

文章编号: 1671-7449(2025)01-0013-07

基于BP神经网络的压力传感器原位温度补偿技术

刘雨桥¹, 张 姝², 雷 程¹, 余建刚¹, 唐梦璇¹, 王涛龙^{1,3}, 梁 庭^{1*}

(1. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 天津航技术物理研究所, 天津 300308;
3. 成都天奥电子股份有限公司, 四川 成都 610037)

摘要: 由于压阻式压力传感器存在温度漂移, 而现有的软件温度补偿方法依赖额外的温度传感器获取温度信号。为了简化这一流程, 提出了一种基于BP神经网络的压力传感器原位温度补偿方法。利用多参数测量方法, 仅依赖压力传感器自身的电学信号, 无需引入新的传感器, 便能实现对传感器原位温度及压力的测量; 进一步通过BP神经网络实现压力传感器温-压解耦及温度补偿。结果显示, 补偿后传感器输出误差降低至 $\pm 0.5\%$ FS以内, 零位温度漂移从 0.021% FS/ $^{\circ}$ C降低到 0.0025% FS/ $^{\circ}$ C, 灵敏度温度漂移从 0.15% FS/ $^{\circ}$ C降低到 0.0055% FS/ $^{\circ}$ C, 显著降低了零位温度漂移和灵敏度温度漂移。

关键词: 压力传感器; 温度补偿; 多参数测量; BP神经网络

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025003

引用格式: 刘雨桥, 张姝, 雷程, 等. 基于BP神经网络的压力传感器原位温度补偿技术[J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 13-19.

LIU Yuqiao, ZHANG Shu, LEI Cheng, et al. In-situ temperature compensation technology for pressure sensors based on BP neural network[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 13-19.

In-Situ Temperature Compensation Technology for Pressure Sensors Based on BP Neural Network

LIU Yuqiao¹, ZHANG Shu², LEI Cheng¹, YU Jiangang¹, TANG Mengxuan¹,
WANG Taolong^{1,3}, LIANG Ting^{1*}

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
3. Chengdu Spaceon Electronics Co., Ltd., Chengdu 610037, China)

Abstract: Due to the temperature drift of piezoresistive pressure sensors, existing software temperature compensation methods rely on additional temperature sensors to obtain temperature signals. To simplify this process, a pressure sensor in-situ temperature compensation method based on BP neural networks is proposed. Utilizing a multi-parameter measurement method, it can achieve in-situ temperature and pressure measurements of the sensor based solely on its electrical signals, without the need to introduce new sensors. Furthermore, it achieves pressure sensor temperature-pressure decoupling and temperature com-

收稿日期: 2024-07-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3208500); 山西省重点研发计划资助项目(2023020302010); 中央引导地方科技发展资金资助项目(YDZJSX20231B006)

作者简介: 刘雨桥(2000-), 男, 硕士生, 主要从事MEMS高温压力传感器研究。E-mail: s202206041@st.nuc.edu.cn。

* **通信作者:** 梁庭(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事MEMS高温压力传感器、集成电路先进封装技术、宽禁带半导体传感器、MEMS微加工工艺以及微光学集成气体传感器等研究。E-mail: liangtingnuc@163.com。

penetration through BP neural networks. The results show that the sensor output error is reduced to within $\pm 0.5\%FS$ after compensation, with the zero-position temperature drift reduced from $0.021\%FS/^\circ C$ to $0.0025\%FS/^\circ C$, and the sensitivity temperature drift reduced from $0.15\%FS/^\circ C$ to $0.0055\%FS/^\circ C$, significantly reducing the zero-position temperature drift and sensitivity temperature drift.

