

基于神经网络算法补偿的压力扫描阀标定方法 及其标定系统研究

王欢¹, 曾庆华^{1*}, 黄哲志², 张宗宇¹, 邹易君¹, 任恩泽¹

(1. 中山大学 航空航天学院, 广东 深圳 518107; 2. 南云中赛博信息科技有限公司, 湖南长沙 410000)

摘要: 为解决国产自主研发的多通道压力扫描阀在测压时准确度不高的问题, 本文首先从压力扫描阀生产中的标定过程切入, 然后设计适用于压力扫描阀的高低温正负压密封装置以提高获取测量数据的准确性, 最后组建压力扫描阀的标定系统进行标定实验。本文分别采用传统的最小二乘法, 以及提出的 BP 神经网络方法完成温度补偿。采集数据的补偿结果和补偿后实验的测试结果均显示神经网络的温度补偿方法测量准确度较高, 多通道压力扫描阀的 32 通道能达到 0.1%FS 的测压准确度, 明显优于国内同类型产品, 为今后国产多通道压力扫描阀的准确度研究提供关键依据和重要研究方向。

关键词: 神经网络算法; 压力扫描阀; 温度补偿; 标定系统

Research on the calibration method of pressure scanner and its calibration system based on the compensation of neural network algorithm

Wang Huan¹, Zeng Qinghua¹, Huang Zhezhi², Zhang Zongyu¹, Zou Yijun¹, Ren Enze¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. Hunan Cloud Cyber Information Technology Co., Ltd, Changsha 410000, China)

Abstract: In order to solve the problem of low accuracy in pressure measurement of domestic self-developed multi-channel pressure scanners, this paper firstly starts from the calibration process in the production of pressure scanners, then designs a high and low temperature positive and negative pressure sealing device for pressure scanners to improve the accuracy of the acquired measurement data, and finally sets up a calibration system for pressure scanners for calibration experiments. In this paper, the traditional least squares method and the proposed BP neural network method are used to complete the temperature compensation. The compensation results of the collected data and the test results of the post-compensation experiments show that the

temperature compensation method of the neural network has a high measurement accuracy, and the 32 channels of the multi-channel pressure scanner can achieve a pressure measurement accuracy of 0.1% FS, which is significantly better than the same type of domestic products, providing a key basis and an important research direction for the future research of the accuracy of the domestic multi-channel pressure scanner.

Keywords: Neural network algorithm; pressure scanner; temperature compensation; calibration system

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

近年来,随着我国各型飞机和发动机试验的发展,越来越多的高准确度压力扫描阀被应用于实践中。考虑到压力扫描阀的集成度、稳定性、测量准确度等指标,目前国内很多单位主要还是采用美国压力系统公司(PSI)、扫描阀公司(Scanivalve Corp)和美国库力特(Kulite)公司的产品,但国外产品在极端环境下容易出现损坏、价格昂贵、维修周期长、禁运等诸多问题^[1]。针对这一问题,国内研究机构开始自行研制压力扫描阀测压系统,但测量准确度仍然有很大的提升空间^[2]。压力扫描阀集成了多个硅压阻式压力传感器,通过不同时刻切换开关来采集不同通道的压力,这样就可以方便地获得多个通道的压力值。在压力扫描阀的压力测量中,由于半导体材料的感温特性,各通道传感器容易出现温度漂移现象,导致压力扫描阀的测量准确度不高。

面对该现象,主要采取的方法有硬件补偿和软件补偿两大类^[3]。硬件补偿通过外加电路的方法,使得与现有温度的漂移值相互抵消,从而实现对传感器的补偿^[4],但该方法补偿效果相对较差,且不适用于集成化体积较小的多通道压力扫描阀。软件补偿是采用将各通道的传感器与处理器连接的方式,采集各通道在全部工作温度和压力环境下输出的数据,建立输入输出关系,再通过高精度的算法拟合,计算得到各通道的传感器系数,补偿压力传感器由于非线性和温度带来的影响^[5]。此前应用于压力扫描阀的补偿通常采用多元回归分析法(传统多项式拟合法),这其中主要以最小二乘法的曲面拟合^[2]、样条曲线插值法为代表,而传统的补偿算法存在计算量增大时拟合准确度不高的问题,已经不适用于温度范围大,采集速率较快的多通道压力扫描阀。

1.2 应用价值

压力扫描阀因其体积小、集成化程度高、扫描速率快等优点广泛应用于飞行器、发动机、风洞等复杂试验中^[6-7]，能满足多通道的测试需求。图 1 所示展示了压力扫描阀的多种应用场合。本系统在此基础上进一步提高了其测压准确度，已成功在高超声速飞行器进气道的压力场测量、固冲发动机燃气发生器闭环控制系统中和冲压发动机补燃室压力测量及推力计算中得以运用，具有良好效果。图 2 为压力扫描阀应用于发动机外场试验的场景。

