

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007216

## 硅谐振式压力传感器双频合成与误差补偿研究\*

高英杰<sup>1,2</sup>, 赵 稔<sup>3</sup>, 赵晓丹<sup>1,2</sup>, 张中飞<sup>3</sup>, 杨毅彪<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室 太原 030024; 2. 太原理工大学物理与光电工程学院 太原 030024; 3. 太原航空仪表有限公司 太原 030032)

**摘要:**由于新型双“H”型硅谐振式压力传感器与传统振动筒式和单梁硅谐振式等压力传感器在新旧替代方面存在冲突,基于GD32单片机定时器计数和中断定时技术,研制了一种双频率采集合成系统。该系统搭建了基于GD32F405RGT6单片机多个定时器同步计数电路,实现双频20 ms同步采集。在此基础上,提出了一种单片机定时器定时中断控制I/O口翻转电平从而输出方波的数频转换方法,并设计了一种双频率合成误差补偿方案,使双频合成最大理论误差从51.15 Pa减小为0.127 9 Pa。实验结果表明,在大气环境-45℃~+85℃、大气压力2~266 kPa条件下该系统可正常工作,输出单频范围为4~10 kHz,双频采集合成误差均小于传感器测量量程的0.005%。该系统数字电路板体积小,可以集成到新型双“H”型硅谐振式压力传感器电路中,很好地满足了大气压力检测监控用硅谐振式压力传感器双频率采集合成输出的要求。

**关键词:** 双频合成; 误差补偿; 双频采集; 数频转换

**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

## Dual-frequency synthesis of the silicon resonant pressure sensor and error compensation research

Gao Yingjie<sup>1,2</sup>, Zhao Ren<sup>3</sup>, Zhao Xiaodan<sup>1,2</sup>, Zhang Zhongfei<sup>3</sup>, Yang Yibiao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for New Sensor and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Taiyuan Aviation Instrument Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** In the replacement from old version to new version, there is a conflict between the new double “H” silicon resonant pressure sensor and the traditional pressure sensor, such as vibration cylinder and single beam silicon resonant. To solve the problem, develops a dual-frequency acquisition and synthesis system, which is based on the GD32 single-chip timer counting and interrupt timing technology. The system builds a multiple timer synchronous counting circuit by using the tiny single-chip microcomputer (GD32F405RGT6) to realize dual frequency 20 ms synchronous acquisition. On this basis, a new digital frequency conversion method is proposed, which can control the I/O port flipping level by the timer interrupt of the single-chip microcomputer to outputs square wave. And a dual-frequency synthesis error compensation method is designed to decrease the maximum theoretical error of the dual-frequency synthesis from 51.15 Pa to 0.127 9 Pa. Experimental results show that the system can work under -45℃~+85℃ and 2~266 kPa. The single frequency range of the system output is 4~10 kHz. The dual frequency acquisition and synthesis error is less than 0.005% of the full pressure scale. The digital circuit board is small and can be integrated into the new double “H” type silicon resonant pressure sensor circuit, which well satisfies the requirement of the dual frequency acquisition and synthesis output for the silicon resonant pressure sensor in atmospheric pressure detection and monitoring.

**Keywords:** dual frequency synthesis; error compensation; dual frequency acquisition; digital frequency conversion

收稿日期:2020-12-08 Received Date:2020-12-08

\* 基金项目:山西省重点研发计划(国际科技合作)(201903D421052)、山西省应用基础研究计划(青年基金)(201901D211070)项目资助

## 0 引 言

双“H”型硅谐振式压力传感器是一种新型的硅谐振式压力传感器,其采用双“H”型谐振梁结构<sup>[1]</sup>,在大气压力作用下传感器内部硅膜发生形变,应变产生的张应力与压应力分别作用于两个“H”型谐振梁,使两个谐振梁谐振频率增加和减少,从而表示所受大气压力。与同类型单谐振梁结构的硅谐振式压力传感器相比,双谐振梁结构可以实现温度自补偿,不需要用温度传感器测量谐振梁的温度进行补偿,从而提升线性度的优点<sup>[2-4]</sup>。相比与其他类型的压力传感器,如振动筒式压力传感器<sup>[5-6]</sup>,也具有温度自补偿的优点,且精度高、稳定性好、抗干扰能力强<sup>[7-9]</sup>。

