

组合式自解耦压电薄膜三维力传感器研制

赵鹏, 王桂从, 李映君, 杨志康

(济南大学机械工程学院, 250024, 济南)

摘要: 针对传统三维力传感器存在的非线性误差、维间耦合误差过大等瓶颈问题, 面向重载、高频、强冲击三维力的测量需求, 基于聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜, 结合并联分载原理, 创新性的利用冲击力产生的倾覆力矩, 设计了立柱菱形布局的压电薄膜三维力传感器结构, 立柱菱形布局时具有抵消维间耦合能力, 每个立柱近似只受单个倾覆力矩的影响, 故可进行组合测量。探究了 PVDF 压电薄膜的最优布置, 采用理论分析、有限元仿真分析和实验验证相结合的方法, 对传感器设计方案的可行性进行了验证。研制了组合式自解耦压电薄膜三维力传感器样机, 分别对其进行准静态标定实验和动态标定实验, 实验结果表明, 改进后传感器具有高灵敏度、高固有频率等特点, 3 个方向非线性误差均小于 0.2%, 维间耦合误差在 1.2% 以内, 其结构设计具备抵消维间耦合的能力。该三维力传感器在高精密轴承钢球冷锻成型及瞬态强冲击等场景下有着重要的应用价值及潜力。

关键词: 三维力传感器; 聚偏氟乙烯; 压电薄膜; 维间耦合; 重载

中图分类号: TN06; TH823 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202303013 **文章编号:** 0253-987(2023)03-0139-11

Development of Combined Self-Decoupling Piezoelectric Thin Film Three-Dimensional Force Sensor

ZHAO Peng, WANG Guicong, LI Yingjun, YANG Zhikang

(School of Mechanical Engineering, Jinan University, Jinan 250024, China)

Abstract: Given the bottleneck problems of a traditional three-dimensional force sensor, such as non-linear error and large error of inter-dimensional coupling, and the measurement demand of the three-dimensional force with heavy load, high frequency, and strong impact, a piezoelectric thin film three-dimensional force sensor with a diamond configuration of pillars is designed by innovatively using the overturning moment generated by impact force based on polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric thin film and combined with parallel load sharing principle. The diamond configuration of the pillars enables the sensor to compensate for inter-dimensional coupling. Each pillar is approximated to be affected by a single overturning moment and therefore combined measurements can be made. The optimal arrangement of PVDF piezoelectric thin films is investigated. The feasibility of the sensor design scheme is verified by combining theoretical analysis, finite element simulation analysis and experimental verification. A combined self-decoupling piezoelectric thin film three-dimensional force sensor prototype is developed. Quasi-static and dynamic calibration experiments are carried out respectively. The experimental results show that the im-

proved sensor has the characteristics of high sensitivity and high natural frequency, the three-direction non-linear error is less than 0.2%, and the inter-dimensional coupling error is less than 1.2%. Its structure design can counteract the inter-dimensional coupling. The three-dimensional force sensor has important application value and potential in high-precision bearing ball cold upsetting and transient strong impact scenarios.

Keywords: three-dimensional force sensor; polyvinylidene fluoride; piezoelectric thin film; inter-dimensional coupling; heavy load

航空航天、高速铁路、高精尖机床主轴等常用高性能轴承^[1]主要依靠进口。钢球作为轴承最核心的组成部分,其形状控制对轴承的使用性能起着重要的作用。冷镦成型^[2]作为轴承钢球加工的第一道工序,过程中往往会使轴承钢球产生隐蔽性、扩散性和遗传性的缺陷^[3]。常见的轴承钢球缺陷检测核心技术被封锁,且有检测效率较低、成本较高等特点。近年来有学者通过检测冷镦过程中的力载荷来间接表征轴承钢球成型质量。

应变式、压电式^[4]、电容式^[5]等三维力传感器可同时检测出3个方向力的大小,已成为热门的研究方向。钢球冷镦成型时瞬时承受重载、强冲击载荷作用,故压电式三维力传感器具有的快速动态响应能力、高精度等优势在检测中的重要性不言而喻。相较于压电石英^[6]、多晶半导体陶瓷(压电陶瓷)等压电材料^[7],聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)压电薄膜^[8-9]兼具抗疲劳性高、耐冲击、动态响应性好等优点。Li等^[10]证明了PVDF压电薄膜力传感器具有优异的动态性能和高精度,可用于测量钢球冷镦力。Ting等^[11]通过在铣刀刀柄上并排布置6片PVDF压电薄膜来组合完成了铣削过程中的进给力、轴向力和切向力的同步测量。Petrović等^[12]证明了PVDF压电薄膜能够测量动态应变的瞬态响应,其灵敏度优于应变式传感器。

三维力测量方面,I类误差(非线性误差)、II类误差(维间耦合误差)是力传感器性能评判标准的重要组成部分,而弹性体的结构设计 with II类误差又有着密切关联。彭小武等^[13]采用等截面梁式弹性元件设计的三维力传感器,其各方向最大非线性误差、维间耦合误差分别达到了2.36%和2.30%,最大量程为Z向60 kN;杨述焱等^[14]设计的生物力学测量用传感器,3个方向最大非线性误差、维间耦合误差分别为2.80%、4.60%;Rezvani等^[15]提出了一种用于测量三维夹紧力和切削力的虎钳式测力装置,通过有限元得到最大维间耦合误差为41%,最大负载为4 893 N;张晨等^[16]结合柔顺机构、混联机构,

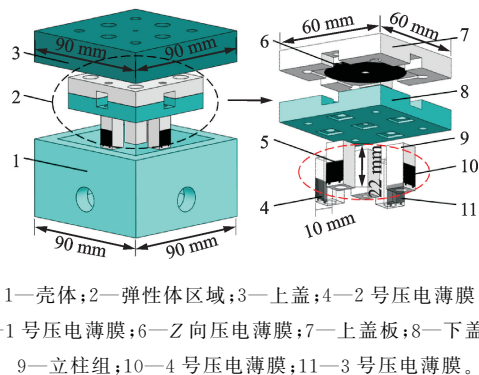
提出了一种柔性传感器弹性体,通过有限元得到了3个方向最大维间耦合误差为1.67%。He等^[17]提出了一种具有回形针形弹性体的三维力传感器,其3个方向非线性误差最大为0.8%。

