

石英压电晶体谐振式力学传感器

巫晟逸^{1*}, 梁佳辉^{1,2}, 刘秋实¹, 丁岗寅¹, 陈庆盈³, 付浩³, 王溪溪¹, 熊宣明¹, 徐俊俊¹,
王骥², 赵岷江¹

¹台晶(宁波)电子有限公司, 浙江 宁波

²宁波大学机械工程与力学学院, 压电器件技术实验室, 浙江 宁波

³中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 先进制造技术研究所, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年4月24日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

成功以方型石英谐振式晶体作为力学传感器敏感单元芯片, 使用金属封装结构进行环境隔离, 验证并提高其精度、灵敏度、线性、重复性与降低迟滞等特性; 在可靠度方面, 也验证了环境温湿度、气密性、力学疲劳、掉落与振动等可靠度与稳定性, 可大量应用于机器人、新能源车、航天航空与智能制造等产业。

关键词

石英压电晶体, 谐振式, 力学传感器, 可靠度

Quartz Crystal Piezoelectric Resonant Force Sensors

Chengyi Wu^{1*}, Jiahui Liang^{1,2}, Qiushi Liu¹, Gangyin Ding¹, Chinyin Chen³, Hao Fu³,
Xixi Wang¹, Samson Xiong¹, Junjun Xu¹, Ji Wang², Minchiang Chao¹

¹TXC (Ningbo) Corporation, Ningbo Zhejiang

²Piezoelectric Device Laboratory, School of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

³Institute of Advanced Manufacturing Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Ningbo Zhejiang

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

Successfully used the square quartz resonant crystal as the sensor head chip of the force sensors.

*通讯作者。

文章引用: 巫晟逸, 梁佳辉, 刘秋实, 丁岗寅, 陈庆盈, 付浩, 王溪溪, 熊宣明, 徐俊俊, 王骥, 赵岷江. 石英压电晶体谐振式力学传感器[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 551-559. DOI: 10.12677/jsta.2025.133054

Using a metal package structure for environmental isolation. Verify and improve its accuracy, sensitivity, linearity, repeatability, and hysteresis reduction characteristics. In terms of reliability, the reliability and stability of environmental temperature and humidity, air tightness, mechanical fatigue, drop and vibration are also verified. It can be widely used in robots, new energy vehicles, aerospace and intelligent manufacturing industries.

Keywords

Quartz Piezoelectric Crystals, Resonant, Force Sensors, Reliability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石英晶体(Quartz Crystals)是一种二氧化硅(SiO_2)晶体,其具备压电(Piezoelectric Effect)特性,当晶体受到外部机械应力时,其表面产生电荷,可作为力传感器,常使用于力与力矩等传感器应用,称为石英压电传感器(Quartz Piezoelectric Crystal Sensor),石英晶体有不同的切型,如 AT、BT、SC 等,AT 切型具备较佳的温度稳定性,常被使用于传感器晶体设计中,因此石英压电传感器拥有高稳定性、高精度、高温稳定性等特性,适合于振动或是动态状态中进行量测,因其施力随时间改变而不中断,石英晶体可持续产生压电效应而产生电讯号,然而在静态测量时,无持续施加的外力,使其无法保持稳定的输出信号,压电效应产生的电荷则随时间的推移而泄漏掉,传感器无法维持恒定的输出,因此发展出更进步的石英压电谐振式(Quartz Crystal Resonator)力学传感器,其使用连续的逆压电效应(Inverse Piezoelectric Effect)作为感应原理,当重复施加电场于晶体时,电荷的生成和测量在短时间内完成,其产生往返动态形变与振荡基础频率,受到外部应力后,改变了振荡基础频率,产生振荡频率差值,作为传感器的线性量测基础,可作为高精度、高灵敏度、快速响应、低电磁干扰与迟滞的力学传感器(Force Sensors),可应用于机器人、新能源车及制造业等[1]-[4]。

