

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210809

介质隔离高精度 MEMS 谐振式压力传感器^{*}

李传昊¹, 王军波^{2,3}, 商艳龙², 谢波³, 张玉萍¹

(1. 山东科技大学电子信息工程学院 山东 266590; 2. 山东中科思尔科技有限公司 山东 250102;
3. 中国科学院空天信息创新研究院传感技术国家重点实验室 北京 100190)

摘要:为满足液体、气体多种介质中高精度压力测量要求,本文设计了一种介质隔离的高精度微机械电子系统(MEMS)谐振式压力传感器。为降低充油封装过程中压力传递损耗以及非线性问题,本文对波纹膜片的结构参数进行了仿真优化并确定了适合传感器芯体的膜片参数。采用 MEMS 加工工艺和真空微量充灌方法,完成了 MEMS 谐振式压力传感器芯体制作与充油封装。利用双谐振器压力、温度多参数协同敏感方法,在不外加温度传感器的条件下实现了温度自补偿。测试表明,封装后的传感器在-55℃~85℃工作温度范围内,准确度优于 $\pm 0.01\%$ FS、迟滞性误差优于 0.006% FS、非线性误差优于 0.003% FS、重复性误差优于 0.008% FS。

关键词: 谐振式压力传感器; 充油封装; 温度自补偿

中图分类号: TH823.2 TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Dielectrically isolated high-precision MEMS resonant pressure sensors

Li Chuanhao¹, Wang Junbo^{2,3}, Shang Yanlong², Xie Bo³, Zhang Yuping¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong 266590, China;
2. Shandong sir-cas technology Co., Ltd., Shandong 250102, China; 3. State Key Laboratory of Transducer
Technology, Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: To meet the requirements of high-precision pressure measurement in various applications, such as liquid and gas, a medium-isolated MEMS resonant pressure sensor is designed. To reduce the pressure transfer losses and nonlinearities during oil-filled packaging, the structural parameters of the corrugated diaphragm are simulated and optimized, and the diaphragm parameters suitable for the sensor core are determined. By using MEMS processing technologies and vacuum micro-filling methods, the MEMS resonant pressure sensor chip production and oil-filled packaging are completed. The dual resonator pressure and temperature multi-parameter co-sensing methods are utilized, and the temperature self-compensation is realized without the addition of a temperature sensor. The test shows that the accuracy of the packaged sensor is better than $\pm 0.01\%$ FS, hysteresis error is better than 0.006% FS, nonlinearity error is better than 0.003% FS, and repeatability error is better than 0.008% FS in the operating temperature range of -55℃~85℃.

Keywords: resonant pressure sensor; oil-filled package; temperature self-compensated

0 引 言

微机械电子系统(micro electro mechanical system, MEMS)压力传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、稳定可靠、成本低、便于集成化的优点,广泛应用于水利、地

质、气象、化工、医疗卫生等方面^[1-3]。在实际的工业领域,压力信息往往以含有腐蚀性的气体压力或液体压力形式存在,如工业管道中的腐蚀性气压、航空发动机的油压等,不能直接作用到压力传感器芯体上,需要采用一定的隔离封装技术使待测压力与敏感芯体分隔开以保护芯体不被腐蚀破坏。因此诞生了很多介质隔离的压力传感

收稿日期:2022-11-30 Received Date: 2022-11-30

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2012003)、国家自然科学基金 NSAF 联合基金(U1930206, 62121003, 61825107)、中科院关键技术团队(GJJSTD20210004)、中科院青年创新促进会会员(2022121)、山西省揭榜招标项目(20201101018)资助

器^[4-5],并在流程工业、装备工业领域取得了广泛应用。随着国内流程、装备技术的不断发展,对压力传感器的精度提出了更高的要求。当前,国内外介质隔离的压力传感器主要基于硅压阻压力传感器芯体开发,芯体受温度影响较大,传感器在工作温度范围内的精度仅为0.5% FS左右,无法满足高精度测量需求。反观谐振式压力传感器由于具备高分辨率、高稳定、准数字输出的特点,是普遍认为宽温区综合精度最高的压力传感器^[6]。将谐振技术与介质隔离的有机结合是满足工业测控领域高精度压力测量的重要途径,具有较大的研究潜力。

但 MEMS 谐振式压力传感器的工作线性范围有限,通常为谐振器固有频率的 10%~20% 左右^[7]。因此,研究者们都将谐振器的频率变化范围维持在 10%~20% 左右以保证谐振式压力传感器的高精度输出。当谐振式压力传感器芯片完成充油封装后,若外界压力通过波纹膜片传递到谐振式压力传感器压力敏感膜上出现压力损耗或出现非线性时,会造成谐振器频率变化与外界待测压力之间也存在非线性的问题,并最终导致传感器精度下降。由此可见,与压阻式压力传感器的充油封装类似,在谐振式压力传感器的充油封装过程中无损传压显得尤为重要。

为满足高精度压力测量需求,本文设计了一种介质隔离的 MEMS 谐振式压力传感器,通过有限元分析的方法对传感器结构及封装结构进行仿真优化,通过 MEMS 工艺制作与充油封装完成传感器制备,并对传感器性能进行了测试。

