模型),来及时检测燃烧室压力异常情况^[18]。大多数研究较多关注燃烧振荡机理、测试技术和诊断方法,而针对燃气轮机燃烧脉动压力采集监测的研制和开发却鲜少报道。

另一方面,当前我国燃气轮机燃烧脉动压力监测系

统的研发与应用仍面临显著的技术瓶颈与进口依赖问题^[19]。据统计,高端动态压力传感器、多通道高速同步采集模块及专用分析软件等核心部件约80%依赖进口,导致设备采购成本高昂、后期维护受限,且存在关键技术“卡脖子”风险。国产传感器在长期耐受1 300℃以上高温环境时,普遍存在信号漂移、使用寿命短等问题,难以满足燃气轮机燃烧室的极端工况需求^[20]。此外,国产数据采集模块的采样率与进口设备存在显著差距,且多通道同步误差控制技术尚未突破,限制了高精度动态信号的实时捕获能力^[21]。在软件算法层面,现有国产系统多依赖传统阈值报警机制,缺乏基于机器学习或深度学习的自适应诊断模型,导致误报率高,难以区分正常波动与异常振荡,严重制约了监测系统的智能化水平^[22]。尽管国内学者在燃烧振荡机理和单一技术环节上取得了一定进展,但全链条国产化监测系统仍存在硬件自主化不足、软件智能化欠缺及行业标准体系不完善等核心问题^[23]。

针对上述现状,本文设计并开发一种国产化燃烧脉动压力采集监测系统,对采集的燃气轮机燃烧室内的脉动压力信号进行监测并进行在线处理,通过提取信号时域、频域的振动特征与阈值参数进行匹配对比,对可能存在的安全隐患进行预警提示,为后续的控制调节和应急措施提供基础和保障。本文详细介绍了该系统的整体架构和软硬件功能模块,最后针对系统功能验证问题,提供了功能验证方案和验证范围。

1 系统总体设计

燃烧脉动压力采集监测系统通过实时采集和传输燃气轮机燃烧过程的脉动压力数据,并结合数据处理技术,对与脉动压力特征相关的信息进行滤波、提取、监测和预测。若信号特征指标超过了健康阈值边界,则由监测装置提示对应通道的异常情况,最终实现对燃气轮机燃烧过程的健康状态监测和异常提醒。同时针对燃烧脉动压力数据采集和分析的国产化替代问题,开展硬件研制和技术攻关。根据以上需求,开展燃烧脉动压力采集监测系统的功能、架构、接口等设计。

1.1 系统架构

燃烧脉动压力状态监测系统涵盖了健康管理的全部功能,使来自不同厂商的硬件与软件单元具有可互换

性,增强系统集成能力。主要包括数据采集层、数据存储层、数据交换层、数据分析层和可视化层,具体架构设计如图 1 所示。

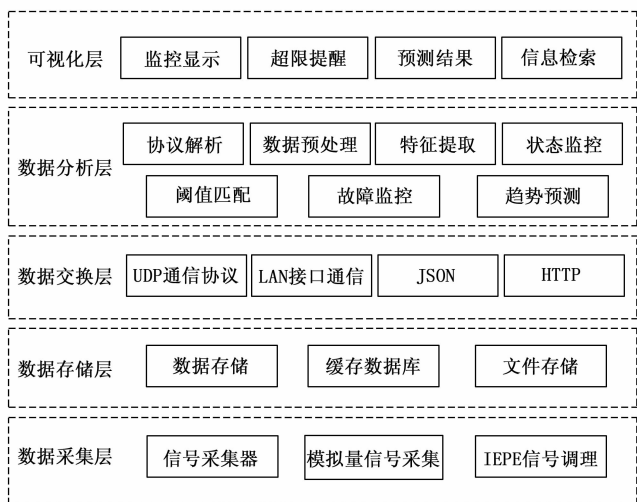


图 1 燃气轮机脉动压力采集监测系统架构

数据采集层：针对燃烧脉动压力实时采集任务，在燃烧室关键位置布局高温信号采集器和配套电荷放大器或相同技术规格的脉动压力探头，配合信号调理模块，实现模拟量信号的并行采集和调理。

数据存储层：提供系统所需的存储环境，由于采集和保存的数据量较大，故采用关系型数据库、时序数据库和缓存数据库相结合的方式，并基于国产化存储设备对监测数据和处理后的特征数据进行存储和记录，支持不同策略的长期数据存储，例如频谱峰值保护、预触发记录、触发后记录等。

