

# 热激励硅谐振梁压力传感器闭环数据采集系统\*

范兆岩 崔大付 陈德勇 高晓童

(中国科学院电子学研究所 传感技术国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 利用正反馈闭环谐振原理, 采用偏置交流激励、一倍频拾振的方法, 设计了闭环谐振电路和相应的数据采集电路, 并对该电路进行了综合调试. 实验结果表明, 该系统实现了该传感器频率信号的自动跟踪和信号转换, 以及快速、准确采集压力数据的功能, 采集频率范围为 30~ 100kHz, 频率采集精度为  $\pm 1\text{Hz}$ , 温度采集精度为  $0.03\text{ }^\circ\text{C}$ .

**关键词:** 硅梁; 数据采集系统; 闭环谐振

**EEACC:** 1290

**中图分类号:** TN43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2003)08-0866-05

## 1 引言

随着近几年 MEMS 技术的不断发展与完善, 传感器逐步趋向小型化和集成化. 其中, 硅微梁谐振式压力传感器以其体积小、精度高、频带宽、抗干扰能力强等优点, 在相关领域正逐渐取代传统的谐振筒、电容或压阻式传感器. 英国、日本、德国、荷兰等发达国家自 20 世纪 80 年代起开始研究高性能微谐振器, 至今英国采用静电激励和日本采用电磁激励的硅谐振式压力传感器已经投入规模化生产, 并大量应用于航空、航天、大气探测等领域<sup>[1,2]</sup>, 而采用热激励的硅谐振式压力传感器国外尚未研制成功. 相对于国外的成熟工艺和研究成果, 目前我国对这种新型传感器的研究尚处于起步阶段. 研制实用化的硅谐振式压力传感器不仅对发展我国航天、航空工业有重要应用价值, 而且在石油化工、医疗、环境等其他许多领域都有广泛的应用前景.

本实验室已经成功设计并研制了热激励硅谐振梁压力传感器. 该传感器已经成功通过了开环测试. 但是, 在实际工作条件下, 开环系统无法完成谐振频率的自动跟踪及实时温度监控等功能. 为此设计了

闭环数据采集系统, 其主要技术指标为: 采集频率范围为 30~ 100kHz, 频率采集精度为  $\pm 1\text{Hz}$ , 温度采集精度为  $0.03\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2 工作原理

### 2.1 传感器简介

谐振式压力传感器是一种以频率变化来反映外界压力变化的换能器. 在环境温度不变的条件下, 固支梁受迫振动时, 其固有频率仅与梁的物理结构和所受的轴向力有关<sup>[3]</sup>.

$$f = f_0(1 + \sigma/\sigma_c)^{1/2}$$

其中  $f_0$  为硅梁固有频率;  $\sigma$  为对梁施加的轴向力;  $\sigma_c$  为梁发生振动的临界欧拉应力.

本设计所采用的热激励谐振式传感器结构如图 1 所示. 铂电阻在梁中间位置进行周期性加热, 改变轴向应力. 当此频率接近梁本身的固有频率时, 硅梁发生谐振, 即梁中部振幅及梁根部应力都达到最大值. 沉积在梁根部的压敏电阻拾取机械振动频率, 同时, 可以通过梁附近的铂电阻监测传感器温度. 其扫描电镜照片如图 2 所示.

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69936010)

范兆岩 男, 1977 年出生, 研究生, 目前主要从事 MEMS 传感器的研究.

崔大付 男, 1941 年出生, 研究员, 博士研究生导师, 目前主要从事 MEMS 新型传感器及微系统的研究.

陈德勇 男, 1967 年出生, 研究员, 目前主要从事 MEMS 新型传感器及微系统的研究.

2002-09-16 收到, 2002-11-20 定稿

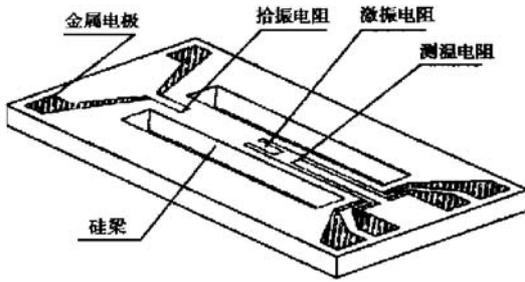


图1 硅梁传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of silicon beam sensor

