

文章编号 1004-924X(2020)12-2655-10

轮辐结构压电式六维力传感器设计

徐兴盛, 李映君*, 王桂从, 孙 选, 孙 杨
(济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022)

摘要:针对机器人对工作环境进行反馈进而实现自动化作业,展开了对压电式六维力传感器的研究。本文选用压电石英作为力敏元件,结合并联分载原理及多点测量原理提出一种 8 点支撑轮辐式压电六维力传感器结构及其测量原理,它具备强解耦、轻量化、大量程和高固有频率的特点。利用 ANSYS 软件进行参数化建模,并进行六维力静力学仿真实验,验证了 8 点支撑轮辐式传感器测量原理。搭建了准静态标定及动态标定平台,对设计的压电式六维力传感器进行标定。实验结果表明,传感器的非线性度 $<0.5\%$,维间干扰 $<4\%$,固有频率超过 6 kHz。轮辐式结构压电六维力传感器可以有效地完成六维力测量并消除维间耦合,满足动态测量需求,为轻量化大量程传感器的设计提供了理论基础和设计依据,对其他类型压电式六维力传感器设计和研制具有重要的参考价值。

关键词:压电石英;轮辐式;多点测量原理;六维力传感器;维间耦合

中图分类号:TH823 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20202812.2655

Design of six-axis force piezoelectric sensor with spoke structure

XU Xing-sheng, LI Ying-jun*, WANG Gui-cong, SUN Xuan, SUN Yang

(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

* Corresponding author, E-mail: me_liyj@ujn.edu.cn

Abstract: Aiming at the robot's feedback to the working environment for realizing automatic operation, a piezoelectric six-axis force sensor was designed. Specifically, an eight-fulcrum spoke six-axis force sensor structure combined with the principle of multipoint measurement was proposed herein. Quartz was employed as the piezoelectric material in the force-sensing device. The advantage of such a sensor is its strong decoupling, light weight, large range, and high natural frequency. The parametric modeling of this sensor was carried out using the ANSYS finite element software. The measurement principle of the eight-fulcrum sensor's feasibility was verified through a six-axis force quasi-static simulation. Moreover, a quasi-static and dynamic calibration experimental platform was built to conduct the calibration experiment. The experimental results show that for the proposed sensor, the nonlinearity is less than 0.5% , inter-dimensional interference is more than 4% , and natural frequency is over 6 kHz. From the theoretical analysis and experimental results, we confirmed that the sensor structure could complete the six-axis force measurement and that the coupling between the dimensions was eliminated. The demand for dynamic measurement was thus fulfilled. The proposed sensor's structure provides the theoretical and design bases for the design of light-

收稿日期:2020-09-10;修订日期:2020-10-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51875250, No. 51705200);山东省高等学校青创科技支持计划(No. 2019KJB018)

weight large range sensors, which is of important reference significance for the design and development of other types of piezoelectric six-axis force sensors.

Key words: piezoelectric quartz; spoke; multi-point measurement principle; six-axis force sensor; dimensional coupling

1 引言

传感器技术是一种信息获取、处理和运输的技术,是实现自动化的基础^[1]。六维力/力矩传感器(以下简称六维力传感器)能够精确测量三维空间任意力系中的三维正交力(F_x, F_y, F_z)及正交力矩(M_x, M_y, M_z)^[2],是智能机械实现力控制信息获取的关键装置,被广泛应用于航空航天、工业智能机器人和重载制造装备等领域^[3]。

根据力敏元件测量原理,六维力传感器可分为弹性体式和非弹性体式两类。其中,弹性体式传感器的典型代表是电阻应变式六维力传感器,该类传感器出现时间较早,技术相对成熟,应用最为广泛。它通过弹性敏感元件和应变计将被测力转换为电阻值的变化,可以测量应力、应变等^[4-5],具备测量精度高和测量效果好的特点,但是高灵敏度的实现会使其固有频率降低,导致该类传感器动态响应性能差;而作为非弹性体式代表的压电式传感器利用力敏元件的压电效应进行测量,受外界环境因素的影响较小,有着高精度、高灵敏度以及高固有频率的特点,特别适用于对固有频率要求高的场合^[6]。

大连理工大学的孙宝元等最先在国内开展压电式多向测力仪研究,为国内压电测力传感器研究奠定了基础。济南大学李映君等^[7-8]提出并联分载原理,研制出一种新型自解耦压电式六维力传感器并提出了压电式轴上六维力传感器的解耦算法。金雷^[9-10]等研究了传感器力敏元件晶片与电级的接触刚度对传感器整体刚度等性能的影响。张军等^[11]分析了两种四点支撑空间布局方式的优缺点,确定了四点支撑六维力传感器力敏元件的合理布局方式。重庆大学的刘俊等^[12]设计了一种差动式压电六维力传感器,该传感器具有结构简单、灵敏度及固有频率高等优

点,但使用环境对它的影响较大,稳定性低。

无论是电阻式传感器还是压电式传感器,在测量过程中都存在维间耦合,测量后期需要进行大量的解耦计算,设计研发一种可以屏蔽维间耦合缺陷的六维力传感器,对它在各个应用领域的发展有着突破性的意义,因此本文提出基于并联分载原理的八点支撑轮辐式压电石英六维力传感器结构形式,并对其测量原理进行了分析和验证。