现有三维力传感器非线性误差、维间耦合误差较大,难以承受强冲击^[18]、高频载荷^[19];大量程冷镦力测量传感器多为单维力测量;可检测高频载荷的压电薄膜式三维力传感器常用于可穿戴设备^[20-21]小量程力测量。故本文结合并联分载原理,创新性地利用了冲击力产生的倾覆力矩,设计了具有抵消维间耦合能力的压电薄膜三维力传感器结构,并对测量原理开展了研究。利用有限元进行应变分析从而探究了压电薄膜最优布局,完成了准静态^[22]标定及动态^[23]标定实验,验证了传感器可行性。相较于前人研究,本文研制的三维力传感器具有更低的非线性误差和维间耦合误差,且具备大量程、高灵敏度、高固有频率等特点。

1 结构设计及其测量原理

1.1 整体结构设计

针对钢球冷镦过程中的200 kN大量程轴向力、10 kN切向力测量需求,对传感器的细节进行设计,其三维示意图如图1所示。



1—壳体;2—弹性体区域;3—上盖;4—2号压电薄膜;
5—1号压电薄膜;6—Z向压电薄膜;7—上盖板;8—下盖板;
9—立柱柱;10—4号压电薄膜;11—3号压电薄膜。

图1 传感器三维示意图

Fig. 1 Three-dimensional sensor diagram

传感器主要结构包括上盖、弹性体区域、壳体,

其中弹性体区域由上盖板、下盖板、立柱组、1~4 号和 Z 向 PVDF 压电薄膜组成。Z 向及其余 4 片压电薄膜分别黏贴于上盖板、立柱组。除 PVDF 压电薄膜以外,其余材质均为 AISI 4130。Z 向压电薄膜直径为 40 mm,厚度为 30 μm ,其余 4 片压电薄膜大小为 10 mm $\times$ 10 mm,厚度为 50 μm 。

1.2 传感器并联分载原理

由于传感器需承受大量程轴向力、切向力,而常用的压电薄膜屈服强度仅为 55 MPa,故需要对传感器进行并联分载,即通过与被测大力有恒定比例关系的分载力来进行间接测量^[24]。

并联分载原理图如图 2 所示。图 2(a)中,区域 b 为轴向分载区域,轴向力 F 分解为力 f_a 、 f_b ,压电薄膜感知的力主要为 f_a 、 f_b 通过壳体向下传递。由于传感器承受的切向力远小于轴向力,故传感器不需单独设计切向分载,可利用轴向分载产生的切向分载效果进行分载,如图 2(b)所示,切向力 F' 作用时产生倾覆力矩,进而使得沿 X/Y 轴对称布置的立柱产生近似等大反向的拉压变形,区域 b 由于距 Z 轴较远,承受较大的倾覆力矩,故区域 b 为切向分载区域。

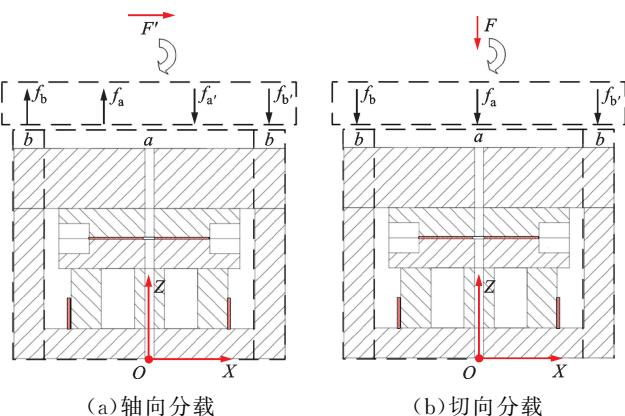


图 2 并联分载原理图

Fig. 2 Parallel load sharing schematic

1.3 测量原理研究

由于单片 PVDF 压电薄膜仅能测量单维力,因此通过设计三维力传感器的新结构,同时研究新的测量原理是解决重载三维力测量问题的关键所在。传感器承受切向力,随即产生倾覆力矩,研究中常减小该倾覆力矩以达到降低耦合的目的。本文创新性地利用这一倾覆力矩来设计传感器,即通过放大经分载后立柱所承受的倾覆力矩来间接测量切向力。

传感器测量原理简图如图 3 所示,该测力原理

的基本思路是通过弹性体区域上盖板粘贴一片压电薄膜来测量 F_z ,通过立柱 a、b、c、d 表面各粘贴一片等大的压电薄膜组合完成 F_x 和 F_y 的测量。

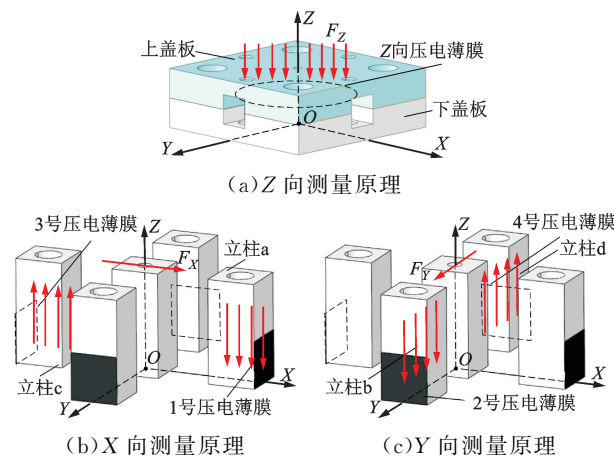


图 3 传感器测量原理简图

Fig. 3 Schematic diagram of sensor measurement

基于正压电效应, F_z 作用下 Z 向压电薄膜发生形变,并产生一定的电荷量,由于 Z 向压电薄膜极化方向与 Z 轴平行,故理论上在 F_x 、 F_y 作用下输出电荷较少。其余 4 片压电薄膜在 F_z 作用下均处于压缩状态,当切向力 F_x (F_y) 作用时, X(Y) 方向对称布置的立柱 a、c(b、c) 受倾覆力矩作用进而产生近似等大的拉、压,使得相对应立柱上的 1 号、3 号压电薄膜(2 号、4 号压电薄膜)产生大小近似相等、极性相反的电荷,故理论上可通过对称结构减小维间耦合,通过输出电荷的组合运算进而完成三维力的测量。

压电薄膜本构方程定义如下

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}_{ij} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \quad (1)$$

