基于样条曲线插值的压力传感器的温度补偿

樊尚春 张秋利 秦 杰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出了基于三次样条曲线插值的温度补偿方法,用这种方法对测压范围为 $0.013\ 3\times10^5$ ~ $3.198\ 9\times10^5$ Pa,温度应用范围为-55 ~ +80℃的高精度谐振筒压力传感器的实验标定结果进行了温度补偿.为加快标定过程,给出了传感器标定点数的减少方案.结果表明,在传感器的标定点数减少 2/3 的情况下,提出的温度补偿方法的综合误差为 0.007 9%,约是基于径向基函数(RBF)神经网络的温度补偿方法的 1/2,从而有效减少了传感器的标定成本和工作量.这对于解决高精度压力传感器的温度补偿问题具有一定的理论意义和工程应用价值.

关 键 词: 传感器; 样条; 温度; 补偿; 神经网络

中图分类号: TP 212

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0684-03

Temperature compensation of pressure sensor based on the interpolation of splines

Fan Shangchun Zhang Qiuli Qin Jie

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The temperature compensation method based on the interpolation of cubic splines was presented. This method was applied for the temperature compensation of the experimental results of calibration of high precision resonant cylinder pressure sensors. The measuring range of the pressure sensor is $0.013\ 3\times10^5$ ~ $3.198\ 9\times10^5$ Pa and the applied temperature range is -55 ~ +80℃. To make the calibrating process of pressure sensor fast, the principle of reducing the number of calibrating points was presented. The results indicate that the integrated error of the presented method of temperature compensation is 0.007 9%, when the number of calibrating points reduces about 2/3. The integrated error is approximately half of the method of temperature compensation based on the radial basis function (RBF) neural network. Thereby the presented method reduces the cost and workload of calibration effectually. The proposed method can provide a valuable theoretical reference for the temperature compensation of the high precision pressure sensors.

Key words: sensors; splines; temperature; compensation; neural network

压力传感器的输出不仅决定于所受的压力,而且受环境温度的影响,即压力传感器对温度存在交叉灵敏度,从而影响传感器的性能和测量准确度.这对于使用温度范围比较宽的高精度压力传感器尤为严重.对于这一实际问题,通常采用在标准的温度、压力下测定传感器的特性,即进行传感器标定.基于标定实验结果,采取一定的方法进行后验修正,即进行软件修正.一般而言,选取的温度点越多,标定精度越高,对温度影响的修正效果也越好.但标定时间也随之加长,需要的硬件资源和软件资源也相应增加.为加快标定过程,提高补偿效能,工程上总是希望采用较少的数据,得到足够精确的结果.目前的软件补偿方法主要采用曲线曲面拟合方法和神经网络方法[1-3].曲线曲面拟和精度不高,神经网络方法最大的缺点就是

收稿日期: 2005-07-01

作者简介: 樊尚春(1962-),男,内蒙古包头人,教授, shangcfan@buaa.edu.cn.

网络不稳定,训练时间较长. 因此本文提出了一种基于三次样条曲线插值的温度补偿方法,并针对一种典型的高精度谐振筒压力传感器进行了实际的处理和分析,并与基于径向基函数(RBF)神经网络方法的温度补偿结果进行了比较.

1　样条曲线插值方法

当插值基点很多时,使用高次多项式插值并不能得到好的结果,因而一般采用分段插值法,即将插值区间分成若干个小区间,然后在每个小区间上使用次数较低的多项式进行插值. 一般的分段插值法有一个严重的缺点,就是会导致插值函数在子区间的端点处不光滑,而样条曲线插值就不存在这个问题.

样条是绘图员用来描绘光滑曲线的一种简单工具[4]. 设 $f(x)$ 是区间 $[a,b]$ 上的一个二次连续可微函数,在区间 $[a,b]$ 上给定一组基点: $a = x_1 < x_2 < \cdots < x_{n+1} = b$. 设函数:

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x), x \in [x_1, x_2] \\ \vdots \\ S_i(x), x \in [x_i, x_{i+1}] \\ \vdots \\ S_n(x), x \in [x_n, x_{n+1}] \end{cases} \tag{1}$$

是二次连续可微的,$S_i(x)$ $(i=1,2,\cdots,n)$ 是一个不高于三次的多项式,且满足条件:

$$S(x_j) = f(x_j) \quad j = 1,2,\cdots,n+1 \tag{2}$$

则称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 的三次样条插值函数,简称三次样条.

