

# 基于石英谐振式力学传感器的电子秤模块应用

巫晟逸<sup>1\*#</sup>, 郁峰<sup>2</sup>, 刘秋实<sup>1</sup>, 李坤<sup>1</sup>, 梁佳辉<sup>1</sup>, 丁岗寅<sup>1</sup>, 陈庆盈<sup>3</sup>, 赵长春<sup>4</sup>, 陈晖<sup>5</sup>, 熊宣明<sup>1</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>宁波联测传感科技有限公司, 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>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>5</sup>宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

该数字称重模块采用AT切型石英谐振器作为敏感单元, 通过力频转换实现高稳定性与强抗干扰能力, 有效避免了应变片传感器固有的热漂移问题, 借助有限元仿真优化了单点剪切梁结构, 并设计应力集中槽以确保力的高效传递, 系统搭载定制化FFT-PLL电路与低噪声电源, 可维持优异的信号质量, 测试结果表明, 在40~100 N·m载荷范围内, 器件精度误差为3.51%, 重复性误差为1.32%, 满足行业标准, 当载荷大于30 N·m时, 重复性误差可控制在2%以内, 在10~40 N·m区间内精度偏低, 主要源于振动阻尼不足与低载荷灵敏度下降, 后续通过增设阻尼结构并优化低力响应特性, 可将其应用场景从工业领域拓展至精密测量领域。

## 关键词

AT切型石英谐振器, 力频转换, 力学传感器, 剪切梁, 快速傅里叶变换 - 锁相环

# Electronic Weighing Application Based on Quartz Resonant Force Sensor

Chengyi Wu<sup>1\*#</sup>, Feng Yu<sup>2</sup>, Qiushi Liu<sup>1</sup>, Kun Li<sup>1</sup>, Jiahui Liang<sup>1</sup>, Gangyin Ding<sup>1</sup>, Qingying Chen<sup>3</sup>, Changchun Zhao<sup>4</sup>, Hui Chen<sup>5</sup>, Xuanming Xiong<sup>1</sup>, Minjiang Zhao<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Ningbo Liance Smart Technology Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

<sup>3</sup>Institute of Advanced Manufacturing Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Ningbo Zhejiang

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 巫晟逸, 郁峰, 刘秋实, 李坤, 梁佳辉, 丁岗寅, 陈庆盈, 赵长春, 陈晖, 熊宣明, 赵岷江. 基于石英谐振式力学传感器的电子秤模块应用[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(3): 537-547. DOI: 10.12677/jsta.2026.143054

<sup>4</sup>Key Laboratory of Advanced Unmanned Aerial Systems of Zhejiang Province, Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo Zhejiang, Ningbo Zhejiang

<sup>5</sup>School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Received: April 25, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

This digital weighing module adopts an AT-cut quartz resonator as the sensing unit. By utilizing force-to-frequency conversion, the proposed design exhibits high stability and strong noise immunity, which effectively eliminates the intrinsic thermal drift problem of conventional strain-gauge sensors. The single-point shear beam structure is optimized through finite element simulation, and a stress-concentrating groove is integrated to ensure efficient force transmission. To maintain superior signal quality, the system is equipped with a custom-designed FFT-PLL circuit and a low-noise power supply. Experimental results demonstrate that the module obtains an accuracy error of 3.51% and a repeatability error of 1.32% under an equivalent bending moment of 40~100 N·m., satisfying standard industrial requirements. The repeatability error is kept below 2% when the load exceeds 30 N·m. The degraded accuracy in the range of 10~40 N·m is mainly caused by insufficient vibration damping and reduced low-load sensitivity. With further improvements such as introducing damping structures and optimizing low-force response performance, the proposed weighing module can be extended from general industrial applications to high-precision measurement fields.

## Keywords

AT-Cut Quartz Crystal Resonator, Force-Frequency Conversion, Force Sensors, Shear Beam, Fast Fourier Transform-Phase Locked Loop Circuit

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

称重模块在工业、商贸、医疗、交通及航空航天等领域应用广泛，如工业生产中，可保障产品一致性，减少物料损耗，在商贸领域，精准称重是公平交易的重要基础；在医疗场景中，对测量精度要求极高，是精准配药与高效病患管理的必要条件；交通领域中，货运车辆的重量监测能够降低道路安全事故风险，保障人员与货物安全；航空航天领域里，燃油与有效载荷的精确核算直接关系运行成本与飞行安全。

电子称重模块的核心是机械传感单元，常见类型包括电阻应变片式[1]、电磁力平衡式[2]、电容式[3]、压电式[4]、光电式[5]、半导体压阻式[6]以及音叉式传感器[7]。各类传感器均存在特定技术短板：电阻应变片易受温度波动影响，且存在非线性误差，长期稳定性不佳；电磁力平衡传感器结构复杂、制造成本高，难以大范围推广；电容式传感器易受湿度与杂散电容干扰，测量精度下降；压电式传感器因电荷泄漏问题，难以稳定测量静态或低频信号；光电式传感器对环境光照敏感，需要精密光学对准，安装与维护难度大；半导体压阻式传感器温度依赖性强，材料长期使用会出现老化，可靠性下降；音叉式传感器

