研究论文

谐振式压力传感器全温频率精度及压力输出稳定性研究

史　凯[1,2], 韩雨庐[1,2], 陈晓峰[1,2], 刘　华[1,2], 刘鑫宇[1,2]

(1. 陕西华燕航空仪表有限公司, 西安 710100; 2. 上海交通大学 集成电路学院与航空工业华燕智能航空传感协同创新联合实验室, 西安 710100)

摘要: 高精度谐振压力传感器的谐振频率较高(20~40 kHz), 芯体谐振频率的波动会影响压力输出精度, 且压力输出过程存在温度耦合效应, 需进行标定以提升全温区(−55~100 ℃)芯体谐振频率精度及压力输出稳定性。本文提出采用多层应力隔离结构实现芯体微型化集成, 有效隔离了温度变化引起的应力传递; 在传统谐振式压力传感器自激振荡电路基础上, 通过优化 C2V 电路, 显著提升了检测端信号的信噪比, 保障了传感器工作稳定性; 设计了基于频率方波计数的频率解析算法, 结合微控制单元(microcontroller unit, MCU)中断时序控制, 提高了频率解析精度; 同时建立了基于多元回归分析的压力解算模型, 在充分表征物理非线性的同时避免参数冗余, 确保了标定过程的数值稳定性与泛化能力, 并完成了最终压力输出精度评估。试验结果表明: 采用多层应力隔离结构封装硅谐振结构, 其尺寸和重量较金属封装样机缩小了 4/5 以上; 所设计的闭环控制电路使硅谐振结构实现了高频振荡并输出相应方波信号; 在 −55~100 ℃ 温区及 3.5~110 kPa 测量范围内, 频率输出最大偏差小于 0.14 Hz, 稳定性达到 0.02 Hz (RMS), 压力输出值与标准压力值的最大偏差小于 17 Pa, 压力解析精度达到 0.015 4%。

关键词: 谐振压力传感器; 应力隔离; 闭环控制; 压力测量

中图分类号: TH703　　**文献标志码:** A

DOI: 10.3724/jfmd.2604050　　CSTR: 32180.14.jfmd.2604050

Research on accuracy enhancement of pressure sensors based on stress-isolation packaging

SHI Kai[1,2], HAN Yulu[1,2], CHEN Xiaofeng[1,2], LIU Hua[1,2], LIU Xinyu[1,2]

(1. AVIC Shaanxi Hua Yan Aviation Instrument Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 2. SJTU IC-AVIC Huayan Intelligent Aviation Sensing joint Lab., Xi'an 710100, China)

Abstract: For high-precision resonant pressure sensors, the resonant frequency of the sensing element typically ranges from 20 kHz to 40 kHz. Minor fluctuations in this frequency can significantly affect pressure measurement accuracy, while temperature coupling further complicates the output, necessitating effective calibration. To enhance frequency accuracy and output stability over the full temperature range of −55 ℃ to 100 ℃, this paper proposes a miniaturized sensing element integrated with a multi-layer

收稿日期: 2026−04−16;　　**修订日期:** 2026−05−27

基金项目: 航空科学基金(No. 20240008198001)

作者简介: 史　凯(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为飞行器导航制导与控制研究工作(E-mail: sky20041130@163.com)

stress isolation structure, which effectively mitigates stress transmission induced by temperature variations. Building upon the conventional self-oscillating circuit for resonant pressure sensors, the C2V circuit is optimized to improve the signal-to-noise ratio at the detection end, thereby ensuring stable sensor operation. A frequency extraction algorithm based on square wave cycle counting is developed in conjunction with microcontroller unit (MCU) interrupt timing control to improve frequency resolution. Moreover, an online three-dimensional multi-order calibration model is established for pressure output to enable comprehensive accuracy evaluation. Experimental results demonstrate that the silicon resonant structure encapsulated with the multi-layer stress isolation structure achieves a reduction in both size and weight of more than 80% compared to a metal-packaged counterpart. The proposed closed-loop control circuit enables stable high-frequency oscillation and square wave generation. Over the temperature range of −55 ℃ to 100 ℃ and the pressure range of 3.5 kPa to 110 kPa, the maximum frequency output deviation is less than 0.14 Hz, with a stability of 0.02 Hz (RMS). The pressure output deviates from the reference value by less than 17 Pa, corresponding to a pressure measurement accuracy of 0.015 4%.

Key words: resonant pressure sensor; effective stress isolation; closed-loop control; pressure measurement

0 引言

压力传感器是将压力信号按特定规律转换为电信号的装置。微机电压力传感器基于微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术,根据工作原理可分为电容式[1-2]、压阻式[3-4]、压电式[5-6]和谐振式压力传感器[7-8]。其中,硅谐振压力传感器(resonant pressure sensor, RPS)是 MEMS 压力传感器中精度最高的类型之一[9-10]。表 1 展示了其与其他 MEMS 传感器的主要性能对比。硅谐振压力传感器具有体积小、精度高、线性度好及长期稳定性优异等特点,在航空航天、汽车电子及生物医学领域得到广泛应用[11]。

表 1 不同类型传感器对比

Table 1 Comparison of different types of sensors

类型	稳定性/(%/年)	精度/% FS	分辨率/10^{-6}	温度系数/(10^{-6} ℃$^{-1}$)
硅电容式	0.05~0.10	0.1	10~100	4
硅压阻式	0.1	0.1	10	1 600
硅谐振式	0.01	0.01	10	30

谐振式压力传感器以多晶硅为弹性体,采用先进 MEMS 工艺在硅片上加工硅谐振结构,并通过闭环控制电路驱动与检测谐振结构,从而实现压力测量[12]。硅谐振压力传感器基于敏感结构振动频率随压力变化的原理工作,对压力引起的结构微变形具有极高灵敏度。然而,结构微变形不仅源于外部压力,还可能受封装应力、温度应力等其他外部因素影响[13]。因此,降低外部因素对硅谐振结构的影响,对于提高测量精度至关重要。

为降低封装应力和温度应力,常规做法是将谐振结构粘接于较厚的金属基座。该方法虽能获得较好的温度特性,但金属壳体体积较大,导致传感器整体尺寸增加,难以实现多通道微型化集成,限制了其在尺寸和重量敏感场合(特别是微型化多通道领域)的应用。因此,在抑制外界干扰的同时实现硅谐振结构的微型化集成,成为该领域的重要研究方向。此外,鉴于硅谐振结构工作时处于高频振荡状态,设计简化的闭环控制电路以实现对谐振结构的有效控制,有利于促进微型化集成。

硅谐振压力传感器输出与压力呈特定关系的频率信号,频率解析精度是影响压力测量精关键因素。频率解析通常由微处理器读取规定时间内的频率信号(TTL 方波)数量来实现,该方法原理简单且易于实现。然而,由于谐振芯体具有高频谐振特性(几万至几十万赫兹),在规定时间内计数的方波数量可能非整数,从而引入偶发性频率误差。这导致传感器在长期工作中出现异常频率跳点,降低频率解析准确性,进而影响压力测量精度。

