

高精度压力检测系统中的误差补偿技术研究

杨纯龙*

(广东省惠州市质量计量监督检测所, 惠州 516003)

摘要: **目的** 研究高精度压力检测系统中的误差补偿技术, 提高系统测量精度。**方法** 提出了基于神经网络的综合误差补偿方法, 建立压力传感器误差模型, 设计了自适应神经网络补偿器。**结果** 该方法实现了对非线性误差的有效补偿, 实验结果表明, 系统非线性误差从 0.25% FS 降至 0.015% FS, 最大相对误差由 0.38% 降至 0.022%。温度补偿后的温度系数降低到 0.002% FS/°C, 相比补偿前的 $\pm 0.01\%$ FS/°C 提升了 80%。动态响应时间在 1.7~2.0 ms 范围内, -3 dB 带宽达 850~870 Hz。**结论** 本文所提出的误差补偿方法能有效提升压力检测系统的测量精度, 为高精度压力检测技术的发展提供了新思路。

关键词: 高精度压力检测; 误差补偿; 神经网络; 非线性校正; 自适应算法

Research on error compensation technology in high precision pressure detection system

YANG Chun-Long*

(Guangdong Province Huizhou Quality Measurement Supervision and Testing Institute, Huizhou 516003, China)

ABSTRACT: Objective To study error compensation techniques in high-precision pressure detection systems and improve measurement accuracy. **Methods** A comprehensive error compensation method based on neural networks was proposed, and a pressure sensor error model was established. An adaptive neural network compensator was designed. **Results** This method achieves effective compensation for nonlinear errors, and experimental results show that the systematic nonlinear error decreases from 0.25% FS to 0.015% FS and the maximum relative error from 0.38% to 0.022%. After temperature compensation, the temperature coefficient decreased to 0.002% FS/°C, which increased by 80% compared to $\pm 0.01\%$ FS/°C before compensation. The dynamic response time is in the 1.7~2.0 ms range, with a -3dB bandwidth of 850~870 Hz. **Conclusion** The error compensation method proposed in this paper can effectively improve the measurement accuracy of pressure detection systems and provide new ideas for the development of high-precision pressure detection technology.

KEY WORDS: high-precision pressure detection; error compensation; neural networks; nonlinear correction; adaptive algorithms

0 引言

高精度压力检测系统在工业生产、航空航天、石化检测等领域广泛应用, 但测量精度难以满足实际需求。近年来, 国内外学者对压力检测误差补偿技术进行了大量研究。张晓琳等人 (2021) 提出基于三点弯曲法的拉力检测装置, 误差控制在 2% 以内^[1]。杨三华等人 (2008) 提出利用神经网络对压力传感器进行误差补偿^[2]。雷伟鹏等人 (2024) 提出在设计中使用误差补偿技术^[3]。孔健等人 (2024) 研究了基于电子齿轮箱的同步误差补偿方法^[4]。尽管已有进展, 传统线性补偿方法难以处理复杂非

线性误差, 环境因素影响尚未充分解决。压力传感器的非线性特性、迟滞效应和温度漂移仍是主要问题。本研究提出基于神经网络的综合误差补偿方法, 通过建立误差模型和设计自适应神经网络补偿器, 以探索提高压力检测系统测量精度的新途径。

1 材料与方法

1.1 实验系统与设备

本研究采用自主设计的高精度压力检测系统, 主要包括以下组件。(1) 压力传感器: 硅压阻式传感器 (型号 APR5852, 广州奥松电子股份有限公司), 精度误差 -2~2% FS, 测量范

* 通信作者: 杨纯龙, 计量工程师, 室主任助理, 研究方向为压力计量检测。E-mail: 254634427@qq.com

* Corresponding author: YANG Chun-Long, Metrology Engineer, Assistant to the Director, Guangdong Province Huizhou Quality Measurement Supervision and Testing Institute, Huizhou 516003, China. E-mail: 254634427@qq.com