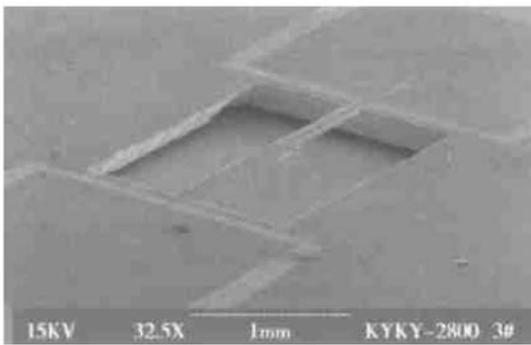


图2 硅梁谐振器扫描电镜照片

Fig. 2 SEM micrograph of the silicon beam resonator

该类传感器的自由谐振(梁不受外力作用时)频率为 30~90kHz, 拾振、激振、测温电阻阻值在 150Ω 左右<sup>[5]</sup>.

## 2.2 传感器闭环谐振原理

激振电压  $U_{in}$  可表示为直流分量  $U_{DC}$  和交流分量  $U_{AC}$  的矢量和<sup>[5]</sup>:

$$U_{in} = U_{DC} + U_{AC} \cos(\omega t) \quad (1)$$

因此对梁的加热功率可以表示为:

$$P = U_{in}^2 / R = P_{const} + P_{v1} + P_{v2} \quad (2)$$

其中:

$$P_{const} = (U_{DC}^2 + 0.5 U_{AC}^2) / R \quad (3)$$

$$P_{v1} = (2 U_{DC} U_{AC} \cos \omega t) / R \quad (4)$$

$$P_{v2} = (0.5 U_{AC}^2 \cos 2\omega t) / R \quad (5)$$

由热力学原理可知, 常值分量  $P_{const}$  使梁上产生恒定的温差分布场, 并使材料内部产生初始温度热应力, 此热应力可以由测量梁上固定点的温度计算得出. 一倍频分量  $P_{v1}$  和二倍频分量  $P_{v2}$  分别使硅梁沿轴向  $x$  产生交变温差分布场, 从而产生交变热应力:

$$\sigma_{v1} = E \alpha \Delta T_1(x, t) \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (6)$$

$$\sigma_{v2} = E \alpha \Delta T_2(x, t) \cos(2\omega t + \varphi_2) \quad (7)$$

式中  $E$  为硅梁材料的杨氏弹性模量;  $\alpha$  为热应变系数;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  为应力与输入信号之间的相移, 当传感器各结构参数确定时,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  也是确定的.

此交变应力使拾振电阻阻值产生变量  $\Delta R$ :

$$\Delta R = \beta R \sigma(x_0, t) \quad (8)$$

式中  $\beta$  为拾振电阻压力灵敏系数;  $R$  为拾振电阻平均阻值;  $x_0$  为压敏电阻相对硅梁的位置坐标. 结合公式(6)、(7)、(8)可以得出, 激振信号在拾振电阻上引起的一倍频和二倍频变量分别为:

$$\Delta R_{v1} = K_1 \cos(\omega t + \theta_1)$$

$$\Delta R_{v2} = K_2 \cos(2\omega t + \theta_2)$$

式中  $K_1$ 、 $K_2$  为归一化系数;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为信号相移. 当传感器各项物理参数和激振信号直流分量  $U_{DC}$  确定时, 以上四项均可视为常数. 因此, 通过检测拾振信号的一倍频或二倍频分量都可以得到硅梁的振动频率.

实验表明, 交流分量  $U_{AC}$  可通过拾振电阻-激振电阻之间的分布电容直接耦合至拾振端, 形成相当严重的干扰. 因此本设计采用拾取信号一倍频分量的方法. 由公式(4)和(5)可知: 当  $U_{DC} \gg U_{AC}$  时,  $P_{v1} \gg P_{v2}$ , 即可以通过适当减小激振信号中  $U_{AC}$ , 增加  $U_{DC}$  的方式降低二倍频分量, 同时有效地抑制了耦合干扰, 获得与激振信号同频的拾振信号<sup>[5]</sup>. 该信号经放大、滤波、移相后正反馈至激振源, 从而实现硅梁传感器的闭环谐振.

## 3 系统设计

热激励谐振式压力传感器闭环数据采集系统主要由闭环谐振电路和以 AT89s8252 单片机为核心的数据采集电路两部分组成, 其原理如图 3 所示.