针对金属基座粘接硅谐振结构存在的尺寸大、质量重等问题,以及硅谐振结构的高频振荡控制难题,本文设计了简化的闭环控制电路,并采用自动

增益控制(automatic gain control, AGC)电路实现谐振体的稳幅振荡。通过多层应力隔离结构, 实现了硅谐振结构的闭环控制与微型化集成。同时, 选用高频晶振作为基准, 设计了基于特定数量频率信号耗时来求解谐振频率的方法, 并结合 MCU 中断时序控制, 有效避免了传统定时计数法引入的误差及中断冲突导致的解算延迟, 提高了频率信号解析精度。最后, 利用高精度频率信号对压力进行多项式补偿解算, 提升了压力传感器的测量精度。

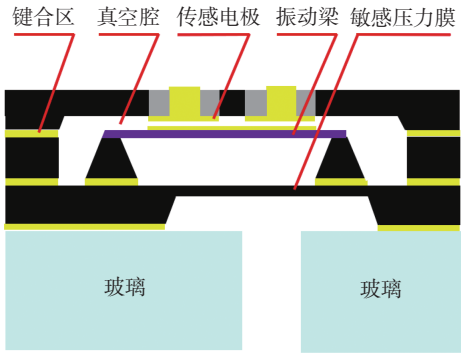


图 1　谐振压力传感器原理图

Fig. 1　Schematic diagram of a resonant pressure sensor

1　RPS 工作原理及芯体制备工艺

1.1　RPS 工作原理

谐振式压力传感器主要由谐振器、敏感膜片和信号调理电路三部分组成。其工作原理基于敏感体支撑梁的谐振频率变化: 敏感体作为压力敏感膜, 在外部压力作用下发生变形, 引起与之固连的支撑梁变形, 从而导致梁的谐振频率发生变化[14]。典型的谐振式压力传感器结构如图 1 所示, 主要由支撑梁、压力敏感膜和信号传感器等组成。其中, 支撑梁一侧与压力敏感膜固连, 另一端固定。

敏感膜与支撑梁等结构在真空环境下封装。当敏感膜承受压力应力变化时, 其形变带动支撑梁产生转动, 导致支撑梁谐振频率改变, 进而引起传感器输出信号的变化。通过测量该信号并解算谐振频率的变化, 即可获取压力信息。鉴于低功耗及易与互补金属-氧化物-半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺兼容的特性, 设计了基于平衡振动原理的硅基高 Q 值谐振器。芯体与电路之间采用静电驱动和电容检测原理进行连接, 谐振式压力传感器系统如图 2 所示。

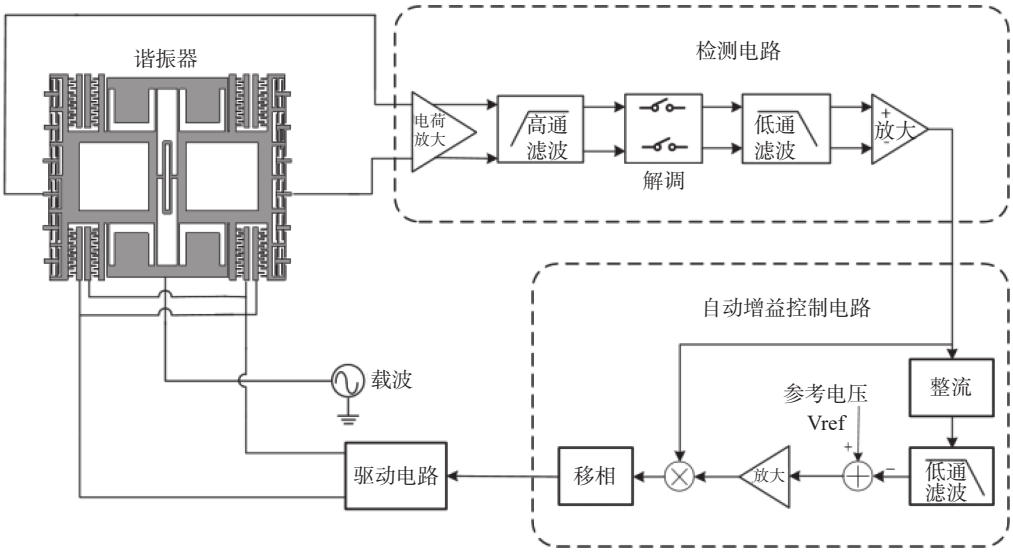


图 2　硅微谐振式压力传感器系统框图

Fig. 2　System block diagram of the silicon micro-resonant pressure sensor

以谐振体为设计原型, 基于 SOI (silicon on insulator)工艺, 在 CoventorWare 中建立材料库与工艺库并完成版图设计, 生成谐振器的网格划分模型, 如图 3 所示。

利用 MemMech 工具对谐振器进行了前五阶模态分析, 结果如图 4 和表 2 所示。

结果表明, 第 4 阶振动模态为面内振动, 即期望模态, 其谐振频率为 38.164 4 kHz。相邻模态的谐振频率分别为 32.793 8 kHz 和 46.736 1 kHz, 均不与期望模态的谐振频率呈整数倍关系, 且频率间隔

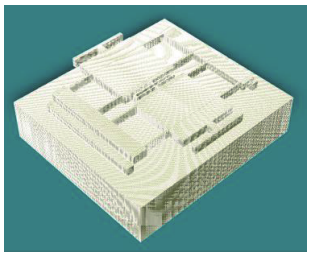


图 3　谐振器模型

Fig. 3　Resonator model

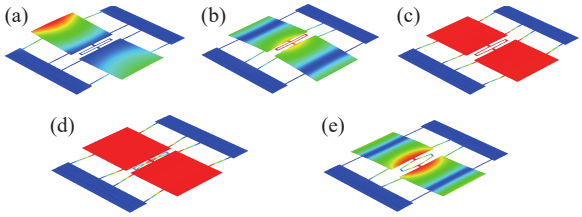


图 4　谐振器(a)~(e)前 5 阶振动模态仿真图

Fig. 4　Simulation diagrams of (a) - (e) the first five vibration modes of the resonator

表 2　谐振器前 5 阶模态谐振频率

Table 2　Resonant frequencies of the first five modes of the resonator

模态	谐振频率/kHz
1	26.166 3
2	29.496 3
3	32.793 8
4	38.164 4
5	46.736 1

较大，符合设计规避要求。

利用 ElecMech 工具对谐振器进行梳齿电容分析，仿真结果显示，当振幅为 0.1 μm 时，差动检测电容的总变化量为 3.5 fF。

1.2　硅谐振压力芯体工艺流程

谐振压力传感芯体基于 SOI 硅片制备，可有效简化工艺步骤，降低工艺难度并提高成品率。利用 SOI 硅片的器件层制作谐振器和梳齿电极结构，氧化层制作支撑柱，基底层制作压力敏感膜片和边框。本次流片采用的 SOI 硅片规格参数如表 3 所示。其中，氧化层厚度为 4 μm，较厚的氧化层可避免压力作用下压力敏感膜片与谐振器之间的间隙过小；器件层厚度选用 50 μm；基底层选用 400 μm，以减小封装应力对压力膜片的影响。

表 3　SOI 硅片参数

Table 3　SOI wafer parameters

参数	器件层	基底层
厚度	(50±0.5)μm	(400±3)μm
晶向	<100>	<100>
掺杂类型	P	P
电阻率	0.01~0.02	0.01~0.02

