

高温高压工况下智能压力仪表的精度优化与稳定性分析

梁春雨

中海石油（中国）有限公司湛江分公司，广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ME.2026010040

摘 要： 针对南海区域某生产平台高温高压工况下智能压力仪表面临的精度衰减与稳定性下降问题，本文深入探讨了温度与压力的耦合效应机理，并提出了系统性的优化方案。通过建立温度-压力-输出误差三维耦合模型，分析了材料特性漂移与非线性变形对测量精度的影响；在此基础上，采用蓝宝石、碳化硅等宽禁带半导体材料替代传统硅材料，并利用 ANSYS 等仿真软件对敏感膜片及封装结构进行优化设计，从物理层面提升了仪表的耐温压性能与结构稳定性。针对硬件电路设计了抗干扰方案，选用军品级耐高温元件，构建了基于高温兼容型 ADC 与 MCU 的精密数据采集系统，并采取多重屏蔽与滤波措施以保障电磁兼容性。在软件算法层面，提出 BP 神经网络与支持向量机（SVM）相结合的混合补偿算法，通过对实验采集数据进行清洗、滤波及归一化处理，实现了对传感器多因素耦合误差的精准修正，并完成了算法的嵌入式移植与实时性优化。

关 键 词： 高温高压；智能压力仪表；耦合效应；结构优化

Accuracy Optimization and Stability Analysis of Intelligent Pressure Instruments under High-Temperature and High-Pressure Conditions

Liang Chunyu

Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： In response to the issues of accuracy degradation and stability decline faced by intelligent pressure instruments under high-temperature and high-pressure conditions on a production platform in the South China Sea, this paper delves into the mechanism of the coupling effect between temperature and pressure and proposes a systematic optimization plan. By establishing a three-dimensional coupling model of temperature-pressure-output error, the impact of material property drift and nonlinear deformation on measurement accuracy is analyzed. Based on this, wide-bandgap semiconductor materials such as sapphire and silicon carbide are used to replace traditional silicon materials, and simulation software like ANSYS is employed to optimize the design of sensitive diaphragms and packaging structures, enhancing the temperature and pressure resistance and structural stability of the instruments at the physical level. An anti-interference scheme is designed for the hardware circuit, utilizing military-grade high-temperature-resistant components to construct a precise data acquisition system based on high-temperature-compatible ADCs and MCUs, and implementing multiple shielding and filtering measures to ensure electromagnetic compatibility. At the software algorithm level, a hybrid compensation algorithm combining BP neural networks and support vector machines (SVMs) is proposed. Through cleaning, filtering, and normalization of experimentally collected data, precise correction of multi-factor coupling errors in the sensors is achieved, along with embedded transplantation and real-time optimization of the algorithm.

Keywords： high-temperature and high-pressure; intelligent pressure instruments; coupling effect; structural optimization

引言

传统的压力仪表在面临高温高压工况时，常因敏感元件材料特性漂移、结构发生非线性变形以及电路性能衰减等问题，导致测量精度显著下降，甚至引发安全事故，难以满足现代精密工业的测量需求。基于此，本文旨在系统研究高温高压工况下智能压力仪表的精度优化与稳定性提升技术。深入剖析温度与压力的耦合效应机理，建立误差分析模型，指导关键材料的选型与传感器结构的优化设计；从硬件层面设计抗干扰能力强、耐高温的信号调理电路与精密数据采集系统；构建基于 BP 神经网络与支持向量机（SVM）的混合智能补偿算法，实现对多因素耦合误差的高精度修正，并完成算法的嵌入式移植。通过结构优化、硬件设计与软件补偿的协同作用，全面提升智能压力仪表在极端工况下的测量精度与运行稳定性，为相关工业领域的自动化控制提供可靠的技术支撑。