Key words: pressure transducer; temperature compensation; multi-parameter measurement; BP neural network

0 引言

各类传感器广泛应用于工业、国防和生产生活各个领域,其中压力传感器作为力敏传感器的重要组成部分,是应用最广泛的传感器之一^[1-3]。相较其他压力传感器,压阻式压力传感器具有稳定性好、线性度好、抗干扰能力强等优势,已被广泛应用于各类工业领域^[4-6]。

由于半导体材料自身特性,使得压阻式压力传感器输出不仅受压力变化影响,还受温度变化影响。因此,温度漂移是其测量精度的主要影响因素,需要进行温度补偿^[7]。常用的温度补偿方法有硬件补偿和软件补偿两类^[8-10]。硬件补偿通常是通过在电桥电路中串并联硬件电路来调节各桥臂电阻的温度系数,以实现温度补偿^[11]。此类方法需要筛选相应电子元件用以适配补偿电路,实现成本高、通用性较差、补偿精度和范围有限,因此工程领域更多倾向于软件温度补偿。

软件温度补偿是通过计算机等设备分析温度、压力信号关系,形成相应的补偿算法对传感器进行温度补偿。软件补偿方法通常采用差值算法和神经网络等方面的模型算法^[12-14]。朱志峰等^[15]提出一种基于粒子群算法(PSO)优化小波神经网络的温度补偿方法,克服了神经网络收敛速度慢,容易陷入局部极值的缺陷。韩欣玉等^[16]提出一种利用PSO优化支持回归向量机的温度补偿模型,该模型补偿精度高于径向基函数网络和支持向量机。

软件补偿方法通常需要一个温度传感器来采集温度信号,使得在工程应用中需要预留额外的传感器安装空间。因此,本文提出了一种基于BP神经网络的压力传感器原位温度补偿方法。采用多参数测量的方法,不需要额外引入温度传感器,仅使用一支压力传感器即可同时输出压力信号和原位温度信号。同时,将采集到的信号作为BP神经网络输入参量,完成温-压解耦算法及温度补偿,改善压力传感器的输出特性。此方法同时具备硬件补偿无额外传

感器和软件补偿通用性强的优势。

1 压力传感器原位温度补偿原理

1.1 压力传感温-压解耦及原位测温原理

压阻式压力传感器利用半导体材料的压阻效应,在敏感膜片上制备4个位置方向不同的压敏电阻,构成如图1所示的惠斯通电桥^[17]。

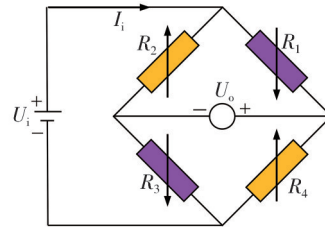


图1 惠斯通电桥

Fig. 1 Wheatstone bridge

理想情况下,4个电阻阻值相等且均为 R ,当外界压力改变时, R_1 、 R_3 电阻阻值增加,增加量为 ΔR , R_2 、 R_4 电阻阻值减小,减小量为 $-\Delta R$,电桥总电阻阻值不变,此时传感器输出电压为

$$U_o = \frac{\Delta R}{R} U_i, \quad (1)$$

式中: U_o 为传感器输出电压; $\frac{\Delta R}{R}$ 为传感器的灵敏度; U_i 为传感器输入电压。

由于半导体材料的温度特性,压阻式压力传感器会受到温度影响,传感器输出信号存在温-压耦合问题。设4个压敏电阻的温度系数均相等,当压力、温度同时改变时, R_1 、 R_3 阻值变化量为 $R + \Delta R + \Delta R_t$, R_2 、 R_4 阻值变化量为 $R - \Delta R + \Delta R_t$,则电桥总电阻为

$$R_b = (R + \Delta R + \Delta R_t + R - \Delta R + \Delta R_t) \parallel (R + \Delta R + \Delta R_t + R - \Delta R + \Delta R_t) = R + \Delta R_t. \quad (2)$$

由式(2)可知,通过测量电源电流和电桥输出,即可将传感器同时作为压力传感器和温度传感器使用,避免了引入额外的温度传感器。根据欧姆定律,在传感器供电电压不变时,电源两端电流与环境温度具有直接关系^[18],可用一阶多项式表示为

$$T = a_0 I_t + a_1, \quad (3)$$

式中: T 为温度; I_t 为电源电流; a_0 和 a_1 为系数。

1.2 BP神经网络原理

BP神经网络是最常用的神经网络之一,它的结构相对简单,但有较强的自学习能力和曲线拟合能力,经常应用在函数拟合、优化计算、模式识别、最优预测等方面^[19]。在图2中, x_i 为神经网络输入, y_k 为神经网络输出, ϕ 为隐含层的激励函数, ω_{ij} 为输入层第 i 个节点与隐含层第 j 个节点的连接权值, ω_{jk} 为隐含层第 j 个节点与输出层第 k 个节点的连接权值。

