

# 基于石英力学传感芯片的智能工装夹持器

巫晟逸<sup>1\*#</sup>, 刘秋实<sup>1</sup>, 李 坤<sup>1</sup>, 丁岗寅<sup>1</sup>, 梁佳辉<sup>1,2</sup>, 陈庆盈<sup>3</sup>, 温 繁<sup>4</sup>, 赵长春<sup>5</sup>, 陈荣杰<sup>6</sup>,  
赵岷江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>台晶(宁波)电子有限公司, 浙江 宁波

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>浙江丰州科技股份有限公司, 浙江 宁波

<sup>5</sup>北京航空航天大学宁波创新研究院, 浙江省先进无人飞行系统重点实验室, 浙江 宁波

<sup>6</sup>宁波兴茂电子科技有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年2月3日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月5日

## 摘 要

本实验验证了一种集成于工装夹持器中的石英谐振式力学传感芯片的应用。该夹持器设计了应力集中凹槽以安装芯片, 通过计频器读取芯片的频率信号, 并将其与油压装置施加的力进行对比标定, 得到整体线性度98.7%、重复性95.2%、迟滞0.77%的结果, 可应用于智能装置与制程, 如新能源车、机器人与航天航空等领域。

## 关键词

石英压电晶体, 谐振式, 力学传感器, 夹持器

# Intelligent Fixture Clamping Force Monitoring and Control Based on Quartz Force Sensor

Chengyi Wu<sup>1\*#</sup>, Qiushi Liu<sup>1</sup>, Kun Li<sup>1</sup>, Gangyin Ding<sup>1</sup>, Jiahui Liang<sup>1,2</sup>, Chinying Chen<sup>3</sup>,  
Fan Wen<sup>4</sup>, Changchun Zhao<sup>5</sup>, Jungchieh Chen<sup>6</sup>, MinchiangZhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TXC (Ningbo) Corporation, Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>Piezoelectric Device Laboratory, School of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 巫晟逸, 刘秋实, 李坤, 丁岗寅, 梁佳辉, 陈庆盈, 温繁, 赵长春, 陈荣杰, 赵岷江. 基于石英力学传感芯片的智能工装夹持器[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(2): 310-317. DOI: 10.12677/jsta.2026.142031

<sup>3</sup>Zhejiang Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineer, Chinese Academy of Science, Ningbo Zhejiang

<sup>4</sup>Zhejiang Fengzhou Mechanical Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

<sup>5</sup>Key Laboratory of Advanced Unmanned Aerial Systems of Zhejiang Province, Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo Zhejiang

<sup>6</sup>TSE Technology Corporation, Ningbo Zhejiang

Received: February 3, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 5, 2026

## Abstract

**This experiment validates the application of a quartz resonant force-sensing chip integrated into a tooling gripper. The gripper features stress-concentrating grooves designed to accommodate the chip. Frequency signals from the chip are read by a frequency counter and compared with forces applied via a hydraulic pressure system for calibration. The system demonstrates an overall linearity of 98.7%, repeatability of 95.2%, and hysteresis of 0.77%. It can be applied in smart devices and manufacturing processes across fields such as new energy vehicles, robotics, and aerospace.**