2 压电式六维力传感器测量原理

压电石英是一种单晶体材料,其压电效应由自身晶体结构产生。它的电荷损失量很低,静态特性和动态特性均十分良好,可以长期保存电荷,对于准静态、静态以及动态测量均有良好表现。按照极化方向的差异可以制作出不同功效的石英晶片,再设计合理的叠放方式和晶组布局方案,基于压电效应中的剪切效应和纵向效应配合作用完成六维力的有效测量。

通过研究多点支撑空间布局方案可知:四点支撑菱形布局方案在空间三维力的测量中维间干扰误差较小,正方形布局方案在进行空间三维力矩测量时效果更好。本文基于两种不同空间布局的四点支撑方案的工作特点,提出了一种具备强解耦特点的八点支撑式空布局方式,如图 1 所示。八组石英晶组均匀布置在半径为 R 的圆周上,其中菱形布局的 1, 3, 5, 7 四组晶组负责测量空间三维应力 F_x, F_y, F_z ; 正方形布局的 2, 4, 6, 8 四组石英晶组用于测量空间三维力矩 M_x, M_y, M_z 。安装时保证 1, 3, 5, 7 晶组的 x, y 晶片极化方向与传感器坐标系的 X, Y 轴一致, 2, 4, 6, 8 晶组的 x 晶片极化方向相切于晶组安装圆周, 八组晶组的 z 晶片极化方向与传感器坐标系 Z 轴一致。

基于空间力系平衡和杠杆原理,结合传感器

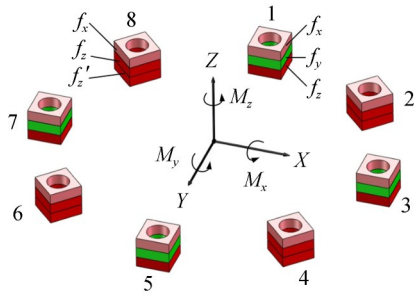


图 1 八点支撑空间布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of eight-fulcrum space layout

的石英晶组空间布局组合方案,推导出传感器的六维力/力矩测量公式为:

$$\begin{cases} F_x = f_{x1} + f_{x3} + f_{x5} + f_{x7} \\ F_y = f_{y1} + f_{y3} + f_{y5} + f_{y7} \\ F_z = f_{z1} + f_{z3} + f_{z5} + f_{z7} \\ M_x = \sqrt{2} R/2 \times (-f_{z2} + f_{z4} + f_{z6} - f_{z8}) \\ M_y = \sqrt{2} R/2 \times (-f_{z2}' - f_{z4}' + f_{z6}' + f_{z8}') \\ M_z = R \times (f_{x2} - f_{x4} + f_{x6} - f_{x8}) \end{cases} \quad (1)$$

在上述传感器进行六维力测量的过程中,由于采用两种不同布局的石英晶组分别对力、力矩进行测量,各测量支路之间不会产生干扰,从理论角度分析可知,八点支撑空间布局方案可以有效消除传感器六维力测量时的维间耦合缺陷。

3 压电式六维力传感器结构设计

传感器各项性能指标的一个决定性因素就是传感器的结构,结构决定了传感器的测量性能及承载能力等指标。传感器预期量程满足:Z向载荷量程为 60 kN,X,Y向载荷量程为 30 kN, \$M_x, M_y, M_z\$向载荷量程为 3 kN·m,固有频率超过 5 kHz。应用并联分载原理,基于轻量化设计原则设计出一种轮辐式压电六维力传感器结构,其三维模型如图 2 所示。

传感器由上盖、下盖、力敏元件和预紧螺栓组成。上/下盖都分为内分载环、轮辐机构和外分载环三个区域:轮辐区域和内分载环均设有预紧螺栓安装孔,外分载环对称开出线孔。石英晶组安装在轮辐机构位置,通过预紧螺栓将传感器

的上盖、力敏元件及下盖固定,通过预紧螺丝对传感器施加预紧力,消除三者之间的安装间隙。

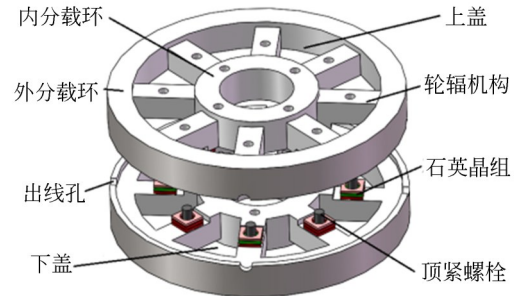


图 2 轮辐式压电六维力传感器结构三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of six-axis force piezoelectric sensor with stroke structure

当空间外力作用于传感器上盖表面,内/外分载环区域共同起到分载作用,仅使部分外力通过上盖的轮辐区域传递至石英晶组表面,这种结构可以防止外力过大破坏石英晶组。通过改变传感器内外环分载环结构的面积,可调节传感器的量程。

4 仿真分析

有限元分析方法已经在模拟求解真实的工程问题中得到广泛地应用^[13],为验证传感器测量原理的可行性,利用 ANSYS 软件建立传感器模型并进行静力学仿真分析。传感器各材料参数如表 1 所示,采用自由网格划分后的有限元模型及六维力加载点如图 3 所示。按照实际应用情况,对传感器底面做自由度为零的约束。

