DOI: 10.13382/j.jemi.B2104283

压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究*

贺红林 许佳豪 周战洪 胡东明 李 冀
(南昌航空大学 航空制造工程学院 南昌 330063)

摘 要:为减小环境温度变化对压阻式压力传感器实施可靠测量的不利影响,提出一种结合三次样条插值与埃尔米特插值的补偿方法。首先通过标定实验获取标定数据,采用三次样条插值建立环境温度、传感器输出电压与待测压力之间的函数关系以补偿传感器的温度误差,再借助埃尔米特插值构造输出电压与待测压力之间的映射关系描述传感器的测量特性。两种标定工况条件下压力传感器的温度补偿实验结果表明,经该方法补偿后的传感器测量最大引用误差分别为 2.414×10^{-4} 和 6.129×10^{-4}、平均引用误差分别为 2.353×10^{-5} 和 1.313×10^{-4}、误差方差分别为 1.751×10^{-9} 和 1.613×10^{-8},零点温度系数分别为 2.780×10^{-7} 和 8.862×10^{-7},灵敏度温度系数分别为 1.952×10^{-6} 和 3.672×10^{-6},验证了该方法在不同建模数据条件下补偿性能的一致有效性。

关键词:压阻式压力传感器;温度漂移;三次样条插值;埃尔米特插值
中图分类号:TN06;TP212 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.8040

Research on interpolation compensation method for temperature error of piezo-resistive pressure sensor

He Honglin Xu Jiahao Zhou Zhanhong Hu Dongming Li Ji
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to reduce the adverse effect of environmental temperature change on the reliable measurement of piezoresistive pressure sensor, a compensation method combining cubic spline interpolation and Hermite interpolation is proposed in this paper. Firstly, the calibration data are obtained through the calibration experiment, and the cubic spline interpolation is used to establish the functional relationship between the ambient temperature and the output voltage of the sensor and the pressure to be measured to compensate the temperature error of the sensor. Then the Hermite interpolation is used to construct the mapping relationship between the output voltage and the pressure to be measured to describe the measurement characteristics of the sensor. The results of temperature compensation experiment under two different working conditions show that the maximum qualified error are 2.414×10^{-4} and 6.129×10^{-4} respectively, the average qualified error are 2.353×10^{-5} and 1.313×10^{-4} respectively, and the variance of qualified error are 1.751×10^{-9} and 1.613×10^{-8} respectively, zero temperature coefficients are 2.780×10^{-7} and 8.862×10^{-7}, sensitivity temperature coefficients are 1.952×10^{-6} and 3.672×10^{-6}, which verifies the consistent effectiveness of the compensation performance under different modeling data conditions.

Keywords: piezo-resistive pressure sensor; temperature drift; cubic spline interpolation; Hermite interpolation

0 前 言

由于硅基半导体材料电阻率具有热敏特性,压阻式压力传感器的测量结果将伴随环境温度的变化出现温度漂移现象[1]。另一方面,由于光刻、扩散的工艺不稳定性,桥臂阻值无法保证完全一致,惠斯通电桥通电后将产生零位漂移,且零位漂移也将随着温度变化而放大,使其测量精度严重恶化[2-4]。因此,需要采取有效措施改善传感器的温度特性,即温度补偿。

目前,改善传感器温度特性的手段主要包含硬件补偿和软件补偿两类方法[5-6]。硬件补偿的方法主要通过

收稿日期:2021-05-13 Received Date: 2021-05-13
*基金项目:江西省自然科学基金重点项目(20202ACB202003)、国家自然科学基金(51665040)、江西省重点研发计划(20181ACG70024)项目资助

串并联热敏电阻、二极管等元件优化测量电路的温度敏感特性[7]。由于硬件补偿存在电路设计、调试复杂,通用性较弱等不足,无法完全满足工程应用要求[8-10]。软件补偿方法根据标定数据构建待测压力与传感器输出之间的函数关系以达到温度补偿的目的,主要可划分为人工智能方法和数值计算方法。人工智能方法主要借助神经网络、支持向量回归机、最小二乘支持向量回归机等手段逼近传感器在温度影响下的非线性特性,可有效提升传感器的测量精度[11]。人工智能补偿方法对于非线性映射的构建能力正比于模型复杂度与标定数据规模。一方面,选取恰当的人工智能模型及其拓扑结构存在一定困难,且模型超参数的优化选择需要以开发寻优算法为代价。另一方面,人工智能的预测精度对样本规模与样本质量要求较高,目前传感器的硬件配置较难与之相适应,不利于在线补偿。数值计算方法依据最小二乘拟合原理或插值原理描述压力传感器的非线性输出特性,具有补偿原理清晰、对建模数据规模要求不高、补偿速度快、易于实现在线补偿等特点。最小二乘拟合次数过高时,求解拟合系数的正规矩阵存在病态问题,削弱了最终补偿模型的可信度。相较于最小二乘拟合方法,插值方法在边界数据已知的情况下能够对样本数据进行更为精细的刻画,然而插值次数过高所产生的龙格现象将导致补偿结果出现振荡现象。