目前大气压力检测监控等领域中使用的传统高精度压力传感器的输出模式为一频率信号和一路温度电压信号,其检测电路只能同时测量一路频率和一路温度电压,如传统振动筒式和单梁硅谐振式等传统压力传感器。由于双“H”型硅谐振式压力传感器输出模式变为两路频率信号,所以使用时需要同时测量两路频率,在不改变现有检测电路的条件下,压力传感器新旧式替换存在冲突,此问题需要迫切解决。但是由于大气压力检测监控系统的占有空间有限,在解决此问题时传感器内部只能添加一个 25 mm 宽的正方形电路板,显然需要一个微小系统先把传感器输出的两路频率采集解算为大气压力数字量,再把大气压力数字量转换成一路频率量或者一路温压,这样才能让现有大气压力检测设备接收。同时,大气压力检测设备中温度电压 AD 采集芯片一般为 12 位且精度达不到 0.005%,因此只能把大气压力数字量转换成一路频率量,即此问题可以转换为 20 ms 双频同步采集和 20 ms 高精度数频转换的问题。

对于方波信号的频率测量已有较多研究<sup>[10-16]</sup>,而基于微小单片机电路 20 ms 高精度数频转换的研究相对较少。本文使用 GD32F405RGT6 单片机搭建数字电路系统(长 23 mm,宽 17 mm),可集成到双“H”型谐振梁结构的硅谐振式压力传感器内部电路中。首先基于单片机多定时器同步计数功能,设计 5 个定时器协同作业,解决双频同步采集问题;然后在单片机 1 个定时器定时中断控制 I/O 口输出高低电平时间的基础上,提出一种误差补偿方案,解决了高精度数频转换的问题;最后通过单片机 6 个定时器共同协同作业,整个单片机数字电路系统实现同步采集传感器输出的两路频率并同时输出一路频率。本文设计实验在不同温度和不同大气压力下测试系统双频合成性能,实验结果显示输出的频率值仅与大气压力相关,系统双频合成误差很小且基本不受大气温度影响,为现有大气压力测量设备提供了硅谐振压力传感器原位替代其他压力传感器的可行性方法。

## 1 GD32 单片机对两路方波信号的同步采集方法

本文基于 GD32F405RGT6 单片机对传感器输出双频进行同步采集,在采集周期内使用单片机的两个定时器分别对传感器输出的两路方波信号的上升沿同步计数,并同时给单片机的另外两个定时器输出门控信号,在门控期间对单片机内部的标准方波信号的上升沿也进行计数,单片机内部的标准信号即配置单片机的时钟信号。双频率同步采集方法原理如图 1 所示。

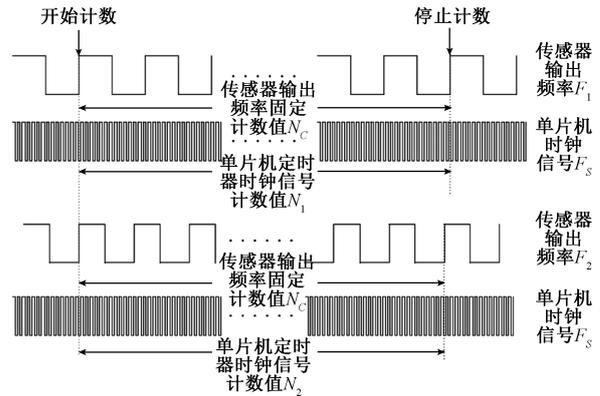


图 1 双频率同步采集方法原理

Fig. 1 Schematic of the dual-frequency synchronous acquisition method

传感器输出频率  $F_1$  和频率  $F_2$  如式(1)和(2)所示。

$$F_1 = \frac{F_s \times N_c}{N_1} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{F_s \times N_c}{N_2} \quad (2)$$

式中:  $N_c$  为对待测信号上升沿的固定计数值;  $F_s$  为单片机时钟信号的频率;  $N_1$  和  $N_2$  分别为单片机时钟信号传感器输出频率  $F_1$  和频率  $F_2$  对应门控信号期间的上升沿计数值。

