

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003778

压电三向测力单元的精度提高方法研究^{*}

张 军¹ 于 婧¹ 任宗金¹ 王成刚² 田志强^{1,3} 陈以华¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院 大连 116024; 2. 北京航天试验技术研究所 北京 100074;
3. 大连施奈莱克创新汽车零部件有限公司 大连 116024)

摘 要:随着动态力测试量程的不断増加以及对测试精度要求的提高,压电测试技术的关键性作用日益凸显,并被广泛应用于重载设备以及航空航天矢量力测量中。针对压电三向测力单元装配及施加预紧力过程中出现的上下压块偏转、不同轴等问题,基于力的分载原理对误差进行了量化,建立了测力单元的自预紧误差理论模型,并设计了新型的装配夹具,进行了两种夹具装配下的测力单元角度偏转测试实验以及静态标定实验。实验结果表明,使用新夹具装配的测力单元测试精度明显得到很大提高,相间干扰最大值由6.06%减少为2.97%,为后续测力单元的精度提升途径以及相应的结构研制提供了理论支撑。

关键词:压电测力单元;夹具;装配误差;测试精度;标定

中图分类号: TN304; TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on methods of improving the precision of piezoelectric force measuring unit

Zhang Jun¹ Yu Jing¹ Ren Zongjin¹ Wang Chenggang² Tian Zhiqiang^{1,3} Chen Yihua¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Test Technology, Beijing 100074, China; 3. Dalian Schnelleck Innovation Auto Parts Co., Ltd, Dalian 116024, China)

Abstract: With increase of the dynamic force test range and the improvement of test accuracy requirements, the key role of piezoelectric test technology becomes gradually prominent, which has been widely used in heavy-duty equipment and aerospace vector force measurement. In the process of assembling and applying preload of the piezoelectric three-way force measuring unit, problems such as the deflection of the upper plate and lower plate and the different axis incurred. Based on the load sharing principle of force, this paper quantifies the error and establishes a theoretical model of the self-preload error of the force measurement unit. A new type of assembly fixture is designed, and the angle deflection test experiment and static calibration experiment of the force measuring unit assembled with two types of fixtures are carried out. The experimental results show that the test accuracy of the force measurement unit assembled with the new fixture has been significantly improved, and the maximum value of interphase interference is reduced from 6.06% to 2.97%, which provides theoretical support for the improvement of the accuracy of the force measurement unit and the development of related structures.

Keywords: piezoelectric load cell; fixture; assembly error; test accuracy; calibration

0 引 言

目前,多维力传感器在生物医疗、机器人、航空航天等方面都得到广泛应用^[1-2]。其中在重载操作设备以及航空航天领域,基于压电材料的测力单元以及测力仪被

用于力/力矩的精确测量和反馈^[3-4],对实时监控工作状态、实现工艺调整至关重要^[5-7]。压电传感器适用于动态力测量,具有体积小、刚度高、动态特性好、耐高温等良好特性^[8-10]。然而,在将压电传感器装配成测力单元的过程中,由于需要施加较大的预紧力,其数值通常会达到30 kN 或者更大,导致结构旋转,上下压块之间偏转、不