对外部机械振动敏感,易引发共振,造成测量偏差。

为解决上述问题,本文提出一种将石英压电谐振式力传感器应用于数字称重模块的技术方案。该方案沿用石英晶体振荡器封装工艺,具备精度高、响应快、耐用性好、生产成本低等优势[8]。工程实现时,需从现有结构中选用适配的力学结构:双端剪切梁与圆筒承压式结构适用于大量程或重载车辆场景,而单点剪切梁结构可有效应对偏载受力,更适合平台秤使用[9]。因此,本设计选用单点剪切梁结构,通过仿真优化设计应力集中机构,并粘贴石英传感芯片。本文最初提出两种应力集中结构方案,分别采用开槽与转接板形式,并对两种结构分别进行了载荷测试。

## 2. 石英晶体谐振器力传感器

### 2.1. 石英力传感器

石英晶体谐振器用作力传感器时,可将物理量变化直接转换为频率信号。由于频率属于高精度可测物理量,这类传感器相比传统应变片具备更突出的性能优势。首先,石英传感器拥有高灵敏度与高分辨率。在石英晶体微天平(QCM)等应用中,谐振频率偏移与晶体表面质量变化直接相关,可实现纳克至亚纳克级的检测[10]。这种高灵敏度源于频率与晶体等效质量之间的直接对应关系。相比之下,应变片依靠几何形变引起的电阻变化工作,其灵敏度本质上受限于电噪声与材料灵敏系数。

此外,石英传感器还具备高稳定性与测量精度。这种稳定性来自石英晶体低温度系数、低固有噪声的特性,使其频率输出不易受电压漂移、增益波动等常见模拟电路问题影响。而应变片则对温度漂移、引线电阻变化及电磁干扰敏感,需要复杂的信号调理与定期校准。另一项优势是直接数字输出带来的强抗干扰能力。频率信号可由微处理器直接处理,无需复杂的模数转换,能减少传输过程中的信号衰减与环境噪声干扰,适用于远程或恶劣环境;而模拟信号的应变片需要放大与屏蔽才能保证数据完整。最后,石英谐振器支持多功能实时动态监测。

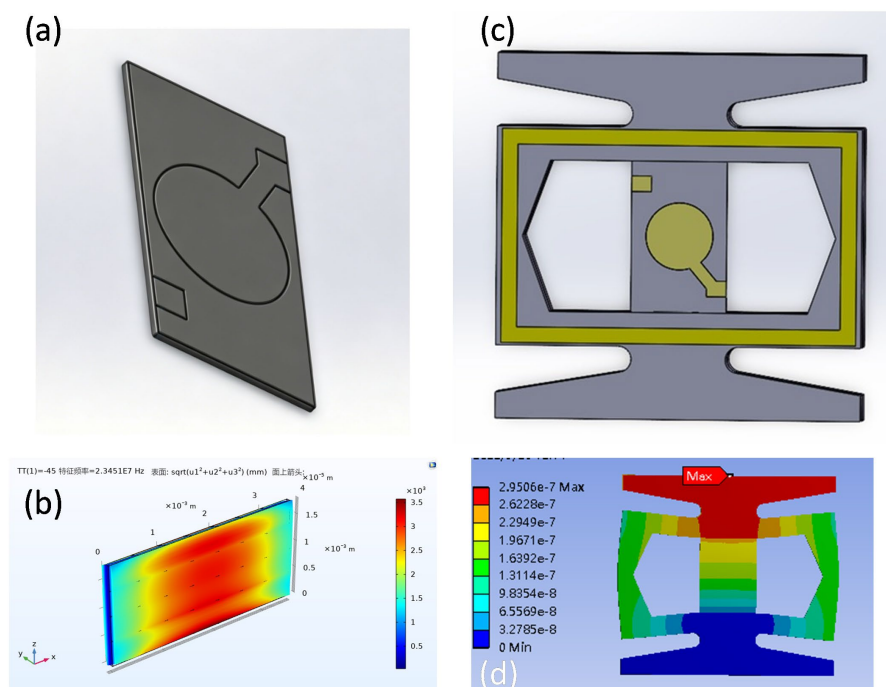
除了通过频移测量质量负载,它还可同步监测能量耗散,并通过品质因数 $Q$ 的数值大小,为粘弹性特性与界面相互作用提供更多分析依据,可对复杂液体环境中的蛋白质吸附、细胞黏附等动态过程进行原位实时监测。应变片则通常仅适用于静态或准静态应变测量,不具备这种多维度、实时分析的能力。总体而言,石英晶体谐振器相比应变片优势显著,包括更高灵敏度、稳定性、抗干扰数字输出能力与微尺度感知能力[11]-[13]。已有多项研究验证了这类应用:王等人开发了一种高分辨率石英谐振力敏与称重传感器,采用对称非完整圆形结构提升了可靠性[14];Murozaki等人使用AT切型石英晶体谐振器设计了扁平结构的紧凑型力传感器[15];Murozaki等人将石英晶体用于生物信号检测,实现了高精度与快速响应[16]。

### 2.2. 敏感单元设计与仿真

本研究采用方形石英谐振器芯片进行机械传感器结构设计,封装后的传感元件为AT切型石英晶体,基频工作频率为25 MHz。选择AT切型取向主要因其具备优异的热稳定性,可保证频率变化主要由所施加的外力引起,而非温度波动。同时,25 MHz的工作频率实现了良好的折中,既保证信号检测具备较高灵敏度,又保留足够的结构厚度,能够承受机械压缩而不发生碎裂。将石英芯片封装在金属框架内,可使结构同时实现应力集中与刚性提升。