2. 石英压电谐振式力学传感器简介

2.1. 石英力学传感器的发展

从石英晶体的压电效应(Piezoelectric Effect)与负压电效应(Inverse Piezoelectric Effect)的发现开始,其在电子元器件的频率控制及通讯领域得到了广泛应用,并且随着技术的持续发展,和其高精度、高稳定性,可微小化、制造简单等优势,使得石英晶体在传感器上的应用也逐渐增加。至今为止,石英晶体敏感单元已发展出多种形式,包含音叉式、圆片式与方片式等。2000 年,山东大学岳书彬等人,对双端石英音叉横向弯曲振动的原理、力频特性、激励方式、电极的设置进行了研究与分析,并初次将石英音叉作为力敏单元进行相关研究[5]。2005 年,美国学者 J. M. Van Ruitenbeek 等人使用石英音叉谐振器作为力传感器的敏感单元,应用于原子力的测量,并成功实现对铂原子的首次测量[6]。2008 年,潘安宝等人,利用石英音叉作为敏感单元,制作了英谐振式压力传感器,传感器量程 0~120 kPa,中心频率为 (40 ± 4) kHz,精度可达 0.05% [7]。利用石英音叉作为力敏感单元,可获得高精度以及高灵敏度,但由于石英音叉结构复杂,且薄、易碎,因此只能作为微小量程的力敏感单元,同时其结构加工困难,制造成本高等问题,后续逐步发展了较简单的结构。使用圆形石英芯片,在加工工艺上变的容易,且不易破碎,可用

于大量程力敏感单元,最早是由国外学者 Bottom 提出,提到晶体中的应力会引起振动频率的变化,并且频率偏差变化与施力大小成线性比例关系[8]。J. M. Ratajsk 等人提出了著名的 Ratajsk 归一化系数 K_f , 其对圆形石英芯片的力频变化关系进行详细的描述[9], 如公式(1):

$$S_{\text{圆}} = K_f \times \frac{f^2}{D \times n} \quad (1)$$

式中, f 为石英芯片的基频(Hz)、 S 为力频系数、 D 为圆形芯片直径、 n 为谐波次数、 K_f 为石英芯片的力敏系数, 该系数只与石英芯片的切型以及加力角度有关系, 对于不同的切型, 其系数值有所不同[10]。方形石英芯片与圆形比较起来, 在加工工艺上只需要简易切割即可, 且容易小型化, 在安装的时候, 也可减少安装难度, 因此方形石英芯片更具备集成化与智能化的优势。2007 年, 日本 Ayumi Asakura 等人利用方形石英芯片设计出微型扁平的力感测机构, 其结构简单、体积小、灵敏度高, 可用于医疗、人体动态接触力检测等领域, 在温度和频率稳定性方面也具有优越的特性[11]。2020 年, Yuichi Murozaki 采用真空封装的方形石英芯片, 制作宽量程的力传感器, 可实现对体重、心跳和呼吸等信号检测, 测量范围为 0.27 mN~1180 N, 检测误差率达 0.6% [12]。利用方形石英芯片在力传感器上的优势, 本文将应用于机器人一体化关节力与力矩传感器产品上, 针对石英芯片本身的力学与力频关系进行研究, 并设计力与扭力传感器结构, 以符合市场需求。

2.2. 石英谐振式力学传感器的原理与优势

使用方形石英晶体作为力学传感器的敏感单元, 引用圆形芯片的力频系数计算方式, 可解释方形石英芯片的计算原理, 根据石英切型和温度稳定特性, 选择 AT 切型($\theta = 35.15^\circ$)、25 MHz 为基础振动频率(基频)、工作宽温度范围($-10^\circ\text{C} \sim +75^\circ\text{C}$), 加工方便可用于批量生产(图 1), 基于逆压电效应原理, 在 AT 切型石英芯片两侧镀上金或银电极并通电施加电场后, 石英芯片产生基础与多种谐振振动跟模态, 以厚度剪切振动模态作为主要力学感应基础振动模态, 当石英芯片受到压力与拉力外力作用时, 其基频产生改变, 以受压为例, 振动频率随着压力增加逐步增加, 当其收到拉力作用时, 振动频率随着拉力增加而逐步减少, 使用有限元计算, 在方形芯片与圆形芯片各自施加径向力后, 对比两者表面应力, 其应力比例在 1.27 至 1.35 之间, 同时调整方形石英的长宽比(长为 B 、宽为 A), 可获取 $A = 1.95 - 0.6B^{0.5}$ 的关系, 可修正公式(1)为公式(2), 因此压力、拉力与振动频率皆可形成线性关系, 进而用作力学传感器使用。

$$S_{\text{方}} = \frac{K_f \times f^2}{n \times A} \times \frac{1}{\sqrt{1.95 - 0.6 \left(\frac{A}{B} \right)}} \quad (2)$$