基于 SOI 工艺进行器件制备。首先，采用 DRIE (deep reactive ion etching)刻蚀器件层以形成谐振结构和梳齿电极，并利用氢氟酸腐蚀氧化层以释放谐振器；随后，通过 DRIE 刻蚀基底层形成压力敏感膜片。主要工艺流程如图 5 所示，具体步骤简述如下。

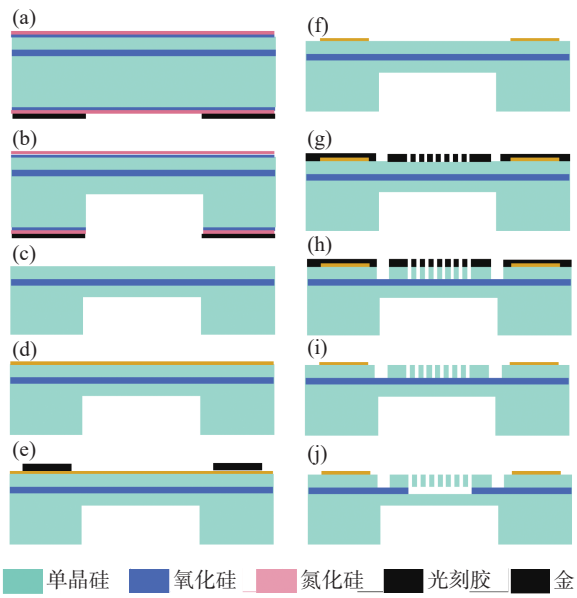


图 5　谐振压力传感器工艺流程。(a)背腔光刻；(b)背腔刻蚀；(c)去胶及清洗；(d)镀膜；(e)光刻；(f)金属刻蚀；(g)光刻；(h)器件层刻蚀；(i)去胶及清洗；(j)器件层释放

Fig. 5　Process flow of the resonant pressure sensor. (a) Back-cavity photolithography; (b) back-cavity etching; (c) photoresist removal and cleaning; (d) film deposition; (e) photolithography; (f) metal etching; (g) photolithography; (h) device-layer etching; (i) photoresist removal and cleaning; (j) device-layer release

(1)前处理：确认 SOI 规格后，使用硫酸溶液去除表面有机污染物，经去离子水清洗后，再用氢氟酸溶液去除硅片表面的原生氧化层。接着，在 SOI 硅片表面热氧化生成 300 nm 氧化硅层，并采用低压化学气相沉积法沉积 150 nm 氮化硅，作为湿法刻蚀掩膜。

(2)背腔光刻: 在硅片背面进行光刻, 随后利用干法刻蚀图案化氮化硅层, 并采用 BHF(buffered hydrofluoric acid)选择性腐蚀氧化硅, 从而形成背腔释放窗口。

(3)背腔刻蚀: 采用 TMAH(tetramethylammonium hydroxide)进行背腔湿法刻蚀, 目标深度为 360 μm。最后, 使用 40% HF 溶液去除 SOI 表面的氧化层和氮化硅, 并利用台阶仪检测背腔刻蚀深度。

(4)金属镀膜: 采用物理气相沉积(PVD)技术, 在硅片器件层表面依次溅射 10 nm 铬层和 100 nm 金层。

(5)金属层光刻: 在器件层表面涂覆光刻胶, 经显影后形成图形化光刻胶, 将其作为后续金属刻蚀的掩膜。

(6)金属刻蚀: 以光刻胶为掩膜, 分别使用金腐蚀液和铬腐蚀液对金属层进行湿法刻蚀。刻蚀完成后, 经清洗获得由金属构成的焊盘结构。

(7)器件层光刻: 在硅片器件层表面进行光刻, 显影后形成图形化光刻胶, 作为器件层刻蚀的掩膜。

(8)器件层刻蚀: 以光刻胶为掩膜刻蚀器件层, 直至暴露出中间氧化层, 并使用绝缘测试仪验证器件层刻蚀是否完成。

(9)去胶及清洗: 利用去胶机去除器件层表面的残留光刻胶, 并对硅片表面进行彻底清洗。

(10)器件层释放: 将硅片浸泡于氢氟酸溶液中以释放器件层。释放时间需严格控制, 既要保证传感器质量块完全释放, 又要避免支撑柱被过度腐蚀。释放完成后, 形成可动谐振器结构。

完成谐振器工艺后, 进行硅-玻璃键合, 最终完成谐振式压力芯体的制备。加工后的芯体如图 6 所示。

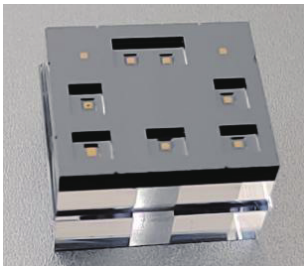


图 6　谐振式压力芯体

Fig. 6　Resonant pressure sensing element

2　应力隔离结构

实际应用中, 传感器通过胶粘剂固定于载体基板, 载体材料通常为 PCB 或陶瓷。根据表 4 数据可知, PCB、陶瓷及胶粘剂的热膨胀系数均显著大于单晶硅[15-18]。在相同温度变化条件下, 载体基板的形变量将远大于单晶硅元件。图 7 直观展示了不同工况条件下梁结构的形变对比情况。

表 4　材料特性[15–18]

Table 4　Material properties[15–18]

材料特性	单晶硅	硼磷硅玻璃	316L 不锈钢	PCB材料(FR4)
弹性模量/GPa	170	55	195	11
泊松比	0.28	0.25	0.3	0.3
热膨胀系数/(10^{-6} ℃$^{-1}$)	2.6	2.8	10.4	50~70

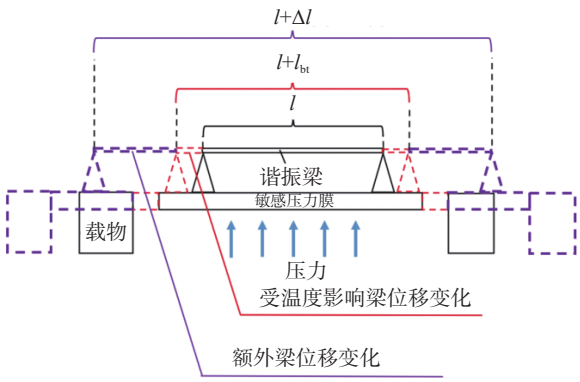


图 7　梁结构形变对比

Fig. 7　Comparison of beam structure deformation

鉴于谐振器设计振幅较小, 后续分析忽略非线性影响。假设压力恒定, l 为温度 T_0 下梁的初始长度。当温度由 T_0 变化至 T_1 时, 受硅材料热膨胀特性影响, 梁产生 l_{bt} 的热变形量。此时, 梁的谐振频率[19]可表示为:

$$f_{l_{bt}} = 1.028\sqrt{\frac{E}{\rho}\cdot\frac{b}{(l+l_{bt})^2}} = \left(\frac{l}{l+l_{bt}}\right)^2 f_0 \tag{1}$$