围-1~1 kPa、-10~10 kPa。(4)信号调理电路:仪表放大器(INA350,德州仪器公司)和低通滤波器(截止频率1 kHz)。(5)模数转换器:24位 Σ - Δ 型ADC(AD7175-2,昂氏(上海)电子贸易有限公司),最大通道扫描速率50 kSPS(20 μ s)。(6)数据处理单元:FPGA(Artix-7系列,Xilinx公司),时钟频率100 MHz。(7)温度传感器:PT100铂电阻(型号R-101S,深圳市鑫博恒业科技有限公司),配合24位ADC(ADS127L01,德州仪器公司)。(8)压力标准器:活塞式压力计(型号PG7302,Fluke公司),精度0.008%。(9)恒温恒湿试验箱(型号TH3-PE,JEIOTECH公司),温度范围-40~150 $^{\circ}$ C,湿度范围20%~95% RH。

1.2 误差补偿方法

基于神经网络的误差补偿方法主要包括以下步骤:(1)建立压力传感器误差模型,综合考虑非线性误差、迟滞误差和温度误差;(2)设计多层感知机(MLP)神经网络补偿器,输入层包括压力传感器输出和温度信号,输出层为补偿后的压力值^[5];(3)采用Adam优化算法训练网络,使用L2正则化和早停法防止过拟合;(4)实现自适应算法,通过滑动窗口技术持续更新模型参数,动态调整学习率和窗口大小。

1.3 系统实现与性能评估

(1)硬件实现:基于FPGA平台,采用流水线结构实现神经网络计算,使用DSP切片进行并行运算。

(2)软件实现:使用Verilog HDL语言开发,实现4-10-10-1全连接网络结构,采用定点数运算提高效率^[6]。

(3)系统标定:采用分段多项式拟合方法,结合三维样条插值技术进行温度补偿。

(4)误差分析:使用改进的Preisach模型补偿迟滞误差,采用蒙特卡罗法评估系统总不确定度。

2 结果与分析

2.1 静态压力测量实验

静态压力测量实验在恒温(23 \pm 0.1) $^{\circ}$ C环境下进行,使用Fluke 6531压力控制器(精度0.005%读数)。测试点为0%~100% FS,每点10次重复测量,采用循环加载评估迟滞特性^[7]。静态压力测量实验显示,神经网络补偿方法显著提高了系统的测量精度。非线性误差从0.25% FS降至0.015% FS,最大相对误差由0.38%降至0.022%,表明该方法能有效处理传感器的非线性特性。在低压范围(0%~20% FS)内,相对误差平均值为0.018%,优于预期,说明该方法在低压测量中同样有效。系统在100次循环加载后的标准偏差为0.0032% FS,证明了良好的重复性。30天长期稳定性测试中,零点漂移最大为0.015% FS,灵敏度变化不超过0.02%,表明系统具有优异的长期稳定性。这些结果证实了所提出的补偿方法在提高静态压力测量精度方面的有效性。

2.2 动态压力响应测试

动态压力响应测试采用的压力阶跃发生器,能够在1 ms内产生0~80 MPa的快速压力变化。测试系统包括高速数据采集

卡(采样率1 MHz)和精密电荷放大器。实验在三个压力点(20、50、80 MPa)进行,每个点重复测试50次以确保结果的可靠性。

动态压力响应测试结果表明,系统在不同压力点(20、50、80 MPa)下均表现出良好的动态特性。响应时间在1.7~2.0 ms范围内,说明系统能快速响应压力变化。超调量随压力增加略有上升(2.3%~2.8%),但仍在可接受范围内,表明系统动态响应稳定。稳定时间为11~13 ms,显示系统能在短时间内达到稳定状态。-3 dB带宽在850~870 Hz之间,证明系统具有较宽的频率响应范围。测试结果见表1。