由于本文使用的硅谐振式压力传感器测量大气压力范围为 2~266 kPa,其对应传感器输出的两路频率范围在 80~120 kHz,采集周期为 20 ms,所以在 20 ms 内对传感器输出的两路频率方波上升沿计数,最大计数值为 80 kHz 对应的 1 600 个上升沿,考虑到实际采集程序需要,一般设置  $N_c=1 400$ 。

## 2 双频实时合成与输出误差补偿方案

双频率实时数字合成单频率方法是硅谐振式压力传感器输出的两路频率随动的方波信号通过一个单片机数

字电路采集并合成一路频率随动的方波信号,其步骤为先把采集到的两路频率解算为大气压力数字量,再把大气压力数字量线性转化为一路线性方波信号输出,即方波信号的频率量对应大气压力数字量。该方法的核心为高精度线性数频转换技术,这种技术可以应用在单片机数字电路中,提供了一种将连续变化的数字量实时线性转换为一个频率连续变化的方波信号的方法。

单片机 I/O 口输出电平必须由整数个单片机时钟周期构成,即需要输出的方波信号的电平只能由整数个时钟周期构成,其具体步骤如下:

1) 通过单片机数字采集电路每 20 ms 实时采集硅谐振压力传感器两路方波的信号,并解算为对应的压力数字量,解算如式(3)所示。

$$Z_1 = \sum_{p=0}^5 \left( \sum_{q=0}^{5-p} K_{pq} \times \left( \frac{x-A}{B} \right)^p \times \left( \frac{y-C}{D} \right)^q \right) \quad (3)$$

式中:  $Z_1$  为硅谐振压力传感器测量的大气压力;  $x$  为  $F_1$ ;  $y$  为  $F_2$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为常数;  $K_{pq}$  为传感器系数。

2) 本文硅谐振式压力传感器测量大气压力 2~266 kPa,需要转换的频率范围为 4~10 kHz,即大气压力线性转换频率公式如式(4)所示。

$$F = \frac{10-4}{266-2} (Z_1 - 2000) + 4000 \quad (4)$$

即数字采集电路每 20 ms 实时采集得到一次大气压力值,便可以通过式(4)计算得到对应单频频率值为  $F$ 。

当数字采集电路第一次采集硅谐振压力传感器两路方波信号时,可以通过线性关系式(4)得到预期的单频频率值  $F$ 。假设将输出的方波信号占空比设置为 50%,即方波信号单个周期低电平或高电平与单片机时钟周期的比值可以由式(5)计算得出。

$$M = \frac{F_s}{F} \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

式中:  $F_s$  为单片机时钟信号的频率;  $M$  为方波信号单个周期低电平或高电平与时钟周期的比值。

由于单片机 I/O 口输出电平必须是整数个单片机时钟周期构成,因此发送的方波信号的单个周期低电平或高电平对应单片机时钟周期的个数  $N$  由  $M$  向下取整得到,  $e$  为  $M$  的小数部分。  $N$  和  $e$  可分别由式(6)和(7)得到。

$$N = \lfloor M \rfloor \quad (6)$$

$$e = M - N \quad (7)$$

3) 每进入一次中断,翻转一次电平,调整下一次中断时间为  $N$  个单片机时钟周期,这样便可输出一个连续的方波信号。

通过以上步骤,可以输出一个连续的方波信号,但是方波信号的频率与预期的频率会有一个很大的误差,因为方波每个电平都会丢掉小数部分  $e$  对应的时间,结果

再次换算回来的压力值与传感器实时采集的压力值会有一个比较大的误差。为了解决这一误差,本文提出了一种误差补偿方案,即对  $N$  进行误差补偿,其具体步骤如下:

1) 数字采集电路每 20 ms 采集一次硅谐振压力传感器两路方波的信号时,通过线性关系式计算得到单频频率值  $F$  和输出信号高低电平的  $N$  和  $e$ 。

2) 程序进入第一次中断,翻转一次电平,累加一次误差,即  $e = e + e$ 。判断  $e$  是否  $< 1$ ,如果  $< 1$  则  $N$  不变;如果  $> 1$ ,则对  $N$  进行误差补偿,即  $N = N + 1$ ,并且令  $e = e - 1$ 。判断完毕后,调整下一次中断时间为  $N$  个单片机时钟周期。

3) 接下来每进入一次中断,都和进入第一次中断一样,翻转一次电平,累加一次误差,判断是否对  $N$  进行误差补偿,调整下一次中断时间为  $N$  个单片机时钟周期。