式中:电场效应方向 $i=1,2,3$;机械效应方向 $j=1,2,3,4,5,6$; $\mathbf{D}$ 为电位移矩阵; $\mathbf{d}_{ij}$ 为压电常数矩阵; $\mathbf{T}$ 为应力矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为介电常数矩阵; $\mathbf{E}$ 为电场强度矩阵。

针对本文使用的较小尺寸的 PVDF 压电薄膜,上下表面电极任意一表面的自由电荷量可表示为

$$Q = Ed_{33}Slw \quad (2)$$

式中: Q 为压电薄膜表面电荷量; E 为压电薄膜的弹性模量; d_{33} 为压电薄膜的压电常数; S 为作用于金属构件上的应变; l 为压电薄膜长度; w 为压电薄膜宽度。

压电薄膜布局示意简图如图 4 所示。利用下式作本文敏感元件的传感机理表达式,其体现了输入载荷和输出电压之间的线性关系,初步验证了传感器的设计可行性

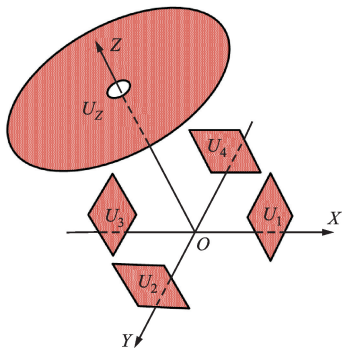


图 4 压电薄膜布局示意图

Fig. 4 Schematic diagram of piezoelectric film layout

$$\begin{cases} F_Z = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S_1 U_z}{h_1 d_{33}} \\ F_X = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S_2 (U_1 - U_3)}{h_2 d_{33}} \\ F_Y = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S_2 (U_2 - U_4)}{h_2 d_{33}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： ϵ_r 、 ϵ_0 分别为 PVDF 压电薄膜的相对介电常数和真空介电常数； S_1 、 S_2 分别为 Z 向压电薄膜和任一立柱上所粘贴压电薄膜的面积； h_1 、 h_2 分别为 Z 向压电薄膜和任一立柱上所粘贴压电薄膜的厚度； U_z 为 Z 向压电薄膜上、下表面产生的电势差； U_i ($i=1,2,3,4$) 为第 i 号压电薄膜上下表面产生的电势差。

2 力敏元件布局分析

2.1 力敏元件布局方案设计

针对 F_X 和 F_Y 测量,充分考虑到附加弯矩、力的传递效率等影响因素,设计传感器立柱组的矩形布局和菱形布局方式,以及 8 种压电薄膜布局方案,如图 5、图 6 所示。

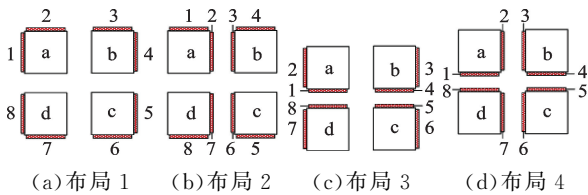


图 5 矩形布局方案图
Fig. 5 Rectangular layout plan

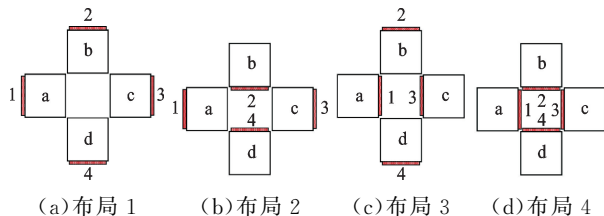


图 6 菱形布局方案图
Fig. 6 Diamond layout plan

为探寻压电薄膜最优布局方案,使其最大限度降低维间耦合误差,利用有限元对其进行仿真研究。

2.2 可行性分析及验证

由于立柱矩形布局的特殊性,当承受三维力载荷时,立柱组中至少有一个立柱不可避免地同时受到两个方向的倾覆力矩作用,从而难以进行组合测量;而立柱菱形布局时每个立柱近似只受单个倾覆力矩的影响,故可进行组合测量。

使用 ANSYS APDL 建立有限元模型,采用扫描的方式划分六面体网格,各压电薄膜网格尺寸为 0.2 mm,壳体及其他部分网格尺寸为 1 mm,传感器各部分网格划分如图 7 所示,参数定义如表 1 所示。

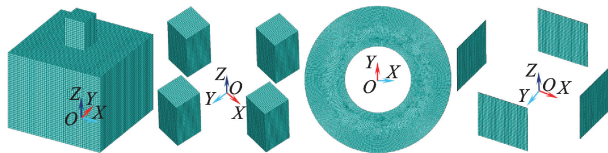


图 7 传感器各部分网格划分
Fig. 7 Meshing of sensor parts

表 1 传感器各部件材料参数

Table 1 Material parameters of sensor components

部件名称	单元	材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
壳体及其他	Solid 186	AISI 4130	205 000	0.285	7 850
压电薄膜	Solid 226	PVDF	2 500	0.35	1 780

在有限元中对采用立柱菱形布局的传感器进行应变分析,分别施加满量程轴向力 $F_Z = 200 \text{ kN}$ 和满量程切向力 $F_X = 10 \text{ kN}$ 、 $F_Y = 10 \text{ kN}$,立柱应变云图如图 8 所示。较易得出,各方向加载时立柱外侧偏下处为应变最大位置,即为 1、2、3、4 号压电薄膜的最佳粘贴位置。

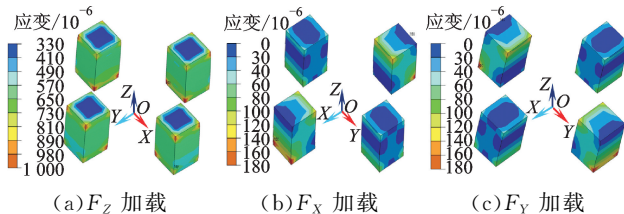


图 8 立柱应变云图
Fig. 8 Column strain nephogram

特别针对传感器菱形布局方案中的压电薄膜进行应变分析。布局 1 方案中,将压电薄膜布置在立柱外侧下端,对传感器施加轴向力 200 kN,5 片压电

薄膜应变云图如图 9 所示,应变结果见表 2。由表 2 可得,1、2、3、4 号压电薄膜受压力的作用进而产生向内的形变,应变结果较小且近似相等,故理论上产生的电荷量近似等大。结合(3)式可得,可利用 Z 向压电薄膜完成 F_z 测量,通过对称结构设计进而消除维间耦合的方式可行。