1 传感器设计

1.1 工作原理与结构设计

本文设计的充油封装压力传感器剖面图如图 1(a)所示,包括用于介质隔离的波纹膜片,带有金属引脚的烧结座和传感器芯体组成。外界的压力作用于波纹膜片,导致波纹膜片发生形变挤压内部的硅油,因硅油具有不可压缩性,被用来作为传递力的介质将压力传递到传感器芯体上。芯体通过引线键合技术与金属引脚实现电气连接,通过电路将芯体受到的压力信号转换为电信号输出。

芯体结构如图 1(b)所示,该传感器由两部分组成,一部分是制作压力敏感膜和谐振器的 SOI 硅片,另一部分是用于真空封装的玻璃盖板。SOI 硅片的衬底层用于形成压力敏感膜和硅通孔,埋氧层用于形成谐振器的锚点以及电气绝缘,器件层用于制作谐振器以及对应的电极和电极引线。如图 1(c)所示,当外界压力通过硅油作用于传感器芯体的压力敏感膜时,压力敏感膜会发生形变,膜上产生压应力形变区和张应力形变区,利用这一现象将两个谐振器分别放置于压应力区和张应力区并匹配其压力灵敏度。谐振器受到拉伸时,谐振频率增大,反之受到压缩时,谐振频率减小。根据这一特性,设计出差分表征理念:中间梁(受拉伸影响)的谐振频率减去边梁(受压缩影响)的谐振频率表征压力;两者之和表征温度。

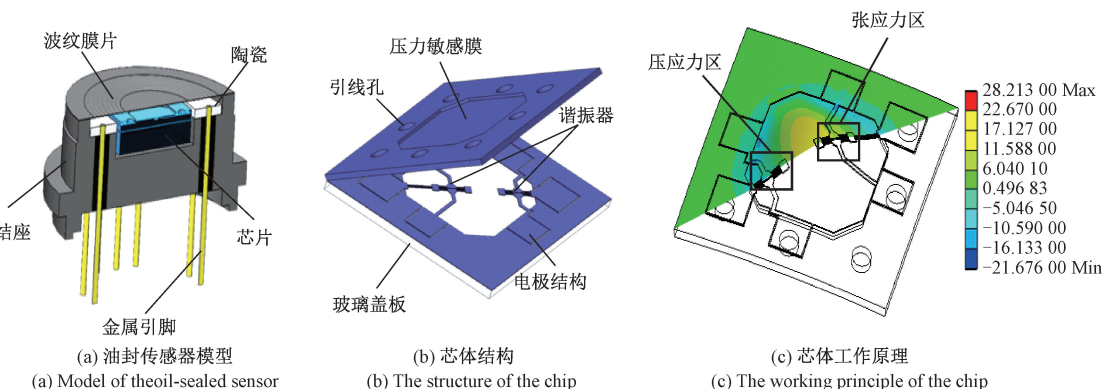


图1 油封传感器模型、芯体结构及芯片工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the oil-sealed sensor model, chip structure and working principle of the chip

1.2 谐振器设计

为避免谐振器振动方向与压力敏感膜形变方向一致从而导致的能量耦合问题^[8],本文选择水平一阶振动模态作为谐振器的工作模态。本文选用的谐振器为双端固支梁结构,如图 2 所示。沿双端固支梁的截面中心位置建立直角坐标系,假设谐振梁长度为 l ,宽度为 b ,厚度为 h 。

其无阻尼状态下水平方向的微分振动方程为^[9]:

$$EI \frac{\partial^4 D(x,t)}{\partial x^4} - \sigma S_c \frac{\partial^2 D(x,t)}{\partial x^2} = -\rho S_c \frac{\partial^2 D(x,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中, $D(x,t)$ 是谐振器的挠度方程; E 和 ρ 为谐振器材料的杨氏模量和密度; σ 为梁的轴向应力; $I = \frac{1}{12}hb^3$ 为

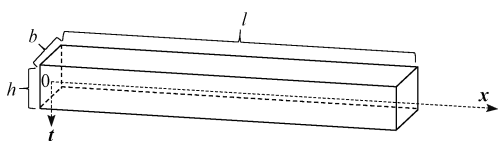


图2 双端固支梁示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a double end clamped beam

转动惯量; $S_c = hb$ 为梁的横截面积。式(1)的通解为:

$$D(x,t) = \sum_n D(x) [A_n \cos(D_n t) + B_n \sin(D_n t)] \quad (2)$$

其中双端固支水平振动梁的边界条件可以表示为:

$$\begin{cases} D|_{x=0} = 0, & \frac{dD}{dx}|_{x=0} = 0 \\ D|_{x=l} = 0, & \frac{dD}{dx}|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入到式(1)中,并根据式(3)的边界条件,可求解得双端固支梁在无阻尼状态下水平方向上的一阶谐振频率为:

$$f = f_0 \sqrt{1 + \frac{\sigma}{\sigma_c}} \quad (4)$$

$$f_0 = 1.028 \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{b}{l^2}} \quad (5)$$

