

# 基于压力补偿的 高精度智能变送器的设计

**摘要：**为在不同大气压力环境下，精确测量热式差压传感器采集的差压信号，设计了基于压力补偿的高精度智能变送器。系统由热式差压传感器、压力补偿放大器模块、变送输出模块组成。给出了完整的系统低功耗设计框图，提出了一种在传统变送器基础上复合绝压传感器进行大气压力补偿的方法，实现了变送器的自校准功能。描述了压力补偿放大器模块和变送输出模块的设计方案，分析了系统的软件处理流程。目前，该智能变送器已经投入实际使用，系统结构简单，经现场测试，精度高且长期运行稳定，效果良好。

**关键词：**热式差压传感器；压力补偿；高精度；智能变送器；低功耗

**中图分类号：**TP216 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-883X(2011)10-0017-04

孙学飞 申群太 黄永锋

## 一、引言

传统的热式差压传感器输出易受环境大气压力的影响，固定差压信号的电信号输出与环境大气压力成正比，造成在变送输出端出现信号输出误差。为了保证在固定差压信号的作用下，变送输出端的信号不受环境大气压力的影响，本文提出了一种在传统差压传感器的基础上复合一个绝压传感器的设计方法，使用单片机进行数据处理，补偿差压传感器的输出，达到固定差压信号的变送输出不受环境大气压影响的效果。

## 二、系统结构框图

系统结构框图如图 1 所示。整个系统由热式差压传感器、压力补偿放大器模块、变送器输出模块组成。热式差压传感器采集工业现场的差压信号，输出差分小信号；压

力补偿放大器模块放大热式差压传感器输出的差分小信号，同时采集环境大气压力，补偿受环境大气压影响的差分小信号，保证固定差压信号下，放大器的输出  $V_o$  保持不变；变送输出模块对应差压传感器的零点和满量程，输出 4-20mA 标准电信号。

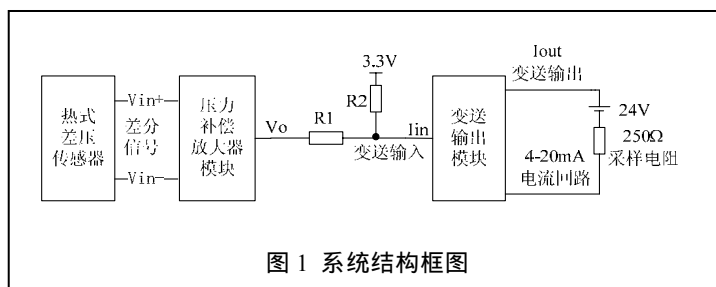


图 1 系统结构框图

## 三、系统硬件设计

### 1、压力补偿放大器模块

压力补偿放大器模块使用 3.3V 供电。该模块为大气压力控制增益改变的放大电路。由于差压传感器输出的差分小信号与环境大气压力成正比例线性关系，利用绝压传感器采集的环境大气压力，按反比例

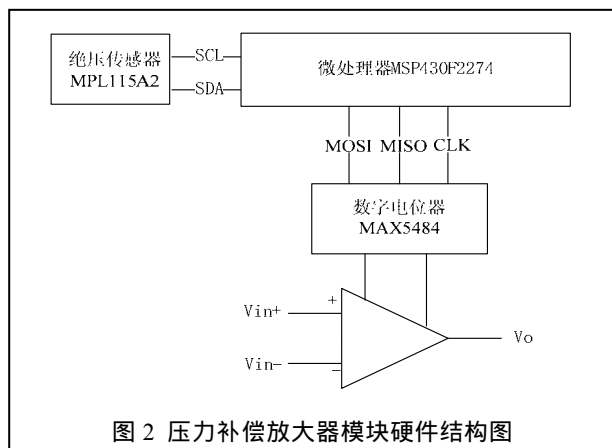


图2 压力补偿放大器模块硬件结构图

关系改变放大电路的增益，可以保证在差压信号不变的情况下，压力补偿放大器输出  $V_o$  保持不变。其硬件结构如图2所示。

### (1) 微处理器

系统的微处理器采用了 TI 公司的 MSP430F2274 单片机。低功耗是该单片机一个最突出的优势，在 1 MHz、2.2 V 工作条件下，功耗仅为 250  $\mu$ A，睡眠模式仅为 0.7  $\mu$ A，满足系统低功耗要求<sup>[2]</sup>。I<sup>2</sup>C 通信接口连接绝压传感器，读取环境大气压力和温度。SPI 接口和数字电位器连接，程序控制数字电位器输出可变阻值。