## Keywords

**Quartz Piezoelectric Crystal, Resonant, Force Sensors, Clamping Fixture**

Copyright © 2026 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

因现代制造业的智能化与高精度发展，对于生产线中的工装夹持器要求也逐步提高，作为与加工件直接接触并定位的核心执行部件，其性能优劣直接决定了加工质量、生产效率和稳定性[1][2]。传统的夹持器普遍基于制造者直观意识寻找适合夹持方式与位置，在夹持力的精确控制与实时状态感知方面存在显著的技术空白，其缺乏反馈与感应能力的情况，难以应对日益复杂的精密加工需求，且容易导致加工件因受力不均而产生变形与损伤，尤其在航空航天、精密仪器等高附加值产业中，更显其重要性[3]-[7]。为了解决这一问题，需要由被动夹持方式进步到主动侦测最佳夹持力与位置，举例来说，Berend Denkena 等人使用传统应变片结合了液压夹持器进行感知功能的建立，在机床恶劣工况下实现夹紧系统的状态与过程监控[8]。更进一步地使用集成传感器系统进行监控，避免加工失败成为废品[9]。Dongsheng Liu 等人将力学传感器与夹持器结合形成一套力感测夹具系统，可进行飞机零件在加工过程中的切削力监测，其精度误差与测力仪相差小于 6% [10]。前述论文说明了夹持器在传感器的辅助下，可进行智能化的应用，对于制造精度、安全性与监控有莫大帮助，主要使用了应变式力学传感器产品[11]。力学传感器种类繁多，包含应变片式、光学式、电容式、电磁式、电感式、压电与压电谐振式等。然而应变式力学传感器仍然存在部分功能不够的缺陷，如精度与材料刚度较低、响应时间较慢等因素，对于未来智能制造业的需求已显不足。因此本研究创新性地提出将石英压电谐振式力学传感芯片安装于工装夹持器之中，藉以提高精度与响应时间等参数。石英芯片以压电效应原理作为驱动基础、具备高机械刚度、长期稳定性和动态力

信号的灵敏响应, 对于静态侦测需要以逆压电效应作为驱动。基于谐振式原理可同时侦测动态与静态, 因此石英压电谐振式可作为高精度力传感系统的最佳选择[12]。通过胶黏贴合方式将石英力学传感芯片嵌入夹持器的关键受力部位(力学能量集中点), 当外部夹持力传导致内部感应芯片时, 利用石英压电谐振式力学传感芯片的频率变化量作为力学侦测量, 经由读取电路读取讯号与运算优化可得到高精度的线性关系(接近 95%) [13], 可精确监测夹持力大小、分布乃至夹持器表面结构的微小变化, 对于精密装配、微细加工中的工件夹持难题提供全新的技术路径, 对于提升高端制造装备的智能化水平、保证超精密加工的实现具有重要的应用前景。

## 2. 智能夹持器

### 石英芯片安装于夹持器

图 1(a)为一传统多轴加工平台装置案例图, 平台上白色部分为加工件, 其中使用三组无传感器夹持器进行加工件固定, 如图 1(b)红色箭头指示处, 后续根据图 1 的使用情境进行了智能夹持器的设计与应用。