一、高温高压对仪表性能的影响机理及结构优化

（一）温度与压力的耦合效应分析

智能压力仪表作为关键测量设备,广泛应用于汽车工业、航空、石油化工、节能环保、电力能源等自动化控制环境及高端重大装备的关键环节^[1]。现场工况下,压阻式、电容式传感器核心敏感元件本身具有温度敏感性,高温会改变材料特性,引发零点与灵敏度漂移;高压载荷会进一步加剧温度影响,形成温压耦合误差,难以单因素修正^[2]。高压使敏感膜片变形产生附加热效应、增大局部温度梯度,高温又降低膜片刚度强度,使变形增大且呈非线性,二者叠加误差无法用常规单一温压补偿消除。长期高温高压还会加速传感器封装老化、密封性能衰减,引发泄漏、绝缘下降等故障,降低运行稳定性^[3]。工程上可根据现场温压参数建立温度-压力-输出误差三维耦合模型,通过试验与数据拟合得到误差规律,确定各因素贡献占比,为结构优化和补偿算法提供依据,使方案适配现场工况。

（二）关键材料选型与耐高温设计

关键材料工程选型是提升仪表耐高温高压性能的基础,需结合现场温压、介质与环境,兼顾性能与工程适配性,重点完成敏感元件、封装、外壳三大类材料选型,从源头解决传统材料耐高温不足问题^[4]。敏感元件摒弃传统硅材料,优先选用蓝宝石、碳化硅等宽禁带半导体,蓝宝石适配常规高温高压工况,碳化硅适用于超高温高压极端场景。封装材料替代传统环氧树脂,采用聚酰亚胺或陶瓷,聚酰亚胺温域稳定、施工便捷;陶瓷耐高温耐腐蚀,需解决与金属外壳的密封连接问题^[5]。外壳选用高温合金或钛合金,高温合金适配超高压工况,钛合金轻量化便于狭小空间安装,可通过结构优化进一步提升运行稳定性。

（三）传感器结构优化设计

结合温压耦合工程影响机理,以减小敏感元件温度梯度、降低膜片非线性变形、提升结构现场稳定性为核心目标,采用ANSYS/COMSOL等仿真软件开展传感器结构仿真优化,确保方案适配现场加工、安装与使用需求。工程设计中,构建含敏感膜片、封装基座的三维模型,结合现场工况进行温-应力-变形耦合分析;优化敏感膜片结构及尺寸,设计微沟槽减小温度梯度,优化封装端传热路径与密封结构,适配高温超高压工况、解决密封失效问题。仿真完成后制作样机,结合现场工况开展实测测试,微调设计参数,确保优化方案具备现场可实施性,可直接应用于仪表现场改造与新设备研发。

二、智能压力仪表的硬件电路抗干扰与稳定性设计

（一）高温环境下的信号调理电路设计

高温工业现场中,电路元件参数漂移、电磁噪声干扰是影响智能压力仪表采集精度与稳定性的关键问题^[6]。信号调理电路需重点实现耐高温、低噪声、抗漂移,对传感器mV级微弱信号进行放大、滤波与线性化处理,为后续采集转换提供高质量信号。元件上优先选用军品级耐高温、低漂移精密器件,采用高温运

放、金属膜/合金电阻、陶瓷/钽电容,禁用高温易失效的电解电容^[7]。电路以差分放大为核心抑制共模干扰,搭配温度补偿电阻抵消高温漂移;通过RC低通滤波(10Hz~100Hz)与工频陷波滤波抑制高频及工频噪声。布局布线采用陶瓷基板替代常规PCB,信号线路与电源、数字线路分离以减少串扰;现场使用耐高温屏蔽线或双绞线,缩短引线长度,兼顾耐高温与抗干扰要求。

（二）精密数据采集与转换系统

精密数据采集与转换系统是智能压力仪表高精度测量的核心,其性能决定测量精度与数据可靠性,主要由ADC、MCU及电源管理模块组成,需满足高温高压、高精度、高稳定、低功耗及强抗干扰要求。ADC选用高精度高温兼容 $\Sigma-\Delta$ 型,常规高温场景(-40℃~125℃)采用24位ADS1256;超高温场景(>125℃)采用HTAD7740(-55℃~200℃)^[8]。MCU选用耐高温高性能型号:常规场景用STM32H7(-40℃~125℃);超高温用MSP430FR5994-HT(-55℃~210℃,低功耗)。电源管理采用耐高温隔离电源,配合EMI与电容滤波电路,抑制电源干扰,保证供电稳定,降低测量误差。