### (2) 绝压传感器 MPL115A2

MPL115A2是 Freescale 公司研发的一款低功耗且具有数字输出的绝压传感器。5 $\times$ 3 $\times$ 1.2mm 的 LGA 封装非常适合便携式电子设备和对空间有比较严格限制的情况。该传感器为低功耗器件，工作状态下功耗为 5  $\mu$ A，休眠模式功耗仅为 1  $\mu$ A，适用于电池供电和小功率的设备中。另外 MPL115A2 的工作电压范围宽，可达 2.375V ~ 5.5V，工作温度范围可达 -40 ~ 105，满足比较苛刻的环境需要。

MPL115A2 内部集成了 MEMS 压力传感器和调理 IC，压力测量范围 50kPa ~ 115kPa，内部集成的 10 位 ADC 能够把温度传感器和压力传感器测得的结果以数字量的形式通过 I<sup>2</sup>C 接口输出。芯片出厂时设置的校准数据保存在芯片内部的 EEPROM 中，可以通过程序读取。MSP430F2274 通过执行一个补偿算式，得到精度为 1kPa 的精确压力。

### (3) 数字电位器 MAX5484

改变放大电路的增益是通过改变放大电路的反馈电阻或输入电阻实现的，增益改变方式主要采用手工机械控制和程序控制两大类。程序控制方式与手工机械控制方式相比，具有可编程改变阻值、耐震动、噪声小、寿

命长、抗环境污染等重要优点，因而可变增益放大电路的增益改变方式大多采用程序控制方式。

系统采用数字电位器 MAX5484 取代机械电位器，采用程序控制方式改变放大电路增益。MAX5484 是 10 位（1024 抽头）非易失、线性变化、可编程分压器和可变电阻器，能实现机械电位器的功能，但是采用可引脚配置的 3 线串行 SPI 接口或增/减数字接口可以替代机械装置。另外该数字电位器是 2 端可变电阻器，内部具有非易失、电可擦除可编程只读存储器 (EEPROM)，用于存储上电时滑动端的初始位置和微处理器写入的控制其输出电阻值的数字值。

MAX5484 非常适合需要数字控制电位器的应用场合。用作可变电阻器时，提供 50k $\Omega$  端到端输出电阻。端到端标称电阻温度系数为 35ppm/，而比例温度系数仅为 5ppm/，因此该器件非常适用于那些要求低温度系数分压器的应用，例如低漂移、可编程增益放大器。

该数字电位器工作电压范围宽，可采用 +2.7V ~ +5.25V 单电源供电或  $\pm$ 2.5V 双电源供电。向非易失存储器写数据时，该器件消耗 400  $\mu$ A（最大值）电源电流，待机电源电流为 1.0  $\mu$ A（最大值）。采用节省空间的（3mm  $\times$  3mm）16 引脚 TQFN 或 14 引脚 TSSOP 封装，可工作在扩展级（-40 ~ +85）温度范围，可根据需要选择适当的封装和扩展温度等级。

### (4) 放大电路

系统的放大电路选用了集成运放 AD627，AD627 是一款完整的低功耗仪表放大器，在单电源 2.2V ~ 18V 下提供满电源幅度输出，使设计更为简单；它具有高精度直流、交流性能，工作时的功耗仅为 85  $\mu$ A。增益通过外接电阻可方便调节。无外接电阻时，被设置为单位增益  $G = 5$ ，接入电阻时， $G$  值最大可达 1000，增益公式为：

$$G = \frac{200k\Omega}{R} + 5 \quad (1)$$

其中， $R$ —放大电路的输入电阻。

低功耗，宽电源电压，使其非常适合电池供电电路。

### (5) 系统工作原理

标准大气压下，运放增益为  $G$ ，差压传感器的输出为  $V_1$ ，经过运放放大后，运放输出  $V_{o1}$ ：

$$V_{o1} = V_1 \times G \quad (2)$$

环境大气压为  $P$ （50kPa  $\leq P \leq$  115kPa），根据差压传感器的输出与环境大气压成正比的关系，差压传感器的输出  $V_2$ ：

$$V_2 = V_1 \times \frac{P}{101} \quad (3)$$

而此时通过改变数字电位器的阻值，运放的放大增益设置

$$G_1 : G_1 = G \times \frac{101}{P} \quad (4)$$

则大气压为  $P$  运放的输出  $V_{o2}$  为：

$$V_{o2} = V_2 G_1 = V_1 \cdot \frac{P}{101} \cdot G \cdot \frac{101}{P} = V_1 G = V_{o1} \quad (5)$$

