

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006194

# 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究\*

闫文吉<sup>1,2</sup>, 陈红亮<sup>1,2</sup>, 陈洪敏<sup>1</sup>, 王力<sup>1</sup>, 董静<sup>1</sup>

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院 成都 610500; 2. 四川天利科技有限责任公司 绵阳 621010)

**摘要:** 由于硅压阻式压力传感器的测量精度易受温漂和非线性等因素影响, 而现有测量误差数字补偿方法实时性不高, 因此提出了一种基于二元插值算法的异频分步在线补偿方法。首先采用三次样条插值算法对传感器输出电压和工作温度插值, 抑制温漂; 然后利用拉格朗日插值算法对压力和电压进行分段插值, 减小非线性误差; 同时降低温度的插值频率以减少每个压力插值周期内计算量, 克服了传统的插值补偿方法将两个变量在一个插值周期内计算时间长的缺点。通过传感器标定和误差补偿实验验证了该方法的补偿精度在 0~60℃ 的温度范围内满足  $\pm 0.05\%$  FS 的误差要求, 并且在设计的采集系统上实现 1 kHz 的数据输出速率。实验结果表明该方法可以有效地提高硅压阻式压力传感器的测量精度, 且具有较高的实时性, 能够实现误差在线补偿。在航空发动机试验的气体压力测量中具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 硅压阻式压力传感器; 测量误差; 异频分步补偿; 在线补偿; 二元插值

**中图分类号:** TP212 TH812      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4099

## Research on on-line compensation method for the measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor

Yan Wenji<sup>1,2</sup>, Chen Hongliang<sup>1,2</sup>, Chen Hongmin<sup>1</sup>, Wang Li<sup>1</sup>, Dong Jing<sup>1</sup>

(1. Sichuan Gas Turbine Establishment, AECC, Chengdu 610500, China;

2. Sichuan Tianli Technology Co., Ltd., Mianyang 621010, China)

**Abstract:** The measurement accuracy of silicon piezoresistive pressure sensor is subject to the influence of temperature drift, nonlinear error and etc., existing measurement error numerical compensation methods have low real-time performance. A step-by-step different frequency compensation method based on two element interpolation is proposed. The method is implemented as follows: firstly, the cubic spline interpolation algorithm is used to interpolate the output voltage and working temperature of the sensor, and suppress temperature drift; and then, Lagrange interpolation algorithm is used to interpolate the pressure and voltage piecewisely, and reduce the nonlinear error; meanwhile, the frequency of the temperature interpolation is decreased to reduce the calculation burden in each pressure interpolation period, and overcome the shortcoming that traditional interpolation compensation method calculates two variables in one interpolation period and the calculation is time-consuming. Experiments on sensor calibration and error compensation were conducted, the results verify that the compensation accuracy meets the error requirement of  $\pm 0.05\%$  FS in the temperature range of 0~60℃, and the data output rate of 1 kHz is achieved in the designed acquisition system; the experiment results indicate that the proposed method can effectively improve the measurement accuracy of silicon piezoresistive pressure sensor, has good real time performance and can realize error on-line compensation. The proposed method possesses a certain engineering value in the gas pressure measurement in aeroengine tests.

**Keywords:** silicon piezoresistive pressure sensor; measurement error; different frequency compensation; on-line compensation; two element interpolation

## 0 引言

硅压阻式压力传感器具有体积小、成本低、稳定性好等特点,在航空发动机试验中气体压力测试领域广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,由于半导体材料自身温度非常敏感,使得传感器的输出不仅受压力的影响,还受工作温度变化的影响,从而产生温度漂移,加上传感器自身存在的非线性问题,使其测量精度大大降低,需要采取措施对其进行温漂补偿和非线性校正。同时,随着对发动机过渡态的深入研究,对采集系统的采样速率提出更高要求,因此所使用的补偿方法应在满足精度的前提下具有更高的实时性<sup>[3]</sup>。

目前对硅压阻式压力传感器进行误差补偿常采用硬件补偿和软件补偿两类<sup>[4-5]</sup>。硬件补偿主要是指对传感器的电路和制作工艺进行优化设计或者使用专用芯片对传感器输出电压进行补偿从而达到提高采集精度的目的<sup>[6-9]</sup>,但硬件补偿方法存在补偿过程复杂、调试困难、通用性不强等缺点,不利于进行实际工程应用<sup>[10]</sup>,因此工程中更倾向于软件补偿。