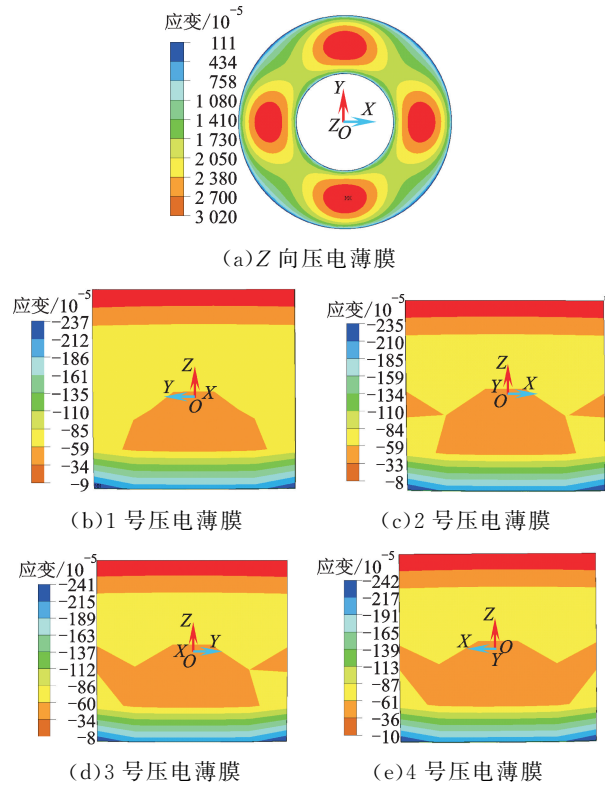


图 9 $F_z=200\text{ kN}$ 时压电薄膜应变云图
Fig. 9 Strain nephogram of piezoelectric film at $F_z=200\text{ kN}$

表 2 $F_z=200\text{ kN}$ 时压电薄膜应变结果					
Table 2 Strain result of piezoelectric film at $F_z=200\text{ kN}$					
应变类型	应变/ 10^{-5}				
	Z 向	1 号	2 号	3 号	4 号
最大应变	3 020	-237	-235	-241	-242
最小应变	111	-9	-8	-8	-10

对传感器施加切向力 $F_x=10\text{ kN}$,5 片压电薄膜应变云图如图 10 所示,应变结果见表 3。由表 3 可知, F_x 作用下立柱 a、c 分别受到拉、压,因此用于测量 F_x 的 1 号与 3 号压电薄膜的应变值近似等大反向;测量 F_y 的 2、4 号压电薄膜最大应变结果以及最小应变结果近似相等,故理论上自身产生的电荷近似为 0。相较其他 4 片压电薄膜,Z 向压电薄膜应变值较小,由此认为加载 F_x 对 F_z 测量造成的耦合较小。结合式(3)可得,可利用 1、3 号压电薄膜完成 F_x 测量,通过对称

结构设计进而消除维间耦合的方式可行。

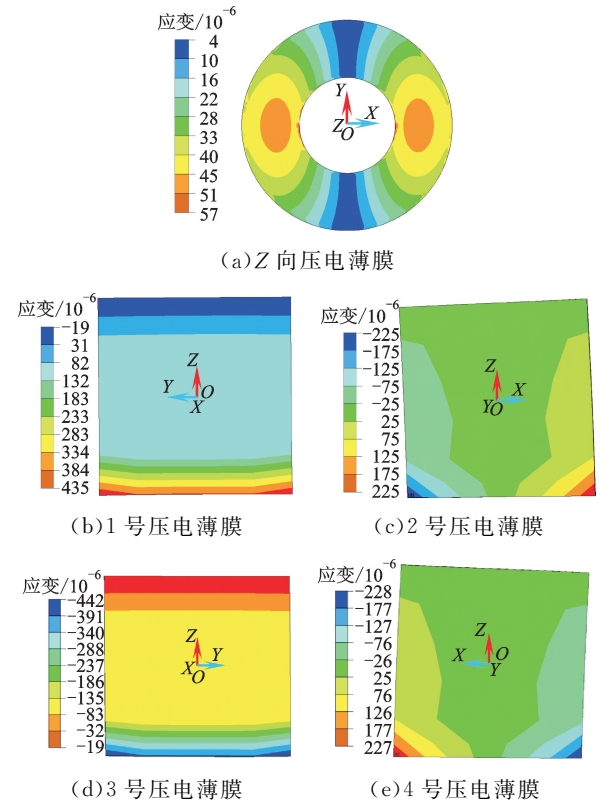
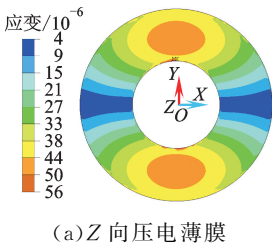


图 10 $F_x=10\text{ kN}$ 时压电薄膜应变云图
Fig. 10 Strain nephogram of piezoelectric film at $F_x=10\text{ kN}$

表 3 $F_x=10\text{ kN}$ 时压电薄膜应变结果					
Table 3 Strain result of piezoelectric film at $F_x=10\text{ kN}$					
应变类型	应变/ 10^{-6}				
	Z 向	1 号	2 号	3 号	4 号
最大应变	57	435	225	19	227
最小应变	4	-19	-225	-442	-228

向传感器施加切向力 $F_y=10\text{ kN}$,5 片压电薄膜应变云图如图 11 所示,应变结果见表 4。由于传感器的结构对称性, F_y 作用下,用于测量 F_y 的 2 号与 4 号压电薄膜的应变值近似等大反向;1、3 号压电薄膜正负应变结果近似相等,故理论上自身产生的电荷近似为 0。结合式(3),再次验证了测量原理和结构可行性。



