

文章编号:1671-251X(2013)12-0021-05 DOI:

高磊,马英辉,刘祎,等.高精度硅压阻式气压计设计[J].工矿自动化,2013,39(12):21-25.

高精度硅压阻式气压计设计

高磊¹, 马英辉², 刘祎¹, 毛万华³

(1. 宿迁学院 机电工程系, 江苏 宿迁 223800; 2. 宿迁学院 计算机科学与技术系, 江苏 宿迁 223800;
3. 南京航空航天大学 理学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对硅压阻式气压传感器因温漂、离散性大而使其应用受限的问题,设计了一种高精度硅压阻式数字气压计。该气压计采用全温度范围的曲面拟合算法进行温度补偿和线性化处理,解决了硅压阻式气压传感器的温漂和非线性问题;在 ATmega88PA 微控制器内采用软件实现压力数据的温度补偿,并通过 RS485 接口将数据发送给上位机。测试结果表明,在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,该气压计测量误差在 0.50% 以内,满足设计要求。

关键词:气压计;硅压阻式气压传感器;曲面拟合;温度补偿

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Design of silicon piezoresistive barometer with high-precision

GAO Lei¹, MA Ying-hui², LIU Yi¹, MAO Wan-hua³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China;
2. Department of Computer Science and Technology, Suqian College, Suqian 223800, China;
3. College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: In view of problems of temperature drift and big discreteness of silicon piezoresistive pressure sensor which cause application of the pressure sensor to be limited, a silicon piezoresistive and digital barometer with high-precision was designed. The barometer uses surface-fitting algorithm with whole temperature range to make temperature compensation and linear processing, so as to solve problems of temperature drift and nonlinear of the silicon piezoresistive pressure sensor, and uses software to realize temperature compensation of pressure data in ATmega88PA micro-controller and sends the data to upper computer through RS485 interface. Test result shows that measuring error of the barometer is less than 0.50% in range of $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the barometer meets design requirement.

Key words: barometer; silicon piezoresistive pressure sensor; surface-fitting; temperature compensation

0 引言

目前常用的气压传感器主要有电容式和谐振式2种。电容式气压传感器是基于气压传感元件的形状产生电容变化来实现气压测量,如PTB220系列

数字气压传感器,其在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的总精度 $\leq \pm 0.15\text{ hPa}$,分辨率为 0.01 hPa ,但价格较高^[1]。谐振式气压传感器价格便宜,但受环境湿度的影响测量精度稍差,且有时会停止工作,导致观测失败^[2-3]。硅压阻式气压传感器基于半导体的压阻效应,具有

收稿日期:2013-08-07。

基金项目:江苏省重大科技支撑与自主创新项目(BE2012732);宿迁市市级科技创新专项资金计划项目(Z201102);宿迁学院科研基金项目(2013KY38)。

作者简介:高磊(1978—),男,河北青县人,讲师,主要研究方向为检测技术与微系统集成,E-mail:gaolei0114@163.com。

价格低、精度高、测量范围宽等优点,但存在温漂、离散性等非线性问题,从而使其应用受限。针对上述问题,国内的应用研究多限于常温条件下的补偿,没有形成真正意义上的全温度补偿,且误差较大^[4-6]。目前,较为前沿的研究是通过 BP 神经网络算法进行温度补偿,但尚处于模拟仿真阶段^[7-10]。本文采用硅压阻式气压传感器设计了一种高精度的数字式气压计,采用全温度范围的高次曲面补偿,解决了气压计设计过程中的温漂和非线性问题,实现了高精度的气压测量。该气压计结构简单、体积小、功耗低、精度高、响应快。

1 高精度硅压阻式气压计硬件设计

高精度硅压阻式气压计硬件系统包括微控制器、电源模块、硅压阻式气压传感器(气压敏感元件)、温度传感器、AD 转换器、串口通信等部分,如图 1 所示。系统工作时,气压传感器输出大气压力相应的模拟电压信号,温度传感器输出温度的模拟电压信号,两者经同一 AD 转换器的 2 个通道转换为数字量,在微控制器中进行补偿运算处理,通过 RS485 接口输出最终压力和温度。

