

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.016

## 基于 PSO-BP 温度补偿算法的智能压力传感器设计

张凌峰, 丁晓宇, 潘慕绚

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

**摘要:** 压力信号是表征航空发动机工作性能的重要物理量。本文针对压力信号的高精度测量需求, 提出了一种基于 PSO-BP 温度补偿算法的智能压力传感器设计方案。选取微电子机械系统 (Micro-electro-mechanical system, MEMS) 压阻式传感器作为信号感知端, 通过模块化思想设计智能压力传感器的硬件和软件构架。针对压力传感器敏感元件因温度漂移造成的精度偏差问题, 提出了一种基于 PSO-BP 神经网络的嵌入式温度补偿算法以提升测量精度。集成智能传感器软硬件功能, 为验证智能传感器在全工况范围内的精度, 进行多种压力、温度下的压力测量实验。结果表明, 本文设计的智能压力传感器经补偿后满量程误差最大值为 0.44% (量程范围为 0~4 MPa), 相比于传统插值法、多项式拟合法等温度补偿算法, 精度提升至少 20%, 且算法单次仅耗时 2  $\mu$ s, 具有工程应用价值。

**关键词:** 航空发动机; MEMS 压阻式智能压力传感器; 模数转换驱动; 温度补偿; PSO-BP 神经网络

**中图分类号:** V233.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)01-0160-09

## Design of Intelligent Pressure Sensor Based on PSO-BP Temperature Compensation Algorithm

ZHANG Lingfeng, DING Xiaoyu, PAN Muxuan

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Pressure is an important physical signal that characterizes the operating performance of aero-engine. A design based on PSO-BP temperature compensation algorithm for intelligent pressure sensor is proposed for the high-precision measurement requirement of pressure signal. Micro-electro-mechanical system (MEMS) piezoresistive sensor is selected as the sensing module, and the hardware and software architecture of the intelligent pressure sensor is designed through modularization scheme. An embedded temperature compensation algorithm based on PSO-BP neural network is proposed to enhance the measurement accuracy in response to the problem of accuracy deviation of pressure sensor element due to temperature drift. The integration of hardware and software functions of intelligent sensor are carried out, and the pressure measurement experiments under different pressure and temperature conditions are conducted in order to verify the accuracy of intelligent sensor in the full range of operating conditions. The results show that the maximum full-scale error of the intelligent pressure sensor designed is 0.44% (Measurement range 0—4 MPa) after compensation, which improves the accuracy by at least 20% compared with temperature compensation algorithms such as the traditional interpolation method and polynomial fitting method, and the temperature compensation algorithm only takes 2  $\mu$ s for a single time, which is valuable for engineering application.

**Key words:** aircraft engine; MEMS piezoresistive intelligent pressure sensor; analog to digital conversion driver; temperature compensation; PSO-BP neural network

收稿日期: 2024-10-12; 修订日期: 2024-11-07

通信作者: 潘慕绚, 女, 教授, E-mail: muxuan.pan@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张凌峰, 丁晓宇, 潘慕绚. 基于 PSO-BP 温度补偿算法的智能压力传感器设计[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 160-168. ZHANG Lingfeng, DING Xiaoyu, PAN Muxuan. Design of intelligent pressure sensor based on PSO-BP temperature compensation algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(1): 160-168.

压力信号是航空发动机内部的重要物理量,高精度、高实时响应的压力测量在发动机性能监控、故障诊断、控制优化和安全保障等方面发挥着至关重要的作用<sup>[1-3]</sup>。在传统集中式结构的航空发动机控制系统中,压力传感器通过点对点的模拟传输将信号发送给发动机控制单元(Engine control unit, ECU),使得 ECU 不仅需要与控制系统中所有传感器和执行机构进行数据交互,还需要具备发动机状态监视及信号修正等功能,极大地增加了 ECU 的设计复杂性,降低了控制系统的可靠性。分布式控制系统通过在传感器中构建微处理器,将信号修正等功能从 ECU 下放到传感器,使其成为智能传感器<sup>[4-5]</sup>。集成微处理器后的智能传感器具备信号采集、信号调理、自修正以及实时通信等功能。在分布式控制系统架构下,ECU 仅需完成高级控制逻辑和算法,极大地释放了 ECU 的处理能力,从而提高整个控制系统的性能。

目前,国内外研究学者针对智能压力传感器开展了广泛研究。国外著名压力传感器厂商 Kulite 公司研发出了多种高精度的压力测量系统,在世界航空市场占据了大量的市场份额<sup>[6]</sup>。美国海军开发出了面向恶劣环境下的智能压力传感器,可实现信号的本地处理以及数据发送等功能<sup>[7]</sup>。国内在 1987 年就开始了智能压力传感器的研究,并以 51 单片机为中央处理器成功研制了模块式智能压力传感器,该传感器可实现故障报警、RS-232 输出等功能<sup>[8]</sup>。蒋文亮等<sup>[9]</sup>提出一种基于可编程门阵列(Field programmable gate array, FPGA)的智能压力传感器技术并已成功应用到某型发动机控制系统。潘慕绚等<sup>[10]</sup>设计并研制了智能压力传感器,实现了传感器的自校正功能。

考虑到航空发动机工作环境恶劣且安装空间有限,微电子机械系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)压阻式传感器因其体积小、精度高、响应快和可适于恶劣环境下工作等优点已经逐渐成为航空航天领域压力测量的主流方案<sup>[11]</sup>。但是由于硅半导体材料极易受环境温度的影响,传感器输出压力可能会出现灵敏度漂移和零点温度漂移,从而降低测量精度。因此, MEMS 压阻式传感器温度补偿方法一直是研究的重点。