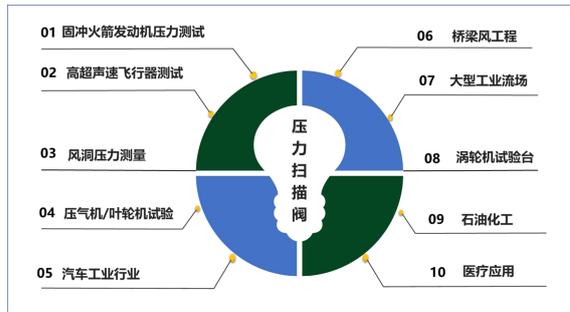


图 1 压力扫描阀的应用



图 2 压力扫描阀应用于固体冲压发动机外场试验

2 创新点与优势

目前，国外高准确度压力扫描阀及其配套产品的发展已经较为成熟，虽然我国近些年也开始加大压力扫描阀自主研发的力度，但由于我国缺少高端工业级 MEMS 芯片公司以及成熟的压力扫描阀生产制造商，导致系统的高准确度、稳定性和强抗干扰性依然是亟待解决的问题。

为了打破国外对于标定技术垄断的局面，本文从此核心问题出发，设计适用于压力扫描阀工作环境正负压高低温的密封装置^[8]，先后进行多次测试验证其密封性及整体标定系统的气密性，再进行标定实验，以此获取准确可靠的测试数据。相较于我国传统的最小二乘拟合、四阶拟合等方法，结合当前的机器学习领域，采用优化算法与神经网络算法，对多通道压力扫描阀在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 环境温度下进行高准确度温度补偿^[9]。实验结果说明，在同等硬件配置下，经过神经网络算法补偿后的压力扫描阀测压准确度大幅提升，达到 0.1%FS，远远优于传统的最小二乘法，有望在国防军工等领域取得突破。

3 实现方案简介

实验选用自主设计的 32/64 通道压力扫描阀（测压量程为 0.0MPa~1.0MPa），并对其全温度区下 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 各通道输出的电压值和温度值进行整体标定测试。该压力扫描阀系统包括硬件和软件两部分，具体架构如图 3 所示。

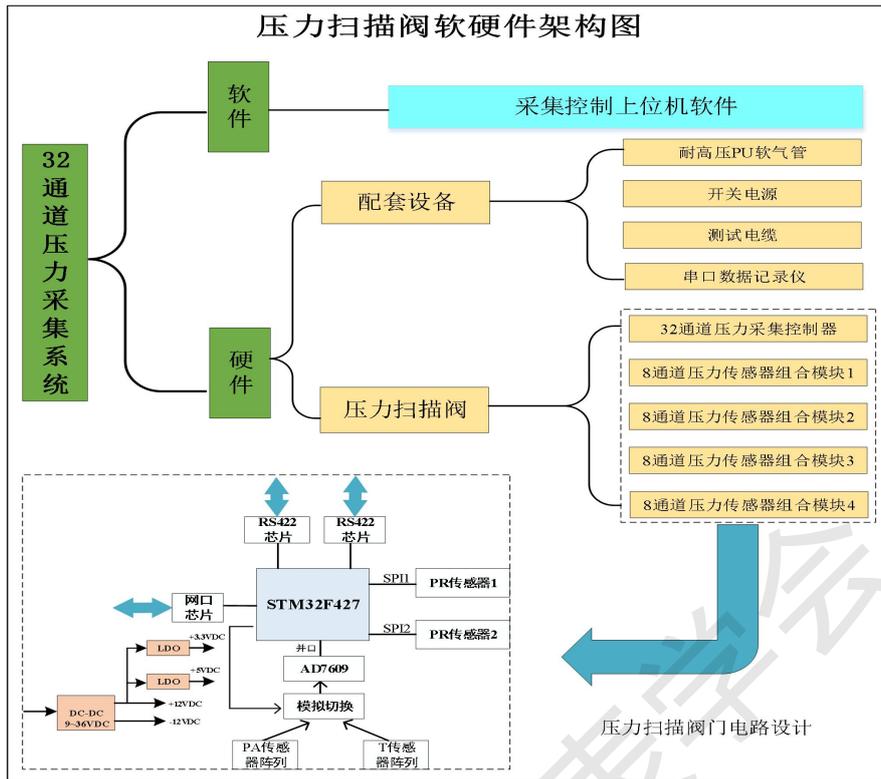


图3 压力扫描阀软硬件架构图

3.1 设计原理

参考单个压力传感器的温度补偿方法，设计出多通道压力传感器的温度补偿架构，如图4所示。举例来说，通道1中的压力传感器输出的电压信号为 U_{p1} 和对应温度的输出为 U_{T1} ，这两部分作为神经网络模型算法的输入，每组输入会对应一个模型输出的预测压力值 P_1 。通过比较预测压力值与标定压力值的误差指标来检验补偿的效果。最后，依次补偿32通道的压力传感器。