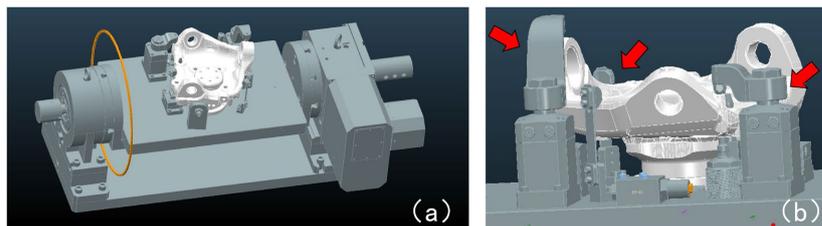
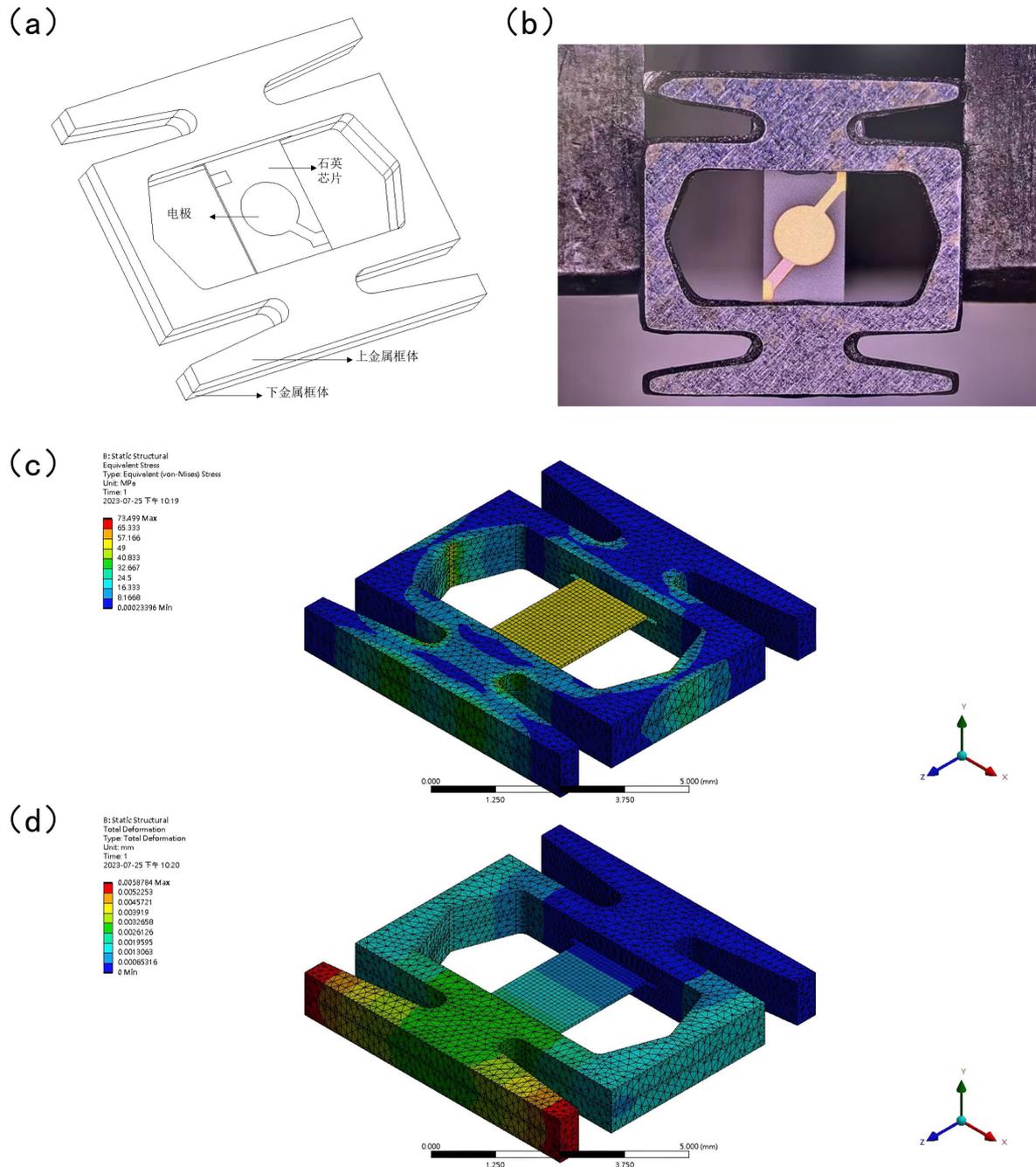


Figure 1. Multi-axis machining platform and fixture  
图 1. 多轴加工平台与夹持器

图 2(a)石英压电谐振式力传感芯片设计图, 其原理为金属框体受到外力作用后, 力学能量传递至中央石英芯片上, 经由侦测其振荡频率的改变量, 可与外部力数值形成线性关系。制作两个相同蝴蝶结构的上下金属框体, 使用三明治堆栈方式将方型石英芯片上下夹持住, 其连接处皆使用胶体进行连结, 石英芯片上镀有黄金电极, 作为石英芯片导电与讯号传递使用, 石英芯片以 AT 切型石英材料为主, 长、宽、厚度分别为 3.5 mm、1.8 mm、66.7  $\mu\text{m}$ , 中心振动频率为 25.8 MHz, 振动能量集中于芯片中央, 蝴蝶金属框体结构的长、宽、厚度尺寸为 7 mm、7 mm、5 mm。图 2(b)为实际样品图, 使用简单夹具将石英芯片夹住, 可观察其实际结构与设计图无太大差距。