针对上述问题,本文提出一种基于三次样条插值和埃尔米特插值相结合的压阻式压力传感器温度补偿方法,能够满足不同标定工况条件下压力传感器的温度补偿要求。

1 温度补偿原理及建模

在环境温度 T 条件下,压力传感器在压力 P 作用下的输出电压 U 应满足函数关系 $U=f(P,T)$。因此,可根据传感器标定规程对压力传感器进行数据标定,当环境温度为 $T_i(i=1,2,\cdots,m)$ 时,将标准压力 $P_j(j=1,2,\cdots,n)$ 作用于压力传感器,获得静态输出 U_{ij},通过补偿算法预测待测压力 $P'=f'(\mathrm{T},\mathrm{U})$。令环境温度为 T_c 时待测压力 P' 对应的输出电压为 U_c,结合三次样条插值与埃尔米特插值完成待测压力温度误差补偿的步骤如下:

1) 为完成传感器的温度补偿工作,利用三次样条插值法针对标定压力 $P_j(j=1,2,\cdots,n)$ 按照式(1)建立 n 种标定压力条件下温度工况 $T_i(i=1,2,\cdots,m)$ 对输出电压 U_{ij} 的影响 $U_{ij}=S_j(T_i)$,将上述函数关系中的系数写入 EEPROM;

2) 将当前环境温度 T_c 结合 EEPROM 中的系数计算得到该温度条件下标定压力 $P_j(j=1,2,\cdots,n)$ 对应的输出电压 $U'_j(j=1,2,\cdots,n)$;

3) 在 U'_j 中选取与 U_c 差异程度最小的3种标定电压输出,记为$[U_x,U_y,U_z]$,$x,y,z\in\{1,2,\cdots,n\}$;

4) 结合$[U_x,U_y,U_z]$与相应的标定压力$[P_x,P_y,P_z]$采用埃尔米特插值建立如式(2)的传感器的输出特性 $P=H(U)$;

5) 将 U_c 代入步骤4)中最终得到待测压力 P'。

$$U'_j=\begin{cases}a_{1j}+b_{1j}(T_c-T_1)+c_{1j}(T_c-T_1)^2+d_{1j}(T_c-T_1)^3, & T_1\leqslant T_c<T_2\\ a_{2j}+b_{2j}(T_c-T_2)+c_{2j}(T_c-T_2)^2+d_{2j}(T_c-T_2)^3, & T_2\leqslant T_c<T_3\\ \vdots & \\ a_{(m-1)j}+b_{(m-1)j}(T_c-T_{m-1})+c_{(m-1)j}(T_c-T_{m-1})^2+d_{(m-1)j}(T_c-T_{m-1})^3, & T_{m-1}\leqslant T_c<T_m\end{cases}$$

$$j=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

$$P'=\left(\frac{U_c-U_y}{U_x-U_y}\right)^2\left(1+2\frac{U_c-U_x}{U_y-U_x}\right)P_x+\left(\frac{U_c-U_x}{U_y-U_x}\right)^2\left(1+2\frac{U_c-U_y}{U_x-U_y}\right)P_y+$$
$$\left(\frac{U_c-U_y}{U_x-U_y}\right)^2(U_c-U_x)P'_x+\left(\frac{U_c-U_x}{U_y-U_x}\right)^2(U_c-U_y)P'_y \tag{2}$$

式(2)将任意温度 T 下的输出电压 U_i 划分为 $m-1$ 个区间,每个区间对应一个三次多项式。然后将惠斯通电桥因待测压力作用所输出的电压 U 代入对应的三次样条多项式,可以得到经过误差补偿后的压力值 P',压力传感器温度误差的插值补偿方法流程如图1所示。