软件补偿是利用传感器的温度和压力信息,通过一定的数字补偿算法对传感器的测量误差进行修正。文献<sup>[11]</sup>提出一种基于粒子群算法优化最小二乘支持向量机的温度补偿模型,改善了传统的最小二乘支持向量机模型对参数选取耗时耗力且未必找到全局最优解的缺陷,改善了测量精度;文献<sup>[12]</sup>针对低温和高温区域使用径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络进行补偿,对中间线性区域使用最小二乘拟合方法进行补偿,取得了较好的补偿效果。虽然这类基于人工智能的方法能够实现高精度补偿,但是存在对系统的硬件要求较高、计算量大和实时性较差等缺点,较难实现在线补偿<sup>[13]</sup>。

实时性和补偿精度是衡量在线补偿效果的两个重要指标,选择计算量少和补偿精度高的补偿方法是实现在线补偿的关键。文献<sup>[14]</sup>提出一种将样条插值与最小二乘拟合相结合的补偿算法并结合标定数据进行了仿真实验,结果表明该方法可以改善补偿效果,缩短补偿时间。文献<sup>[15]</sup>基于最小二乘法 and 抛物线插值相结合的算法对蓝宝石压力传感器进行了温度补偿,并在设计的硬件平台上进行了高温高压实验,实验结果表明该方法可以显著提高补偿精度。与基于人工智能的补偿方法<sup>[16]</sup>相比,这类方法的计算量较小,但也存在插值节点数少时补偿精度不高和增加插值节点数时计算量增大的矛盾,或者拟合次数较高时容易出现龙格振荡的问题<sup>[17]</sup>。针对上述问题,本文在三次样条插值和拉格朗日插值相结合的补偿算法的基础上,提出一种基于二元插值算法的异频分步补偿方法,能够在保证补偿精度的前

提下实现硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿。

## 1 测量误差在线补偿策略及流程

传统的二元分步插值<sup>[18]</sup>先是根据当前温度找到相邻的两个温度标定点,然后分别在两个温度标定点上将压力对电压插值得到两个温度标定点上的压力值,最后再将这两个值对温度插值得到经过温度补偿和非线性补偿的压力测量值。这种方法无法将温度插值周期和压力插值周期分开,对温度和压力的插值必须放在一个插值周期里完成,计算量大。因此,本文提出的在线补偿策略是先根据当前工作温度修正传感器的输出电压,完成温度插值;再将压力对输出电压进行分段线性插值,实现压力插值;同时将两个插值过程分步进行,且降低温度的插值频率,进一步减少每个压力插值周期内计算量,提高了算法的实时性。

根据上述策略,确定了硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿流程如图1所示。具体可描述如下:1)所需的输入为从传感器提取的温度数据和通过标定实验得到的压力数据;2)根据传感器的数学模型将导致测量误差的原因分成由温度变化引起的输出电压漂移和二阶以上的非线性分量两类;3)利用MATLAB计算得到传感器输出电压和温度的三次样条插值函数的系数,并下载到采集系统的存储器中;4)采集系统的处理器根据检测到的信号和预先存入存储器中的校准数据,经过三次样条插值和拉格朗日插值程序计算,得到经过温漂和非线性误差补偿的工程值,从而完成实时自补偿和自校正。

本文方法的创新点是在误差数字补偿过程中将温度插值的计算频率降低(图1中红色点划线框),并且提高压力插值的计算频率(图1中红色虚线框),这样的优势在于既可保证在温度插值周期内使用计算量较大的算法提高精度,又可以减少压力插值周期内计算量,从而在提高补偿精度的同时提高数据输出速率,克服了传统二元插值算法将温度插值和压力插值放在同一个插值周期里完成时计算量大的缺点。在满足测量精度的同时提高了算法的实时性,实现亚毫秒级的算法计算时间,因此在航空发动机试验中的气体压力测量领域具有较好的工程应用价值。

## 2 硅压阻式压力传感器的数学模型

利用数字方法对硅压阻式压力传感器测量误差进行在线补偿,首先对传感器的数学模型进行推导。

### 2.1 数学模型推导

理想的硅压阻式压力传感器的输出电压 $U_p$ 与输入压力 $P$ 之间应为线性关系: $U_p = b + kP$ ,其中 $b$ 和 $k$ 分别代表传感器的零点和灵敏度。然而,实际的传感器输出