目前,工程界常采用的温度补偿方法可分为硬件补偿和软件补偿两类<sup>[12-13]</sup>。硬件补偿主要从硬件结构<sup>[14]</sup>、材料和电路<sup>[15]</sup>等方面对传感器进行温度补偿。软件补偿方法则是对输出信号进行算法处理。软件补偿相对于硬件补偿具有成本低、灵活性好和可靠性高等优点。传统的软件补偿方法包含查表法<sup>[16]</sup>、插值法<sup>[17-18]</sup>和多项式拟合法<sup>[19-20]</sup>。查

表法操作简单,但是制作的查找表会占用大量存储器空间且补偿精度不高;插值法往往需要多次插值操作,其精度会受到插值次数的影响;多项式拟合法通常需要大量的温度补偿校准点,且多项式阶数过高或者过低都会影响补偿精度。随着人工智能的崛起,基于神经网络智能方法逐渐取代了传统的补偿方法。国内研究学者分别采用了 BP 神经网络模型<sup>[21]</sup>、径向基函数(Radial basis function, RBF)神经网络模型<sup>[22]</sup>、极限学习机(Extreme learning machine, ELM)神经网络模型<sup>[23]</sup>以及优化算法改进神经网络模型<sup>[24]</sup>对压力传感器进行温度补偿。这些算法利用了人工智能技术的优势,基于标定实验工况点的数据来拟合未知工况点的输出,满足了温度补偿和传感器精度的要求。

本文针对航空发动机分布式控制系统中智能压力传感器的研制需求,选取 MEMS 压阻式压力传感器作为信号感知端,提出了一种基于 PSO-BP 温度补偿算法的智能压力传感器设计方案。硬件层面,提出了信号调理模块、智能处理模块以及系统供电模块等模块化电路设计方法。软件层面,智能处理器模块采用 FPGA(Field-programmable gate array)+ARM(Advanced RISC machine)处理器架构。其中,基于 FPGA 设计模数转换器驱动实现高频压力信号采集,为传感器温度补偿方法提供支撑;面向 ARM 端算力提出了一种基于 PSO-BP 神经网络的嵌入式温度补偿算法以解决压力传感器敏感元件因温度漂移造成的精度偏差问题。最后进行智能压力传感器软、硬件功能的集成,针对集成后的智能传感器进行多种压力、温度工况点下的实验,验证智能传感器的性能。

## 1 MEMS 压阻式传感器工作原理

本系统选取 MEMS 压阻式传感器测量发动机关键截面压力信号,选用的传感器工作温度范围为  $-55\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,压力测量量程为  $0\sim 4\text{ MPa}$ 。MEMS 压阻式传感器基于硅材料的压阻效应制成,在外界压力作用下,硅材料会产生微小的形变或弯曲,其内部的电子结构和电子流动方式发生改变,使得硅材料的电阻值发生变化,其变化随压力变化近似呈线性关系。图 1 给出了 MEMS 压阻式传感器结构示意图,传感器敏感芯体有两路内部结构相同的输出通道 1 和 2。在通道内部感压膜片上有 4 个相同阻值的应变电阻  $R_1\sim R_4$ ,经过排列组成差动全桥形式的惠斯通电桥结构。由于应变电阻的粘贴位置和方向的不同,使得在受压时相邻桥臂上的电阻阻值变化相反。在不受压时初始电阻阻值均为  $R$ ,

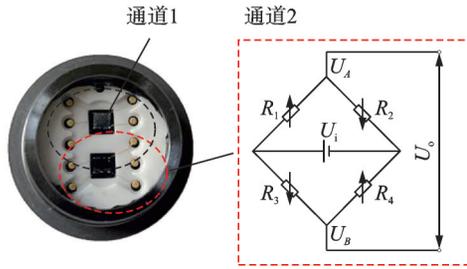


图1 MEMS压阻式传感器结构

Fig.1 Sensor structure of MEMS piezoresistive

在受压时,  $R_1$ 、 $R_4$  阻值为  $R + \Delta R$ ,  $R_2$ 、 $R_3$  阻值为  $R - \Delta R$ 。若激励电压为  $U_i$ , 此时电桥输出电压为

$$U_o = U_A - U_B = U_i \frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

式中:  $U_A$  和  $U_B$  分别为惠斯通电桥输出端电动势;  $\Delta R/R$  为压力传感器的灵敏度, 理想情况下它通常为一常数, 由于硅电阻的压阻系数会随温度变化而变化, 传感器的灵敏度也会随温度改变, 导致传感器输出非线性。因此, 为了获得高精度的压力测量结果, 需要同时测量系统的温度值并考虑其影响。

通过分析 MEMS 压阻式传感器标定实验数据, 当温度变化时, 传感器通道的输出阻抗会随仅随着温度近似呈线性变化, 可通过测量其输出阻抗反映当前环境温度。因此, 为最大限度减少温度对压力测量带来的误差, 同时避免引入额外的温度传感器。本系统选用传感器通道 1 测量压力, 选用通道 2 的输出阻抗作为补偿温度信号修正通道 1 的压力测量结果。

## 2 系统架构设计

### 2.1 硬件架构设计

针对第 1 节提出的系统测量方案, 基于 MEMS 压阻式传感器的信号输出类型, 提出了如图 2 所示的系统硬件架构方案。其中主要包括 MEMS 压阻式传感器、信号调理模块、智能处理模块以及系统供电模块等。