为衡量补偿方法对修正传感器温度误差的有效性,本文以压力传感器的全量程引用误差 E_q 作为评判传感器性能指标:

$$E_q=\left|\frac{P'-P}{P_{FS}}\right|\times 100\% \tag{3}$$

式中:P_{FS} 为传感器测量范围。

2 压力传感器标定实验

实验选用的压阻式差压传感器(WP-BADP8E)量程为-40~40 kPa(测量性能要求 $\max(E_q)\leqslant 0.065\%$),高低温试验箱(ACS-CH250TF)可调温度范围为-40 ℃~180 ℃,工业用惰性气体气瓶(氮气,40 L),压力控制器(Mensor CPC6000)压力控制精度为 2×10^{-4}(0~1 MPa),气瓶、压力控制器与压力传感器由橡胶软管密封连接,实

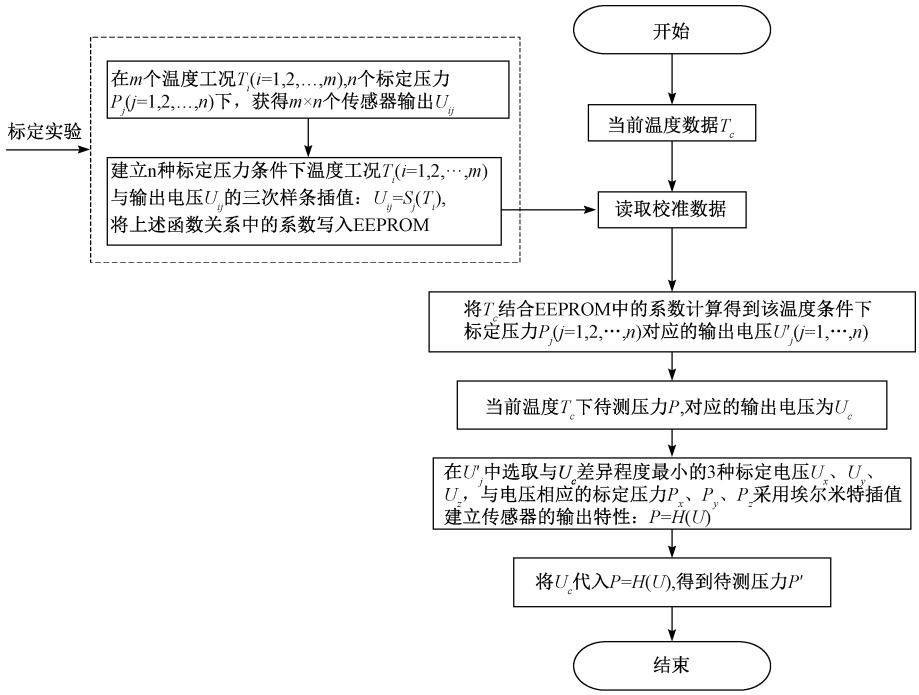


图 1　压力传感器温度误差的插值补偿方法

Fig. 1　Interpolation compensation method for temperature error of pressure sensor

验装置如图 2 所示。传感器置入高低温试验箱后,在 -40 ℃~80 ℃工作温度范围内以 10 ℃为步距设置 13 种温度测量工况。规定差压传感器工作的端面分为参考端(H 端)和测量端(L 端)。当 L 端压力大于 H 端压力,为负差压;反之,为正差压。以施加-40 kPa 标准差压为例说明上述差压定义:压力控制器可控制 H 端压力保持 0 kPa,施加相应标准压力作用于 L 端,当 L 端压力为 40 kPa 时,认为此时传感器所受差压作用为-40 kPa。设置每种温度工况后试验箱保温 2.5 h,通过压力控制器向差压传感器的参考端与差压端同时施加标准压力,待两侧压力稳定后读取数据。在-40~40 kPa 量程范围内以 4 kPa 为步长采样待测压力,共 21 个压力测量点。对每个取样点测量三次取平均值,共获取 273 组标定数据, U 经过换算之后即为压力输出 P', 如表 1 所示。差压传感器测量范围内的静态输出特性如图 3 所示,以 20 ℃(常温)条件下传感器输出作为标准输出的引用误差曲面如图 4 所示。由图 3 和 4 可知,差压传感器因环境温度变化呈现显著的温度漂移现象。

本文进一步利用零点温度系数和灵敏度温度系数综合评价差压传感器的温度效应。零点温度系数 α_0 为温度变化 1 ℃时零点输出偏移值与输出范围的百分比,可表示为:

$$\alpha_0 = \frac{|\Delta P_{0\max}|}{\Delta T \cdot P_{FS}} \times 100\% \tag{4}$$