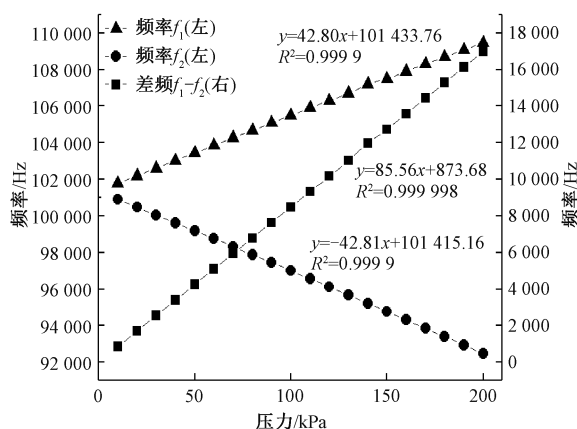
其中, f_0 是梁不受外力作用($\sigma = 0$)时,其无阻尼状态下水平一阶振动的一阶谐振频率; $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{3} \left(\frac{b}{l}\right)^2$ 为临界欧拉应力。

根据式(4)、(5)可以看出,双端固支梁的谐振频率仅与梁长度 l 和宽度 b 有关,而与其厚度 h 无关。

1.3 传感器灵敏度设计

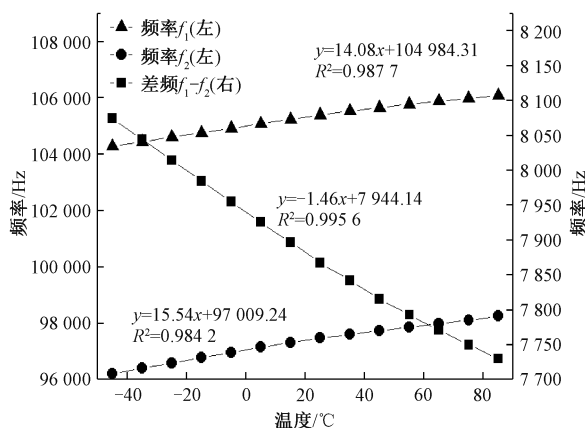
本文使用 SolidWorks 软件建立芯体模型,通过 ANSYS 有限元分析对芯体灵敏度进行仿真(本文所有双纵轴图,通过图例后面标记“左”、“右”的方式区分相对应的纵轴,下文不再说明)。如图3所示,分别对传感器芯体进行压力与温度特性的仿真,仿真结果表明:双谐振器的压力灵敏度为 ± 42.8 Hz/kPa左右,其灵敏度匹配程度较高且差频 $f_1 - f_2$ 输出的灵敏度可以达到85 Hz/kPa,是每个谐振器单独工作时的2倍。温度灵敏度为14.08 Hz/°C和15.54 Hz/°C,差频 $f_1 - f_2$ 输出仅为-1.46 Hz/°C,表现为对温度几乎不敏感,即 $f_1 - f_2$ 的输出数值几乎不受温度影响。

计算图3(a)和(b)的和频可以得出:压力特性的 $f_1 + f_2$ 斜率为-0.01 Hz/kPa,而温度特性的 $f_1 + f_2$ 斜率为29.62 Hz/°C,为单个谐振器的两倍,即 $f_1 + f_2$ 的输出数值几乎不受压力的影响,但对温度敏感,利于后期温度补



(a) 压力特性仿真

(a) Simulation of pressure characteristics



(b) 温度特性仿真

(b) Simulation of temperature characteristics

图3 仿真结果示意图

Fig. 3 Diagram of simulation results

偿。因此差分输出理念不但提高了传感器的压力灵敏度,同时降低传感器的温度敏感特性。

1.4 波纹膜片设计

压力传感器充油封装的关键,就在于外部压力到芯体之间的无损耗传递。相关文献[10]已经对不同形状的膜片进行了详细的研究,结果表明波纹膜片可以借助修改自身结构参数减小自身的形变应力,中心的平膜区域在受力时能够与压力敏感膜保持平行移动,尽可能地减少出现应力集中于一点的情况,使压力敏感膜受力均匀,从而改善传感器性能。同时,相比于圆弧波纹膜片、锯齿状波纹膜片等,正弦波形的膜片在0~200 kPa量程内,对外部压力的灵敏度高且线性度好。因此本文选择正弦波纹膜片进行研究。

正弦波纹膜片涉及到的参数很多,在设计过程中必须根据膜片的压力特性方程以及产品的结构尺寸确定。当固支波纹圆膜片受均布压力 P 时,其中心挠度 y 与 P

的解析关系为^[11]：

$$\frac{PR^4}{Eh^4} = A_p \frac{y}{h} + B_p \frac{y^3}{h^3}, A_p = \frac{2(q+3)(q+1)}{3(1-\mu^2/q^2)},$$
$$B_p = \frac{32}{q^2-9} \times \left[\frac{1}{6} - \frac{3-\mu}{(q-\mu)(q+3)} \right], \quad (6)$$
$$q = \sqrt{1 + 1.5 \left(\frac{H}{h} \right)^2}$$

式中： P 为均布压力； R 为膜片的工作半径； E 为波纹膜片的杨氏模量； h 为膜片厚度； A_p 为无量纲刚度系数； B_p 为无量纲拉伸非线性项系数； μ 为波纹膜片的泊松比； H 为膜片的波纹深度。

由上述压力特性方程可以看出，膜片的设计要考虑到实际产品的尺寸结构、膜片的厚度、波纹深度、膜片的材料以及波纹膜片的工作半径等参数。上述的 q 值一般在 5~20 之间， q 值决定了波纹膜片的变形， q 值越大，刚度越大，线性区间越长^[12]。