同轴等问题,引起较大的相间干扰,进而造成精度损失,限制了测力单元及测力仪的精度提升。因此,传感器的装配误差对压电测力单元测试性能的影响不可忽略^[11]。

关于压电传感器测试精度研究,王浩宇^[12]对四维力传感器针对晶组结构进行优化,将传统的平铺式石英晶片布局改为双层晶组式布局,实验结果表明,三向相间干扰均小于5%。徐兴盛等^[13]提出一种8点支撑轮辐式压电六维力传感器结构,通过静态标定实验得出维间干扰小于4%。赵延治等^[14]提出了多维力传感器“自标定”设计理念,设计了一种弱耦合全压向力自标定正交并联16分支六维力传感器结构。金雷等^[15]基于分形理论建立了压电力传感器中晶片与电极结合面接触刚度模型,提出一种以接触刚度为约束的晶片表面形貌优化方法。刘俊等^[16]通过对垫圈式压电六维力传感器多参数主动设计和优选,研究了静态灵敏度解析数学模型研究,为提高测试精度提供了理论依据。Luo等^[17]提出了使用运动等值阈值法对压电结构形状进行最佳拓扑设计,通过实验研究的数值结果得出了优化的拓扑材料分布。肖才伟等^[18]设计了微小三向切削力测量刀具,将4个压电传感器按两向完全对称的形式布置在刀杆上,通过解耦算法进行修正,得到向间干扰小于1%。Tian等^[19]提出了基于Kirchhoff板变形的测力仪主向力偏载标定算法,周山等^[20]提出了基于克拉默法的三维力传感器耦合误差建模解耦算法,Liu等^[21]提出了一种新型平板式压电六维力/力矩传感器去耦矩阵,均在很大程度上改善了传感器的测试精度。压电传感器测试精度的提升主要受结构、装配误差和布局等因素影响。上述文献都是从结构优化、算法解耦以及布置形式方面提升测试精度,很少有文章分析研究压电传感器本身的装配误差对测力单元测试精度的影响。针对测力单元装配过程中出现的上下压块偏转造成的装配误差,本文通过对测力单元的角度偏转误差理论模型的建立,设计了新型装配夹具,实现提高压电测力单元的装配及测试精度的目的。

1 测力单元自预紧误差模型的建立

1.1 测力单元的结构

压电测力单元可用来测量三维力,同时测力单元可通过个数组合以及不同的布置形式组成压电测力仪,如图1(a)所示,实现对矢量力的精确测量。压电测力单元作为压电测力仪的核心部件,主要由上压块、传感器、下压块、预紧螺栓和预紧螺母五部分组成,如图1(b)所示。基于压电效应,传感器主要是由3个石英单元晶组构成的组合晶组,并采用中间开孔的形式,包括两个用于测量X和Y方向力的 y_x 单元晶组和一个用于测量Z方向力的 xy 量单元晶组。通过预紧螺栓完成传感器与上下压

块之间的连接以及测力单元的自预紧。此外,预紧力带来足够大的摩擦力,满足测力单元侧向的测试需求。

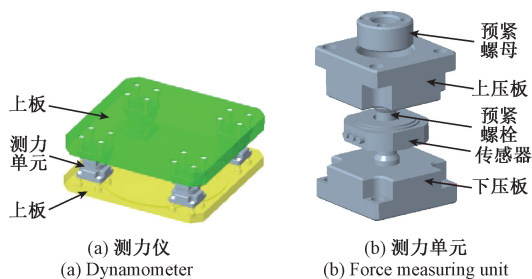


图1 压电测力仪结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric dynamometer structure

1.2 自预紧理论误差的计算

测力单元在实际装配过程中,上下压块无法保证位置精度而容易产生角度偏转,中间传感器与预紧螺栓之间由于没有足够的限位装置而导致中间传感器与预紧螺栓的不对心。为研究装配误差对压电测力单元的测试精度的影响,通过定心套筒能够有效的保证传感器与上下压块之间的同轴度,因此,上下压块偏转因素成为装配时造成测力单元精度损失的重要因素。以测力单元下压块为测试基准,在侧向力 F_y 的作用下,上压块、传感器分别与测力单元下压块之间存在角度偏转 θ_1 、 θ_2 (规定顺时针方向为正方向),如图2所示。侧向力 F_y 在上压块偏转方向分解的两个垂直分力为:

$$\begin{cases} F_{yy} = F_y \cos \theta_1 \\ F_{yx} = F_y \sin \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

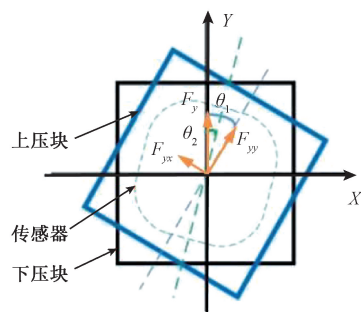


图2 上压块与传感器偏转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deflection between upper plate and sensor