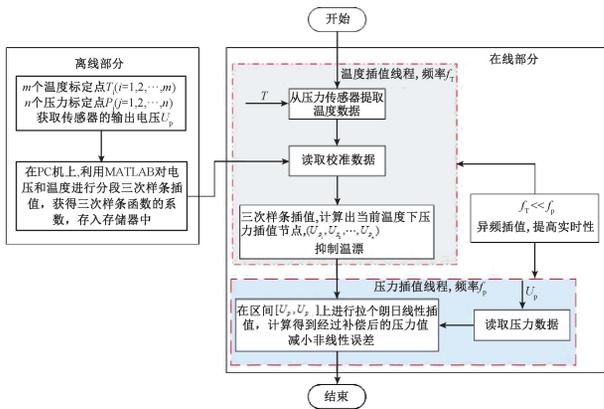


图1 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿流程

Fig.1 On-line measurement error compensation process of silicon piezo-resistive pressure sensor

与输入之间的关系易受工作温度的影响,而且总是存在着一定的非线性<sup>[19]</sup>。所以,实际的硅压阻式压力传感器的输出与输入的关系可用式(1)来表示。

$$U_p = b(T) + k(T)P + o(P, T) \quad (1)$$

式中:  $b(T)$  和  $k(T)$  分别代表传感器的零点和灵敏度,它们都是温度的函数,反映了温度漂移;  $o(P, T)$  代表传感器的非线性成分,是压力  $P$  和和工作温度  $T$  的高阶函数。补偿的目的就是根据实时的工作温度  $T$  去修正输出电压  $U_p$  中因温漂而产生的分量,同时消除二阶以上的非线性成分  $o(P, T)$ 。

所以,在对硅压阻式压力传感器的测量误差进行补偿之前,先要想办法获得能够反映温度变化的特征参数,然后才能进行补偿。

### 2.2 传感器工作温度信息的提取

从压力元件桥路提取传感器的工作温度和压力信息<sup>[20]</sup>,其原理如图2所示。在硅压阻式压力传感器的4个桥臂上有4个应变电阻  $R_1, R_2, R_3, R_4$ ,这些电阻的阻值不仅会随压力的变化而变化,还会随温度的变化而变化。设  $R$  为桥臂的初始阻值,  $\Delta R_p$  为受压后桥臂阻值的变化量,  $\Delta R_T$  为受工作温度影响的变化量,  $I$  为施加在传感器激励端的恒流激励源。则桥路的并联电阻为:

$$R_B = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = R + \Delta R_T \quad (2)$$

由式(2)可知,传感器的桥路电阻仅与温度引起的阻值变化有关。因此,可以利用  $R_B$  作为反映温度变化的参数。该方法直接利用压力传感器桥路元件本身来反映温度变化,省去了外加的温度传感器。然而,实际应用中,传感器厂商为了减少温度漂移一般会将桥路电阻的温度系数做得很低,即  $R_B$  在工作温度范围内的变化很小,使得通过  $R_B$  来采集温度的分辨率较低。

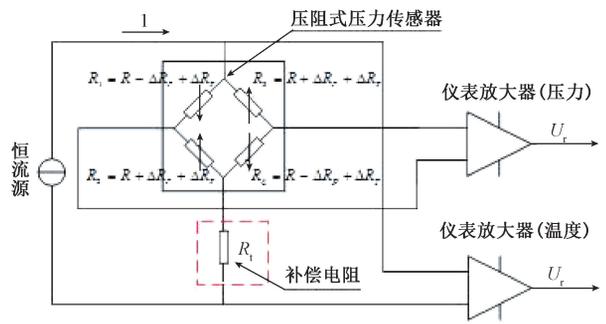


图2 工作温度信息提取原理

Fig.2 Schematic diagram of operation temperature information extraction

本文在压力传感器的激励端加入一个线性度好且温漂较大的金属膜电阻作为补偿电阻(图2虚线框所示)。补偿电阻  $R_l$  的电阻随温度变化而变化,补偿电阻与传感器串联,且处于同一工作温度下,则电流  $I$  流过压力传感器和补偿电阻形成的总电压  $U_T$  为:

$$U_T = U_{R_B} + U_{R_l} = (R_B + R_l) \times I \quad (3)$$

设补偿电阻  $R_l$  的初值为  $R_{l_0}$ ,随温度变化量为  $\Delta R_l$ ,将式(2)代入式(3)得:

$$U_T = (R + R_{l_0}) \times I + (\Delta R_T + \Delta R_l) \times I \quad (4)$$

式中:  $R, R_{l_0}, I$  均为常量,所以  $U_T$  的变化由  $\Delta R_T$  和  $\Delta R_l$  两部分组成,而  $\Delta R_T$  和  $\Delta R_l$  仅与温度有关。此时就可以将电压  $U_T$  当做温度数据来处理。