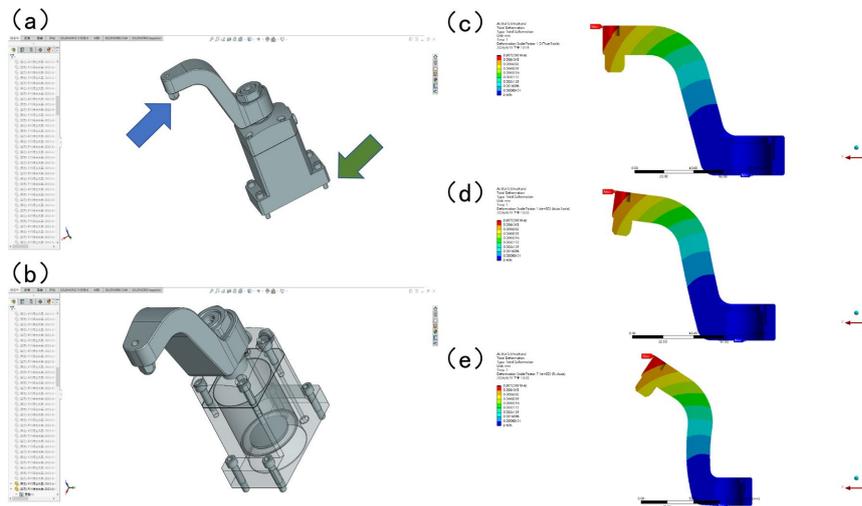
图 2(c)与图 2(d)分别为使用有限元仿真方式, 进行石英芯片的应力与形变分布仿真, 将右边部分定义为固定端, 使用 100 N 力施加于左边部分, 可观察到应力(stress)分布经由左边部分传递至金属框体后, 又再传递至石英芯片上, 并且均匀分布至其表面, 如图 2(c)。图 2(d)为形变(deformation)分布图, 观察到最大形变在蝴蝶翅膀结构两端红色部分, 并且传递直至中央部分, 后影响石英芯片也同时产生微小形变, 形变量也传递至蝴蝶翅膀结构的边框部分, 但无法完全传递至另一端的蝴蝶翅膀结构上, 因此认为其边框结构具备部分形变量阻挡与缓冲功能, 对与力学传感器而言, 可减少外部振动力影响与提高量测精度, 后续可根据有限元力学仿真方式进行优化。

图 3(a)与图 3(b)为夹持器装置外观图与内部透视图, 其使用液压方式进行夹持力能量提供。图 3(a)中的蓝色箭头指示处为夹持器上方旋转头部与加工件接触点, 绿色箭头指示处为夹持器底座固定面, 图 3(c)至图 3(e)分别为图 3(a)中加工件接触点, 逐步施加 1 N、 $1 \times 10^3$  N、 $1 \times 10^7$  N 后观察其形变量, 大部分形变量集中在头部, 并未向下传递, 因此判断石英芯片安装凹槽可设计于头部。