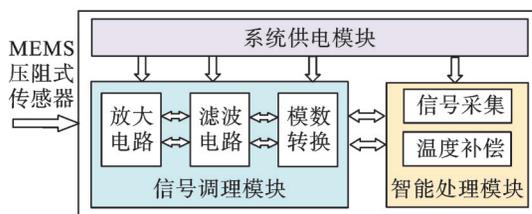


图2 智能压力传感器硬件架构

Fig.2 Hardware architecture of intelligent pressure sensor

MEMS 压阻式传感器输出两路信号: 一路压力信号; 另一路补偿温度信号, 经传感器输出后接入信号调理模块, 信号调理模块包含压力信号和补

偿温度信号的放大、滤波以及模数转换电路。在航空发动机工作过程中, 压力信号作为快变量, 脉动频率可达 1 000 Hz 或更高, 根据奈奎斯特采样定理, 采样频率需高于信号最高频率的 1 倍。因此, 选用 AD7380 作为本系统的模数转换芯片, 该芯片具有两个模数转换通道, 可支持压力信号和温度信号双通道同步采样。并且具备 16 位分辨率, 满足系统的精度需求。

智能处理模块选用 Xilinx 公司的 ZYNQ7020 型号芯片处理器作为智能传感器的微处理器, 该芯片集成了高性能双核 ARM 架构处理器以及可编程逻辑部分, 可依靠高性能、高带宽和低延迟的高级可拓展接口 (Advanced extensible interface, AXI) 总线互联, 实现两者之间的数据传输。

基于上述理论, 设计的压力传感器智能单元如图 3 所示。智能单元尺寸为 70 mm × 36 mm, 质量为 24 g, 满足传感器小型化的需求。此时智能单元仅具备信号调理功能, 下文将针对信号采集方法以及温度补偿算法开展软件层的架构设计, 满足传感器智能化的内涵。



图3 压力传感器智能单元

Fig.3 Intelligent unit of pressure sensor

### 2.2 软件架构设计

在本系统设计中, 处理器采用 FPGA+ARM 双处理器构架方案。由于 ARM 处理器适用于各种控制算法, FPGA 适用于实时信号采集和处理。因此在本系统的软件架构中, FPGA 端基于串行外设接口 (Serial peripheral interface, SPI) 协议驱动 AD7380 进行模数转换完成信号采集; ARM 端通过 AXI 总线访问读取压力采集结果并实现嵌入式温度补偿功能。本节仅介绍基于 AD7380 芯片的模数转换驱动设计, 为高速率的温度补偿算法提供硬件支持。基于 ARM 处理器实现的嵌入式温度补偿算法详见第 3 节。

AD7380 芯片具有 5 个引脚: CS、SCLK、SDOA、SDOB 以及 SDI 引脚, 分别与 FPGA 进行连接, 并通过 SPI 协议与 FPGA 进行数据传输。其中, CS 为片选信号, SCLK 为串行时钟输入信号, SDOA 和 SDOB 分别为串行数据输出通道, SDI

为串行数据输入引脚,用于将数据写入片上的控制寄存器。根据 AD7380 手册可知,该芯片 SPI 通信模式为模式 2,即时钟极性 CPOL=1,时钟相位 CPHA=0,在时钟下降沿采样,上升沿输出。因此发送数据时,FPGA 需要将待写入的数据在 SCLK 上升沿送至 SDI 引脚;接收数据时,FPGA 检测到 SCLK 下降沿时读取输出引脚数据。AD7380 单次工作周期为完成 1 次完整的信号采样和模数转换所需要的时间,该周期可分为 4 个状态,分别为空闲状态、数据转换状态、等待转换状态以及结束状态。AD7380 的驱动可基于有限状态机进行设计,状态转换过程如图 4 所示。

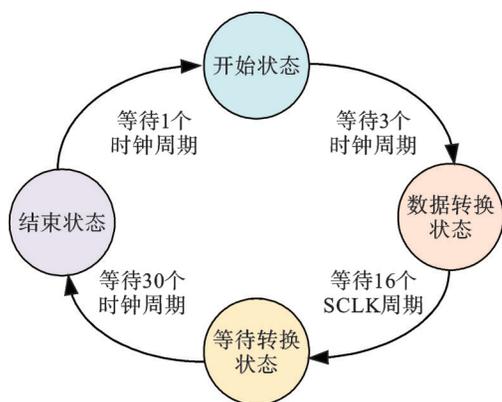


图 4 AD7380 工作状态转换过程

Fig.4 Transition process for AD7380 working state

空闲状态是状态机的初始状态,FPGA 接收到 ARM 端的采样命令时开始此状态并在该状态下完成初始化操作,同时拉低 CS 信号,拉高 SCLK 信号。在空闲状态开始后 3 个时钟周期后转入数据转换状态,在该状态下拉低 CS 信号启动转换过

程,然后基于 SCLK 信号的驱动下发送和接收数据,单次传输 16 位数据。在等待 16 位数据传输完成后转入等待转换状态,在该状态下拉高 CS 信号,拉高 SCLK 信号,随即停止当前周期的数据发送,开始下一周期的数据转换。在等待 30 个时钟周期后转入结束状态,该状态持续 1 个时钟周期,标志着这一工作循环的结束,随即转入空闲状态,继续下一个周期的循环。

在 AD7380 数据转换状态过程中,FPGA 对该芯片进行如下配置操作:FPGA 在接收到初始复位信号的第 1 个周期内向芯片写入 0x9042,该操作配置 AD7380 的采样模式、过采样率以及基准电压源的选择。在复位的第 2 个周期写入 0xA03C,该操作配置 AD 芯片工作过程中执行双通道同步采样、模数转换以及执行芯片的初始复位。同时,FPGA 在该状态下并行读取芯片转换结果,具体操作为:在检测到 SCLK 下降沿时读取输出引脚的数据,累计读取 16 bit 数据,并通过移位获得 16 bit 转换数据结果,并在状态机等待转换状态时将转换结果通过 AXI 总线发送到 ARM 中。