这样 20 ms 内能重复误差补偿很多次,直到采集到下一个大气压力值后继续重复上面的步骤。

综上所述,误差补偿前每个电平都会丢掉小数部分对应的时间(小于一个时钟周期),补偿后就会变为整个 20 ms 内所有电平加起来最多只会丢掉一个时钟周期。因为硅谐振压力传感器测量大气压力 2~266 kPa 转换的频率范围为 4~10 kHz,单片机 GD32F405RGT6 配置定时器的时钟信号为 104 MHz,所以该双频率实时数字合成单频率方法如果不进行误差补偿,那么理论最大误差就是输出最高频率 10 kHz 的一个电平 0.05 ms 内丢失的一个单片机时钟周期,对应 266 kPa 的误差为 51.15 Pa,这显然不满足大气压力检测监控压力传感器双频率采集合成输出的要求。若进行误差补偿,那么理论最大误差减小至整个 20 ms 内丢失的一个单片机时钟周期,对应 266 kPa 的误差为 0.127 9 Pa。这样误差就会缩减 400 倍并且基本可以忽略不计,完全满足压力传感器双频率采集合成输出的要求。

### 3 系统电路和软件设计

双频采集合成系统选择使用单片机 GD32F405RGT6 数字电路对压力传感器输出的两路频率方波信号进行测量、解算并对外输出一路频率方波信号。该系统电路板如图 2 所示,其长 23 mm,宽 17 mm,完全可以集成到传感器内部电路中。该系统电路原理如图 3 所示,  $G1$  为 8 MHz 高精度数字温补晶振,  $G2$  为 15 V 直流电压转 3.3 V 直流电压 DC/DC 转换器,  $D1$  为单片机 GD32F405RGT6,  $D2$  和  $D3$  为施密特反相器,  $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 、 $L4$ 、 $L5$ 、 $L6$  为叠层片式磁珠。

该系统的 GD32 单片机驱动电源由外部 15 V 直流电压通过 DC/DC 转换器  $G3$ 、多组磁珠和多个电容过滤

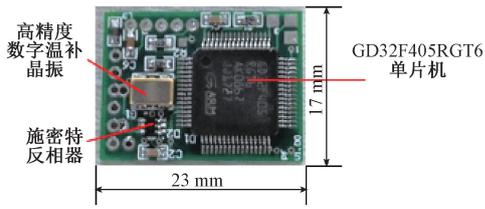


图 2 双频采集合成系统电路板

Fig. 2 Circuit board of the dual-frequency acquisition and synthesis system

转换为满足需要的 3.3 V 直流电压,用 8 MHz 高精度数字温补晶振作为单片机时钟来源。系统配置硅谐振压力传感器的两路频率  $F_1$  和  $F_2$  通过施密特反相器 D2 连接到 GD32 单片机上,用单片机 TIMER3 的 CH1 连接频率  $F_1$ ,用单片机 TIMER4 的 CH1 连接频率  $F_2$ ,用单片机 I/O 口 PA0 连接施密特反相器 D3 对外输出频率  $F_3$ 。

软件程序设计由主程序和中断程序构成。主程序完成初始化配置、使能定时器、以及两路频率、大气压力和误差循环计算等功能。中断程序为单片机 TIMER6 定时中断函数来实现单频的对外发送,在每 20 ms 频率测量时,单片机 TIMER6 同时持续中断控制 I/O 口 PA0 输出高低电平。

采集频率  $F_1$  的定时器具体配置为配置主从模式实现 TIMER3(16 位)、TIMER1(16 位)和 TIMER8(16 位)内部连接;配置 TIMER3 的 CH1 通道接收频率  $F_1$  方波信号进行上升沿计数,并设置初始比较值为 5,终止比较值为 1 405,CH2 通道对 TIMER1 输出门控信号;配置 TIMER1 级联 TIMER8 组成 32 位定时器并在门控期间内协同对单片机内部信号上升沿计数,其中 TIMER1 最大计数值为 36 000。