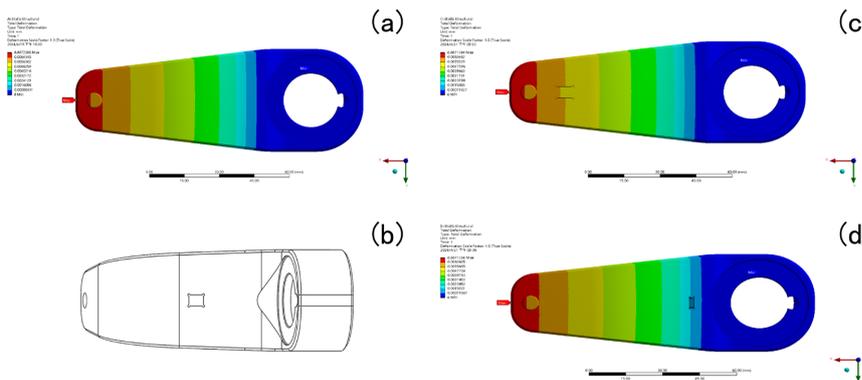


**Figure 2.** Quartz piezoelectric resonant force sensing chip  
**图 2.** 石英压电谐振式力传感芯片

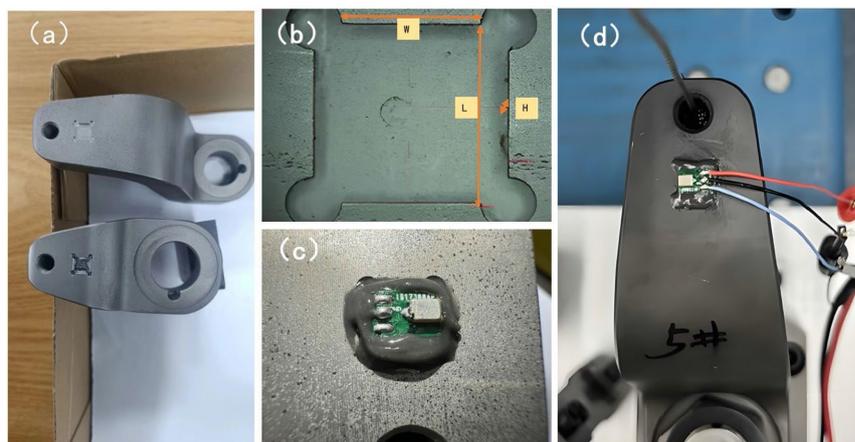
石英压电谐振式力传感芯片为刚性组件，且存在一定体积，与弹性体(夹持器)结合，需要制作凹槽空间进行安装，通常安装于力学能量集中点，且其设计不能造成结构过度疲劳损伤。图 3(a)与图 3(b)为夹持器装置外观图与内部透视图，其使用液压方式进行夹持力能量提供。图 3(a)中的蓝色箭头指示处为夹持器上方旋转头部与加工件接触点，绿色箭头指示处为夹持器底座固定面，图 3(c)至图 3(e)分别为图 3(a)中加工件接触点，逐步施加 1 N、 $1 \times 10^3$  N、 $1 \times 10^7$  N 后观察其形变量，可依照形变量判断力学能量集中情形，大部分形变量集中在头部，并未向下传递，因此判断石英芯片安装凹槽可设计于头部。



**Figure 3.** Fixture and deformation simulation diagram  
**图 3.** 夹持器装置与形变仿真图



**Figure 4.** Fixture deformation simulation in top view  
**图 4.** 夹持器形变仿真俯视图



**Figure 5.** The quartz chip is installed at the head of the fixture  
**图 5.** 石英芯片安装于夹持器头部

图 4(a)为夹持器头部形变仿真俯视图，经由前述内容判断夹持器头部为适合设计安装凹槽区域，因

此可以藉由观察其头部形变量(在  $1 \times 10^3$  N 施力的案例), 来选取适合的凹槽位置。图 4(b)中在其夹持器头部位置中央根据石英芯片尺寸设计了一凹槽结构, 同时在图 4(c)与图 4(d)中设计了凹槽在前方与后方的案例, 后续实验中, 使用凹槽在前方的设计, 对于传感器芯片的感应最为直接。

图 5(a)为两款不同尺寸夹持器, 图中上方夹持器头部为细长型, 下方为短胖型, 使用细长型夹持器作为验证, 在其头部加工一凹槽结构, 图 5(b)中, 其凹槽尺寸标定为  $W \times L \times H$  ( $7.10 \text{ mm} \times 7.16 \text{ mm} \times 1.23 \text{ mm}$ ), 加工完成后在其上方涂抹封装胶材, 将封装后贴有处理电路的石英芯片放置进去后等待胶材干燥固化, 如图 5(c), 最后在其芯片上的电极连接处接上电线, 如图 5(d)。