### 3 基于二元插值的异频分步补偿方法

由上述内容可知,式(1)是一个含有两个自变量的数学模型,它揭示了硅压阻式压力传感器的输出电压与输入压力和工作温度相互关联、耦合的关系。要求解此模型,工程上一般是在  $m$  个温度标定点  $T_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ,  $n$  个压力标定点  $P_j (j = 1, 2, \dots, n)$  下测得  $m \times n$  个传感器的输出电压  $U_{p_{ij}}$  和  $m$  个温度补偿电阻的电压  $U_{T_i}$ ,然后利用一定的数学方法来建立  $P_j$  与  $U_{p_{ij}}$  和  $U_{T_i}$  的映射关系,从而实现测量误差的补偿。

本文采用基于二元插值算法的异频分步补偿方法来建立  $P_j$  与  $U_{p_{ij}}$  和  $U_{T_i}$  的映射关系。

#### 3.1 二元插值算法

二元插值基本思路是在两个变量方向分别进行插值。对温度漂移的补偿,本文方法采用三次样条插值方法,保证了插值函数在各插值节点处一阶、二阶可导,连续且光滑<sup>[21]</sup>,具有更好的补偿效果;对于输出电压的非线性问题,使用拉格朗日分段插值法进行补偿,减少计算量。

## 1) 温漂补偿

为确定非温度标定点下压力传感器的输入压力  $P$  和输

$$U_{P_j} = \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot (U_T - U_{T_1}) + c_1 \cdot (U_T - U_{T_1})^2 + d_1 \cdot (U_T - U_{T_1})^3, U_{T_1} \leq U_T < U_{T_2} \\ a_2 + b_2 \cdot (U_T - U_{T_2}) + c_2 \cdot (U_T - U_{T_2})^2 + d_2 \cdot (U_T - U_{T_2})^3, U_{T_2} \leq U_T < U_{T_3} \\ \vdots \\ a_{m-1} + b_{m-1} \cdot (U_T - U_{T_{m-1}}) + c_{m-1} \cdot (U_T - U_{T_{m-1}})^2 + d_{m-1} \cdot (U_T - U_{T_{m-1}})^3, U_{T_{m-1}} \leq U_T \leq U_{T_m} \end{cases}$$

( $j = 1, 2, \dots, n$ )

式(5)所示的函数表示1个压力点下不同温度的关系式,而这样的压力点共有  $n$  个,且每个压力点有  $m - 1$  个三次多项式,所以整个压力范围内共  $n \times (m - 1)$  个三次多项式。三次样条插值函数的系数求解过程可以参考数值计算的相关教材<sup>[22]</sup>。

某温度  $T$  下的  $n$  个压力插值节点三次样条多项式对应项的系数矩阵  $Co$  可表示为:

$$Co = \begin{bmatrix} a_{i1}, b_{i1}, c_{i1}, d_{i1} \\ a_{i2}, b_{i2}, c_{i2}, d_{i2} \\ \vdots \\ a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij} \\ \vdots \\ a_{in}, b_{in}, c_{in}, d_{in} \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 2) 非线性补偿

将任意温度  $T$  下补偿电阻输出的电压  $U_T$  带入式(5)后即可得到该温度下经过温度补偿了的压力标定点的输出电压  $U_{P_j}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ )。通常这些  $U_{P_j}$  与压力  $P$  存在着一定的非线性,所以本文采用分段插值进行补偿。将整个压力量程范围分成若干个小区间,然后根据采集的压力传感器的输出电压  $U_p$  查表,若有  $U_{P_j} < U_p < U_{P_{j+1}}$ ,则可利用拉格朗日插值算法在  $U_{P_j}$  和  $U_{P_{j+1}}$  间进行线性插值,得到经过误差补偿的输入压力值  $P$ , 公式如下:

$$P = \frac{U_p - U_{P_{j+1}}}{U_{P_j} - U_{P_{j+1}}} P_j + \frac{U_p - U_{P_j}}{U_{P_{j+1}} - U_{P_j}} P_{j+1} \quad (7)$$

