

一种压阻式压力传感器的温度补偿方法

李冀^{1,2} 胡国清^{2,3} 周永宏⁴ 邹崇⁴ 吴翩卉³

(1.南昌航空大学,江西南昌 330063; 2.厦门大学机电工程系,福建厦门 361005;

3.华南理工大学机械与汽车工程学院,广东广州 510640; 4.福建上润精密仪器有限公司,福建福州 350015)

摘要: 针对压阻式压力传感器的温度补偿问题,提出一种将样条插值与最小二乘拟合相结合的补偿算法,并结合传感器标定实验数据进行仿真试验。结果表明该方法相比曲面拟合方法、BP神经网络和RBF神经网络,补偿最大相对误差和平均补偿时间分别为0.103%和0.135 4 s,不仅能够满足高精度测试要求,而且可减少标定工作量达到提升生产效率的目的。

关键词: 硅压阻式压力传感器; 温度补偿; 样条插值; 最小二乘拟合

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2018)06-0001-04

Temperature Compensation Method for Piezo-resistive Pressure Sensor

LI Ji^{1,2}, HU Guo-qing^{2,3}, ZHOU Yong-hong⁴, ZOU Chong⁴, WU Pian-hui³

(1.Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

4.Fujian Wide Plus Precision Instruments Co.Ltd, Fuzhou 350015, China)

Abstract: To address this temperature compensation problem of Piezo-resistive pressure sensor, a combined method of spline interpolation and least square fitting was presented. The simulation results based on a calibration experiment demonstrate the maximum relative error of the proposed compensation method is 0.103% as well as the mean compensation time is about 0.135 4 s. Compared with the results come from surface fitting, BP neural networks and RBF neural networks, in addition to short the calibration process the proposed compensation method can also obtain a more satisfactory compensation precision. The compensation results also indicate that the presented temperature compensation method is able to reach a balance between the time cost and the compensation effectiveness, which lays a foundation to the further reach.

Keywords: piezo-resistive pressure sensor; temperature compensation; spline interpolation; least square fitting

0 引言

MEMS 硅压力传感器采用半导体单晶硅材料淀积制造压力敏感元件,利用惠斯登电桥根据压阻效应进行压力测量。由于实际制造工艺无法完全保证桥臂电阻的扩散浓度以及电阻条宽度完全一致,封装材料之间的膨胀系数不匹配以及装配应力等诸多原因,随着环境温度变化将引起桥臂电阻的压阻系数变化以及电子器件功能特性变化等现象,将无法保证输入输出特性之间保持理想的线性关系^[1],因此,需要采取措施消除温度的非线性影响,即温度补偿。

现有温度补偿方法主要分为硬件补偿和软件补偿2种,硬件补偿通过调整电路参数,如对桥臂串并联电阻、桥外串并联电阻、热敏电阻网络、双电桥补偿等

对测量电路进行优化^[2-4],目前所采用的硬件补偿存在调试不便、精度不足、适用性不强等缺点,并不利于进行实际工程生产的推广。软件补偿主要分为基于人工智能方法和基于数值分析方法2类,基于人工智能的方法包括神经网络、遗传算法、灰色系统及其融合补偿技术^[5-9],对系统硬件要求较高,较难完成实时在线补偿。基于数值分析的方法包括插值和最小二乘拟合等补偿方法^[10-14]。插值法虽然精度较高但是必须首先确定插值区间的边界,而拟合方法次数过高则容易出现病态问题。因此本文提出一种基于两者优势结合的补偿方法,完成压力传感器的温度补偿。

1 高精度压力检测系统

利用智能压力传感器的高度集成性,将封装于传感器中的温度传感器与压力传感器的测量值通过A/D转换后送入CPU模块当中,并通过在标定时上位机存入E²PROM中的算法程序进行补偿,得到含实时温度

基金项目: 国家科技重大专项项目(2015ZX03003010)