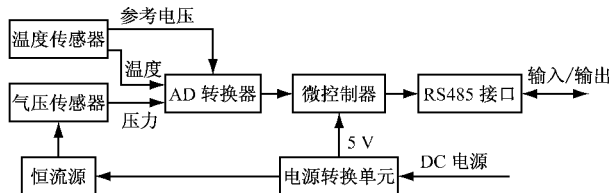


图 1 高精度硅压阻式气压计硬件组成

1.1 微控制器

高精度硅压阻式气压计采用 ATmega88PA 芯片为 CPU。ATmega88PA 具有只需 2 个时钟周期的硬件乘法器,这为传感器设计中大量的乘法运算提供了方便,从而大大提高系统的反应速度;AVR 内核具有丰富的指令集和 32 个通用工作寄存器,所有的寄存器都直接与算术逻辑单元(ALU)相连接,使得 1 条指令可以在 1 个时钟周期内同时访问 2 个独立的寄存器,从而大大提高了代码效率。

1.2 气压传感器和温度传感器

气压传感器采用硅压阻式气压传感器,其等效电路如图 2 所示。该传感器量程范围从 0~0.103 MPa 至 0~1.724 MPa。在 1.5 mA 恒流供电条件下,满量程输出典型值为 100 mV。但由于存在 $\pm 0.1\%$ 的非线性误差和 $\pm 0.5\%$ 的温度误差,必须对每个传感器做温度补偿才能达到较高的测量精度。采用激光调阻技术可使传感器的温度补偿范

围达到 $-20\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

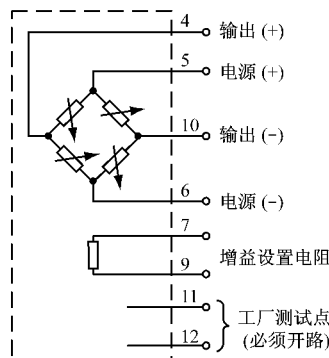


图 2 硅压阻式气压传感器等效电路

温度传感器选用高灵敏度、低功耗的 MAX873 芯片,其工作电源电压范围为 4.5~18 V,静态电流为 $280\text{ }\mu\text{A}$,在 $-40\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内具有极好的线性输出,25 $^{\circ}\text{C}$ 时的典型输出为 608 mV,灵敏度为 $2\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$;同时,MAX873 还能为 AD 转换器提供稳定的 2.5 V 基准电压,其温漂为 $7\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 AD 转换器

为使高精度硅压阻式气压计在 500~1 100 hPa 测量范围内的分辨率达 0.01 hPa,所需 AD 转换器至少应为 20 位,同时为消除压力转换通道与温度转换通道之间的温漂问题,选用高精度双通道串行 AD 转换器 CS5532 芯片,使用 A,B 两个通道分别对压力和温度的模拟量进行转换,以消除压力转换通道和温度转换通道之间温漂的差异。CS5532 是一种具有高集成度的 AD 转换器,转换性能达 24 位,芯片内部有一个极低噪声的放大器,其增益可选择为 2^n ($n=0\sim 6$),扩大了信号输入范围,且允许小信号输入,提高了系统的动态特性,简化了硬件电路结构。CS5532 在 50 Hz 的共模抑制比为 120 dB,适用于从高共模电压中检测微弱的差分信号。利用 CS5532 内部的校准系统(包括自校准和系统校准),可设置 AD 转换器传递函数的零点及增益斜率,从而消除系统通道的失调和增益误差现象。

1.4 RS485 通信

高精度硅压阻式气压计采用 MAX3471EUA 芯片将信号电平转换为 RS485 电平。该芯片的结构和引脚非常简单,其内部含有一个驱动器和接收器,RO 和 DI 端分别为接收器的输出端和驱动器的输入端,与单片机连接时只需分别与单片机的 RXD 和 TXD 相连即可,如图 3 所示。 $\overline{\text{RE}}$ 和 DE 端分别为接收和发送的使能端,当 $\overline{\text{RE}}$ 为逻辑“0”时,器件处于接收状态;当 DE 为逻辑“1”时,器件处于发送状态,因 MAX3471EUA 工作在半双工状态,所以只

需同时控制这2个引脚即可。A端和B端分别为接收和发送的差分信号端,需要在这两端之间加 $54\ \Omega$ 匹配电阻。当A端的电平比B端高 $2\sim 6\ \text{V}$ 时,表示发送的数据为“1”;当A端的电平比B端低 $2\sim 6\ \text{V}$ 时,表示发送的数据为“0”。

