DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513900

基于 d_{33} 模式的压电式多维力传感器性能研究

李 芬,侯晓娟,张 欣,富肖严,何 剑
(中北大学极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 太原 030051)

摘 要:随着现代制造业、机器人技术、精密测量等领域飞速发展,多维力传感器对精准测量多方向力的需求日益凸显。针对提高机械臂和复杂机械系统中力控制与反馈精确性问题,开展关于压电式多维力传感器的研究。基于压电陶瓷的 d_{33} 模式设计一种可精确测量 X、Y、Z 这 3 个方向力的压电式多维力传感器。传感器采用立方体结构,压电片分别与 X、Y、Z 轴垂直放置,实现多维力独立测量及自解耦。在 COMSOL Multiphysics 中对其参数和网格进行设置,模拟分析在不同方向施加载荷时整体结构的应力分布和变形,并结合微机控制电子万能试验机、传感器和信号采集设备,建立传感器三维测量系统,实现三维力的测量与分析。研究表明,各加载方向的力可通过合理设计传递路径准确作用于目标压电片,且可测试 0~500 N 法向力(Z 方向)及 0~200 N 剪切力(X、Y 方向)。所设计传感器具有较好动态响应能力、良好灵敏度、高精方向性及较稳定重复性,其中 Z 方向灵敏度 0.080 V/N,X 方向灵敏度 0.110 V/N,Y 方向灵敏度 0.113 V/N,且各方向串扰均<0.2%。本研究在多维力测量领域具有广阔应用前景,为多维力传感器设计与优化提供重要实验数据和理论支持。

关键词: d_{33} 模式;多维力传感器;压电陶瓷;有限元分析
中图分类号: TH86 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Research on the performance of piezoelectric multi-dimensional force sensor based on d_{33} mode

Li Fen, Hou Xiaojuan, Zhang Xin, Fu Xiaoyan, He Jian
(*State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

Abstract: With the rapid development of modern manufacturing, robotics, precision measurement and other fields, the demand for multi-dimensional force sensors to accurately measure multi-directional forces has become increasingly prominent. Research on piezoelectric multi-dimensional force sensors has been initiated to address the problem of improving the accuracy of force control and feedback in robot arms and complex mechanical systems. Based on the d_{33} mode of piezoelectric ceramics, this paper designs a piezoelectric multi-dimensional force sensor that can accurately measure forces in the X, Y, and Z directions. The sensor adopts a cubic structure, and the piezoelectric sheets are placed vertically to the X, Y, and Z axes, respectively to achieve independent measurement and self-decoupling of multi-dimensional forces. The parameters and meshes are set in COMSOL Multiphysics to simulate and analyze the stress distribution and deformation of the overall structure when loads are applied in different directions. A three-dimensional sensor measurement system is established by combining a microcomputer-controlled electronic universal testing machine, sensors, and signal acquisition equipment to achieve three-dimensional force measurement and analysis. The study shows that the force in each loading direction can be accurately applied to the target piezoelectric sheet through a reasonably designed transfer path, and it is able to test the normal force of 0~500 N (Z direction) and the shear force of 0~200 N (X and Y directions). The designed sensor has good dynamic response capability, high sensitivity, precise directional resolution and relatively stable repeatability, with a sensitivity of 0.080 V/N in the Z direction, 0.110 V/N in the X direction, and 0.113 V/N in the Y direction, and crosstalk in each direction is less than 0.2%. It has a broad

收稿日期:2025-04-08 Received Date: 2025-04-08

application prospect in the field of multi-dimensional force measurement, providing important experimental data and theoretical support for the design and optimization of multi-dimensional force sensors.

Keywords: d_{33} mode; multi-dimensional force sensor; piezoelectric ceramics; finite element analysis

0　引　　言

随着机器人技术、智能制造和精密测量等领域快速发展,多维力传感器在机器人手臂、航空航天、医疗设备等领域需求日益增加。尤其是可同时检测 3 个方向力的传感器,因其能够提供全面力学信息而成为研究热点[1]。该类传感器按测力原理可分为电阻应变式[2]、电容式[3]、压电式[4-5]和光电式[6]等。电阻应变式传感器结构简单、技术成熟,但其测量速度相对较慢、抗干扰能力较弱;电容式传感器易受湿度影响,制造工艺复杂;光电式传感器抗电磁干扰能力强,但结构复杂,易受环境光影响;压电式传感器具有动态响应好、灵敏度高和分辨率高等优点。目前,国内外学者在多维力传感器的研究取得显著进展,主要集中在结构设计及力敏元件放置等方面。

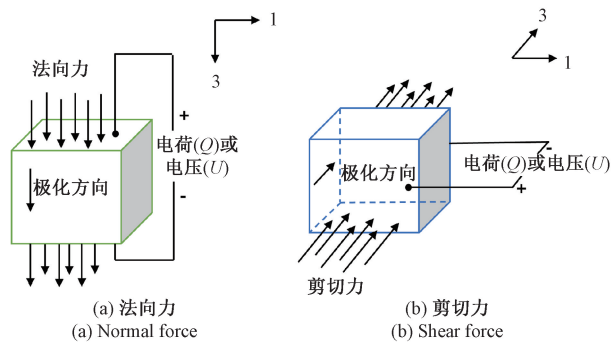
姚建涛等[7]提出 8 分支 4-4 冗余正交式六维力感知机构,通过支链正交与对称拓扑配置减小测量通道间耦合,但其结构冗余设计增加了整体机械系统复杂性和加工难度。Li 等[8-9]将 x_y 切型与 y_x 切型石英片组成石英晶组,与均荷环并联布置形成四点支撑结构布局,优化载荷环厚度提高各方向灵敏度以减小耦合,然而该方法对于结构布局和制造精度高要求使其易受加工误差影响,降低传感器实用性。陈望隆等[10]针对运动力学测量提出基于十字横梁结构无线六维力传感器,通过力敏元件分布优化实现测力单元方向性分离,但其结构复杂性与实际安装便捷性之间仍存在冲突,且未完全消除交叉耦合的潜在风险。金雷等[11-12]将两压电晶片并联放置于壳体内,通过改善晶片与电极接触方式减少信号传输畸变,但难以在制造过程中精确控制表面粗糙度,易导致批量生产的传感元件性能不一致,影响传感器精度与可靠性。张军等[13]将 1 个 x_y 单元和 2 个 y_x 单元组成石英晶组,安装 4 个石英晶组形成四点支撑空间布局,通过多块压电片协同工作提高信号灵敏度并抵消耦合,但该方案仍需复杂信号处理及额外电子补偿措施,增加系统成本和处理延迟。

针对上述研究中存在的复杂结构设计、高加工要求、制造一致性难以保证以及复杂信号处理问题,本文提出一种基于 d_{33} 模式的立方体结构压电式多维力传感器。该传感器采用与 X、Y、Z 轴垂直的压电片布局,实现三维力独立测量和自解耦,有效降低结构复杂性及加工要求,同时确保各方向测量高灵敏度和低耦合,避免现有方法的缺陷,提供一种更加实用、高效的解决方案。

1　力敏元件的选择

压电材料是压电传感器核心部件,其利用压电效应,即特定材料在受到外力压缩或拉伸时,其内部发生极化,从而在材料表面产生电荷,当外力移除后,材料恢复不带电初始状态。压电式传感器正是利用压电材料这一特性。压电材料[14-15]种类繁多,根据其组成和性能不同,可分为压电单晶、压电陶瓷(化学式通常写作 $Pb(Zr,Ti)O_3$,PZT)、压电聚合物和压电复合材料等。压电单晶和 PZT 因其稳定的压电性和高介电常数而广泛应用于高精度和高功率的应用场景。而聚合物和复合材料则因其柔韧性和轻便性,更适合柔性可穿戴设备和大面积传感器应用。

本研究选择 d_{33} 模式 PZT 作为力敏元件,其是指在压电材料的 3 方向(垂直方向)施加外力时,材料在同一方向产生电荷或电压响应,如图 1 所示。通过巧妙的结构设计与信号提取方式,实现对三维力(F_x、F_y、F_z)的测量。



(a) 法向力　(b) 剪切力
(a) Normal force　(b) Shear force

图 1　d_{33} 模式

Fig. 1　d_{33} mode

d_{33} 模式 PZT 不同点位(图 2)压电系数如表 1 所示,测量所得 d_{33} 值在 380~430 pC/N 间,边缘压电系数相对较低。由于样品在极化程度、材料均匀性及测量过程中的误差,各测点间压电系数存在一定差异。XRD(X-ray diffraction)图谱如图 3 所示,该图谱表明 PZT 具有典型的钙钛矿结构,(200)面未出现明显分裂,表明材料晶相主要为菱形相,相较于四方相具有较高的介电常数和压电系数,主峰(111)方向择优取向明显。综上该材料具有良好的压电性能,适用于高灵敏度和高稳定性的压电器件。

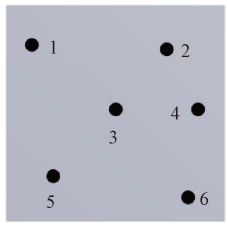


图 2 PZT 不同点位

Fig. 2 PZT with different points

表 1 不同位置压电系数

Table 1 Piezoelectric coefficient at different positions

($pC \cdot N^{-1}$)

点位编号	压电系数 d_{33}	点位编号	压电系数 d_{33}
1	392	2	415
3	425	4	387
5	401	6	384

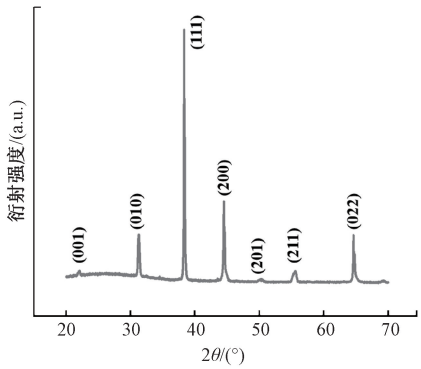


图 3 PZT 的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of PZT

2 压电式多维力传感器设计

压电式多维力传感器主要由压电元件、弹性体构成，其核心功能是将外部施加的机械力转换为电信号，主要组成部分包括信号采集、处理、传输及输出，以实现对外部机械力检测和测量。

2.1 结构设计

在瞬变、多维动态测量等技术要求下，多维力传感器多点布局方式需具备良好动态测量性能，确保在复杂工况下准确、稳定地采集各方向的力信号。本研究基于 d_{33} 模式设计一种压电式多维力传感器，其核心设计理念是确保外加载力可准确传递至陶瓷片厚度方向，避免力耦合干扰。设计结构如图 4 所示，采用立方体结构(20 mm×20 mm×20 mm)，主要材料为树脂，并在不同位置嵌入 PZT(5 mm×5 mm×1 mm)作为力敏元件，实现三轴独立测量。

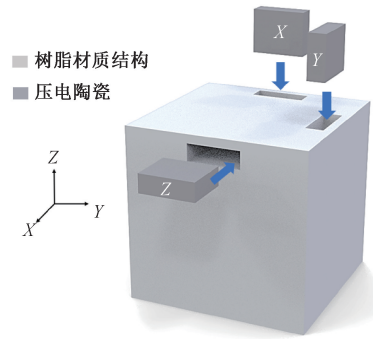


图 4 结构设计

Fig. 4 Structural designs

上述装置在立方体内部针对 X、Y、Z 这 3 个方向分别设置独立压电传感单元。压电片 X、Y、Z(PZT-X、PZT-Y、PZT-Z)分别垂直于 X、Y、Z 轴放置。其中当外力沿 Z 方向施加时，压电片受力后产生与该力成正比的电压信号；X、Y 方向测量采用力转换结构，即通过机械转动结构将 X/Y 方向水平力转化为压电片厚度方向垂直应力，使力有效加载至 PZT-X/PZT-Y 上，并输出对应的电压信号。其受力分析如式(1)所示。每个轴设计独立传感单元，且每个单元仅对单一方向力敏感。

$$\begin{cases} F_z = k_z \times V_z \\ F_x = k_x \times V_x \\ F_y = k_y \times V_y \end{cases} \tag{1}$$

其中，V_i 是各方向产生电压信号，k_i 是各方向灵敏度系数，F_i 是各方向力。在外加载力 $\boldsymbol{F}$ 作用下，传感器内部的各 PZT 分别响应 X、Y、Z 这 3 个方向的力，对应压电片可独立感知并输出相应的电信号，避免复杂的力耦合解算。

本研究设计的传感器采用立方体结构，选择 d_{33} 模式 PZT 作为力敏元件，提高垂直方向的测量精度，增强信号稳定性；通过结构优化，使不同方向力可独立加载至相应的压电片，减少测量信号间的耦合误差。

2.2 仿真分析

有限元分析方法在模拟求解真实的工程问题方面已被广泛应用，为验证得到的传感器模型是否满足设计要求，对其进行力学性能分析，利用 COMSOL Multiphysics 建立传感器的有限元模型并进行固体力学及静电仿真分析。本文依据机电耦合效应，利用如式(2)所示的应力-电荷形式耦合本构方程[16]。

$$\begin{cases} \boldsymbol{T} = \boldsymbol{c}_E \boldsymbol{S} - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{D} = \boldsymbol{e}\boldsymbol{S} + \boldsymbol{\varepsilon}_s \boldsymbol{E} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{T}$ 为应力；$\boldsymbol{S}$ 为应变；$\boldsymbol{E}$ 为电场；$\boldsymbol{D}$ 为电位移；$\boldsymbol{c}_E$ 为弹性矩阵；$\boldsymbol{e}$ 为耦合矩阵；$\boldsymbol{\varepsilon}_s$ 为节点矩阵。

在 COMSOL Multiphysics 建立压电式多维力传感器三维结构模型,并进行相应的参数设置和网格划分,模拟其在 X、Y、Z 这 3 个方向受力时的电荷分布和电压输出特性。研究不同加载方向力传递路径及其对压电片影响,分析压电片及整体结构在三维力加载下应力分布和变形情况。

在机-电耦合多物理场的仿真环境中将传感器压电元件材料设置为 PZT,并在结构力学模块中施加边界载荷,以分析不同力下应力情况和电势分布。同时对传感器底面自由度全约束,在传感器上施加载荷,得出传感器仿真云图如图 5 所示。在施加满量程载荷情况下,传感器外壳最大应力为 75.3 MPa,未达到所选材料的极限载荷,即该结构具有良好的力学强度与安全性;传感器整体应力分布较为均匀,仅在局部区域存在应力集中现象,不会影响传感器稳定性与长期使用性能。在固定一端情况下,对传感器某一表面施加载荷,如图 6 所示,左图为应力仿真,右图为电势仿真。在施加满量程载荷情况下,X 方向(图 6(a))最大位移 4.13×10^{-6} m,Y 方向(图 6(b))最大位移 4.32×10^{-6} m,Z 方向(图 6(c))最大位移 1.19×10^{-5} m。不同力所产生的应变程度不一样,产生的电场分布也不尽相同,随着施加力的增加,应变程度逐步递增,电势也逐步递增。

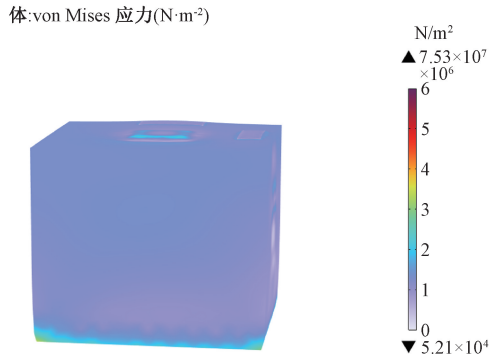


图 5　传感器仿真云图

Fig. 5　Sensor simulation cloud diagram

3　实验验证

三维力检测传感器由 PZT、立方体结构组成。PZT 放置在立方体结构内部,其顶部及底部附有用于输出的电极,微机控制电子万能试验机循环施加力,导致立方体结构反复形变,PZT 感知结构变形产生并输出电压。

3.1　三维力测量系统

本系统结合微机控制电子万能试验机、压电式多维力传感器及信号采集设备,如图 7 所示,主要用于测量外力施加在 X、Y、Z 这 3 个方向上的输出电压信号。系统

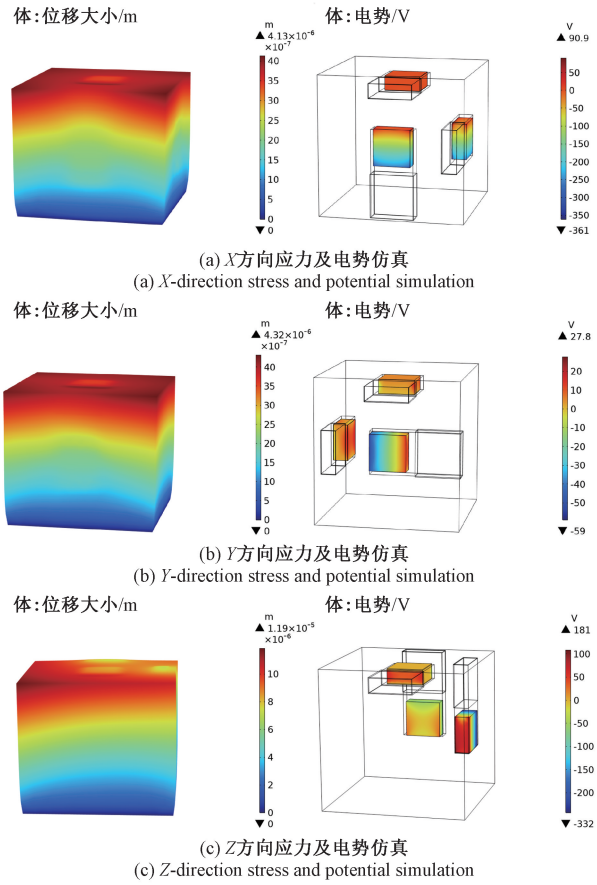


图 6　不同方向作用力下的应力及电势

Fig. 6　Stresses and potentials under forces acting in different directions

采用高精度力加载设备与精密电信号采集设备结合,确保数据采集的准确性、稳定性和实时性,为多维力测量研究提供可靠数据支持。

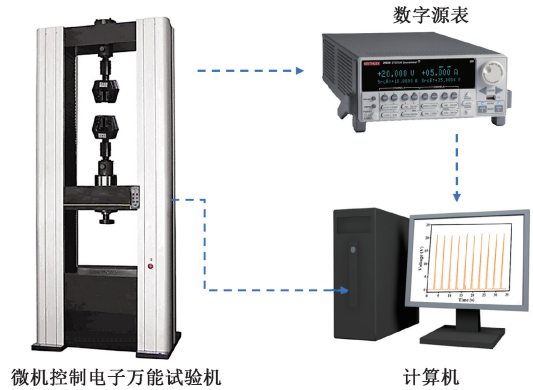


图 7　测试系统

Fig. 7　Test systems

电子万能试验机作为力加载设备,可提供高精度、可控的力加载环境,以模拟不同工况下受力情况。压

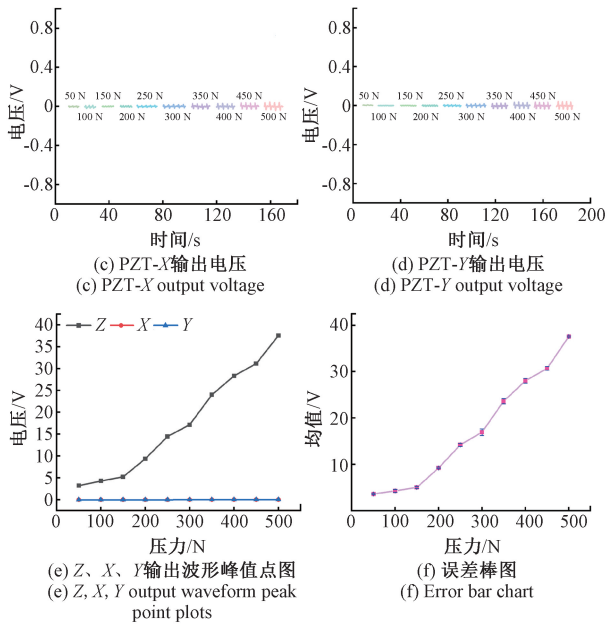
电式多维力传感器用于测量 X、Y、Z 这 3 个方向力，外力作用在压电片上时，压电片受力发生形变，输出相应的电压信号 V_x、V_y、V_z，为后续数据处理提供基础。Keithley 2602B 源表作为高精度电压测量设备，负责采集压电式传感器输出的电压信号，其具备高分辨率及数据传输功能，可测量 X、Y、Z 这 3 个方向的电压，确保数据采集准确性和实时性，为上位机分析提供可靠数据，实现三维力实时测量。

通过微机控制电子万能试验机施加外力，压电式多维力传感器将外力转换为电压信号，Keithley 2602B 进行高精度采集，上位机接收数据、实时显示和存储。整个流程实现三维力的测量与分析，且具有高精度、实时性和可视化的特点。

3.2 实验测试

施加 0~500 N 的法向力，采集各 PZT 电压信号响应值并进行分析。图 8(a)展示了传感器放置方式，法向力沿 Z 轴方向作用于立方体结构顶部，使得内部 PZT 受力变形并产生电压响应，Z、X、Y 输出电压如图 8(b)~(d)所示。随着施加法向力增大，传感器 Z 方向输出电压呈显著线性增长趋势，而 X、Y 方向输出电压基本保持恒定，未随法向力增加产生显著变化。上述结果表明法向力主要作用于 PZT-Z，X、Y 方向未产生明显的机械变形，电压响应较弱。这一现象可归因于传感器内部压电片的受力特性，加载力沿 Z 轴方向施加，使 PZT 沿该方向发生较大形变，产生明显的电压变化；而 X、Y 方向的压电片未受到直接挤压，导致其输出电压的变化幅度极小。

为量化不同方向的电压响应特性，对不同加载力下的输出电压峰值进行均值计算，并绘制电压-力关系曲线，如图 8(e)所示。该可视化结果表明 Z 方向输出电压最高，且峰值随施加力的增大呈现良好线性关系，X、Y 方向输出电压几乎为 0，传感器在这两方向上对法向力干扰响应极小，计算可得串扰 C_{XZ} 为 0.105%，C_{YZ} 为 0.108%，具备良好的抗干扰能力，且对输出电压峰值平均值拟合后得 Z 方向灵敏度 0.080 V/N。重复测量 3 次，在 0~500 N 的载荷范围内，整体呈明显上升趋势。误差棒图(图 8(f))显示各测点的波动范围较小，即在较大载荷下也能保持较好的稳定性和重复性。

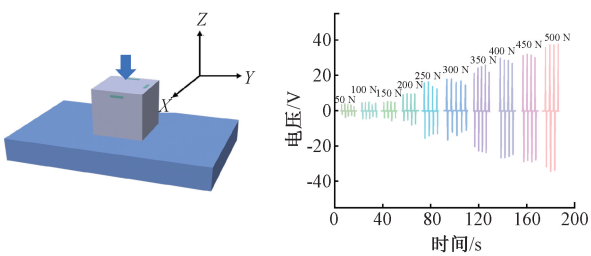


(c) PZT-X输出电压 (c) PZT-X output voltage
(d) PZT-Y输出电压 (d) PZT-Y output voltage
(e) Z、X、Y输出波形峰值点图 (e) Z, X, Y output waveform peak point plots
(f) 误差棒图 (f) Error bar chart

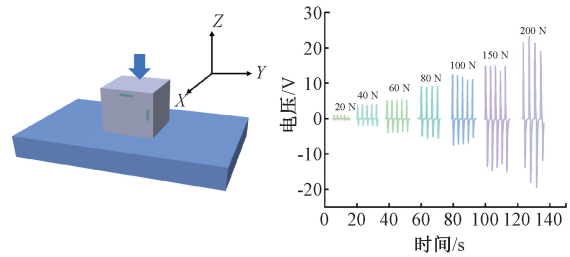
图 8 Z 轴法向力下传感器输出性能

Fig. 8 Sensor output performance under Z-axis normal force

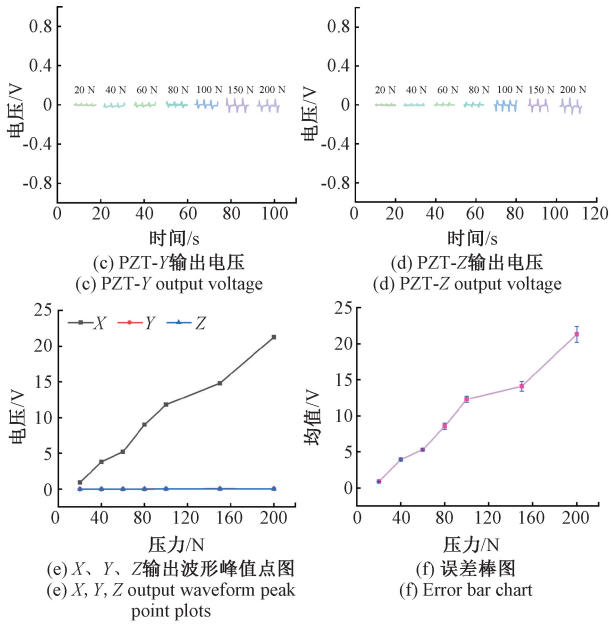
将传感器置于万能试验机上，并对其顶部施加 0~200 N 剪切力，检测 X 轴剪切力，施加位置如图 9(a)所示。图 9(b)~(d)描绘了传感器在不同 X 轴力作用下 X、Y、Z 这 3 个方向的电压输出曲线。施加的 X 轴剪切力逐步增加，PZT-X 发生形变，导致其电压信号显著变化，可观察到 X 方向电压输出整体呈正向增长趋势。由于本实验仅施加 X 轴方向的剪切力，未直接作用于 Y、Z 轴，其输出电压基本保持在低幅度区间。输出电压曲线峰值在 X 轴不同力下平均值曲线如图 9(e)所示，当受到 X 轴力时，PZT-X 输出电压比 PZT-Y、PZT-Z 更明显。此外，PZT-Y、PZT-Z 输出电压表现出一致趋势，计算可得串扰 C_{YX} 为 0.141%，C_{ZX} 为 0.155%，表明该传感器在剪切力检测方面具有良好的线性响应特性，且对输出电压峰值平均值拟合后得 X 方向灵敏度 0.110 V/N。重复测量 3 次，在 0~200 N 的载荷范围内，X 方向输出电压表现出良好上升趋势。各测点的误差棒(图 9(f))较短，多次测量之间差异较小，重复性较好。该方向的量程和灵敏度与 Z 方向相比略低，但在中小载荷范围内表现稳定。



(a) Z轴受力位置 (a) Z-axis force position
(b) PZT-Z输出电压 (b) PZT-Z output voltage



(a) X轴受力位置 (a) X-axis force position
(b) PZT-X输出电压 (b) PZT-X output voltage

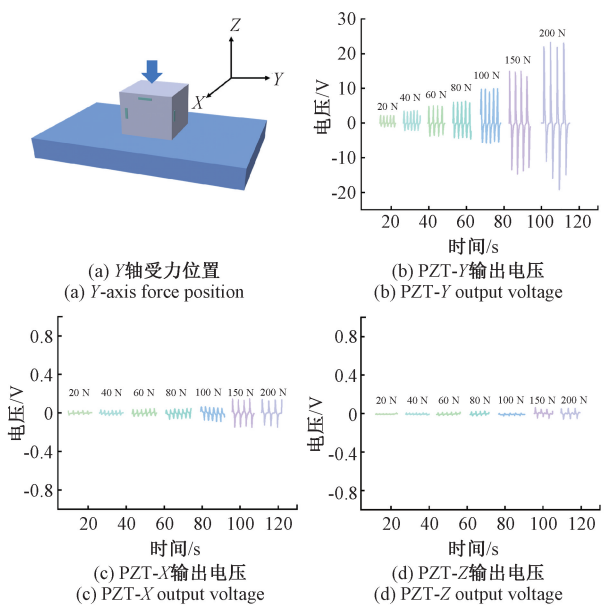


(c) PZT-*Y*输出电压
(c) PZT-*Y* output voltage
(d) PZT-*Z*输出电压
(d) PZT-*Z* output voltage
(e) *X*、*Y*、*Z*输出波形峰值点图
(e) *X*, *Y*, *Z* output waveform peak point plots
(f) 误差棒图
(f) Error bar chart

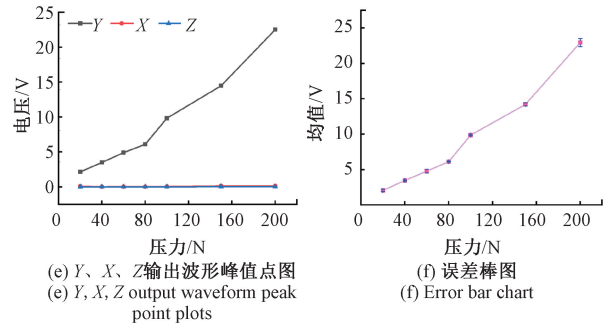
图 9　*X* 轴剪切力下传感器输出性能

Fig. 9　Sensor output performance under *X*-axis shear force

传感器在 *Y* 方向施加力位置如图 10 (a)所示,其中三维力传感器位于平台上,在 *Y* 轴力作用下,PZT-*Y* 产生电信号。图 10(b)~(d)显示了在 0~200 N 动态 *Y* 轴力作用下,*Y*、*X*、*Z* 轴输出电压分布。*Y* 方向输出电压呈较明显增长趋势,而 *X*、*Z* 方向不直接受力影响,输出电压变化不明显。图 10(b)~(d)中输出电压曲线峰值在图 10(e)中进行了平均和绘制,显示 *Y* 方向输出电压明显增长趋势,*X*、*Z* 方向输出电压几乎为 0,计算可得串扰 C_{XY} 为 0.113%,C_{ZY} 为 0.199%,且对输出电压峰值平均值拟合后得 *Y* 方向灵敏度 0.113 V/N。同样在 0~200 N



(a) *Y*轴受力位置
(a) *Y*-axis force position
(b) PZT-*Y*输出电压
(b) PZT-*Y* output voltage
(c) PZT-*X*输出电压
(c) PZT-*X* output voltage
(d) PZT-*Z*输出电压
(d) PZT-*Z* output voltage



(e) *Y*、*X*、*Z*输出波形峰值点图
(e) *Y*, *X*, *Z* output waveform peak point plots
(f) 误差棒图
(f) Error bar chart

图 10　*Y* 轴剪切力下传感器输出性能

Fig. 10　Sensor output performance under *Y*-axis shear force

范围内,*Y* 方向曲线整体平滑上升,表明传感器在该方向上也具有较好的线性响应。误差棒(图 10(f))短小,表明测试数据波动不大,重复性良好。与 *X* 方向相比,*Y* 方向的最大输出略低,但整体性能依旧稳定可靠。

主要性能指标如表 2 所示,测试结果进一步验证压电晶体在不同力值下响应特性,向间干扰均<0.2%,表明其在多维力测量中应用潜力巨大,为多维力传感器设计和优化提供了可靠实验数据和理论依据。

表 2　主要性能指标

Table 2　Main performance indicators

性能指标	方向	*X*	*Y*	*Z*
灵敏度/(V·N^{-1})		0.110	0.113	0.080
向间干扰/%	*X*		0.141	0.155
	Y	0.113		0.199
	Z	0.105	0.108	

3.3　响应时间

在实验测试中,对压电片与应变片在不同加载频率(0.4、0.8、1.2、1.6 Hz)下的响应特性进行对比分析,如图 11 所示。结果表明,在相同外部加载条件下,两种传感元件在响应时间上存在显著差异。压电片利用压电效应,当受到外力作用时能迅速产生电荷变化,其响应时间随着加载频率的提高而不断缩短。例如,在 1.6 Hz 加载频率下,压电片的响应时间仅为 0.368 s,表现出极快的瞬态响应能力;而在较低的 0.4 Hz 频率下,其响应时间略长,但仍远快于应变片。相较之下,应变片依赖于电阻随应变变化的原理,其内部应力传递及电阻累积变化的过程需要一定时间,使得其响应时间在各频率下均显著高于压电片,尽管随频率增高,其响应时间有所减小,但总体仍明显滞后于压电片。

实验结果清晰展示在不同加载频率下,压电片与应变片在响应时间与动态信号捕捉上的显著差异。压电片由于其快速响应的特性,更适用于需要捕捉瞬态或高频

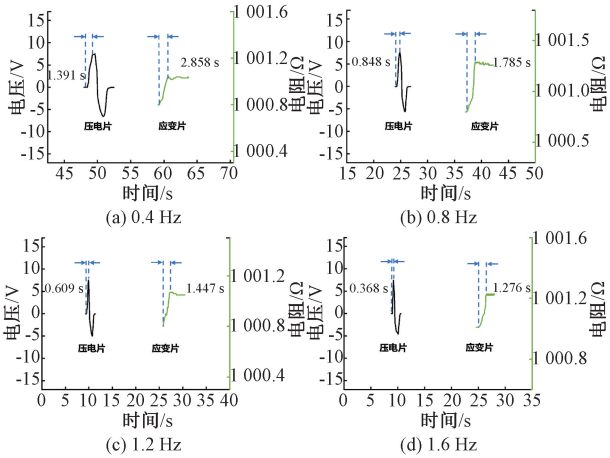


图 11 响应时间对比

Fig. 11 Response time comparison

动态信号的场合;而应变片虽响应稍慢,但在低频、稳态加载条件下仍能提供稳定、可靠的测量结果,为实际工程应用中提供更多符合测量需求的选择。

4 结 论

本文所设计传感器通过紧凑立方体结构与合理 PZT 布置,在 X、Y、Z 这 3 个方向分别实现约 0.110、0.113 和 0.080 V/N 的灵敏度,且误差棒图波动较小,各方向串扰均<0.2%,同时确保各方向力的独立传递与测量,大大降低因结构误差引起的耦合干扰。此外,在响应时间方面,采用压电力敏元件可迅速捕捉外部力变化,使该传感器在动态、瞬态力测量中表现更为出色。

从应用角度看,该传感器凭借其灵敏度、快速响应和精确方向性,适用于机器人手臂、航空航天及医疗设备等领域中对动态力反馈和力控制要求较高的场合。其快速瞬态响应性能使其在复杂机械系统中可实时捕捉瞬时变化的力信号,有效提升系统的控制精度和安全性。同时,该研究为多维力传感器设计与优化提供了重要理论依据和实验数据,推动相关领域在高精密力测量技术方面的发展,并为未来开发更智能、响应更迅速的力检测系统奠定坚实基础。

参考文献

[1] 李春风, 张春, 胡珊珊, 等. 六维力传感器的结构设计分析[J]. 测控技术,2020, 39(5):41-48.
LI CH F, ZHANG CH, HU SH SH, et al. Structure design and analysis of six-dimensional force sensor[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(5): 41-48.

[2] 韩康, 陈立恒, 李行, 等. 高灵敏度大量程六维力传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 61-69.
HAN K, CHEN L H, LI H, et al. Design of a six-axis force sensor with large range and high sensitivity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2019, 40(9): 61-69.

[3] 蒲明辉, 冯向楠, 罗国树, 等. 基于结构解耦的新型电容式力矩传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 10-17.
PU M H, FENG X N, LUO G SH, et al. Design of novel capacitive type torque sensor based on structural decoupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2020,41(2):10-17.

[4] DIZDAR H, AYDEMIR B, VATAN C. Investigation of the effect of load rate on creep and hysteresis errors in strain gauge and piezoelectric force transducer[J]. Measurement: Sensors, 2022, 22: 100374.

[5] LI Y J, XU X SH, WANG G C, et al. Fault-tolerant measurement mechanism research on pre-tightened four-point supported piezoelectric six dimensional force/torque sensor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106420.

[6] JU F, HONG Y, BAI D M, et al. A laminated continuum robot with gripping force-sensing forceps for robot-assisted minimally invasive surgeries[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 23(1): 766-774.

[7] 姚建涛,阮豪奇,蔡大军,等. 冗余正交式六维力感知机构性能分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2020, 41(1):162-169.
YAO J T, RUAN H Q, CAI D J, et al. Performance analysis and experimental study of redundant orthogonal six-dimensional force sensing mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2020, 41(1): 162-169.

[8] LI Y J, YANG C, WANG G C, et al. Research on the parallel load sharing principle of a novel self-decoupled piezoelectric six-dimensional force sensor[J]. ISA Transactions, 2017, 70: 447-457.

[9] LI Y J, WANG G C, YANG X, et al. Research on static decoupling algorithm for piezoelectric six axis force/torque sensor based on LSSVR fusion algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 110: 509-520.

[10] 陈望隆, 杨述焱, 胡权, 等. 面向运动力学测量的无线六维力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 129-136.
CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2019, 40(4): 129-136.

[11] 金雷, 贾振元, 刘巍. 压电力传感器晶片与电极接触刚度影响研究[J]. 机械工程学报,2016, 52(22): 15-23, 30.
JIN L, JIA ZH Y, LIU W. Effect of contact stiffness between sheets and electrodes in piezoelectric force sensors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 15-23, 30.

[12] JIA ZH Y, JIN L, LIU W, et al. Influence of sheet roughness on the sensitivity of piezoelectric force sensor[J]. Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(1): 243-250.

[13] 张军, 李寒光, 李映君, 等. 压电式轴上六维力传感器的研制[J]. 仪器仪表学报,2010, 31(1): 73-77.
ZHANG J, LI H G, LI Y J, et al. Development of piezoelectric six-axis force sensor on axis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 73-77.

[14] HABIB M, LANTGIOS I, HORNBOSTEL K. A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(42): 423002.

[15] 段利利, 邢健. 浅谈压电材料研究现状及发展趋势[J]. 山东工业技术, 2015(22): 271.
DUAN L L, XING J. A brief discussion on the research status and development trends of piezoelectric materials[J]. Shandong Industrial Technology, 2015 (22): 271.

[16] 王稳稳, 杨文慧, 蒙蕊蕊, 等. 基于压电效应的压电式传感器特性研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(8): 292-295.
WANG W W, YANG W H, MENG R R, et al. Characterization of piezoelectric sensors based on piezoelectric effect[J]. Electromechanical Engineering Technology, 2024, 53(8): 292-295.

作者简介

李芬,2023 年于中北大学获得学士学位,现为中北大学硕士研究生,主要研究方向为多维力传感器。
E-mail:lifennn07@163.com

Li Fen received her B.Sc. degree from the North University of China in 2023. She is currently a master's student at North University of China, with her main research interest includes multi-dimensional force sensors.

侯晓娟(通信作者),2015 年于华中科技大学获得博士学位,现为中北大学教授,主要研究方向为柔性传感技术、微系统设计与集成。
E-mail:houxiaojuan@nuc.edu.cn

Hou Xiaojuan (Corresponding author) received the Ph.D. degree in physical electronics from the Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, in 2015. She is currently an associate professor with North University of China, Taiyuan, China. Her main research interests include flexible sensing technology, microsystem design, and integration.