收稿日期: 2017-06-01

数据矫正的压力检测值进行数字显示并与上位机通讯,系统原理如图1所示。

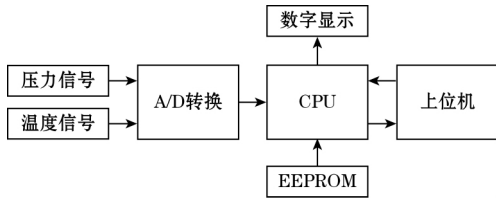


图1 温度补偿系统原理

2 温度补偿算法原理及建模

压力传感器进行补偿之前,考虑输入压力值与环境温度对输出结果的共同作用,需要在给定的 m 个标准压力输入 $P_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ n 个标准温度 $T_j(j=0, 1, 2, 3, \dots, n)$ 下进行数据标定,获取传感器相应的静态输出 U_{ij} 。 P 、 T 、 U 三者满足函数关系 $U=f(P, T)$, 实际检测过程中则是依据测得的 U 、 T 利用补偿算法得到 P' :

$$P' = f^{-1}(U, T) \quad (1)$$

本文提出的补偿模型将样条插值与最小二乘拟合相结合^[13]。为确定非标定温度点下 P 与 U 样条函数的插值节点 $U_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 保持 $P_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 不变,利用标定温度向量 $T=(T_1, T_2, \dots, T_n)$ 与输出 $U=(U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in})$ 通过最小二乘法获得 U 与 T 的次数为 l 的函数关系:

$$U_i(T) = Co_l T^l + Co_{l-1} T^{l-1} + \dots + T^2 + Co_1 T + Co_0 \quad (2)$$

将任意温度 T 带入上式后即可获得响应温度 T 下的 P 与 U 之间样条函数的插值节点 $U_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 进而确定插值区间 $[U_i, U_{i+1}]$ 。

保持 n 个标定温度点 $T_j(j=0, 1, 2, 3, \dots, n)$ 不变,将 $P_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 作为样条插值节点,采用三次样条插值将测量范围划分为 $m-1$ 段,获取 P 、 U 之间的 $m-1$ 段三次样条函数关系:

$$P_j = \begin{cases} a_{1j}U^3 + b_{1j}U^2 + c_{1j}U + d_{1j} \\ a_{2j}U^3 + b_{2j}U^2 + c_{2j}U + d_{2j} \\ \vdots \\ a_{(m-1)j}U^3 + b_{(m-1)j}U^2 + c_{(m-1)j}U + d_{(m-1)j} \end{cases} \quad (3)$$

则测量范围内每一分段上的三次样条多项式对应项的系数矩阵 Co 可表示为:

$$Co = \begin{bmatrix} co_{11} & \dots & co_{1j} & \dots & co_{1n} \\ & & \vdots & & \\ co_{i1} & \dots & co_{ij} & \dots & co_{in} \\ & & \vdots & & \\ co_{(m-1)1} & \dots & co_{(m-1)j} & \dots & co_{(m-1)n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将矩阵元素替换为 a 、 b 、 c 、 d ,则系数矩阵表示了对应

三次样条多项式不同项且大小都为 $(m-1) \times n$ 的系数矩阵 A 、 B 、 C 、 D 。非测量参数温度 T 是分段多项式在不同温度下系数不一致的成因,针对不同温度 T_j 下任意相同子区间 $[P_i, P_{i+1}]$ 内三次样条函数的系数向量 $A_i(1 \times n)$ 、 $B_i(1 \times n)$ 、 $C_i(1 \times n)$ 、 $D_i(1 \times n)$ 和温度向量 $T(1 \times n)$,利用最小二乘法建立以下函数关系:

$$\begin{cases} a_{ij} = Ca_i(k) T_j^k + Ca_i(k-1) T_j^{k-1} + \dots + Ca_i(1) T_j + Ca_i(0) \\ b_{ij} = Cb_i(k) T_j^k + Cb_i(k-1) T_j^{k-1} + \dots + Cb_i(1) T_j + Cb_i(0) \\ c_{ij} = Cc_i(k) T_j^k + Cc_i(k-1) T_j^{k-1} + \dots + Cc_i(1) T_j + Cc_i(0) \\ d_{ij} = Cd_i(k) T_j^k + Cd_i(k-1) T_j^{k-1} + \dots + Cd_i(1) T_j + Cd_i(0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $Ca_i(k)$ 、 $Cb_i(k)$ 、 $Cc_i(k)$ 、 $Cd_i(k)$ 分别为子区间 $[U_i, U_{i+1}]$ 的三次样条函数的系数 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 、 d_{ij} 与温度 T_j 最小二乘拟合多项式的系数。