数据交换层：数据交换层是压力监测系统中负责数据传输和通信的关键部分，它确保了数据能够在不同系统和组件之间高效、准确地流动。通过 UDP 通信协议和 LAN 接口实现数据的传输；JSON 可以用于封装传感器数据，使得数据在不同系统和应用程序之间传输时更加方便和标准化，HTTP 可以用于预留 Web 服务，允许用户通过浏览器或其他客户端软件访问和监控数据。

数据分析层：数据分析层是压力监测系统中对收集到的数据进行深入分析和处理的核心部分，实现监测信号的数据预处理以及时域、频域和时频域的分析计算功能。通过算法从原始数据中提取关键特征，设定特定的阈值，当数据超出这些阈值时，系统可以触发警报；利用历史数据和统计模型，预测未来的压力变化趋势，为决策提供支持。

可视化层：将数据分析的结果以直观的方式展示给用户，包括实时显示压力监测数据，使用户能够直观地了解当前的系统状态。当监测到的数据超出预设的安全

范围时，系统会发出警告，提醒用户注意。展示数据分析层预测的趋势和结果，提供用户友好的界面，使用户能够方便地检索和查看历史数据和分析报告。

层间信息交互：数据分析层通过 RESTful API 主动从存储层拉取数据，执行多维度处理。实时分析模块从 Redis 缓存中提取最新数据窗口，计算时域特征；离线分析模块则从时序数据库批量读取历史数据，开展频域分析提取特征频段的幅值及能量分布。此外，分析层利用关系型数据库中的历史特征数据集训练 LSTM 趋势预测模型，动态生成健康阈值（如幅值波动范围）。分析结果（特征参数、预测曲线、阈值边界）通过 MQTT 协议推送回存储层，更新至关系型数据库，并触发可视化层的实时刷新，形成闭环反馈。可视化层基于 WebSocket 与数据分析层建立双向通信，实现数据的动态呈现与交互。实时监控界面接收分析层推送的时域波形图、频域频谱图及瀑布图，以 1 Hz 的刷新频率展示多通道并行数据；当特征参数超出动态阈值时，分析层通过 HTTP POST 向可视化层发送告警信息（含通道号、超限值及建议措施），触发弹窗与声光提示，辅助运维人员快速响应。用户还可通过前端界面发起历史数据查询，可视化层调用存储层 API 生成趋势曲线与对比报表，支持深度分析与决策优化。为提升系统鲁棒性与扩展性，层级间设计了容错与扩展机制。数据存储层采用主从复制与分布式架构，任一节点故障时可自动切换至备份节点，避免单点失效；数据分析层通过微服务部署实现负载均衡与故障隔离，确保高可用性。在扩展性方面，数据采集层支持 PXI 总线扩展，可灵活增加采集通道；存储层通过分库分表策略支持 PB 级数据扩容；算法层提供 SDK 接口，允许集成第三方模型（如 CNN、SVM），进一步提升系统智能化水平。

1.2 功能及组成

燃烧脉动压力采集分析软件以燃气轮机燃烧脉动压力数据的采集为基础，开展监测数据的在线分析和异常提醒，数据分析模块中引入时域和频域分析方法对信号进行特征提取和监测，同时还支持快速的趋势递推，并能够长期存储监测数据便于进行历史数据分析和预测模型持续迭代优化。其中，燃烧脉动压力采集分析软件采用自主可控技术，即 QT 开发工具和 C++ 语言编程实现、模块化设计，最大程度的实现软件的扩展性和国产化，提升数据监控的实时性。根据燃烧脉动压力状态监测系统架构设计的软硬件功能，实现动态信号的数据采集、数据解析、数据处理、数据长期存储和 AI 算法模型集成运算等功能，其功能组成如图 2 所示。

2 硬件设计

燃气轮机燃烧脉动压力采集监测系统硬件部分采用

1 Mbps, 能够对收发信号及流量控制信号 CTSA、RT-SA、DCDA、DSRA、RIA 等进行驱动, 其工作温度达到 $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$; 指标完全能够满足设计需求, 电路原理框图如图 6 所示。

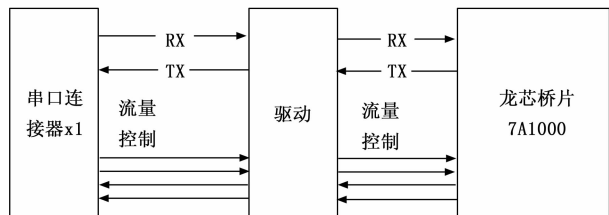


图 6 USB 转 RS232 电路原理框图

2.2 高速动态信号同步采集模块

高温压力传感器信号即压电晶体输出的电荷信号, 经电荷放大器调理放大后输出电压信号。该电压信号由多通道模拟电压信号同步采集功能电路进行采集。多通道模拟电压信号同步采集功能电路主要包括保护电路、差分转单端电路、增益调整电路、抗混叠滤波、ADC 差分驱动电路以及 ADC 电路, 如图 7 所示。