式中:$|\Delta P_{0\max}|$ 为测量范围内零点输出最大改变量的绝对值;ΔT 为差压传感器工作温度范围。灵敏度温度系数 α_s 为温度变化 1 ℃时传感器灵敏度的相对变化百分比:

$$\alpha_s = \frac{|\max(\Delta P)|}{\Delta T \cdot P_{FS}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:$|\max(\Delta P)|$ 为测量范围内任一差压等级下最大输出变化量的绝对值。

根据式(3)计算可知,传感器最大引用误差出现在 -40 ℃与-40 kPa 时,达到 8.4%。零点温度系数中的 $|\Delta P_{0\max}|$ 由-40 ℃时输出值-0.541 kPa 与 80 ℃时输出值 0.153 kPa 共同决定,零点温度系数为:

$$\alpha_0 = \frac{|-0.541-0.153|}{(80-(-40))\times 80} = 5.556\times 10^{-5} \tag{6}$$

灵敏度温度系数中的 $|\max(\Delta P)|$ 由-40 kPa 作用时传感器在-40 ℃与 80 ℃环境温度下的输出-46.722 和 -34.753 kPa 构成,灵敏度温度系数为:

$$\alpha_s = \frac{|-46.722-(-34.753)|}{(80-(-40))\times 80} = 1.246\times 10^{-3} \tag{7}$$

上述分析表明,为满足高精度测量要求 $\max(E_q) \leqslant 0.065\%$,必须进行温度补偿。

3　温度补偿结果及误差分析

为验证本文所研究方法在不同标定数据条件下的一致补偿有效性,本文构造两种标定工况条件下的建模数据集。标定工况 1,在压力传感器的工作温度范围内(-40 ℃~80 ℃)以 20 ℃为温度采样步长取 6 个温度标定工况,以 8 kPa 为压力采样步长取 11 个压力标定等

图 2 压力传感器压力标定系统

Fig. 2 Pressure sensor calibration system

级,共 77 组(7×11)标定数据为建模数据集,其余 196 组标定数据构成验证集。标定工况 2,以-40 ℃、20 ℃和 80 ℃为温度工况,-40、-20、0、20 和 40 kPa 为压力标定等级,共 15 组(3×5)标定数据为建模数据集,其余 258 组标定数据构成验证集。运算过程数据均参照下位机运算精度做等精度运算处理,便于补偿算法移植至下位机。

表 1 标定数据

Table 1 Calibration data

输入压力	输出压力 P'/kPa												
P/kPa	-40 ℃	-30 ℃	-20 ℃	-10 ℃	0 ℃	10 ℃	20 ℃	30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃
-40.000	-46.722	-45.396	-44.160	-42.992	-41.888	-40.811	-40.000	-38.844	-37.951	-37.092	-36.279	-35.503	-34.753
-36.000	-42.145	-40.943	-39.824	-38.766	-37.764	-36.789	-36.000	-35.008	-34.200	-33.423	-32.688	-31.987	-31.307
-32.000	-37.556	-36.479	-35.476	-34.528	-33.630	-32.756	-32.000	-31.161	-30.436	-29.742	-29.085	-28.458	-27.850
-28.000	-32.957	-32.004	-31.117	-30.279	-29.485	-28.712	-28.000	-27.302	-26.663	-26.050	-25.471	-24.918	-24.382
-24.000	-28.349	-27.518	-26.749	-26.020	-25.330	-24.658	-24.000	-23.433	-22.879	-22.348	-21.846	-21.368	-20.903
-20.000	-23.730	-23.024	-22.370	-21.750	-21.164	-20.592	-20.000	-19.553	-19.083	-18.635	-18.211	-17.807	-17.414
-16.000	-19.106	-18.523	-17.986	-17.475	-16.991	-16.521	-16.000	-15.666	-15.281	-14.915	-14.568	-14.238	-13.916
-12.000	-14.474	-14.014	-13.592	-13.190	-12.810	-12.440	-12.000	-11.770	-11.469	-11.186	-10.917	-10.660	-10.410
-8.000	-9.834	-9.498	-9.192	-8.897	-8.621	-8.352	-8.000	-7.866	-7.651	-7.448	-7.256	-7.074	-6.896
-4.000	-5.179	-4.966	-4.773	-4.589	-4.416	-4.248	-4.000	-3.946	-3.816	-3.695	-3.581	-3.472	-3.367
0	-0.541	-0.450	-0.371	-0.295	-0.225	-0.158	0	-0.039	0.008	0.047	0.084	0.119	0.153
4.000	4.100	4.069	4.033	4.001	3.969	3.936	4.000	3.872	3.834	3.793	3.753	3.714	3.678
8.000	8.770	8.616	8.463	8.323	8.190	8.058	8.000	7.809	7.687	7.565	7.447	7.334	7.227
12.000	13.429	13.154	12.886	12.638	12.403	12.171	12.000	11.740	11.534	11.331	11.137	10.949	10.771
16.000	18.088	17.692	17.311	16.956	16.620	16.288	16.000	15.674	15.384	15.100	14.829	14.568	14.320
20.000	22.746	22.229	21.734	21.272	20.834	20.403	20.000	19.607	19.234	18.870	18.522	18.188	17.869
24.000	27.405	26.766	26.159	25.590	25.051	24.520	24.000	23.544	23.087	22.642	22.219	21.811	21.421
28.000	32.060	31.302	30.582	29.907	29.267	28.638	28.000	27.480	26.940	26.416	25.916	25.435	24.975
32.000	36.713	35.835	35.002	34.222	33.481	32.754	32.000	31.416	30.793	30.189	29.613	29.060	28.530
36.000	41.362	40.364	39.420	38.534	37.694	36.868	36.000	35.351	34.645	33.962	33.310	32.685	32.084
40.000	45.950	44.889	43.834	42.843	41.903	40.980	40.000	39.284	38.496	37.733	37.006	36.308	35.638