本文使用有限元分析对膜片模型进行仿真，环境压力为 10~200 kPa，如图 4(a) 所示，为方便计算，采用 1/4 波纹膜片模型仿真，所用仿真材料的密度为 7 750 kg/m³，杨氏模量为 1.93 GPa，泊松比 0.31。对中心平面区域以及波纹区域施加 10~200 kPa 均布压力，对其边缘部分施加固定约束，网格采用正四面体网格进行仿真，因为膜片自身形变量较大，仿真时开启大变形开关。根据使用到的芯体尺寸与封装设计要求，波纹膜片总直径为 18.6 mm，下面分别对不同波纹数、波纹深度以及膜片厚度在 10~210 kPa 的应力下对中心挠度形变进行了仿真分析（ R^2 为趋势线拟合程度）。

根据仿真结果如图 4(b)~(d) 可以看出，随着波纹数量、深度以及膜片厚度的增加，都会使膜片本身刚度增大，导致对压力的灵敏度变小，但膜片的弹性特性更加趋于线性。在后期设计中，在保证膜片对于压力的灵敏度满足芯片要求时，选择弹性特性更好的膜片进行封装，方便后期对频率输出进行数据拟合。最终将膜片设计为直径 18.6 mm、波纹数量 5、波纹深度 0.3 mm、厚度为 0.05 mm。

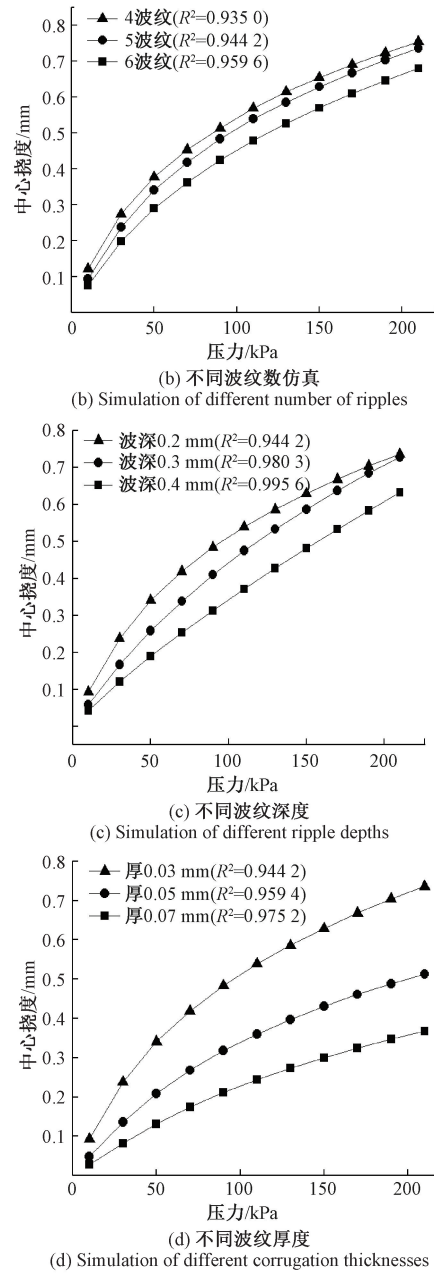
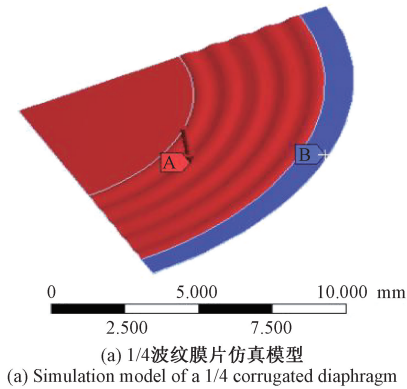


图4 膜片模型及不同膜片参数仿真结果示意图
Fig.4 Diagram of diaphragm model and simulation results of different diaphragm parameters

2 传感器制作

2.1 传感器芯片制作

谐振式压力传感器敏感芯体的 MEMS 工艺，包括深反应离子刻蚀（deep reactive ion etching, DRIE）、谐振梁释放和阳极键合等关键步骤。具体如下：

首先，清洗 SOI 圆片（图 5(a)），然后利用光刻胶和介质薄膜作为复合掩膜，通过光刻和 DRIE 工艺在 SOI 片衬

底层上制作出通孔和压力敏感膜(图 5(b))。然后在器件层上通过 DRIE 制作谐振器(图 5(c)),然后释放谐振器(图 5(d))。采用湿法腐蚀的方法制作玻璃盖板凹槽(图 5(e)),并采用溅射工艺制备吸气剂(图 5(f))。然后将 SOI 与玻璃盖板进行阳极键合(图 5(g)),并在通孔内制作铝电极(图 5(h))。制备完成的传感器芯片如图 6 所示。