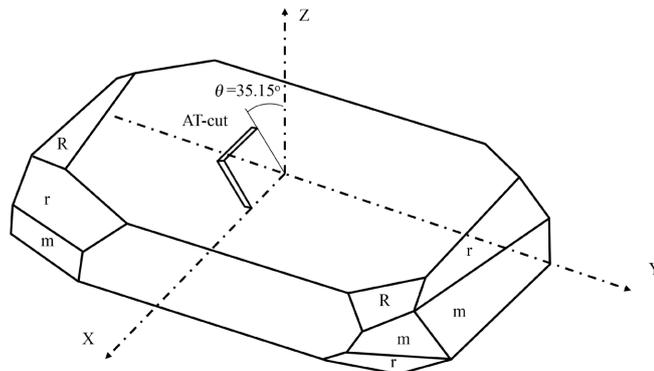


Figure 1. Diagram of the AT-cut quartz crystal
图 1. AT 切型石英晶体图

如表 1, 比对市场上各种力学传感器, 包含电阻应变式、光学式、电容式、电磁式、电感式、压电与压电谐振式等, 电阻应变式力学传感器结构简单、技术较成熟、可设计量程范围大、但灵敏度较低、长时间使用会有蠕变、容易受到温度的影响而产生漂移、需要使用补偿电路减少误差与放大信号, 常用于电子称重产品; 光学式力学传感器, 如光纤光栅传感器, 其抗干扰能力强、适合复杂电磁环境、可单点分布检测、耐腐蚀、适合恶劣环境, 但其光谱分析仪设备昂贵, 安装工艺也较复杂; 电容式力学传感器的分辨率极高, 可达纳米级、温度稳定性高、低功耗, 但其容易受到电磁干扰、湿度影响大、量程小、信号处理电路复杂; 电磁式力学传感器, 可实现高精度测试量, 分辨率达到微牛(μN), 但其体积庞大、响应较慢、可靠度较低; 电感式力学传感器在理论上, 其分辨率没有极限、线性度可达到 0.1%FS, 但其体积大、需要交流电激励、电磁屏蔽要求高、低可靠度、动态响应在 200 Hz 以下无法量测; 压电式力学传感器在高频范围(MHz)的响应非常好, 适合动态力测量、灵敏度高、高刚性、形变量小, 可耐高温、但无法测量静态力; 压电谐振式基于逆压电效应原理进行力学感应, 可同时拥有压电式力学传感器优势, 同时也能在静态状态下进行检测, 响应速度快, 但需要持续供电激励, 对比市场上大部分力学传感器产品, 谐振式力学传感器在敏感单元与信号处理单元等功能上优于其他产品, 同时在微小化、智能化、多样集成化等方面应用, 也具备了相当大的发展空间。

Table 1. Comparison of the advantages and disadvantages of different force sensors
表 1. 不同力学传感器优缺点对比

力学传感器种类	感应原理	主要优点	主要缺点
电阻应变式	电阻量改变	技术成熟、量程范围大	信号微弱
光学式	光学量变化(光电效应)	高可靠度与动态响应	价格昂贵
电容式	电容量变化	高灵敏度与环境适应性	讯号电路复杂
电磁式	磁通量变化(霍尔效应)	功耗小、结构简单	误差大、体积大
电感式	电感量变化	高线性度与重复性	低可靠度、无法动态量测
压电式	电荷量变化(压电效应)	高动态响应与精度	无法静态量测
压电谐振式	频率量变化(逆压电效应)	高精度、动态响应、抗干扰与高低温环境使用	需要持续供电激励

2.3. 石英力学传感器设计

石英力学传感器在设计面可分为三个主要步骤, 包含: 1) 石英芯片的尺寸、结构与电极设计、2) 封装结构设计、3) 弹性体结构设计, 如图 2(a), 首先使用有限元分析软件进行石英芯片设计, 以 AT 切型石英材料为基础, 设定长、宽、厚度分别为 3.5 mm、1.8 mm、66.7 μm , 经由计算后获得中心振动频率为 25.8 MHz, 整体振动能量集中于芯片中央部分, 基于能阻理论, 电极范围内可产生振动频率, 因此可将电极位置设计于芯片中央。如图 2(b), 为石英力学传感器敏感单元设计图, 使用金属材料, 如钢、铁、铝等材料制作封装壳体, 如图 2(c), 为图 2(b)的爆炸图, 包含上盖、承载体、石英芯片、基座与电极, 石英芯片经由上下两片承载体将其固定住, 并将基座与上盖将上下承载体粘合住, 基座上电极经由银胶与石英芯片上的电极相连接, 图 2(d)为取走上盖后观察的内部情况, 包含黄金电极与基座电极之间使用银胶连接细节, 图 2(e)为其背部图, 在其上方焊上起振或是除频 IC。