采集频率  $F_2$  的定时器具体配置为配置主从模式实现 TIMER4(16 位)和 TIMER5(32 位)内部连接;配置 TIMER4 的 CH1 通道接收频率  $F_2$  方波信号进行上升沿计数,并设置初始比较值为 5,终止比较值为 1 405 以及 CH2 通道对 TIMER5 输出门控信号;配置 TIMER5 在门控期间内对单片机内部信号上升沿计数。

进入程序循环时,先通过式(8)和(9)分别计算出频率  $F_1$  和频率  $F_2$  值。

$$F_1 = \frac{104\,000\,000 \times 1\,400}{N_1} \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{104\,000\,000 \times 1\,400}{N_2} \quad (9)$$

式中: $N_1$  为 TIMER8 的计数值乘 36 000 加上 TIMER1 的计数值; $N_2$  为 TIMER5 的计数值。

然后通过式(3)得出传感器实际测量出的大气压力

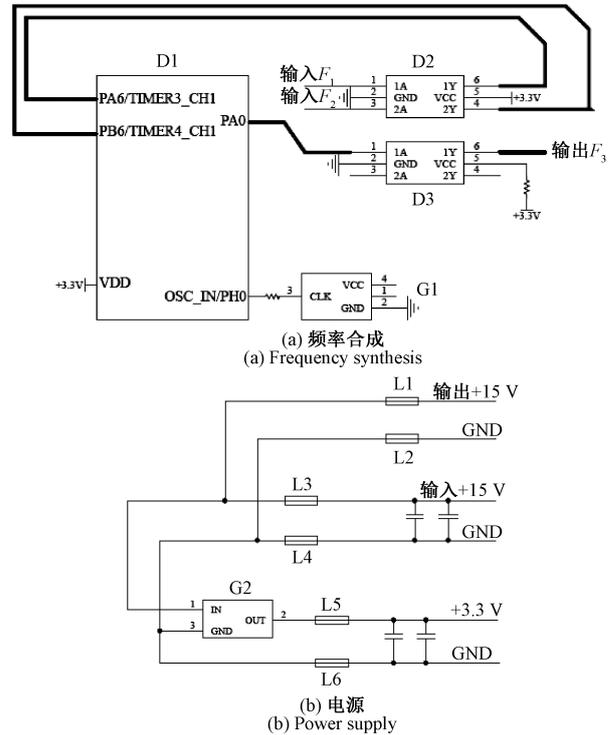


图 3 双频采集合成系统电路原理

Fig. 3 Circuit schematic of the dual-frequency acquisition synthesis system

值  $Z_1$ , 通过式(4)得出大气压力对应的预期频率值  $F$ , 通过式(5)~(7)得出频率值  $F$  对应方波信号的  $N$  和  $e$ 。最后在循环内加个延时函数避免在 20 ms 内循环计算,并等待 TIMER6 中断函数。

通过以上对单片机程序配置,双频率采集合成系统就能通过接收传感器输出的两路频率实时转换合成为一路频率输出,最后只需采集一路频率便可以得到传感器实时测量到的大气压力值,单频表示压力如式(10)所示。

$$Z_2 = \frac{264}{6} \times (F_3 - 4\,000) + 2\,000 \quad (10)$$

式中: $F_3$  为大气压力检测设备采集到的一路频率值; $Z_2$  为传感器通过双频率采集合成系统最终测量得到的大气压力值。

## 4 实验结果与分析

双频率采集合成系统性能实验测试为 3 部分:在不同大气压力和不同大气温度环境下,硅谐振压力传感器输出的两路频率连接到双频率采集合成系统;双频率采集合成系统输出一路与传感器实时测量的大气压力对应的频率随动的方波信号;用高精度频率计数器测量传感

器输出的两路频率和双频率采集合成系统输出的一路频率。双频采集合成系统实验性能测试如图4所示。

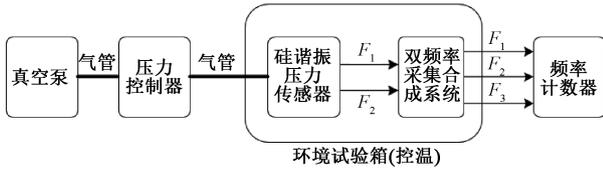
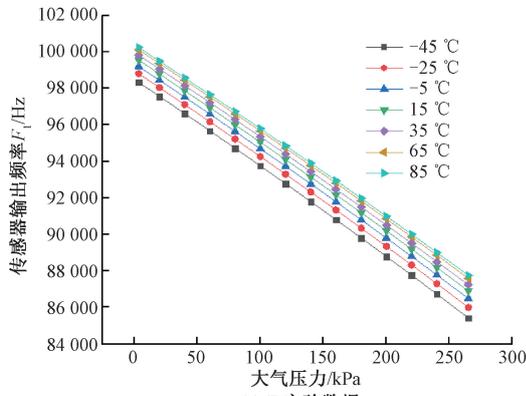