表 1 模型材料和有限元单元参数

Tab. 1 Model material and element parameters

结 构	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	单元类型
加载块	7 850	175	0.300	Solid186
上 盖	7 900	206	0.243	Solid186
下 盖	7 900	206	0.243	Solid186
石英晶片	2 210	77.8	0.170	Solid186
电 极	8 930	82.7	0.330	Solid186
绝缘薄膜	1 380	3.50	0.340	Solid186

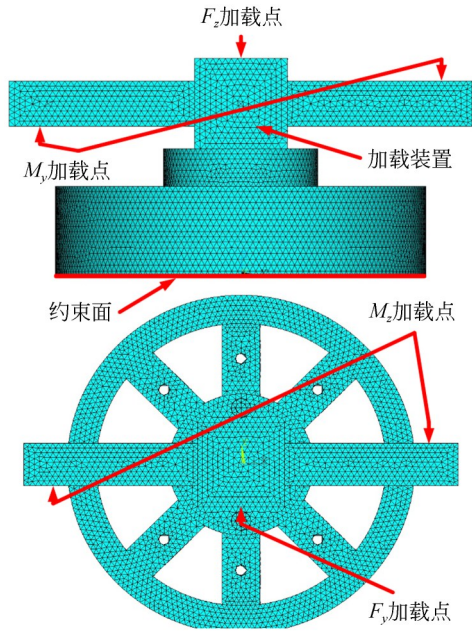


图3 六维力压电传感器的有限元模型网格划分
Fig. 3 Model meshing of six-axis force piezoelectric sensor

4.1 传感器静力学仿真

4.1.1 轴向力仿真

法向应力 F_z 作用于加载块表面,如图3所示。仿真时 F_z 载荷的起始数值为 0 kN,以 10 kN 的步长递增加载,加载 10 kN 载荷时传感器壳体的等效应力如图4所示。通过有限元仿真得出八组石英晶组的三维正交应力仿真值,通过公式(1)计算得出在法向应力作用下,传感器的六维力测量结果,如图5所示。

由图5可知, F_x, F_y 与力矩 M_x, M_y, M_z 的耦合

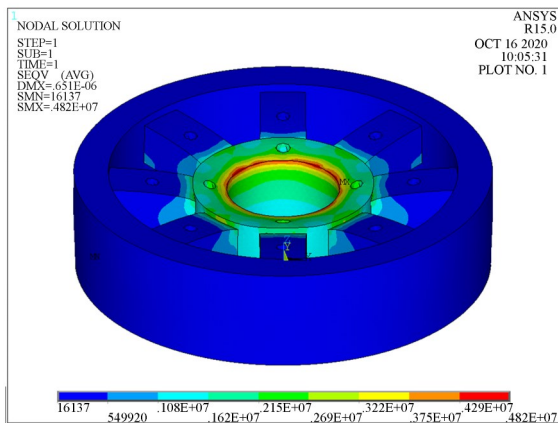


图4 F_z 加载传感器的等效应力云图
Fig. 4 Equivalent stress nephogram of sensor under F_z

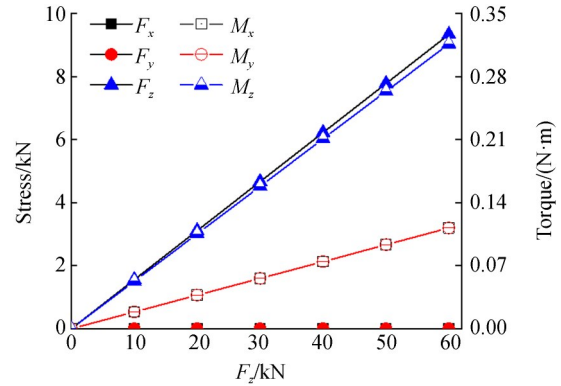


图5 F_z 向加载输入/输出曲线
Fig. 5 Input/output curves under F_z

输出结果近似为零,法向应力 F_z 的测量值随载荷步递增,轮辐式压电六维力传感器的力/力矩测量性能良好。

4.1.2 切向力仿真

由于传感器的 X 向载荷与 Y 向载荷是同一种组合的石英晶组进行测量,在理论情况下,两组载荷仿真具有同样的变化规律,所以对传感器进行 Y 向应力仿真,加载方式如图3所示。仿真时 Y 向载荷以 0 kN 为起始载荷,以 5 kN 的步长递增加载,加载 5 kN 载荷时传感器壳体的应力云图如图6所示,得出八组晶组的仿真数据并计算出传感器的六维力仿真结果,如图7所示。

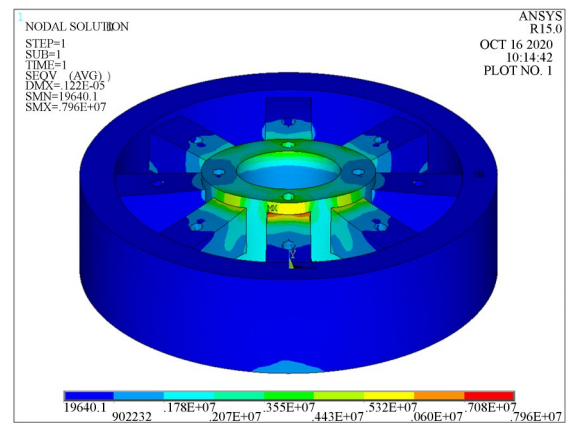


图6 F_y 加载传感器的等效应力云图
Fig. 6 Equivalent stress nephogram of sensor under F_y

由图7可知,应力 F_x, F_z 以及力矩 M_y, M_z 的耦合输出均近似为零,切向应力 F_y 的测量值随步进载荷线性增大,灵敏度较高在切向载荷的作用下, M_x 耦合测量值较大,但不影响传感器的测量。