为全面评价本文补偿方法对压力传感器的温度补偿性能,选取文献[12]的多项式拟合法(Polyfit)、文献[13]的最小二乘拟合结合三次样条插值法(Polyfit_Spline)、文献[14]的最小二乘拟合结合拉格朗日插值法(Polyfit_

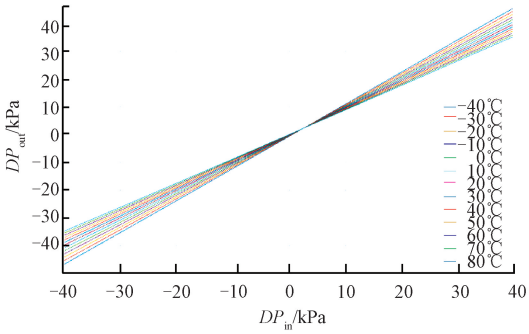


图 3　差压传感器静态特性

Fig. 3　Static characteristics of differential pressure sensor

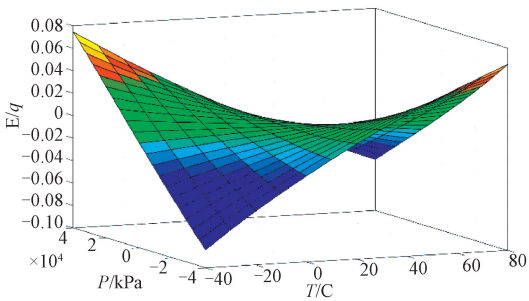


图 4　差压传感器温度误差

Fig. 4　Temperature error of differential pressure sensor

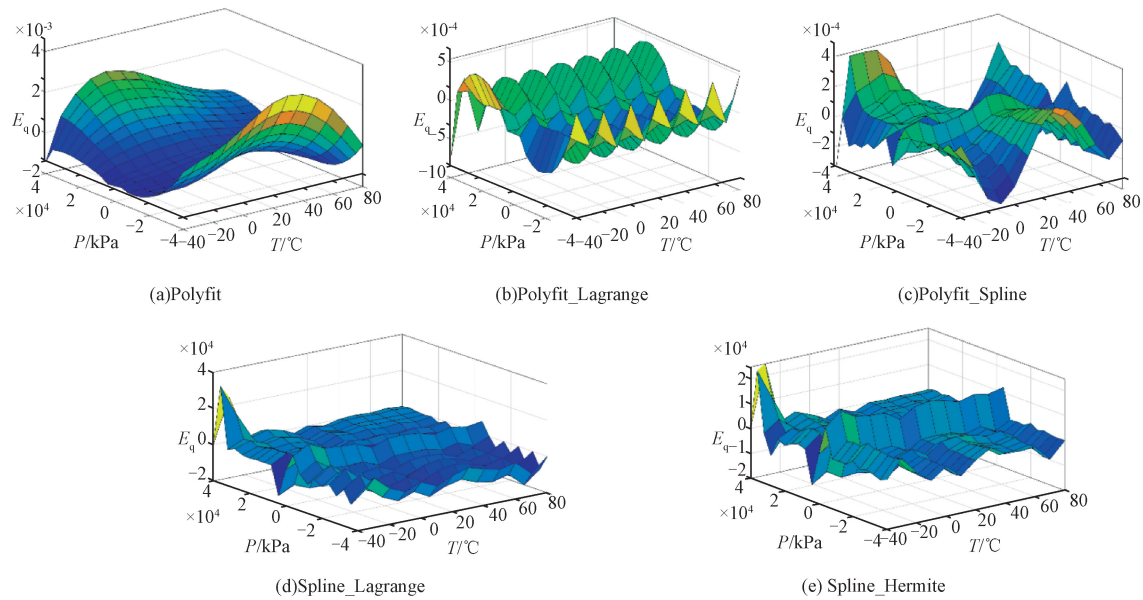
Lagrange)、文献[15]的三次样条插值结合拉格朗日插值法(Spline_Lagrange)与本文所提出的补偿方法(Spline_Hermite)结合上述两种标定工况条件下获得的建模数据进行温度补偿实验。各方法在标定工况 1 条件(77 个标定样本)下的补偿结果如表 2 和图 5 所示。