## 3.2 异频分步补偿方法

通过前述内容可以完成硅压阻式压力传感器的误差补偿,求得被测压力。但是由于工作温度变化得很慢,每个插值周期都进行温度插值是不必要的。所以本文提出的异频补偿方法的核心思想是将温度补偿电阻的电压  $U_{T_i}$  和传感器的电压输出  $U_{P_{ij}}$  分步参与补偿计算,同时将温度插值的频率较于压力插值频率降低一些,减小了每个压力插值周期的计算量,从而提高数据输出速率。所以,基于二元插值算法的异频分步补偿方法的步骤如下:

1) 保持  $n$  个压力标定点  $P_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 不变,将每个压力点  $P_j$  下  $m$  个温度标定点  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 时压力传感器的输出电压  $U_{P_{ij}}$  和温度补偿电阻输出的电压  $U_{T_i}$

输出电压  $U_p$  插值函数的插值节点  $U_{P_j}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), 首先在一定的压力  $P_j$  下,将其对温度  $U_T$  的三次样条插值算式为:

利用三次样条插值获得式(5)中的系数。这部分工作可以利用计算机强大的计算能力,离线地计算出来再下载到采集系统的存储器中。

2) 每个温度计算周期(一般是数秒钟)根据实际采集得到的温度补偿电阻输出的电压值  $U_T$  代入式(5)中相应的三次多项式,计算得到  $n$  个压力标定点下传感器的输出电压  $U_{P_j}$ , 建立当前温度下各压力标定点的输出电压的表格 ( $U_{P_1}, U_{P_2}, \dots, U_{P_n}$ )。

3) 每个压力计算周期(一般是数毫秒)根据实际采集得到的压力传感器输出的电压值  $U_p$ , 查找步骤2)中建立的输出电压表格,得到两个相邻数据点  $U_{P_i}$  和  $U_{P_{i+1}}$ , 满足  $U_{P_i} < U_p < U_{P_{i+1}}$ 。

4) 利用式(7)在  $U_{P_i}$  和  $U_{P_{i+1}}$  间进行拉格朗日线性插值,即可得到经过误差补偿后的压力值  $P$ 。

上述过程计算得到的非插值节点的值为  $\hat{P}_j$ , 与输入的真实压力值  $P_j$  间的测量误差为:

$$\Delta P_j = \hat{P}_j - P_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

所以,经过误差补偿后,整个温度和压力量程范围内测量结果的最大满量程误差可由式(9)计算得到。

$$\xi = \frac{\max(\hat{P}_j - P_j)}{P_{FS}} \times 100\%, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

## 4 实验与结果分析

实验选用的硅压阻式压力传感器的量程为  $0 \sim 700$  kPa, 激励电流为  $1.5$  mA, 在  $0 \sim 60^\circ\text{C}$  范围内的精度为  $\pm 1\%$  FS, 补偿后的目标精度为  $\pm 0.05\%$  FS 以内。实验中采用的压力校准器是美国 FLUKE 公司的 7250Xi, 压力校验范围  $-100 \sim 800$  kPa, 精度为  $0.003\%$  FS。

## 4.1 数据标定实验

传感器标定在温度试验箱内进行,在各个温度点对传感器施加不同的压力,测得传感器的输出电压。加温过程选择  $0, 10, 20, 30, 40, 50, 60^\circ\text{C}$ , 每个温度点保温  $2$  h 后开始加压测试。压力标定点适当扩大一点,选择  $-50 \sim 750$  kPa, 每  $50$  kPa 1 个测量点,共计  $17$  个压力测试点,  $7$  组温度测试数据共记录  $119$  个压力传感器的输出电压