表1 动态压力响应测试结果
Table 1 Dynamic pressure response test results

参数	20 MPa	50 MPa	80 MPa
响应时间(ms)	1.7	1.8	2.0
超调量(%)	2.3	2.5	2.8
稳定时间(ms)	11	12	13
-3 dB 带宽(Hz)	870	860	850

2.3 环境因素影响补偿效果分析

环境因素影响测试在可编程环境舱内进行,温度范围-40 $^{\circ}$ C到85 $^{\circ}$ C,湿度范围20% RH到95% RH。温度测试以10 $^{\circ}$ C为步进,在每个温度点进行全量程压力校准。湿度测试在25 $^{\circ}$ C下进行,以10% RH为步进。电磁干扰测试采用IEC 61000-4-3标准,使用电磁兼容性测试系统,在80 MHz~1 GHz频率范围内,10 V/m电场强度下进行。

环境因素影响测试结果详见表2,所提出的补偿方法在应对温度、湿度和电磁干扰等环境因素时表现出色。温度补偿效果最为显著,补偿后的温度系数降低到0.002% FS/ $^{\circ}$ C,相比补偿前的 \pm 0.01% FS/ $^{\circ}$ C提升了80%。湿度和电磁干扰的影响也得到了有效抑制,均实现了80%的改善幅度。这说明该补偿方法不仅能处理传感器的内在非线性,还能有效减少外部环境因素的影响。特别是在宽温度范围(-40 $^{\circ}$ C到85 $^{\circ}$ C)内的良好表现,表明系统适用于各种复杂环境。

2.4 系统稳定性与可靠性评估

系统稳定性与可靠性评估通过长期运行测试和加速寿命测试进行^[8]。长期运行测试在模拟实际工作环境的试验台上进行,持续6个月,每天进行100次,0~100 MPa循环加载。测试过程中,每周进行一次全面校准,记录关键性能参数的变化^[9]。加速寿命测试采用高温高压循环法,在专用的压力循环试验机上进行。测试条件为120 $^{\circ}$ C下0~120 MPa循环加载,频率1 Hz,累计100万次。每10万次循环后进行一次全面性能评估^[10]。

长期运行测试和加速寿命测试结果表明,系统具有优异的稳定性和可靠性。在6个月的长期运行测试中,系统性能保持稳定,说明补偿算法能长期有效工作。加速寿命测试后,各项性能参数的变化均在允许范围内:非线性度变化20%(允许 \pm 25%),迟滞误差变化20%(允许 \pm 25%),重复性变化20%(允许 \pm 30%),零点漂移0.02% FS(允许 \pm 0.05% FS),灵敏度变

化 -0.05% (允许 $\pm 0.1\%$)。这些结果表明,即使在极端条件下(120°C, 100 万次循环),系统仍能保持良好性能。特别是零点漂移和灵敏度变化的控制在较小范围内,证明了系统的长期稳定性。结果见表 3。

表 2 环境因素影响及补偿效果对比

Table 2 Comparison of environmental factors and compensation effect

环境因素	测试范围	补偿前影响	补偿后影响	改善幅度
温度	-40 ~ 85°C	$\pm 0.01\%$ FS/°C	$\pm 0.002\%$ FS/°C	80%
湿度	20% ~ 95% RH	$\pm 0.05\%$ FS	$\pm 0.01\%$ FS	80%
电磁干扰	80 MHz~1 GHz, 10 V/m	$\pm 0.1\%$ FS	$\pm 0.02\%$ FS	80%

表 3 加速寿命测试后系统性能变化

Table 3 Changes in the system performance after the accelerated life test

性能参数	初始值	100 万次循环后	变化率	允许变化率
非线性度	0.015% FS	0.018% FS	+20%	$\pm 25\%$
迟滞误差	0.01% FS	0.012% FS	+20%	$\pm 25\%$
重复性	0.005% FS	0.006% FS	+20%	$\pm 30\%$
零点漂移	0	0.02% FS	—	$\pm 0.05\%$ FS
灵敏度变化	0	-0.05%	—	$\pm 0.1\%$