### 3.1 闭环谐振电路设计

#### 3.1.1 激振源电路

如前所述, 为有效抑制机械振动的二倍频分量, 必须减小激振信号中的交流分量  $U_{AC}$ , 增大直流分量  $U_{DC}$ . 同时, 由公式(4)可知,  $U_{AC}$  的减小也会使一倍频振动减弱. 因此要得到足够清晰的拾振信号, 必须适当选取激振信号源的输出. 实验表明, 对于该类传感器, 当  $U_{DC} = 0.7V$ ,  $U_{AC} = 0.3 \sim 0.4V$  时, 在拾

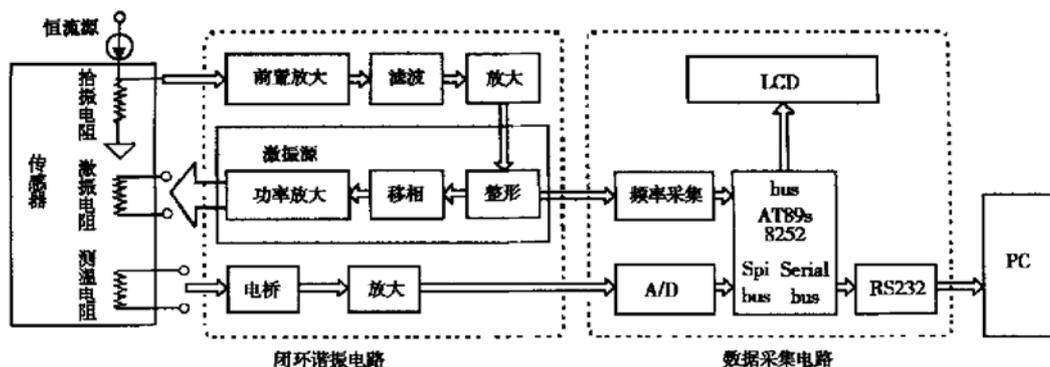


图3 闭环数据采集系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of close-loop data acquisition system

振端可以得到最佳的信噪比。其中，交流分量由拾振信号经滤波放大之后，由一级比例积分电路整形，再经一级相位补偿电路后获得；直流分量则直接由标准参考电源得到；二者由模拟加法器叠加后即成为激振信号。由于加热硅梁需要激振电阻中通过 10~20mA 电流，因此增加了一级放大电路以提高激振源的输出功率。

### 3.1.2 前置放大电路

传感器在开环激振时，可以得到 10~20μV 的拾振信号<sup>[6]</sup>。针对输入信号弱，频率较高(50kHz)的特点，前置放大器采取了三级晶体管级联电路。各级放大倍数分别为 20、10、10。其中，提高前级增益，有效地降低了晶体管内部噪声对信号的影响。为了避免电源对信号采集的干扰(主要来自激振和数字电路)，前置放大器与其他电路之间设置了两级电源隔离电路。拾振信号经此前置放大器后可放大至 10mV 量级，输出噪声小于 0.5mV。

### 3.1.3 滤波电路

本设计采用了无限增益多路反馈带通滤波器，如图 4 所示。其优点是：电路简单，降低了元件热噪声；特性稳定；Q 值灵敏度高。设计增益  $G = -2$ ，中心频率在 30~80kHz 可调，带宽为 50kHz。

## 3.2 数据采集电路设计

### 3.2.1 频率采集电路

硅微梁谐振式压力传感器具有很高的灵敏度，Q 值达 10000 以上，而传统的单片机软件计数方式往往无法同时满足高精度和高速计数的要求，为此设计了硬件频率采集电路，如图 5 所示。该电路由高速时钟计数器 82C54、JK 触发器 4027 及其他逻辑器件组成。其控制端口和数据/地址总线由单片机提