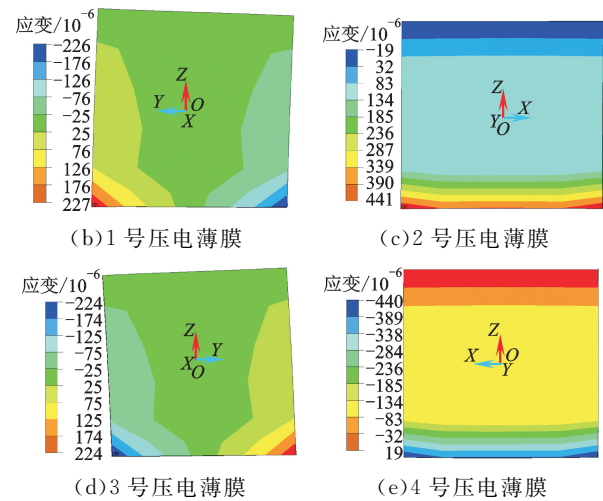


图 11 $F_Y=10\text{ kN}$ 时压电薄膜应变云图

Fig. 11 Strain nephogram of piezoelectric film at $F_Y=10\text{ kN}$

表 4 $F_Y=10\text{ kN}$ 时压电薄膜应变结果					
Table 4 Strain result of piezoelectric film at $F_Y=10\text{ kN}$					
应变类型	应变/ 10^{-6}				
	Z 向	1 号	2 号	3 号	4 号
最大应变	56	227	441	224	19
最小应变	4	-226	-19	-224	-440

将压电薄膜分别以布局 2、布局 3、布局 4 方案布置,同理对传感器分别施加轴向力 200 kN 和切向力 $F_X=10\text{ kN}$ 、 $F_Y=10\text{ kN}$,由此得到 1、2、3、4 号压电薄膜应变云图,将应变结果整理为表 5、表 6、表 7。

表 5 布局 2 方案压电薄膜应变结果								
Table 5 Piezoelectric film strain results in layout II								
轴向力或切向力/kN	最大应变/ 10^{-6}				最小应变/ 10^{-6}			
	1 号	2 号	3 号	4 号	1 号	2 号	3 号	4 号
$F_Z=200$	-2 603	-2 059	-2 173	-2 216	-136	-134	-134	-131
$F_X=10$	19	230	442	235	-435	-230	-19	-235
$F_Y=10$	235	44	216	90	-235	-88	-216	-44

表 6 布局 3 压电薄膜应变结果								
Table 6 Piezoelectric film strain results in layout III								
轴向力或切向力/kN	最大应变/ 10^{-6}				最小应变/ 10^{-6}			
	1 号	2 号	3 号	4 号	1 号	2 号	3 号	4 号
$F_Z=200$	-1 702	-2 277	-2 561	-2 741	-143	-150	-122	-106
$F_X=10$	90	215	44	236	-41	-216	-87	-237
$F_Y=10$	222	451	243	20	-221	-20	-242	-451

表 7 布局 4 压电薄膜应变结果								
Table 7 Piezoelectric film strain results in layout IV								
轴向力或切向力/kN	最大应变/ 10^{-6}				最小应变/ 10^{-6}			
	1 号	2 号	3 号	4 号	1 号	2 号	3 号	4 号
$F_Z=200$	-2 215	-2 610	-2 233	-2 578	-171	-186	-169	-186
$F_X=10$	18	151	332	150	-329	-149	-18	-150
$F_Y=10$	128	390	130	32	-128	-32	-130	-381

综合分析布局 2、3、4,当施加 $F_Z=200\text{ kN}$ 时,布局 3 中的 1、2、3、4 号压电薄膜应变结果相差过大,结合式(3)可得,施加 F_Z 对其余各向造成的维间耦合误差过大;当施加 $F_X(F_Y)=10\text{ kN}$ 时,布局 4 中 1、3 号(2、4 号)压电薄膜最大应变值较小;布局 2 中 1、3 号(2、4 号)压电薄膜应变方向不一致性稍大,导致应变值过小。

综上,选择布局 1 作为力敏元件布局设计具有一定的可行性依据。

3 传感器标定实验

3.1 准静态标定实验

钢球冷镦过程中,传感器近似受到点载荷,故基于负阶跃响应原理,搭建准静态标定平台,利用伺服

电动缸施加三维力载荷进而展开传感器准静态标定实验。完成了传感器样机制造,如图 12 所示,力敏元件由锦州科信电子材料有限公司定制。各硬件组成部分包括准静态加载实验台、传感器样机、电荷放大器、数据采集卡及数据处理软件,其中电荷放大器选用江苏联能 YE5850 型、信号采集卡选用 DT9804 型。

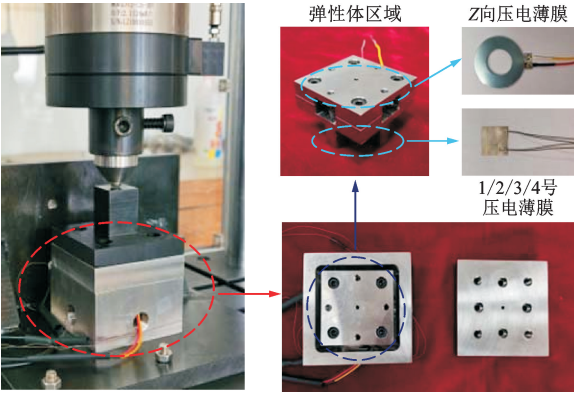


图 12 传感器样机
Fig. 12 Sensor prototype

为验证该准静态标定平台及标定方式可行性,对 Z 向施加阶跃信号,记录其他方向上的动态输出信号。以 50 mm/s 的速度沿传感器 Z 向施加力源输出满量程 45 kN 力载荷,连续冲击 3 次,压电薄膜电压输出曲线如图 13 所示。由图 13 可知,峰值时间均保持在 0.1 s 以内,重复性误差均小于 0.5%,可满足高精密钢球自动冷镦机 550 件/min 的测量需求;压电薄膜电压输出曲线符合阶跃曲线,从而证明该传感器标定方式及准静态标定平台可行。

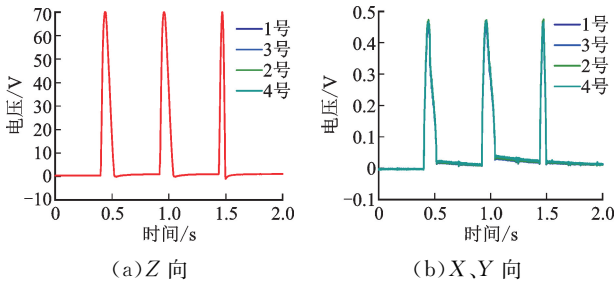


图 13 压电薄膜输出电压曲线
Fig. 13 Voltage output curve

3.1.1 F_z 加载标定实验

搭建 Z 向准静态加载实验台,其主要组成部分如图 14 所示。以施加阶跃信号的方式,通过伺服电动缸带动加载头,沿压电薄膜三维力传感器 Z 方向分别依次施加 0~45 kN、步长为 5 kN 的阶梯载荷