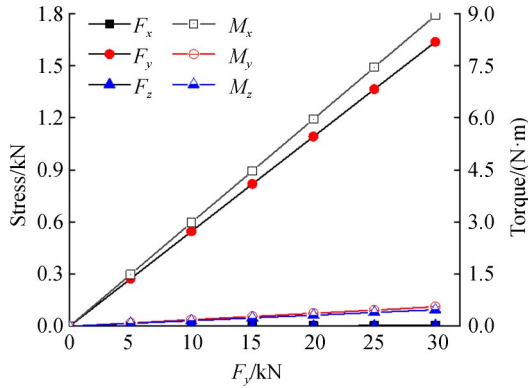


图 7 F_y 加载输入/输出曲线
Fig. 7 Input/output curves under F_y

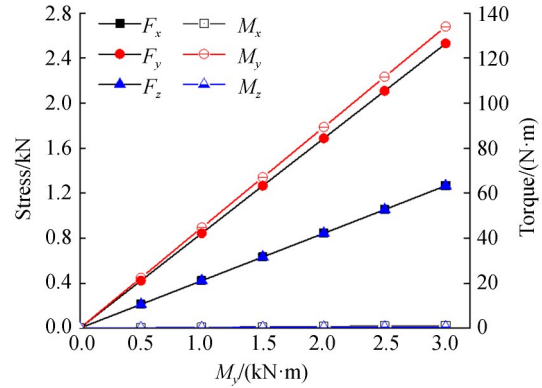


图 9 M_y 加载输入/输出曲线
Fig. 9 Input/output curves under M_y

4. 1. 3 弯矩仿真

如图 3 所示,基于应力测量坐标系在标定杆对称位置加载大小相同、方向相反的轴向应力载荷 F_z 与 $-F_z$ 产生扭矩载荷 M_y 。两加载点间距为 250 mm, M_y 载荷由 0 kN·m 递增至 3 kN·m, M_y 载荷为 1 kN·m 时传感器的等效应力如图 8 所示, 得出 8 组晶组的仿真数据并计算出传感器的六维力仿真结果, 如图 9 所示。

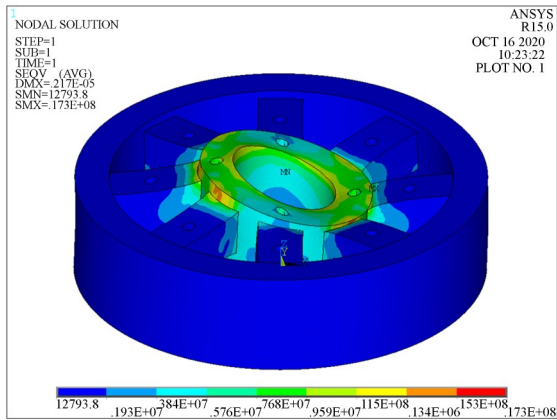


图 8 M_y 加载传感器的等效应力云图
Fig. 8 Equivalent stress nephogram of sensor under M_y

由图 9 可知,空间三向力和力矩 M_x, M_z 的耦合输出均近似为零,未影响弯矩 M_y 的测量结果。 M_y 仿真输出随着载荷的增大而增大,且呈现出良好的线性。

4. 1. 4 扭矩仿真

如图 3 所示,基于应力测量坐标系在标定杆对称位置加载大小相同、方向相反的切向应力载荷 F_y 与 $-F_y$ 产生扭矩载荷 M_z , M_z 载荷由 0 kN·m

递增至 3 kN·m, M_y 为 1 kN·m 时传感器的等效应力如图 10 所示,得出八组晶组的仿真数据并计算出传感器的六维力仿真结果, 如图 11 所示。

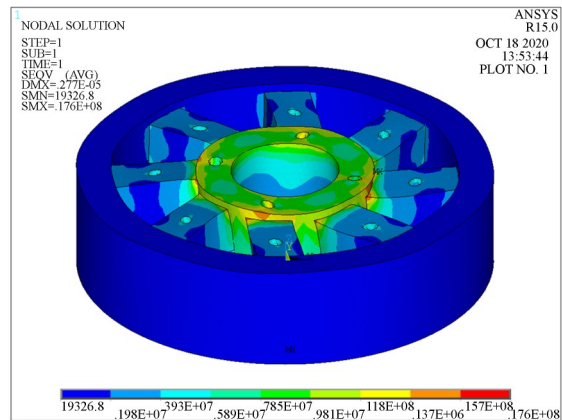


图 10 M_z 加载传感器的等效应力云图
Fig. 10 Equivalent stress nephogram of sensor under M_z

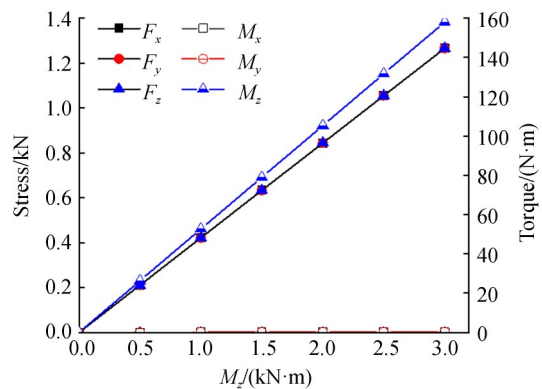


图 11 M_z 加载输入/输出曲线
Fig. 11 Input / output curve under M_z

由图 11 可知,三向力 F_x, F_y, F_z 耦合输出均近似为零,这与理论设想一致,证明八点支撑布局方式及测量原理合理可行。力矩 M_x, M_y 的耦合近似为零,扭矩 M_z 测量值随着扭矩载荷的增大而增大,线性良好。