（三）电磁兼容性(EMC)与硬件抗干扰措施

高温高压工业现场电机、变频器等强电磁干扰易通过传导、辐射侵入仪表,引发数据误差、工作异常甚至元件损坏,需采取EMC抗干扰措施保障仪表稳定运行。仪表采用金属导电氧化外壳与内部电路模块屏蔽,传感器使用单端接地耐高温屏蔽线,抑制辐射干扰;采用单点接地设计,信号地、电源地、屏蔽地汇总共点,接地电阻 $\leq 1\Omega$,解决传导干扰。接口加装耐高温EMI滤波器与TVS管,抑制传导干扰与浪涌;同时优化电路布局、缩短信号线、减小环路面积,从电路层面降低干扰耦合,提升仪表恶劣工况适应性。

三、基于智能算法的精度优化与补偿技术

（一）数据采集与预处理

基于智能算法的精度补偿需以高质量、贴合现场的工程数据集为基础,因此需按照工程化标准开展数据采集与预处理工作,确保数据的准确性、完整性与有效性,为后续补偿模型训练提供可靠的现场数据支撑^[9]。数据采集环节,搭建模拟工业现场的高温高压实验平台,模拟不同温度(-50℃~600℃)与压力(0~100MPa)工况,采集传感器的原始输出信号、现场温度信号、压力标准信号,每个工况点重复采集10~20组数据,确保数据的统计可靠性;同时长期采集仪表在现场运行过程中的漂移数据(如零点漂移、灵敏度漂移),为现场动态补偿提供数据支撑,确保采集数据与现场实际工况高度契合。数据预处理是提升算法补偿效果的关键工程步骤,主要包括数据清洗、数据滤波、异常值剔除、数据归一化等操作,所有操作均围绕现场工程需求开展:数据清洗去除缺失值与重复值,缺失值采用线性插值或均值填充的工程方法补充,重复值直接删除;数据滤波采用小波滤波算法,其良好的时频局部化特性可有效分离现场信号与噪声,相较于传统RC滤波,能更好保留信号细节特征,同时抑制现场

高频噪声与工频干扰；异常值剔除采用 3σ 准则与格拉布斯准则相结合的方法，识别并剔除因设备故障、现场操作误差等导致的异常数据，确保数据集纯度；数据归一化将数据映射到 $[0,1]$ 或 $[-1,1]$ 区间，消除不同维度数据的量纲影响，避免因数据量级差异导致算法收敛速度慢、补偿精度低的工程问题，根据现场数据分布特性选择 min-max 归一化、Z-score 归一化等合适方法。预处理完成后，将数据集按工程比例划分为训练集（70%）、验证集（20%）与测试集（10%），用于智能算法模型的训练、优化与验证。

（二）软件补偿算法模型

针对高温高压工况的误差工程特性，为精准补偿传感器多因素耦合误差，需构建贴合现场的软件补偿模型，建立传感器原始输出、温压与真实测量值的非线性映射关系，确保模型具备现场适配性与高精度补偿能力^[10]。BP神经网络与支持向量机（SVM）相结合的混合补偿算法，兼顾BP的非线性拟合能力与SVM的小样本学习优势，提升模型对现场复杂工况的适配性与补偿精度，解决单一算法在现场补偿中精度不足、泛化能力差的问题。BP神经网络补偿模型以传感器原始输出电压、温度、压力为输入，补偿后压力值为输出；结合工程实践，隐藏层设2~3层，神经元数量经试错法与交叉验证确定（输入3、隐藏10~20、输出1），激活函数选用 Sigmoid 或 ReLU，训练算法采用 Adam，兼顾非线性映射效果与模型收敛速度、稳定性，实现对现场主要非线性耦合误差的初步拟合。SVM补偿模型基于统计学习理论实现小样本非线性拟合，输入特征与BP一致，选用径向基函数（RBF）为核函数适配现场复杂的误差耦合关系，通过交叉验证优化惩罚因子C与核参数 σ ，平衡模型拟合与泛化能力。该混合算法将BP输出作为SVM的输入之一，结合原始特征参数完成二次补偿，经加权融合得到最终结果，由BP初步拟合非线性误差、SVM修正剩余误差，充分发挥二者优势