F_z 。载荷加载、卸载实验分 3 次重复进行。

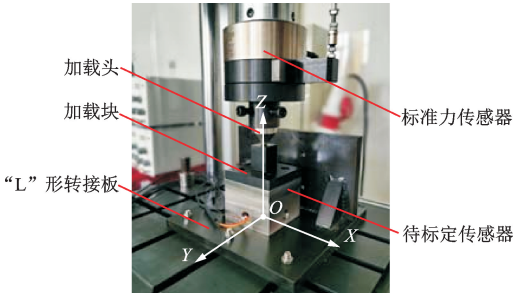
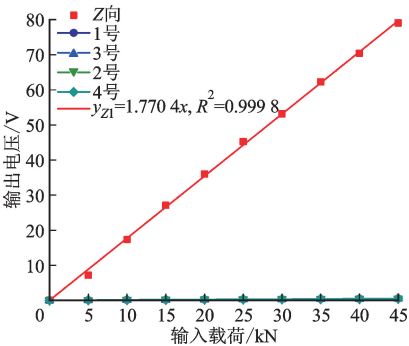


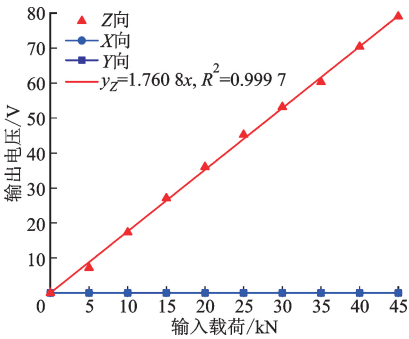
图 14 Z 向准静态加载实验台
Fig. 14 Z-direction quasi-static loading test stand

将 3 组实验数据中的峰值电压进行均值计算。通过将平均峰值电压、相对压力值线性拟合,得到压电薄膜三维力传感器 F_z 输入载荷与电压输出值之间的标定特性曲线,如图 15(a)所示。

根据式(3)运算后得到 F_z 输入载荷作用下压电薄膜三维力传感器输出电压特性曲线如图 15(b)所示。实验结果可得,其压电薄膜三维力传感器输出电压值基本没有维间耦合。其线性拟合表达式为 $y_z = 1.7608x, R^2 = 0.9997$, F_z 向力加载时非线性误差为 0.11%,电荷灵敏度、电压灵敏度分别为 3 177 pC/kN、1.7608 V/kN。



(a) 标定特性曲线



(b) 输出电压特性曲线

图 15 F_z 加载特性曲线

Fig. 15 F_z loading characteristic curve

3.1.2 F_X 加载标定实验

X 向准静态加载实验台如图 16 所示。改变压电薄膜三维力传感器在“L”形转接板上的安装位置,通过伺服电动缸带动加载头施加阶跃信号,即沿压电薄膜三维力传感器分别依次施加 X 方向 0~10 kN、步长为 2 kN 的阶梯载荷 F_X ,分 3 次重复进行载荷加载、卸载实验。

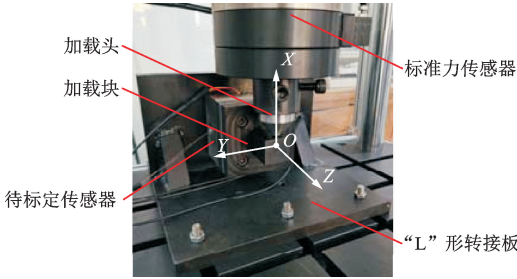
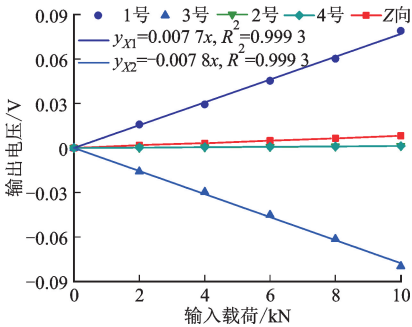


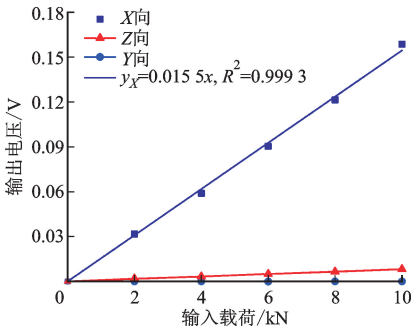
图 16 X 向准静态加载实验台

Fig. 16 X-direction quasi-static loading test stand

F_X 加载特性曲线如图 17 所示。由准静态标定实验结果可得,其压电薄膜三维力传感器输出电压值基本没有维间耦合。线性拟合表达式为 $y_x = 0.0155x, R^2 = 0.9993$, F_X 向力加载时非线性误差为 0.19%,电荷灵敏度为 27.89 pC/kN,电压灵敏度为 0.0155 V/kN。



(a) 标定特性曲线



(b) 输出电压特性曲线

图 17 F_X 加载特性曲线

Fig. 17 F_X loading characteristic curve

3.1.3 F_Y 加载标定实验

搭建 Y 向准静态加载实验台,主要组成部分如图 18 所示。同理改变压电薄膜三维力传感器的安装位置,利用伺服电动缸施加阶跃信号,沿压电薄膜三维力传感器分别依次施加 Y 方向 0~10 kN、步长为 2 kN 的阶梯载荷 F_Y 。载荷加载、卸载实验分 3 次重复进行。