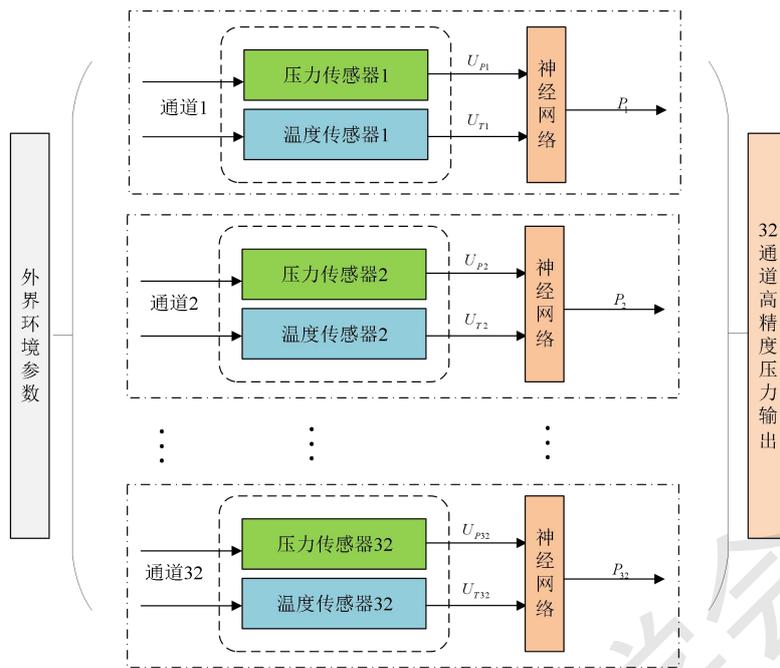


图4 多通道压力扫描阀温度补偿原理图

具体来说，BP神经网络是指按误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络。正是由于反向的能力，因此，非常容易找到输入与输出的关系，具有强大的非线性映射能力。其中，典型的梯度下降法是利用计算出的权值对网络进行动态调整，从而减少网络输出误差的方法。在实际工程应用中，多采用3层的BP神经网络，其基本的结构如图5所示^[10]。

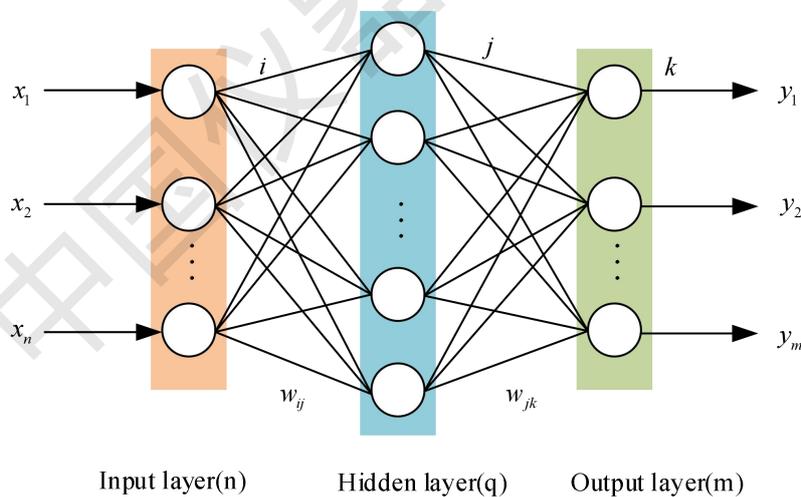


图5 BP神经网络结构图

设输入层有 n 个神经元，隐含层有 q 个神经元，输出层有 m 个神经元。定义隐含层第 j 个节点的输入为 net_j ，则输出为 c_j 。输出层第 k 个节点的输入为 net_k ，则输出为 c_k 。隐含层与输出层的阈值分别为 θ_j 和 θ_k 。输入层到隐含层之间连接权值 w_{ij} ，隐含层到输出层连接权值 w_{jk} 。

若给定输入向量为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ，期望输出向量为 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ 。依据 BP 神经网络的前馈计算，隐含层的第 j 个节点的输入为

$$net_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} c_i \quad (1)$$

对应隐含层第 j 个节点的输出为

$$c_j = f(net_j) = \frac{1}{1 + e^{-(net_j - \theta_j)}} \quad (2)$$

输出层的第 k 个节点的输入为

$$net_k = \sum_{j=1}^q w_{jk} c_j \quad (3)$$

对应输出层第 k 个节点输出为（神经网络的预测输出）

$$c_k = f(net_k) \quad (4)$$

当神经网络预测输出与期望输出存在误差时，引入系统的平均代价函数为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (y_k - c_k)^2 \quad (5)$$

为了使代价函数 E 尽可能最小，连接权值应按照梯度变化的反向调整，使得神经网络的预测输出接近期望值。对输出层的权值修正如下

$$\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial w_{jk}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial c_k} \frac{\partial c_k}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial w_{jk}} \quad (6)$$

式（6）中， η 为学习速率，一般 $\eta > 0$ 。又因为

$$\frac{\partial E}{\partial c_k} = -(y_k - c_k) \quad (7)$$

$$\frac{\partial c_k}{\partial net_k} = \frac{\partial f(net_k)}{\partial net_k} = f'(net_k) \quad (8)$$

由此，可以得到输出层的权值调整公式

$$\Delta w_{jk} = \eta (y_k - c_k) c_k (1 - c_k) c_j \quad (9)$$

类似地，可以隐含层的权值调整公式

$$\Delta w_{ij} = \eta c_j (1 - c_j) \left[\sum_{k=1}^m c_k (1 - c_k) (y_k - c_k) w_{jk} \right] c_i \quad (10)$$