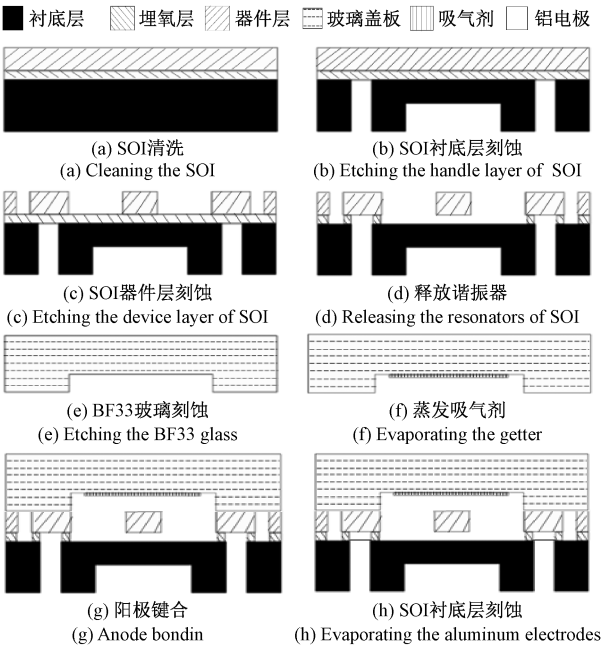


图 5 芯片制作工艺流程图

Fig. 5 Process flow chart of chip production

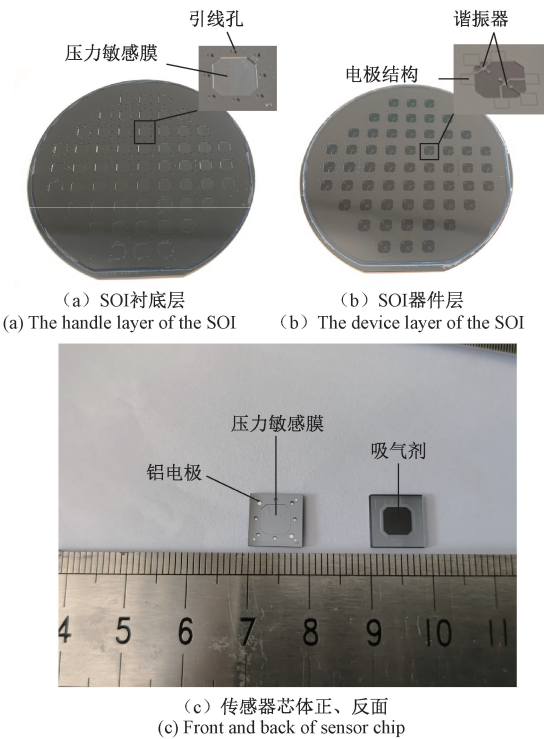


图 6 制备的传感器芯体

Fig. 6 Photos of the sensor chip

2.2 芯片充油封装

对压力传感器芯体尤其是谐振式压力敏感芯体进行封装时,对传压介质的要求非常高,首先是不可压缩性,这是保证外部压力传递到芯片压力敏感膜时损耗大小的关键,介质因为热膨胀的原因势必会产生额外应力,所以还要有尽可能小的热膨胀系数和良好的介电性能以及耐寒、耐高温等特性。综上所述,选择硅油作为压力传递介质,其不可压缩性,在封装工艺中被广泛运用。表 1 所示为道康宁二甲基硅油的多种硅油参数^[13]。通过表 1 可以看出,3 种不同粘度的硅油中,粘度为 100 cSt 的硅油在 150℃时,挥发物含量最低仅为 0.02%,而且其热膨胀系数在能够购买到的种类当中处于最低水平。经过比较,在表面张力近似的情况下,选择道康宁 100 cSt 粘度的硅油作为研究使用硅油。

表 1 道康宁不同粘度二甲基硅油参数
Table 1 Parameters of Dimethyl silicone fluids of different viscosities of the Corning brand

粘度	50	100	200
热膨胀系数/℃	0.001 04	0.000 96	0.000 96
表面张力/cm	20.8	20.9	21.0
150℃挥发物含量/%	0.30	0.02	0.07

由于气体和水分子的半径远小于线性直链硅油分子间的距离^[14],未经净化的硅油如果直接充灌在传感器中,杂质受温度影响引起的体积变化会对传感器性能造成影响,而且气体的可压缩性远远大于液体的可压缩性,如果腔体中有气泡存在,必定会影响腔体内硅油的体积弹性模量,进而影响传感器的工作性能^[15]。所以在高温下抽真空至 1 Pa 数量级,这样能够去除掉高温下硅油分解的小分子有机物、水汽等杂质。油封后的传感器如图 7 所示。



图 7 油封后传感器示意图

Fig. 7 Diagram of the oil sealed sensors

3 传感器测试

3.1 开环测试

硅谐振压力传感器的开环电路是通过外接激励的方式驱动谐振器振动并通过仪器检测获取谐振器的基本性能参数。本文的开环测试系统主要包括开环测试网络、网络分析仪 (Agilent: E5061B, 美国) 和电源。开环测试系统示意图如图 8 所示。