由  $V_{o1} = V_{o2}$  可以得出，在差压传感器采集同一个差压的条件下，即使环境大气压改变，运放的输出保持不变，最终变送输出为准确的实际值。

### 2、变送输出模块

系统变送输出模块采用BB (BURR-BROWN) 公司生产的XTR115芯片，XTR115属于二线制电流变送器，内部的2.5V基准电压可作为传感器的激励源。XTR115可将输入的40~200μA电流信号放大100倍，获得4mA~20mA的标准输出，即：

$$I_o = 100 \times I_{in} \quad (6)$$

当环路电流接近32mA时，能自动限流，差压传感器零点和满量程时分别对应4mA和20mA，可以得到：

$$\frac{V_z}{R_1} + \frac{3.3V}{R_2} = 4\mu A \quad (7)$$

$$\frac{V_f}{R_1} + \frac{3.3V}{R_2} = 20\mu A \quad (8)$$

其中， $V_z$ —传感器零点输出；

$V_f$ —传感器零点输出。

### 四、系统软件设计

为降低功耗，MSP430F2274 在上电初始化完成后直接进入低功耗睡眠模式，当定时中断发生时，单片机从睡眠状态模式下被唤醒，执行相应的中断服务子程序。

系统上电初始化过程及任务包括：设置系统时钟、初始化 GPIO、配置 SPI 和 I<sup>2</sup>C 接口、通过 I<sup>2</sup>C 接口读取绝压传感器 MPL115A2 保存在 EEPROM 中的补偿数据、设置定时中断。

系统需响应的中断为 10ms 定时中断，其中断处理函数实现采集环境压力和温度、确定是否需要数字电位器写入数据，若需对数字电位器写入数据则写入线性

化之后的数据。具体流程如图 3 所示。

#### 1、读取环境大气压力和温度值

MPL115A2 采集环境大气压力和温度，MSP430F2274 通过 I<sup>2</sup>C 接口读出其采集的数据。利用初始化时读取的补偿参数，MSP430F2274 对采集到的环境大气压力和温度进行补偿运算，得到准确地环境大气压力，其精度为 1kPa。MSP430F2274 对绝压传感器的操作函数主要包括：

```
void readpt(); //读压力和温度的 ADC 值
void reada0(); //读固化在 EEPROM 里的补偿系数
void startpt(); //转换得到精确压力值
```

#### 2、改变数字电位器的阻值

MAX5484 提供可编程的轨对轨 50kΩ 量程的电阻输出，具有 10 位步进精度。MSP430F2274 通过 3 线 SPI 接口写 10 位数据到 MAX5484 内部寄存器，改变其输出阻值。输出的电阻值  $R$ ：

$$R = \frac{D}{1023} \times 50000\Omega + 110\Omega \quad (9)$$

其中，110Ω—零点漂移误差；

$D$ —单片机写入数字电位器内部寄存器的数据：

$$D = \frac{(R - 110) \times 1023}{50000} \quad (10)$$

MSP430F2274 对数字电位器的操作函数主要包括：

```
void calMAX5484(); //计算写到数字电位器中的数据
void writeMAX5484(); //写数字电位器数据
```

#### 3、线性化处理

通过绝压传感器可测得的环境大气压的范围为 50~115kPa。为了达到在可变的大气压环境下，放大器的放

大倍数呈比例的改变，必须对放大倍数进行反比例线性化处理。标准大气压环境下，设定的放大器的放大倍数为 9，则不同环境大气压下的放大倍数为：

$$A = \frac{101}{P} \times 9 \quad (10)$$

$$\text{数字电位器输出的阻值} : R_o = \frac{200000}{(A - 5)} \Omega \quad (11)$$

$$\text{写入 MAX5484 的数据为} : D = \frac{(R_o - 110) \times 1023}{50000} \quad (12)$$