3.2 设计方法

3.2.1 标定系统

多通道压力扫描阀标定系统由 ITECH IT6332B 直流电源、密封装置、32 通道压力扫描阀、打压机、真空机、精密数字压力表（精度 0.05 级）、精密数字大气压测量仪（精度 0.3hPa）、程式恒温恒湿试验箱、测试计算机、若干阀门、气管、测试电缆和串口接线等组成，具体压力扫描阀标定系统如图 6 所示。

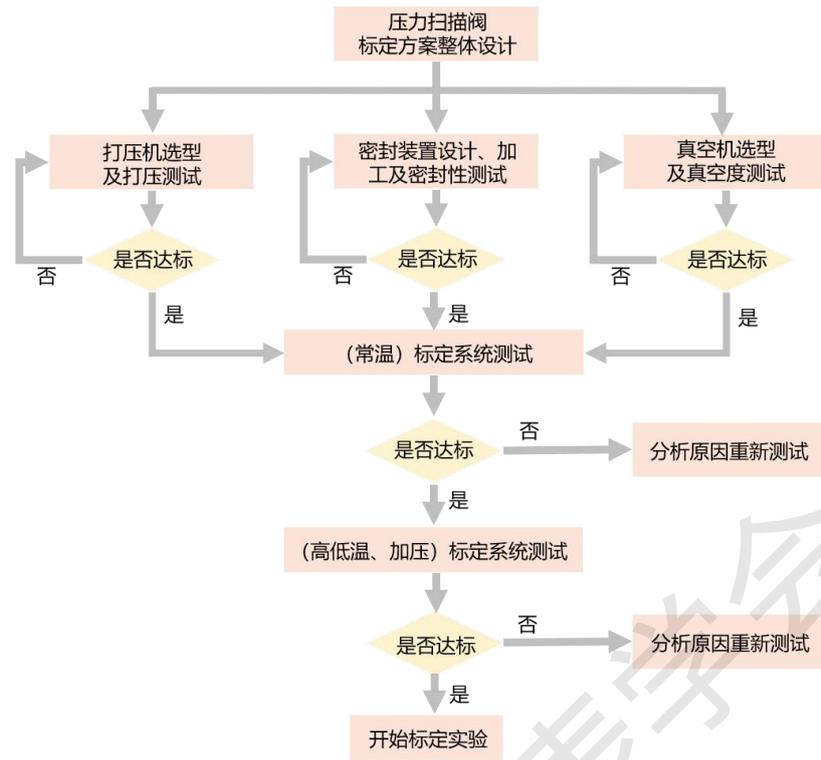


图 7 压力扫描阀标定方法流程图

标定实验结束后，对采集到的多通道压力扫描阀数据进行分类与预处理。分别采用传统的最小二乘法以及先进的神经网络算法进行温度补偿，观察补偿结果是否满足预期要求。如果满足，再次进行在线实验验证；否则，检查原因或者重新设计算法。具体流程图如图 8 所示。

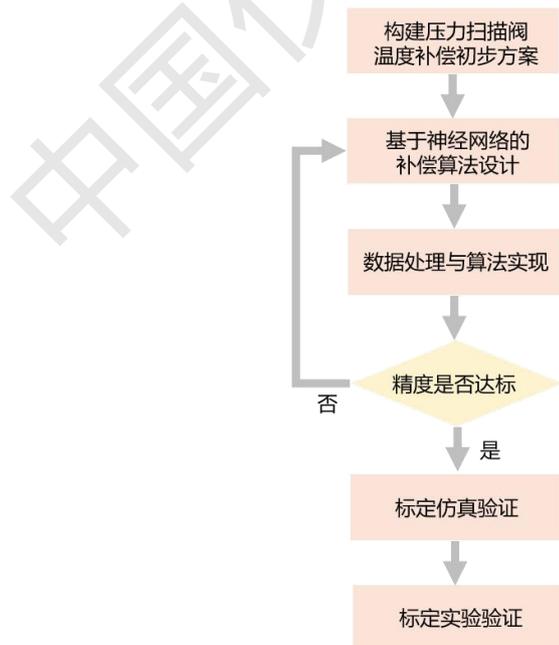


图 8 压力扫描阀神经网络补偿流程图

3.3 实验验证过程

3.3.1 测试集数据验证

本文使用 Matlab2017a 对标定系统产生的数据进行处理。首先，将采集到的数据集随机划分为训练集与测试集（训练集数据的占比为 80%，测试集数据的占比为 20%）。然后，我们采用传统应用于压力扫描阀温度补偿的最小二乘法对训练集数据训练，测试集则用作为验证算法补偿结果的数据。最后，绘制测试集数据在每个温度点下 13 个压力点中绝对误差最大值如图 9-12 所示。

