

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312106

无源无线应变传感器中压电材料接触力学模型研究*

李子帆^{1,2}, 邹希岳², 梁晓瑜¹, 胡斌²

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要:针对现有无源无线传感器存在稳定性差,抗干扰能力不强,传输距离过短的问题,提出一种新型无源无线应变传感器。该传感器由两个线圈和一个体声波传感器组成,体声波传感器包括传力结构和石英晶片,其可将被测表面的应变转化为可检测的石英谐振频率偏移。首先,建立了半椭圆接触模型,研究接触力、激励电压、接触元件形状对石英的影响,以提高传感器性能;其次,设计了石英加载装置,实现石英表面微力加载研究;最后,搭建了无源无线应变传感系统,传输距离可达5 cm,分辨率约为4.2 Hz/ $\mu\epsilon$,应变测量范围为600 $\mu\epsilon$,重复性实验显示RSD为5.47%。实验结果表明,该传感系统具有良好性能,在未来将与无人机结合为大型结构应变测量提供有效的解决方案。

关键词: 体声波;无源无线传感器;应变测量;接触力学

中图分类号: TH89 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Contact mechanics study of piezoelectric materials in passive wireless strain sensors

Li Zifan^{1,2}, Zou Xiyue², Liang Xiaoyu¹, Hu Bin²

(1. School of Measurement and Testing Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor stability, weak anti-interference ability and short transmission distance of existing passive wireless sensors, a new type of passive wireless strain sensor was proposed. The sensor consists of two coils and a volume acoustic sensor, which includes a force transmission structure and a quartz wafer, which converts the strain on the measured surface into a detectable quartz resonant frequency shift. Firstly, a semi-elliptical contact model was established to study the effects of contact force, excitation voltage, and contact element shape on quartz to improve sensor performance. The second, design a quartz loading device to realize the loading of small forces on the quartz surface. Last, build a passive wireless strain sensing system, the transmission distance can reach 5 cm, the resolution is about 4.2 Hz/ $\mu\epsilon$, the strain measurement range is 600 $\mu\epsilon$, and the repeatability is 5.47%. The experimental results show that the sensing system has good performance, and will be combined with UAVs in the future to provide an effective solution for large-scale structural strain measurement.

Keywords: bulk acoustic wave; passive wireless sensor; strain measurement; contact mechanics

0 引言

针对超大型结构(如桥梁、摩天轮、过山车等)随时间老化引起的安全事故,降低或避免由于结构健康问题引起的经济损失和不良社会影响,在这些结构上安装适当的结构健康监测系统将带来极重要的经济和社会效

益。近年来,结构健康监测中的无源无线传感技术吸引了学者们的大量研究,解决了有源有线传感器存在的线序复杂,需频繁维护,费用高等缺点,实现了非接触测量,且无需电池,维护方便。

无源无线传感器根据无线传输类型可分为近场传输和远场传输。近场无源无线传感器主要由电容电感电路(LC电路)构成,利用电感间的磁耦合完成无线传输^[1];

收稿日期:2023-11-02 Received Date: 2023-11-02

* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3005100)、国家市场监督管理总局项目(2022MK211)资助

远场无源无线传感器是由谐振器和在超高频 (ultra-high frequency, UHF) 工作范围下的微波天线构成^[2]。它们被广泛应用于湿度^[3]、温度^[4-5]、应变^[6-12]、裂纹^[13]、腐蚀^[14]的监测以及生物化学分析^[15-16]、压力测量^[17-18]等领域。近场无源无线应变传感器因其大多依靠金属导体变形改变谐振频率,故存在稳定性差,传感距离过近 (<5 cm) 等缺点^[11-12]。远场无源无线应变传感器的信号传输距离可达数米,符合大部分的测量需求,但其采用的 UHF 频段信号易受移动通信和广播电视等领域的信号干扰,信号处理困难。基于此,设计了一种近场无源无线体声波应变传感器,选择具有良好的无线电力传输和信噪比的石英(工作频率 1~50 MHz)作为敏感元件,利用所设计的传力结构使被测结构表面弯曲转化为石英表面载荷的变化,从而将被测结构表面产生的应变转化为石英谐振频率偏移。将其与带有便携式网络分析仪的无人机结合,利用无人机接近目标结构读取体声波应变传感器信号。

薄石英盘夹在两金属电极间,由于石英的压电材料性质,处于交变电场中的石英在逆压电效应作用下产生机械形变,声波在压电振荡堆中沿厚度剪切方向传播产生体声波。石英在无源无线体声波传感器中的一个重要应用是无源无线石英晶体微天平,是一种微质量传感器,广泛应用在生物化学分析领域^[15-16]。将石英利用硅胶板边缘轻夹固定,其余部分悬空,并在石英表面沉积敏感性膜进行特异性吸附,使其表面质量增加,从而改变谐振频率。另外,石英还被用于无源无线压力检测^[17]。采用胶水将石英边缘固定在杆的两个机械触点上,对杆施压使石英发生形变,石英谐振频率改变。上述学者为保持石英的无线传输能力,将石英边缘小部分固定,大部分部分悬空,以维持石英主要圆盘部分自由振荡。目前,对于无源无线体声波应变传感器的研究甚少。但已有学者对石英和接触元件间的接触机制进行了研究,表明石英的谐振频率随法向接触力的增加而增加,并表示石英谐振频率的增量与接触元件的接触半径有关^[19-20]。