由表 2 和图 5 可知,1)与 Polyfit 方法相比,由于引入了插值过程,Polyfit_Spline 法与 Polyfit_Lagrange 法能够充分挖掘温度对传感器测量特性的内在影响,且在分段节点满足导数连续的三次样条插值方法总体优于拉格朗日分段线性插值;2)相较于融合拟合与插值手段的补偿手段,以不同插值过程构建的 Spline_Lagrange 法与本文提出方法更为细致地刻画了给定温度条件下压力传感器的输出特性,满足节点一阶连续性的埃尔米特插值方法对传感器输出特性的描述优于无节点连续性约束的拉格朗日插值方法;3)本文提出的三次样条插值结合埃尔米特插值方法在标定工况 1 条件下的最大引用误差为 0.024%(−40 ℃,36 kPa),为温度补偿前的 0.287%,零点温度系数为温度补偿前的 0.5%,灵敏度温度系数为温度补偿前的 0.157%;本文方法得到的引用误差均值 E_q(mean)和引用误差方差 E_q(var)均小于其他补偿方法,体现出更为稳定的补偿表现。

表 2　温度补偿误差结果(标定工况 1)

Table 2　Temperature compensation results (Calibration condition 1)

温度补偿方法	E_q(max)	E_q(mean)	E_q(var)	α_0/℃	α_s/℃
Polyfit[12]	3.336×10^{-3}	8.250×10^{-4}	3.714×10^{-7}	6.068×10^{-6}	1.194×10^{-5}
Polyfit_Lagrange[13]	7.335×10^{-4}	1.613×10^{-4}	2.628×10^{-8}	6.123×10^{-7}	2.458×10^{-6}
Polyfit_Spline[14]	3.791×10^{-4}	9.645×10^{-5}	5.167×10^{-9}	9.860×10^{-7}	4.505×10^{-6}
Spline_Lagrange[15]	3.360×10^{-4}	3.295×10^{-5}	2.130×10^{-9}	2.782×10^{-7}	2.744×10^{-6}
Spline _ Hermite	2.414×10^{-4}	2.353×10^{-5}	1.751×10^{-9}	2.780×10^{-7}	1.952×10^{-6}



(a)Polyfit　(b)Polyfit_Lagrange　(c)Polyfit_Spline

(d)Spline_Lagrange　(e) Spline_Hermite

图 5　温度补偿结果(标定工况 1)

Fig. 5　Temperature compensation results (calibration condition 1)

各方法在标定工况 2 条件(15 个标定样本)下的补偿结果如表 3 和图 6 所示,由表 3 和图 6 可知,1)由于标定工况 2 建模数据规模约为标定工况 1 的 1/5,属于典型的小样本建模条件,所有补偿方法在该条件下的补偿性能均有所降低,表明标定样本量是最终补偿结果的决定性影响因素,补偿性能随标定样本量的扩增而提升;2)两种标定工况中引用误差方差出现的波动情况表明,Spline_Lagrange 方法的补偿性能对标定数据规模的变化较为敏感,而本文方法获得的零点温度系数与灵敏度温度系数的变化对标定数据的依赖性较弱;3)本文方法在补偿精度与稳定性两方面均优于其他补偿方法,有效将差压传感器的最大引用误差抑制在 0.065%,可满足高精度测量要求。

表 3 温度补偿误差结果(标定工况 2)

Table 3 Temperature compensation results (Calibration condition 2)