### 3. 夹持力测试

在夹持器的夹持力测试中, 如图 6(a), 为整体架设装置, 图 6(b)使用一金属条状物作为夹持工件, 将安装石英芯片后的传感器夹持住金属条状物, 确保传感器受力轴向与夹持力方向一致, 确保力能传递准确且不产生非轴向分力, 夹持器稳固安装于平台或夹具上, 确保其在测试过程中不会发生移动或振动。图 6(c)中使用双泵油压系统(含泵、马达、阀门与油箱)为夹持器提供油压夹持力, 可提供夹持力由 0 至 220 bar (数据间隔 20 bar), 并放置于附近平面上, 与夹持器保持距离, 以减少干扰, 油压系统的压力输出讯号亦接入数据撷取系统, 以便同步监控油压与夹持力。双泵油压系统使用高压油管将夹持器与油泵连接并依规定扭力锁紧, 防止测试中出现漏油, 夹持器上石英芯片读取到力学讯号经由电线传输至计频器上, 图 6(d)中展示计频器与其电源, 开始测试前, 确定电气连接正确, 并对石英芯片力值进行零点校正(归零), 在未启动油压泵的状态下, 进行夹持器空载检查, 确认夹持器作动顺畅。

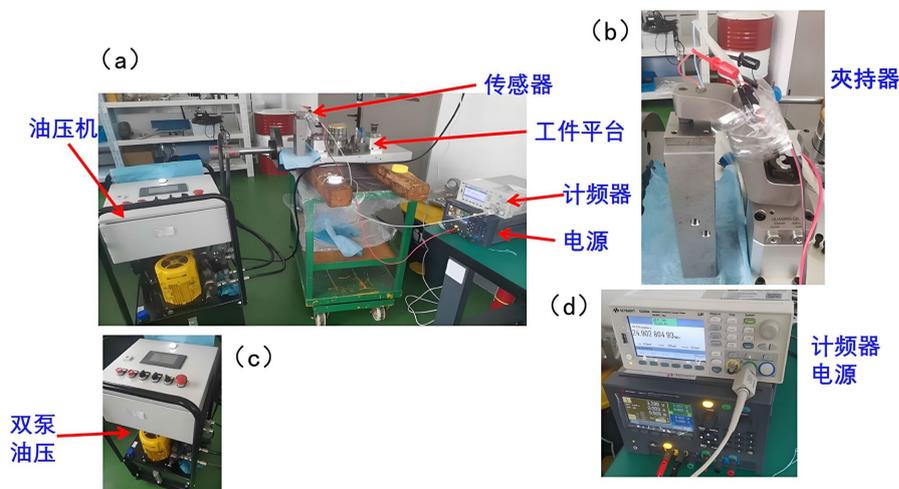
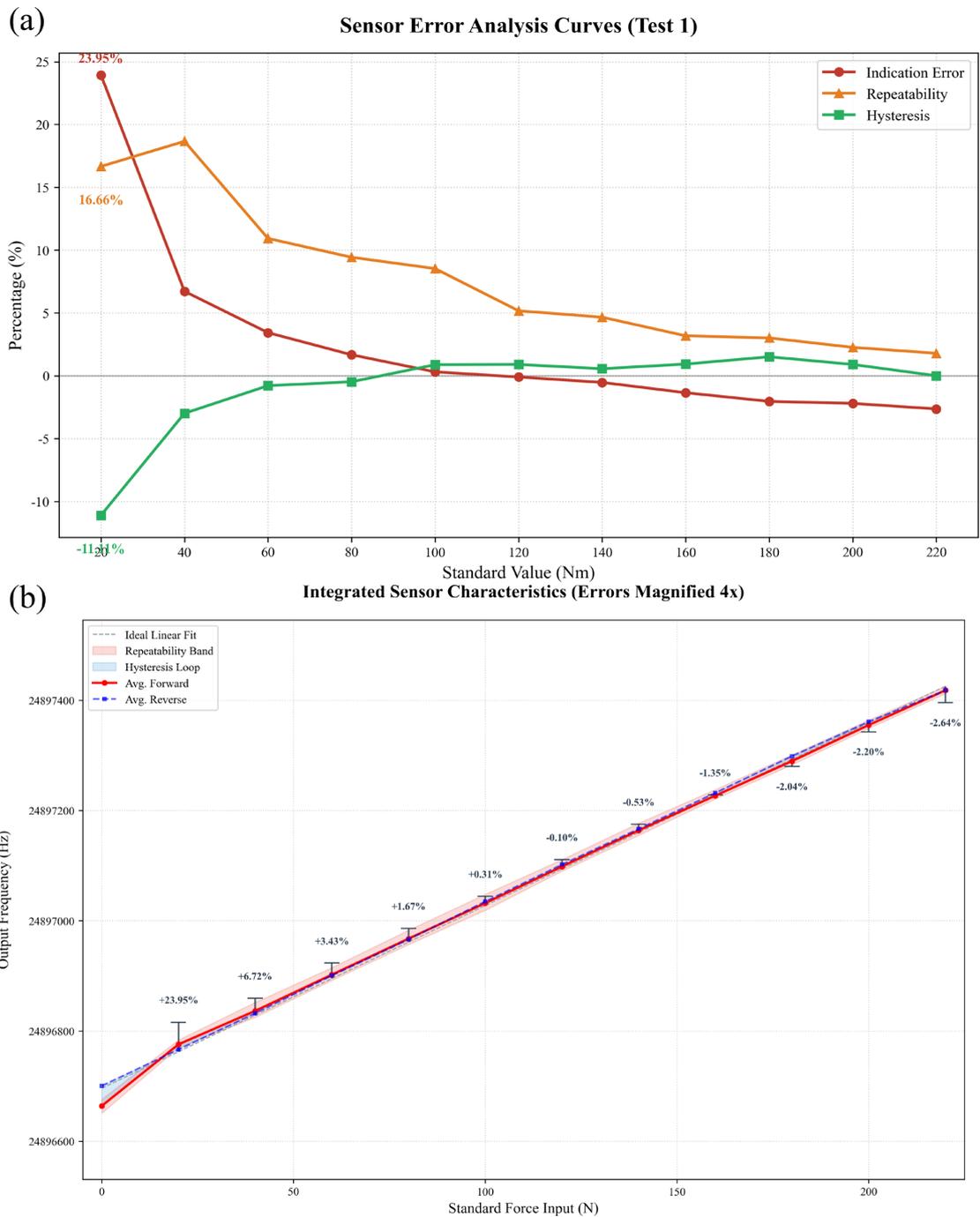