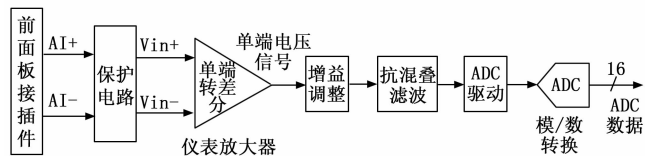


图 7 模拟输入通道功能框图

其中保护电路实现对外部输入信号的差分 and 共模保护, 同时实现射频滤波功能; 单端转差分电路将输入的差分信号转换为单端信号, 并提供足够高的输入阻抗; 增益调整电路, 可以实现对输入信号进行增益调整, 提供 4 个增益, 分别为 1、2、5、10, 对应的量程分别为 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 2\text{ V}$ 和 $\pm 1\text{ V}$; 抗混叠滤波电路, 提供 2 阶单位增益的低通滤波器; ADC 驱动电路将被测信号调理至 ADC 测量范围, 并将输入信号转换为 ADC 能够测量的差分信号; ADC 电路实现模拟信号到 16 位数字信号的转换。

保护电路、射频滤波及差分转单端电路如图 8 所示。

其中保护电路由钳位二极管和限流电阻组成。钳位二极管选择低漏电流双二极管 BAV199, 其额定电流 150 mA, 在 75 V 电压时漏电流 2 nA。限流电阻选择封装 1210, 阻值 5.1 k 欧姆电阻。该电阻额定功率 0.5 W, 在其额定功率时其压降约 50.5 V, 配合钳位电压 $\pm 15\text{ V}$, 可以实现 $\pm 65\text{ V}$ 的输入保护。

为提高电容精度造成电路不平衡, 从而引起交流共模抑制比下降的问题, 需要设定 C1 容值为 C2 的 10 倍, 从而实现将电容引起的误差降低 20 倍的效果。此

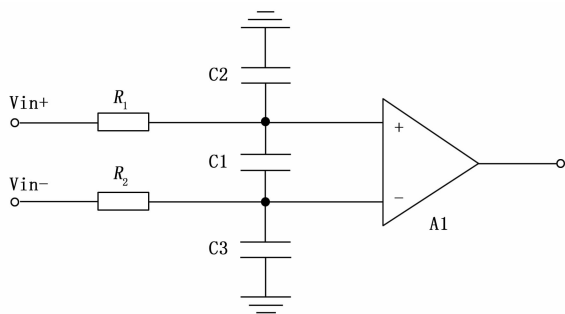


图 8 保护电路、射频滤波及差分转单端电路

时 C1 选为 1 nF、精度 2%, 根据公式可知差分信号带宽约为 10 kHz。当对单端信号进行测量时, 信号带宽根据公式计算可知, 约 28 kHz, 亦可以满足声音以及其他振动信号传输需求。

由于目前国产可编程仪表放大器不能满足项目增益要求, 故本设计增益调理电路采用 2 级运放和模拟开关的组合, 如图 9 所示, 产生 1、2、5、10 倍增益, 实现 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 2\text{ V}$ 、 $\pm 1\text{ V}$ 量程信号的增益调理。该电路由于模拟开关导通阻抗位于第一级运放的反馈回路, 该运放工作于电压跟随状态, 故模拟开关的导通阻抗不影响增益精度。该电路运放选用芯片 F825, 该芯片与 ADI 公司 AD825 兼容, 其单位增益带宽 26 MHz, 满足 1 MHz 的带宽指标。

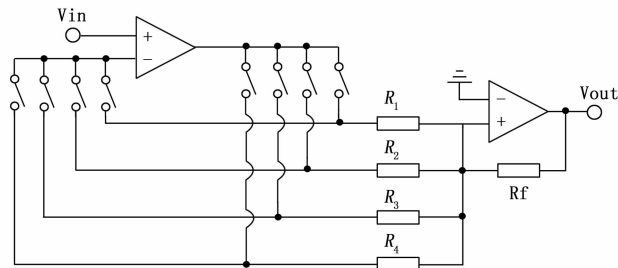


图 9 可编程增益放大电路

为了从噪声中有效的提取被测信号, 本设计采用低通滤波器来滤除被测信号带宽以外的所有信号, 不仅可以提高测量电路的信噪比, 而且具有抗混叠作用。低通滤波器阶数采用 2 阶, 根据电路参数可知, 截止频率约为 1.1 MHz。