式中, E 为材料杨氏模量, ρ 为材料密度, b 为梁宽。由式(1)可知, 梁的谐振频率随温度变化而改变。其中, l_{bt} 表征硅材料自身的热膨胀特性。由于 l_{bt} 数值极小, l_{bt} 其影响已处于理论最优状态。同理, 当温度发生相同变化(从 T_0 至 T_1)时, 在传统安装方式下, 芯体焊接于 PCB 载体基板。鉴于 PCB 材料具有更大的热膨胀系数, 其产生的热形变量约为

l_{bt} 的 20~30 倍。在此条件下，梁在相同温变环境中的谐振频率为：

$$f_{l_{tc}} = 1.028\sqrt{\frac{E}{\rho}\cdot\frac{b}{(l+\Delta l)^2}} \tag{2}$$

$$f_{l_{tc}} = \left(\frac{l+l_{bt}}{l+\Delta l}\right)^2 f_{l_{bt}} = \left(\frac{l}{l+\Delta l}\right)^2 f_0 \tag{3}$$

式中，Δl为梁结构固连于 PCB 基板时的整体形变。由式(3)可知，载体基板的形变会导致梁的谐振频率发生改变。当>>l_{bt}时，由 PCB 载体基板引入的热形变成为影响谐振频率精度的主要因素，必须采取有效措施予以消除。

基于上述分析，降低 PCB 载体基板形变对梁的影响是提高压力谐振传感器精度的有效途径。为此，设计了一种如图 8 所示的应力隔离结构，该结构包含防护盖、接线柱、RPS 芯体、电子元件、PCB 载体基板、隔离板和通气孔。

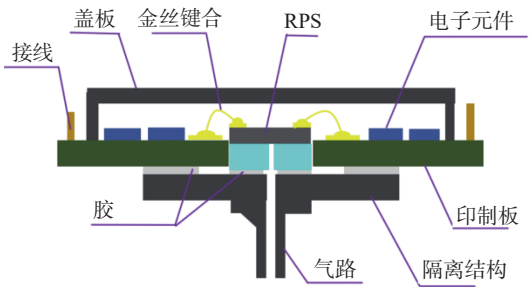


图 8　谐振压力传感器应力隔离结构

Fig. 8　Stress isolation structure of the resonant pressure sensor

该结构不仅能有效隔离温度应力，为硅谐振结构提供可靠的工作环境，还实现了硅谐振结构的微型化集成。

隔离结构的具体安装方式如图 9(a)所示。RPS 芯体与 PCB 载体基板非接触，通过金线键合实现电气互联，芯体粘接于 316L 不锈钢隔离板上。

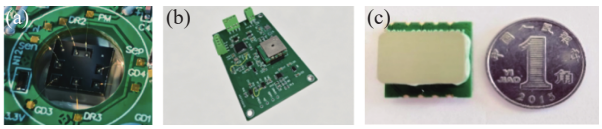


图 9　隔离模块结构。(a)内部金丝键合；(b)闭环控制电路；(c)隔离结构模块外形

Fig. 9　Structure of the isolation module. (a) Internal gold wire bonding; (b) closed-loop control circuit; (c) outline of the isolation module structure

如图 9(b)所示，隔离板与芯体气路互通。该结构能有效隔离 PCB 板的热应力，且其热变形系数极低，对谐振梁频率的影响可忽略不计。当温度变化时，RPS 芯体模块仅受本体热变形影响，结合补偿算法可实现高精度测量。此外，铝制防护盖可为内部元件提供安全稳定的工作环境，如图 9(c)所示。

闭环控制电路的电子元件焊接在另一块 PCB 板上，包括微控制器、运算放大器、电阻、电容以及隔离模块结构，如图 9(b)所示。RPS 传感器模块与闭环控制电路通过排针支撑方式连接，以进一步隔离外部应力。

3　硅谐振结构控制电路

硅谐振压力传感器工作时采用闭环自激振荡电路，将硅谐振结构驱动至高频振荡状态，再通过信号提取电路获取与压力相关的方波频率信号。控制电路原理框图如图 10 所示。其中，幅值检测电路与压控增益放大器构成 AGC 自动增益控制回路。幅值检测利用半波整流和低通滤波电路将交流信号转换为直流信号，并作为压控增益放大器的负反馈信号，使环路增益始终维持为 1，从而确保硅谐振结构的等幅稳定振荡。同时，频率提取电路将硅谐振结构的输出信号转换为方波信号，最后利用最小二乘法对频率、压力和温度进行拟合，从而解算出实测压力值。

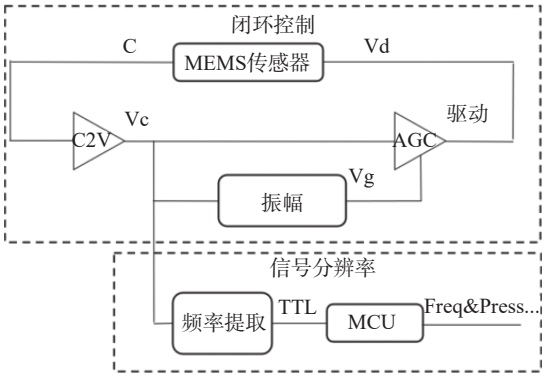


图 10　控制电路原理图

Fig. 10　Schematic diagram of the control circuit

C2V 电路是硅谐振结构信号检测的关键环节。本文在传统 MEMS 谐振压力传感器自激振荡电路的基础上，对 C2V 电路进行了优化。由于谐振压力传感器的检测端采用电容结构，具有极高阻抗和极微弱输出信号的特点，因此后端 C2V 电路需具备较高带宽，通常至少为谐振信号频率的十倍；同时，C2V 电路需具有极低的噪声密度，要求低于

20 nV·Hz^{-1}。此外，电荷放大器需具备 nA 级以下的输入偏置电流，以防止高阻抗节点上的电荷快速泄漏，进而影响传感器品质因数，导致自激振荡幅度衰减或频率漂移。经优化后，电路整体噪声密度进一步降低。电路仿真结果显示，在 1.2 MHz 处的等效输入噪声约为 10 nV·Hz^{-1}，如图 11 所示。

C2V 电路采用的运放输入偏置电流达 pA 级，具备极高输入阻抗，特别适用于 MEMS 电容式传感器。上述优化显著提升了电荷放大器的信噪比（SNR），使振荡波形更纯净、谐振更稳定，从而提高了频率测量精度。此外，电路优化进一步减少了自激振荡电路中的分立器件数量：由优化前的 11 个降至优化后的 4 个。

在闭环自激振荡电路中，硅谐振结构的输出信号 *S*+和 *S*-输入至 C2V 电路，转换为电压信号 out$_{12}$；经半波整流和低通滤波处理后，得到整流信号 out$_{13}$。