图4 系统实验性能测试原理

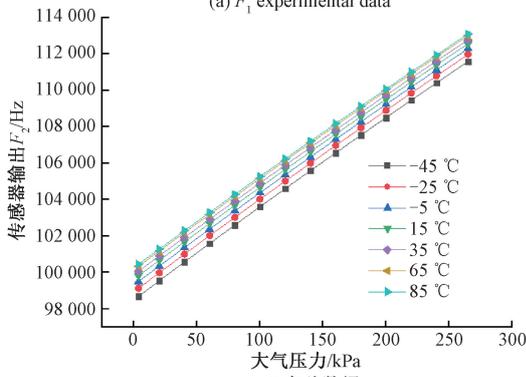
Fig. 4 Schematic of system experiment performance test

实验使用真空泵、大气压力控制器和环境试验箱控制与压力传感器和双频采集合成系统接触的大气压力和大气温度环境。在-45℃、-25℃、5℃、35℃、65℃和85℃等不同温度条件下,实验测试了压力传感器和双频采集合成系统在3.5、20、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、240和265 kPa等一系列大气压力环境下测量系统输出的 $F_1$ 、 $F_2$ 和 $F_3$ 的频率值,并分析双频率采集合成系统的系统采集合成性能,实验结果如图5所示。

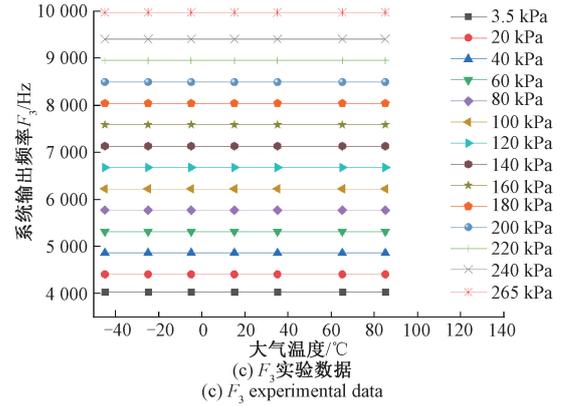
实验结果表明,传感器输出频率 $F_1$ 随大气压力的增大而变小,传感器输出频率 $F_2$ 随大气压力的增大而变大,这符合压力传感器的双“H”型谐振梁在大气压力变化时两个谐振梁谐振频率分别增加和减少的原理。系统输出的频率 $F_3$ 在相同大气压力下,随大气温度变化不明显,基本不受温度影响。



(a)  $F_1$  实验数据  
(a)  $F_1$  experimental data



(b)  $F_2$  实验数据  
(b)  $F_2$  experimental data



(c)  $F_3$  实验数据  
(c)  $F_3$  experimental data

图5 双频采集合成系统实验性能测试数据结果

Fig. 5 Experimental performance test data results of dual-frequency acquisition and synthesis system

硅谐振压力传感器实际测量出的大气压力值 $Z_1$ 可以由传感器输出的 $F_1$ 和 $F_2$ 代入式(3)得到。其中实验使用的硅谐振压力传感器参数 $A=92\ 666$ 、 $B=7\ 574$ 、 $C=105\ 772$ 、 $D=7\ 332$ ,传感器系数 $K_{pq}$ 如表1所示。

表1 传感器系数 $K_{pq}$

Table 1 Sensor coefficient  $K_{pq}$

系数 $K_{pq}$	值
$K_{00}$	134.220 545 10
$K_{01}$	84.121 974 96
$K_{02}$	4.390 993 44
$K_{03}$	-0.109 328 11
$K_{04}$	6.151 127 27
$K_{05}$	5.949 648 40
$K_{10}$	-67.905 580 52
$K_{11}$	1.282 332 51
$K_{12}$	-1.038 001 15
$K_{13}$	24.531 393 06
$K_{14}$	28.650 726 88
$K_{20}$	-3.164 550 19
$K_{21}$	-1.555 993 42
$K_{22}$	37.067 074 28
$K_{23}$	56.944 965 35
$K_{30}$	-0.857 015 50
$K_{31}$	24.972 962 68
$K_{32}$	58.782 361 57
$K_{40}$	6.296 592 12
$K_{41}$	31.725 308 33
$K_{50}$	7.205 438 66