基于上述设计与研究,本文将体声波传感器设计为石英边缘与传力结构底座接触,其余大部分悬空,并使石英上表面与接触元件接触。为提高体声波传感器性能,建立了半椭圆接触模型,研究了接触力、激励电压、接触元件形状对石英谐振频率的影响。对所设计的传感系统在悬臂梁上进行实验,传输距离可达 5 cm,分辨率约为 4.2 Hz/ $\mu\text{ε}$,重复性实验结果显示 RSD 为 5.47%,实验结果显示出良好的传输距离,分辨率以及重复性。

1 接触模型建立

石英的压电性能使加载在石英表面的接触力将对石英谐振频率产生影响,随接触力的增加,石英的谐振频率

往高频移动,如图 1 所示^[19-20]。

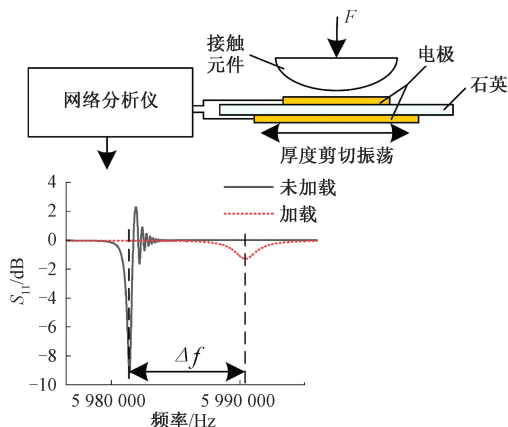


图 1 石英接触

Fig. 1 Quartz contact

接触元件形状变化可改变接触元件与石英间接触范围,为明确接触范围对石英谐振频率的影响,将接触元件设计为半圆柱形状,截面为半椭圆形,通过改变短轴半径改变接触范围,如图 2(a) 所示。另外,为便于制造,对部分过薄的尺寸进行加厚处理。理论上将接触元件设计为一个圆形片,通过改变圆形片的直径即可改变接触范围大小。但由于石英与接触元件(选用 96 氧化铝陶瓷)间刚度相差较大,二者接触并在接触元件上施加法向力时,二者间的平行度将变化,导致接触不完全,如图 2(b) 所示。因此,将接触元件设计为半圆柱形状,使石英与接触元件存在固定接触点。

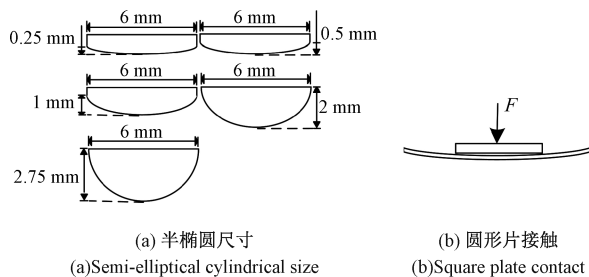


图 2 接触元件设计

Fig. 2 Contact element design

对于任何给定的轴对称体的接触均可将三维接触映射为物体与一维弹簧阵列接触。一维弹簧阵列由具有独立自由度元素的线性排列组成,元素间有一个足够小的距离 Δx ,如图 3(a) 所示^[21]。因此,半椭圆接触模型可以被考虑为一个刚性轮廓在弹性半空间的压痕,如图 3(b) 所示。

其中, F_N 为法向力, F_x 为切向力, a 为接触半径, d 和 $u^{(0)}$ 分别为刚性压头在法向和切向的位移。 x 为每个弹簧的位置, Δx 是每个弹簧间的距离, $g(x)$ 为刚性压头的

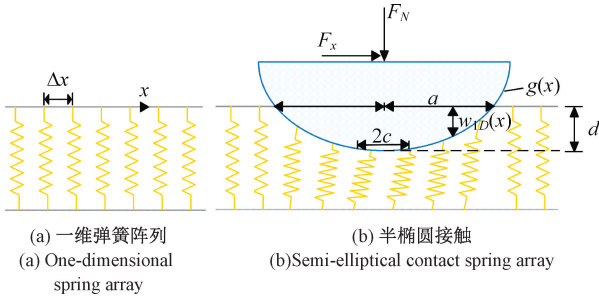


图3 接触模型

Fig. 3 Contact model

表面轮廓,在这里考虑为短轴半径不同的半椭圆, $w_{ID}(x)$ 为在接触区域内位置 x 的法向表面位移。接触区由粘着区 ($0 \leq x \leq c$) 和接触区边界的滑移区 ($c \leq x \leq a$) 组成,接触元件在接触区域的一部分保持相互粘连,而在其他区域则相对于彼此滑动。

定义由法向和切向刚度弹簧组成的弹簧基础^[21]:

$$\Delta k_z = E^* \times \Delta x \quad (1)$$

$$\Delta k_x = G^* \times \Delta x \quad (2)$$

有效弹性模量 E^* 和有效剪切模量 G^* 为:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2 - v_1}{4G_1} + \frac{2 - v_2}{4G_2} \quad (4)$$