AD7380 工作时序如图 5 所示。基于 FPGA 有限状态机设计的 AD7380 单次工作周期为 480 ns,即完成 1 次完整的模拟信号采样到转换为数字量所需要的时间为 480 ns,对应系统采样速率为 2.083 3 MHz,系统采样速率高,可适用于高频压力采集。同时,采样时间的减少也可为下文设计的嵌入式温度补偿算法提供硬件支撑。可进一步基于该硬件设施进行温度补偿算法的设计及实验验证。

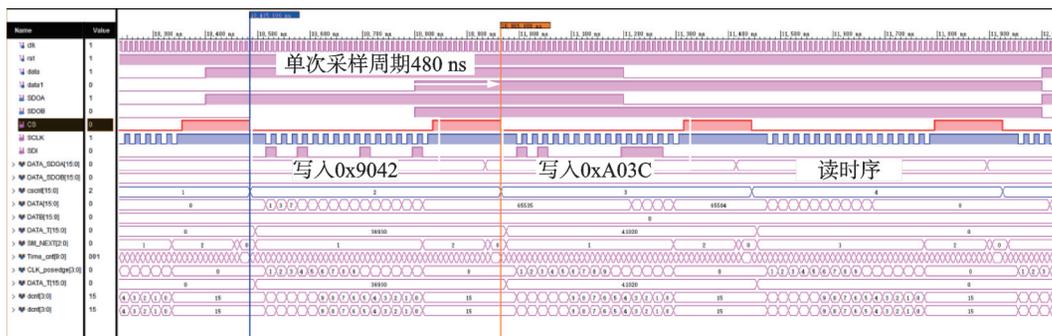


图 5 AD7380 读写时序

Fig.5 AD7380 read and write timing

### 3 基于 PSO-BP 的嵌入式温度补偿算法

#### 3.1 PSO-BP 算法

压力传感器温度补偿算法本质上是解决温度导致的传感器输出非线性问题,而前馈神经网络

(如 BP、RBF 和 ELM 等)可以实现输入到输出的任意非线性映射,非常适用于非线性函数拟合。其中,RBF 神经网络训练速度快、不易陷入局部最优,然而其复杂的网络架构和较大的计算需求,使其在硬件资源有限的嵌入式系统中难以实现。ELM 神经网络训练速度快、结构简单,但是其仅适

合处理简单的非线性问题,而且为了达到相同性能,往往需要更多的隐含层节点数,增加了系统计算负担和存储需求。相比之下,BP神经网络能够有效地处理复杂的非线性问题,结构灵活,可随时修改网络层数以及节点数目以适应不同的任务要求,但是其训练过程中需要多次迭代导致训练时间过长。本系统设计的嵌入式温度补偿算法,完成网络在线训练后提取权重和阈值,然后以离线方式运行,可以有效地避免训练时间过长的问题。然而,BP神经网络还容易出现稳定性差和陷入局部最优等问题,主要是因为网络收敛的方向受初始权值和阈值的影响较大,而BP神经网络中初始权值和阈值往往是随机设定,使收敛方向具有不确定性。PSO算法被广泛用于寻找全局最优问题,可有效解决这一问题。因此本文采用PSO算法优化BP神经网络(PSO-BP)作为压力传感器的温度补偿算法。利用PSO算法为BP神经网络选择合适的初始权值和阈值,再利用BP神经网络实现压力传感器的温度补偿功能,提高传感器测量精度。基于PSO-BP算法建立的压力传感器温度补偿模型结构如图6所示。

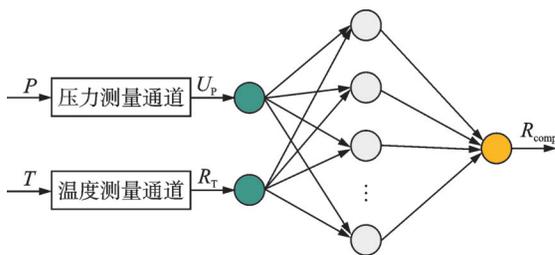


图6 基于PSO-BP的压力传感器温度补偿模型

Fig.6 Temperature compensation model for pressure sensor based on PSO-BP

在该压力传感器温度补偿模型中,输入层有两个节点,分别为传感器压力测量通道的输出电压值 $U_p$ 以及温度测量通道输出阻抗 $R_T$ ,输出层为当前环境的实际压力值 $P_{comp}$ 。在使用PSO算法优化BP神经网络时,将BP神经网络神经元的权重和阈值视为待优化粒子的位置,适应度选取待优化粒子对应权重和阈值训练获得的神经网络均方差损失函数值,适应度越小表明神经网络的性能越好。

### 3.2 压力传感器二维标定实验

网络训练数据选取MEMS压阻式传感器二维标定实验数据,开展传感器温度标定实验,实验装置如图7所示。将MEMS压阻式传感器置于高低温试验箱中,系统温度由高低温试验箱模拟产生,压力由高压气瓶提供。高压气瓶的输出与压力控制仪输入端连接,由上位机调节压力控制仪的压力输出值,再通过智能单元采集传感器的输出值。