如图1(a)所示,AT切型石英芯片的尺寸为 $3.5\text{ mm} \times 1.9\text{ mm} \times 0.07\text{ mm}$ 。芯片中心的圆形区域为黄金电极,芯片两侧均镀有电极。图1(b)为采用COMSOL Multiphysics软件仿真得到的石英芯片振动模式(厚度剪切模式),振动频率为25 MHz,红色区域表示高振动能量区域。图1(c)为未封装的传感头,采用铁镍合金金属框架制成,石英芯片安装在中心位置,金属框架中心周围的黄色区域为涂胶区。图1(d)为金属

框架的应力仿真，结果清晰表明，应力能量从金属框架传递到石英芯片的中心区域，确保力能够有效传递至传感元件。



**Figure 1.** AT-cut quartz crystal chip (a) AT-cut quartz chip dimensions ( $3.5 \times 1.9 \times 0.07 \text{ mm}^3$ ); (b) Vibration mode simulation of the quartz chip; (c) Unpackaged sensing unit; (d) Force application simulation of the sensing unit

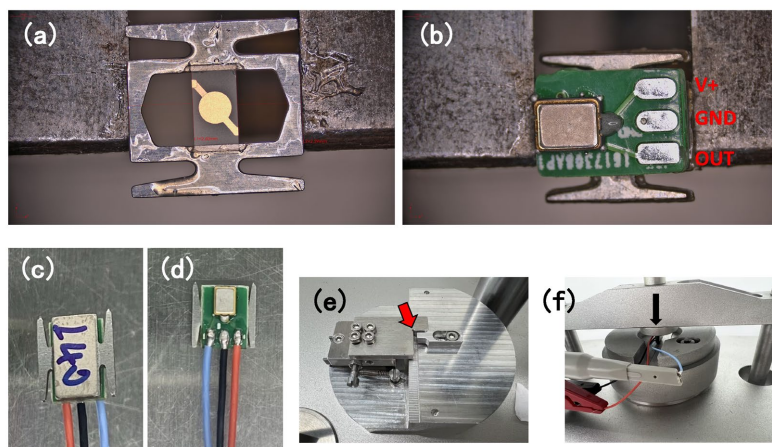
**图 1.** AT 切型石英芯片 (a) AT 切型石英芯片尺寸( $3.5 \times 1.9 \times 0.07 \text{ mm}^3$ ); (b) 石英芯片振动模式仿真结果; (c) 未封装敏感单元结构; (d) 敏感单元施力仿真

### 2.3. 敏感单元组装与力学测量

图 2(a)为安装在支架上的敏感单元实物图，为验证 AT 切型石英谐振器在称重场景下的力-频转换特性，本研究提出了初步的敏感单元设计，可通过简单的悬臂梁结构实现载荷向谐振器的应力传导，以快速验证结构可行性。敏感单元金属框架尺寸为  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。装配时，先在金属框架上表面涂覆胶粘剂，再将另一块金属框架对准并压合，施加外部压力使两块框架紧密贴合，随后在  $25^\circ\text{C}$  室温下固化 24 小时，之后在顶部粘接盖板，并使用胶粘剂将集成振荡芯片的 PCB 板粘接在底部，再次经过 24 小时固化以保证结构稳定。如图 2(b)所示，固化完成后在组件外围涂覆三防涂层，以提升防潮与防尘性能。图 2(c)(正面)与图 2(d)(背面)为电气接线示意图，蓝色、黑色与红色线缆分别对应传感头正、反面的信号输出端、接地端与电源正极。图 2(e)为用于固定传感头的定制夹具，如红色箭头所示，该夹具可使传感头呈  $90^\circ$  垂直安装。装配好的夹具与传感头整体安装在 FE-J02 测试设备上。该设备采用静态砝码加载方式，通过逐级添加标准砝码施加垂直载荷，所加载荷可换算为等效外部应力，加载方向如图 2(f)中黑色箭头所示。