式中: v_1 和 v_2 分别为石英晶片和氧化铝陶瓷的泊松比。

将平面轮廓 $g(x)$ 以法向力 F_N 压入弹性基础,在接触区域内位置 x 的法向表面位移等于压痕深度 d 和轮廓形状 $g(x)$ 的差,如下:

$$w_{ID}(x) = d - g(x) \quad (5)$$

由于非粘着性接触的边界 ($x = \pm a$) 表面位移必须为0:

$$w_{ID}(\pm a) = 0 \rightarrow d = g(a) \quad (6)$$

给定坐标 x 处的初始法向力为:

$$\Delta F_N(x) = \Delta k_z w_{ID}(x) = E^* w_{ID}(x) \Delta x \quad (7)$$

将式(7)在接触半径内积分,即可得到法向力 F_N 为:

$$F_N = E^* \int_{-a}^a w_{ID}(x) dx = 2E^* \int_0^a [d - g(x)] dx \quad (8)$$

若法向力已知,接触半径 a 可由该式计算。随后,接触元件在切线方向上发生位移。粘着半径 c 由绝对切向力等于摩擦系数 μ 乘法向力 $\Delta k_x w_{ID}(c)$ 决定:

$$G^* |u^{(0)}| = \mu E^* [d - g(c)] \quad (9)$$

给定坐标 x 处的切向位移为:

$$u_{ID}(x) = \begin{cases} u^{(0)}, & x < c \\ \mu \frac{E^*}{G^*} [d - g(x)], & c < x < a \\ 0, & x > a \end{cases} \quad (10)$$

分布载荷通过切向位移乘 G^* 得到:

$$q_x(x) = \begin{cases} G^* u^{(0)}, & x < c \\ \mu E^* [d - g(x)], & c < x < a \\ 0, & x > a \end{cases} \quad (11)$$

切向力由分部载荷在接触半径范围内积分得到:

$$F_x = 2 \int_0^a q_x(x) dx = \mu [F_N(a) - F_N(c)] \quad (12)$$

式中: $F_N(a)$ 和 $F_N(c)$ 分别为接触半径为 a 和 c 的法向力。

压电元件石英在激励电压的作用下,产生由电场带来的切应力^[22]:

$$T_6 = c_{66}' E_6 - e_{26}' E_2 \quad (13)$$

式中: T_6 为切应力; S_6 为切应变; E_2 为激励电压; c_{66}' 为弹性顺度常数; e_{26}' 为压电应力常数。式(13)表明,对于石英接触,切向力 F_x 由施加在石英的激励电压产生。利用网络分析仪产生激励电压,通过调节网络分析仪的功率改变激励电压。为简化计算,利用有限元分析计算石英在不同激励电压下的切向力,如表1所示。石英与接触元件模型参数如表2所示。

表1 功率与切向力关系

Table 1 Power vs. tangential force

功率/dBm	电压/V	切向力/N
10	2	0.005
0	0.64	0.001 5
-10	0.2	0.000 5
-20	0.06	0.000 13
-30	0.018	0.000 025

表2 模型参数

Table 2 Model parameters

材料	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比
石英	82.80	27.4	0.33
氧化铝陶瓷	350	142	0.23

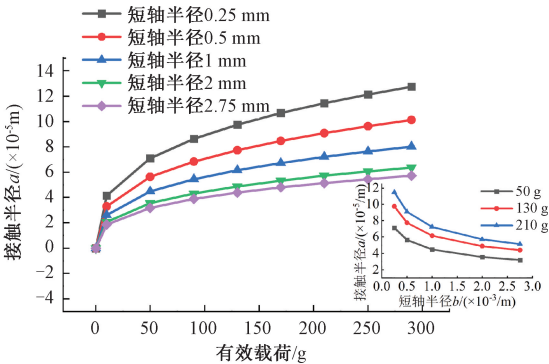
2 石英接触分析

2.1 模型分析

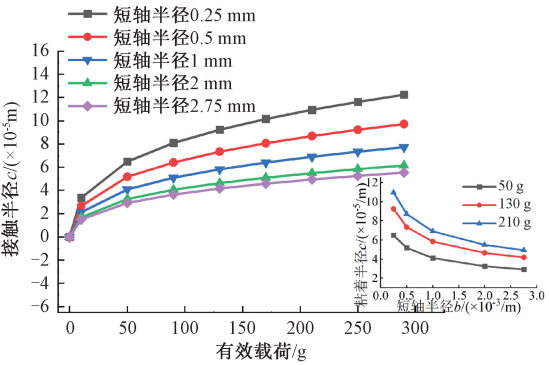
由式(8)可知,接触元件和石英间的接触半径与有效载荷以及接触元件轮廓形状有关。利用该式可计算不同有效载荷下,接触元件短轴半径为0.25、0.5、1、2、2.75 mm时的接触半径,结果如图4(a)所示。随有效载荷的增加,接触半径增加;随短轴半径的增加,接触半径减小。且有效载荷与接触半径呈非线性增加,初始加载

阶段,接触半径迅速增加,有效载荷继续增加,接触半径增加逐渐缓慢。另外,图4(a)中小图为同一载荷下,短轴半径与接触半径的关系。

由式(12)可知,切向力一定时,粘着半径与法向力和接触元件形状相关。利用该式计算网络分析仪功率为0 dBm,即切向力为0.001 5 N时的粘着半径,结果如图4(b)所示。粘着半径小于接触半径,并与接触半径的变化趋势一致,且二者基本呈线性关系。



(a) 有效载荷以及短轴半径与接触半径的关系
(a) Payload and the relationship between the radius of the minor axis and the radius of contact



(b) 有效载荷及轴半径与粘着半径的关系
(b) Payload and minor axis radius as a function of the adhesive radius

图4 不同接触元件尺寸下的接触参数

Fig. 4 Contact parameters for different contact element sizes

利用式(12)还可计算不同切向力下的粘着半径,选择接触元件为短轴半径0.25 mm计算,计算结果如图5所示。结果显示,粘着半径随切向力的减小呈非线性增加。图5中小图为同一载荷下,粘着半径与切向力间的非线性关系,当切向力小于0.000 3 N(激励电压小于0.12 V)时,粘着半径增加量很小。