可由工作温度范围内任意温度 T 表达子区间 $[U_i, U_{i+1}]$ 上三次样条函数的系数:

$$\begin{cases} a'_i = Ca_i(k) T^k + Ca_i(k-1) T^{k-1} + \dots + Ca_i(1) T + Ca_i(0) \\ b'_i = Cb_i(k) T^k + Cb_i(k-1) T^{k-1} + \dots + Cb_i(1) T + Cb_i(0) \\ c'_i = Cc_i(k) T^k + Cc_i(k-1) T^{k-1} + \dots + Cc_i(1) T + Cc_i(0) \\ d'_i = Cd_i(k) T^k + Cd_i(k-1) T^{k-1} + \dots + Cd_i(1) T + Cd_i(0) \end{cases} \quad (6)$$

在环境温度值为 T 时,计算子区间 $[U_i, U_{i+1}]$ 上三次样条的系数,则最终能够获得由 U 、 T 组成的表达测量范围内的任意压力值的多项式:

$$P_i = a'_i U^3 + b'_i U^2 + c'_i U + d'_i \quad i=1, 2, 3, \dots, m-1 \quad (7)$$

补偿时先应判断测得的 U 值处在哪一个分段子区间 $[U_i, U_{i+1}]$,然后和实时测得的 T 带入式(6)获得子区间内样条插值的系数 a'_i 、 b'_i 、 c'_i 、 d'_i ,将 U 与 a'_i 、 b'_i 、 c'_i 、 d'_i 一并带入式(7)计算即可获得经温度补偿后的压力值 P' ,算法原理如图2所示。

3 数据标定实验及误差分析

对传感器在标准温度及压力输入条件下进行数据标定,所采用的单晶硅压力传感器的测量范围为 $-40 \sim 40$ kPa,以 4 kPa 为步距取 21 个压力测量点,记

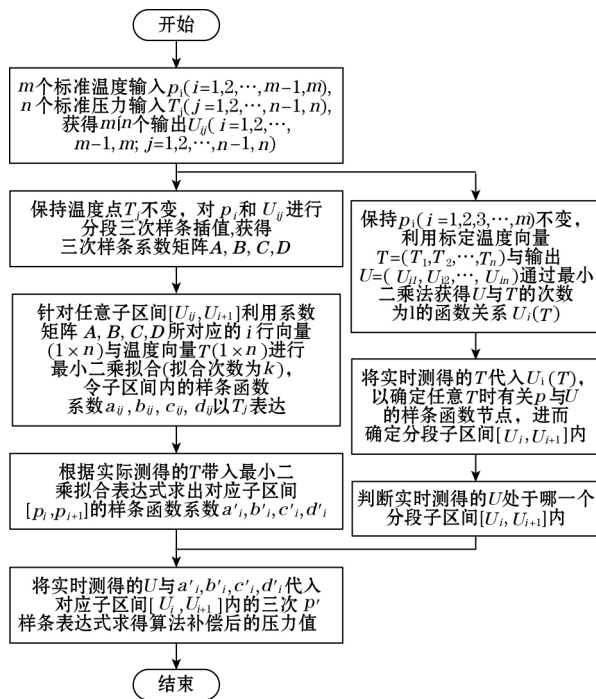


图 2 温度补偿算法原理

为 p , 工作温度范围为 $-40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$, 由 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 向 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 以 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 为步长等距取 13 个温度点, 温度值 T 和传感器输出 U 经 A/D 转换后, 分别记为 T_{AD} 和 U_{AD} , 每个取样点测量 3 次取平均值, 共获得 273 组标定数据, 如表 1 所示。以 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 为步距由 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 向 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 取 6 个温度等级, 8 kPa 为步距在测量范围内取 11 个压力等级, 共 66 个输出。运用本文所提出的补偿方法结合所选取的数据对其余温度等级下的标定压力值以及非插值节点上的标定压力值进行补偿校验。在进行确定温度 T 时测量范围内的插值节点 $U_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 以及三次样条系数与温度拟合函数关系时, 考虑到高次 ($k \geq 3, l \geq 3$) 最小二乘法容易出现系数矩阵病态的问题, 本文取拟合次数 $k=2, l=2$, 即二次拟合。检验补偿算法的标准是在工作温区内考察最大相对误差是否在达到产品的精度要求:

$$\max(e_i) = \max\left(\frac{p'_i - p_i}{p_{FS}}\right) \quad (8)$$

式中 p_{FS} 为传感器量程。

表 1 标定数据

$T/^\circ\text{C}$	p/Pa											
-40	46 721.89	-42 145.22	-37 556.06	-32 956.85	-28 348.53	-23 729.49	-19 106.11	-14 473.35	-9 833.39	-5 179.17	-541.12	
-30	-45 395.57	-40 942.89	-36 478.41	-32 003.32	-27 518.19	-23 023.69	-18 523.21	-14 013.76	-9 497.53	-4 966.36	-450.26	
-20	-44 160.24	-39 823.41	-35 475.72	-31 117.30	-26 749.10	-22 370.30	-17 985.40	-13 591.80	-9 191.42	-4 773.78	-372.17	
-10	-42 992.27	-38 765.45	-34 527.49	-30 278.53	-26 019.93	-21 750.19	-17 474.48	-13 190.08	-8 897.25	-4 589.62	-296.12	
0	-41 887.32	-37 764.26	-33 630.06	-29 485.27	-25 330.02	-21 163.90	-16 991.27	-12 809.67	-8 620.61	-4 416.60	-225.63	
10	-40 810.34	36 788.87	-32 755.98	-28 711.96	-24 658.03	-20 592.28	-16 420.96	-12 439.72	-8 351.84	-4 249.28	-158.54	
20	-4 000	-36 000	-32 000	-28 000	-24 000	-20 000	-16 000	-12 000	-8 000	-4 000	0	
30	-38 844.22	-35 007.99	031 160.48	-27 302.25	-23 432.48	-19 553.06	-15 665.62	-11 769.50	-7 865.91	-3 946.97	-39.84	
40	-37 950.32	034 199.65	-30 436.07	-26 662.72	-22 878.37	-19 082.88	-15 280.87	-11 469.22	-7 650.38	-3 817.13	6.06	
50	-37 091.32	-33 422.40	-29 741.81	-26 050.08	-22 348.03	-18 634.71	-14 915.00	-11 185.52	-7 447.34	-3 695.99	45.99	
60	-36 279.04	-32 687.53	-29 084.76	-25 470.58	-21 846.08	-18 211.12	-14 568.28	-10 916.34	-7 255.98	-3 582.05	82.39	
70	-35 503.29	-31 986.35	-28 457.45	-24 917.83	-21 367.62	-17 806.54	-14 238.26	-10 660.07	-7 074.13	-3 473.40	117.56	
80	-34 752.39	-31 307.02	-27 850.25	-24 381.92	-20 903.28	-17 413.64	-13 916.25	-10 410.04	-6 895.82	-3 368.28	152.19	
$T/^\circ\text{C}$	p/Pa											
-40	4 099.38	8 769.76	13 429.0	18 088.65	22 746.26	27 404.82	32 060.53	36 712.71	41 362.44	45 950.11		
-30	4 068.55	8 616.02	13 153.98	17 692.35	22 228.82	26 765.83	31 301.76	35 835.65	40 364.38	44 889.03		
-20	4 032.29	8 463.10	12 886.44	17 311.13	21 733.79	26 158.90	30 581.69	35 002.18	39 419.82	43 833.78		
-10	4 000.24	8 323.21	12 638.58	16 956.26	21 272.31	25 590.26	29 907.40	34 221.81	38 534.33	42 842.91		
0	3 968.46	8 190.39	12 403.63	16 619.72	20 834.19	25 051.09	29 267.46	33 481.51	37 694.21	41 903.24		
10	3 935.73	8 057.70	12 171.40	16 287.80	20 403.13	24 520.35	28 637.98	32 753.84	36 868.35	40 980.14		
20	4 000	8 000	12 000	16 000	20 000	24 000	28 000	32 000	36 000	40 000		
30	3 871.49	7 808.76	11 739.93	15 673.81	19 607.28	23 544.14	27 480.33	31 416.38	35 351.35	39 284.01		
40	3 833.06	7 687.21	11 534.17	15 384.12	19 233.80	23 086.87	26 940.49	30 793.29	34 645.27	38 495.90		
50	3 792.04	7 564.98	11 330.87	15 100.28	18 869.96	22 642.50	26 416.12	30 189.34	33 962.01	37 733.32		
60	3 751.71	7 447.37	11 136.79	14 829.61	18 522.43	22 219.18	25 916.21	29 613.50	33 310.53	37 006.47		
70	3 713.14	7 333.70	10 949.51	14 568.17	18 188.20	21 810.93	25 435.44	29 059.80	32 684.71	36 308.13		
80	3 676.60	7 227.22	10 771.60	14 319.78	17 869.18	21 421.57	24 975.31	28 529.74	32 084.43	35 638.18		