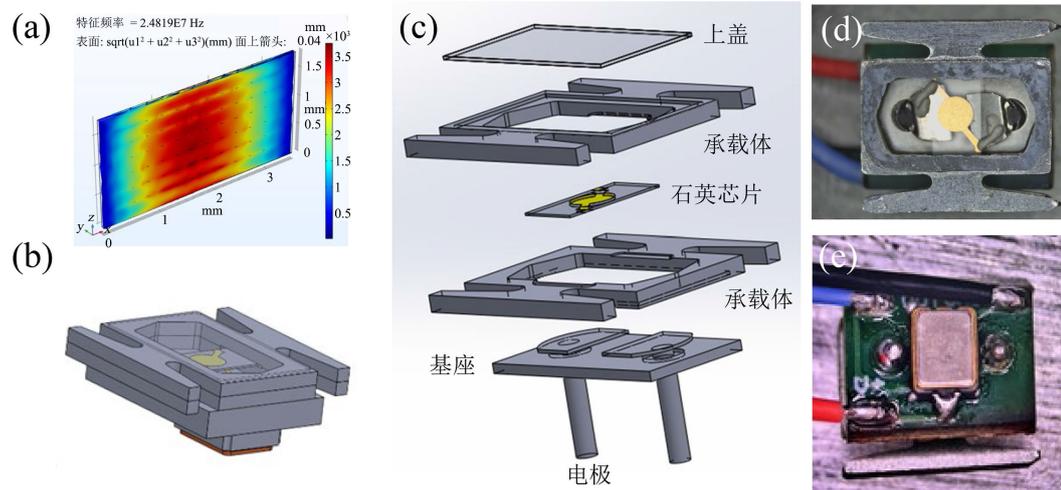


Figure 2. Design of the quartz crystal chips and sensor head
图 2. 石英芯片与敏感单元设计

3. 石英压电谐振式力学传感器测试方法

图 3 为石英谐振式力学传感器测试方法，图 3(a)将力学传感器单元接上电线，将蓝、黑、红电线分别与图 3(b)中的 Out、GND 与 V+ 连接，并使用 250B 石英晶体测试系统与网络分析仪 KEYSIGHT E5063A 进行讯号读取，使用图 3(c)中，静重力式力学检测设备(FE-J02)来验证力学传感器与施加外力的相关性，将石英谐振式力学传感器放置于静重力式检测设备上方的固定工装中，如图 3(d)，将传感器单元放置于固定工装中，静重力式检测设备开始增加砝码重量，外力依照红色箭头方向施加与传感器敏感单元上，经由 250B 石英晶体测试系统可读取传感器频率值，因此可将外力与频率绘制成线性相关曲线并进行分析。