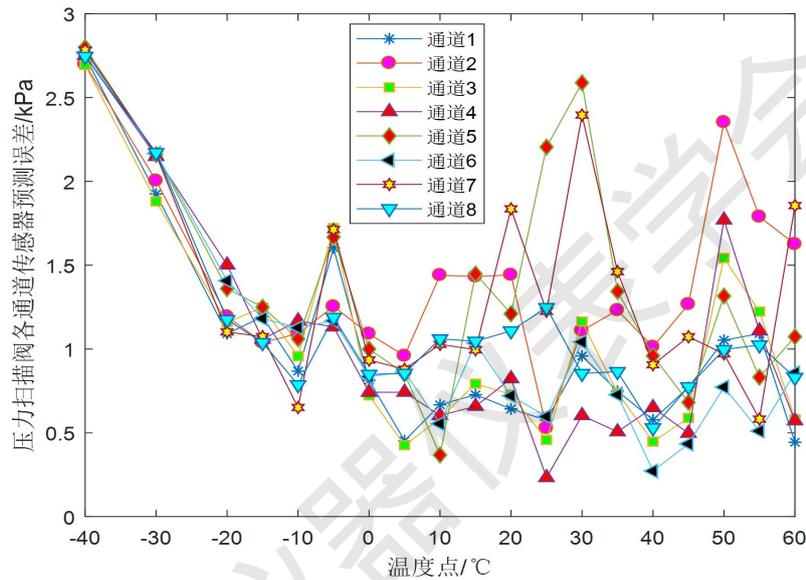


图9 基于最小二乘法温度补偿的绝对误差折线图（通道 1-8）

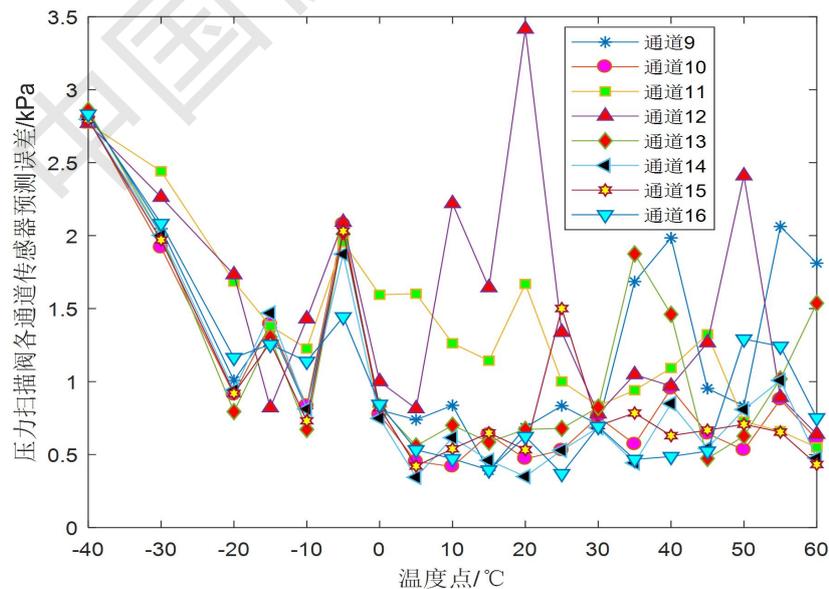


图10 基于最小二乘法温度补偿的绝对误差折线图（通道 9-16）

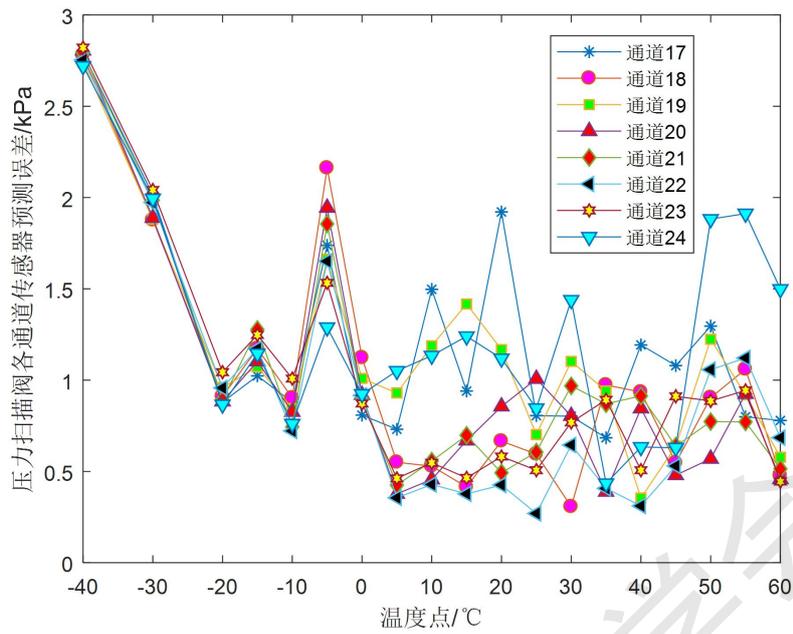


图 11 基于最小二乘法温度补偿的绝对误差折线图（通道 17-24）

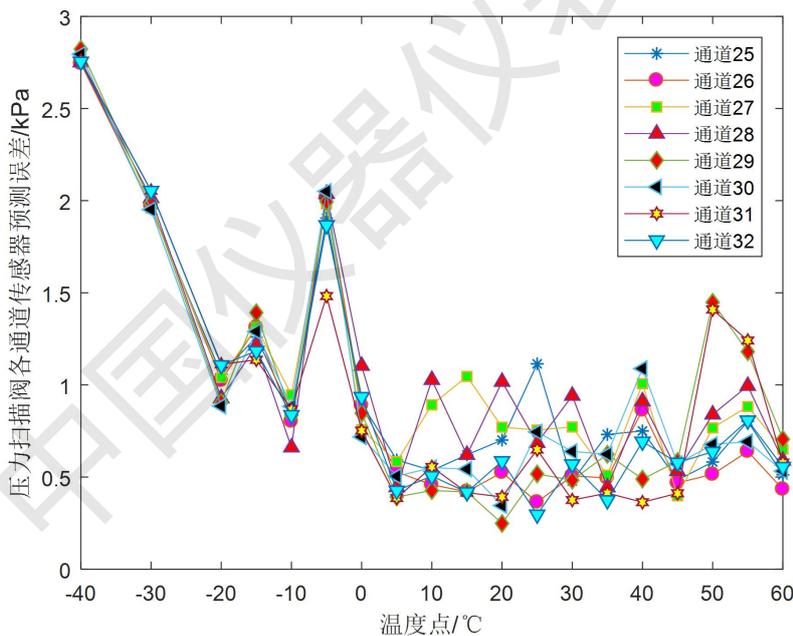


图 12 基于最小二乘法温度补偿的绝对误差折线图（通道 25-32）

图 9-图 12 依次显示了传统基于最小二乘法多通道压力扫描阀的温度补偿结果。从图中可以看出，32 通道的压力传感器中，大部分的通道补偿结果走向类似。但是，仍然存在少部分传感器（如通道 12 等）在补偿过程出现结果走势不相同的情况（我们不排除是传感器本身硬件带来的影响，后续可以更换单通道的传感器继续实验）。进一步地，传统的方法在进行补偿时，我们发现其在常温下是优于低温下的补偿结果。特别地，32 通道的补偿结果