根据作用力与反作用力,可以得到传感器对上压块的支反力,基于分载原理可以进一步计算得到传感器上沿上压块偏转方向所受的两个分力,如式(2)所示。

$$\begin{cases} F'_{yy} = \frac{k_{y2} F_{yy}}{k_{y1} + k_{y2}} \\ F'_{yx} = \frac{k_{y2} F_{yx}}{k_{y1} + k_{y2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： k_{y1} 是预紧螺栓 Y 向刚度； k_{y2} 是传感器 Y 向刚度。

通过上压块之后侧向力会分成两个沿上压块相互垂直的力影响传感器 X 向力值输出，造成相间干扰。由于上压块与传感器之间也存在角度偏差，那么通过上压块之后 F_y 分别对测力单元 X 正向和反向的影响输出力值如下：

$$\begin{cases} F_{x+} = F_{yy}' \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ F_{x-} = F_{yx}' \cos(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

通过对不同偏转情况下的测力单元的偏转误差进行计算，可以得到侧向力 F_y 引起的 X 向总体干扰均满足式(4)。

$$\varepsilon_{y-x} = \frac{F_{x+} - F_{x-}}{F_y} = [\cos\theta_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \sin\theta_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \cdot \frac{k_{y2}}{k_{y1} + k_{y2}} \times 100\% \quad (4)$$

同样可以得出在受侧向力 F_x 的情况之下，求解得到对 Y 向引起的相间干扰 ε_{x-y} 的大小，如下：

$$\varepsilon_{x-y} = \frac{F_{y+} - F_{y-}}{F_x} = [\cos\theta_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \sin\theta_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \cdot \frac{k_{x2}}{k_{x1} + k_{x2}} \times 100\% \quad (5)$$

式中： k_{x1} 是预紧螺栓 X 向刚度， k_{x2} 是传感器 X 向刚度。

预紧螺栓刚度可通过有限元仿真求解变形量，而传感器由于内部组成环节众多，有限元无法准确求解其三向力作用下的变形量，可通过标准力加载实验，采用电感测微仪(DGS-6C)对传感器变形量进行测量，进而根据变形量计算出刚度值，结果如表 1 所示。

表 1 传感器与预紧螺栓的 X 向和 Y 向刚度表

Table 1 X and Y stiffness table of sensor and pre-tightening bolt

结构	$k_x / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$k_y / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
预紧螺栓	3.16×10^7	3.14×10^7
传感器	2.52×10^7	2.44×10^7

由于旧式夹具采用滑板与螺栓进行侧面的紧固，如图 3 所示，该装置只能保证测力单元在初始状态时上下压块平行，无法确保各个组件之间的同轴；且在装配过程中施加螺栓预紧力时，可能会产生附加转动，难以满足大力值下测力单元的装配精度。因此，需要设计一种新的夹具结构，减小测力单元的装配误差。

2 组合式夹具体结构设计

针对测力单元装配过程中出现的角度偏转问题，设计了一种组合式夹具结构如图 4(a) 所示。该夹具体主

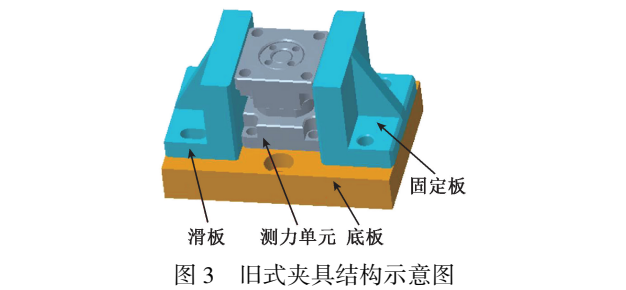


Fig. 3 Schematic diagram of old fixture structure

要由 5 部分组成，包括液压缸、液压缸挡板、组合定位体、后挡板和支承底座。其中关键定位部件为组合定位体，如图 4(b) 所示，采用内外双层定位的方案，即通过上下压块定位块与 V 型上块三平面的平行度来保证内部测力单元上下压块与传感器之间不产生角度偏转，在整体夹具之外，通过楔形块的平面保证定位装置内部测力单元上下压块定位块与 V 型上块顶部平面不产生相互偏转，实现预紧力施加时的测力单元防偏转目标。