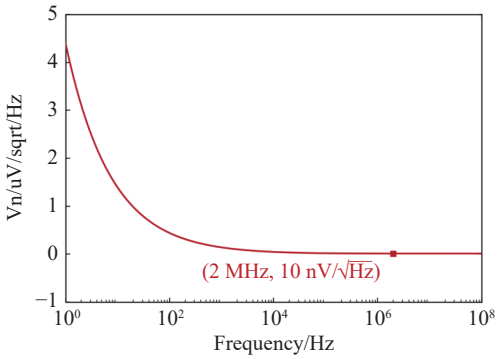


图 11　电荷放大器等效输入噪声仿真结果

Fig. 11　Simulation results of the equivalent input noise of the charge amplifier

场效应管在 out$_{12}$ 和 out$_{13}$ 电压的共同作用下工作于可变电阻区，作为 AGC 电路的输入电阻，与反馈电阻 R_{14} 共同调节 AGC 增益，最终输出 out$_{15}$ 作为硅谐振结构的驱动信号，实现其等幅稳定振荡，如图 12 所示。

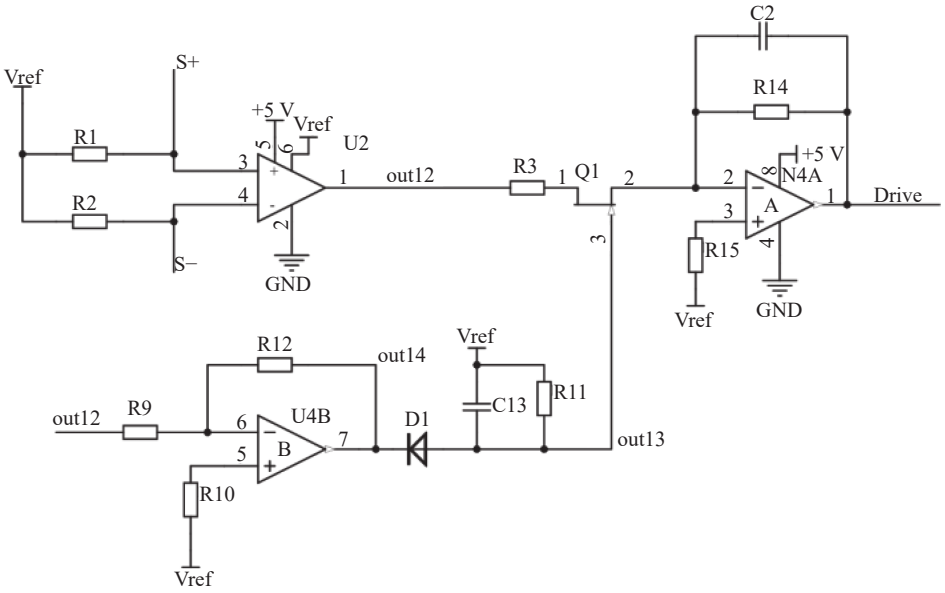


图 12　闭环控制电路图

Fig. 12　Closed-loop control circuit diagram

为验证闭环系统的工作状态，需对传感器电路与谐振器结构进行联合仿真。由于谐振器属于机械结构，无法在 Cadence 中直接建立机械模型以进行机电联合仿真，因此需先将其等效为相应的电模型。谐振器可近似为二阶线性系统，而在电路中可利用电阻-电感-电容（RLC）网络构建类似的二阶线性系统。如图 13 所示，通过设置合适的参数，即可建立谐振器的等效模型。

对谐振器模型与电路进行联合仿真，利用电源

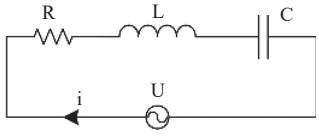


图 13　RLC 串联系统

Fig. 13　RLC series system

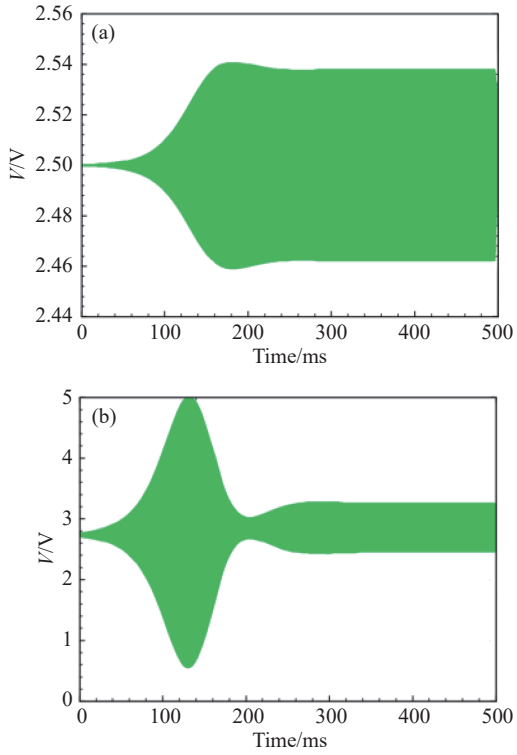


图 14　瞬态仿真结果。(a)C2V 电路输出波形;(b)AGC 驱动放大器输出波形

Fig. 14　Transient simulation results. (a) Output waveform of the C2V circuit; (b) output waveform of the AGC drive amplifier

阶跃电压激励系统起振,瞬态仿真结果如图 14 所示,分别为 C2V 电路输出信号波形和 AGC 驱动放大器输出信号波形。结果表明,传感器闭环系统在电源阶跃电压作用下能正常起振并维持稳定振动;驱动信号在起振瞬间振幅较大,但处于放大器输出摆幅范围内。检测电路输出信号幅值约为 40 mV,与设计值相符。

4　频率信号解析算法

频率信号是大气数据解算的基础,其准确性与稳定性直接决定解算精度。频率信号采集由 STM32F103 MCU 实现。频率测量的基本原理是统计一定数量的脉冲数 N 所对应的时间 t,进而解算单位脉冲周期 T_1,最终获得脉冲频率。为满足高频采集的实时性要求,软件采用双中断架构。利用 STM32 定时器的计数器模式,将被测信号作为外部时钟源输入。测量过程中,当定时器计数值达到 N 时触发中断,读取滴答定时器计数寄存器的数值以计算时间 t。

$$t = T_{\mathrm{SysTick}} \Delta_{\mathrm{sysval}} \tag{4}$$

$$f = \frac{1}{T} = N/t \tag{5}$$

式中,T 为滴答定时器的时钟周期,Δ_{sysval} 为计数期内 Systick 的被测频率变化量。频率解算的软件逻辑如图 15 所示。

多路传感器的频率信号通过不同频率的计数器采集。尽管各传感器频率各异,但在实际运行中,不同计数器可能在某一时刻同时触发中断,引发中断竞争,导致部分计数器中断等待,进而引起频率输出跳变。因此,在频率解析算法设计中,需对不同计数器的中断时序进行合理规划,以规避不同功能中断间的竞争冲突。

硅谐振压力传感器的压力值基于不同压力下的频率值解算得出。利用全温、全压条件下的样机频率值及对应温度数据,采用多项式拟合方法可求解压力值。硅谐振压力传感器的频率输出 f 与待测压力 P 之间呈现复杂的非线性关系,且该非线性特性受温度 T 的显著调制。为准确描述这种耦