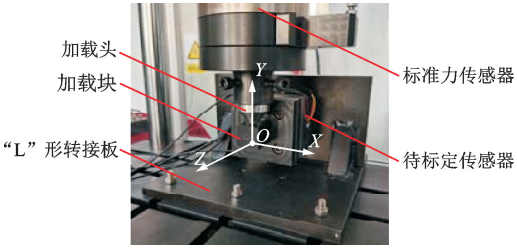
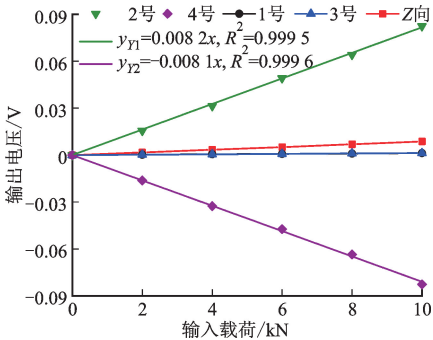


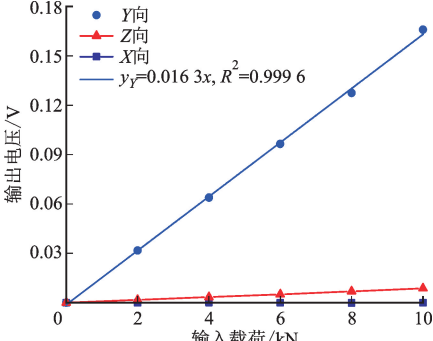
图 18 Y 向准静态加载实验台

Fig. 18 Y-direction quasi-static loading test stand

F_Y 加载特性曲线如图 19 所示。由准静态标定实验结果可得,其压电薄膜三维力传感器输出电压值基本没有维间耦合。线性拟合表达式为 $y_y = 0.0163x, R^2 = 0.9996$, F_Y 向力加载时非线性误差为 0.10%,电荷灵敏度为 29.36 pC/kN,电压灵敏度为 0.0163 V/kN。



(a) 标定特性曲线



(b) 输出电压特性曲线

图 19 F_Y 加载特性曲线

Fig. 19 F_Y loading characteristic curve

3.2 动态标定实验

搭建动态测试平台如图 20 所示。利用锤击法,通过力锤对压电薄膜三维力传感器施加 Z 方向瞬态激励,传感器输出的电荷信号经过电荷放大器、数据采集卡到 PC 端完成 FFT 分析,输出动态响应曲线如图 21 所示。由图 21 可知,传感器的固有频率达到 7.4 kHz,满足动态特性测量要求。

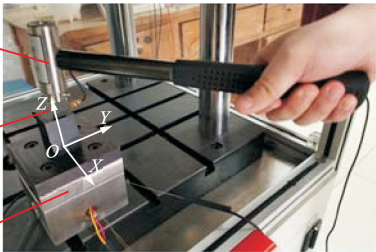


图 20 动态测试平台
Fig. 20 Dynamic test platform

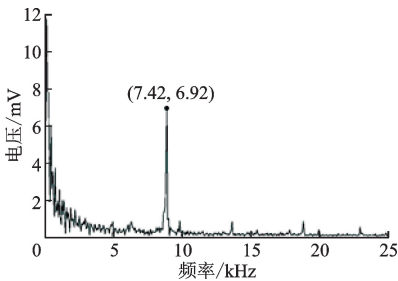


图 21 动态响应曲线图
Fig. 21 Dynamic response curve

3.3 传感器技术指标分析

利用传感器准静态标定实验结果来计算维间耦合误差^[25],可表示为

$$C_{ij} = \frac{U_{ij}}{U_{ii}} \tag{4}$$

式中: C_{ij} 为 j 方向对 i 方向产生的维间耦合; U_{ij} 为 j 方向满量程加载时所有测量 i 方向的输出电压之和; U_{ii} 为 i 方向满量程加载时所有测量 i 方向的输出电压之和; 其中 $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$, 其中 1、2、3 分别代表 X、Y、Z 方向。

分析得到各方向之间的维间耦合误差见表 8,例如表 8 中 1.04 代表 F_x 对 F_z 方向的维间耦合,即为当 F_x 满量程加载时所有测量 F_z 通道的输出电压之和与 F_z 满量程加载时所有测量 F_z 通道的输出电压之和的比值。三方向维间耦合误差均小于 1.2%,满足使用需求。

表 8 传感器维间耦合误差			
Table 8 Sensor dimensional coupling error			
方向	轴向力或切向力维间耦合误差/%		
	X	Y	Z
X		0.01	1.04
Y	0.01		1.10
Z	0.00	0.01	

传感器主要准静态标定技术指标见表 9。分析准静态标定、动态标定实验结果,其研制的组合式自解耦压电薄膜三维力传感器各方向输出电压值维间耦合误差较小,传感器具有高灵敏度、低非线性误差、大量程、高固有频率等优点。

表 9 传感器主要技术指标			
Table 9 Main technical indicators of sensors			
技术指标	数值		
	X	Y	Z
量程/kN	10	10	200
电压灵敏度/(V · kN ⁻¹)	0.015 5	0.016 3	1.760 8
电荷灵敏度/(pC · kN ⁻¹)	27.89	29.36	3 177
非线性误差/%	0.19	0.10	0.11

4 结 论

面向重载、瞬态强冲击三维力的测量急需,针对传统三维力传感器存在的非线性误差、维间耦合误差过大等瓶颈问题,基于传感器并联分载原理,设计了一种组合式自解耦压电薄膜三维力传感器结构形式,提出了具备抵消维间耦合能力的对称布置力敏元件布局方案。对传感器测量原理进行了研究,利用有限元论证了传感器结构形式、力敏元件布局及测量原理的可行性。

研制了组合式自解耦压电薄膜三维力传感器样机,基于负阶跃响应原理,进行了三维力传感器的准静态标定实验及其动态标定实验,实验结果表明传感器各方向维间耦合误差均在 1.2% 以内,3 个方向非线性误差分别为 0.19%、0.10%、0.11%, F_x 、 F_y 、 F_z 加载时电压灵敏度分别达到了 0.015 5 V/kN、0.016 3 V/kN、1.760 8 V/kN,传感器的固有频率达到 7.4 kHz。

所做工作在高精密轴承钢球冷锻成型、高频重载和多维力测量场景下有着重要的现实意义与应用价值。

参考文献:

- [1] 王明凯, 闫柯, 马帅军, 等. 联合载荷作用下精密角接触球轴承动态特性演变规律 [J]. 航空动力学报, 2022, 37(6): 1134-1149.
WANG Mingkai, YAN Ke, MA Shuaijun, et al. Evolutionary regularity of dynamic characteristics for precision angular contact ball bearing under combined loads [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(6): 1134-1149.
- [2] 杨万博, 霍元明, 何涛, 等. TC16 钛合金航空紧固件冷镦成形实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27(10): 7-12.
YANG Wanbo, HUO Yuanming, HE Tao, et al. Experimental study on cold heading forming of TC16 titanium alloy aerospace fastener [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(10): 7-12.
- [3] 文生平, 周正军, 张啸言, 等. 基于计算机视觉的轴承滚子表面缺陷在线检测系统 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 76-87.
WEN Shengping, ZHOU Zhengjun, ZHANG Xiaoyan, et al. Online detection system of bearing roller's surface defects based on computational vision [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(10): 76-87.
- [4] 徐兴盛, 李映君, 王桂从, 等. 轮辐结构压电式六维力传感器设计 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2655-2664.
XU Xingsheng, LI Yingjun, WANG Guicong, et al. Design of six-axis force piezoelectric sensor with spoke structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(12): 2655-2664.
- [5] 倪娜, 薛晓敏, 张陵, 等. 高灵敏度离子皮肤手指关节角度传感器的设计 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(3): 164-174.
NI Na, XUE Xiaomin, ZHANG Ling, et al. Highly sensitive ionic skin for measuring finger joint angles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(3): 164-174.
- [6] LI Yingjun, XU Xingsheng, WANG Guicong, 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.
- [7] 周凤玺, 蒲育. 功能梯度压电材料梁的热-机-电耦合振动及屈曲特性分析 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 166-174.
ZHOU Fengxi, PU Yu. Vibration and buckling behaviors of functionally graded piezoelectric material beams subjected to thermal-mechanical-electrical loads [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 166-174.
- [8] 曹经鎡, 康健伟, 袁卫锋. 柔性压电复合材料薄膜无线应变传感器研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 184-190.
CAO Jingqi, KANG Jianwei, YUAN Weifeng. Research on wireless strain sensor using flexible piezoelectric composite film [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 184-190.
- [9] 张艳芳, 刘玉荣, 许章铖. 基于 PVDF 三维力传感器设计 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 66-72.
ZHANG Yanfang, LIU Yurong, XU Zhangcheng. Design of three-dimensional force sensor based on PVDF [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 66-72.
- [10] LI Yingjun, WANG Guicong, CUI Huanyong, 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.
- [11] TING Y, CHEN H Y, CHEN Junhao, et al. Design and performance evaluation of a multi-axis thin-film sensor for milling process measurement [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2021, 332(1): 113147.
- [12] PETROVIĆ P B, PAVLOVIĆ V B, VLAHOVIĆ B, et al. A high-sensitive current-mode pressure/force detector based on piezoelectric polymer PVDF [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2018, 276: 165-175.
- [13] 彭小武, 马国鹭, 赵涌, 等. 三维力传感器的设计和静态解耦算法研究 [J]. 传感技术学报, 2021, 34(11): 1518-1522.
PENG Xiaowu, MA Guolu, ZHAO Yong, et al. Design of three-dimensional force sensor and research on the static decoupling algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(11): 1518-1522.
- [14] 杨述焱, 孙东杰, 李丹若, 等. 用于生物力学测量的新型电容式三维力传感器 [J]. 计量学报, 2021, 42(4): 495-502.
YANG Shuyan, SUN Dongjie, LI Danruo, et al. Three dimensional force sensor for biomechanical measurement based on capacitance principle [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(4): 495-502.
- [15] REZVANI S, NIKOLOV N, KIM C J, et al. Development of a vise with built-in piezoelectric and strain gauge sensors for clamping and cutting force measurements [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 1041-1046.

- [16] 张晨, 张元开, 王均. 基于串并混联柔顺机构的三维力传感器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 4-7, 31.
ZHANG Chen, ZHANG Yuankai, WANG Jun. Design of three-dimensional force sensor based on string and hybrid compliant mechanism [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(8): 4-7, 31.
- [17] HE Xiu, RAN Zengling, XIAO Yaqin, et al. Three-dimensional force sensors based on all-fiber Fabry-Perot strain sensors [J]. Optics Communications, 2021, 490: 126694.
- [18] 陈乐瑞, 曹建福, 胡河宇. 采用非线性频谱的重载工业机器人故障机理分析 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 92-101.
CHEN Lerui, CAO Jianfu, HU Heyu. Fault mechanism analysis for heavy-load industrial robot with non-linear spectrum [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 92-101.
- [19] 李晓田, 邹博文, 王安麟. 适应多工况的工程机械液压元件载荷集总参数动态响应模型 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 56-64.
LI Xiaotian, ZOU Bowen, WANG Anlin. Lumped parameters dynamic response model of loads for hydraulic components of construction machinery adapted to multiple working conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 56-64.
- [20] 常龙飞, 牛清正, 宋伟, 等. 压阻式柔性应变传感纤维的手指姿态识别装置 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 116-123.
CHANG Longfei, NIU Qingzheng, SONG Wei, et al. A finger gesture recognition device with piezoresistive flexible strain sensing fiber [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(8): 116-123.
- [21] 陈广州, 陈刚, 潘莉, 等. 基于 PVDF/GO 纳米复合薄膜的柔性压电传感器 [J]. 微纳电子技术, 2022, 59(3): 236-241.
CHEN Guangzhou, CHEN Gang, PAN Li, et al. Flexible piezoelectric sensors based on PVDF/GO nanocomposite films [J]. Micronanoelectronic Technology, 2022, 59(3): 236-241.
- [22] 李响, 段宇, 宋小俊, 等. 组合型类蜂窝夹芯结构设计及面内力学性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 168-176.
LI Xiang, DUAN Yu, SONG Xiaojun, et al. Design of combined quasi-honeycomb core structure and research on its in-plane mechanical properties [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 168-176.
- [23] 江文松, 尹肖, 李泓洋, 等. 基于参数辨识的力传感器动态校准方法 [J]. 计量学报, 2021, 42(5): 603-608.
JIANG Wensong, YIN Xiao, LI Hongyang, et al. Dynamic calibration method of a force transducer based on parameter identification [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(5): 603-608.
- [24] LI Yingjun, YANG Cong, WANG Guicong, 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.
- [25] KANG M K, LEE S, KIM J H. Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2014, 209: 41-51.

(编辑 武红江 杜秀杰)