4.2 仿真误差分析

在 Y 向力仿真过程中,力加载位置平面与传感器约束面存在一个高度差 h ,如图 3 所示,对传感器产生类似 M_x 的弯矩载荷加载,所以 M_x 方向有一定的耦合误差,与传感器结构本身无关。轮

辐式压电六维力传感器的耦合输出及其他误差均由标定夹具以及应力加载方式产生,其各项性能指标均呈良好状态,仿真分析表明轮辐式压电六维力传感器方案合理可行。

4.3 传感器动力学仿真

对压电式力传感器来说,固有频率是与动态响应有关的主要参数,是传感器应用中倍受关注的性能指标之一,可以用来确定传感器的动态测量量程,对传感器进行模态仿真得到传感器的前六阶振型如图 12 所示,模态数据如表 2 所示。

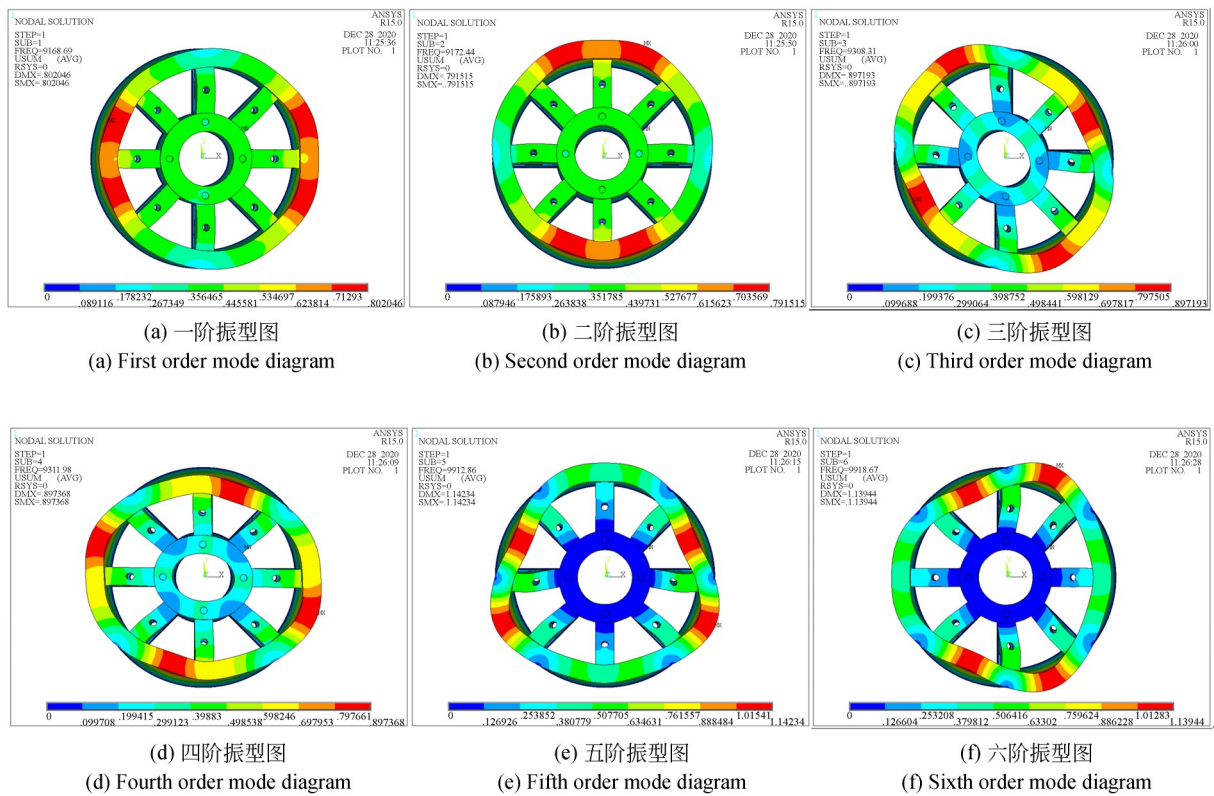


图 12 六维力压电传感器前六阶振型图

Fig. 12 Sixth-order vibration modes of six-axis force piezoelectric sensor

表 2 传感器模态数据

Tab. 2 Modal data of six-axis force piezoelectric sensor

模态阶数	固有频率/Hz	模态振动
1	9 168.69	沿 Y 轴线性振动
2	9 172.44	沿 X 轴线性振动
3	9 308.31	绕 Z 轴扭转振动
4	9 311.98	沿 Z 轴线性振动
5	9 912.86	绕 X 轴扭转振动
6	9 918.67	绕 Y 轴扭转振动