均显示低温段（ $-40^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ ）是误差的重要来源。因此，我们可以总结出基于传统最小二乘法方法不适合于宽温度区的温度补偿，在低温段的表现较差。

在此基础上，我们选取通道 1 中的压力传感器，分别采用最小二乘法和提出的神经网络方法进行温度补偿研究。经过神经网络补偿后，绘制两种算法误差对比折线图如图 13 所示。

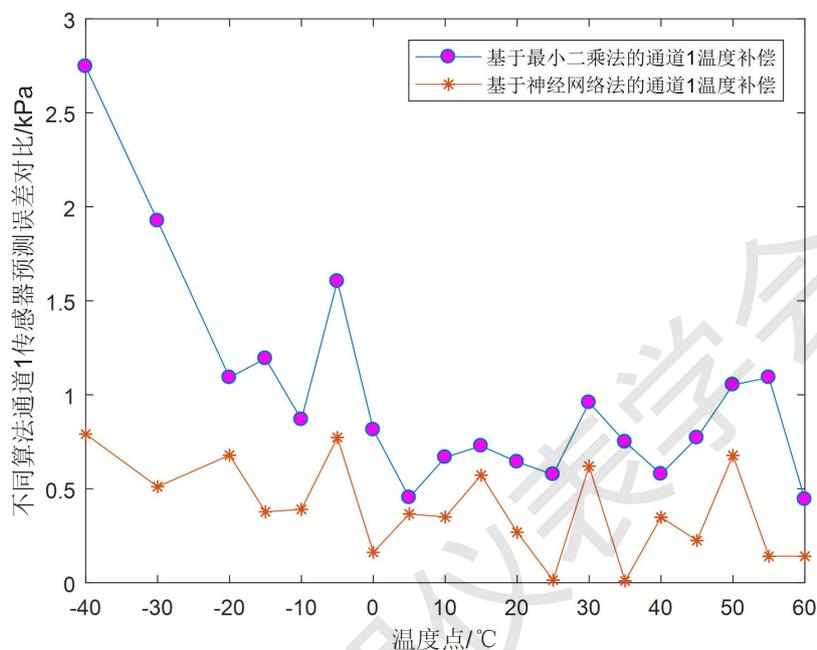


图 13 不同算法温度补偿预测误差对比

图 13 中，我们可以清晰看出相较于传统最小二乘法最大绝对误差 2.5-3kPa，经神经网络法补偿后，有效地降低了通道 1 压力传感器各温度点下的绝对误差，最大绝对误差小于 1 kPa，即显著提高了该通道压力传感器的准确度。这就意味着，基于神经网络的温度补偿算法不仅克服了传统算法低温段补偿准确度低的不足，而且在其余温度点下都有着不错的表现。

为了进一步验证神经网络算法的泛化能力与其余通道的补偿效果，我们将神经网络法应用于全部通道进行温度补偿研究，绘制全温度点下各压力点中绝对误差最大值如图 14-17 所示。