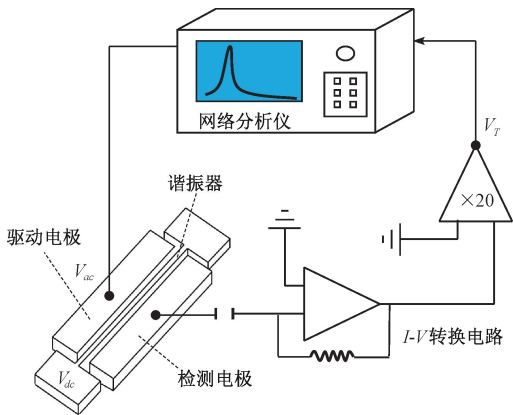


图 8 开环测试系统示意图

Fig. 8 Diagram of the open-loop test system

电源为谐振器提供直流偏置电压 V_{dc} , 在驱动电极端通交流电压 V_{ac} , 在 V_{ac} 的作用下谐振器所受静电力作用从而产生周期性往复振动。谐振器的振动引起检测电容周期性变化, 因此在检测电极上产生相对应的电荷变化, 进而产生周期性电流, 通过 I - V 转换电路将该电流信号转换为电压信号, 并经过放大电路输出 V_T 。检测 V_T 的周期与幅度即可检测谐振器的振动情况。当 V_{ac} 的频率与谐振器的谐振频率一致时, 谐振器的振幅最大, 此时对应的 V_T 也最大, 通过改变网络分析仪输出交流电压的频率范围, 逐步逼近谐振器的谐振频率, 便可得到谐振器的开环特性 (谐振状态下的幅值比、相位、 Q 值、谐振频率)。其中幅值比为网络分析仪检测段电压 V_T (谐振器 I / V 转换、放大后的电压) 与其输出电压 V_{ac} (谐振器的交流驱动电压) 的比值。

本文对 3 只硅谐振压力敏感芯片进行封装并测试了充油封装前与封装后的开环特性, 如表 2 所示。根据表 2 可以看出, 样品 1 充油封装前的谐振频率为 105 647.89 Hz, Q 值为 10 179, 幅值比和相位分别为 17.31 dB 和 3.21°; 充油封装后的谐振频率为 105 648.17, Q 值为 10 157, 幅值比和相位分别为 17.03 dB 和 3.42°。样品 2、3 的数据对比也没有太大变化。测试表明, 本文研究的压力传感器在充油封装后, 谐振器基本性能没有明显变化, 此结果验证了充油结构设计的合理性。

表 2 充油封装前后开环测试对比表

Table 2 Comparison table of open-loop tests before and after oil-filled packages

开环性能测试	充油封装前				充油封装后			
	谐振频率/Hz	Q 值	幅值比/dB	相位/(°)	谐振频率/Hz	Q 值	幅值比/dB	相位/(°)
样品 1	105 647.89	10 179	17.31	3.23	105 648.17	10 157	17.03	3.42
样品 2	104 726.13	10 164	17.68	3.34	104 726.82	10 141	17.15	3.11
样品 3	106 877.54	9 968	15.96	-1.78	106 877.47	9 942	15.71	-1.63

3.2 综合性能测试

本文所使用的闭环测试系统由压力控制器、温箱、电源、数据采集器和相应软件构成。传感器的工作温度在 $-55^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$, 在工作温度范围内每隔 10°C 设置一个温度标定; 压力量程为 $10 \sim 200 \text{ kPa}$, 在压力量程内每隔 10 kPa 设置一个压力标定点。每个标定点取样 5 次, 得出传感器的压力、温度敏感特性曲线和标定拟合误差, 如图 9 所示。根据图 9(a) 所示的传感器压力特性曲线可以看出, 传感器中间梁的压力灵敏度为 47.87 Hz/kPa , 线性相关系数为 0.9999; 边梁的压力灵敏度为 -45.51 Hz/kPa , 线性相关系数为 0.9999, 差频输出 $f_1 - f_2$ 的压力灵敏度为 93.37 Hz/kPa , 为单梁的两倍; 和频输出 $f_1 + f_2$ 的压力灵敏度为 2.36 Hz/kPa , 表现

为 $f_1 + f_2$ 几乎不受压力的影响。此结果验证了芯体设计的差分理念, 不但提高了传感器的差分灵敏度, 而且自身便可检测温度变化带来的影响, 为电路中的温度自补偿提供了条件。将图 9(a) 的标定结果与图 3 的仿真结果 (中间梁 42.80 Hz/kPa , 边梁 -42.81 Hz/kPa) 相比较可以看出, 灵敏度最大误差为 5.07 Hz/kPa , 最大偏差小于 10%, 进一步验证了仿真的准确性。图 10(b) 为传感器标定拟合偏差。传感器在全温全压内的标定拟合偏差在 $\pm 10 \text{ Pa}$ 以内。小的拟合偏差说明传感器在不同温度下对不同压力敏感的稳定性好。

传感器的重要参数除了灵敏度之外, 还有迟滞性误差、非线性误差、重复性误差等。参照 JJG 860 《压力传感器 (静态)》的相关规定, 在室温条件下对传感器施加

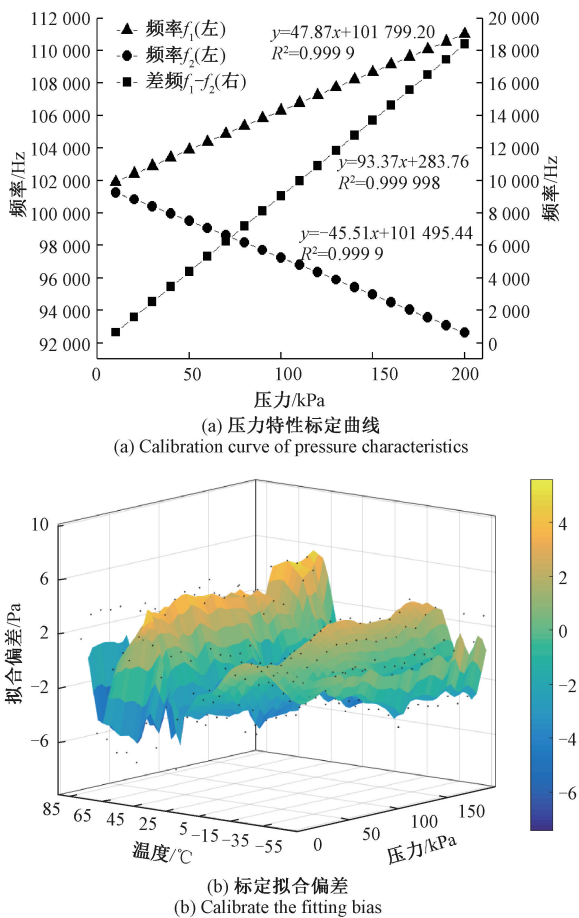


图 9 压力特性标定曲线及标定误差示意图

Fig. 9 Diagram of calibration curve and calibration error of pressure characteristics