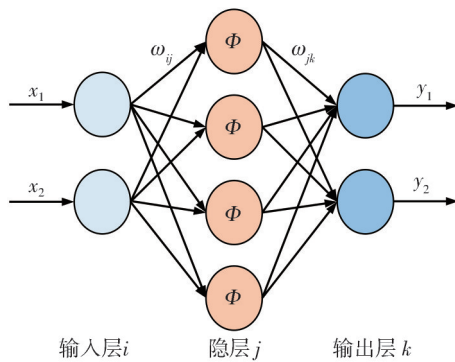


图2 BP神经网络模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of BP neural network model

BP神经网络训练过程如下^[20]:

- 1) 选用激活函数, 设定学习速度并为权值、阈值随机赋予初始值;
- 2) 输入学习样本;
- 3) 计算隐含层单元、输出层单元的输出值;
- 4) 计算隐含层和输出层的训练误差;
- 5) 根据误差修正权值、阈值;
- 6) 判断均方差是否满足给定允许偏差, 不满足则重复步骤4)~6), 若满足则结束训练。

2 压力传感器静态标定实验

选用自制压力敏感芯体进行静态标定实验。搭建如图3所示的测试环境。

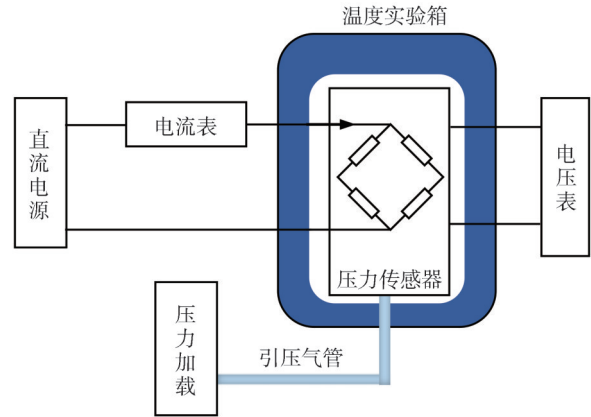


图3 测试环境示意图

Fig. 3 Schematic diagram of testing environment

实验使用的压力加载装置是北京康斯特公司的162HV台式气压泵, 精度为0.05%FS, 使用的温度试验箱为上海海向仪器设备厂的GD-4005, 控温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。施加温度 $T=25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100^\circ\text{C}$, 每个温度点保温1h。对压力传感器施加0~5 MPa的压力, 每1 MPa测量一次, 测量正反行程3次。使用PPH-1503D可编程高速直流电源为传感器提供恒压电源。PPH-1503D提供了一个内置先进的测量系统, 能准确地测量设备在使用过程中的电压输出, 以确保电源电压恒定。同时采用两台GDM-9060高精度万用表测量电桥差分电压输出和电源电流, 其分辨率分别为0.1 μV 和10 nA, 共采集到9组不同温度下的电桥差分电压 U_0 和电源电流 I_t , 将同一测量点数据求平均得到测试数据, 如表1所示。