记 $m_i = S''(x_i)$, $f(x_i) = f_i$, $h_i = x_{i+1} - x_i$,由三次样条的定义知,$S(x)$ 的二阶导数 $S''(x)$ 在每一个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$, $i = 1,2,\cdots,n$ 上都是线性函数. 于是在 $[x_i, x_{i+1}]$ 上 $S(x) = S_i(x)$ 的二阶导数可表示为

$$S''_i(x) = m_i \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + m_{i+1} \frac{x - x_i}{h_i} \tag{3}$$

式中,$x \in [x_i, x_{i+1}]$. 对 $S''_i(x)$ 连续积分 2 次得:

$$S'_i(x) = -m_i \frac{(x_{i+1} - x)^2}{2h_i} + m_{i+1} \frac{(x - x_i)^2}{2h_i} + A_i \tag{4}$$

$$S_i(x) = m_i \frac{(x_{i+1} - x)^2}{6h_i} + m_{i+1} \frac{(x - x_i)^2}{6h_i} + A_i(x - x_i) + B_i \tag{5}$$

式中,A_i 和 B_i 为积分常数. 根据式(5)、式(1)得:

$$B_i = f_i - m_i \frac{h_i^2}{6} \tag{6}$$

$$A_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} - \frac{h_i}{6}(m_{i+1} - m_i) \tag{7}$$

将式(6)、式(7)代入式(4)、式(5)分别可得:

$$S'_i(x) = -m_i \frac{(x_{i+1} - x)^2}{2h_i} + m_{i+1} \frac{(x - x_i)^2}{2h_i} + \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} - \frac{h_i}{6}(m_{i+1} - m_i) \tag{8}$$

$$S_i(x) = \frac{1}{h_i}\left[\frac{m_i}{6}(x_{i+1} - x)^3 + \frac{m_{i+1}}{6}(x - x_i)^3\right] + f_i + \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i}(x - x_i) - \frac{h_i^2}{6}\left[(m_{i+1} - m_i)\frac{x - x_i}{h_i} + m_i\right] \tag{9}$$

由式(8)和 $S'(x)$ 的连续性可得:

$$h_{i-1}m_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)m_i + h_i m_{i+1} = 6\left[\frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} - \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}}\right] \tag{10}$$

式中,$i=2,\cdots,n$. 补加 x_1 和 x_n 端点处的 2 个边界约束条件,可获得三次样条插值曲线 $S(x)$.

2　温度补偿模型

非线性的压力传感器一般是在 n 个标准温度 t_i $(i=1,2,\cdots,n)$, m 个标准压力 p_j $(j=1,2,\cdots,m)$ 下进行标定,得到 $n \times m$ 组标定点. 基于标定过程得到的压力传感器的实测数据对 (t_i, p_j, T_{ij}) 可以得到压力传感器的输入/输出关系,即 $T = f(t,p)$,也可以将其写成:

$$p = f^{-1}(t,T) \tag{11}$$

实际的测量过程是根据得到的输出测量值 T 和相应的标准温度 t,利用式(11)计算相应的输入被测量值 p,计算得到的 p 称为"被测校准值". 在第 j 个测点 p_j 处,若由式(11)计算得到的被测校准值为 $\hat{p}_j$,则其测量误差为 $\Delta p_j = |\hat{p}_j - p_j|$, $j=1,2,\cdots,m$. 在整个测量范围内,压力传感器的最大测量误差为: $\Delta p_{\max} = \max(\Delta p_1, \cdots, \Delta p_j, \cdots, \Delta p_m)$,对应的综合误差为: $\xi = \frac{\Delta p_{\max}}{p_{FS}} \times 100\%$,其中 p_{FS} 为压力传感器的量程.

下面介绍利用三次样条曲线插值方法对压力传感器进行温度补偿的具体步骤:①根据标定数据,在 t_i 固定的情况下对压力传感器的输出信号周期 T_{ij} 及 p_j 进行三次样条插值,其中 $i=1,2,\cdots,n$, $j=1,2,\cdots,m$,得到 n 条被测压力与输出信号周期的插值曲线;②实际测量将 T 分别代入第①步得到的 n 条插值曲线,可以得到 n 个被测压力 p_i;③对标定温度 t_i 和第②步得到的 p_i,进行三次样

条插值,得到 p_i 与 t 的插值曲线;④将 t 代入第③步得到的插值曲线,就可得到 t,T 所对应的 p.