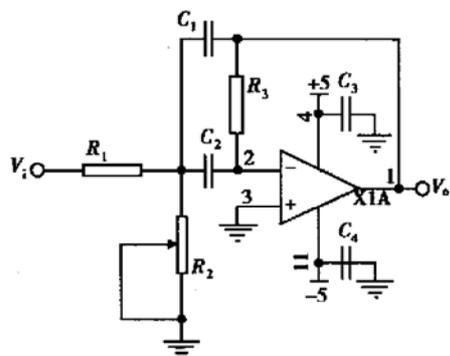


图4 滤波电路原理图

Fig.4 Filter circuit

供；标准时钟可根据计数的速度和精度选择相应的晶振。实际选用 2MHz 晶振，单数据采集时间不超过 0.4s。

频率采集电路工作时序如图 6 所示。首先单片机向 82C54 从总线输出待测频率方波下降沿个数  $C_1$ ，并由初始化脉冲写入计数器 1 缓存。当已启动计数，并且待测信号端出现第一个下降沿时同时开始计数器 1 和计数器 2，分别对待测信号和标准时钟进行计数；当计数器 1 记满溢出时，停止计数器 2，并向单片机发出中断请求信号。此时可以由单片机读出计数器 2 计数结果  $C_2$ 。已知标准时钟频率  $f_c$ ，可以计算待测信号频率  $f_s$ 。

$$f_s = f_c (C_1 / C_2)$$

理论误差：

$$\Delta f_{\max} = \frac{1}{|t_1 - t_2|_{\max}} = f_c / C_2 \quad (9)$$

由公式(9)可知，频率采集的最大误差仅由标准时钟频率  $f_c$  的精度和计数个数  $C_2$  决定，从而避免了单片机和其他外围电路对频率采集精度的影响。

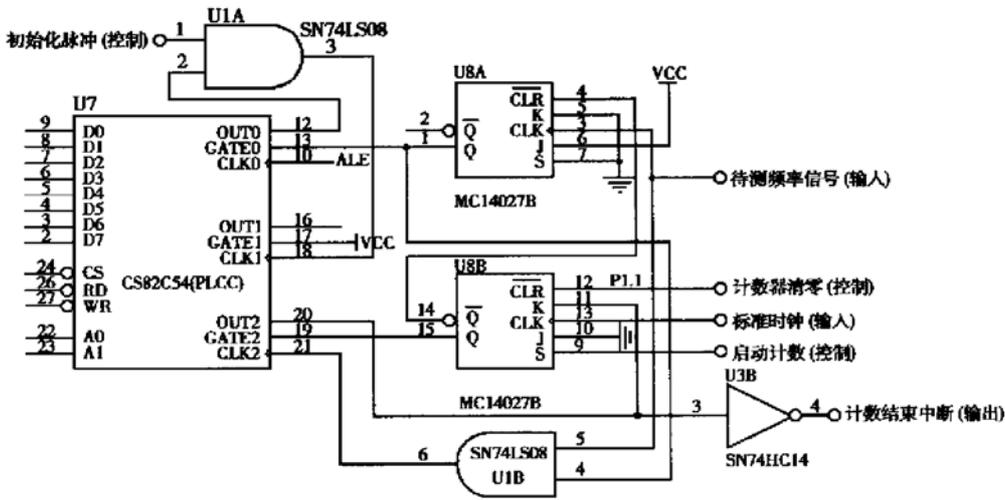


图 5 频率采集电路原理图

Fig. 5 Architecture of frequency collecting circuit

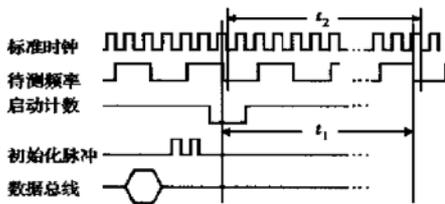


图 6 频率采集电路时序图

Fig. 6 Timing sequence of the frequency collecting circuit

### 3.2.2 温度采集电路(A/D转换电路)

温度信号的采样采用 MAXIM 公司的 MAX187,它是采用  $\Sigma\Delta$  结构的 12 位串行 A/D 转换器,片内提供 4.096V 标准电压源. MAX187 通过 SPI(串行外设接口)与单片机进行通信,只需要一个串行同步时钟和一个数据端口就可以实现 A/D 结果的传输.

### 3.2.3 数据处理及接口电路

单片机采用 ATMEL 公司的 AT89S8252,其指令系统与 MCS-51 完全兼容,片内带有 8kB Flash. 其硬件 SPI 接口可以直接与串行 A/D 通信,2kB 可读写 E<sup>2</sup>PROM 能够在线存储压力数据,以便得到更准确的拟合曲线.

频率采集电路的 20 位数据和温度采集电路的 12 位数据由单片机处理后,转换成相应的频率和温度信号,实时的显示在液晶屏上,同时,另一组数据从串行总线发送至外部 PC,用于长时间记录数据和分析结果.