Figure 6. Clamping force testing device  
图 6. 夹持力测试装置

### 夹持力测试结果

为了取得最准确测试结果, 重复进行三次由 0 至 220 bar (数据间隔 20 bar)的方式来测量, 并对其三次测量进行平均值计算, 如图 7(a)所示, 显示了三组进程与回程数据平均值结果, 参数包含精度误差、重复性误差与迟滞, 逐步增加油压压力时, 精度误差也逐步减少, 从一开始的接近 24%精度误差至 100 bar 的 0.31%, 到 220 bar 之后精度误差又增加为 2.64%, 与迟滞数据在 100 bar 交叉, 从一开始的-11.11%误差至 60 bar 的-0.79%, 之后皆保持在 1%之下, 同时也观察到重复性误差, 在一开始的-16.66%误差到 120 bar 之后也大幅减少至 5.17%, 到 220 bar 之后达到 1.79%。



**Figure 7.** Clamping force testing data  
**图 7.** 夹持力测试数据

图 7(b)中将图 7(a)的三组进程与回程数据平均值显示于图表上, 可直观地发现其线性关系, 在施力 20 bar 的时候, 其误差值达到了 24%, 在施力 40 bar 的时候, 其误差值达到了 6.72%, 之后便降到了 1.67% 左右, 在 120 bar 时候达到 -0.1% 的精度误差, 也就是单点线性度达到了 99.9%, 考虑其系统为油压驱动, 在起始区域因为振动与油压精度较低的影响, 选取施力范围由 80 bar 至 220 bar 的数据进行分析, 整体线性度达到了 98.7%、重复性达到了 95.2%、迟滞为 0.77%。实验结果显示, 力学传递效率为三段变化, 低