2.2 接触实验

为明确有效载荷,接触元件形状以及激励电压与石英谐振频率的关系,设计了加载装置,如图6所示。该加载装置利用螺丝进行力的加载,螺丝底部有一个压力传感器,品牌为中诺传力,型号为ZNLBM-IX,量程为0~1 kg。压力传感器底部用螺丝连接了接触元件底座,

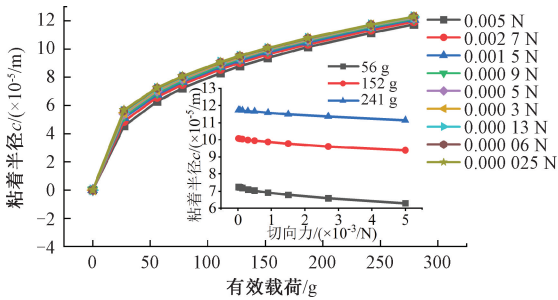


图5 不同切向力下的接触参数

Fig. 5 Contact parameters at different tangential forces

底座粘有接触元件,接触元件与石英正面接触。发射器的反射由Keysight E5061b矢量网络分析仪完成。石英采用品牌INFICON,谐振频率为6 MHz,电极采用银胶水将纯铜丝粘于石英正反两面的金电极边缘,如图6右侧所示。由于在使用过程中石英表面电极发生磨损,石英初始谐振频率将发生微小改变,本文结果中谐振频率变化均以谐振频率偏移量表示。

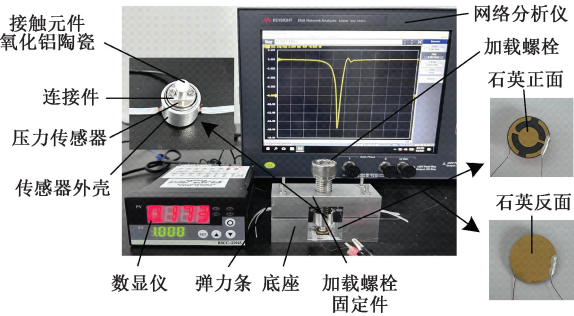


图6 加载装置

Fig. 6 Load the device

采用短轴半径0.25、0.5、1、2、2.75 mm以及圆形片(即短轴半径为0 mm)的氧化铝陶瓷与石英进行接触实验,网络分析仪功率为0 dBm(激励电压为0.64 V)。有效载荷与石英谐振频率关系反射在网络分析仪上如图7所示(小图)。随有效载荷的增大,石英谐振频率往高频移动。

各尺寸接触元件下有效载荷与石英谐振频率偏移量的关系如图7所示。随有效载荷的增加,石英谐振频率偏移量非线性增加。初始加载时,频率偏移量迅速增加,随有效载荷的增加,频率偏移量增加逐渐缓慢,该趋势与模型计算的接触半径以及粘着半径变化趋势一致。另外,随接触元件短轴半径增大,石英频率偏移量减小。但短轴半径为0 mm时(圆形片),频率增量最小。对于短轴半径为0 mm的接触元件,初始加载,谐振频率偏移量随有效载荷的增加而增加,到达一定载荷后,石英谐振频率偏移量呈减小的趋势,后续趋于平稳状态。该实验结

果表明,到达一定载荷后使圆形片与石英间平行度逐渐变差,二者接触范围减小,谐振频率减小,载荷增加到石英最大弯曲呈度二者间平行度几乎不再变化,谐振频率不变。

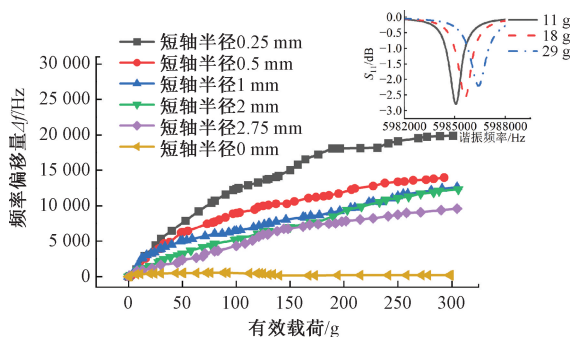


图7 短轴半径以及有效载荷对频率偏移量的影响

Fig. 7 The radius of the minor axis and the effect of the load on the frequency offset

各尺寸接触元件下,石英灵敏度与有效载荷的关系如图8所示。有效载荷越大,石英的灵敏度越低,与接触力与石英的非线性关系相关。短轴半径越小,石英灵敏度越高,但短轴半径为0 mm时灵敏度最低。因此,需将短轴半径加工的越小越好,但不能为0 mm。目前所使用的加工技术最小加工至0.25 mm,灵敏度被限制。

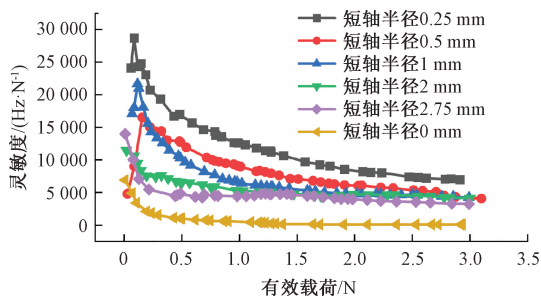


图8 短轴半径以及有效载荷对石英灵敏度的影响

Fig. 8 The radius of the minor axis and the effect of payload on quartz sensitivity

选取有效载荷50、130、210 g,比较不同短轴半径下石英谐振频率偏移量与粘着半径的变化趋势,如图9所示。二者显示出一致的变化规律,说明粘着半径对石英谐振频率存在一定影响,粘着半径越大,谐振频率偏移量越大。