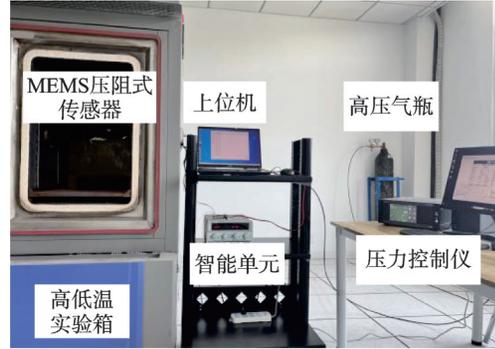


图7 压力传感器实验装置

Fig.7 Pressure sensor test set

实验过程中,将MEMS压阻式传感器置于高低温试验箱中部,传感器通过引气管与压力控制仪输出端相连接。确保装置密封性完好后,调节高低温试验箱达到第1个标定点温度值 $-55^{\circ}\text{C}$ ,保温1h,待温度稳定后,记下此时MEMS压阻式传感器的输出阻抗 $R_T$ ,然后依次调节压力控制仪输出值至标定点压强值100、500、1000、1500、2000、2500、3000、3500和4000 kPa,每次实验待压力达到平衡后,记录下压力传感器输出电压值 $U_p$ 。再依次调节高低温试验箱温度至标定点温度值 $-25、0、25、50、75、100、125、150$ 和 $175^{\circ}\text{C}$ ,重复上述步骤,获得不同温度下的传感器输出阻抗以及不同压力下的传感器输出电压值。

### 3.3 嵌入式温度补偿算法实现

选取3.2节压力传感器标定实验中10个温度标定点、9个压力标定点对应的90组传感器输出数据作为网络的样本数据。样本数据按7:2的比例随机选取,分别构成训练样本和测试样本进行网络的训练和测试。基于PSO-BP的温度补偿算法的实现步骤如下:

**步骤1** 建立BP神经网络结构。设计网络的输入层、输出层、隐含层数和隐含层节点数。

**步骤2** 初始化粒子群参数。设置种群规模、最大迭代次数等,将BP神经网络的神经元权重和阈值视为待优化粒子的位置,并初始化粒子初始速度 $v$ 、初始位置 $x$ ,确定当前个体最佳适应度值 $p_{best}$ 和全局最佳适应度值 $g_{best}$ 。

**步骤3** 更新粒子速度和位置。在每一次种群迭代中,根据个体最优和全局最优适应度值更新粒子的速度和位置,粒子的速度更新公式为

$$v_i^n = \omega v_i^{n-1} + c_1 r_1 (p_{best_i}^n - x_i^n) + c_2 r_2 (g_{best}^n - x_i^n) \quad (2)$$

式中: $i$ 表示第 $i$ 个粒子; $n$ 表示第 $n$ 次迭代; $\omega$ 表示惯性权重; $c_1$ 为个体学习因子; $c_2$ 为群体学习因子;

$r_1$  和  $r_2$  为分布在  $[0, 1]$  的随机数;  $v_i^n$  表示第  $n$  次迭代时第  $i$  个粒子的速度;  $p_{best_i}^n$  表示第  $n$  次迭代时第  $i$  个粒子的个体最佳适应度值;  $g_{best}^n$  表示第  $n$  次迭代时粒子群的全局最佳适应度值;  $x_i^n$  表示第  $n$  次迭代时第  $i$  个粒子的位置。粒子的位置更新公式如下

$$x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^n \quad (3)$$

**步骤 4** 计算并更新个体最佳适应度值  $p_{best}$  和全局最佳适应度值  $g_{best}$ 。利用步骤 3 更新后粒子位置对应的权重和阈值训练神经网络,得到当前粒子的适应度值 fitness。对每个粒子,若  $fitness > p_{best}$ , 则更新  $p_{best} = fitness$ 。再比较各个粒子的个体最佳适应度值和全局最佳适应度值,若  $p_{best} > g_{best}$ , 则更新  $g_{best} = p_{best}$ 。当达到最大迭代次数或者全局最佳适应度值满足精度要求时,迭代结束,否则跳转至步骤 3。

**步骤 5** 输出全局最优适应度值对应粒子的位置,并利用该结果初始化 BP 的权值和阈值。

**步骤 6** 基于步骤 5 获得的权值和阈值误差开展网络训练,直到测试集的误差满足精度要求,此时获得 PSO-BP 温度补偿模型。基于 PSO-BP 的温度补偿算法流程图如图 8 所示。

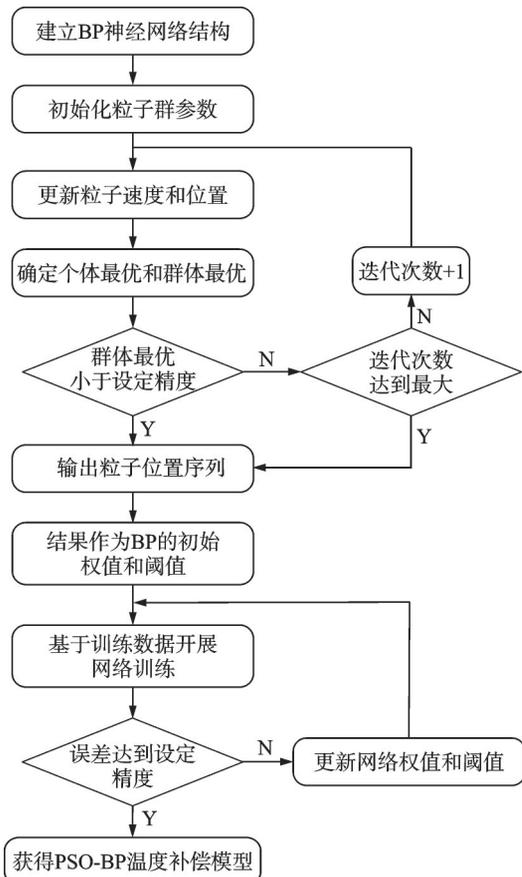


图 8 基于 PSO-BP 的温度补偿算法流程图  
Fig.8 Flow chart of temperature compensation algorithm based on PSO-BP