由系统输出频率  $F_3$  代入式(10)可以得到系统转换的大气压力值  $Z_2$ , 通过  $Z_2$  和  $Z_1$  的差值可以得到双频率采集合成系统误差, 如图 6 所示。

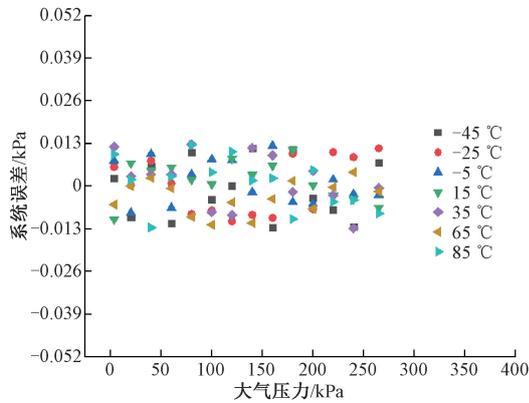


图 6 双频采集合成系统误差

Fig. 6 Dual-frequency acquisition and synthesis system error

结果表明,在采样周期为 20 ms、工作温区为  $-45^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$  和大气压力量程为 2~266 kPa 条件下,系统将硅谐振压力传感器两路频率输出合成为一路频率输出,输出频率范围为 4~10 kHz,实验结果系统误差最大 12.78 Pa 且均小于 13 Pa,对应硅谐振压力传感器的压力测量误差小于 0.005% FS,满足航空用硅谐振压力传感器的双频率采集合成要求。

显然,实验最大误差 12.78 Pa 比没有经过误差补偿的理论最大误差 51.15 Pa 小很多,相比误差补偿后的理论最大误差 0.1279 Pa 仍有差距。这说明误差补偿对系统的双频合成优化起到了效果。通过理论分析双频合成这一方法本身基本没有误差,即误差主要来自系统时钟源 8 MHz 晶振、GD32F405RGT6 单片机对 8 MHz 时钟信号倍频和分频以及定时器计数带来的误差。所以降低系统误差需要继续深入研究 GD32F405RGT6 单片机在不同温度下倍频、分频和计数的误差补偿,或者使用更高性能的单片机搭建系统,从而实现更高精度的双频合成。

## 5 结 论

本文提出了一种基于 GD32F405RGT6 单片机多个定时器同步计数和定时中断翻转 I/O 电平实现传感器双频输出采集合成单频输出的方法,并设计了一种定时中断误差累加补偿方案。采用两个定时器独立对两路方波上升沿计数功能,实现两路传感器输出待测方波信号同步计数;同时基于多定时器主从配置,实现对低频待测方波信号和高频标准方波信号同步计数,保证大气压力采

集的准确性和实时性。在此基础上,提出一种基于单片机定时中断翻转 I/O 电平方法以实现大气压力数值量转换为频率量,并设计了一种误差补偿方案,满足了高精度数频转换的要求,确保双频合成单频的准确性和实时性。基于该双频采集合成方法实现了采样频率为 20 ms、工作温区为  $-45^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$  和大气压力为 2~266 kPa 条件下,实验结果合成误差均小于 13 Pa,对应硅谐振压力传感器的压力测量误差小于 0.005% F.S,测量精度达到了国内外压力采集合成的顶尖水平。