改变网络分析仪功率(改变激励电压)即改变切向力大小。采用短轴半径为0.25 mm的氧化铝陶瓷在不同功率下进行接触实验,实验结果如图10所示。结果表明,网络分析仪功率越小(即切向力越小),频率偏移量越大。且二者具有非线性关系,功率小于-15 dBm时,频率偏移量变化很小。

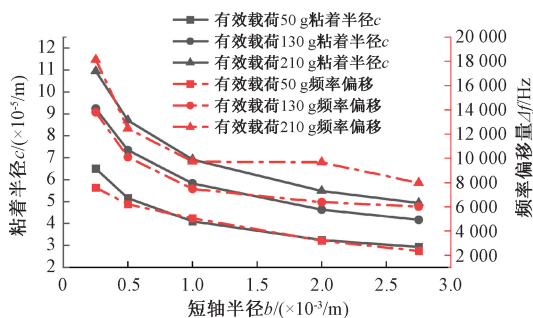


图9 比较不同短轴半径下谐振频率偏移量与粘着半径趋势

Fig. 9 The trend of resonant frequency offset and adhesion radius at different minor axis radii was compared

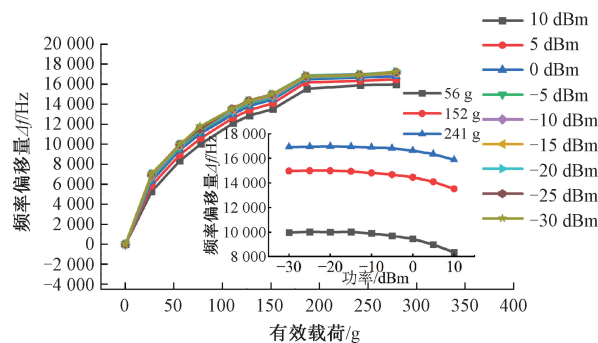


图10 同一接触元件在不同功率下的接触实验

Fig. 10 Contact experiments with the same contact element at different powers

选取有效载荷56、152、241 g,比较不同切向力下石英谐振频率偏移量与粘着半径的变化趋势,如图11所示。二者变化规律一致,再次说明了粘着半径越大,谐振频率偏移量越大。

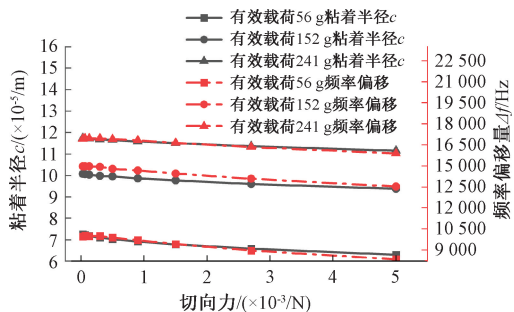


图11 比较不同切向力下谐振频率偏移量与粘着半径趋势

Fig. 11 The trend of resonant frequency offset and adhesion radius under different tangential forces is compared

综上所述,石英谐振频率变化与粘着半径具有相关性。首先,有效载荷与石英谐振频率偏移呈非线性增加。经模型分析,其与有效载荷与粘着半径间非线性增加相关。其次,椭圆柱接触元件短轴半径越小,石英谐振频率

偏移越大。经模型分析,椭圆接触元件短轴半径越小,粘着半径越大。最后,激励电压越小(切向力越小),石英谐振频率偏移越大。经模型分析,切向力越小,粘着半径越大。

3 无源无线应变传感系统设计

3.1 无源无线应变传感系统概述

传感系统如图 12 所示,该系统由接收器和发射器组成,发射器包括发射线圈,谐振电容和网络分析仪,接收器包括接收线圈和体声波传感器。根据上述的石英接触力学研究对体声波应变传感器进行开发,该传感器可将被测结构的形变转化为石英上表面有效载荷的变化,从而改变石英谐振频率。

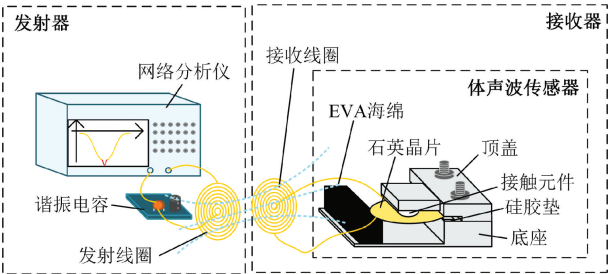


图 12 无源无线应变传感系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of a passive wireless strain sensing system

体声波传感系统的等效电路如图 13 所示。无线传输由接收线圈和发射线圈间的磁耦合完成,当接收器和发射器的两线圈距离很近时,由发射线圈引起的磁通量在接收线圈中感应出电压,从而在接收器中产生电流 I_2 。同时,接收器线圈引起的磁通量也在发射器线圈产生感应电压并改变发射器的电流 I_1 。谐振电容器用于补偿发射器的阻抗。电容和发射线圈可产生 LC 谐振,减小发射器在接收器的谐振频率 f_{s2} 下的电抗,使发射器的谐振频率 f_{s1} 近似等于 f_{s2} 。