温度补偿方法	E_q(max)	E_q(mean)	E_q(var)	α_0/℃	α_s/℃
Polyfit[12]	$3.072\ 4\times10^{-3}$	$8.820\ 6\times10^{-4}$	$4.288\ 4\times10^{-7}$	6.091×10^{-6}	3.575×10^{-6}
Polyfit_Lagrange[13]	$7.163\ 6\times10^{-4}$	$1.950\ 9\times10^{-4}$	$2.862\ 9\times10^{-8}$	8.038×10^{-7}	3.723×10^{-6}
Polyfit_Spline[14]	$7.852\ 3\times10^{-4}$	$1.622\ 5\times10^{-4}$	$2.209\ 0\times10^{-8}$	3.386×10^{-6}	3.388×10^{-6}
Spline_Lagrange[15]	$7.845\ 1\times10^{-4}$	$2.359\ 6\times10^{-4}$	$3.259\ 4\times10^{-8}$	8.897×10^{-7}	4.761×10^{-6}
Spline _ Hermite	$6.128\ 5\times10^{-4}$	$1.312\ 9\times10^{-4}$	$1.613\ 4\times10^{-8}$	8.862×10^{-7}	3.672×10^{-6}

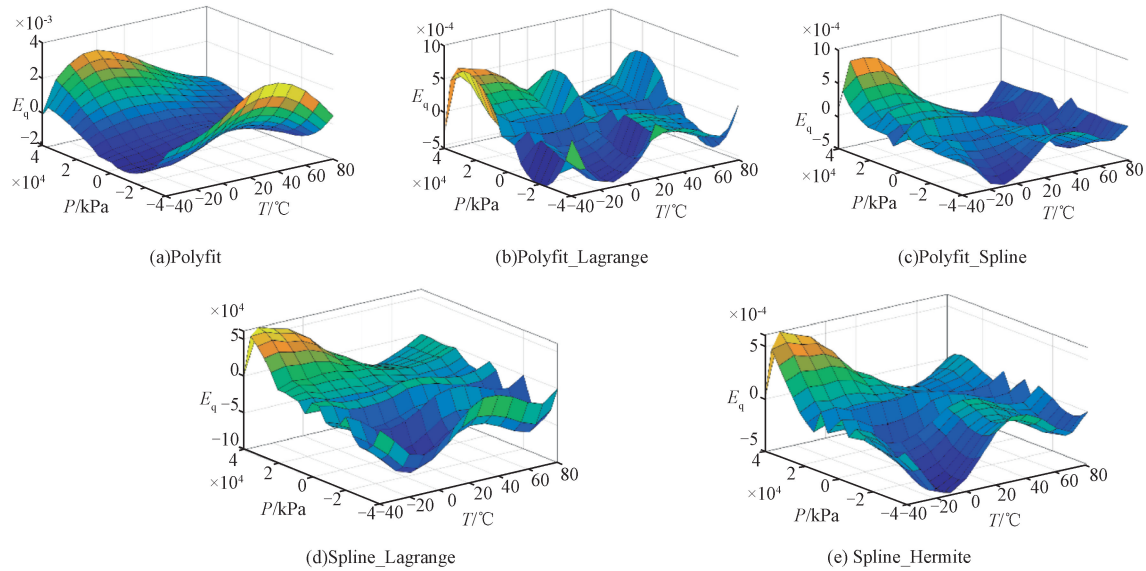


图 6 温度补偿结果(标定工况 2)

Fig. 6 Temperature compensation results (calibration condition 2)

4 结 论

本文提出一种结合三次样条插值和埃尔米特插值的压力传感器温度误差补偿方法。当标定数据较为充裕时,本文提出的基于满足连续性条件的双插值原理,在保证传感器对建模数据(训练数据)的补偿误差为 0 的前提下,弥补了分段线性插值对非线性数据描述能力不足,同时完成了对不同环境温度影响下传感器输出特性的细致刻画。在标定数据极为稀疏的条件下,本文方法建立的温度补偿模型虽然相比于工况 1 而言出现了一定程度的性能下降,但相对其他补偿方法而言能够较好地解决相同数据条件下的欠补偿问题,保证了补偿性能对数据规模的一致性,在有效减轻标定实验工作量的前提下取得较为理想的补偿效果,是一种兼顾经济性与精确性的有效温度补偿方法,具有良好的工程适用性。

参考文献

[1] 王慧,宋宇宁. 基于混合优化算法的压力传感器温度补偿[J]. 传感技术学报,2016,29(12):1864-1868.
WANG H, SONG Y N. Temperature compensation of pressure sensor based on hybrid optimization algorithm[J]. Journal of Sensing Technology, 2016, 29 (12): 1864-1868.