数据  $U_p$  和 7 个温度补偿电阻输出电压数据  $U_T$ , 如表 1 所示。实验时, 为避免出现野值, 每个标定数据都采集多次

求平均的方式得到。温度和压力的大小由上位机分别控制温度试验箱和压力校准器来给定。

表 1 标定实验数据  
Table 1 Calibration experiment data

| T/°C | $U_r/V$ | $U_p/mV$ |       |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------|---------|----------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|      |         | -50 kPa  | 0 kPa | 50 kPa | 100 kPa | 150 kPa | 200 kPa | 250 kPa | 300 kPa | 350 kPa | 400 kPa | 450 kPa | 500 kPa | 550 kPa | 600 kPa | 650 kPa | 700 kPa | 750 kPa |
| 0    | 3.527   | -6.825   | 0.065 | 6.965  | 13.84   | 20.715  | 27.589  | 34.46   | 41.329  | 48.196  | 55.063  | 61.928  | 68.79   | 75.651  | 82.51   | 89.367  | 96.222  | 103.077 |
| 10   | 3.667   | -6.758   | 0.131 | 7.019  | 13.882  | 20.743  | 27.606  | 34.464  | 41.322  | 48.177  | 55.033  | 61.886  | 68.737  | 75.589  | 82.437  | 89.285  | 96.129  | 102.976 |
| 20   | 3.800   | -6.659   | 0.207 | 7.065  | 13.899  | 20.773  | 27.633  | 34.485  | 41.337  | 48.187  | 55.037  | 61.885  | 68.732  | 75.577  | 82.421  | 89.264  | 96.105  | 102.947 |
| 30   | 3.943   | -6.682   | 0.192 | 7.066  | 13.921  | 20.778  | 27.632  | 34.485  | 41.338  | 48.188  | 55.039  | 61.888  | 68.736  | 75.583  | 82.429  | 89.273  | 96.117  | 102.96  |
| 40   | 4.066   | -6.698   | 0.192 | 7.065  | 13.924  | 20.784  | 27.641  | 34.497  | 41.353  | 48.207  | 55.061  | 61.914  | 68.766  | 75.616  | 82.467  | 89.316  | 96.164  | 103.012 |
| 50   | 4.198   | -6.693   | 0.176 | 7.052  | 13.913  | 20.775  | 27.641  | 34.503  | 41.364  | 48.225  | 55.086  | 61.945  | 68.804  | 75.661  | 82.518  | 89.374  | 96.23   | 103.086 |
| 60   | 4.331   | -6.747   | 0.14  | 7.024  | 13.896  | 20.766  | 27.638  | 34.508  | 41.379  | 48.248  | 55.117  | 61.985  | 68.853  | 75.721  | 82.587  | 89.453  | 96.317  | 103.182 |

将表 1 所示的数据以 20°C 下的两点 (-50, -6.659) 和 (750, 102.947) 为基准, 经过计算并用式 (9) 得到未经过补偿的误差, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看出传感器的输出存在非线性且发生了温度漂移, 最大误差发生在 (60°C, 750 kPa) 处, 满量程误差约为 0.245% FS, 超过了 ±0.05% FS 的要求。为了保证其测量精度, 必须进行误差补偿。

### 4.2 仿真实验

使用 MATLAB 进行误差补偿仿真时, 以 0、20、40、60°C 为温度补偿点, 10、30、50°C 为温度检验点。压力也以 -50 kPa 起, 100 kPa 为步长的 9 个点为压力补偿点, 其他点为检验点, 即温度的插值节点数  $m = 4$ , 压力的插值节点数  $n = 9$ 。根据前述补偿算法步骤, 结合插值点的数据进行插值运算, 并对非插值节点上的标定压力进行检验。经过误差补偿后的结果如表 2 所示。

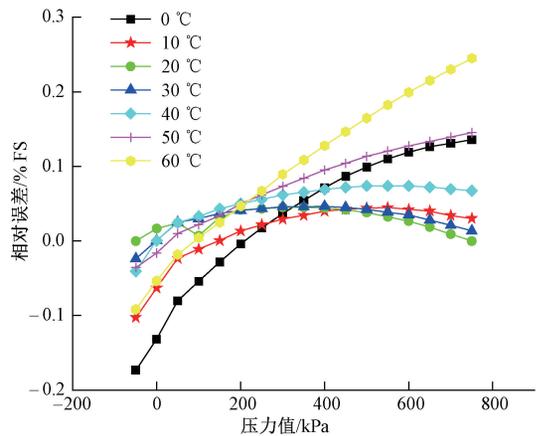


图 3 补偿前传感器的误差曲线

Fig. 3 Error curve of the sensor before compensation

表 2 非插值点经过误差补偿计算结果

Table 2 Calculation results of error compensation for non-interpolation points

| T/°C | P/kPa  |         |         |         |         |         |         |         |
|------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|      | 0      | 100     | 200     | 300     | 400     | 500     | 600     | 700     |
| 10   | -0.002 | 99.961  | 200.031 | 300.007 | 400.008 | 500.006 | 600.007 | 699.996 |
| 30   | -0.054 | 99.922  | 200.016 | 300.007 | 400.005 | 500.007 | 600.005 | 699.998 |
| 50   | 0.050  | 100.043 | 199.997 | 300.009 | 400.002 | 500.005 | 600.005 | 700.000 |