为了验证本文所研究的压力值温度补偿方法的有效性,基于标定数据进行仿真计算 30 次,与曲面拟合以及 BP 神经网络和 RBF 神经网络补偿的效果进行比较,获得补偿结果如图 3~图 6 所示。本文所提出的补偿方法补偿后压力值的最大相对误差为 0.103%,相较于曲面拟合方法的 0.157%,BP 神经网络的 0.322% 以及 RBF 神经网络获得的 0.75% 有了显著的提升。在执行速度方面,所提出的补偿方法计算耗时平均为 0.135 4 s,曲面拟合为 0.110 3 s 而 BP 神经网络以及 RBF 神经网络则为 1.869 7 s 和 0.969 7 s。最大补偿出现在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、40 kPa 状态,满足准确度为 0.075% 级的压力传感器要求^[15],因此补偿效果符合工业要求。

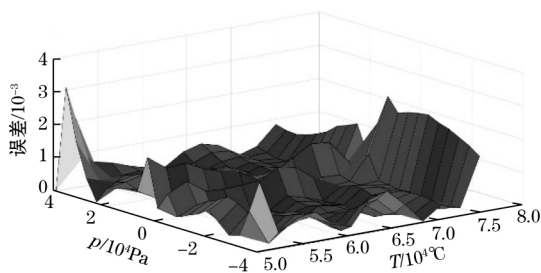


图 3 BP 神经网络温度补偿结果

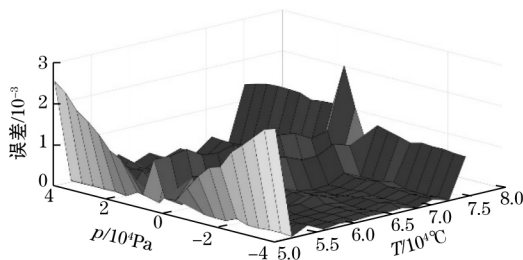


图 4 RBF 神经网络温度补偿结果

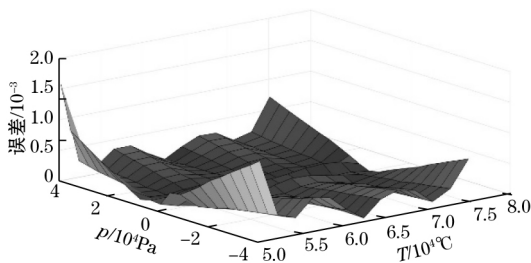


图 5 曲面拟合温度补偿结果

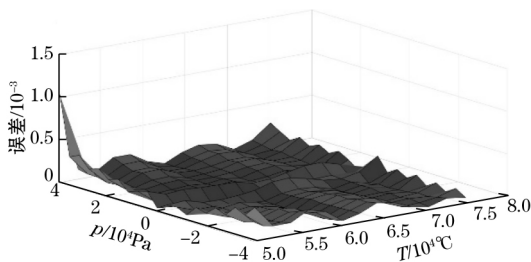


图 6 最小二乘结合三次样条插值温度补偿结果

4 结论

本文采用的温度补偿矫正压力传感器的方法结合了样条插值法与最小二乘拟合原理。在保证所选取的插值节点数据稳定的前提下,能够完全满足传感器对于测量范围内非插值节点及非标定温度下任意压力值的测量精度要求。本方法既克服了对于插值节点而言采用最小二乘拟合进行曲面拟合时精度不如插值节点高的缺点,也改进了仅使用样条插值法进行补偿只能实现完全内插补偿需取温度区间端点的不足,可减少标定点时选取的温度等级和压力等级,以较少的实验量完成效果较为理想的温度补偿,达到了在性能和计算之间的良好平衡,是一种实效性很强的补偿方法。