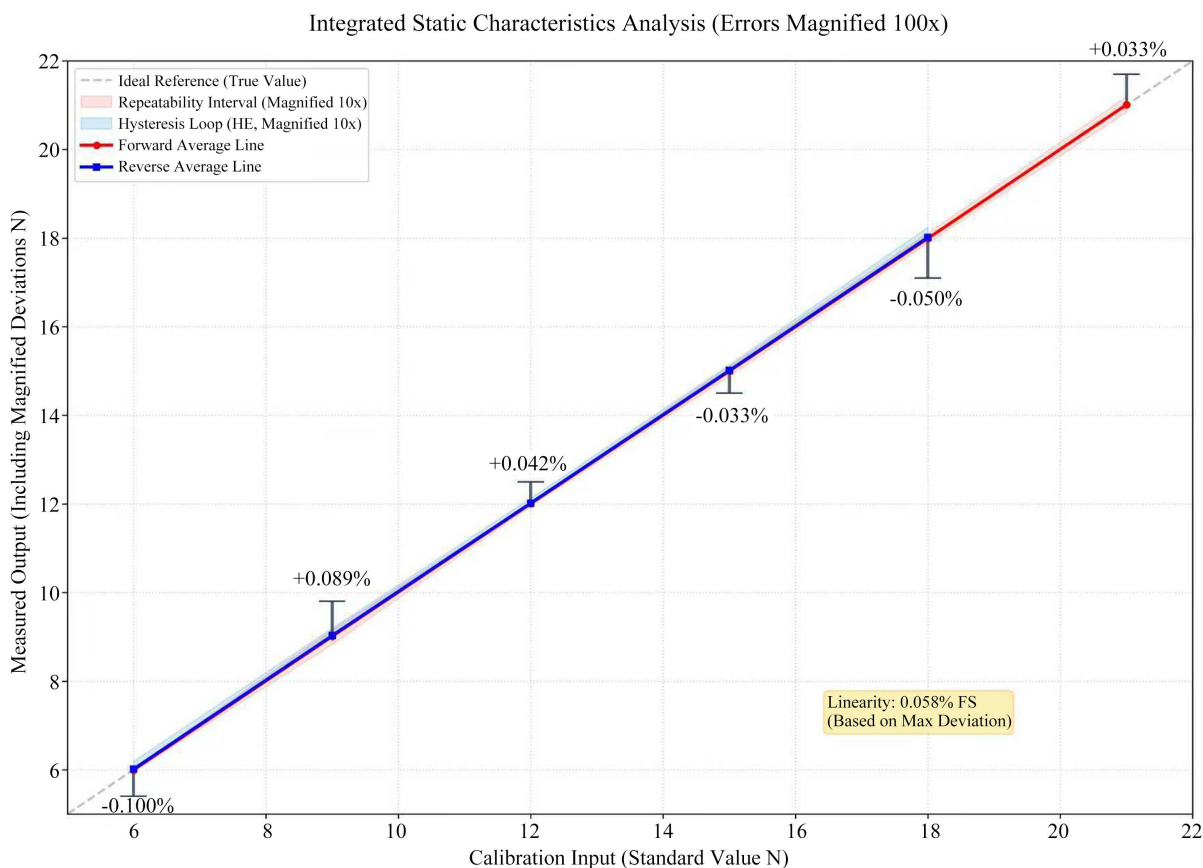
图 3 展示了敏感单元的静态重力加载测试结果。所施加的外力被换算为传感头所受的等效外应力。静态重力测试采用反复加载方式进行，载荷从 6 N 开始，每次递增 3 N，直至 21 N，并完成三轮正向与反向加载测试。测试结果表明，其测量精度远优于常规工业级传感器(通常为  $\pm 0.1\% \sim \pm 0.5\%$ )，可可靠应用于精密加工、自动装配检测、生产质量控制等对力学测量要求严苛的场景，在这些应用中，即使微小误

差也会直接影响产品可靠性与系统运行性能,该传感器能够达到计量级仪器的严格指标(通常在 $\pm 0.05\%$ 以内),在部分指标上甚至更优,有效兼顾了大批量生产需求与实验室级别的测量精度。



**Figure 2.** Photographs of the sensing unit: (a) Photograph of the sensing unit; (b) Assembled photograph of the sensing unit; (c) Front wiring diagram; (d) Back wiring diagram; (e) Fixture diagram of the sensing unit; (f) Force application diagram of the sensing unit