压区(20~80 bar)精度误差达 24%，传递效率仅 76%，外力因接触间隙与油压不稳而损耗，重复性误差-16.66%亦反映传递路径离散。中压区(80~220 bar)进入线性工作段：100 bar 时误差降至 0.31%，传递效率达 99.7%，120 bar 单点线性度 99.9%，重复性误差收敛至 5%以下，迟滞低于 1%，说明接触面贴合完整稳定，外力与晶面应力已具备确定比例关系。高压区(>220 bar)误差回升至 2.64%，传递效率降至 97.4%，虽迟滞仍低，但传力效率已开始下滑，推测与系统刚度弱化或局部屈服有关。整体而言，力学传递效率非固定常数，随负载变化呈非线性函数，此特性可作为石英谐振式传感器量程规划与分段补偿之依据。

#### 4. 结论

本实验成功验证了石英谐振式力学传感芯片，结合工装夹持器的可行性与应用。通过夹持器上设计的应力集中凹槽结构，石英力学芯片得以安装并实现高效的力传递，实验过程中，借助高精度计频器实时读取芯片的频率信号，并与油压装置施加的标准力值进行系统对比与标定，测试结果表明，该传感系统表现出优异的综合性能，整体线性度达到 98.7%，显示一致的响应关系，重复性为 95.2%，说明系统在多次加载卸载中具有高可靠性，而迟滞误差仅为 0.77%，进一步证实了其回程误差小、响应一致性高的特点。该石英力学传感方案具备高精度、高稳定性与良好重复性等优势，可广泛应用于各类智能装置与精密制程中，如新能源汽车领域，可用于电池组装配应力监测、电机悬挂系统力学反馈，在机器人技术中，能够实现关节力矩感知、抓握力控制，在航空航天方面，则适用于关键结构健康监测、推进系统力学状态评估等场景，为高精度力学测量与控制系统提供了可靠的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 牛奔, 李岩艳, 钱德隆, 张恒, 葛海娅, 宁娜. 浅谈工艺工具制造中的工装夹具设计[J]. 石化技术, 2023, 30(9): 87-88.
- [2] Bi, Z.M. and Zhang, W.J. (2010) Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Future Directions. *International Journal of Production Research*, **39**, 2867-2894.
- [3] 郭飞燕, 张永亮, 刘嘉良, 张辉. 强迫定位装夹对航空复合材料构件几何-物理装配性能的影响与协同保障[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4): 655-670.
- [4] 赵长喜, 刘景祥. 大型薄壁密封舱体工装夹具的设计研究[J]. 航天工艺, 2001(1): 54-57.
- [5] 吴宝海, 郑志阳, 张阳, 张莹, 郑天飞. 面向薄壁零件加工变形与振动控制的智能装夹技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 21-34.
- [6] Denkena, B., Bergmann, B. and Kiesner, J. (2019) Increasing the Measuring Accuracy of a Sensory Swing Clamp by Multi-Sensor Evaluation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of the ASME*, **141**, Article 111007. <https://doi.org/10.1115/1.4044714>
- [7] Wu, D., Wang, H., Peng, J., Zhang, K. and Chen, Y. (2019) Machining Fixture for Adaptive CNC Machining Process of Near-Net-Shaped Jet Engine Blade. *Chinese Journal of Aeronautics*, **33**, 1311-1328.
- [8] Denkena, B. and Kiesner, J. (2015) Strain Gauge Based Sensing Hydraulic Fixtures. *Mechatronics*, **34**, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.05.008>
- [9] Denkena, B., Dahlmann, D. and Kiesner, J. (2014) Sensor Integration for a Hydraulic Clamping System. *Procedia Technology*, **15**, 465-473. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.006>
- [10] Liu, D., Hu, Y., Zhang, D. and Luo, H. (2019) Milling Force Monitoring with Thin-Film Sensors Integrated into Fixtures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **103**, 1519-1527. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03666-6>
- [11] 梁伟, 韦铁平, 杨晓翔, 赖征创, 姚进辉. 应变片排布位置对柱式力传感器输出影响[J]. 仪器仪表学, 2019, 40(5): 132-143.
- [12] 巫晟逸, 梁佳辉, 刘秋实, 丁岗寅, 陈庆盈, 等. 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.
- [13] 巫晟逸, 张盼, 李坤, 刘秋实, 丁岗寅, 梁佳辉, 等. 石英压电谐振式力学传感芯片[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(2): 269-277.