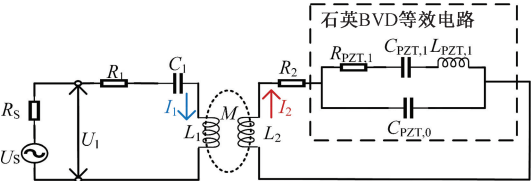


图 13 无源无线应变传感系统等效电路

Fig. 13 Passive wireless strain sensing system equivalent circuit

3.2 体声波传感器设计

体声波传感器由一个传力结构和一个 6 MHz 的石英晶片组成,实物如图 14 所示。传力结构包括底座、顶盖、

氧化铝陶瓷、EVA 海绵以及薄硅胶垫。其中底座与顶盖采用 SAL 3D 打印机制造,型号为中瑞 SLA660,经 UV 汞灯固化后,成型件抗弯模量为 2 688~2 790 MPa,抗弯强度为 66~73 MPa,硬度为 88。传感器底座采用胶水(LOCTITE 403)粘于悬臂梁上。石英一端边缘放置于底座凹槽处的薄硅胶垫上,另一端边缘放置于与底座粘连的 EVA 海绵上(硬度 60 度,邵氏硬度 C 型测量,误差 ± 5 度),薄硅胶垫与 EVA 海绵均可对薄石英晶片起到保护作用。接触元件位于顶盖上,底座与顶盖采用螺丝紧固。该传感器对被测表面的弯曲十分敏感,初始状态,接触元件对石英施加一个预紧力,海绵被微压缩。被测表面向下弯曲时,海绵压缩量减小,氧化铝陶瓷对石英表面施加的载荷减小,石英谐振频率减小;当被测表面上弯曲时,海绵压缩量增大,氧化铝陶瓷对石英表面施加的载荷增大,谐振频率增大。

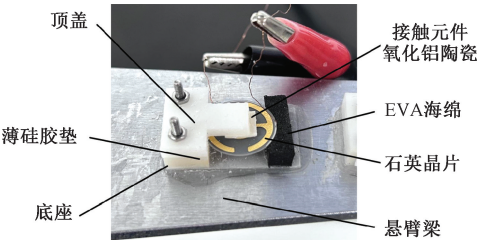


图 14 体声波传感器测试

Fig. 14 Bulk acoustic wave sensor testing

对所设计的传感器进行测试,网络分析仪功率为 0 dBm(激励电压为 0.64 V)。根据接触模型以及接触实验所分析的结果,接触元件采用短轴半径为 0.25 mm 的氧化铝陶瓷。在悬臂梁自由端逐个施加 3 个 1 000 g 的砝码,石英的谐振频率变化如图 15 所示。随砝码的增加,石英谐振频率减小,从 1 000 g 砝码到 3 000 g 砝码石英产生的频率偏移量分别为 393.75、768.75、1 018.75 Hz。采用上述实验步骤继续进行 5 组重复实验,方差分析结果如图 15 所示(小图)。

重复实验结果以施加 3 个砝码产生的频率偏移量表示,重复性以单次测量的相对标准偏差表示。

$$RSD = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - c)^2}{n - 1}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: c 为测量平均值, x_i 为第 i 次测量的值, n 为测量次数。经计算,6 次重复实验相对标准差结果为 4.91%,表明重复性良好。

为再次说明石英谐振频率与接触元件形状相关,将传感器上的接触元件更换为短轴半径为 0.5、1、2、2.75 mm 的氧化铝陶瓷,重复上述实验。每一尺寸进行 6 组重复实验,实验结果取 6 组实验的平均值,并进行方

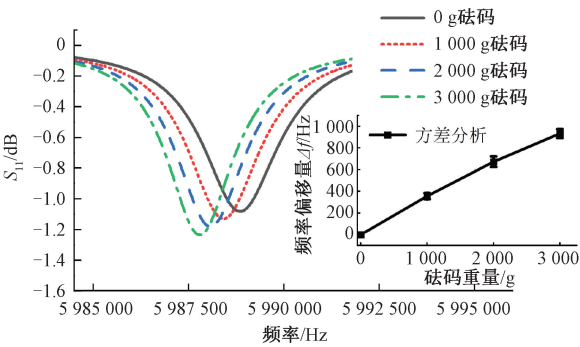


图 15 体声波传感器实验

Fig. 15 Experiment of a bulk acoustic sensor

差分析,结果如图 16 所示。结果与模型分析结果一致,石英表面的载荷越小(应变越大),谐振频率越往低频移动;接触元件短轴半径越小,石英产生的频率偏移量越高,传感器的分辨率越高。

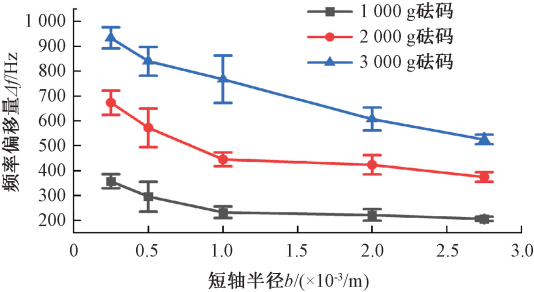


图 16 不同短轴半径下体声波传感器实验

Fig. 16 Experiments on lower body acoustic wave sensors with different minor axis radii

3.3 无线传输实验

对所设计的无源无线体声波应变传感系统进行测试,搭建系统如图 17 所示。谐振电容由多个并联电容以及一个可调电容组成,发射器和接收器均采用电感为 $6.3\text{ }\mu\text{H}$,直径为 43 mm 的线圈。发射器与网络分析仪、谐振电容相连,接收器与体声波传感器相连。传感线圈粘贴于悬臂梁下侧,发射线圈位于传感线圈下侧 5 cm 。