**图 2.** 敏感单元实物图 (a) 敏感单元实物图; (b) 敏感单元组装实物图; (c) 正面接线图; (d) 背面接线图; (e) 敏感单元夹具图; (f) 敏感单元施加力图

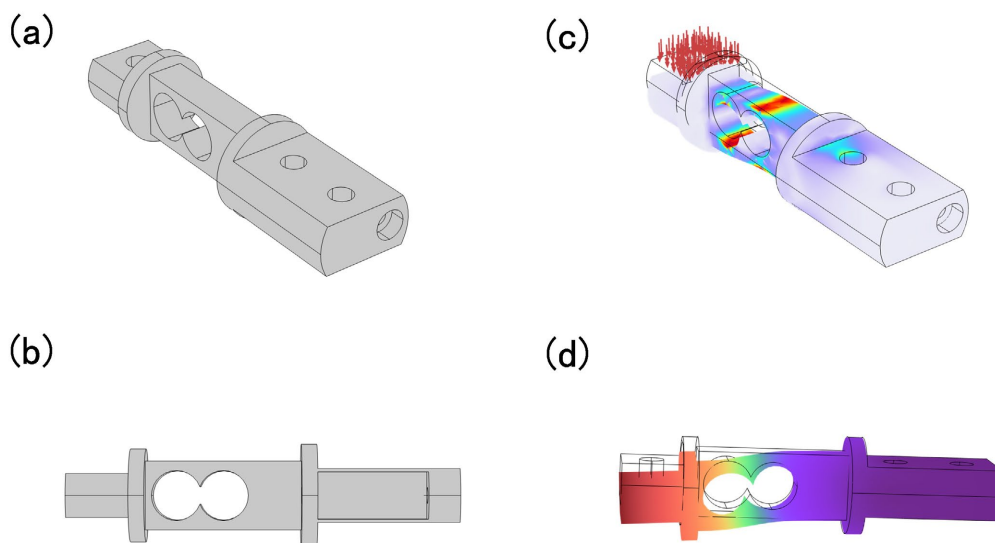


**Figure 3.** Static gravity loading test of the sensing unit

**图 3.** 敏感单元的静态重力加载测试结果

## 2.4. 称重传感器模块

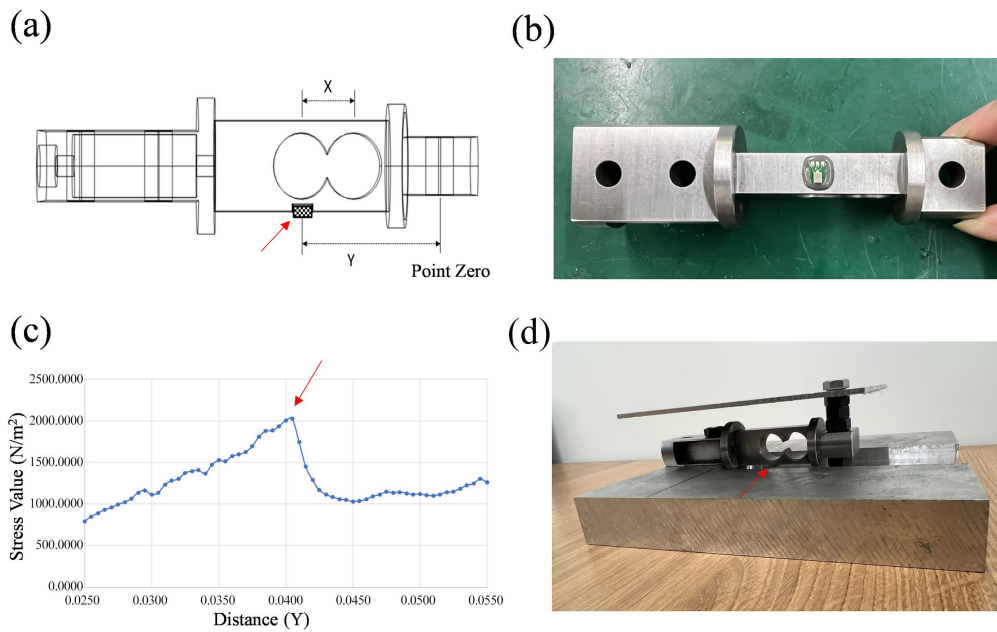
图 4(a)为基于一款商用高精度称重模块(波纹管传感器)建立的 ANSYS 仿真模型,采用悬臂梁结构,图 4(b)是该模型的侧视图。研究采用有限元法(FEM)进行力学仿真,分别分析应力与变形分布。图 4(c)的应力仿真结果表明,在受力状态下,悬臂梁上某一特定位置会出现应力集中,该位置可作为应力集中结构的设计点位。图 4(d)的变形仿真结果显示,该位置处变形量最大,通过设计可保证变形不会对传感头造成过度挤压,从而避免潜在损伤。



**Figure 4.** Commercial high-precision weighing module (bellows-type load cell) (a) ANSYS simulation model; (b) Side view of the cantilever beam; (c) Stress simulation results; (d) Deformation simulation results

**图 4.** 商用高精度称重模块(波纹管传感器) (a) ANSYS 仿真模型; (b) 悬臂梁侧视图; (c) 应力仿真结果; (d) 变形仿真结果

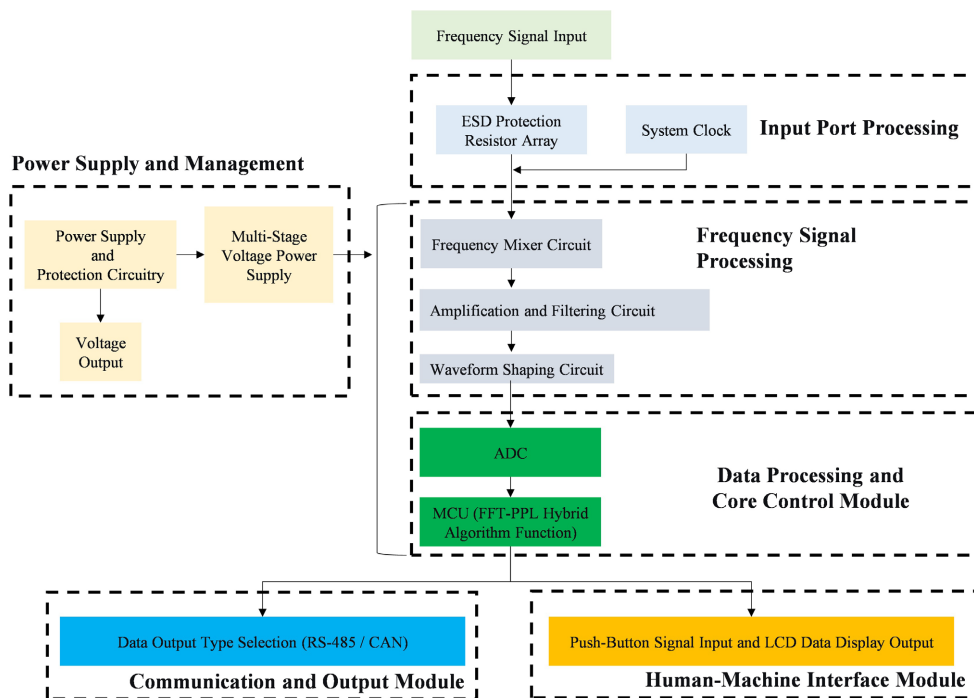
通过对商用波纹管结构的仿真分析,对设计进行了改进,以确定最佳应力集中位置,这些结果最终确定了图 5 所示的传感器开槽结构。如图 3 所示,单独的敏感单元虽具备良好的线性度与优异的力灵敏度,然其量程范围较为有限,须借助额外的力传导结构作为承载与传力载体。如前文所述的波纹管结构,通过分析其应力集中区域,可在最大化提升石英传感器力传递效率的同时,兼顾较高的力灵敏度并拓宽可测量程。基于上述分析,设计出如图 5 所示的称重传感器结构:在弹性体的应力集中部位开设槽口,内置石英传感器,二者协同完成称重功能。图 5(a)为波纹管称重传感器,其表面加工有用于安装石英芯片的凹槽,如红色箭头所示。凹槽中心距离施力点(零点)的距离为  $Y$ ,内部双孔结构的间距为  $X$ 。图 5(b)为安装有石英传感元件的实物样机。图 5(c)的纵向应力分布仿真结果显示,凹槽中心位置出现应力峰值,箭头所指处的应力集中可有效提升传感灵敏度。图 5(d)为称重模块装配示意图,箭头指向芯片安装位置。当在零点施加载荷时,力通过波纹管传递并挤压石英芯片,从而产生可测量信号。石英芯片的输出信号与所施加的力呈线性关系,保证了测量的高精度。该设计有效减小了机械滞后与漂移,提升了长期稳定性。密封式结构同时可抵御外界环境干扰,增强了在复杂工况下的可靠性,通过增设应力集中槽,提升低载荷段的应力传递效率,改善低量程灵敏度,调整整体结构尺寸与安装方式,降低安装难度,增强对平台秤偏载工况的适应性,有限元仿真与后续测试结果表明,优化设计有效提升了结构的应力传导效率,在保持原有线性度优势的同时,显著改善了低载荷段的性能表现,满足了本研究设定的工业级称重精度要求。