（三）算法实现与嵌入式移植

智能补偿算法的实现与嵌入式移植是确保算法工程化应用的

关键，需兼顾算法的实时性、精度与嵌入式平台的资源约束。算法实现环节，在 MATLAB 环境下进行仿真验证，利用预处理后的数据集训练补偿模型，通过调整模型参数优化模型性能，确保模型在测试集上的补偿误差满足设计要求。仿真验证通过后，将算法转化为嵌入式可执行代码，选用 C 语言作为开发语言，结合嵌入式 MCU 的指令集进行代码优化。针对嵌入式平台运算能力有限的问题，对算法进行精简与优化，如简化神经网络的计算流程、采用定点运算替代浮点运算、删除冗余代码等，在保证补偿精度的前提下提升算法运行速度；对于模型参数，采用查表法存储，减少参数计算时间，提升实时性。嵌入式移植过程中，将优化后的代码下载到仪表的 MCU 中，搭建硬件在环测试平台，模拟高温高压工况，验证算法在实际硬件平台上的运行效果。测试内容包括补偿精度、实时性、稳定性等，确保算法运行稳定，补偿精度满足设计要求；同时，设计算法自校准功能，仪表上电后自动采集标准信号，对补偿模型参数进行微调，适应环境变化与元件老化带来的性能漂移，提升仪表的长期运行稳定性。此外，为便于算法的后期维护与升级，在嵌入式软件中设计标准化的接口，支持通过串口或无线通信方式更新补偿模型参数，无需拆卸仪表即可完成算法优化，降低维护成本。

四、结束语

本文针对南海区域某生产平台高温高压极端工况下智能压力仪表的精度衰减与稳定性难题，从材料结构、硬件电路及智能算法三个维度进行了系统的研究与探讨。通过建立温度-压力-输出误差的三维耦合模型，明确了核心误差机理，并基于此提出了采用蓝宝石、碳化硅等宽禁带半导体材料及高温合金的结构优化方案，有效降低了敏感元件的非线性变形与温度梯度影响。通过结构、硬件与算法的协同优化，智能压力仪表在高温高压环境下的测量精度得到了显著提升，长期运行稳定性得到有效保障。

参考文献

- [1] 王成城, 王金江, 张来斌, 等. 智能压力仪表故障机理表征分析与模型验证 [J]. 自动化仪表, 2025, 46(10): 63-69+77. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2025010029.
- [2] 郭文斌, 黄继强. 压力仪表全自动检定和校准系统的开发应用 [J]. 石油化工自动化, 2012, 48(3): 60-63. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7324.2012.03.021.
- [3] 薛伟, 王权, 丁建宁等. 内燃机气缸压力智能检测仪研究 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 194-196. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2006.07.050.
- [4] 郁腾达. 智能压力仪表技术在天然气分布式能源系统中的应用研究 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(4): 106-108. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2025.04.038.
- [5] 李明慧. 压力仪表整机标定产品的在线异常分类与系统实现 [D]. 重庆大学, 2023.
- [6] 韩涛. 压力仪表在油田中的应用及提高测量准确性的方法 [J]. 自动化应用, 2019, (11): 33-35. DOI: 10.19769/j.zdhy.2019.11.014.
- [7] 张殿冬. 论压力仪表测量过程的质量控制 [J]. 中外交流, 2021, 28(4): 932.
- [8] 侯佳俊. 压力仪表现场计量影响因素探究 [J]. 工业计量, 2019, 29(5): 78-80. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2019.0087.
- [9] 王钰涵. 压力仪表的检定与维护 [J]. 化工管理, 2017, (13): 54.
- [10] 张晓飞. 压力仪表校验系统的设计与实现 [D]. 江西理工大学, 2010. DOI: 10.7666/d.D443980.