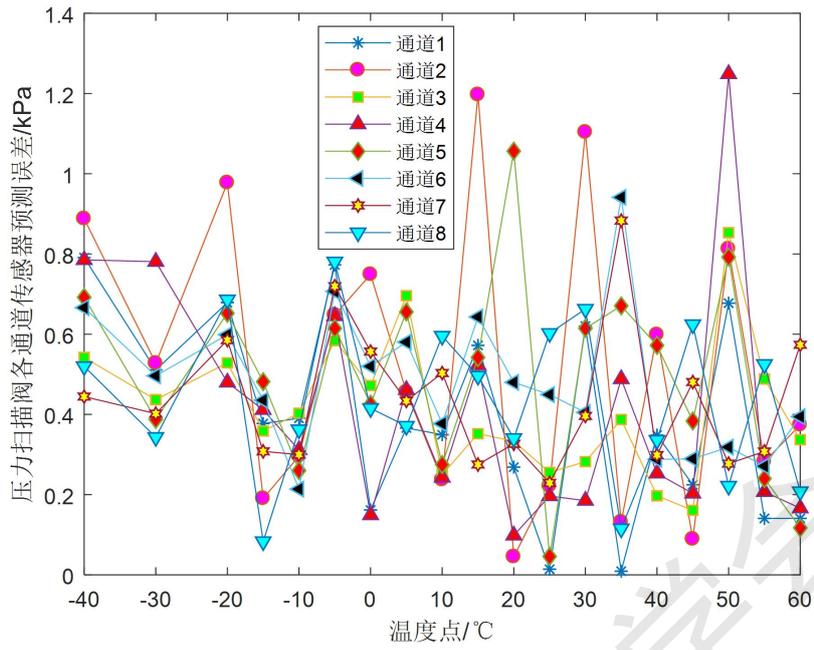


图 14 基于神经网络法温度补偿的绝对误差折线图（通道 1-8）

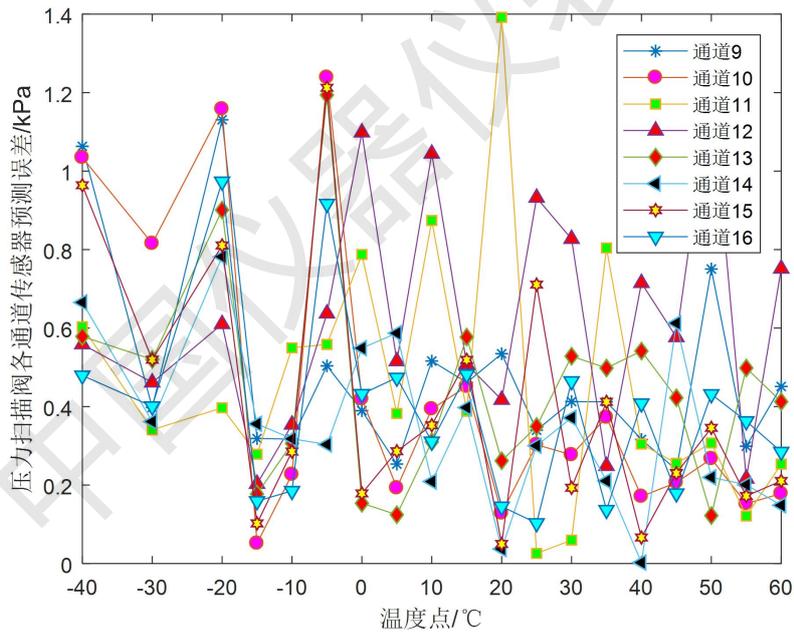


图 15 基于神经网络法温度补偿的绝对误差折线图（通道 9-16）

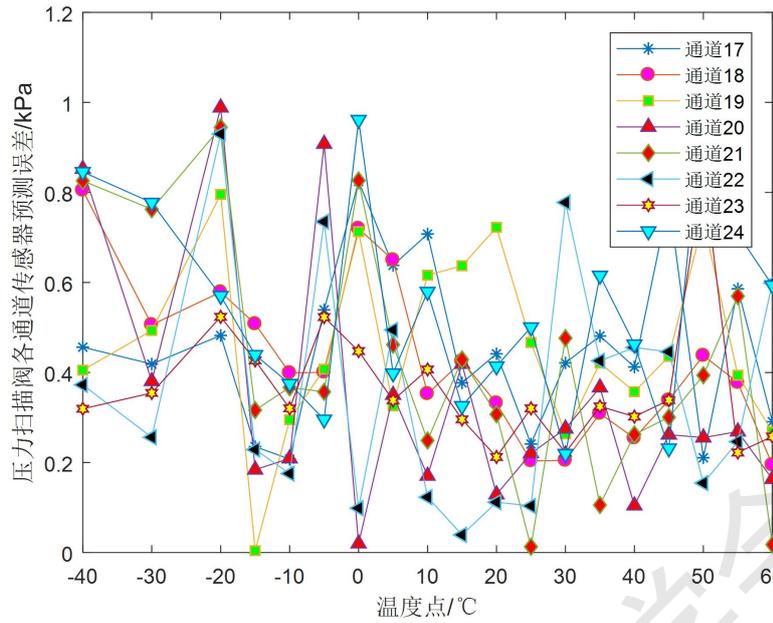


图 16 基于神经网络法温度补偿的绝对误差折线图（通道 17-24）

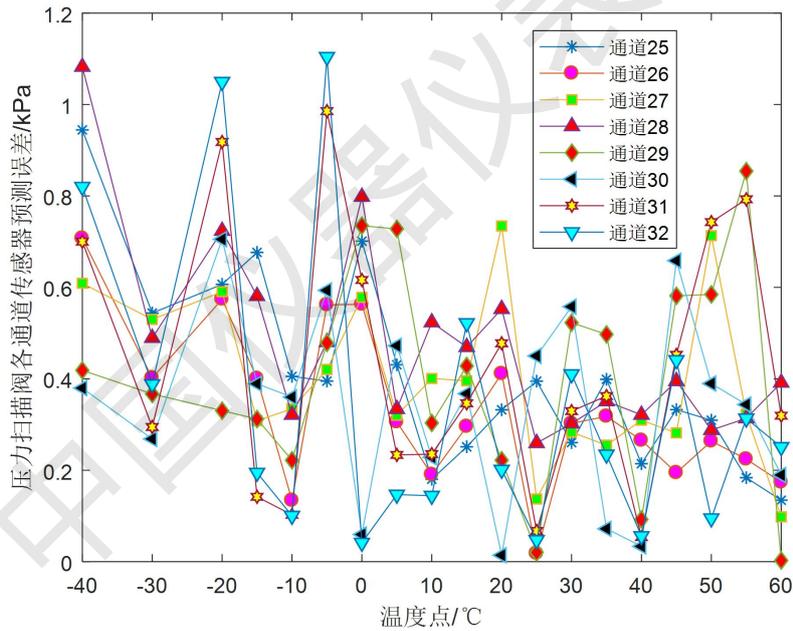


图 17 基于神经网络法温度补偿的绝对误差折线图（通道 25-32）

从图 14 到图 17 显示出，对于压力扫描阀的 32 通道，神经网络的温度补偿法均较为适用，补偿后所产生的误差与通道 1 的测试结果一致性较高。95% 的补偿误差均在 1kPa 以下，进一步证明了该算法对压力扫描阀里不同压力传感器的适应性和鲁棒性较好。然而，并非全部通道的压力传感器补偿结果的绝对误差最大值都在 1kPa 以下，说明神经网络算法有进一步的优化空间。

3.3.2 在线采集实验验证

将神经网络法温度补偿的代码转化为 C 语言嵌入上位机软件中，利用下位机采集数据，并发送给上位机软件，由上位机根据神经网络系数进行计算，便可以接收到补偿后的压力数据，如图 18 所示。



图 18 基于神经网络法温度补偿在线实验

图 18 展现了基于神经网络算法补偿后的压力扫描阀在线采集压力数据的情况。我们认为艾雷柯和大气压计采集的值为精确值，即当前压力环境为绝压 1078.95kPa。通过压力扫描阀上位机软件我们可以看出，经补偿后采集到的压力数据值均在 $1078.95\text{kPa} \pm 1\text{kPa}$ 内，与测试集补偿结果一致，具有较强的可信度与实用性。

参考文献:

- [1] 王欢,曾庆华.压力扫描阀测压系统研究进展综述[J].宇航计测技术,2021,41(06):76-81.
- [2] 钟诚文, 杨小辉, 浦甲臣,等. ZDS2003 智能电子压力扫描阀研制[J]. 流体力学实验与测量,2003,017 (U09):116-119.
- [3] Chen L T, Lee C Y, Cheng W H. MEMS-based humidity sensor with integrated temperature compensation mechanism[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(2): 522-528.