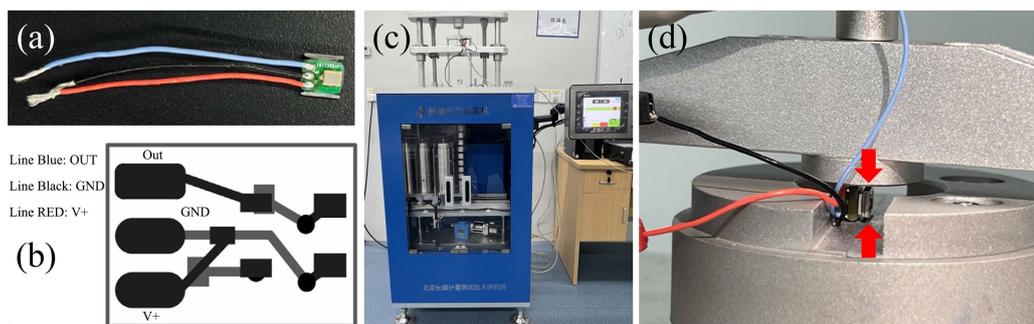


Figure 3. Force testing method for quartz resonator sensors
图 3. 石英谐振式力学传感器测试方法

力学测试结果

首先进行主频确认，将石英谐振式力学传感器敏感单元与网络分析仪 KEYSIGHT E5063A 连接，将其仪器中心频率设置为 24 MHz，带宽为 100 kHz，在室温 25℃ 的环境下进行记录传感器频率数据、带宽、波形。使用计频器 KEYSIGHT 53230A 进行精度测试(精度定义为最大误差/量程)，连接上敏感单元后，再将敏感单元放置于静重力式力学检测设备(FE-J02)上方固定工装中，可逐步增加砝码种类，分别为 6 N、9 N、12 N、15 N、18 N、21 N，以主频率为 24.96 MHz (24 MHz \pm 1 MHz 范围)并经过除频 IC (1/8 频率)

处理的样品为案例, 测试结果如表 2 所示, 使用拟合计算公式 $y = 115.662x + 3113253$ 进行精度计算, 其中 y 为传感器测试的频率值, x 为施加传感器的力值。将案例样品放置于恒温箱(爱斯佩克 GPU-4)中, 设定为 25°C , 进行分辨率测试, 定义为在恒温与恒力条件下, 计算频率的标准差, 使用拟合计算公式求一阶导数的倒数, 得到器件灵敏度(单位 N/Hz)为 $1/115.662$ N/Hz, 分辨率为器件灵敏度(单位 N/Hz) \times 频率最低分辨率/量程, 结果为 $1/115.662$ N/Hz \times 0.05 Hz/21N = 0.0021% , 接近万分之一水平。

Table 2. Force testing results of sensor head

表 2. 敏感单元力学测试结果

力值(x)/N	频率(y)/Hz	计算值/N	误差/N	精度/% F.S.
6	3,113,945	5.984609	-0.015	-0.073
9	3,114,292	8.986830	-0.013	-0.063
12	3,114,640	11.989988	-0.010	-0.048
15	3,114,986	14.984832	-0.015	-0.072
18	3,115,333	17.986718	-0.013	-0.063
21	3,115,681	20.990602	-0.009	-0.045

为了求得其他传感器参数, 重新选取 10 个样品进行力学测试, 如表 3 所示, 经由量程 0~50 N 测试范围, 每 2 N 量测一次求得的结果, 将得出的频率(单位 Hz)根据拟合计算公式求出力值(单位 N), 利用拟合后的数值进行计算对应参数: 示值误差 = (测量值 - 真实值)/真实值; 重复性 = (进程示值最大值 - 进程示值最小值)/进程示值平均值; 进回程差 = (回程示值平均值 - 进程示值平均值)/进程示值平均值。

Table 3. Force testing results of sensor head

表 3. 敏感单元力学测试结果

编号	频率	示值误差	重复性	进回程差
H104	3.125 MHz	0.122%	0.768%	0.569%
H125	3.123 MHz	0.611%	0.436%	0.361%
H151	3.111 MHz	0.136%	0.884%	0.638%
H164	3.125 MHz	0.050%	0.408%	0.578%
H166	3.111 MHz	0.478%	0.603%	0.290%
H169	3.113 MHz	0.756%	0.314%	0.510%
H171	3.125 MHz	0.367%	0.780%	0.243%
H225	3.125 MHz	0.100%	0.400%	0.567%
H226	3.121 MHz	0.450%	0.846%	0.361%
H232	3.125 MHz	0.256%	0.401%	0.452%

4. 力学传感器可靠度验证

可靠度验证

在力学传感器领域中, 除了精度、线性度、重复性误差、迟滞等基本功能要求外, 最重要的莫过于

可靠度与稳定性的需求,在石英谐振式力学传感器的可靠度测试中,列举了包含温湿度测试、气密测试、力学疲劳测试与自由跌落等测试。在恒温恒湿测试中,参考 JB/T 7483-2005 标准进行测试(6 个样品),以环境温度 85℃,环境湿度 85% RH,持续时间 168 小时做观察,如图 4(a)所示,重新以静重力式力学检测设备(FE-J02)验证传感器敏感单元性能,以图 4(b)示值误差、图 4(c)重复性、图 4(d)进回程差三种参数观察,变化量不超过 2%范围。