该滤波器采用单位增益设计, 电阻电容的选择不影响运放温度特性。有利于提高采集设备在整个温度范围内的增益精度。本方案选用的 16 bit 高精度模数转换芯片 SAD7606EN, ADC 内置 8 个 16 bit 的快速、低功耗逐次逼近型 ADC, 支持 8 个通道同步采样。每个通道 ADC 的转换速率高达 200 kSPS。ADC 采用 5 V 电源供电, 即可支持转换 $\pm 10\text{ V}$ 和 $\pm 5\text{ V}$ 的真双极性输入信号。

3 软件设计

根据燃气轮机燃烧脉动压力采集监测系统的需求, 通过设备和系统布置的传感器获取设备信号, 对燃烧室的脉动压力振动信号进行采集, 并对状态识别所需的信号特征参数进行特征提取, 以获得可应用于燃烧状态判别特征指标, 并用于进一步的故障预警和预测功能。

3.1 数据在线处理功能

针对采集到的燃气轮机燃烧脉动压力振动数据, 需要对其进行处理, 以挖掘信号中包含的设备状态信息, 以更明晰的视角对燃气轮机的燃烧状态进行监测和预测, 主要包括数据预处理、特征值提取和趋势预测等功能。

3.1.1 动态信号采集

燃气轮机燃烧脉动压力采集监测系统的动态信号采集驱动主要包括 A/D 采集功能、校准功能等; 通过驱动函数进行参数配置, 或发出操作指令, 通过 PXI 总线对 FPGA 发送参数及功能指令, 读取 AD 采集数据, 进行脉动压力振动信号测量值计算和校准。

3.1.2 数据预处理

在监测过程中, 数据往往会受到多种外部因素的干扰, 导致数据表现出非稳定性, 并且可能包含缺失值或错误值。同时, 系统自身也可能产生不稳定的信号, 使得监测数据缺乏连续性, 这些因素都为监测任务带来了挑战。

为了提升数据的准确性并减少数据处理所需的时间, 必须对燃气轮机工作过程中采集到的原始监测数据实施预处理, 输出经过清洗和准备的数据, 这些数据随后会被送入特征提取和趋势预测等后续处理单元。预处理的主要内容包括识别并处理异常值以及填补数据中的空白, 采用剔除野值、滤波等方法滤除杂波干扰。

3.1.3 特征值提取

特征提取是燃烧脉动压力状态监测中至关重要的步骤, 有效的特征提取方法可以降低振动信号中噪声等无用信息的影响, 提取出反映设备状态的有效信息, 用于设备异常检测。系统所采用的特征提取方法包括时域、频域的特征指标提取和跟踪计算, 以获得可应用于后续阈值比对以及异常提醒所需的特征信号。

1) 时域特征指标计算:

特征指标计算可以对时域信号的全局特性进行良好反馈, 对预处理后的燃烧脉动压力振动信号进行特征指标计算, 包括最大值、最小值、峰峰值、方差、标准差、均方根、歪度、峭度等常用特征指标, 并与正常工作状态下的特征指标进行比对, 以及时发现异常。

2) 频域特征提取:

由于燃烧过程通常呈现不稳定性, 仅通过时域特征指标的计算难以全面捕捉非稳态下的燃烧特性。根据燃

烧振荡机理, 燃烧不稳定通常表现为燃烧室内低频、中频和高频脉动压力幅值超出限定值。因此在本系统中, 在进行频域特征提取之前, 需要在系统中根据经验设置好各特征频段的上下截至频率, 让监测的脉动压力振动信号分别经过不同的带通滤波器后, 计算对应频段滤波信号经过快速傅里叶变换 (FFT, fast fourier transform)^[24] 处理后的峰量频率及幅值, 并进行长期跟踪和监测, 其工作流程如图 10 所示。