表1 标定数据表

Tab. 1 Calibration data table

$T/^\circ\text{C}$	U_0/mV						I_t/mA					
	0 MPa	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	0 MPa	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa
25	-6.558 9	19.594 5	45.738 5	71.904 7	98.028 2	124.025	1.877 71	1.876 85	1.875 94	1.875 27	1.874 49	1.873 47
30	-6.143 3	19.681 3	45.670 6	71.774 5	97.705 7	123.654	1.872 43	1.871 30	1.870 18	1.869 32	1.868 44	1.867 49
40	-5.848 8	19.883 5	45.420 7	71.018 9	96.433 4	121.929	1.861 47	1.860 45	1.859 36	1.858 23	1.857 11	1.856 02
50	-5.317 2	19.897 3	44.921 6	69.907 3	94.802 8	119.732	1.840 14	1.838 88	1.837 77	1.836 65	1.836 17	1.834 74
60	-5.162 9	19.733 1	44.562 1	69.374 4	93.954 8	118.932	1.834 76	1.833 16	1.831 44	1.829 86	1.828 61	1.827 51
70	-4.832 9	19.447 7	43.691 9	67.941 2	92.125 8	116.197	1.814 56	1.813 11	1.811 62	1.810 34	1.809 22	1.807 85
80	-4.535 2	19.230 1	42.954 4	66.622 6	90.295 9	113.905	1.792 66	1.791 53	1.790 22	1.788 95	1.787 86	1.786 28
90	-4.514 7	19.102 4	42.616 9	66.120 1	89.497 7	112.945	1.784 43	1.783 11	1.781 65	1.780 25	1.778 75	1.777 35
100	-4.475 1	18.736 4	41.892 9	65.006 9	88.024 2	111.111	1.767 06	1.765 38	1.764 21	1.762 80	1.761 47	1.760 50

3 测试结果分析及温度补偿

3.1 压力传感器温度漂移分析原理

由表1电压数据可得压力传感器的电压输出特性平面图,如图4所示。随着温度的升高,压力传感器的零位输出和灵敏度发生了明显偏移。

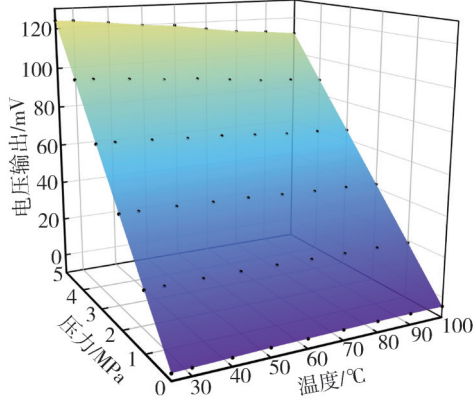


图4 补偿前电压输出特性平面图

Fig. 4 Plan view of voltage output characteristics before compensation

以25 °C时传感器输出特性为基准,计算温度引起的传感器输出误差,如图5所示。可以看到随着温度升高,传感器输出误差逐步增大,并在(100 °C, 5 MPa)时达到最高,约为-9.89%FS。

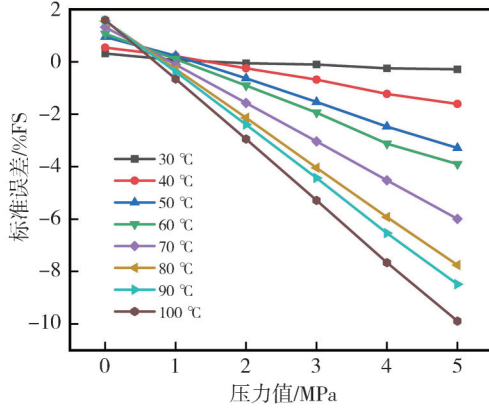


图5 补偿前输出误差图

Fig. 5 Output error graph before compensation

为评估传感器的温度漂移特性,计算零位温度漂移 α_0 和灵敏度温度漂移 α_s ,其中零位温度漂移 α_0 为传感器零位值随温度漂移的速度,公式为

$$\alpha_0 = \frac{\Delta U_{0m}}{\Delta T U_{FS}}, \quad (4)$$

式中: α_0 为零位温度系数; ΔU_{0m} 为零位漂移量; ΔT 为温度变化范围; U_{FS} 为在25 °C时压力传感器满量程输出。计算可得, α_0 约为0.021%FS/°C。

$$\Delta R_b = R_{b0} \left(\frac{\Delta R_2 - \Delta R_3}{R_{20} + R_{30}} + \frac{\Delta R_4 - \Delta R_1}{R_{40} + R_{10}} - \frac{\Delta R_2 + \Delta R_4 - \Delta R_1 - \Delta R_3}{R_{10} + R_{20} + R_{30} + R_{40}} \right) = R_{b0} \left(\frac{A + B}{4} \right), \quad (7)$$