[2] 胡启阳,龙军,陈君. 基于 LS-SVR 的压力传感器温度自补偿策略[J]. 传感技术学报,2017,30(7):1057-1061.
HU Q Y, LONG J, CHEN J. Self compensation strategy of pressure sensor temperature based on LS-SVR [J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30 (7): 1057-1061.

[3] 刘贺,李淮江. 基于 BP 神经网络的压力传感器温度补

偿方法研究[J]. 传感技术学报,2020,33(5):688-692,732.
LIU H, LI H J. Research on temperature compensation method of pressure sensor based on BP neural network [J]. Journal of Sensing Technology, 2020, 33 (5): 688-692, 732.
[4] 文常保,王蒙,钟晨昊, 等. 基于 DE-SVM 的硅基压阻式压力传感器温度补偿研究[J]. 传感技术学报,2019,32(10):1493-1498.
WEN CH B, WANG M, ZHONG CH H, et al. Research on temperature compensation of silicon piezoresistive pressure sensor based on DE-SVM [J]. Journal of Sensing Technology, 2019,32 (10): 1493-1498.
[5] 唐朝国. 基于改进 Levy 飞行的 PSO 湿度传感器补偿算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 119-125.
TANG CH G. PSO humidity sensor compensation algorithm based on improved Levy flight [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (3): 119-125.
[6] 何怡刚,陈张辉,李兵, 等. 改进 AFSA-BP 神经网络的湿度传感器温度补偿研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(7):95-100.
HE Y G, CHEN ZH H, LI B, et al. Research on temperature compensation of humidity sensor based on improved AFSA-BP neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32 (7): 95-100.
[7] 党瑞荣,张宏伟,宋楠, 等. 高温高压井下压力传感器的补偿与校正[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 737-743.
DANG R R, ZHANG H W, SONG N, et al. Compensation and calibration of high temperature and high pressure downhole pressure sensor [J]. Journal of Instrumentation, 2016,37 (4): 737-743.
[8] 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 Y F, LI J T, LI H J, et al. Design of pressure measurement circuit with temperature compensation [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39 (12): 86-89.
[9] 张艳华,陈玉玲,赵爽, 等. 压阻式压力传感器温度补偿技术的研究及应用[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5):138-142,153.
ZHANG Y H, CHEN Y L, ZHANG SH, et al. Research and application of temperature compensation technology for piezoresistive pressure sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2017,40 (5): 138-142, 153.
[10] 马宏光,曾国辉,黄勃. 基于 WOA-BP 的压力变送器温度补偿研究[J]. 仪表技术与传感器,2020(6):33-36.
MA H G, ZENG G H, HUANG B. Research on temperature compensation of pressure transmitter based on WOA-BP [J]. Instrument Technology and Sensor, 2020 (6): 33-36.
[11] 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.
[12] WU T, CHEN S, WU P, et al. A high precision software compensation algorithm for silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(4): 748-753.
[13] 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, 2017, 17(3): 709-715.
[14] 李冀,胡国清,周永宏, 等. 一种压阻式压力传感器的温度补偿方法[J]. 仪表技术与传感器,2018(6):1-4,10.
LI J, HU G Q, ZHOU Y H, et al. A temperature compensation method of piezoresistive pressure senso[J]. Instrument Technology and Sensor,2018(6):1-4,10.
[15] 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 W J, CHEN H L, CHEN H M, et al. Research on online compensation method for measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41 (6): 59-65.

作者简介

贺红林,1996 年于华中科技大学获得硕士学位,2007 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南昌航空大学教授,主要研究方向为先进传感技术与精密驱动技术。
E-mail: Hehonglin1967@163.com

He Honglin received M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1996 and Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2007 respectively. Now he is a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include advanced sensing technology and precision driving technology.

李冀(通信作者),2013 年于苏州大学获得硕士学位,2017 年于厦门大学获得博士学位,现为南昌航空大学教师,主要研究方向为先进传感技术与多传感器数据融合。
E-mail: lj@nchu.edu.cn

Li Ji (Corresponding author) received M. Sc. degree from Soochow University in 2013 and Ph. D. degree from Xiamen University in 2017 respectively. Now he is a lecture at Nanchang Hangkong University. His main research interests include advanced sensing technology and multi-sensor data fusion.