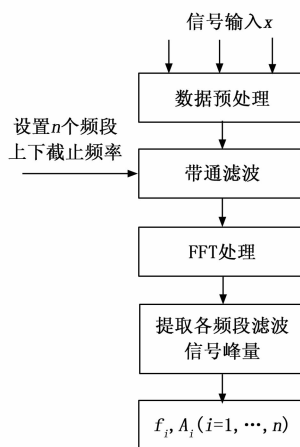


图 10 频域特征提取流程

此外, 系统中嵌入了多种图谱分析功能, 主要包括时域波形图、频谱图、瀑布图、趋势图、倒谱图、相关趋势图等。时域波形以时间为横坐标变量, 反映信号的变化。频谱图用来显示信号的频率成分, 横轴为频率轴, 纵轴为幅值轴。瀑布图可显示设备在某一段时间内通道的各频率成分的大小随时间的变化趋势, 清楚地看到各频率成分随时间的变化情况。趋势图可用来揭示被监测参数在相对较长的一段时间内的变化趋势。应用于趋势图的变量参数计可以是过程量参数, 横坐标为监测时间轴, 纵坐标为监测时间所对应监测数据的统计值。倒频谱可以处理复杂频谱图上的周期结构, 对于分析具有同族谐频或异族谐频、多成分边频等复杂信号非常有效。相关趋势图显示某一段时间内各种信号变量相互之间的变化关系, 其横坐标和纵坐标由用户任意选择。

3.1.4 特征趋势预测

特征趋势预测提供燃气轮机燃烧脉动压力频域特征值的预测界面, 能够实现根据所需预测时间尺度, 对历史特征数据进行趋势递推和预测曲线的结果展示, 以及与历史数据的对比功能。

趋势预测功能的实现主要利用存储的燃烧脉动压力振动信号各特征频段的最大峰幅值结果作为历史数据, 利用系统并发进程加载不同的预测模型, 按照算法模型的 Json 定义将内存中记录的动态数组推送到预测算法文件进行计算, 并将计算结果反馈运行环境输出, 预测

模型集成运算功能原理如图 11 所示。该功能模块不仅可以清晰观察脉动特征的变化趋势，还能够预测异常发生的时间，对燃烧异常状态进行预判，为相关人员进行参数调控预留出更多时间。

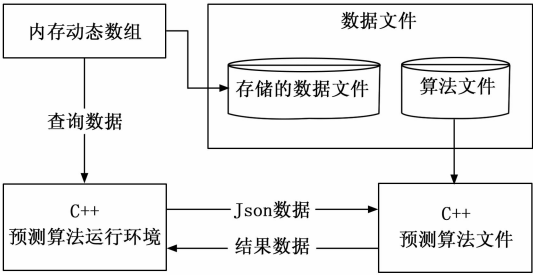


图 11 趋势预测算法集成运算工作原理图

3.2 燃烧状态监控功能

燃烧脉动压力采集监测系统的燃烧状态监控功包括燃烧过程的关键参数监控和异常监测两个部分。

燃烧过程的关键参数包括原始监测参数、时域特征指标、频域特征参数和引起异常报警的关键参数健康阈值。关键参数监控主要对燃烧过程中采集的实时过程进行跟踪、记录和显示，以确保用户及时掌握燃气轮机当前工作的实时状态以及变化情况。异常监测主要通过将时域特征指标、频域特征参数、频域预测参数与对应的健康阈值进行实时比对，若超出限值，则系统触发超限预警提示，并反馈超限通道及超限参数信息，异常监测流程如图 12 所示。

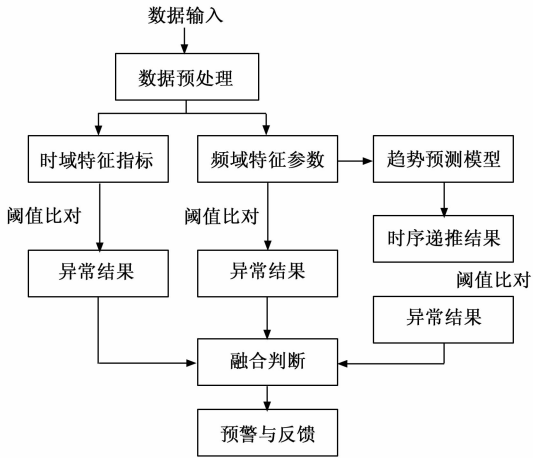


图 12 关键参数异常监测流程图

3.3 数据长期存储功能

燃烧脉动压力采集监测系统采用独立线程持续将内存中的动态数据保存成数据文件。长期存储的动态数据文件按照日、周、月、年等进行抽样存储；同时也能够按照不同策略选择数据进行长期存储，例如频谱峰值保护、预触发记录、触发后记录等。

4 实验结果与分析

为验证燃烧脉动压力采集监测系统的性能与可靠性，本研究开展了全面的实验测试，涵盖系统关键参数验证、测试方法设计、功能效果评估及结果分析。本节详细阐述系统实现的主要参数、测试方法、实验效果及讨论分析。