5 标定实验

5.1 传感器准静态标定实验

在前期理论研究的基础上,完成轮辐式压电传感器样机的研制。传感器材料与仿真所选材料一致,安装石英晶组,通过预紧螺栓施加 3 kN 的预紧力,消除安装间隙。六维力传感器静态测量平台如图 13 所示。该平台主要由六维力传感器静态标定实验装置、高速数据采集卡(美国

DT-9804 型)、电荷放大器(江苏联能 YE-5850 型)、传感器样机、数据预处理电路(扬州科动 KD-5401 型)和 PC 端组成。

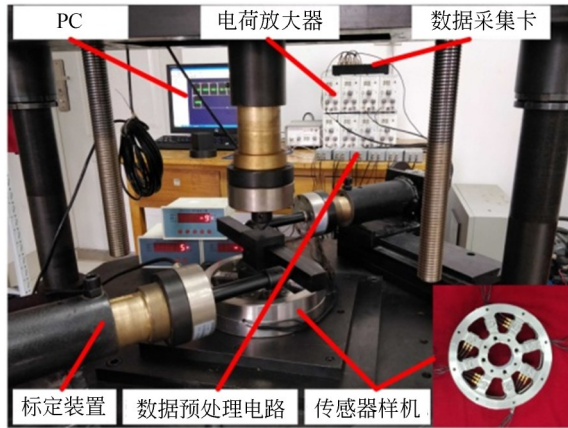


图 13 六维力传感器静态标定实验平台

Fig. 13 Static calibration experimental platform of six-axis force piezoelectric sensor

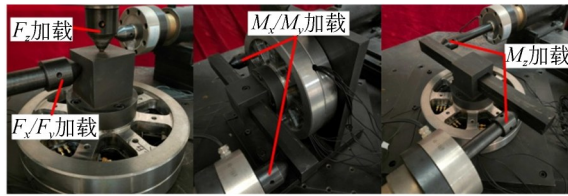
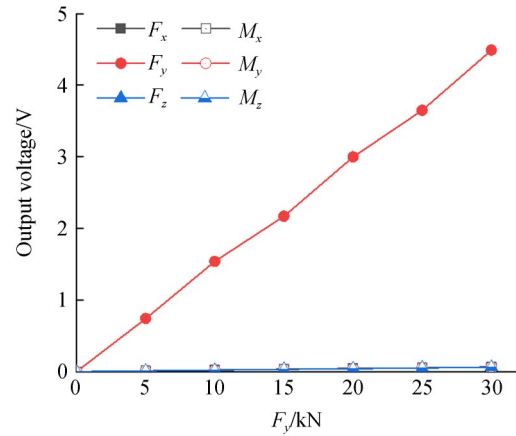


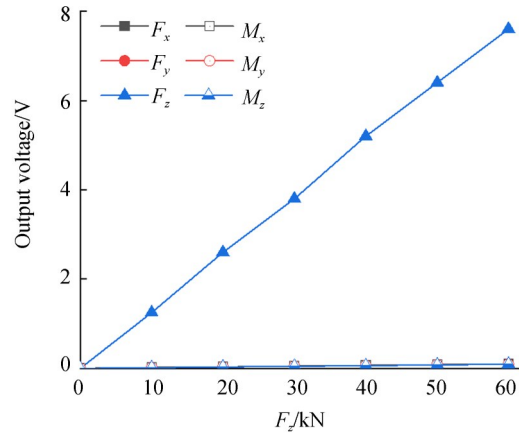
图 14 加载方式示意图

Fig. 14 Schematic diagram of loading modes

采用等距逐步加载的方法对传感器进行静态标定,实际加载方式如图 14 所示, X, Y 向载荷以 5 kN 的步长递进加载至 30 kN, Z 向载荷以 10



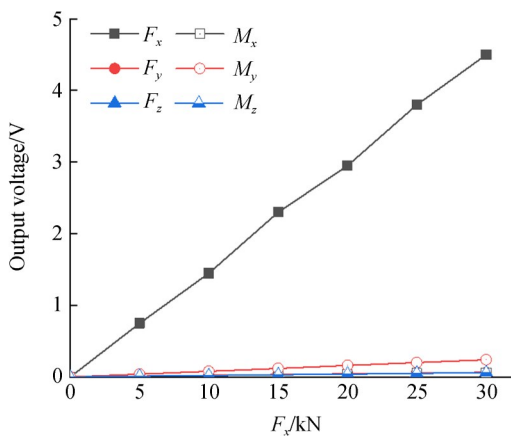
(b) F_y 加载标定曲线
(b) Calibration curves under F_y



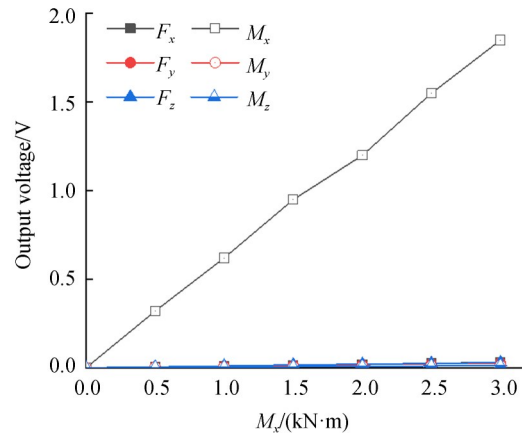
(c) F_z 加载标定曲线
(c) Calibration curves under F_z