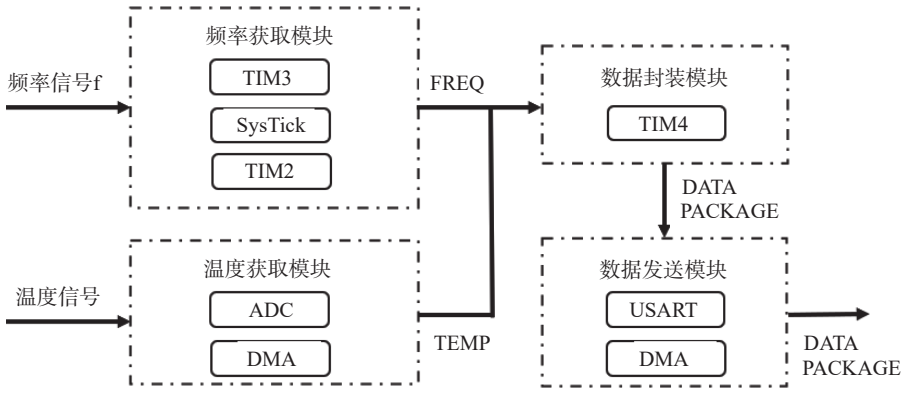


图 15　频率信号解析逻辑图

Fig. 15　Logic diagram for frequency signal analysis

合非线性, 本文采用多元回归分析方法建立压力解算模型, 构建以 f 和 T 为自变量、P 为因变量的多项式模型, 其矩阵形式如下:

$$P=\begin{bmatrix}1 & f & f^2\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{03} & p_{04}\\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0\\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & 0 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1\\ T\\ T^2\\ T^3\\ T^4\end{bmatrix} \tag{6}$$

等价于:

$$P=p_0+p_1\cdot \mathrm{X}_1(f,T)+p_2\cdot \mathrm{X}_2(f,T)+\cdots+p_m\cdot \mathrm{X}_m(f,T) \tag{7}$$

式中: P 为压力, 单位为 kPa; f 为频率输出, 单位为 Hz; T 为温度输出, 单位为 LSB; p 为解算系数; X 为关于频率和温度的确定基函数。

基于实际测量的频率和温度数据, 构建残差平方和目标函数 S:

$$S(p)=\sum_{i=1}^{n}(P_i-\hat{P}_i)^2=\|P-\mathrm{X}p\|_2^2 \tag{8}$$

对 p 求导并令导数为零, 可得正规方程:

$$\mathrm{X}^{\mathrm{T}}\mathrm{X}p=\mathrm{X}^{\mathrm{T}}P \tag{9}$$

当$\mathrm{X}^{\mathrm{T}}\mathrm{X}$可逆时, 可直接获得解析解:

$$\hat{p}=(\mathrm{X}^{\mathrm{T}}\mathrm{X})^{-1}\mathrm{X}^{\mathrm{T}}P \tag{10}$$

根据实测频率和温度解算出系数 p 后, 即可解算出压力输出。该模型中 f 的最高幂次取为 2, T 的最高幂次取为 4。这是因为 RPS 的压力-频率响应在量程内主要表现为近似二次非线性, 二次项足以捕捉其主要弯曲特征, 而更高阶项对精度提升有限且易引入过拟合。同时, 将 T 的最高幂次扩展至 4 次, 是因为温度对传感器特性的影响较为复杂, 弹性模量温度系数、热应力释放及封装滞回效应等因素会导致压力灵敏度随温度变化呈现三阶或四阶非线性漂移。交叉项(fT, f^2T, fT^2, f^2T^2, fT^3)用于描述温度对频率-压力曲线斜率及曲率的非线性调制作用。通过将 f 的幂次限制为 2、T 的幂次提升至 4, 模型在充分表达物理非线性的同时避免了参数冗余, 保证了标定过程的数值稳定性。基于全温全压范围内采集的样机频率与温度数据, 利用最小二乘法求解系数矩阵 p_{ij}, 即可获得能够在宽温工作范围内精确拟合真实压力输出的多元回归模型。该方法有效避免了因欠拟合导致的系统误差, 提升了压力解算在全温区内的精度与一致性。

5　实验验证

5.1　闭环控制电路方波输出

利用多层隔离结构的硅谐振封装体及文中设计的简化闭环控制电路, 研制了具备频率解析和压力解析功能的大气压力传感器测试样机。测试样机外形如图 16 所示。通电测量硅谐振结构的输出信号及频率方波信号, 方波信号幅值为 0~5 V, 占空比为 50%。如图 17 所示, 通道 1 的频率为 30.281 kHz; 如图 18 所示, 通道 2 的频率为 30.1392 kHz。频率方波输出的稳定性证明了文中设计的闭环控制电路的有效性。

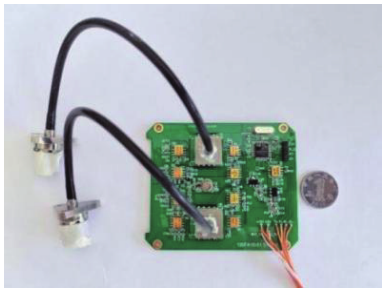


图 16　大气压力传感器
Fig. 16　Atmospheric pressure sensor

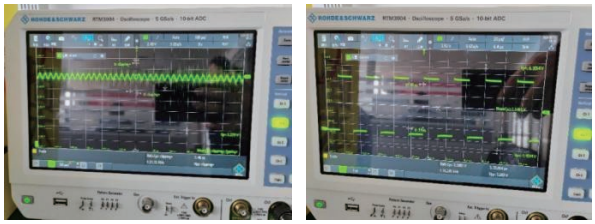


图 17　通道 1 输出
Fig. 17　Channel 1 output

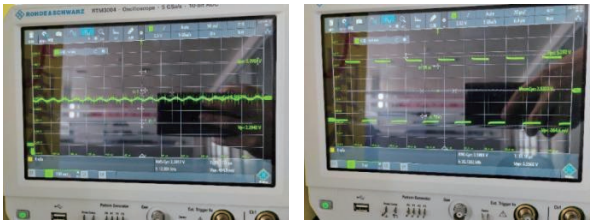


图 18　通道 2 输出
Fig. 18　Channel 2 output

5.2　频率输出测试

试验设备包括大气模拟机和高低温试验箱等。大气模拟机通过气管与样机连接, 为样机提供标准

输入气压，测试系统如图 19 所示。在 25 ℃ 环境下，将样机与大气模拟机相连，由大气模拟机提供标准气压输入，通电测试样机在长时间工作条件下的频率解析稳定性。

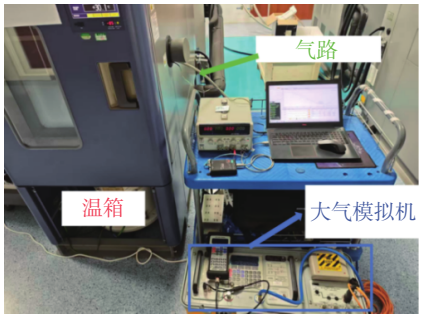


图 19　测试平台

Fig. 19　Test platform

在温度与标准气压输入稳定的条件下，频率 1 和频率 2 的输出分别如图 20 和图 21 所示。结果显示，频率 1 输出的跳变小于 0.14 Hz(峰峰值)，标准差为 0.03 Hz；频率 2 输出的跳变小于 0.04 Hz(峰峰值)，标准差为 0.02 Hz。