将上述数据作图观察, 得到经过补偿后的误差曲线, 如图 4 所示。从图 4 中可看出, 采用本文方法补偿后最大测量误差出现在低压处, 约为 -0.011% FS, 证明本方法取得了很好的补偿效果。

### 4.3 在线补偿实验

本文所设计的压力采集系统实物如图 5 所示, 包含

16 个压力测量通道, 其量程为 0~700 kPa。利用多路复用器和放大器将多个通道的压力测量值和温度测量值转到一个模数转换芯片的输入端, 完成模数转换后送入采集模块中。采集模块的处理器根据预先存入存储器中的校准数据, 经过补偿算法程序计算得到工程值, 从以太网接口发送到上位机。采集模块的处理器选择 ST 公司的 32

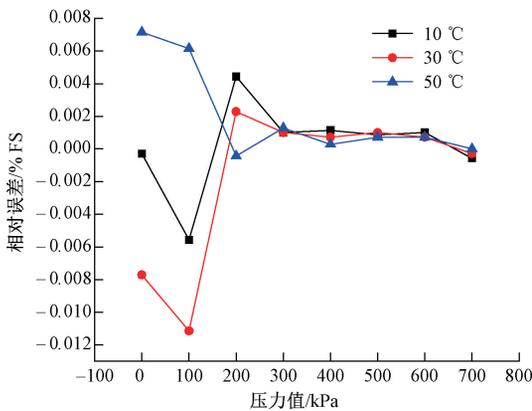


图4 补偿后传感器的误差曲线

Fig. 4 Error curve of the sensor after compensation



图5 压力采集系统实物

Fig. 5 Photo of the pressure acquisition system

位嵌入式计算机 STM32F407, 主频为 168 MHz。程序设计时, 温度插值频率选择 1 Hz, 压力插值频率选择 1 kHz。

将该系统放在温度试验箱中经历从 0~60℃ 每 5℃ 的温度测试点进行打压测试, 打压值为 0~700 kPa, 每 50 kPa 一个点。测试时, 每个检测点连续采集 2 000 次, 取其中误差最大值为当前点的误差, 如表 3 所示。

表3 补偿后误差

Table 3 Error after compensation

| 传感器号  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 满量程误差 | 0.020 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.018 | 0.017 | 0.015 | 0.020 |
| 传感器号  | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| 满量程误差 | 0.011 | 0.013 | 0.009 | 0.018 | 0.007 | 0.009 | 0.008 | 0.016 |

从表 3 中可以看出: 1) 经过本文方法补偿后, 采集精度有显著提高, 在整个工作范围内满足  $\pm 0.05\%$  FS 的精

度; 2) 本文所设计的硅压阻式压力传感器补偿系统可以实现 16 通道 1 kHz 的工程值输出速率, 补偿算法的计算时间低于 1 ms, 实时性高, 能够实现在线补偿。

## 5 结 论

本文在深入分析对压力测量提出的更高采样率和更高精度要求的基础上, 提出了一种基于二元插值算法的异频分步补偿方法。相关理论推导和实验验证可得出以下结论:

1) 采用三次样条插值和拉格朗日线性插值相结合的二元插值补偿方法可以较大幅度地减小传感器的测量误差, 能够实现  $\pm 0.05\%$  FS 的相对误差补偿精度要求;

2) 与传统的二元插值补偿方法相比, 本文提出的异频分步补偿方法避免了在每个插值周期进行温度插值, 从而大幅减小了计算量, 实现了亚毫秒级的算法计算, 非常适合计算能力低的嵌入式系统应用, 是一种实效性较强的在线补偿方法;