灵敏度温度漂移 α_s 为灵敏度随温度漂移的速度,公式为

$$\alpha_s = \frac{|U_{\max FS} - U_{\min FS}|}{\Delta T U_{FS}}, \quad (5)$$

式中: α_s 为灵敏度温度系数; $U_{\max FS}$ 为在温度范围内传感器的最大满量程输出; $U_{\min FS}$ 为在温度范围内传感器的最小满量程输出; ΔT 为温度变化范围; U_{FS} 为在25 °C时压力传感器满量程输出。计算可得, α_s 约为0.15%FS/°C。

3.2 压力传感器温-压耦合分析

根据表1测试数据绘制出电源电流随温度、压力变化的平面图,如图6所示。以0 MPa时电源电流随温度变化曲线为基准,采用最小二乘法做函数拟合,可得到一阶多项式为

$$I_t = -0.001519t - 0.001193p + 1.92, \quad (6)$$

式中: I_t 为电源电流; t 为温度; p 为压力。

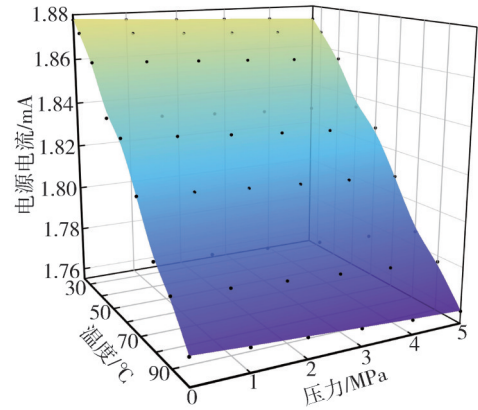


图6 电源电流输出特性平面图

Fig. 6 Power supply current output characteristics plan

分析对比式(3)和式(6),在实际工程使用中,压力传感器作为温度传感器采集原位温度信号时,由于压力传感器在制造过程中会受到工艺参差、封装应力等因素影响,使得压力传感器各压敏电阻的阻值和温度系数难以与理想情况一致,导致当压敏电阻受到温度、压力作用时,各电阻条的阻值变化各不相同,分析表明压力传感器自身产生的电学输出信号存在温-压耦合问题。

分析式(6),当传感器作为温度传感器使用时,测压信号会影响测温的精度,设满量程时各桥臂电阻变化量为 $-\Delta R_1$ 、 $+\Delta R_2$ 、 $-\Delta R_3$ 、 $+\Delta R_4$,当忽略高次项,桥路电阻变化量 ΔR_b 为

式中： $A = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_3}{R}$ ， $B = \frac{\Delta R_4 - \Delta R_1}{R}$ ，设 $R_{10} = R_{20} = R_{30} = R_{40} = R$ ， A 和 B 称为差动量不对称度。式(7)说明不对称度 A 和 B 越小，其测温精度就越高。计算可知实验使用的传感器不对称度 $A+B$ 约为 0.014，对应满量程压力信号引起的测温误差为 3.5℃。

3.3 BP 神经网络温-压解耦及温度补偿

近几年，神经网络在压力传感器温度补偿上的应用越来越普遍，如 BP 神经网络、RBF 神经网络、GRNN 神经网络等都被学者们用来实现压力传感器的温度补偿。

为解决压力传感器温-压信号耦合问题，建立一个共 3 层的 BP 神经网络解耦补偿模型，如图 7 所示。其中，输入节点分别对应电源电流 I 和电桥差分电压 U_0 。不同于传统需要引入额外温度传感器的补偿方法，本文采用的补偿方法中压力和温度信号均由压力传感器提供。将 U_0 及其对应的 I 作为一组数据输入，输出为预测压力值。计算每组数据对应输出及误差，将训练集所有数据遍历完成后计算所有样本误差，计算误差后更新权值和阈值再重复放入所有数据，直至误差小于要求误差。