图 15 三向力加载标定曲线

Fig. 15 Calibration curves under three dimensional forces



(a) F_x 加载标定曲线
(a) Calibration curves under F_x



(a) M_x 加载标定曲线
(a) Calibration curves under M_x

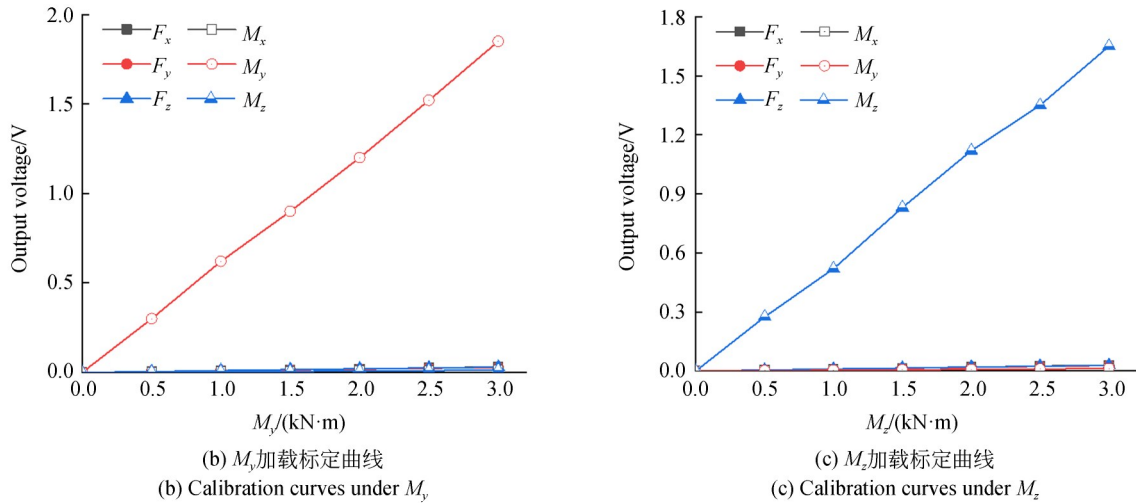


图 16 三向力矩加载标定曲线

Fig. 16 Calibration curves under three dimensional torques

kN 的步长递进加载至 60 kN, 重复进行 3 次加载实验, 得出实验数据并取平均值, 实验结果如图 15 所示。传感器 X, Y, Z 向力测量具备良好的线性输出, 耦合输出近似为零。

如图 14 所示加载方式对传感器进行弯矩 M_x , M_y 及扭矩 M_z 的标定, 基于应力测量坐标系在标定杆对称位置加载相同大小、相反方向的应力载荷产生力矩载荷, 加载力以 2 kN 的步进载荷递

增加载, 加载点距离 250 mm, 施加的力矩载荷由 0 kN·m 递增至 3 kN·m, 重复 3 次加载实验取平均值, 实验结果如图 16 所示。传感器耦合输出近似为零, 随着力矩载荷的增加, 传感器输出电压值近似呈线性增加, 表明传感器弯/扭矩测量线性输出良好, 结构方案切实可行。传感器的主要性能参数如表 3 所示。

表 3 传感器主要指标对比

Tab. 3 Comparison of main indicators of sensors

力/力矩	非线性度/%		维间干扰(仿真值/实验值)/%					
	仿真	实验	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	0	0.12	-	(0.31/2.45)	(0.03/2.02)	(-1.34)	(-1.16)	(-1.10)
F_y	0	0.12	(0.31/2.50)	-	(0.03/2.02)	(-1.35)	(-1.15)	(-1.09)
F_z	0	0.36	(0.18/3.03)	(0.18/3.03)	-	(-1.81)	(-1.82)	(-1.97)
M_x	0	0.31	(-2.12)	(-2.95)	(-2.08)	-	(0.89/1.34)	(0.14/1.25)
M_y	0	0.32	(-2.16)	(-1.97)	(-2.16)	(0.89/1.27)	-	(0.14/1.29)
M_z	0	0.34	(-2.33)	(-1.96)	(-2.22)	(0.37/2.12)	(0.37/2.32)	-

5.2 传感器动态标定实验

因实验条件限制, 选择冲击响应法对传感器进行动态标定。用力锤敲击传感器表面, 传感器受力输出的电荷信号通过电荷放大器转化为电压信号, 高速数据采集卡获取数据并存入 PC 中, 利用数据采集软件进行傅里叶变换分析, 得到相

应激励方向的固有频率参数。搭建的动态标定实验平台如图 17 所示, 得出的动态实验结果如图 18 所示, 满足六维力传感器固有频率为 5 kHz 的测量需求, 表明传感器具备良好的动态测量性能。