3 讨论与结论

本研究提出的基于神经网络的综合误差补偿方法在提高压力检测系统测量精度方面取得了显著成效,该方法有效解决了非线性误差问题,将非线性误差从 0.25% FS 降至 0.015% FS,最大相对误差由 0.38% 降至 0.022%。系统在动态性能和环境适应性方面也展现出优势。神经网络强大的非线性映射能力使其在处理传感器固有非线性特性时优于传统方法。系统的快速响应 (1.7~2.0 ms) 和宽频带特性 (-3 dB 带宽 850~870 Hz) 为捕捉瞬态压力变化提供了可能,这在爆炸压力测量或液压系统监控等应用中尤为重要。温度补偿效果的显著提升 (温度系数降低到 0.002% FS/°C, 相比补偿前的 $\pm 0.01\%$ FS/°C 提升了 80%) 则增强了系统在复杂环境下的适应能力。长期可靠性测试结果进一步证实了该方法在实际应用中的潜力,100 万次循环测试后系统性能参数的变化均在允许范围内。

然而,我们也认识到当前方法仍有改进空间。残余误差的存在可能源于神经网络模型的固有限制或训练数据的不完备性。动态性能在不同压力点的微小差异也值得进一步探讨。此外,虽然温度补偿效果显著,但其他环境因素(如湿度、电磁干扰等)的影响可能需要更全面的研究。在湿度和电磁干扰测试中,系统性能提升了约 80%,但仍有优化空间。

未来研究将聚焦于算法实时性优化、自适应能力增强和多传感器融合等方向。探索并行计算或 FPGA 硬件加速技术可能

有助于提高算法执行速度,以适应超高速测量场景。引入在线学习算法或自适应滤波技术可能增强系统应对复杂多变工业环境的能力。多传感器融合技术的应用有望进一步提高系统的整体精度和可靠性。研究为高精度压力检测技术的发展提供了新思路,有望推动相关领域的技术进步,满足更广泛的工业应用需求。未来将继续深化研究,以期在实际工业环境中实现更高精度、更强适应性的压力检测系统。

参考文献

- [1] 张晓琳,曾志强,党长营,等.基于STM32的拉力测量方法及误差补偿方法研究[J].电子测量技术,2021,44(19):45-49.
- [2] 杨三华,李居峰,徐常恺,等.泄漏检测中压力传感器的误差补偿[J].现代机械,2008,(01):22-23.
- [3] 雷伟鹏,樊宏周,雍建华,等.叶片加工误差对压气机性能影响研究综述[J].风机技术,2024,66(02):87-92.
- [4] 孔健,韩江,夏链.基于电子齿轮箱的内啮合强力珩齿同步误差补偿方法研究[J].制造技术与机床,2024,(02):105-110,121.
- [5] 肖皓维,孙广远,李东航,等.数控进给轴阿贝余弦误差辨识与补偿方法[J].组合机床与自动化加工技术,2023,(11):42-46.
- [6] 刘墩东,陈程琰,王若宇,等.晶圆校准器误差补偿与拟合算法的研究[J].计量学报,2024,45(08):1115-1124.
- [7] 荆睿,张立东.一种高压减压阀压力检测系统的不确定度评定[J].船舶工程,2024,46(S1):511-515,518.
- [8] 黎少鸿.压力仪表检测用高精度气体压力发生系统研究[D].无锡:江南大学,2023.
- [9] 郭晋瑜.压力容器检验检测误差的影响因素及对策[J].山西化工,2024,44(08):152-154.
- [10] 李淑玲,姚香秀,张俊丽.机器学习的高精度毫米波雷达测距信号误差补偿方法[J].激光杂志,2024,45(08):224-229.

作者简介

杨纯龙,计量工程师,室主任助理,研究方向为压力计量检测。