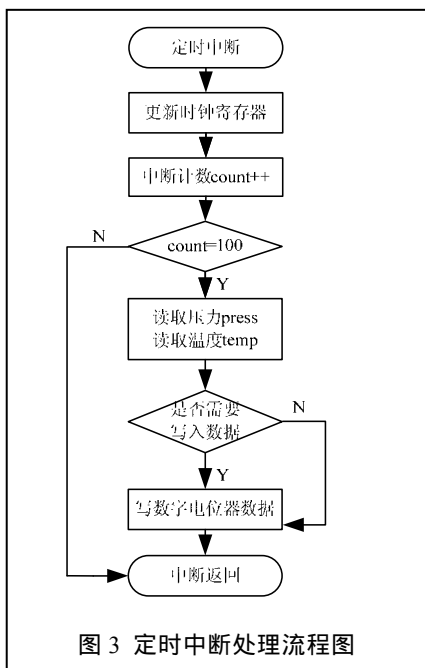


图 3 定时中断处理流程图

## 五、系统测试数据及相关参数

经过实验室和工业现场的数据验证，微处理器采集大气压精度可以达到 0.6%F.S.，放大倍数调整精度达到 0.54%F.S.。表 1 为实验相关数据。

表 1 实验相关数据

| 环境大气压力 | 实测压力       | 放大倍数   | 实测放大倍数 |
|--------|------------|--------|--------|
| 50kPa  | 50.275kPa  | 18.180 | 18.081 |
| 70kPa  | 69.542kPa  | 12.986 | 13.071 |
| 85kPa  | 84.500kPa  | 10.694 | 10.757 |
| 101kPa | 101.601kPa | 9.000  | 8.946  |
| 105kPa | 105.672kPa | 8.657  | 8.603  |
| 110kPa | 109.701kPa | 8.264  | 8.286  |
| 115kPa | 115.702kPa | 7.904  | 7.858  |

经测试，系统主要相关参数如下：

大气压力测量范围：50kPa ~ 115kPa；

大气压力测量精度：0.6% F.S.；

理论增益输出范围：7.904 ~ 18.180；

增益输出精度：0.54% F.S.；

变送输出精度：0.4% F.S.；

工作温度：(-40 ~ +85) ；

工作电压：(2.8 ~ 3.6) V。

## 六、结束语

研究设计了一种基于压力补偿的高精度智能变送器，解决了传统热式差压传感器随大气压力变化变送输出信号出现误差的问题，具有自补偿的功能。给出系统的整体框架和功能，介绍了系统的硬件模块和软件处理流程。目前，该智能变送器已经投入实际使用，系统结构简单，经现场测试，精度高且长期运行稳定，效果良好。

## 参考文献

[1] 王小娟. 数字式可变增益放大器的实现[J]. 仪表技术, 2008(7):7-8.  
 [2] 沈建华, 扬艳琴, 翟晓曙著. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机实践与系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005(4).  
 [3] 蓝加平, 陈首部. 绝压传感器温漂补偿及性能仿真[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2005(6): 51-56  
 [4] 曹恒, 李帅, 奚云辉, 高戟. 基于MSP430的高精度智能变送器研究与设计[J]. 振动、测试与诊断, 2006(3):28-32.  
 [5] 杨路明著. C 语言程序设计教程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005(12).

## Design of intelligent converter with high accuracy based on pressure compensation

SUN Xue-fei<sup>1</sup>, SHEN Qun-tai<sup>1</sup>, HUANG Yong-feng<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Changsha titanium and electronic equipment Co., Ltd, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to measure the differential pressure signals precisely from MEMS-based thermo-differential pressure sensors in the environments with different atmospheric pressures, an intelligent transducer system with high accuracy is designed based on pressure compensation. The system consists of MEMS-based thermo-differential pressure sensor, pressure compensation amplifier module and transforming output module. A complete design diagram of low power consumption is provided, a atmospheric pressure compensation method using absolute pressure sensor based on the traditional transducer is proposed, and the self-calibrating function of transducer is realized. The design proposals for the pressure compensation amplifier module and transforming output module are described, and the flow chart of systematic software is analyzed. This intelligent transducer has worked stably for a long time with good performance in many practical applications until now. The field tests show that the system is portable, has simple structure, ultra-low power consumption and high accuracy.

Keywords: MEMS-based thermo-differential pressure sensor ; pressure compensation; high accuracy; intelligent transducer; ultra-low power consumption

## 作者简介

孙学飞：中南大学信息科学与工程学院 硕士研究生，研究方向：嵌入式系统设计和微处理器应用。

通讯地址：湖南省长沙市中南大学校本部民主楼 128 室  
 邮编：410083

电邮：sunxuefei3064@sina.com

申群太，中南大学 信息科学与工程学院，教授，研究方向：复杂工业过程的决策、优化和控制。

黄永锋：长沙钛合电子设备有限公司 工程师，研究方向：传感器信号调理。

读者服务卡编号 003