静态标定及动态标定的结果表明, 传感器结

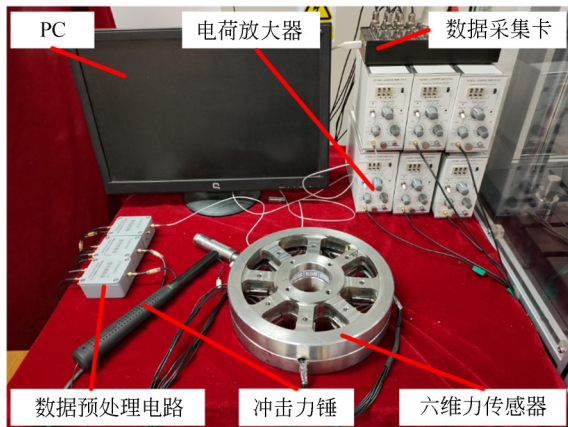


图 17 六维力传感器动态标定实验平台

Fig. 17 Dynamic calibration experimental platform of six-axis force piezoelectric sensor

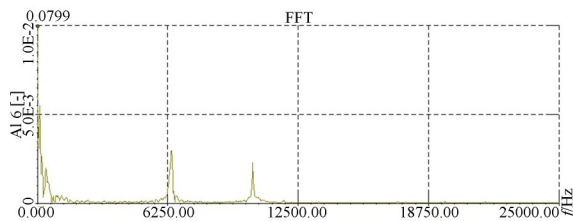


图 18 六维力传感器传感器的动态标定结果

Fig. 18 Dynamic calibration results of six-axis force piezoelectric sensor

构满足预期效果,轮辐式结构可以有效屏蔽维间耦合,非线性度 $<1\%$,测试精度较高,固有频率超过 6 kHz,满足动态测量需求。仿真结果与实验结果对比可知,仿真曲线和测量曲线具备相同

参考文献:

- [1] 王志军,王凯,刘宣佑. 六维力传感器解耦综述[J]. 机械工程与自动化, 2018(2): 220-221.
WANG ZH J, WANG K, LIU X Y. Summarize of six-dimensional force sensor decoupling [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2018(2): 220-221. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 李映君,韩彬彬,王桂从,等. 基于径向基函数神

的变化趋势,而仿真结果是理想情况下的测量输出,可以为传感器的设计提供参考依据。

6 结 论

本文针对工业机器人对六维力传感器的需求,基于并联分载原理及多点测量原理提出了一种八点支撑式布局测量方案,设计出一种可消除维间耦合的八点支撑轮辐式压电六维力传感器。基于参数化建模,结合八点支撑空间布局方案及其测量原理设计了准静态/动态性能仿真实验,利用 ANSYS 软件分别对轮辐式压电六维力传感器在空间不同载荷作用下的测量能力及动态性能进行了仿真分析。由于有限元模型采用四面体网格划分,仿真结果出现轻微耦合输出,但不影响传感器测量过程。

最后加工传感器样机并搭建静态六维力测试平台对传感器进行静态标定及动态标定实验。标定实验结果表明,轮辐式压电六维力传感器测量结果线性度良好,维间干扰 $<4\%$,可以有效测量六维力,传感器自身固有频率满足动态测量需求。传感器晶组安装过程中的位置偏差、其自身厚度不一以及加载点的偏差都会导致实验数据出现耦合,不过实验维间干扰属于正常的实验误差。仿真及实验结果表明,该轮辐式压电六维力传感器的设计方案合理可行,为其他类型压电六维力传感器的设计提供了重要的参考依据。

经网络的压电式六维力传感器解耦算法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1266-1271.

LI Y J, HAN B B, WANG G C, *et al.*. Decoupling algorithms for piezoelectric six-dimensional force sensor based on RBF neural network[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1266-1271. (in Chinese)

- [4] 刘俊,徐军领,李敏,等. 垫圈式压电六维力传感器静态灵敏度解析[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 901-910.

LIU J, XU J L, LI M, *et al.*. Static sensitivity analysis of washer-type piezoelectric six-axis force sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(4): 901-910. (in Chinese)

- [5] 王岩,赵剑,夏阳,等. 考虑应力分布约束的压电

- 全向加速度计梁结构优化设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1751-1760.
- WANG Y, ZHAO J, XIA Y, *et al.*. Optimization of supporting beams of piezoelectric omnidirectional accelerometer under stress constraint [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1751-1760. (in Chinese)
- [6] 任宗金, 朱晓雨, 张军. 基于石英晶片扭转效应的微小推力测量研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(4): 481-483, 487.
- REN Z J, ZHU X Y, ZHANG J. Research on micro-thrust measurement based on torsional effect of quartz wafer [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2020, 42(4): 481-483, 487. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] 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).
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 李敏, 刘俊, 秦岚, 等. 平板式压电六维力传感器静态性能研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 1-7.
- LI M, LIU J, QIN L, *et al.*. Research of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor's static characteristics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(6): 1-7. (in Chinese)
- [13] 赵荣娟, 黄军, 刘施然, 等. ANSYS在压电天平设计中的应用[J]. 实验流体力学, 2020, 34(1): 96-102.
- ZHAO R J, HUANG J, LIU SH R, *et al.*. Application of ANSYS in piezoelectric balance design [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020, 34(1): 96-102. (in Chinese)

作者简介:



徐兴盛(1992—),男,山东聊城人,硕士研究生,2016年于济南大学获得学士学位,主要研究方向为压电六维力传感器测控技术。E-mail: 2928838432@qq.com

导师简介:



李映君(1982—),男,山东烟台人,博士,教授,硕士生导师,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,主要研究方向为传感器与执行器测控技术、工业机器人技术和智能化仪器仪表技术。E-mail:me_liyj@ujn.edu.cn