在本设计中,神经网络的输入层、隐含层、输出层节点数目分别是 2、6、1,输入层到隐含层权重数目为  $2 \times 6 = 12$ ,隐含层到输出层权重数目为  $6 \times 1 = 6$ ,隐含层阈值数目为 6,输出层阈值数目为 1,因此待优化的神经元权重和阈值数目之和为 25。设置种群规模为 40,最大迭代次数为 60,通过 PSO 算法不断寻优筛选出全局最佳适应度粒子对应的位置。种群迭代过程中,适应度曲线如图 9 所示,可以看出当种群迭代到 29 代时,此时适应度达到全局最优。将该结果赋值给 BP 神经网络的初始权重和阈值,基于训练样本开展网络训练,基于测试样本对网络训练结果进行测试。测试样本预测结果以及满量程误差如图 10 所示。由图 10 可知,测试集满量程误差不高于 0.2% (量程范围为 0~4 MPa)。仿真结果表明,本文设计的基于 PSO-BP 的温度补偿算法精度较高,可进一步进行智能压力传感器软、硬件功能集成,进行传感器性能测试实验。

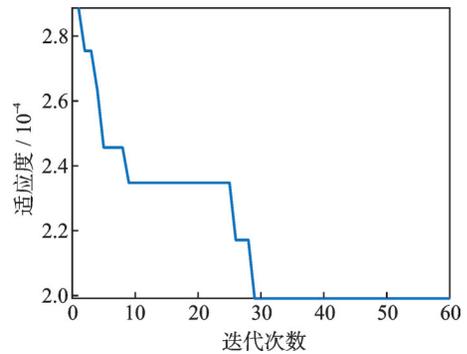
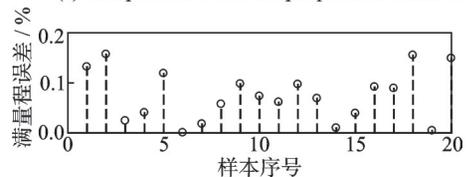
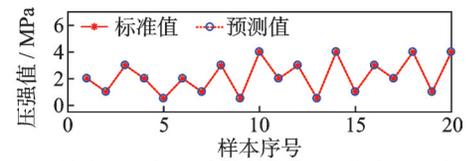


图 9 适应度曲线  
Fig.9 Fitness curve



(a) Comparison of test sample prediction results  
(b) Test sample prediction error  
图 10 测试样本预测结果  
Fig.10 Prediction results of test sample

## 4 实验验证

基于上述硬件层和软件层设计,针对集成后的智能压力传感器开展性能测试实验。实验装置与连接方式与图 7 标定实验装置相同。确保装置密

封性完好后,开展不同温度工况点下的压力输入输出验证实验,依次设置温箱温度为-40、-10、20、50、80、110、140和170℃,等待温度达到设定值后保温1h,保证传感器内部温度与环境温度达到平衡。在每一温度点下调节压力控制仪的压力输出值,分别施加250、750、1250、1750、2250、2750、3250以及3750kPa的供气压强,待传感器输出结果稳定后分别采集传感器输出结果。压力测量结果如表1所示。经过测试,基于PSO-BP算法设计的智能压力传感器完成单次信号采集并补偿压力结果耗时约2μs,航空发动机分布式控制系统中传感器智能节点通信周期为20ms,本文设计的温度算法补偿效率高,能够满足压力传感器的高实时性通信要求。

由表1可知,在温度110℃、压强为3750kPa时,智能压力传感器测量误差最大,最大误差为17.7kPa,传感器满量程最大误差为0.44%,可达到压力传感器0.5级精度等级,表明传感器测量精度较高。为了更好地评估PSO-BP温度补偿算法在压力测量场景下的性能,选择多项式拟合法、插值法以及BP神经网络算法作为对比实验方法,开展相同压力、温度工况点的测量实验。分别计算4种温度补偿方法得到的压力值与标准压力值满量程误差,误差分布如图11所示。同时,为更全面评价算法优劣,选取性能指标——满量程误差最大值、平均值以及温度补偿算法的运行耗时进行比较,计算结果如表2所示。

表 1 基于 PSO-BP 温度补偿后的测量结果

Table 1 Pressure measurement results after temperature compensation based on PSO-BP

T/℃	压强/kPa							
	250	750	1250	1750	2250	2750	3250	3750
-40	250.2	752.8	1254.8	1755.5	2257.4	2758.4	3258.4	3762.3
-10	249.4	747.7	1255.1	1756.1	2257.7	2760.3	3260.3	3764.1
20	251.4	753.1	1255.8	1756.9	2258.0	2760.0	3260.1	3762.6
50	247.9	748.2	1257.3	1758.5	2258.9	2759.2	3259.2	3761.5
80	251.4	754.0	1256.7	1758.1	2261.0	2760.6	3261.8	3765.1
110	255.6	748.5	1252.8	1756.1	2259.8	2761.1	3263.9	3767.7
140	253.5	752.7	1251.8	1750.7	2251.0	2750.1	3250.4	3750.8
170	249.6	748.7	1249.7	1750.0	2248.9	2749.5	3249.5	3750.0