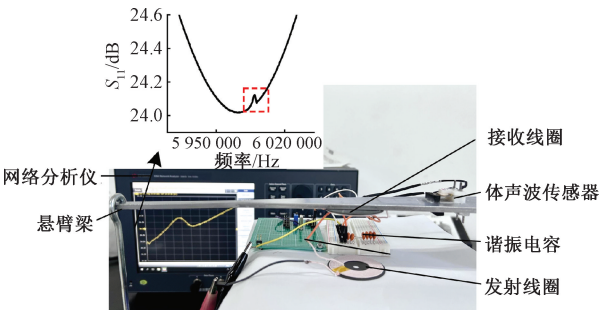
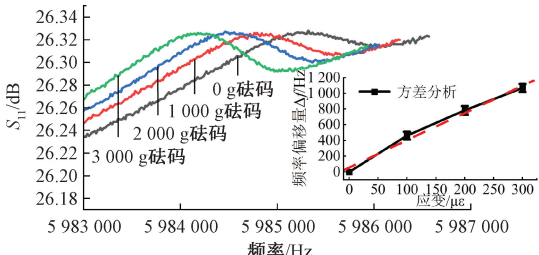


图 17 无线传输实验

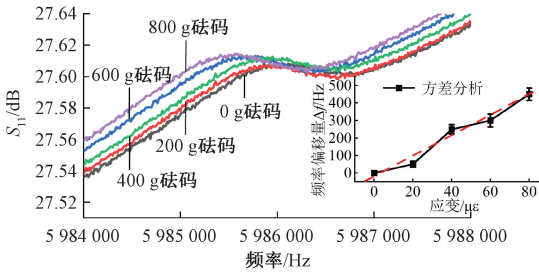
Fig. 17 Wireless transmission experiments

网络分析仪用于采集不同频率下的反射系数 S_{11} 。接收线圈远离发射线圈时,信号为发射器产生的一条宽带抛物线,峰值位置即为发射器的谐振频率。当接收线圈与发射线圈靠近时,信号为体声波传感器的感应信号与发射器信号的叠加,如图 17 所示(小图)。表现为发射器产生的宽带抛物线(带宽约为 $612\text{ }500\text{ Hz}$,品质因数约为 10)旁有一条由传感器感应信号产生的窄带抛物线(带宽约为 844 Hz ,品质因数约为 $7\text{ }095$)。通过测量接收器的传感器感应信号(方框中信号)谐振频率改变判断被测材料的表面应变。

网络分析仪功率为 0 dBm (激励电压为 0.64 V),在悬臂梁右侧逐个施加 3 个 $1\text{ }000\text{ g}$ 砝码,进行 3 组重复实验。放大接收器所产生的峰值信号,如图 18(a)所示。 $1\text{ }000\text{ g}$ 的砝码可对悬臂梁产生 $100\text{ }\mu\epsilon$ 的应变,传感器分辨率约为 $4.0\text{ Hz}/\mu\epsilon$,重复性实验显示 RSD 为 5.47% 。随后在悬臂梁右侧逐个施加 4 个 200 g 砝码,每个砝码可对悬臂梁产生 $20\text{ }\mu\epsilon$ 的应变,进行 3 组重复实验,如图 18(b)所示。传感器分辨率约为 $4.8\text{ Hz}/\mu\epsilon$,重复性实验显示 RSD 为 2.48% 。经测试传感器的最大可测量应变为 $600\text{ }\mu\epsilon$ 。石英频率偏移量与应变呈非线性增加,这是由海绵的非线性伸长以及接触力与石英间的非线性关系共同决定的。初始预紧力决定海绵的固定可伸长度,海绵伸长量越大,石英表面的载荷越小。产生小应变时,海绵可伸长量较大,较大应变时,海绵的可伸长量减小,导致分辨率有所差异。



(a) 大应变
(a) Large strains



(b) 小应变
(b) Small strains

图 18 不同应变下的无线传感实验

Fig. 18 Wireless sensing experiments under different strains

由于系统存在内阻,激励电压经无线传输后将减小。

可知,激励电压越小,频率偏移量越大,但电压<0.12 V 后(功率-15 dBm),频率偏移量变化不明显。因此,选用功率为-10、0、10 dBm(激励电压为 0.2、0.64、2 V),对传感器进行有线和无线传输实验,传感距离 5 cm。每组进行 3 次重复实验,频率偏移量为 3 次实验结果的平均值,如表 3 所示。结果表明无线传输分辨率均大于有线传输,施加在石英上的激励电压越小,粘着半径越大,频率偏移量越大。

表 3 不同激励电压下的传感器有线与无线信号传输

Table 3 Wired and wireless signal transmission of sensors at different excitation voltages

Hz

应变	0.2		0.64		2	
	有线	无线	有线	无线	有线	无线
100 $\mu\epsilon$	359.4	515	294.3	460	335.4	385
200 $\mu\epsilon$	721.7	760	622.6	785	574.6	715
300 $\mu\epsilon$	1 106.6	1 071.6	959.4	1 068.3	789.8	1 060
分辨率	3.6	4.2	3.1	4.0	3.0	3.7
	Hz/ $\mu\epsilon$	Hz/ $\mu\epsilon$	Hz/ $\mu\epsilon$	Hz/ $\mu\epsilon$	Hz/ $\mu\epsilon$	Hz/ $\mu\epsilon$

4 结 论

本文提出一种新型无源无线应变传感器,阐述了其原理和设计。重点对石英接触理论进行研究,建立了石英与接触元件之间的分析模型,研究了有效载荷,激励电压,接触元件形状与石英谐振频率变化的关系。利用 3D 打印技术对传感器进行制备,在实验室条件下对无源无线应变传感器进行测试,评估了传感器的性能,展示了传感器的可行性。

传感器的分辨率与接触元件与石英间的粘着半径有关,粘着半径越大,石英频率偏移量越大,石英灵敏度越高。后续工作将增加数据量,给出粘着半径与谐振频率的经验公式。另外,接触元件短轴半径尺寸限制了传感器的分辨率,在之后的工作中将制备短轴半径更小的接触元件以提升传感器分辨率。在未来,无源无线应变传感系统将会与无人机结合,通过无人机承载便携式网络分析仪,控制无人机靠近目标结构获得传感器信号,以实现大型结构应变测量。

参考文献

[1] ONG J B, YOU ZH P, MILLS-BEALE J, et al. A wireless, passive embedded sensor for real-time monitoring of water content in civil engineering materials[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(12): 2053-2058.