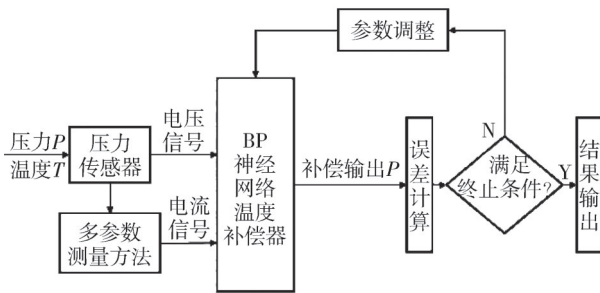


图 7 BP 神经网络温度补偿模型

Fig. 7 BP neural network temperature compensation model

设定 BP 神经网络的隐含层节点数为 20，隐含层传递函数选用 Sigmoid 函数。采用 Bayesian Regularization 反向传播算法，此算法对于小型嘈杂的训练集，可以减小过拟合风险，提升模型泛化能力。设置最大迭代次数为 1 000 次。将表 1 中 $T=25、40、60、80、100℃$ 的对应测试数据作为训练集，网络训练结束后，得到的误差曲线如图 8 所示，可以看到当迭代次数到 210 次时误差几乎不再减少，网络已到达最优解。使用训练后模型对传感器进行补偿，结果如表 2 所示。补偿

后传感器输出误差图 9 所示。

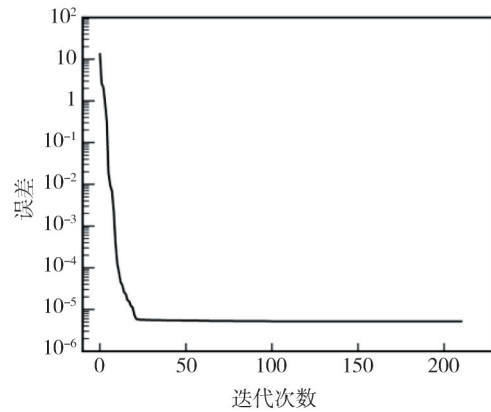


图 8 误差曲线图

Fig. 8 Error curve

表 2 补偿结果表

Tab. 2 Compensation results table

$T/℃$	P/MPa					
	0	1	2	3	4	5
25	-0.000 4	0.999 4	1.999 1	3.000 3	4.002 0	5.001 2
30	0.006 7	0.998 9	1.999 9	3.007 1	4.009 3	5.012 8
40	0.001 6	1.001 5	1.999 0	3.001 6	3.997 6	4.996 0
50	-0.002 9	1.000 5	2.004 9	3.009 2	4.005 2	5.003 6
60	-0.001 8	0.995 2	1.999 6	3.005 1	3.997 9	5.004 2
70	-0.002 2	0.993 1	1.995 9	2.997 7	3.993 1	4.983 5
80	0.002 3	0.999 7	2.001 8	3.000 1	3.996 1	4.990 8
90	0.001 7	1.000 9	2.002 1	3.002 1	3.996 8	4.993 9
100	0.001 1	0.998 2	1.999 5	3.001 0	4.000 1	4.999 1

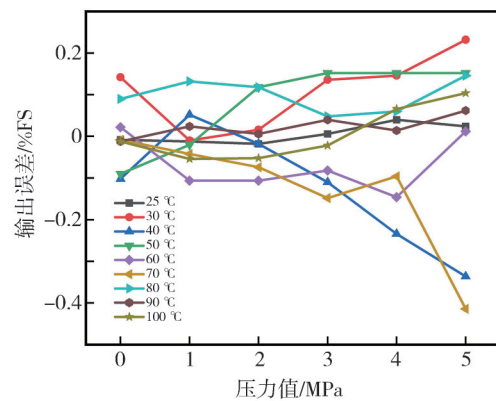


图 9 补偿后输出误差图

Fig. 9 Output error after compensation

从图 9 可以看出，补偿后传感器输出误差在 $\pm 0.5\%FS$ 以内，最大输出误差在 $(70℃, 5MPa)$ 处约为 $-0.414\%FS$ ，证明设计的补偿方法补偿结果有效。补偿结果与现有方法对比如表 3 所示。