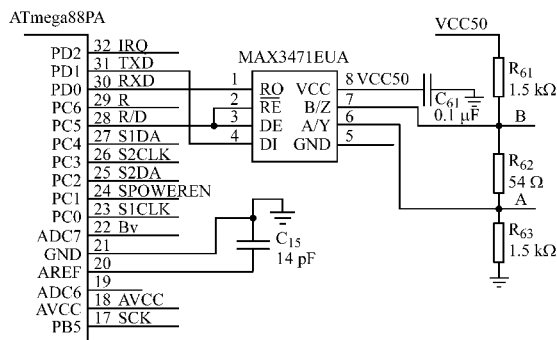


图3 RS485接口电路

2 高精度硅压阻式气压计软件设计

2.1 主程序

高精度硅压阻式气压计的软件设计采用模块化的设计思想,在AVRSTUDIO编译环境中采用汇编语言编写,编译生成的HEX文件通过双龙USB ISP(一种采用USB接口的下载线)载入单片机中。软件模块主要包括系统初始化、启动AD转换器转换压力和温度数据、数字滤波、温度补偿、RS485通信等子程序。主程序工作在循环模式下,完成初始化、子程序的调用及中断调用;其初始化的对象有单片机的堆栈设置、各中断的设置、AD转换器的初始化设置及串行接口的初始化设置;初始化完成后启动AD转换器采集压力数据和温度数据,对转换结果采用中位值滤波法滤除波动干扰^[11];温度补偿是让单片机根据存储在EEPROM中的补偿系数实现对压力数据的温度补偿计算,修正由温度变化引起的气压传感器零点漂移和灵敏度漂移,从而得到实际温度下的压力值。经温度补偿和线性化处理后通过串行接口输出实际压力值。主程序在执行过程中能随时响应串口中断,接收并执行各种上位机指令,其流程如图4所示。

2.2 温漂和温度补偿算法

气压计的测量误差主要取决于所用气压敏感元件的性能,即所用硅压阻式气压传感器的性能。影响硅压阻式气压传感器误差的因素主要包括力学结构的几何尺寸误差、几何非线性、晶向选择误差、电桥阻值误差、压阻系数温度特性和热应力等^[12]。另外,气压计硬件电路所使用的集成电路及每个分立

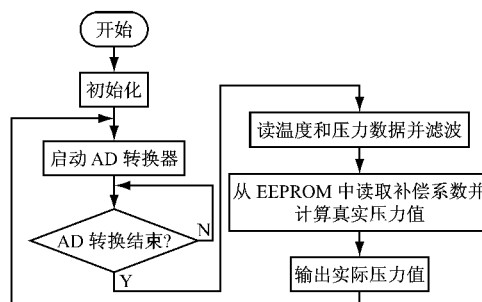


图4 主程序流程

元件的特性都将影响气压计整机的输出特性。

在高精度硅压阻式气压计的设计中,为描述气压计样机的输出特性,首先进行不同温度条件下的标准压力和温度数据的原始码(传感器输出的模拟量经24位AD转换器采样量化的结果,无量纲)采集。为了更加逼近实际特性,在温漂实验测试中,每间隔 $10\ ^\circ\text{C}$ 记录1次数据,图5和图6分别为在不同标准压力下3只气压计样机的温漂特性。

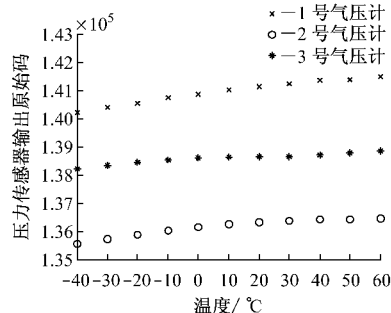


图5 标准压力为500 hPa下气压计的温漂特性曲线

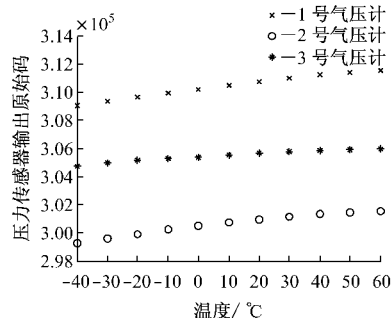


图6 标准压力为1100 hPa下气压计的温漂特性曲线

从图5和图6可看出,在500 hPa和1100 hPa两个标准压力点上,3只气压计样机压力输出差异较大,但都表现为随温度升高而逐渐变大的变化规律,只不过3号气压计的变化幅度比1号和2号气压计要稍小些,但这对于高精度的测量要求也是不能容忍的。所以高效的温度补偿算法是提高硅压阻式气压计一致性和稳定性的关键技术。