参考文献:

- [1] 王冰冰,李淮红.基于三次样条插值的硅压阻式压力传感器的温度补偿[J].传感技术学报,2015,28(7):1003-1007.
- [2] GONZALEZ A H,BELTRAN J R,CERON J T,et al.New architecture for intelligent pressure sensors with analog and digital outputs[J].IEEE Latin America Transactions 2014,12(2):116-121.
- [3] CHIU S R,TENG L T,CHAO J W,et al.An integrated thermal compensation system for MEMS inertial sensors[J].Sensors (Basel) 2014,14:4290-4331.
- [4] LUO X L,XU T B,BI L H.Research on compensation method of temperature drift in pressure sensor using double wheatstone-bridge method[J].Advanced Research on Industry Information System and Material Engineering 2012,459:311-314.
- [5] HE P,PAN G F,SUN YI C,et al.Temperature drift compensation for pressure transducer based on RBF network[J].Chinese Journal of Scientific Instrument,2008,29(3):572-576.
- [6] DING J C,ZHANG J,HUANG W Q,et al.Laser gyro temperature compensation using modified RBFNN[J].Sensors,2014,14(10):18711-18727.
- [7] XIA D Z,WANG S R,ZHOU B L.Temperature compensation method of silicon microgyroscope based on BP neural network[J].Journal of Southeast University (English Edition) 2010,26(1):58-61.
- [8] WANG X Z,ZHANG T,HE L.Application of fuzzy adaptive back-propagation neural network in thermal conductivity gas analyzer[J].Neurocomputing 2010,73:679-683.
- [9] 李强,周轲新.基于 PSO-BP 算法的压力传感器温度补偿研究[J].电子学报,2015,43(2):412-416.

(下转第 10 页)

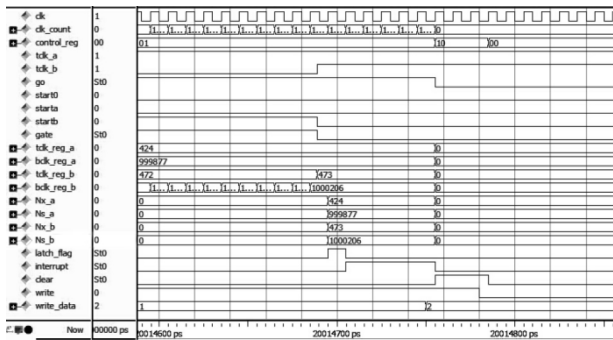


图 8 双路等精度测频电路仿真波形图

号发生器可以同时产生 2 路不同频率且波形质量好的方波信号,方波的上升、下降时间小于 5 ns,分辨率可达 12 ps,频率稳定性高达 10^{-8} 。测试的结果数据如表 2 所示。

表 2 信号发生器测试结果

信号源 a/b	检测值 A/B	相对误差
频率 / kHz	频率 / kHz	/ 10^{-7}
10.0/10.5	9.999 995/10.499 989	5.00/5.71
25.7/25.8	25.699 989/25.799 988	4.28/4.65
36.4/36.6	36.399 986/36.599 991	3.85/2.46
40.0/38.0	39.999 989/37.999 989	2.75/2.89
40.0/40.2	39.999 989/40.199 989	2.75/2.74
49.8/50.0	49.799 986/49.999 984	2.81/3.20
10.0/50.0	9.999 995/49.999 973	5.00/5.40

由式 (8) 和表 2 可以看出,当系统以 50 Hz 频率采样时,测频的绝对误差小于 0.02 Hz,相对误差小于 10^{-6} ,满足石英振梁谐振式传感器的测试要求。