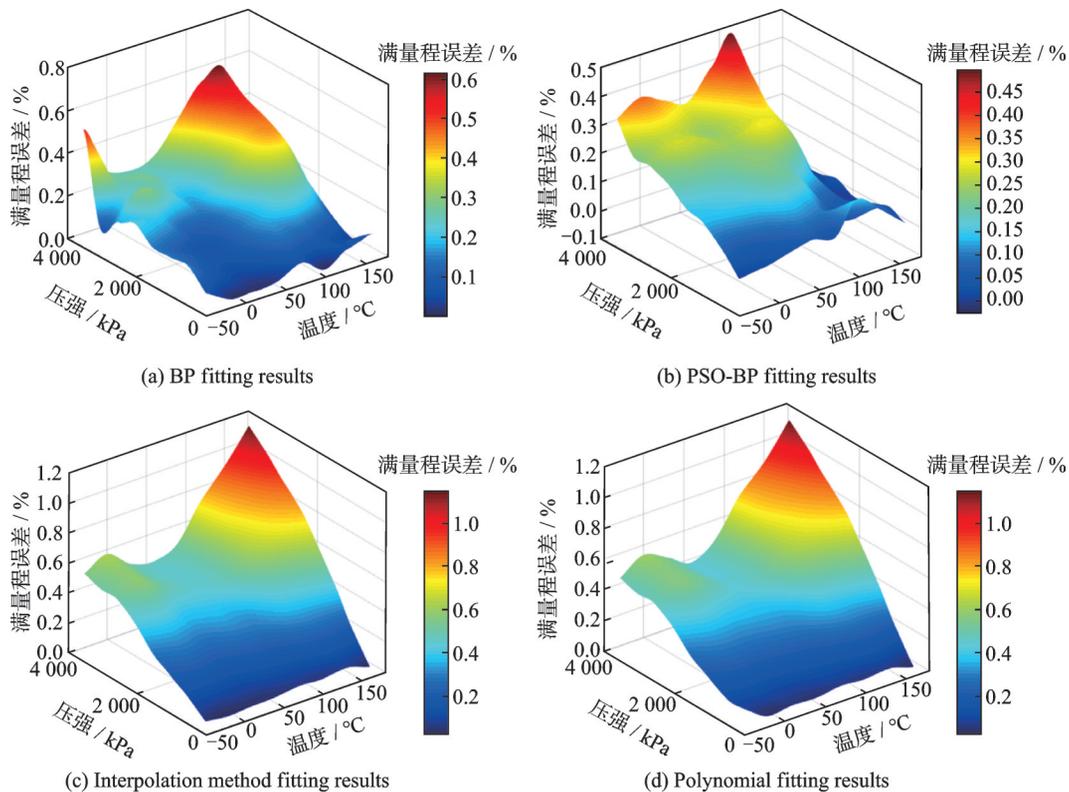


图 11 4种温度补偿算法的满量程误差结果

Fig.11 Full scale error results for four temperature compensation algorithms

表 2 4 种补偿算法对应的性能指标

Table 2 Performance indicators corresponding to four compensation algorithms

补偿算法	满量程误差 最大值/%	满量程误差 平均值/%	算法耗时/ $\mu\text{s}$
PSO-BP 算法	0.44	0.16	约 2
BP 神经网络	0.57	0.20	约 2
插值法	1.15	0.42	约 1.5
多项式拟合法	1.13	0.41	约 1.8

由图 11 和表 2 可知,针对压力传感器的温度补偿效果,基于 BP 神经网络的温度补偿算法相比于传统使用的插值法、多项式拟合法算法耗时相当,但在精度上均有显著的提升,结果表明 BP 神经网络更适合应用于补偿压力传感器随温度输出非线性的问题。基于 PSO-BP 的温度补偿算法补偿后的智能压力传感器满量程误差最大值为 0.44%,满量程误差平均值为 0.16%,相比较优化前的 BP 神经网络分别减少了 22.8% 和 20%。结果表明 PSO 算法能够有效改善 BP 神经网络的性能。综上所述,相比较于文中所提到的其他温度补偿算法,本文所设计的基于 PSO-BP 的压力传感器温度补偿算法性能更优,补偿精度更高,可有效改善 MEMS 压阻式传感器固有的温度漂移问题。

## 5 结 论

本文针对航空发动机分布式控制系统中智能压力传感器的研制需求,开展相关的设计研究工作。选取 MEMS 压阻式传感器作为信号感知端,提出了智能压力传感器的硬件架构和软件架构设计。针对该传感器固有的温度漂移问题,软件层面提出了一种基于 PSO-BP 的嵌入式温度补偿算法,主要贡献如下:

(1) 本文设计的压力传感器智能单元尺寸小、重量轻;信号采集和信号补偿分别基于不同的处理器平台,系统可靠性高。

(2) 基于 FPGA 有限状态机设计的模数转换器驱动单次工作周期为 480 ns,对应 AD 转换速率为 2.08 MHz,满足高频压力采集需求。

(3) 面向 ARM 端算力实现的基于 PSO-BP 的嵌入式温度补偿算法补偿后压力的满量程误差最大值为 0.44%,相比于其他温度补偿算法精度提升至少 20%,且算法单次运行耗时 2  $\mu\text{s}$ ,系统测量精度高、补偿速度快。

面向压力智能感知需求,在本文研制的智能压力传感器基础上,可进一步开展传感器故障诊断算法研究与验证,增强压力传感器智能化功能。此外,还可面向工程应用中的振动、噪声和电磁干扰