3) 本文方法使用标定数据插值计算得到被测压力值, 因此只适用于补偿传感器的可重复性误差。

## 参考文献

- [1] 卞金洪, 王吉林, 周锋. 高精度压力传感器中温度补偿技术研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(12): 55-57.  
BIAN J H, WANG J L, ZHOU F. Research of temperature compensation on high accuracy pressure sensors[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(12): 55-57.
- [2] YAO Z, LIANG T, JIA P, et al. Passive resistor temperature compensation for a high-temperature piezoresistive pressure sensor [J]. Sensors, 2016, 16(7): 1142.
- [3] 苗强, 蒋京, 张恒, 等. 工业大数据背景下的航空智能发动机: 机遇与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 1-12.  
MIAO Q, JIANG J, ZHANG H, et al. Development of aviation intelligent engine under industrial big data: chances and challenges[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 1-12.
- [4] 杨松, 李开林, 胡国清, 等. 基于 FOA 优化 SOM-RBF 的压力传感器温度补偿研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(2): 20-23.  
YANG S, LI K L, HU G Q, et al. Temperature compensation research of pressure sensor based on FOA improved SOM-RBF [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(2): 20-23.
- [5] 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 the high temperature and pressure downhole pressure sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 737-743.
- [6] GONZALEZ A H, BELTRAN J R, CERON J F T, et al. New architecture for intelligent pressure sensors with analog and digital outputs [J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(2): 116-121.
- [7] ARYAFAR M, HAMED M, GANJEH M M. A novel temperature compensated piezoresistive pressure sensor[J]. Measurement, 2015, 63: 25-29.
- [8] FUTANE N P, ROYCHOWDHURY S, ROYCHAUDHURI C, et al. Analog ASIC for improved temperature drift compensation of a high sensitive porous silicon pressure sensor [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2011, 67(3): 383-393.
- [9] TRAN A V, ZHANG X, ZHU B. The development of a new piezoresistive pressure sensor for low pressures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(8): 6487-6496.
- [10] XU D, LIU Y. A temperature compensation algorithm of piezoresistive pressure sensor and software implementation [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2013: 1738-1742.
- [11] 杨婷, 卢文科, 左锋. 基于 PSO-LSSVM 模型的扩散硅压力传感器的温度补偿[J]. 仪表技术与传感器, 2017(12): 25-29.  
YANG T, LU W K, ZUO F. Temperature compensation for diffused-silicon pressure sensor based on PSO-LSSVM[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(12): 25-29.
- [12] 王慧, 宋宇宁. 基于混合优化算法的压力传感器温度补偿[J]. 传感器技术学报, 2016, 29(12): 1864-1868.  
WANG H, SONG Y N. Temperature compensation of pressure sensor based on hybrid optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and actuators, 2016, 29(12): 1864-1868.
- [13] 杨雪, 刘诗斌. 压力传感器温度补偿各种算法的比较分析[J]. 电子设计工程, 2013, 21(10): 90-92.  
YANG X, LIU SH B. Comparison analysis of different compensation methods of pressure sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(10): 90-92.
- [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.  
LI J, HU G Q, ZHOU Y H, et al. Temperature compensation method for piezoresistive pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(6): 1-4.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 康少诚, 刘华丽, 陈徐均. 高精度重力加速度的求法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2016, 17(5): 413-417.  
KANG S CH, LIU H L, CHEN X J. Method of high precision gravity acceleration [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 17(5): 413-417.
- [18] 李仙丽, 陈洪敏. 一种数字温度补偿系统及实现[J]. 测控技术, 2013, 32: 283-285.  
LI X L, CHEN H M. A digital temperature compensation system and its implementation [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32: 283-285.
- [19] 庞启国. 差压传感器数字补偿技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
PANG Q G. Research on digital compensation technology of differential pressure sensor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [20] 龙军, 关威, 汪旭东, 等. 基于岭回归的压力传感器高精度测量模型研究[J]. 传感技术学报, 2017, 3(3): 391-396.  
LONG J, GUAN W, WANG X D, et al. Study on high accuracy measurement model of pressure sensor based on ridge regression [J]. Chinese Journal of Sensors and actuators, 2017, 3(3): 391-396.
- [21] 肖海, 章亚男, 沈林勇, 等. 光纤光栅曲线重建算法中的曲率连续化研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 993-999.  
XIAO H, ZHANG Y N, SHEN L Y, et al. Research on curvature serialization in the curve reconstruction algorithm based on fiber bragg gratings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 993-999.
- [22] JOHN H M, KURTIS D F, 周璐, 等(译). 数值方法 (MATLAB 版)[M]. 第4版, 北京: 电子工业出版社, 2017.  
JOHN H M, KURTIS D F, ZHOU L, et al. Numerical method using MATLAB fourth edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.

### 作者简介



闫文吉, 2011年和2014年于南京航空航天大学分别获得学士学位和硕士学位, 现为中国航发四川燃气涡轮研究院工程师, 主要研究方向为航空发动机试验测试技术。

E-mail: yeshangji@nuaa.edu.cn

Yan Wenji received his B.Sc. degree in 2011 and M.Sc. degree in 2014 both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, respectively. Now, he is an engineer in Sichuan Gas Turbine Establishment, AECC. His main research interest includes aeroengine test technology.