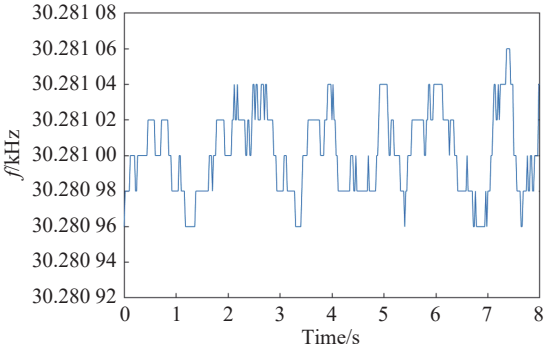


图 20　通道 1 在稳定状态下的频率数据

Fig. 20 Frequency data for Channel 1 under steady-state conditions

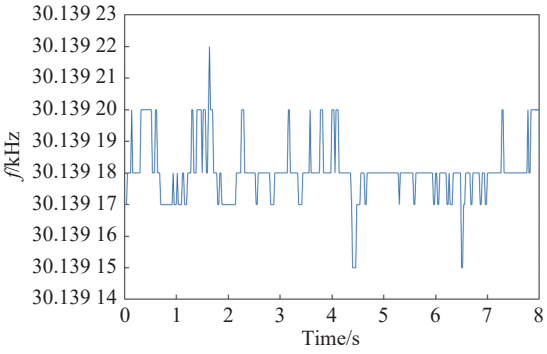


图 21　通道 2 在稳态下的频率数据

Fig. 21 Frequency data for channel 2 under steady-state conditions

在 25 ℃ 条件下，对样机进行连续气压变化频率动态响应测试。大气模拟机输入压力变化速率为 20 kPa·min^{-1}，到达目标气压点后稳定输出 5 min，测试结果如图 22 所示。全频率范围内，频率跳变小于 0.1 Hz。

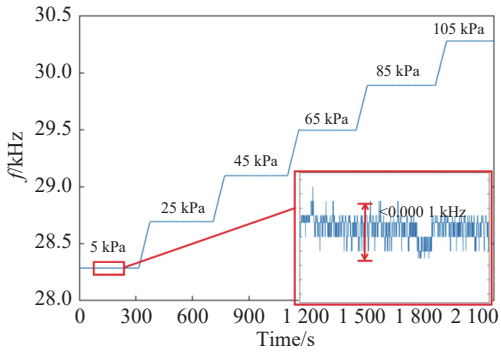


图 22　连续气压变化频率的动态响应

Fig. 22　Pressure-frequency dynamic response

在 25 ℃ 及标准气压的稳定输入条件下，对样机进行了 1 h 的频率稳定性测试，艾伦方差结果如图 23 所示。由图 23 可知，在恒定压力下，样机的短期噪声以白噪声为主，易于通过平均化抑制；在 τ=127.82 s 处，偏置不稳定性达到最小值 1.014×10^{-6} kHz，表明其长期稳定性较好。

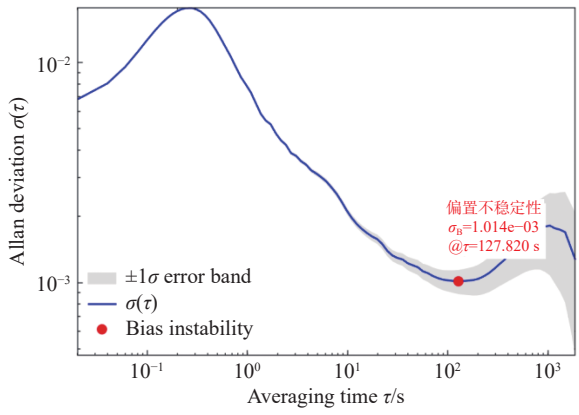


图 23　1 h 艾伦方差测试

Fig. 23　One-hour Allan deviation test

5.3　压力测试实验

频率解析精度试验考核样机在不同温度范围、不同气压条件下的频率输出精度。测试温度范围为−55~100 ℃，范围内每间隔 20 ℃ 作为一个温度

测试点, 如表 5 所示。气压范围为 4~110 kPa。

表 5　测试温度点设置

Table 5　Test temperature point settings

测试点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
温度/℃	−55	−35	−15	5	25	45	65	85	100

样机置于高低温箱内, 并与大气模拟机输出气管相连。试验时, 在全温范围内的各温度测试点, 由大气模拟机向样机施加对应的气压值, 每个测试点连续采集 10 s 数据并取均值, 作为该气压点的输出值。基于前述频率测试结果, 利用式(7)进行压力解算, 全温范围内的压力拟合曲面如图 24 所示。该拟合曲面直观展示了压力解算模型 $P = X(f,T)$ 在三维空间中的形态, 反映了压力与频率、温度之间复杂的耦合非线性关系, 从而可解算出任意频率和温度组合对应的压力值。分析表明, 补偿曲面内的压力输出与标准压力值之间的最大误差为 17 Pa, 精度达到 0.015 4%, 拟合误差分布如图 25 所示。其中, 实测输出与标准压力之间的最大偏差出现在-55 ℃、3.5 kPa 处, 主要归因于 MEMS 工艺的微小误差及测试环境的微小波动。

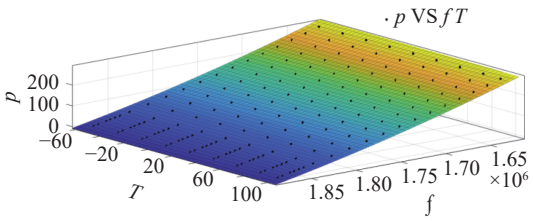


图 24　全温全量程压力解算拟合曲面

Fig. 24 Fitted surface for pressure calculation across the full temperature and pressure ranges

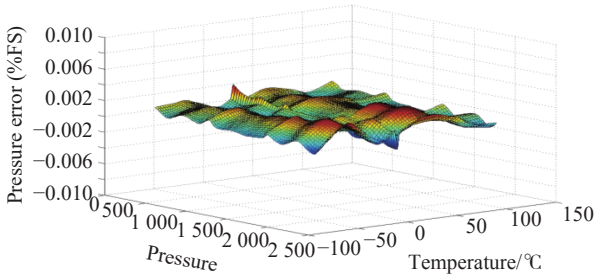


图 25　全温全量程压力解算拟合误差

Fig. 25 Fitting error of pressure calculation across the full temperature and pressure ranges

传统 RPS 芯体的安装方式与隔离结构设计直接影响梁的谐振频率。由于压力信号需经温度、频率与实际输入压力的三维标定获取, 因此评估隔离结构的实际效果需基于全温三维标定结果, 并与实际输入压力进行对比。对比样机采用前期制备的无隔离结构方案, 其中 RPS 芯体直接与 PCB 载体基板固连, 如图 26 所示。隔离结构应用前后与实际输入压力的对比数据见表 6。

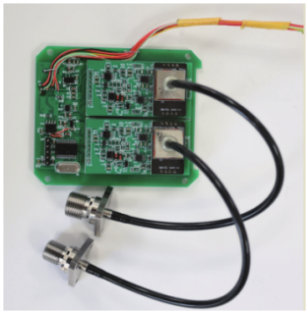


图 26　无隔离结构样机

Fig. 26 Prototype without isolation structure

表 6　隔离结构压力输出与传统安装芯体压力输出对比

Table 6 Comparison of pressure output between the isolated structure and the conventionally mounted sensing element