4.1 系统主要参数和测试方法

系统硬件与软件的核心参数如表 1 所示，实验在燃气轮机燃烧室现场进行，测试装置如图 13 所示。在燃烧室关键位置安装 6 个高温脉动压力传感器，通过电荷放大器连接至采集模块，系统以 200 kSPS 的采样率同步采集 8 通道信号，持续记录燃气轮机启动、稳态运行及负载突变三种工况下的脉动压力数据，通过模拟燃烧不稳定工况，验证系统对时域峰峰值、频段幅值超限的预警功能。

表 1 系统硬件与软件的核心参数

模块	参数名称	指标
高速动态信号采集模块	采样率	200 kSPS(同步 8 通道)
	分辨率	16 bit
	输入量程	±1~±10 V(可编程增益)
	带宽	1.1 MHz(抗混叠滤波后)
高温压力传感器	温度范围	-40~300 ℃
	灵敏度	5 pC/kPa
嵌入式控制器模块	处理器主频	1.5 GHz(龙芯 3A3000)
	数据存储容量	1 TB(支持时序数据库与缓存数据库)
软件分析模块	特征提取频率	1 kHz(时域与频域并行计算)
	预警响应延迟	< 100 ms

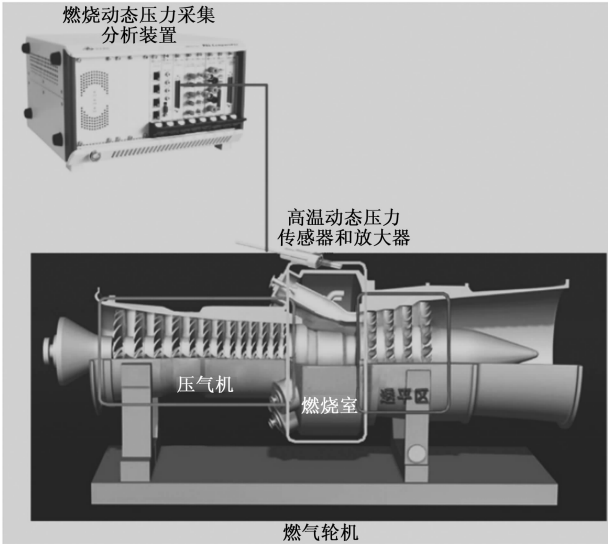


图 13 燃烧脉动压力采集监测系统验证环境

4.2 功能验证范围

在将燃烧脉动压力采集监测系统配置于燃烧车间后，进行了详尽的功能验证，以确保系统的性能满足设

计要求和用户需求主要包括以下几个方面。

1) 覆盖性验证：通过对比系统实现的功能与最初设定的用户需求规格说明书，验证系统是否全面覆盖了所有预期的功能点。重点检查了系统是否能够准确响应用户的操作指令，并提供所需的数据和服务。

2) 协调性验证：评估各个功能模块（如数据采集模块、信号处理模块、数据分析模块等）以及子单元之间的交互情况，确保它们能够无缝协作，避免数据丢失或处理延迟。特别关注了不同模块之间的数据传输效率和一致性，确保整个系统的稳定运行。

3) 正确性验证：通过对系统进行严格的测试，验证其功能设计和操作逻辑是否符合预期。包括但不限于输入输出的正确性、算法的精确性、边界条件的处理等。确保系统在各种工况下都能正确执行任务，提供可靠的结果。

4) 人机交互功能：评估系统的用户界面设计，确保其直观易用，操作简便。重点检查了界面布局的合理性、信息提示的清晰度、操作反馈的及时性等方面，进一步优化界面设计和交互流程。

5) 数据采集与监测：验证系统在不同运行工况（如启动、稳态运行、负载变化等）下，能否稳定、准确地采集和记录燃烧室内的脉动压力数据。确保系统能够在复杂工况下保持高精度和高可靠性。

6) 数据处理与分析：测试系统的数据预处理能力，包括滤波、去噪、归一化等操作，确保原始数据的质量。同时，验证系统能否实时计算关键特征指标（如均值、方差、频谱特性等），并进行特征趋势的递推分析，为后续的故障诊断和预测提供依据。

7) 可视化展示与异常提示：评估系统的可视化功能，确保其能够以图表、曲线、仪表盘等形式直观展示监测数据和分析结果。验证系统的异常检测和报警功能，确保在监测到异常情况时，系统能够及时发出警报，并提供详细的异常信息和建议措施，帮助用户迅速采取行动，防止潜在问题扩大。