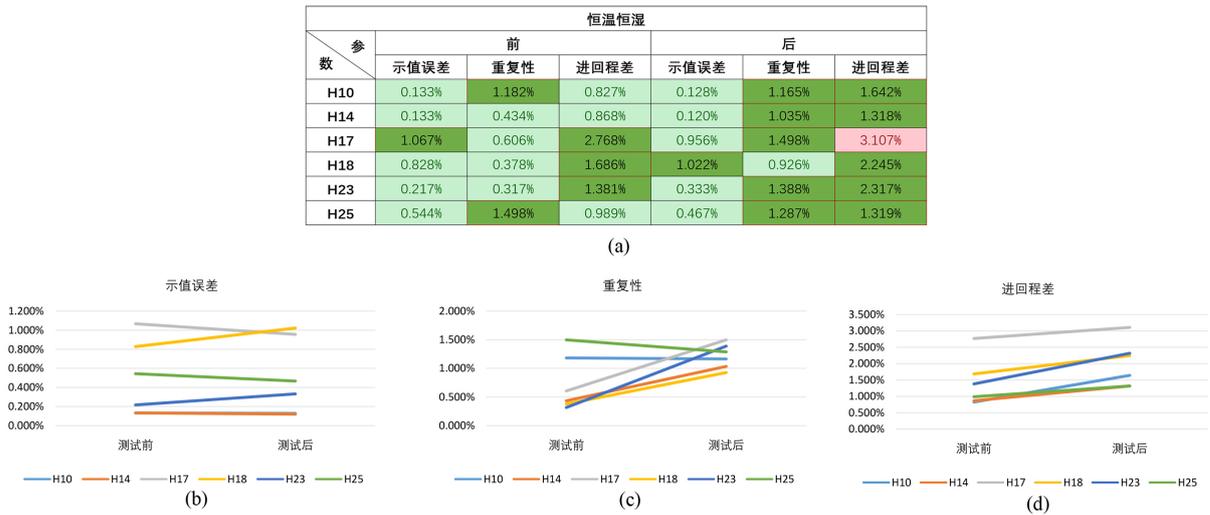


Figure 4. Constant temperature and humidity test of sensor head
图 4. 敏感单元的恒温恒湿测试

力学传感器经常在恶劣环境中使用,因此需要将石英感应芯片与环境隔绝,藉以减少环境对于芯片在工作过程中的干扰,需要使用封装结构达到隔离效果,其中最重要的为气密参数,使用压力筒进行气密测试,使用气压值大于 4 kgf/cm²,时间维持 1 小时,其结果如图 5 所示,以图 5(b)示值误差、图 5(c)重复性、图 5(d)进回程差三种参数观察,变化量不超过 2%范围。经由气密测试后,石英敏感单元可完整保持封装体完整性。