200 kPa 压力,待压力稳定后保持 1 min,再将压力降为 2 kPa 并保持 1 min,不记录输出数据重复 3 次。完成预加压过程后对传感器进行 3 次正反行程测试,得出正反行程误差如图 10 所示。

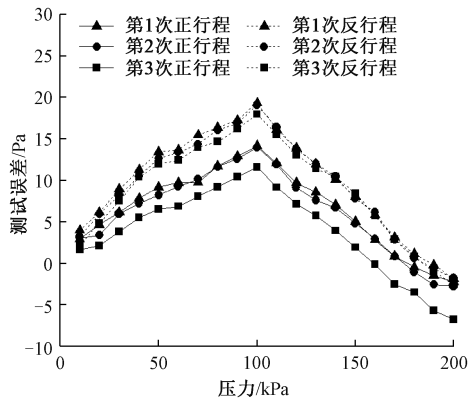


图 10 正反行程误差示意图

Fig. 10 Diagram of forward and reverse stroke errors

从图 10 的结果中,可以获得传感器的迟滞性误差、非线性误差、重复性误差以及准确度。其中,传感器的迟滞性误差为每个测试点正行程输出值的算术平均值与反行程输出值的算术平方值之差的最大值与传感器满量程的比值。本文的测试结果中,正行程的算术平均值与反行程输出值的算术平方值之差的最大值为 12.44 Pa,传感器的满量程为 200 kPa,因此测试传感器的迟滞性误差 ξ_H 为 0.006% FS。

取每个压力点 3 个正反行程传感器输出压力值的算术平均值,采用最小二乘法拟合直线方法可以得到传感器的工作直线,如式(7)所示。

$$y = 0.013\,58 + 0.999\,9p \tag{7}$$

根据传感器的工作直线,可以得出传感器的重复性、非线性和准确度。

其中传感器的重复性定义为:

$$\xi_H = \frac{3S}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{8}$$

其中, S 是传感器在整个测量范围内每个测试点与工作直线之间差值的标准差; Y_{FS} 是传感器的满量程,为 200 kPa。根据图 10 所示的测试结果,可以算出 $S=5.74$ Pa。因此,传感器的重复性误差为 0.002 8% FS。

传感器的非线性误差为:

$$\xi_L = \frac{|\Delta y_L|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{9}$$

其中, $|\Delta y_L|_{\max}$ 是每个压力点下传感器输出的压力值与工作直线的差值绝对值的最大值。根据图 11 所示的测试结果,可以算出 $|\Delta y_L|_{\max} = 15.78$ Pa。因此,传感器的非线性误差为 0.007 9% FS。

传感器的准确度为:

$$A = \pm (\xi_R + \xi_{LH}) \tag{10}$$

式中: ξ_{LH} 为传感器的系统误差,是各压力点正、反行程传感器输出压力值的算术平均值和工作直线之间差值的最大值与满量程的比值。

$$\xi_{LH} = \frac{|\Delta y_{LH}|}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{11}$$

式中: $|\Delta y_{LH}|_{\max}$ 为各压力点正、反行程传感器输出压力值的算术平均值和工作直线之间差值的最大值。根据图 10 所示的测试结果,可以算出 $|\Delta y_{LH}|_{\max} = 12.42$ Pa。因此,传感器的系统误差 ξ_{LH} 为 0.006 2% FS。故传感器的准确度为 $\pm 0.009\%$ FS。表 3 归纳了传感器静态测试的结果。

表 3 传感器静态测试结果			
Table 3 Static test results of sensors			
%FS			
迟滞性	重复性	非线性	准确度
0.006	0.002 8	0.007 9	± 0.009

4 结 论

本文通过有限元分析的方法,对充油封装的谐振式压力传感器封装波纹膜片进行了仿真分析和优化设计,论文设计的 MEMS 谐振式压力传感器芯体采用双谐振器构成差分结构;两个谐振梁的频率之差(差频)表征压力,两个谐振梁的频率之和(和频)表征温度,基于压力和温度双参数敏感的机理,传感器可构成自补偿系统,标定后的数据经过算法解出拟合方程的相关系数。对 3 只传感器进行开环测试,测试表明传感器在充油封装前后开环性能几乎不变。对油封后的传感器进行闭环测试。测试表明传感器的准确度优于 $\pm 0.01\%$ FS、迟滞性误差优于 0.006% FS、非线性误差优于 0.008% FS、重复性误差优于 0.003% FS。