5 结束语

针对石英振梁谐振式传感器设计的带实时温度监测的双路频率采集系统,经过仿真和实验证明,系统能够实现双路频率信号的同步、高精度测量,频率信号采样频率为 50 Hz,测频精度优于 10^{-6} ;同时,采用相同的基准时钟信号,并行执行的 Verilog 语句实现了实时温度值的读取;再加上模块化的结构设计使系统便于移植,而且通过提高基准频率,还能进一步提高测频精度。此外,系统集成 SOPC 技术,采用 Nios II

软核处理器,不仅实现了频率值和温度值的浮点解算、LCD 显示以及串口通讯等功能,还为传感器标定和补偿算法的实现提供平台。总之,该设计为石英振梁谐振式传感器的测试提出了具备实用性和可行性的方案。

参考文献:

- [1] 冯冠平.谐振传感理论及器件[M].北京:清华大学出版社,2008:36-41.
- [2] 程荣俊.MEMS 石英音叉硅膜结构谐振压力传感器研究[D].西安:西安交通大学,2016.
- [3] WATANABE J,SAKURAI T,SAITO Y,et al.High accuracy pressure sensor using quartz dual tuning fork resonator[C].IEEJ Transactions on Electronics,Information and Systems,2011,131:1101-1107.
- [4] YILMAZ M,MIGLIACIO P,BERNARD E.Broadband vibrating quartz pressure sensors for tsunameter and other oceanographic applications[C].Oceans 2004:1381-1387.
- [5] 高延滨,詹俊妮,何昆鹏,等.高精度石英振梁加速度计频率采样系统设计[J].应用科技,2012(3):61-65.
- [6] TRAON O L,J D,PERNICE M,et al.A new quartz monolithic differential vibrating beam accelerometer. position [C]. Location, & Navigation Symposium,IEEE/ION 2006:6-15.
- [7] 林日乐.石英振梁加速度计技术研究[D].西安:电子科技大学,2006.
- [8] 陈丽锋,孟瑞,冯希.频率测量研究综述[J].电子科技,2011,24(7):155-159.
- [9] 杨新鹏.基于 LM75A 的多点温度监测系统的设计[J].仪器仪表与自动化装置,2013(2):80-81.
- [10] 刘欢,欧伟明,陈财彪,等.基于 FPGA 和 LM75A 的测温系统设计[J].湖南工业大学学报,2014,28(4):25-29.
- [11] 方苗,陈泽文,彭澄廉.SOPC 设计中的用户自定义逻辑[J].计算机工程,2004,30(17):42-44.

作者简介:孙登强(1992—),硕士研究生,主要从事 MEMS 传感器测试系统研究。

E-mail: sundengqiang@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者:赵玉龙(1968—),教授,博士,主要研究领域为传感器及测试技术。E-mail: zhaoyulong@mail.xjtu.edu.cn

(上接第 4 页)

- [10] 张晓磊,王辉林.压阻式压力传感器的温度补偿算法研究[J].中国农机化报,2015(5):234-236.
- [11] GANLEY T,HUNG D L S,ZHU G M,et al.Modeling and inverse compensation of temperature-dependent ionic polymer-metal composite sensor dynamics [J].Ieee-Asme Transactions on Mechatronics,2011,16(1):80-89.
- [12] FAN S C,ZHANG Q L,QIN J.Temperature compensation of pressure transducer based on the interpolation of splines [J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006,32(6):684-686.
- [13] LI Q,LIANG L,LIU Z,et al.Intelligent pressure transducer system with temperature compensation [J].Chinese Journal

- of Scientific Instrument 2008,29(9):1934-1938.
- [14] JIANG H,FAN K G,YANG J G.An improved method for thermally induced positioning errors measurement, modeling, and compensation [J].International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,75(9-12):1279-1289.
- [15] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会(SAC/TC124).工业过程测量和控制系统用压力/压力传感器第 1 部分:通用技术条件:GB/T 28474.1-2012, [S].北京:中国标准出版社,2012:4-7.

作者简介:李冀(1989—),讲师,主要研究方向为智能传感技术、传感器数据融合。E-mail: leoshowtime@163.com