4.3 结果分析和讨论

通过在燃烧室各监测点布置燃烧脉动压力信号采集传感器，对燃气轮机工作状态下的脉动压力信号进行采集。经过预处理以及时频域指标的计算，各通道的信号特征分析结果及对应特征分量幅值的监控展示如图 14 至和图 16 所示。

图 14 展示了各通道在不同频率下的脉动压力幅值分布，能够明确识别出燃烧过程中主要的脉动频率成分。每个通道有多个明显的峰值频率点，这些频率对应燃烧室内不同模式的燃烧振荡，如低频热声振荡、中频涡脱落引起的脉动以及高频燃烧噪声等，反映了燃烧过

程的复杂性和多样性。不同通道安装位置的不同使得频域特性存在差异，通过对比各通道的频域结果，可以了解燃烧室内部不同区域的燃烧稳定性情况，为燃烧室内部的燃烧组织和优化提供参考依据。

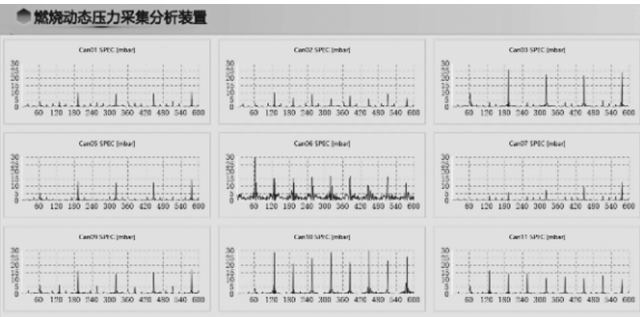


图 14 监测数据频域分析结果

图 15 以 1 秒的刷新频率实时展示了各通道的特征峰量幅值，直观反映了燃气轮机燃烧过程中的脉动压力实时状态。用户可以实时观察到各通道关键特征峰量的波动情况，及时掌握燃烧过程的动态变化，确保燃烧过程始终处于稳定状态。当某一通道的特征峰量幅值接近或超过阈值上限时，系统能够及时发出警报。



图 15 采集监测系统特征监测结果

图 16 展示了基于历史数据对未来特征幅值的趋势预测，从图中可以看出，系统能够对各通道的特征幅值变化趋势做出一定的预估，并且预测曲线与实际数据走向具有一定的吻合度。这表明所采用的趋势预测算法能够有效利用历史数据中的规律，对未来燃烧脉动压力的变化趋势进行合理推测，为提前采取措施预防燃烧不稳定提供了有力支持。

5 总结与展望

5.1 总结

本文介绍了一种适用于燃气轮机的国产化燃烧脉动压力采集监测系统，该系统不仅满足了对燃气轮机高效、安全运行的需求，也体现了我国在高端装备制造业上的进步。通过自主研发的硬件和软件技术，系统实现了从数据获取、分析处理到反馈预警的全过程覆盖，确

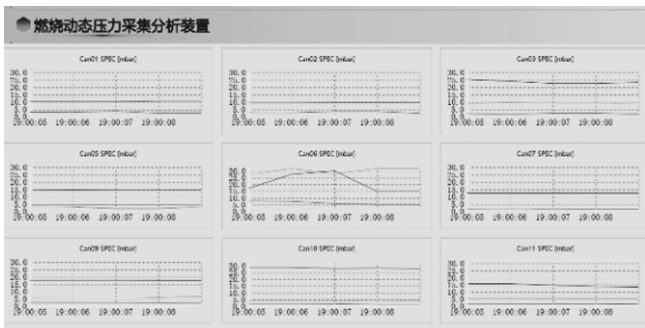


图 16 采集监测系统特征预测结果

保了系统的自主可控性和可靠性。采用高精度传感器和高速数据采集模块,系统能够实现实时数据采集和在线处理,快速响应燃烧过程的变化结合时域、频域及趋势预测等高级分析技术,为燃烧状态评估提供了科学依据,帮助用户提前识别潜在问题。