**Figure 5.** Slotted structure of the sensor (a) Design drawing of the bellows-type load cell; (b) Prototype of the bellows-type load cell; (c) Stress distribution simulation of the bellows-type load cell; (d) Assembly schematic of the weighing module  
**图 5.** 传感器开槽结构(a)波纹管称重传感器设计图; (b)波纹管称重传感器实物样机; (c)波纹管称重传感器应力分布仿真; (d)称重模块装配示意图

### 3. 传感器模块电路设计与测试

#### 3.1. 电路设计



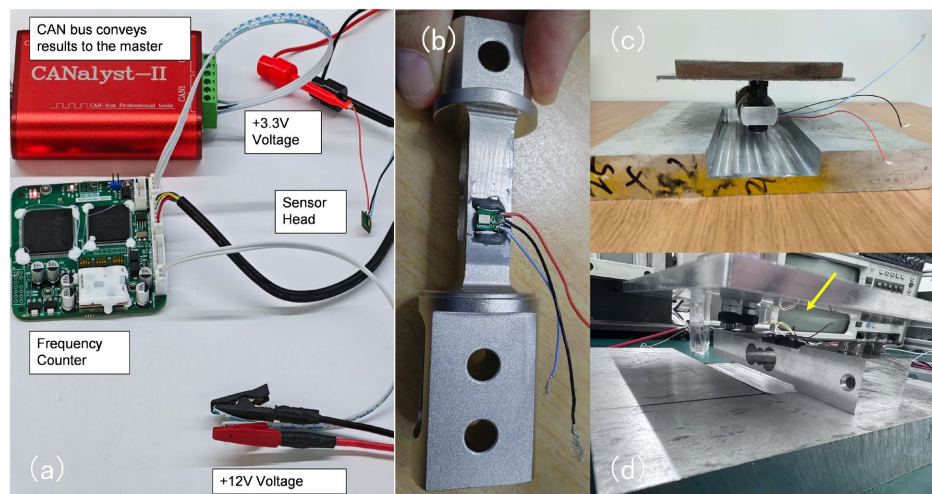
**Figure 6.** Circuit processing flow chart  
**图 6.** 电路处理流程图

为将传感器组件产生的原始力学信号转换为可量化的数字读数，本研究设计了专用集成电路架构。如图 5(d) 的实验装置所示，该系统通过施加标准砝码进行验证，建立了载荷与频率偏移之间的线性关系。核心信号处理流程如图 6 所示。系统采集传感器的原始谐振信号后，首先进行混频与调理。经过放大、滤波及施密特触发器整形，将模拟输入转换为稳定、标准的方波信号。该纯净信号由采用 FFT-PLL 混合算法的中央控制单元进行处理，该算法可精准提取基波谐振频率( $f_0$ )，同时生成次谐波与高次谐波分量，实现多参数分析。

由于频率偏移量极小，保持高信号质量至关重要。为保证测量精度，系统由专用电源管理单元供电，该单元包含多级  $\pi$  型滤波网络，可使电源纹波抑制比达到 80 dB 以上，确保系统稳定、无噪声运行。最终，处理后的数据传输至人机界面进行实时显示。用户可通过集成液晶屏切换测量模式，将不可见的微力变化转换为清晰、精确的数字输出。

### 3.2. 传感器模块测试

图 7(a) 为石英芯片频率读取系统的电路连接图。传感头由 3.3 V 电源供电，并连接至采用 12 V 供电的频率计数器。随后，频率信号通过 CAN 总线传输至主控制器进行分析。图 7(b) 为石英芯片在称重模块上的安装示意图。完整装配后的模块如图 7(c) 所示，秤盘与固定底座共同构成悬臂梁结构。实验中通过在秤盘上逐级施加砝码进行加载模拟，量程范围为 0~100 N·m。最后，图 7(d) 中红色箭头标示出石英芯片的具体安装位置。三次逐级加载试验的结果如图 8 所示。对其表现的评估主要基于两个标准，测量精度误差，重复性误差。精度误差是真实值和测量值之间的差值与真实值的比值，重复性则是进程的最大值和进程的最小值之间的差值与进程平均值的比值。蓝色曲线代表测量精度误差，红色曲线代表重复性误差。在 10 至 40 N·m 的初始载荷区间内，精度误差超过 5%，该偏差无法满足商用称重产品的标准指标要求。而当载荷超过 40 N·m 后，精度误差可控制在 5% 以下，符合市场应用需求。在重复性方面，10 至 30 N·m 区间内误差偏高，超过 30 N·m 后误差保持在 2% 以下，表现出良好的重复性。