参考文献

- [1] EATON W P, SMITH J H. Micromachined pressure sensors review and recent developments [J]. Journal Citation Reports, 1997, 6(5): 530-539.
- [2] STEVE P B, GRAHAM E, MICHAEL K, et al. White MEMS mechanical sensors[M]. Boston, London: Artech House, Inc., 2004.
- [3] 陈德勇. 微机械谐振梁压力传感器研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2002.
CHEN D Y. Research on micromechanical resonant beam pressure sensor[D]. Beijing: Institute of Electronics, University of Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [4] 王俊杰. 硅压阻式压力传感器的封装研究[D]. 浙江: 杭州电子科技大学, 2015.
WANG J J. Packaging study of silicon piezoresistive pressure sensor [D]. Chekiang: Hangzhou Dianzi University, 2015.
- [5] 付兴铭. 汽车用扩散硅压力传感器的设计与封装研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2007.
FU X M. Design and packaging research of diffused silicon pressure sensors for automobiles [D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [6] YUAN W Z, REN S, DENG J, et al. A review of silicon micromachined resonant pressure sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 2-9.
- [7] LU Y L, YAN P C, XIANG C, et al. A resonant pressure microsensor with the measurement rang of 1 MPa based on sensitivities balanced dual resonators [J]. Sensors, 2019, 19: 499767.
- [8] 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 W ZH, REN S, DENG J J, et al. A review of silicon micromachined resonant pressure sensor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 2-9.
- [9] 徐芝纶. 弹性力学(下)(第3版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
XU ZH L. Elasticity (Part II) (3rd edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [10] 丁建梅, 张祥兵, 王海. 基于 Ansys 对中心开孔金属膜片性能的研究与探讨[J]. 材料科学与工程报, 2016, 34(2): 280-286.
DING J M, ZHANG X B, WANG H. Based on Ansys research and discussion on the performance of central open-cell metal diaphragms [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(2): 280-286.
- [11] 刘亚伟, 胡梦飞, 杨露露, 等. 压力传感器波纹膜片设计的力学性能分析[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(8): 40-42.
LIU Y W, HU M F, YANG L L, et al. Analysis of mechanical properties of pressure sensor corrugated diaphragm design [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(8): 40-42.
- [12] 刘元浩, 赵立波, 赵玉龙, 等. 基于压力传感器封装的波纹膜片的结构研究[J]. 研究与开发, 2008, 14(12): 12-15.
LIU Y H, ZHAO L B, ZHAO Y L, et al. Structural study of corrugated diaphragm based on pressure sensor package [J]. Research & Development, 2008, 14(12): 12-15.
- [13] 王俊杰. 硅压阻式压力传感器的封装研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
WANG J J. Packaging study of the silicon piezoresistive pressure sensor [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2016.
- [14] 付兴铭. 汽车用扩散硅压力传感器的设计与封装研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2007.
FU X M. Design and packaging research of diffused silicon pressure sensors for automobiles [D]. Hubei: HuaZhong University of Science and Technology, 2007.
- [15] 付敬奇, 范茂军, 单笠阳, 等. 400 MPa 压阻式压力传感器[J]. 传感器技术, 1995(1): 13-16.

FU J Q, FAN M J, SHAN L Y, et al. 400 MPa piezoresistive pressure sensor [J]. Sensor Technology, 1995(1):13-16.

作者简介



李传昊, 2020 年于潍坊学院获得学士学位, 2023 年于山东科技大学获得硕士学位, 主要研究方向为谐振式压力传感器。

E-mail: lch1365644527@163.com

Li Chuanhao received his B.Sc. degree from Weifang University in 2020, and received his M.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2023. His main research is resonant pressure sensor.



王军波 (通信作者), 1995 年于吉林大学获得学士学位, 1998 年于吉林大学获得硕士学位, 2002 年于清华大学获得博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院的研究员, 主要研究方向为 MEMS 传感器。

E-mail: jbwang@mail.ie.ac.cn

Wang Junbo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Jilin University in 1995, received his M.Sc. degree from Jilin University in 1998, and received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2002. He is currently a researcher at Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is MEMS sensors.



商艳龙, 2009 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2012 年于中国科学院大学获得硕士学位, 现为山东中科思尔科技有限公司总经理(山东产业技术研究院研究员), 主要研究方向为 MEMS 微纳传感器器件。

E-mail: ylshang@sir-cas.com

Shang Yanlong received his B.Sc. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2009, and received his M.Sc. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2012. He is currently a general manager at Shangdong sir-cas technology Co., Ltd. (Researcher at Shandong Industrial Technology Research Institute). His main research interest is MEMS micro-nano sensor device.



谢波, 2011 年于北京师范大学获得学士学位, 2016 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院的副研究员, 主要研究方向为 MEMS 压力传感器及其产业化。

E-mail: xiaobo@aircas.ac.cn

Xie Bo received his B.Sc. degree from Peking Normal University in 2011, received his Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2016. He is currently an associate researcher at Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include MEMS sensors and their industrialization.



张玉萍, 2001 年于曲阜师范大学获得学士学位, 2004 年于曲阜师范大学获得硕士学位, 2007 年于天津大学获得博士学位, 现为山东科技大学教授, 主要研究方向为光电子技术。

E-mail: sdust_thz@163.com

Zhang Yuping received her B.Sc. degree from Qufu Normal University in 2001, received her M.Sc. degree from Qufu Normal University in 2004, and received her Ph.D. degree from Tianjin University in 2007. She is currently a professor at Shandong University of Science and Technology. Her main research interest is optoelectronic technology.