## 参考文献

- [1] LUO Z, CHEN D, WANG J, et al. A high-Q resonant pressure microsensor with through-glass electrical interconnections based on wafer-level MEMS vacuum packaging [J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 24244-24257.
- [2] ZHU L, XIE B, XING Y, et al. A resonant pressure sensor capable of temperature compensation with least squares support vector machine [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 1731-1734.
- [3] XIE B, XING Y, WANG Y, et al. Vacuum-packaged resonant pressure sensor with dual resonators for high sensitivity and linearity [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 120: 194-199.
- [4] LI Y, WANG J, LUO Z, et al. A resonant pressure microsensor capable of self-temperature compensation [J]. *Sensors*, 2015, 15(5): 10048-10058.
- [5] 陈丽艳,康志宏,宋继红.真空腔泄漏对振动筒压力传感器长期稳定性的影响分析[J]. *计测技术*, 2018, 38(1): 21-23.  
CHEN L Y, KANG ZH H, SONG J H. Analysis of the influence of vacuum cavity leakage on the long-term stability of vibrating cylinder pressure sensor [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(1): 21-23.
- [6] 姚敏强,康志宏,宋继红.振动筒压力传感器开环测试特征参数分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(7): 29-31.  
YAO M Q, KANG ZH H, SONG J H. Analysis of characteristic parameters of open-loop test for vibration cylinder pressure sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(7): 29-31.
- [7] KINNELL P K, CRADDOCK R. Advances in silicon resonant pressure transducers [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1(1): 104-107.
- [8] JIAO H, XIE B, WANG J, et al. Electrostatically driven and capacitively detected differential lateral resonant pressure microsensor [J]. *Micro & Nano Letters*, 2013, 8(10): 650-653.

- [9] 樊尚春, 乔少杰, 张轩. 谐振式硅微结构压力传感器非线性振动特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1670-1673.  
FAN SH CH, QIAO SH J, ZHANG X. Study on nonlinear vibration characteristics of resonant silicon micro structure pressure sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1670-1673.
- [10] 柳义利, 周渭, 刘海霞. 一种高速连续频率测量方法[J]. 宇航计测技术, 2000, 20(1): 32-38.  
LIU Y L, ZHOU W, LIU H X. A new method of high speed and continuous measurement of frequency [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2000, 20(1): 32-38.
- [11] 李智奇, 王海, 张雪萍, 等. 关于超高频测量技术的研究[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(3): 12-15.  
LI ZH Q, WANG H, ZHANG X P, et al. Research on technology for measuring ultrahigh frequency [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2004, 24(3): 12-15.
- [12] 邵杨帆, 李宏. 准全同步频率测量方法的研究与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(3): 105-108.  
SHAO Y F, LI H. Research and implementation of quasi full synchronous frequency measurement method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2008, 22(3): 105-108.
- [13] 王海, 周渭, 宣宗强. 高精度频率测量技术及其实现[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 981-983.  
WANG H, ZHOU W, XUAN Z Q. High-accuracy frequency measurement scheme and its implementation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(5): 981-983.
- [14] 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.  
CHEN L F, MENG R, FENG X. Review of frequency measurement research [J]. Electronic Science and Technology, 2011, 24(7): 155-159.
- [15] 权爽, 安亮, 王帆帆. 频率计数器在航天器信号频率测量中的适用性分析[J]. 航天器工程, 2014, 23(4): 66-71.  
QUAN SH, AN L, WANG F F. Applicability analysis of

frequency counter in spacecraft signal frequency measurement [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(4): 66-71.

- [16] 马献果, 焦阳. 频率测量方法的改进[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S1): 120-121.  
MA X G, JIAO Y. Improvement of frequency measurement method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S1): 120-121.

### 作者简介



**高英杰**, 2018年于太原理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为硅谐振压力传感器。  
E-mail: 415285970@qq.com

**Gao Yingjie** received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2018. He is currently a master student at Taiyuan University of Technology. His main research interests include silicon resonant pressure sensor.



**赵稔**, 1992年于西北工业大学获得学士学位, 现为太原航空仪表有限公司研究员高级工程师, 主要研究方向为航空仪表技术。  
E-mail: 13834548128@139.com

**Zhao Ren** received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 1992. He is currently a researcher and a senior engineer at Taiyuan Aviation Instrument Co., Ltd. His main research interests include aviation instrument technology.



**杨毅彪** (通信作者), 1987年于暨南大学获得学士学位, 2009年于太原理工大学获得博士学位, 现为太原理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微纳传感。  
E-mail: yangyibiao\_tyut@sohu.com

**Yang Yibiao** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jinan University in 1987 and received his Ph. D. degree from Taiyuan University of Technology in 2009. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Taiyuan University of Technology. His main research interests include micro-nano sensing.