压力随温度变化的非线性修正(即温度补偿)由软件拟合算法完成。根据真实的(标准)压力(p)与

从 AD 转换器采集的压力原始码(p_m)和温度原始码(T_m)的相关关系,有

$$p = f(p_m, T_m) \quad (1)$$

将式(1)在任意一点(p_{m0}, T_{m0})做二元函数的泰勒级数展开,得

$$\begin{aligned} f(p_m, T_m) = & f(p_{m0}, T_{m0}) + \frac{1}{1!} \left[(p_m - p_{m0}) \frac{\partial}{\partial p_m} + \right. \\ & \left. (T_m - T_{m0}) \frac{\partial}{\partial T_m} \right] f(p_{m0}, T_{m0}) + \frac{1}{2!} \left[(p_m - p_{m0}) \times \right. \\ & \left. \frac{\partial}{\partial p_m} + (T_m - T_{m0}) \frac{\partial}{\partial T_m} \right]^2 f(p_{m0}, T_{m0}) + \dots + \\ & \frac{1}{n!} \left[(p_m - p_{m0}) \frac{\partial}{\partial p_m} + (T_m - T_{m0}) \frac{\partial}{\partial T_m} \right]^n \times \\ & f(p_{m0}, T_{m0}) + R_n \end{aligned} \quad (2)$$

式中: R_n 为拉格朗日型余项, $R_n = \frac{1}{(n+1)!} \left[(p_m - p_{m0}) \frac{\partial}{\partial p_m} + (T_m - T_{m0}) \frac{\partial}{\partial T_m} \right]^{n+1} f((1-\theta)p_{m0} + \theta p_m, (1-\theta)T_{m0} + \theta T_m), 0 < \theta < 1$ 。

若要满足测量精度要求,式(2)需取到二次项,则式(2)可简化为

$$\begin{aligned} f(p_m, T_m) = & k_{00} + k_{10} p_m + k_{01} T_m + k_{20} p_m^2 + \\ & k_{11} p_m T_m + k_{02} T_m^2 + k_{21} p_m^2 T_m + \\ & k_{12} p_m T_m^2 + k_{22} p_m^2 T_m^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $k_{00}, k_{10}, k_{01}, k_{20}, k_{11}, k_{02}, k_{21}, k_{12}, k_{22}$ 为与 p_m 和 T_m 相关的系数,需通过实验采集 p_m, T_m 和 p 的数据,再经曲面拟合得出。具体实现方法:通过调节手动气压微调器来实现 p 的变化,通过温控箱来实现温度变化,用采集程序采集压力原始码 p_m 和温度原始码 T_m 。实际操作中,在 $-40 \sim +60$ ℃范围内,每隔 15 ℃取 1 个工作点,每个温度点上 p 在 $500 \sim 1\,100$ hPa 范围内调整,从高压到低压每隔 50 hPa 测量 1 次,每个温度点上得 13 组数据,总共得到 104 组数据,再通过曲面拟合算法解算出式(3)的曲面方程。编写单片机软件时上述 9 个系数保存在EEPROM中,只要将 p_m 和 T_m 代入式(3),就可得到真实的压力值^[13]。

3 测试结果及分析

在C340-70PRO型高低温试验箱中进行测试。试验箱的温度调节范围为 $-40 \sim +60$ ℃,湿度设定为 55% RH; CPC6000型压力标准器的压力调节范围为 $400 \sim 1\,100$ hPa。实验室环境温度为 $+25$ ℃。对 1 号气压计在不同标准压力下进行高低温测试,测试结果见表1—表3。

表1 1 050 hPa 标准压力下温度循环测试结果

温度/℃	-40	-20	0
实测压力/hPa	1 050.32	1 050.06	1 050.03
误差/hPa	0.32	0.06	0.03
温度/℃	+20	+40	+60
实测压力/hPa	1 049.93	1 049.88	1 049.78
误差/hPa	-0.07	-0.12	-0.22

表2 800 hPa 标准压力下温度循环测试结果

温度/℃	-40	-20	0	+20	+40	+60
实测压力/hPa	800.24	800.06	800.03	799.98	799.84	799.84
误差/hPa	0.24	0.06	0.03	-0.02	-0.16	-0.16

表3 500 hPa 标准压力下温度循环测试结果

温度/℃	-40	-20	0	+20	+40	+60
实测压力/hPa	500.19	500.03	500.03	499.86	499.93	499.93
误差/hPa	0.19	0.03	0.03	-0.14	-0.07	-0.07