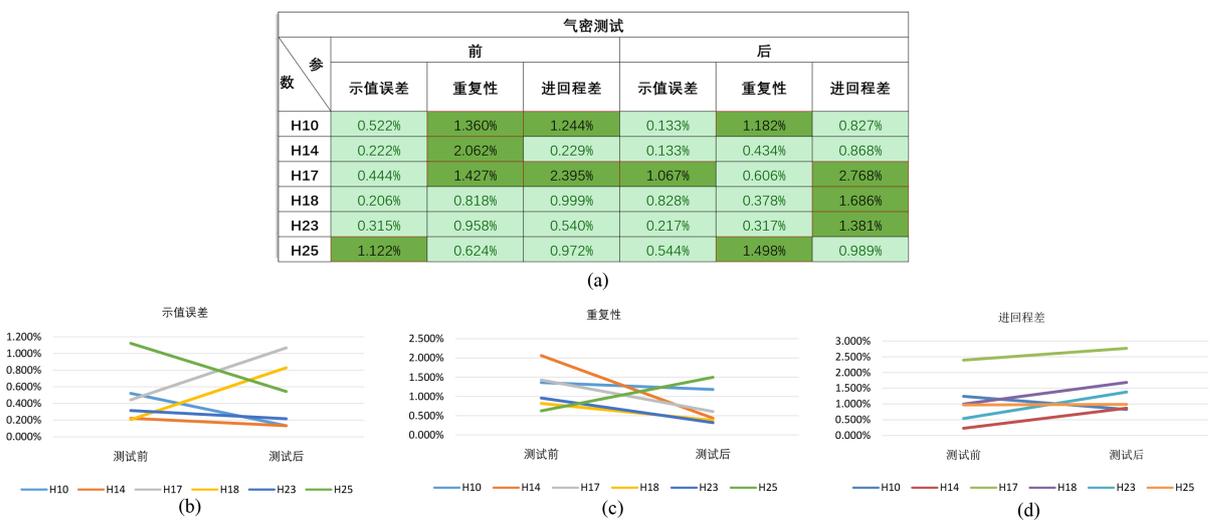


Figure 5. Gas-tightness testing of sensor head
图 5. 敏感单元的气密测试

为了进一步测试力学疲劳方面的测试,使用力矩测试方式,将敏感单元与弹性体进行贴合,如图 6(a)所示,使用金属不锈钢杆作为弹性体(直径 16.5 cm, 长度 211 cm),并在弹性体上制作凹槽,凹槽距离弹性体支点为 D,将敏感单元安装至凹槽内,并使用胶材贴合于内部,如图 6(b),弹性体上的凹槽,为一种力学能量集中结构,将敏感单元两端使用胶材与凹槽内壁粘合,力能量经由两端传递至敏感单元内部,图 6(c)为实际敏感单元使用胶材在凹槽内与内壁粘合的情况,敏感单元可完全埋在凹槽内部。在与弹性体轴方向夹角为 θ 的旋转角范围内,进行顺向与逆向重复来往 10,000 次的施加力矩测试,施力力值为 50 N,其力学疲劳测试结果,变化量在千分之一内。

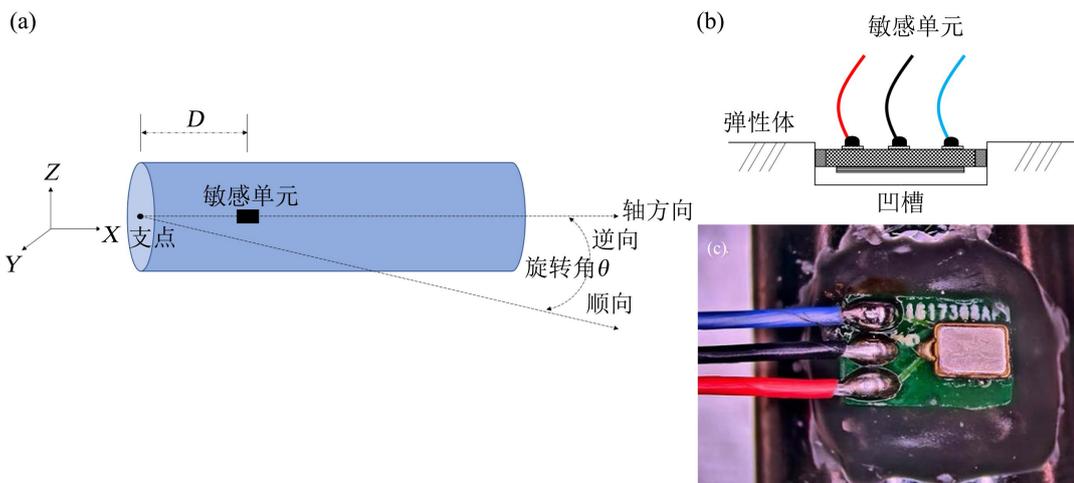


Figure 6. Sensor head mounted inside the groove structure on the elastomer
图 6. 敏感单元安装于弹性体上凹槽结构内部

在自由跌落测试方面,以弹性体上贴装敏感单元的方式进行测试,以高度 150 cm 开始自由掉落至水泥地面上,重复动作 3 次,如图 7(a)所示,取 10 个样品做验证,观察图 7(b)示值误差、图 7(c)重复性、图 7(d)进回程差数据,最大变化量分别在 2%、1%与 2%。

参 数	自由跌落					
	测试前			测试后		
	示值误差	重复性	进回程差	示值误差	重复性	进回程差
G100	0.171%	0.933%	1.851%	0.084%	1.021%	1.877%
G124	0.528%	0.464%	0.857%	0.122%	0.886%	1.311%
G91	0.394%	0.586%	1.311%	0.700%	1.143%	1.388%
G25	0.280%	0.766%	0.671%	0.569%	0.883%	1.333%
G103	0.280%	0.702%	1.192%	0.206%	0.937%	0.628%
G112	0.400%	0.611%	0.456%	0.206%	0.377%	0.660%
G115	0.183%	0.516%	1.130%	0.590%	0.900%	1.378%
G118	0.861%	0.233%	1.333%	0.722%	0.974%	1.060%
G119	0.186%	0.630%	1.311%	0.737%	1.120%	1.354%
G122	0.280%	3.722%	5.220%	0.744%	3.853%	4.842%