- [4] Guo Z, Lu C, Wang Y, et al. Design and experimental research of a temperature compensation system for silicon-on-sapphire pressure sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 17(3): 709-715.
- [5] Chung W Y, Lin Y T, Pijanowska D G, et al. New ISFET interface circuit design with temperature compensation[J]. Microelectronics Journal, 2006, 37(10): 1105-1114.

- [6] Nikoueeyan P, Hind M D, Strike J, et al. Evaluating the Utility of Pressure Scanners for Unsteady Pressure Measurements in Wind Tunnel Characterization of the Space Launch System[C]//AIAA AVIATION 2022 Forum. 2022: 3666.
- [7] Coulton D G, Lambourne M G. A new data acquisition system for high speed pressure scanners[C]//20th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 2003. ICIASF'03. IEEE, 2003: 148-156.
- [8] 曾庆华,王欢,王佳,黄哲志. 用于压力扫描阀的密封装置[P]. 广东省: CN114184315A,2022-03-15.
- [9] Wang, H.; Zeng, Q.; Zhang, Z.; Wang, H. Research on Temperature Compensation of Multi-Channel Pressure Scanner Based on an Improved Cuckoo Search Optimizing a BP Neural Network. *Micromachines* 2022, 13, 1351.
- [10] Ding S, Su C, Yu J. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm[J]. *Artificial intelligence review*, 2011, 36(2): 153-162.