在标准压力为 $1\,050$ hPa 下的温度循环测试数据中,最大相对误差发生在 -40 ℃,为 0.30% ;在标准压力为 800 hPa 下的温度循环测试数据中,最大相对误差发生在 -40 ℃,为 0.30% ;在标准压力为 500 hPa 下的温度循环测试数据中,最大相对误差发生在 -40 ℃,为 0.38% 。可见,最大相对误差均在 0.50% 以内。

采用同样的测试手段,在 20 ℃对 1 号气压计进行压力循环测试,测试数据取上、下 2 个行程反复 3 次的平均值,见表4。

表4 20 ℃下压力循环测试结果

标准压力/hPa	1 050	1 000	900	800
实测压力/hPa	1 050.09	1 000.04	900.06	799.93
误差/hPa	0.09	0.04	0.06	-0.07
标准压力/hPa	700	600	500	
实测压力/hPa	699.96	599.91	499.80	
误差/hPa	-0.04	-0.09	-0.20	

20 ℃下的压力循环测试数据中,平均偏差为 0.08 hPa,最大误差发生在 500 hPa 测试点上,为 0.36% 。把反复 3 次包括上、下 2 个行程共 6 组测试数据用Matlab软件线性拟合,得到气压计输入/输出特性关系曲线,如图7所示。

从温度循环和压力循环测试结果可看出,高精度硅压阻式气压计在 $500 \sim 1\,100$ hPa 量程范围和 $-40 \sim +60$ ℃全温度范围内具有优于 0.5% 的测量精度和优良的线性度,输出分辨率为 0.01 hPa。

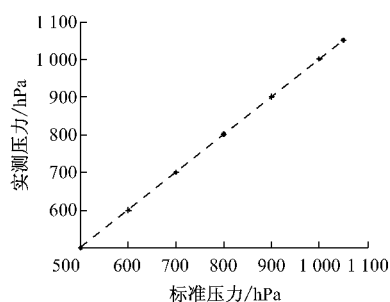


图7 气压计输入/输出特性曲线

4 结语

采用硅压阻式气压传感器为敏感元件,以 AVR 单片机为处理器研制的高精度气压计结合了高速数字运算处理技术和全温区温度补偿技术,在 $-40 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内很好地解决了硅压阻式气压传感器的温漂问题,使测量误差在 0.50% 以内,分辨率达到 0.01 hPa 。该气压计可广泛应用于矿井安全监测、气象、航空航天等领域。

参考文献:

- [1] 胡帆,陈正一. PTB220 系列数字式气压表的原理与应用[J]. 气象水文海洋仪器,2008(2):64-67.
- [2] 祝宇虹,纪军红,孙宁. 桥式硅压阻器件在气压测量中的应用[J]. 传感器技术,2005,24(5):74-76.
- [3] 肖韶荣,朱平,贾富来. 光纤气压传感器特性分析[J]. 光学精密工程,2008,16(6):1042-1046.
- [4] 陈祥. 基于 HART 协议智能压力变送器的研究和开发[D]. 南昌:南昌大学,2006.
- [5] 陈晓颖,宋爱国,李建清,等. 遗传算法在硅压阻气压传感器温度补偿中的应用[C]//2010 年航空试验测试技术峰会,上海,2010.
- [6] 成方林,张齐,门雅彬,等. 最小二乘法在 XQY1-1 型气压传感器中的应用[J]. 海洋技术,2009,28(2):25-27.
- [7] 曹万丹. 基于 AVR 的智能数字气压计的优化设计[D]. 武汉:武汉科技大学,2009.
- [8] 孙艳梅,刘树东. 压力传感器温度补偿的一种新方法[J]. 光通信研究,2011(1):62-64.
- [9] 刘鹏. 压阻式压力传感器温度补偿方法实现的研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [10] 袁智荣,王文襄. 硅压阻式压力传感器的一种温度补偿方法及其应用[J]. 传感器技术,1998,17(3):25-27.
- [11] 孙育才,孙华芳,王荣兴. 单片机原理及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006:251-252.
- [12] 朱目成,夏季,张立红,等. 硅压阻式传感器性能影响因素的研究[J]. 兵工自动化,2000(2):45-47.
- [13] 杜胜波,毛万华,杨雁南. 高精度大气压力指示仪[J]. 仪表技术与传感器,2011(7):39-40.