等开展传感器封装、可靠性研究与实验,推动智能压力传感器的工程化。

## 参考文献:

- [1] 高亚辉,倪焯斌,姜成平,等.航空发动机控制系统及关键技术现状与展望[J].南京航空航天大学学报,2024,56(4):577-596.  
GAO Yahui, NI Yebin, JIANG Chengping, et al. Research status and prospect of aeroengine control systems and key technologies[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 577-596.
- [2] WERNER M, BAAR R, HALUSKA P, et al. Bidirectional flow measurement based on the differential pressure method for surge analysis on a small centrifugal compressor[J]. Mechanical Engineering Science, 2018, 232(24): 4450-4460.
- [3] 武乐群,潘慕绚,郑天翔,等.航空发动机动态总压探针结构设计与优化[J].航空动力学报,2023(12):2872-2882.  
WU Lequn, PAN Muxuan, ZHENG Tianxiang, et al. Design and optimization of dynamic total pressure probe structure in aero-engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2023(12): 2872-2882.
- [4] CULLEY D, THOMAS R, SAUS J. Concepts for distributed engine control[C]//Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati, USA: AIAA, 2007: 5709.
- [5] 李睿超.航空发动机分布式控制系统关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2019.  
LI Ruichao. On key technologies of distributed engine control system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [6] 欧阳承曦.硅压阻式压力传感器高精度温度补偿技术研究[D].成都:电子科技大学,2016.  
OUYANG Chengxi. Precision temperature compensation technology research of silicon piezoresistive pressure sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [7] NAVY S. Intelligent sensor for distributed engine control for advanced propulsion system application[J]. SBIR Topic, 2007(7): 175.
- [8] 余瑞芬,毛万华.南京航空学院研制成功模块式智能压力传感器[J].数据采集与处理,1987(1):11.  
YU Ruifen, MAO Wanhua. Nanjing Institute of Aeronautics and Astronautics has successfully developed a modular intelligent pressure sensor[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 1987(1): 11.
- [9] 蒋文亮,刘晨,侯学彦,等.一种应用于航空发动机

- 的智能压力传感器系统[C]//2016年航空试验测试技术学术交流会.北京:中国航空学会,2016:436-440.
- JIANG Wenliang, LIU Chen, HOU Xueyan, et al. An intelligent pressure sensor system for aero-engine [C]//Proceedings of 2016 Aviation Test and Testing Technology Academic Exchange Conference. Beijing, China: Aeronautics and Astronautics Society of China, 2016: 436-440.
- [10] 潘慕绚,刘杨琳,李瑜.面向硅压阻式压力传感器温度补偿的组合方法[J].航空动力学报,2021(6):1188-1196.
- PAN Muxuan, LIU Yanglin, LI Yu. A combined temperature-compensation approach to silicon piezoresistance pressure sensor[J]. Journal of Aerospace Power, 2021(6): 1188-1196.
- [11] 李鹏军.一种基于MEMS的压力传感器模块开发[D].杭州:浙江大学,2023.
- LI Pengjun. Development of a pressure sensor module based on MEMS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [12] WANG Q, ZHANG J, HU R, et al. Transistor compensation technology of pressure sensor sensitivity temperature coefficient[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,43: 371-375.
- [13] ARYAFAR M, HAMED M, GANJEH M M. A novel temperature compensated piezoresistive pressure sensor[J]. Measurement, 2015,63: 25-29.
- [14] REVERTER F, HORAK G, BILAS V, et al. Novel and low-cost temperature compensation technique for piezoresistive pressure sensors[C]//Proceedings of Imeko World Congress. Lisboa, Portugal: UPCcommons, 2009: 2084-2087.
- [15] ZHAI Y, XU T, XU G, et al. Improvement and compensation of temperature drift of scale factor of a SOI-based MEMS differential capacitive accelerometer[J]. Measurement Science & Technology, 2023, 34(8): 85113.
- [16] 任勇峰,李晋涛,李辉景,等.一种温度补偿的压力测量电路设计[J].国外电子测量技术,2020,39(12):86-89.
- REN Yongfeng, LI Jintao, LI Huijing, et al. Design of a pressure measuring circuit with temperature compensation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(12): 86-89.
- [17] FAN S, ZHANG Q, QIN J. Temperature compensation of pressure sensor based on the interpolation of splines[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 684-686.
- [18] 王文博,马琳,王永鹏,等.基于三次样条曲线插值的压力传感器温度补偿研究[J].机电信息,2020(23):33-35.
- WANG Wenbo, MA Lin, WANG Yongpeng, et al. Research on temperature compensation of pressure sensor based on cubic spline interpolation[J]. Electro-mechanical Information, 2020(23): 33-35.
- [19] 黄奇峰.MEMS压力传感器芯片的数字信号调理与设计实现[D].北京:北京工业大学,2019.
- HUANG Qifeng. Digital signal conditioning and design of mems pressure sensor chip[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [20] GONZALEZ A H, BELTRAN J R, CERON J T, et al. New architecture for intelligent pressure sensors with analog and digital outputs[J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(2): 116-121.
- [21] 崔静雅,吕惠民,程赛.基于BP网络的智能压力传感器系统研究与设计[J].传感技术学报,2011(10):1426-1430.
- CUI Jingya, LYU Huimin, CHENG Sai. The research and design of intelligent sensor system based on BP network[J]. Journal of Sensing Technology, 2011(10): 1426-1430.
- [22] 刘宇,付乐乐,邹新海,等.基于RBF神经网络的MEMS惯性传感器误差补偿方法[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2021,35(1):197-202.
- LIU Yu, FU Lele, ZHOU Xinhai, et al. Error compensation method for MEMS inertial sensor based on RBF neural networks[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science). 2021,35(1): 197-202.
- [23] ZHOU G, ZHAO Y, GUO F, et al. A smart high accuracy silicon piezoresistive pressure sensor temperature compensation system[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12174-12190.
- [24] LIANG H, CHEN H, LU Y. Research on sensor error compensation of comprehensive logging unit based on machine learning[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019,37(3): 3113-3123.

(编辑:刘彦东)