补偿后的传感器输出特性如图 10 所示，图中 x 坐标为实际输入压力， y 坐标为温度， z 坐标为网络补偿后的预测压力。对比补偿前后传感器输出特性

图4和图10,零位温度漂移从0.021%FS/°C降低到0.0025%FS/°C,降低了一个量级;灵敏度温度漂移从0.15%FS/°C降低到0.0055%FS/°C,降低了两个量级。以上结果表明BP神经网络对于通过多参数测量方法得到的数据有着良好的拟合效果,补偿效果优秀。

表3 补偿误差对比表

Tab. 3 Compensation error comparison table

补偿方法	误差/%FS
本文方法	0.414
曲线拟合法 ^[18]	0.788
二维插值法 ^[21]	6.371

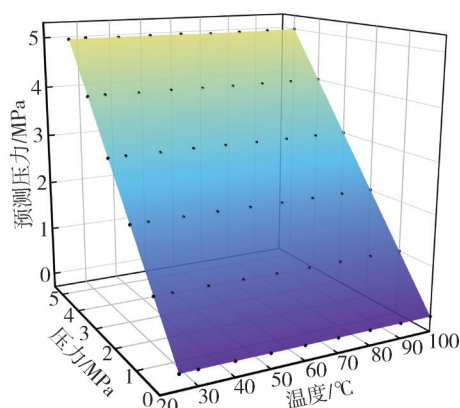


图10 补偿后传感器输出特性平面图

Fig. 10 Plan view of sensor output characteristics after compensation

4 结论

本文针对恒压源供电的压阻式压力传感器提出了一种将多参数测量方法与BP神经网络结合的温度补偿方法,该方法首先根据标定标准对被补偿传感器进行全温区全量程标定,之后选取部分标定数据训练神经网络,完成对传感器的温度补偿。这种方法通过对传感器原位温度的直接测量,避免引入额外的温度传感器。之后使用BP神经网络算法完成了温-压耦合的解耦补偿算法,并对压力传感器进行温度补偿。该方法使得压力传感器输出误差在 $\pm 0.5\%$ FS以内,温度漂移系数均有显著改善。

相比传统温度补偿方法,本文探讨了压阻式压力传感器的温-压耦合情况,分析了恒压源供电时压力传感器自身的电学信号输出特征。这种方法仅使用压力传感器本身就可完成多种物理量的测量,不需要额外考虑其他因素影响,其测量信号即为传感器原位温度,同时减少了传感器安装

孔位和引出线缆,有效降低了测试系统的复杂度,具有实际工程意义。

参考文献:

- [1] ZHAO K, ZHUANG H, CUI L, et al. A packaging technique of pressure sensor for *in vivo* measurement system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 340: 113514.
- [2] 武晓慧,张慧毅,耿文平,等. 压电MEMS振动传感器调理电路设计与实现[J]. *测试技术学报*, 2024, 38(3): 330-336.
WU Xiaohui, ZHANG Huiyi, GENG Wenping, et al. Design and implementation of conditioning circuit for piezoelectric MEMS vibration sensor[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2019, 38(3): 330-336. (in Chinese)
- [3] 钟长志,王凌云,卜振翔,等. 基于绝缘体上硅的颅内压力传感器的设计与制作[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(4): 517-524.
ZHONG Changzhi, WANG Lingyun, BU Zhenxiang, et al. Design and fabrication of intracranial pressure sensor based on SOI[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2023, 62(4): 517-524. (in Chinese)
- [4] HAN X, HUANG M, WU Z, et al. Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging[J]. *Microsystems & Nano-engineering*, 2023, 9: 156.
- [5] 高颖,姜岩峰. 高性能SOI基纳米硅薄膜微压阻式压力传感器的研究[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(6): 839-848.
GAO Ying, JIANG Yanfeng. Research on SOI-based nano-silicon film micro-piezoresistive pressure sensor with high performance[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(6): 839-848. (in Chinese)
- [6] CLARK T M, MALPAS S C, MCCORMICK D, et al. A new tool for the neurointensive care unit: simultaneous measurement of temperature from a catheter-tip pressure sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(3): 1761-1769.
- [7] 杨秋菊,王彤. 扩散硅压阻式压力传感器非线性误差纠正方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(3): 466-472.
YANG Qiuju, WANG Tong. Nonlinear error correction method of diffused silicon piezoresistive pressure sensors[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(3): 466-472. (in Chinese)
- [8] PIENIAZEK J, CIECINSKI P. Temperature and nonlinearity compensation of pressure sensor with com-