[2] 徐壮壮,文玉梅,邵壮,等. 通用无源超高频射频传感

标签[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 158-165.

XU ZH ZH, WEN Y M, SHAO ZH, et al. Universal passive UHF radio frequency sensing tags[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 158-165.

[3] ZHANG C, WANG L F, HUANG J Q, et al. An LC-type passive wireless humidity sensor system with portable telemetry unit[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(3): 575-581.

[4] 王军峰,李平,周志坤,等. 无源无线声表面波谐振器温度传感系统硬件构成[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S2): 155-157,182.

WANG J F, LI P, ZHOU ZH K, et al. The hardware composing of wireless temperature sensing system using passive SAW resonator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S2): 155-157,182.

[5] 许福佳,苏淑靖,张丽丽,等. 谐振式无线无源温度传感器的高温性能优化与设计[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(9): 905-910.

XU F J, SU SH J, ZHANG L L, et al. Optimization and design of high temperature performance of resonant wireless passive temperature sensor[J]. Micronano-electronic Technology, 2022, 59(9): 905-910.

[6] STONEY R, DONOHOE B, GERAGHTY D, et al. The development of surface acoustic wave sensors (SAWs) for process monitoring[J]. Procedia Cirp, 2012, 1: 569-574.

[7] WANG W, XUE X F, FAN SH Y, et al. Development of a wireless and passive temperature-compensated SAW strain sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 308: 112015.

[8] CHAKARAVARTHI G, LOGAKANNAN K P, PHILIP J, et al. Reusable passive wireless RFID sensor for strain measurement on metals[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 5143-5150.

[9] KIM J, WANG Z, KIM W S. Stretchable RFID for wireless strain sensing with silver nano ink[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(12): 4395-4401.

[10] HUANG Y, DONG W, HUANG T, et al. Self-similar design for stretchable wireless LC strain sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 224: 36-42.

[11] TU C, LIU C L, LEE M S, et al. Passive and wireless strain sensor based on LC circuit with lamination fabrication[C]. 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2017: 303-306.

[12] WANG Y, TAN Q L, ZHANG L, et al. Wireless passive LC temperature and strain dual-parameter sensor[J].

- Micromachines, 2020, 12(1): 34.
- [13] MOHAMMAD I, HUANG H. Monitoring fatigue crack growth and opening using antenna sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(5): 055023.
- [14] XIE L Q, ZHU X F, LIU Z R, et al. A rebar corrosion sensor embedded in concrete based on surface acoustic wave[J]. Measurement, 2020, 165: 108118.
- [15] OGI H, OKAMOTO K, NAGAI H, et al. Replacement-free electrodeless quartz crystal microbalance biosensor using nonspecific-adsorption of streptavidin on quartz[J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(10): 4015-4020.
- [16] ZHOU L, NAKAMURA N, NAGAKUBO A, et al. Highly sensitive hydrogen detection using curvature change of wireless-electrodeless quartz resonators [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(17): 171901.
- [17] GROSSMANN R. Wireless measurement of tire pressure with passive quartz sensors [C]. 1999 Symposium on Smart Structures and Materials, 1999: 214-222.
- [18] 徐明浩, 聂宝清, 寇文哲. 基于 RFID 的无线无源柔性压力传感器研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(11): 1695-1700.
- XU M H, NIE B Q, KOU W ZH. Research on RFID-based wireless passive flexible pressure sensors [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(11): 1695-1700.
- [19] LASCHITSCH A, JOHANNSMANN D. High frequency tribological investigations on quartz resonator surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(7): 3759-3765.
- [20] BERG S, PRELLBERG T, JOHANNSMANN D. Nonlinear contact mechanics based on ring-down experiments with quartz crystal resonators [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 118-126.

- [21] POPOV V L, HESS M, WILLERT E. Handbook of Contact Mechanics: Exact Solutions of Axisymmetric Contact Problems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [22] 王矜奉, 苏文斌, 王春明, 等. 压电振动理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 88-91.
- WANG J F, SU W B, WANG CH M, et. al. Piezoelectric vibration theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2011: 88-91.

作者简介



李子帆, 2021 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为无源无线应变传感器。

E-mail: 1436241601@qq.com

Li Zifan received her B. Sc. degree in 2021 from China Jiliang University. Now, her is a postgraduate student of China Jiliang University, Her main research interests is passive wireless strain sensor.



胡斌(通信作者), 2000 年于华中理工大学获得学士学位, 2004 年于清华大学获得硕士学位, 2017 年清华大学获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院研究员, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: hubin@csei.org.cn

Hu Bin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2000 from Huazhong University of Science and Technology, received his M. Sc. degree in 2004 from Tsinghua University, received his Ph. D. degree in 2017 from Tsinghua University, now he is a researcher of China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests is Non-destructive testing technology.