**Figure 7.** Circuit connection diagram of the quartz chip frequency reading system (a) Circuit connection diagram; (b) Installation schematic; (c) Complete module; (d) Installation location diagram

**图 7.** 石英芯片频率读取系统的电路连接图 (a) 电路连接图; (b) 安装示意图; (c) 完整模块 (d) 安装位置图

除机械结构设计仍需进一步优化外，称重模块未配备减振机构也是导致低载荷下误差偏大的原因之一。在 40 至 100 N·m 的整体稳定区间内，平均精度误差为 3.51%，重复性误差为 1.32%。初步验证表明，采用石英压电谐振晶体作为核心传感元件，能够达到高端产品的技术指标。

三次逐级加载试验的结果如图 8 所示。蓝色曲线代表测量精度误差 E, 如公式(1),  $Y_i$  为单次测量值,  $Y_{ref}$  为参考值, 红色曲线代表重复性误差 R 如公式(2),  $\sigma$  为  $n$  次测量值的标准差,  $\bar{Y}$  为  $n$  次测量值的算术平均值。在 10 至 40 N·m 的初始载荷区间内, 精度误差超过 5%, 该偏差无法满足商用称重产品的标准指标要求。而当载荷超过 40 N·m 后, 精度误差可控制在 5% 以下, 符合市场应用需求。在重复性方面, 10 至 30 N·m 区间内误差偏高, 超过 30 N·m 后误差保持在 2% 以下, 表现出良好的重复性。除机械结构设计仍需进一步优化外, 称重模块未配备减振机构也是导致低载荷下误差偏大的原因之一。在 40 至 100 N·m 的整体稳定区间内, 平均精度误差为 3.51%, 重复性误差为 1.32%。初步验证表明, 采用石英压电谐振晶体作为核心传感元件, 能够达到高端产品的技术指标。

$$E = \frac{Y_i - Y_{ref}}{Y_{ref}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{\sigma}{\bar{Y}} \times 100\% \quad (2)$$

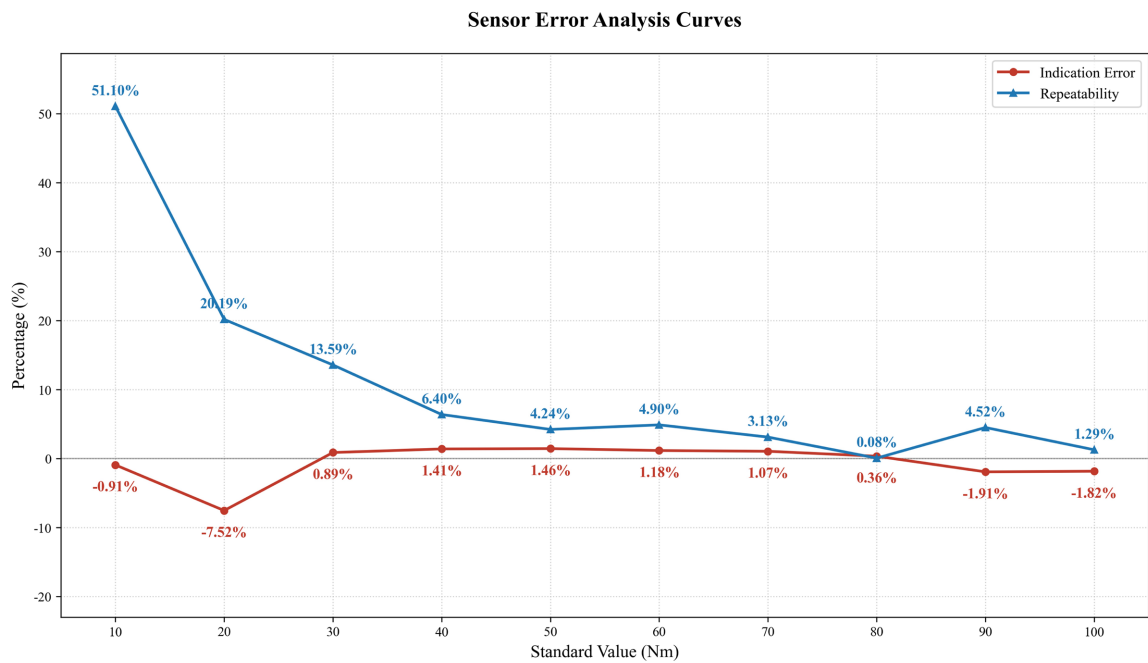


Figure 8. Results of three-step progressive loading experiments

图 8. 三次逐级加载试验的结果

#### 4. 结论

Table 1. Performance comparison of traditional strain gauge Electronic Scales

表 1. 传统应变片式电子秤性能对比

	应变片式	本研究
量程范围	0~500 kg	10~100 N·m (等效约 1~10 kg 载荷)
精度误差	±0.02%~±0.1% FS	3.51% FS (40~100 N·m)
重复性误差	±0.01%~±0.05% FS	1.32% FS
优势	成本低、成熟可靠	无温漂、抗干扰强

本研究提出一种采用 AT 切型石英压电谐振力传感器的数字式称重模块, 其核心创新点在于石英谐振器, 该器件具备优异的长期稳定性、可直接实现力-频率转换, 且抗电干扰能力强, 从而有效缓解了传统应变片传感器普遍存在的温漂与易受干扰等问题, 为保证结构可靠性, 本研究基于有限元仿真指导机械结构集成设计, 得到优化后的单点剪切梁结构, 通过专用凹槽结构将应力集中于石英芯片, 该方案可实现高效力传递, 同时使敏感元件免受外界扰动。在电路设计方面, 采用基于 FFT-PLL 技术的专用电路实现高精度频率测量, 并通过高稳定性电源进一步保障信号完整性, 经实验验证, 该模块性能满足预期: 在 40~100 N·m 载荷范围内, 平均精度误差为 3.51%, 重复性误差为 1.32%, 符合商用标准; 在载荷大于 30 N·m 时, 重复性误差可稳定保持在 2% 以下。但在 10~40 N·m 区间内测量精度有所下降, 该偏差主要源于模块未集成减振结构, 且低力灵敏度的机械参数仍需进一步优化。在表 1 中对比本研究与市场上传统高精度应变片式电子秤产品的规格, 在精度与重复性误差上尚未达到高精度规格, 需优化机构件在结构上的设计, 与产品安装一致性等条件, 本研究研制并验证了一套石英谐振式称重系统样机, 其表现出良好的精度趋势与稳定性, 后续可通过增加减振机构与优化低载荷设计进一步提升性能, 该方案为工业与实验室场景的高精度测量技术提供了一条可行且经济的实现路径。

## 参考文献

- [1] Li, S., Liu, G., Li, R., Li, Q., Zhao, Y., Huang, M., *et al.* (2022) Contact-Resistance-Free Stretchable Strain Sensors with High Repeatability and Linearity. *ACS Nano*, **16**, 541-553. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c07645>
- [2] Yoon, K., Park, S. and Choi, Y. (2020) Electromagnetic Force Compensation Weighing Cell with Magnetic Springs and Air Bearings. *Measurement Science and Technology*, **32**, Article ID: 015905. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abae8e>
- [3] Chen, M. (2012) Weigh-in-Motion Device Based on Capacitive Weighing Sensor. *Applied Mechanics and Materials*, **182-183**, 357-360.
- [4] Feng, J., Wang, Z., Zhanghu, M., Zhang, X., Shen, Y., Yang, J., *et al.* (2024) Monolithic Integrated Optoelectronic Chip for Vector Force Detection. *Microsystems & Nanoengineering*, **10**, Article No. 85. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00712-6>
- [5] Zhang, S., Zhao, Y., Qin, F., Deng, J. and Liu, Y. (2024) A Piezoelectric Balance System with Mass Automatic Recognition Ability Based on Resonant Frequency Shift. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **29**, 544-556. <https://doi.org/10.1109/tmech.2023.3286834>
- [6] Lee, S., Moon, Y., Son, W., Sohn, Y. and Choi, S. (2013) Silicon Strain Gauge Load Cell for Weighting Disdrometer. *Journal of Sensor Science and Technology*, **22**, 321-326. <https://doi.org/10.5369/jsst.2013.22.5.321>
- [7] Hawk, J.E., Ghoraiishi, M.S., Phani, A. and Thundat, T. (2018) Exploiting Broader Dynamic Range in Si-Bridge Modified QTF's for Sensitive Thermometric Applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, **279**, 442-447. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.05.020>
- [8] Shih, J., Chen, Y., Chiu, C., Lo, C., Chang, C. and Chen, K. (2014) Quartz Resonator Assembling with TSV Interposer Using Polymer Sealing or Metal Bonding. *Nanoscale Research Letters*, **9**, Article No. 541. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-9-541>
- [9] Park, J. and Choi, J. (2020) Review—Electronic Circuit Systems for Piezoelectric Resonance Sensors. *Journal of the Electrochemical Society*, **167**, Article ID: 037560. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab6cf7>
- [10] Booth, C.F. and Johns, J.P. (1947) The Development of Quartz Crystal Production. *Journal of the Institution of Electrical Engineers—Part IIIA: Radiocommunication*, **94**, 899-911. <https://doi.org/10.1049/ji-3a-2.1947.0113>
- [11] 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.
- [12] 巫晟逸, 张盼, 李坤, 刘秋实, 丁岗寅, 梁佳辉, 陈庆盈, 赵长春, 赵岷江. 石英压电谐振式力学传感芯片-芯片组装与推力测试实验[J]. *传感器技术与应用*, 2026, 14(2): 269-277.
- [13] 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.
- [14] Asakura, A., Fukuda, T. and Arai, F. (2008) Design, Fabrication and Characterization of Compact Force Sensor Using At-Cut Quartz Crystal Resonators. 2008 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 22-26 September 2008, 506-511. <https://doi.org/10.1109/iros.2008.4650925>

- 
- [15] Murozaki, Y., Nogawa, K. and Arai, F. (2014) Miniaturized Load Sensor Using Quartz Crystal Resonator Constructed through Microfabrication and Bonding. *ROBOMECH Journal*, **1**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s40648-014-0003-x>
- [16] Murozaki, Y. and Arai, F. (2015) Wide Range Load Sensor Using Quartz Crystal Resonator for Detection of Biological Signals. *IEEE Sensors Journal*, **15**, 1913-1919. <https://doi.org/10.1109/jsen.2014.2365240>