- mon sensors response [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(4): 1284-1293.
- [9] 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, 36(6): 1188-1196.
PAN Muxun, LIU Yanglin, LI Yu. A combined temperature-compensation approach to silicon piezoresistance pressure sensor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(6): 1188-1196. (in Chinese)
- [10] BASOV M. High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303: 111705.
- [11] 郑蓓蓉, 薛伟, 周晨, 等. 压力传感器集成恒流源灵敏度温度系数补偿[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(7): 800-803.
ZHENG Beirong, XUE Wei, ZHOU Chen, et al. Sensitivity temperature coefficient compensation based on pressure sensor integrated constant current [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(7): 800-803. (in Chinese)
- [12] 石文兵, 葛斌, 苏树智. 基于深度信念网络的硅压阻式压力传感器高精度温度补偿模型的研究[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(7): 995-1000.
SHI Wenbing, GE Bin, SU Shuzhi. Research on high precision temperature compensation model of silicon piezoresistive pressure sensor based on DBN[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(7): 995-1000. (in Chinese)
- [13] RUAN Y, YUAN L, YUAN W, et al. Temperature compensation and pressure bias estimation for piezoresistive pressure sensor based on machine learning approach [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1008610.
- [14] 闫文吉, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 59-65.
YAN Wenji, CHEN Hongliang, CHEN Hongmin, et al. Research on on-line compensation method for the measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 59-65. (in Chinese)
- [15] 朱志峰, 张海宁. 改进 PSO 优化的小波神经网络在压力传感器温度补偿中的研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2022(8): 122-126.
ZHU Zhifeng, ZHANG Haining. Research on improved PSO optimized wavelet neural network in temperature compensation of pressure sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(8): 122-126. (in Chinese)
- [16] 韩欣玉, 何平, 潘国峰, 等. 基于 PSO-SVR 的压力传感器温度补偿[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(8): 9-12.
HAN Xinyu, HE Ping, PAN Guofeng, et al. Temperature compensation of pressure sensor based on PSO-SVR [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(8): 9-12. (in Chinese)
- [17] 尹家乐, 卢文科, 左锋, 等. 基于 FOA-LSSVM 算法的扩散硅压阻式压力传感器温度补偿[J]. *自动化仪表*, 2020, 41(7): 15-19.
YIN Jiale, LU Wenke, ZUO Feng, et al. Temperature compensation of diffused silicon piezoresistive pressure sensor based on FOA-LSSVM algorithm [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(7): 15-19. (in Chinese)
- [18] DOS SANTOS PEREIRA R, CIMA C A. Thermal compensation method for piezoresistive pressure transducer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9510807.
- [19] 田伟山. 基于 BP 神经网络的压力传感器温度补偿的 FPGA 实现[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020.
- [20] 崔萌洁, 卢文科, 左锋. 基于 PSO-BP 模型的扩散硅压力传感器温度补偿[J]. *中国测试*, 2019, 45(11): 95-100.
CUI Mengjie, LU Wernke, ZUO Feng. Temperature compensation for diffusion silicon pressure sensors based on PSO-BP model [J]. *China Test*, 2019, 45(11): 95-100. (in Chinese)
- [21] 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 航空试验测试技术学术交流会论文集. 北京: 中国航空学会, 2016: 436-440.