3 试验数据处理与分析

本次被标定的传感器是高精度谐振筒压力传感器,共得到322组实际标定数据. 其中有压力(单位为kPa)标定点23个,分别为:319.89,293.24,266.58,239.92,213.26,186.61,159.95,133.29,106.63,101.30,93.30,79.97,66.64,53.32,46.65,39.99,33.32,26.66,19.99,13.33,6.66,4.00,1.33. 有温度(单位为℃)标定点14个,分别为:-55,-45,-30,-20,-10,0,10,20,30,40,50,60,70,80. 标定得到的压力传感器的输出信号周期大小范围为141.260 3 ~ 178.601 1 μs.

如果用全部的322组数据对传感器进行温度补偿,数据存储量和计算量都相当大,而标定点数直接影响了算法的计算量和数据存储量,因此本文主要考虑减少标定点个数来降低算法对存储量和计算量的需求.

1)保持温度标定点数不变,只减少压力标定点数. 选取12个压力标定点分别为:319.89,266.58,213.26,159.95,106.63,101.30,66.64,46.65,33.32,19.99,6.66,1.33. 此时传感器的标定点数减少1/2左右,最大测量误差为14.142 Pa,对应的综合误差为0.004 4%.

2)考虑减少温度标定点数,仍取上述12个压力点,温度点的选取基于上一步计算中反算误差较大的点. 选取9个温度标定点分别为:-55,-45,-30,-20,0,20,40,60,80. 此时标定点数减少到1/3左右. 最大测量误差为25.258 4 Pa,对应的综合误差为0.007 9%.

图1显示了当传感器的标定点数分别减少1/2和2/3左右的综合误差曲线.

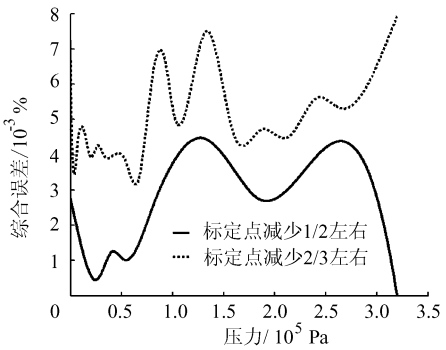


图1 标定点分别减少1/2和2/3左右的综合误差曲线

对于上述数据,如果利用RBF神经网络方法来进行温度补偿:

1)当保持温度标定点不变,只选取12个压力标定点时,以这168组标定点作为训练样本,剩余的154组标定点作为测试样本,其最大测量误差为45.385 1 Pa,其综合误差为0.014 2%,约是基于三次样条曲线插值的温度补偿方法的4倍;

2)当选取12个压力标定点,9个温度标定点时,以这108组标定点作为训练样本,剩余的214组标定点作为测试样本,其最大测量误差为45.611 7 Pa,对应的综合误差为0.014 3%,约是基于三次样条曲线插值的温度补偿方法的2倍.

4 结 论

本文提出的基于三次样条曲线插值的温度补偿方法,不仅可以实现高精度的温度补偿,而且在压力传感器的标定点数减少2/3的情况下,仍可以实现高精度的温度补偿,从而有效地减少了传感器标定时间和工作量. 这对于解决高精度压力传感器的温度补偿问题具有一定的理论意义和工程应用价值.

参考文献(**References**)

[1] 陈明义,杨欣荣,罗桂娥. 多传感器信息融合技术及其在油品含水率检测中的应用[J]. 自动化仪表,2002,23(8):22-25
Chen Mingyi, Yang Xinrong, Luo Guie. Information merge technology of multiple transducers and its application in moisture measurement of oil products[J]. Process Automation Instrumentation,2002,23(8):22-25(in Chinese)

[2] 曲国福. 压阻式压力传感器在线综合补偿[J]. 传感器技术,2003,22(8):45-46
Qu Guofu. On-line comprehensive compensation of piezoresistive pressure sensor[J]. Journal of Transducer Technology,2003,22(8):45-46(in Chinese)

[3] 张广军,武晓利. 基于RBF神经网络的红外二氧化碳传感器数学模型[J]. 仪器仪表学报,2004,25(2):72-74
Zhang Guangjun, Wu Xiaoli. Mathematical model of IR carbon dioxide sensor based on RBF neural network[J]. Journal of Apparatus Meter,2004,25(2):72-74(in Chinese)

[4] 林成森. 数值计算方法[M]. 北京:科学出版社,1998:152-167
Lin Chengshen. Numerical calculating methods[M]. Beijing: Science Press,1998:152-167(in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)