压力/kPa	隔离结构样机			无隔离结构样机		
	85 ℃	25 ℃	−45 ℃	85 ℃	25 ℃	−45 ℃
110	110.012	110.002	109.993	110.035	110.017	109.978
70	70.007	70.001	69.997	70.034	70.018	69.980
30	29.994	29.996	29.990	30.027	30.021	29.964
5	5.011	5.008	4.988	5.040	5.013	4.959

统计结果显示, 隔离结构样机在全温、全压测试范围内, 全量程压力误差≤0.02% (F.S.), 且无明显趋势性偏移; 而无隔离结构样机在高温和低温环境下的误差显著增大, 全量程压力误差约为 0.05% (F.S.)。

6　结论

谐振式压力传感器凭借高精度和高稳定性, 在航空航天领域应用广泛。本文设计了谐振式压力传感器芯体及流片工艺, 并在此基础上设计了闭环控制电路, 系统研究了谐振压力传感器的全温频率输出特性及稳定性。主要结论如下:

(1)提出了一种多层应力隔离结构, 能有效隔离并吸收 PCB 板与安装基体间的热应力。该结构

载体热变形系数极低，对谐振梁频率的影响可忽略不计，且体积和重量减小至金属封装的 1/5 以下。

（2）优化了传统 C2V 电路，进一步降低了电路整体噪声密度。在 1.2 MHz 处，等效输入噪声约为 10 nV/√Hz，输入偏置电流达到 pA 级，使芯体谐振波形更纯净、振荡更稳定，从而提高了频率测量精度。所设计的闭环控制电路实现了芯体的高频振荡，并输出了稳定的方波信号。

（3）采用多元回归分析方法建立了压力输出解算模型，准确描述了频率与温度的耦合特性。通过将 f 的幂次限制为 2、T 的幂次提升至 4，该模型在充分表达物理非线性的同时避免了参数冗余，保证了标定过程的数值稳定性与泛化能力，提升了全温区内压力解算的精度与一致性。

试验结果表明：在全温、全量程范围内，样机压力输出与标准输入压力的最大偏差＜17 Pa，综合精度达到 0.0154%，实现了压力信号的高精度测量，为航空航天领域高稳定性、全温一致性的工程化应用奠定了理论基础。

参考文献：

[1] 曹海燕, 王慧慧, 赵鹤然, 等. 电容式压力传感器的设计和仿真分析 [J]. 传感器与微系统, 2025, 44(4): 88-91.
Cao Haiyan, Wang Huihui, Zhao Heran, et al. Design and simulation analysis of the capacitive pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(4): 88-91.

[2] 吕博, 谭晓兰, 刘胜强. 电容式 MEMS 压力传感器的稳健设计研究 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40(12): 56-58.
Lyu Bo, Tan Xiaolan, Liu Shengqiang. Research on robust design of capacitive MEMS pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(12): 56-58.

[3] 李昕昕. MEMS 压力传感器技术最新进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2013, 19(4): 172-176.
Li Xinxin. Recent advances in MEMS pressure sensor technology. Journal of Functional Materials and Devices, 2013, 19(4): 172-176.

[4] 汪康, 喻研. 柔性压阻式压力传感器应用与展望 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(1): 68-78.
Wang Kang, Yu Yan. Applications and prospects of flexible piezoresistive pressure sensors[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2022, 28(1): 68-78.

[5] Wang Ashu, Zeng Lingyan, Wang Wen. Study on the GaN/AlGaN piezotronic effect applied in pressure sensors[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2021, 10(3): 037007.

[6] Wang Fulei, Jiang Jianfeng, Liu Qilu, et al. Piezopotential gated two-dimensional InSe field-effect transistor for designing a pressure sensor based on piezotronic effect[J]. Nano Energy, 2020, 70: 104457.

[7] 苑伟政, 任森, 邓进军, 等. 硅微机械谐振压力传感器技术发展 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 2-9.
Yuan Weizheng, Ren Sen, Deng Jinjun, et al. A review of silicon micromachined resonant pressure sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 2-9.

[8] 李亨, 王淞立, 赵虎, 等. 基于全硅工艺的硅谐振压力传感器设计与制备 [J]. 测控技术, 2022, 41(9): 127-132.
Li Heng, Wang Songli, Zhao Hu, et al. Design and manufacture of silicon resonant pressure sensor based on all silicon technology[J]. Measurement & Control Technology, 2022, 41(9): 127-132.

[9] Du Xiaohui, Wang Liying, Li Anlin, et al. High accuracy resonant pressure sensor with balanced-mass DETF resonator and twinborn diaphragms[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(1): 235-245.

[10] 任森, 苑伟政, 邓进军, 等. 静电激励硅微机械谐振压力传感器设计 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33(1): 64-67,71.
Ren Sen, Yuan Weizheng, Deng Jinjun, et al. Design on electrostatically excited silicon micromachined resonant pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(1): 64-67,71.

[11] Jindal S K, Raghuwanshi S K. Study of materials for the design of MEMS capacitive pressure sensor[C]//2nd International Conference on Emerging Technologies: Micro to Nano 2015. Melville: American Institute of Physics, 2016, 1724: 020118.

[12] Mishra R B, Al-Modaf F, Babatain W, et al. Structural engineering approach for designing foil-based flexible capacitive pressure sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(12): 11543-11551.

[13] Belwanshi V. Analytical modeling to estimate the sensitivity of MEMS technology-based piezoresistive pressure sensor[J]. Journal of Computational Electronics, 2021, 20(1): 668-680.

[14] 卢鹏, 张顺星, 于慧君, 等. MEMS 压力传感器新型膜结构设计与优化 [J]. 机械设计, 2022, 39(3): 61-67.

Lu Peng, Zhang Shunxing, Yu Huijun, et al. Structure design and optimization of MEMS pressure sensor's new membrane structure[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(3): 61-67.

[15] 张旭, 李浩, 肖定邦, 等. 单晶硅等效机械特性的实验研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(8): 1059-1063.
Zhang Xu, Li Hao, Xiao Dingbang, et al. Experimental study on the equivalent mechanical properties of single crystal silicon[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(8): 1059-1063.

[16] Liu Yong, Irving S, Luk T, et al. Impact of wedge wire bonding and thermal mechanical stress on reliability of BPSG/poly layer of a silicon die[C]//2008 58th Electronic Components and Technology Conference. Lake Buena Vista: IEEE, 2008: 1714-1718.

[17] Hinojosa M, Rodríguez C A, Aldaco J A, et al. Study of the thermomechanical performance of FR-4 laminates during the reflow process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(11): 6761-6770.

[18] 天华化工机械及自动化研究设计院. 腐蚀与防护手册: 第1卷: 腐蚀理论、试验及监测[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2009.
Tianhua Institute of Chemical Machinery and Automation. Corrosion and protection handbook: volume 1: corrosion theory, test and monitoring[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

[19] Bokaian A. Natural frequencies of beams under tensile axial loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 142(3): 481-498.