## 4 实验结果

在监测温度恒定的条件下,对系统闭环输出频率随压力的敏感特性测试结果如图 7 所示. 采用激励信号直流偏置电压 1.1V、交流分量有效值 0.2V,在基频 82334.3Hz 时,谐振灵敏度 127.5Hz/Pa,响应时间 0.5s; 相同条件下开环系统灵敏度为 125.1Hz/Pa. 测试结果表明,系统输出频率对输入压力具有较高的灵敏度,并呈现了良好的直线对应关系.

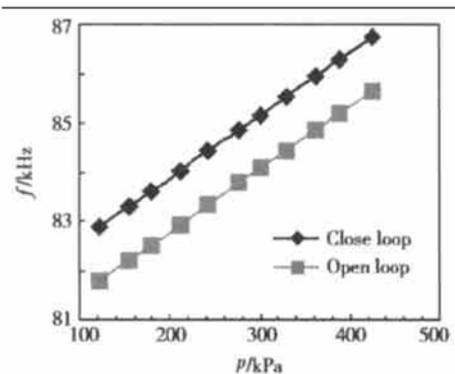


图 7 闭环及开环压力敏感特性

Fig. 7 Sensitivity of close loop and open loop

## 5 结论

利用正反馈闭环原理,针对热激励硅谐振梁传感器输出信号微弱,频率精度高的特点,设计并制作

了闭环信号采集系统. 该系统能够对谐振工作点 30 ~ 100kHz 的传感器输出信号进行自动跟踪, 总体响应时间 0.5s, 灵敏度 127.5Hz/Pa. 达到了预定的设计指标, 并为进一步改进传感器设计和提高性能创造了条件.

### 参考文献

- [ 1 ] Senturia S D. Simulation and design of microsystems: A 10-year perspective. *Sensors & Actuators A67*, 1988: 1
- [ 2 ] Cui Dafu, Han Jinghong. Resonant silicon micro-structure pressure sensor for space application. *Micro-Tech & Micro-Satellite*, 1997: 280 (in Chinese) [ 崔大付, 韩泾鸿. 空间用谐振式硅微结构压力传感器研制. *微小卫星应用微型技术*, 1997: 280]
- [ 3 ] Cui Dafu, Han Jinghong, Chen Deyong. Research of resonant beam pressure sensor. *Corpus of Micro-Electro Mechanical System*. Tsinghua University Press, 2000: 25 (in Chinese) [ 崔大付, 韩泾鸿, 陈德勇. 谐振梁式压力传感器研究. *微型机电系统文集*. 清华大学出版社, 2000: 25]
- [ 4 ] Chiao Mu, Lin Liwei. Self buckling of micromachined beams under resistive heating. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1): 146
- [ 5 ] Chen Deyong, Cui Dafu, Wang Li, et al. Thermally excited SiN beam resonant pressure sensor. *Proc SPIE* 2001, 4408: 548
- [ 6 ] Chen Deyong, Cui Dafu, Wang Li, et al. Research of thermally excited silicon beam resonator. *Chinese Journal of Electronics and Information*, 2001, 23(8): 752 (in Chinese) [ 陈德勇, 崔大付, 王利, 等. 热激励硅梁谐振器研究. *电子与信息学报*, 2001, 23(8): 752]

## Close Loop Data Acquisition System for Thermally Excited Resonant Microbeam Pressure Sensor\*

Fan Zhaoyan, Cui Dafu, Chen Deyong and Gao Xiaotong

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In order to meet the practicality of the thermally excited microbeam resonant pressure sensor, a close-loop data acquisition system is developed and reported. The close-loop resonance method is adopted to design the low-noise driver circuit and high-precision signal processing circuit. Automatic frequency adjustment and accurate data conversion are realized. The test indicates that the system can meet the requirement of resonant sensor with center frequency from 30kHz to 100kHz.

**Key words:** silicon microbeam; data acquisition system; close-loop resonance

**EEACC:** 1290

**Article ID:** 0253-4177(2003)08-0866-05

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69936010)

Fan Zhaoyan male, was born in 1977, MS candidate. His research interest focus on resonant beam sensors.

Cui Dafu male, was born in 1941, professor. His research interest is in the field of MEMS sensor and micro-system.

Chen Deyong male, was born in 1967, professor. His research subject is mainly about MEMS sensors.

Received 16 September 2002, revised manuscript received 20 November 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics