

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104689

压电薄膜三维重载力传感器设计与实验*

王桂从 赵鹏 李映君 杨志康 陈斯

(济南大学机械工程学院 济南 250022)

摘要:面向高性能轴承滚动体成型质量监控领域对重载多维高频强冲击载荷动态测量力传感器的急需,提出了一种基于PVDF压电薄膜三维重载力传感器新的结构形式及其测量原理,实现三维重载载荷动态测量。传感器敏感元件由上、中、下3层压电薄膜组成,三维力变化引起每组不同面域切割的压电薄膜电荷量变化,从而实现三维力大小计算。传感器支撑壳体起到分载作用,从而实现重载载荷测量。对传感器样机进行了准静态标定实验,结果表明,该传感器具有较好的线性,非线性误差小于2%,能完成重载场合下的动态测量要求,为压电薄膜力传感器在重载多维载荷动态测量领域提供了重要的设计、研制及应用参考依据。

关键词:压电效应;PVDF;三维力传感器;重载;面域分割

中图分类号: TN06;TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Design and experiment of PVDF piezoelectric film 3-D heavy load force sensor

Wang Guicong Zhao Peng Li Yingjun Yang Zhikang Chen Si

(School of Mechanical Engineering, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, China)

Abstract: Facing the urgent need of dynamic measuring force sensor for heavy load, multi-dimensional, high-frequency and strong impact load in the field of high-performance bearing rolling element forming quality monitoring, a new structural form and measurement principle of piezoelectric film three dimensional heavy load force sensor are proposed. The sensing element of the sensor is composed of upper, middle and lower piezoelectric films. The change of three-dimensional force causes the change of charge of piezoelectric films cut in different regions of each group, so as to realize the calculation of three-dimensional force. The sensor support shell plays the role of load sharing, so as to realize heavy load measurement. The quasi-static calibration experiment of the sensor prototype is carried out. The experimental results show that the sensor has the advantages of good linearity. The nonlinear error is less than 2%. It can meet the dynamic measurement requirement under heavy load. Therefore, it provides an important reference basis for the design, development and application of piezoelectric thin film force sensor in the field of heavy load multi-dimensional load dynamic measurement.

Keywords: piezoelectric effect; PVDF; 3-D force sensor; heavy Load; area segmentation

0 引言

航空航天轴承、高铁轴承、高档机床主轴承等高性能轴承主要依赖进口,这对于我国国防建设和交通等重要行业领域构成了严重的安全隐患。作为轴承的重要组成部分之一,轴承滚动体的性能和制造精度直接决定了最

终轴承产品的性能和使用寿命,制造高性能轴承滚动体成为促进我国轴承制造业发展的关键所在^[1-3]。冷锻成型在中小型钢球生产加工过程中作为其第一道工序在整个生产工艺中的地位极为重要,冷锻工艺不仅节省材料,而且节省时间,但是国内对于冷锻过程中容易出现冲偏、欠冲、过冲等成型缺陷的检测手段匮乏成为制约钢球制坯行业发展的瓶颈^[4-5]。在中小型钢球成型过程中,现有

收稿日期: 2021-08-31 Received Date: 2021-08-31

* 基金项目: 国家自然科学基金(51705200, 51875250)、山东省高等学校青创科技支持计划(2019KJB018)、济南大学科技计划(XKY1533)项目资助

冷镦机生产能力可达到几百粒/分钟,冷镦成型力具有高速、重载、强冲击等特性,此外,毛坯料在整个轧制过程中冷镦力由初始的单向压力状态向多向压应力状态实时变化,增加了多维力测量及实时监控的难度^[6]。

研究成果表明成型过程中可以通过力的检测表征成型质量^[7-9]。压电式力传感器具有线性好、动态响应快、高灵敏度等优点,在动态力信息检测领域具有非常广阔的应用前景。相比于重载载荷下易脆的压电石英、压电陶瓷等其他压电材料,PVDF 具有固有频率和化学稳定性高、较高的压电常数、耐疲劳能力和耐冲击性强、成本低等优势,对结构的力学性能影响较小,尤其适合于动态冲击力测量的场合^[7,10-11]。在三维力测量方面,Ting 等^[12]设计了一种用于三轴力传感器的单层 PVDF 薄膜,柔性压电薄膜尺寸较大达到 15 cm×15 cm。张艳芳等^[13]提出了一种由 3 个夹角为 120 度的 PVDF 压电敏感单元构成 PDMS 半球结构柔性触觉传感器。潘奇等^[14]设计了基于 PVDF 的四棱台结构形式三维力机器人触觉传感器。Yu 等^[15]制备了一种由 6 个三轴触觉单元组成的 PDMS 结构三维力传感器,实现了 1.5 N 载荷测量。Chen 等^[16]制备了上下电极结构的柔性压电式传感器,接触力通过弹性 PDMS 凸块传递给 4 个对称布置的压电传感单元。Cheng 等^[17]提出了一种基于压电弹性体的三轴力动态测量柔性触觉传感器。压电弹性体放置在 PDMS 凸块下,通过连接分离的铜电极将其分为 4 个传感单元。Lee 等^[18]通过一层聚偏氟乙烯薄膜设计了能够感知剪切力和法向力的 2×2 阵列柔性传感器。

在较大载荷测量方面,刘小锋等^[19]结合压电薄膜和压电石英设计了能实现较大量程载荷测量的车辆动态称重传感器。杨明等^[20]搭建了一套基于 PVDF 压电膜传感器的应力测量系统,用于测量高速冲击下固体推进剂的应力水平。Nguyen 等^[21]设计了基于 PVDF 压电薄膜的应变传感系统,用于监测测镗孔过程中的模态耦合颤振和单点切削过程中的动态切削力和扭矩。Tang 等^[22]进行了碰撞实验建立了 PVDF 薄膜在撞击过程中的压电信号提取系统。Li 等^[23]提出了一种基于载荷信号分析方法的钢球成形质量在线监测技术,初步揭示了钢球冷镦初锻过程中底模的载荷特性,基于压电薄膜研制了一种单维重载载荷测量用力传感器。

现有 PVDF 压电薄膜三维力传感器常用于机器人柔性触觉传感器和可穿戴电子设备等,大多采用的是四棱台等 PDMS 弹性体结构形式,可以实现三维微力测量。冷镦力检测用压电薄膜力传感器的研究则局限于单向重载压力,而合理的结构设计可以实现三维力测量,难点在于重载场合下传感器结构设计和测量原理的实现。为解决现有压电薄膜只能用于单维重载冲击力测量的难题,

本文提出了一种 PVDF 压电薄膜三维重载力传感器新的结构形式,并对其并联分载和面域分割测量原理进行研究,从而实现冷镦机多维、高速、强冲击重载载荷测量。

1 传感器结构设计及测量原理

结合冷镦机底模结构形式对冷镦机底模进行改进,压电薄膜三维重载力传感器结构设计如图 1 所示,由上盖、底座、压电薄膜、电极片、绝缘片组成。底座上表面开有凸台,起到分载作用。采用螺钉将传感器上盖、力敏元件组、底座连接在一起,起到消除间隙和提供预紧力作用。电极片 1、5、8 共同接地,电极片 2、3、4、6、7 用于输出电荷信号。

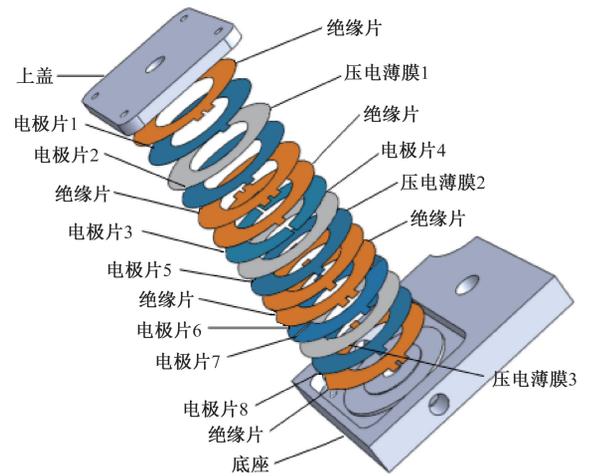


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

根据空间力系平衡和坐标变换原理,横向力载荷会产生弯矩,由于传感器中压电薄膜呈对称布置,所以压电薄膜表面会产生方向相反、大小相等的压力。图 2 所示为压电薄膜三维力测量原理示意图,当横向力 F_x (F_y) 作用于传感器上表面时,由于力的作用点与压电薄膜安装位置之间存在力臂 h ,因此在力的作用下,对称布置的下层(中层)压电薄膜一边产生压力信号,另一边产生拉力信号,理想情况下力载荷大小相等、方向相反,从而在电极片 6、7(3、4) 表面产生极性相反的等量电荷量 Q_1 、 Q_2 (Q_3 、 Q_4),经过 D/A 转换为电压信号 X_1 、 X_2 (Y_1 、 Y_2)。当轴向力 F_z 作用于传感器上表面时,力传递至第 3 层压电薄膜上产生同极性的压电电荷量 Q_5 ,经过 D/A 转换为 Z 。

传感器三维力大小可以通过式(1)计算。 X 向力通过 6、7 号电极片信号组合测量, Y 向力通过 3、4 号电极片信号组合测量, Z 向力通过 2 号电极片信号测量。

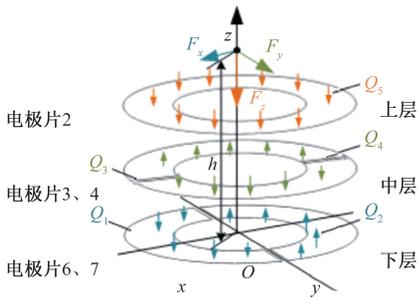


图 2 压电薄膜三维力测量原理

Fig. 2 Three-dimensional force measurement of piezoelectric film

$$\begin{cases} F_x = \frac{Q_1 - Q_2}{d_{33}} = m_1(X_1 - X_2) \\ F_y = \frac{Q_3 - Q_4}{d_{33}} = m_2(Y_1 - Y_2) \\ F_z = \frac{Q_5}{d_{33}} = m_3Z \end{cases} \quad (1)$$

式中： d_{33} 为压电薄膜的压电常数； m_1 、 m_2 和 m_3 为传感器各向载荷灵敏度常数。

2 传感器力学模型建立

当传感器上盖受到外部载荷 F 作用时，传感器的上盖受力区域划分为内分载区域 a 、中间部分测力敏感区域 b 和外分载区域 c ，如图 3 和 4 所示。

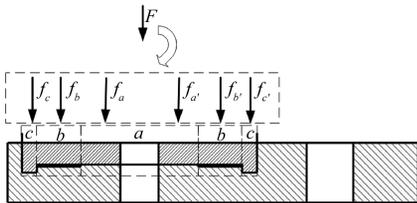


图 3 传感器轴向载荷力学分析

Fig. 3 Mechanical analysis of axial load of sensor

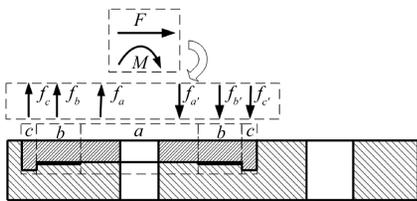


图 4 传感器横向载荷力学分析

Fig. 4 Mechanical analysis of sensor transverse load

施加的轴向载荷 F 分为 3 个并联分力 f_a 、 f_b 和 f_c ，压电薄膜受力为 f_b ，其余两个并联分力通过传感器壳体向

下传递，从而解决压电薄膜测力范围有限和传感器所承受大载荷的矛盾问题，实现重载载荷测量。同样，施加横向载荷时有单侧 3 个并联受力区域，相比于轴向分载，横向分载能力会降低，灵敏度更高。

根据压电薄膜三维重载力传感器结构建立传感器的静力学模型如图 5 所示。

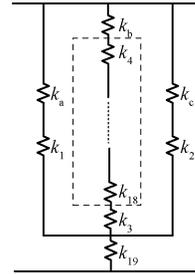


图 5 传感器静力学模型

Fig. 5 Sensor static model

图 5 中， k_a 、 k_b 、 k_c 为传感器上盖内分载区域 a 、中间部分测力敏感区域 b 和外分载区域 c 等效刚度， k_1 、 k_2 、 k_3 为传感器底座对应上述分载区域等效刚度， k_4 、 k_8 、 k_9 、 k_{13} 、 k_{14} 、 k_{18} 为绝缘片等效刚度， k_5 、 k_7 、 k_{12} 、 k_{17} 为电极片 (1、2、5、8) 等效刚度， k_{10} 、 k_{15} 为电极片 (3、4、6、7) 等效刚度， k_6 、 k_{11} 、 k_{16} 为压电薄膜 (1、2、3) 等效刚度， k_{19} 为传感器底座等效刚度， k_{a1} 、 Δl_{a1} 为传感器上盖整个外圈分载区域等效刚度和等效形变量， k_{bd3} 、 Δl_{bd3} 为传感器上盖、压电薄膜组与底座安装凸台分载区域等效刚度和等效形变量， k_{c2} 、 Δl_{c2} 为传感器上盖内分载环与底座分载凸台分载区域等效刚度和等效形变量。假设传感器各部件属于理想刚性连接，由刚性变形协调一致原理，可得传感器各并联支路变形量应相等，即：

$$\Delta l_{a1} = \Delta l_{bd3} = \Delta l_{c2} \quad (2)$$

由胡克定律得：

$$f_a = k_{a1} \Delta l_{a1}, f_b = k_{bd3} \Delta l_{bd3}, f_c = k_{c2} \Delta l_{c2} \quad (3)$$

从图 1 可以看出，传感器各支路内部属于串联结构。 η 为作用在 PVDF 压电薄膜上的载荷与作用在传感器上盖载荷的分载比，可通过式 (4) 求出。

$$\eta = \frac{f_b}{F} = \frac{f_b}{f_a + f_b + f_c} = \frac{k_{bd3}}{k_{a1} + k_{bd3} + k_{c2}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{k_d} = \sum \frac{1}{k_i} \quad i = 4, 5, \dots, 18 \\ \frac{1}{k_{a1}} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_1} \\ \frac{1}{k_{bd3}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_3} \\ \frac{1}{k_{c2}} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_2} \end{cases} \quad (5)$$

通过式(6)计算得到传感器电荷灵敏度。

$$S_Q = \frac{Q}{F} = \eta \frac{Q}{f_b} = \eta d_{33} \quad (6)$$

通过 MATLAB 对建立的力学模型进行数值模拟,分析并获得了传感器关键结构参数变化对传感器灵敏度影响规律。传感器电荷灵敏度随上盖受载荷部分高度和压电薄膜外径增大而增加,分载效果降低;传感器电荷灵敏度随内分载环直径增大而减小,分载效果得到提升;底座高度对传感器灵敏度影响较小。得出优化后传感器的外形尺寸为上盖高度 7 mm,底座高度 15 mm,压电薄膜内径 40 mm,压电薄膜外径 70 mm。

3 传感器仿真分析

根据传感器测量要求分析,需承受轴向载荷 160 kN,横向载荷 10 kN 力。通过 ANSYS 软件建立传感器模型如图 6 所示,进而验证传感器结构及测量原理的可行性。传感器各部件的材料参数如表 1 所示。

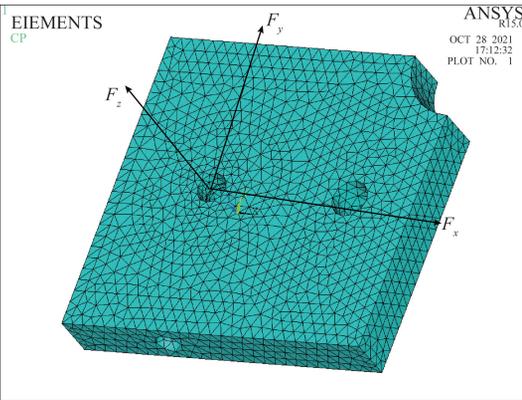


图 6 传感器模型及网格划分

Fig. 6 Sensor model and grid division

表 1 传感器各部件材料参数

Table 1 Material parameters of sensor components

部件	材料	弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ (kg · m ⁻³)	单元
壳体	AISI 130	2.06×10 ¹¹	0.30	7 850	Solid186
压电薄膜	PVDF	2.50×10 ⁹	0.35	1 780	Solid226
电极片	Cu	2.03×10 ¹¹	0.33	8 900	Solid186
绝缘层	PET	2.96×10 ⁹	0.37	1 420	Solid186

由于压电效应的分析属于多耦合场物理分析,PVDF 压电薄膜在 ANSYS 中所对应的压电矩阵、相对介电系数矩阵和弹性系数矩阵设置如下。

压电矩阵 $[e]$ (10⁻²C/m²)如下:

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.036 \\ 0 & 0 & -1.153 \\ 0 & 0 & -2.788 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.215 & 0 \\ -1.224 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

相对介电系数矩阵 $[\epsilon^s]$ (10⁻¹¹F/m)如下:

$$[\epsilon^s] = \begin{bmatrix} 7.324 & 0 & 0 \\ 0 & 9.244 & 0 \\ 0 & 0 & 7.640 \end{bmatrix}$$

弹性系数矩阵 $[c]$ (10⁹N/m²)如下:

$$[c] = \begin{bmatrix} 3.61 & 1.61 & 1.42 & 0 & 0 & 0 \\ 1.61 & 3.13 & 1.31 & 0 & 0 & 0 \\ 1.42 & 1.31 & 1.62 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.69 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0.59 \end{bmatrix}$$

3.1 传感器静力学仿真

与其他测量原理不同,压电式力传感器不仅需要分析应力场变化,还需要进行压电耦合场分析。将传感器各压电薄膜的底面设置成零电势,对传感器底座下表面施加全约束。通过加载块分别在 X 向和 Y 向施加 2~10 kN 载荷(步长 2 kN)、在 Z 向施加 20~160 kN 载荷(步长 20 kN),得到的各电极片的输出电势数值和电势云图。表 2~4 为 PVDF 压电薄膜上表面节点在 X、Y、Z 3 向载荷分别施加载荷后电势值。从表 2~4 仿真结果可以看出,仿真结果与测量原理一致,各向线性度较高,耦合干扰较小。传感器 X 向输出的电压灵敏度为 4.5 V/kN,电荷灵敏度为 8 050 pC/kN;Y 向电压灵敏度为 5.1 V/kN,电荷灵敏度为 9 120 pC/kN;Z 向电压灵敏度为 1.1 V/N,电荷灵敏度为 3 930 pC/N。

表 2 X 向载荷作用下各电极片输出电势

Table 2 Output potentials of electrode under X load

载荷/kN	电势/V				
	6 号	7 号	3 号	4 号	2 号
2	4.510	-4.574	-0.035	-0.033	-0.034
4	9.021	-9.147	-0.071	-0.066	-0.067
6	13.531	-13.721	-0.106	-0.099	-0.101
8	18.042	-18.294	-0.141	-0.132	-0.135
10	22.552	-22.868	-0.177	-0.164	-0.168

传感器 Z 向施加 160 kN 载荷作用下压电薄膜电势和应力仿真云图如图 7 所示。

表 3 Y 向载荷作用下各电极片输出电势

Table 3 Output potentials of electrode under Y load

载荷/kN	电势/V				
	6号	7号	3号	4号	2号
2	-0.002	-0.001	5.091	-5.096	-0.002
4	-0.004	-0.003	10.182	-10.191	-0.004
6	-0.006	-0.004	15.274	-15.287	-0.006
8	-0.009	-0.005	20.365	-20.383	-0.005
10	-0.011	-0.006	25.456	-25.479	-0.009

表 4 Z 向载荷作用下各电极片输出电势

Table 4 Output potentials of electrode under Z load

载荷/kN	电势/V				
	6号	7号	3号	4号	2号
20	21.3	21.5	21.6	21.6	21.5
40	42.5	43.1	43.2	43.2	43.1
60	63.8	64.6	64.8	64.8	64.6
80	85.1	86.2	86.3	86.4	86.1
100	106.4	107.7	107.9	108.0	107.7
120	127.6	129.3	129.5	129.6	129.2
140	148.9	150.8	151.1	151.1	150.7
160	170.2	172.4	172.7	172.7	172.2

能承受的极限载荷,同时对传感器壳体上表面加载快施加 X、Y、Z 方向大小分别为 10、10、160 kN 的复合三维力载荷,图 8 所示为传感器仿真分析后各主要部件的最大应力云图。在施加极限复合三维载荷时,从图 8 可以看出,PVDF 压电薄膜的最大等效应力为 7.8 MPa,传感器壳体的最大等效应力为 253 MPa,最大等效应力均未超过自身材料的许用应力,传感器能够正常工作。

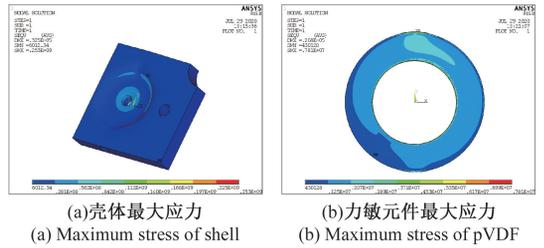


图 8 传感器最大应力云图

Fig. 8 Cloud diagram of maximum stress of sensor

3.2 传感器动力学仿真

传感器的固有频率、振型等是传感器能否实现动态测量的重要指标,现有研究成果表明,为实时记录被测三维重载冷锻力信号,传感器的固有频率需远超过被测信号的固有频率,因此,通过有限元模态分析获取传感器的前 4 阶振型云图,如图 9 所示。

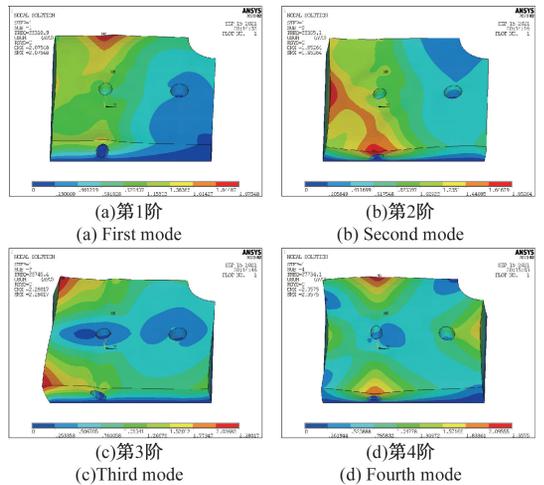


图 9 传感器振型云图

Fig. 9 Cloud diagram of sensor vibration mode

传感器前 4 阶固有频率值和模态振型信息如表 5 所示。由图 9 和表 5 可以得到,传感器在 F_x 向固有频率是第 2 阶 35.4 kHz, F_y 向固有频率是第 1 阶 35.3 kHz, F_z 向固有频率是第 4 阶 37.7 kHz,各向固有频率均远超过要求指标 10 kHz,该 PVDF 压电薄膜三维重载力传感器可以满足动态特性测量要求。

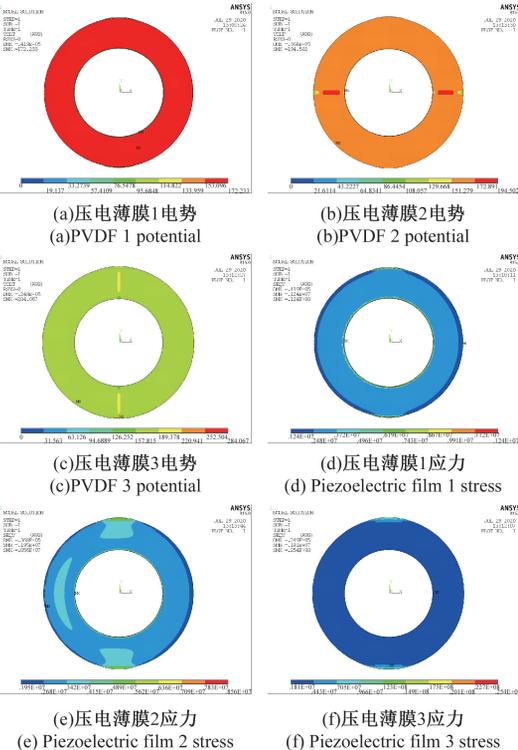


图 7 Z 向 160 kN 载荷作用下压电薄膜仿真云图
Fig. 7 Simulation cloud diagram of piezoelectric film under 160 kN load in Z direction

为了模拟传感器在钢球冷锻实际冷锻成型过程中所

表 5 传感器振型云图

Table 5 Cloud diagram of sensor vibration mode

模态阶数	固有频率/Hz	模态振型
1	35 310	沿 Y 轴线性振动
2	35 385	沿 X 轴线性振动
3	36 748	绕 Z 轴做扭转振动
4	37 734	沿 Z 轴线性振动

4 传感器标定实验

为了得出压电薄膜的输入与输出对应特性曲线,基于负反馈原理搭建了准静态标定实验系统,通过变换传感器安装位置,可以对传感器样机分别施加 X 向、Y 向和 Z 向载荷,实验平台如图 10 所示。由计算机、数据采集卡(DT9804)、电荷放大器(YE5850)、传感器样机和标定装置组成。研发的标定装置可以实现的最快 50 mm/s 速度的准静态自动加载功能。结合理论模型分析和仿真分析结果完成了压电薄膜三维重载力传感器样机研制,力敏元件组采用锦州科信电子材料有限公司定制加工的铝电极封装压电薄膜材料,Z 向压电薄膜不分割,X 向和 Y 向压电薄膜的电极片进行分割。

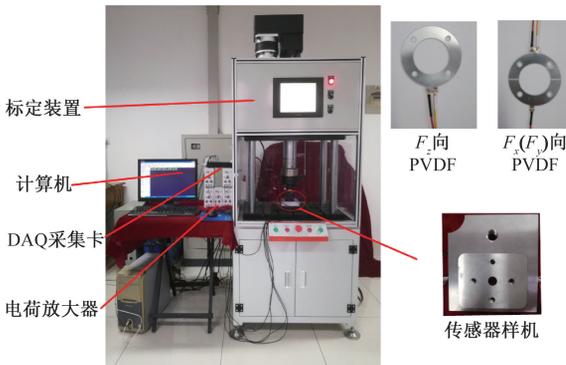


图 10 压电薄膜测试加载平台

Fig. 10 Piezoelectric film test loading platform

对压电薄膜三维重载力传感器分别加载 X 方向 0~15 kN, Y 方向 0~15 kN, Z 方向 0~30 kN 载荷。经过 D/A 转换后获得 5 片电极片输出电压与加载载荷之间对应关系曲线,取 3 次测量数据平均值作为最终输出结果,如图 11 所示。

从图 11 可以看出,当施加 X 向载荷时,电极片 1、2 输出信号 X_1 、 X_2 大小相等、方向相反,当施加 Y 向载荷时,电极片 3、4 输出信号 Y_1 、 Y_2 大小相等、方向相反,当施加 Z 向载荷,PVDF 压电薄膜正常产生电荷,实验结果与理论分析和仿真分析规律吻合。

根据测量原理式(1)计算后可分别得到 X 向、Y 向和 Z 向载荷传感器输出特性曲线如图 12 所示。传感器主要技术指标如表 6 所示。从图 12 和表 6 可以看出,传感

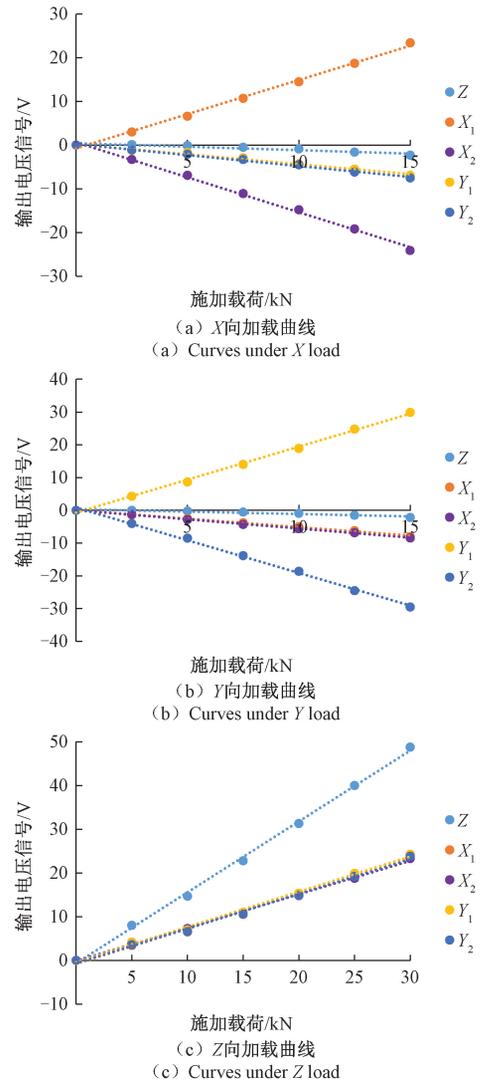


图 11 各向载荷下的压电薄膜各通道输出特性曲线

Fig. 11 Each output characteristic curve of piezoelectric film under anisotropic load

器具有良好的线性。实验获得的电压和电荷灵敏度与仿真分析结果存在一定的差异,主要原因是零件加工质量未能与仿真分析模型保持一致。

表 6 传感器主要技术指标

Table 6 Main technical indexes of sensor

技术指标	F_x	F_y	F_z
非线性误差 FSO	1.970	1.710	1.785
电压灵敏度/(V/kN)	3.164	4.007	1.621
电荷灵敏度/(pC/kN)	5 543	7 152	2 839

利用搭建的实验平台模拟压电薄膜三维重载力传感器实际应用,在传感器 Z 向 1.5 s 内连续施加 5 次 30 kN 冲击力。传感器输出电压信号和实验平台加载载荷的对应曲线如图 13 所示,传感器输出曲线与实验平台的输出

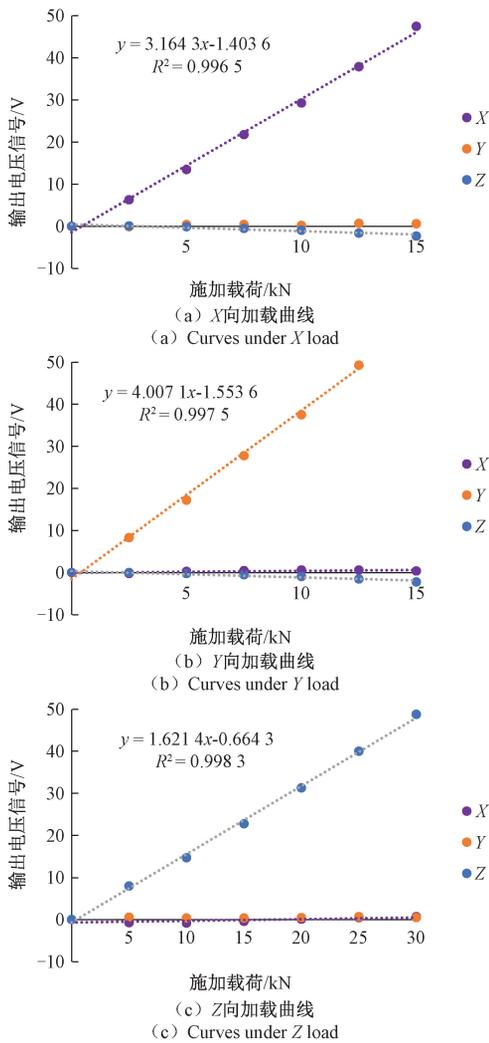


图 12 求解后传感器各向输出特性曲线

Fig. 12 Sensor output characteristic curve in all directions after calculation

曲线基本一致,传感器动态响应能力好,可以满足实际使用要求。

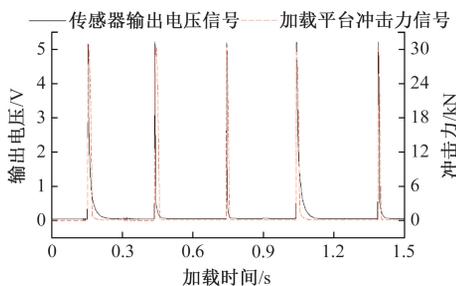


图 13 传感器模拟应用实验

Fig. 13 Sensor simulation application experiment

5 结 论

针对冷锻场合多维重载强冲击测力特殊需求,结合并联分载原理和 PVDF 压电薄膜面域分割技术,提出了一种基于坐标变换测量原理的压电薄膜三维重载力传感器新的结构形式,对测力原理进行了理论分析。

建立了传感器力学模型,推导出了传感器力电转换效率和电荷灵敏度理论计算公式,获得了传感器上盖受载荷部分高度、压电薄膜外径、内分载环直径、底座高度等关键结构参数对其测力性能的影响规律。同时,通过对传感器有限元分析,验证了设计方案和测量原理可行性和有效性。依据理论和仿真分析结果,设计并研制了传感器样机。

采用 PVDF 压电薄膜制作了基于面域分割技术的传感器力敏元件组,通过搭建的静态标定平台对研制的压电薄膜三维重载力传感器样机进行了准静态加载标定实验。实验结果表明该传感器 X 向电荷灵敏度为 5 543 pC/kN, Y 向电荷灵敏度为 7 152 pC/kN, Z 向电荷灵敏度为 2 839 pC/kN。传感器各向非线性误差均小于 2%,主要是由传感器零部件加工质量、装配工艺等因素造成的,是后续研究需要解决的技术问题。本文对测量高频重载多维冲击力的 PVDF 压电薄膜三维力传感器实际开发和应用具有重要的理论和指导意义。

参考文献

[1] BAI R X, XU Q S, MENG Z, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on multi-channel convolution neural network and multi-scale clipping fusion data augmentation [J]. Measurement, 2021, 184(1): 109885.

[2] 李青, 佟文伟, 张开阔, 等. 某航空发动机轴承钢球失效分析 [J]. 航空发动机, 2015, 41(3): 93-96.

LI Q, TONG W W, ZHANG K K, et al. Failure analysis of steel ball in bearing for an aeroengine [J]. Aeroengine, 2015, 41(3): 93-96.

[3] 朱哈娜, 刘慧明. 基于改进 VMD 与 GS_SVM 的轴承故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(21): 71-76.

ZHU H N, LIU H M. Bearing fault diagnosis based on improved VMD and GS_SVM [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(21): 71-76.

[4] KRUŠIĆ V, RODIĆ T. Reliability of system for precise cold forging [J]. Materials and Geoenvironment, 2017, 64(2): 91-102.

[5] NAPIERALA O, DAHNKE C, TEKKAYA A E. Simultaneous deep drawing and cold forging of multi-

- material components; Draw-forging [J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 269-272.
- [6] 侯佳欣, 李江国, 蒋鹏, 等. 12 500 kN 冷锻压力机机身结构的有限元分析[J]. *锻压技术*, 2018, 43(5): 89-95.
- HOU J X, LI J G, PENG J, et al. FEM analysis on frame structure of 12 500 kN cold-forging press [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43(5): 89-95.
- [7] LI Y J, AI C S, MEN X H, et al. Research on on-line monitoring technology for steel ball's forming process based on load signal analysis method [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(2): 317-331.
- [8] 周山, 刘利平, 高建宇, 等. 三维力传感器静态解耦方法的研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(8): 181-187.
- ZHOU SH, LIU L P, GAO J Y, et al. Research on static decoupling algorithm for 3-axis wrist force sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(8): 181-187.
- [9] 姚建涛, 张弘, 勾栓栓, 等. 基于微孔抽丝成型工艺的软体力/位传感器 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(2): 33-41.
- YAO J T, ZHANG H, GOU SH SH, et al. Software force and displacement sensor based on microporous wire drawing molding method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(2): 33-41.
- [10] 周刘聪, 罗健林, 李秋义, 等. PVDF 薄膜压电传感特性及其在工程结构监测应用研究进展 [J]. *功能材料*, 2018, 49(12): 12079-12083.
- ZHOU L C, LUO J L, LI Q Y, et al. Progress on PVDF film piezoelectric performances and its applications in infrastructure monitoring [J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(12): 12079-12083.
- [11] 刘冬生, 张定华, 罗明, 等. 基于 PVDF 薄膜传感器的薄壁件铣削振动在线监测与分析 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(17): 116-123.
- LIU D SH, ZHANG D H, LUO M, et al. On-line vibration monitoring and analysis of thin-walled workpiece based on PVDF film sensor in milling process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 116-123.
- [12] TING Y, NUGRAHA A, CHIU C W, et al. Design and characterization of one-layer PVDF thin film for a 3D force sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 250(1): 129-137.
- [13] 张艳芳, 刘玉荣, 许章斌. 基于 PVDF 三维力传感器设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(7): 66-72.
- ZHANG Y F, LIU Y R, XU ZH CH. Design of three-dimensional force sensor based on PVDF [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(7): 66-72.
- [14] 潘奇, 万舟, 易士琳. 基于 PVDF 的三维力机器人触觉传感器的设计 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(5): 648-653.
- PAN Q, WAN ZH, YI SH L. Design of three-dimensional force tactile sensor for robot based on PVDF [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(5): 648-653.
- [15] YU P, LIU W T, GU C X, et al. Flexible piezoelectric tactile sensor array for dynamic three-axis force measurement [J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 819.
- [16] CHEN X L, SHAO J Y, TIAN H M, et al. Flexible three-axial tactile sensors with microstructure-enhanced piezoelectric effect and specially-arranged piezoelectric arrays [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 025018.
- [17] CHENG X Y, GONG Y, LIU Y S, et al. Flexible tactile sensors for dynamic triaxial force measurement based on piezoelectric elastomer [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7): 075007.
- [18] LEE Y R, CHUNG J, OH Y, et al. Flexible shear and normal force sensor using only one layer of polyvinylidene fluoride film [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4339.
- [19] 刘小锋, 冯志敏, 胡海刚. 压电材料动态称重传感器的融合设计方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4): 115-122.
- LIU X F, FENG ZH M, HU H G. Fusion design method of weigh-in-motion sensor based on piezoelectric material [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(4): 115-122.
- [20] 杨明, 黄卫东, 李高春, 等. 基于 PVDF 传感器的固体推进剂冲击应力测量 [J]. *火炸药学报*, 2018, 41(5): 496-500.
- YANG M, HUANG W D, LI G CH, et al. Measurement of the impact stress of solid propellant based on PVDF sensors [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(5): 496-500.
- [21] NGUYEN V, MELKOTE S, DESHAMUDRE A, et al. PVDF sensor based on-line mode coupling chatter detection in the boring process [J]. *Manufacturing Letters*, 2018, 16(1): 40-43.
- [22] TANG E L, WANG L, HAN Y F. Space debris positioning based on two-dimensional PVDF piezoelectric film sensor [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8): 2410-2421.
- [23] LI Y J, WANG G C, CUI H Y, et al. Dynamic

characteristics and optimization research on PVDF piezoelectric film force sensor for steel ball cold heading machine[J]. ISA Transactions, 2019, 94:265-275.

作者简介



王桂从, 2003 年于济南大学获得学士学位, 2008 年于山东大学获得博士学位, 现为济南大学副教授, 主要研究方向为制造业信息化技术、遗传算法、智能化仪器仪表技术。

E-mail: me_wanggc@ujn.edu.cn

Wang Guicong received her B. Sc. degree from University of Jinan in 2003 and Ph. D. degree from Shandong University in 2008, respectively. Now she is an associate professor at University of Jinan. Her main research interests include manufacturing information technology, genetic algorithm and intelligent instrument technology.



李映君 (通信作者), 2004 年于山东科技大学获得学士学位, 2007 年于沈阳理工大学获得硕士学位, 2010 年于大连理工大学获得博士学位, 现为济南大学教授, 主要研究方向为传感器与执行器测控技术、工业机器人技术、智能化仪器仪表技术。

E-mail: me_liyj@ujn.edu.cn

Li Yingjun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2004, M. Sc. degree from Shenyang Ligong University in 2007, and Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2010, respectively. Now he is a professor at University of Jinan. His main research interests include Sensor and actuator measurement and control technology, industrial robot technology, and intelligent instrument technology.