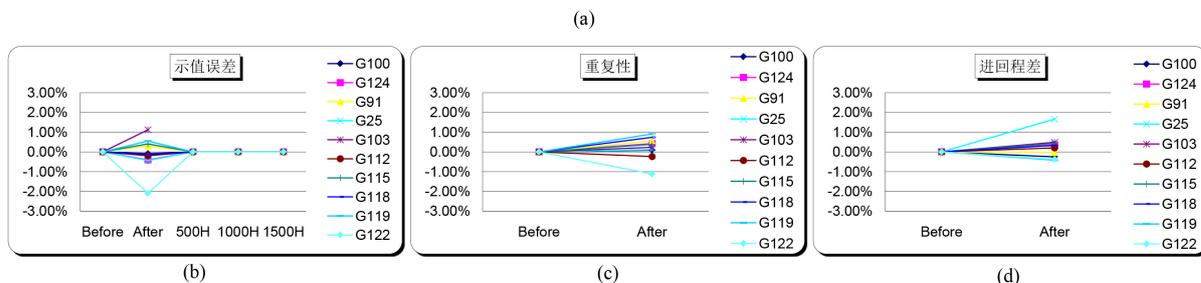


Figure 7. Free drop testing of the sensor
图 7. 传感器的自由跌落测试

5. 结论

本论文提出以石英谐振式晶体作为力学传感器的应用, 并提出方形芯片作为力敏单元芯片的概念, 使用厚度剪切振动作为力学感应模态, 可达精度误差至万分之一、重复性接近 99%、迟滞小于 1%, 经由弹性体贴合敏感单元的力学测试与封装体的验证, 证明其传感器非常适合应用于力学感测市场, 如力与力矩相关产品, 同时其具有高度可靠性与稳定性, 可因应高度环境要求, 未来发展方向可朝向微小化(<1 mm)、集成化、智能化等产品开发, 应用于机器人、新能源车、航天航空等领域。

参考文献

- [1] 张广立. 开放式机器人力控制系统及先进力控制策略的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [2] 李杰. 智能石英谐振式力敏传感器的无线数据采集系统设计[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.
- [3] 李艳杰. 一种差动输出石英谐振式力传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(2): 128-130.
- [4] 路峻岭, 田文杰. AT 切石英晶体频率力敏特性的实验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2003(8): 46-47.
- [5] 岳书彬, 孙秀英, 秦自楷, 等. 双端石英音叉力敏传感器的原理与设计[J]. 山东大学学报: 自然科学版, 2000, 35(3): 282-288.
- [6] Valkering, A.M.C., Mares, A.I., Untiedt, C., Gavan, K.B., Oosterkamp, T.H. and van Ruitenbeek, J.M. (2005) A Force Sensor for Atomic Point Contacts. *Review of Scientific Instruments*, **76**, Article 103903. <https://doi.org/10.1063/1.2084347>
- [7] 潘安宝, 闻化, 姚东媛, 等. 石英晶体谐振式绝对压力传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 85-86+89.
- [8] Bottom, V.E. (1947) Note on the Anomalous Thermal Effect in Quartz Oscillator Plates. *American Mineralogist*, **32**, 590-592.
- [9] Ratajski, J.M. (1968) Force-Frequency Coefficient of Singly Rotated Vibrating Quartz Crystals. *IBM Journal of Research and Development*, **12**, 92-99. <https://doi.org/10.1147/rd.121.0092>
- [10] Vig, J.R. (2007) Quartz Crystal Resonators and Oscillators for Frequency Control and Timing Applications—A Tutorial.
- [11] Lin, Y., Asakura, A., Fukuda, T. and Arai, F. (2007) Design and Fabrication of Miniaturized Force Sensor with Quartz Crystal Resonators. 2007 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, 29 October-2 November 2007, 1112-1117. <https://doi.org/10.1109/iros.2007.4399597>
- [12] Murozaki, Y., Sakuma, S. and Arai, F. (2017) Improvement of the Measurement Range and Temperature Characteristics of a Load Sensor Using a Quartz Crystal Resonator with All Crystal Layer Components. *Sensors*, **17**, Article 1067. <https://doi.org/10.3390/s17051067>