5.2 展望

通过对燃烧脉动压力的有效监控,系统显著提高了燃气轮机的安全性和工作效率,降低了维护成本和污染物排放,展示了重要的实际意义和广泛的应用前景。系统可在以下方向进一步拓展应用潜力与技术深度。其一,针对不同型号燃气轮机的燃烧室结构与工况差异,探索与现有热力参数监测系统、振动监测系统的数据融合,构建燃气轮机全状态综合监测平台,实现燃烧、机械、热力等多维度故障的协同诊断与根因溯源。其二,深化智能化技术集成,利用多机组运行数据联合训练模型,解决小样本场景下的预测精度问题。其三,推动行业标准化与生态共建,联合上下游厂商制定燃烧脉动压力健康阈值、通信协议与数据库接口标准,促进监测系统的跨平台兼容与快速推广。通过上述改进,系统有望从单一功能监测向综合智能运维演进,为高温动力装备的状态评估与安全保障提供更广泛的技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨志鹏,杨景祺,章伟杰. 国外燃气轮机燃烧监测系统的分析对比 [J]. 发电设备, 2017, 31 (4): 234-239.
- [2] 辛 昆,林建成,张久明,等. 燃料电池与燃气轮机集成氢能发电技术研究 [J]. 东北电力技术, 2024, 45 (11): 1-6.
- [3] 伍赛特. 重型燃气轮机研究现状与技术发展趋势展望 [J]. 机电产品开发与创新, 2019, 32 (2): 65-67.
- [4] 刘 帅,刘玉春. 重型燃气轮机发展现状与展望 [J]. 电站系统工程, 2018, 34 (5): 61-63.
- [5] 阎保康. 国内外燃气轮机发电技术的进展与前景 [J]. 浙江电力, 2000 (3): 10-13.
- [6] 王子晋. 西门子 SGT5-4000F 机组燃烧不稳定的调整与应对分析 [J]. 电气技术, 2016 (7): 126-128.

- [7] 顾正皓,张 宝,张浩权,等. 燃气轮机燃烧振荡现象及诊断方法 [J]. 浙江电力, 2014, 33 (10): 45-48.
- [8] 叶家良,胡立生. 基于 FPGA 的燃烧动态监测系统的设计 [J]. 化工自动化及仪表, 2018, 45 (3): 201-204.
- [9] 高 磊,汪 军,GAO,等. 燃气轮机燃烧室的现状及发展趋势 [J]. 能源研究与信息, 2017, 33 (3): 8.
- [10] NAM J, YOH JJ. A numerical investigation of the effects of hydrogen addition on combustion instability inside a partially-premixed swirl combustor [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115478.
- [11] 杨 懿,蹇 玥,贾志杰,等. 液体火箭发动机试验脉动压力数据分析方法研究 [J]. 宇航计测技术, 2020, 40 (6): 43-50.
- [12] 张澄宇. 航空发动机加力燃烧室不稳定燃烧机理与控制方法研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- [13] 张自来. 燃气轮机健康状态的气路与声音诊断方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [14] REA S, JAMES S, GOY C, et al. On-line combustion monitoring on dry low no, industrial gas turbines [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14 (7): 1123-1130.
- [15] 甘 林,张翔宇,金秉宁,等. 非线性燃烧不稳定振荡幅值演化特征信号辨识方法研究 [J]. 固体火箭技术, 2023, 46 (1): 16-24.
- [16] 田寅申,葛 冰,臧述升,等. 实验研究不同燃烧工况对燃烧自激振荡及音频特征的影响 [J]. 热能动力工程, 2017, 32 (10): 52-58.
- [17] 刘志敏,丁 阳,徐婷婷,等. 燃气轮机燃烧压力脉动与测量关键技术研究 [J]. 华电技术, 2019, 41 (9): 1-5.
- [18] 黄 伟,李常伟,席建忠. 基于 PCA-MEA-WNN 模型的燃烧不稳定性检测方法 [J]. 动力工程学报, 2021, 41 (4): 286-293.
- [19] 沈鹏飞,黄之成,金宇航,等. 燃气轮机系统特征及国内发展现状与展望 [J]. 内燃机与配件, 2025, (3): 137-139.
- [20] 张 强,郭 荣,陈荣泽,等. 智能电厂仪表和传感器技术与趋势研究 [J]. 仪器仪表用户, 2021, 28 (3): 83-86.
- [21] 武林尧. 多功能数据采集卡关键技术研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2024.
- [22] 刘 娇,刘金福,于达仁. 燃气轮机性能监测诊断技术研究综述 [J]. 燃气轮机技术, 2017, 30 (4): 1-8.
- [23] 范雪飞,王思远,刘传亮,等. 国内重型燃气轮机辅助系统的发展现状 [J]. 发电设备, 2021, 35 (3): 207-212.
- [24] SHABBIR M S, ANWER N, AHMAD F, et al. Condition monitoring and fault diagnosis of gas turbine engines using vibration signal analysis: A review [J]. Energies, 2021, 14 (7): 1865.