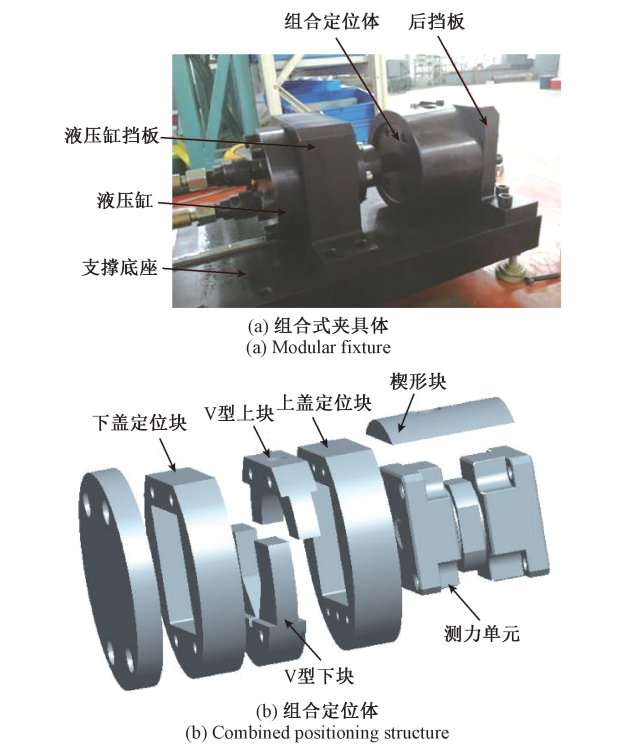


图 4 组合式夹具体结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of modular fixture structure

3 实验验证

为验证设计的夹具能有效减少测力单元的偏转以及定心误差的产生，进而证明自预紧误差理论的合理性，通过新旧夹具体各装加 4 套 5 530 测力单元，进行角度偏转测试实验，并采用集中标定的方式，对标定实验结果的线

性度、重复性、输入与输出的映射关系等方面进行分析,从而评估测力单元的静态特性,运用统计学原理来判断夹具体是否起到减少单元测试精度损失目的。

3.1 测力单元偏转测试实验

测力单元预紧力施加完毕后,为检测新夹具对测力单元的装配效果,对测力单元上下压块之间和传感器与下压块之间的偏转角度值进行测试,如图 5(a) 所示,将测力单元横放于高精度钳工台平面上,以测力单元下压块各面为测试基准面并让其与测试平台贴合,上压块置于悬空状态。采用精度为 0.01 mm 的百分表,先将百分表打到零位位置,分别从左至右测试上压块与传感器 4 个面上测点的高度差,每个面进行三次重复测试并取平均值,对测力单元上压块和传感器取的测试点位置如图 5(b) 所示。将测试结果通过最小二乘法进行斜率的拟合,通过反三角函数求出各表面相对于下压块的角度偏转,取四个面的平均值作为上压块与传感器的偏转角度,取顺时针方向偏转为正值。

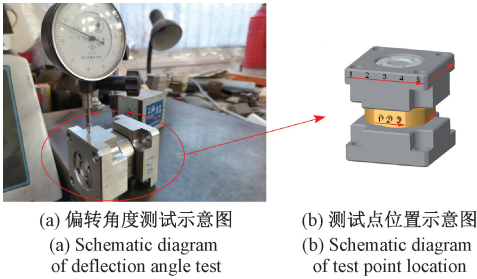


图 5 测力单元偏转测试实验示意图
Fig. 5 Schematic diagram of force measurement unit deflection test experiment

对旧式夹具装配的四套测力单元偏转角度值进行测试,可得到上压块、传感器与下压块之间的角度偏转误差,将其带入所推相间干扰误差式(5),结果如表 2 所示。由表 2 可知,旧式夹具装配导致的角度偏转造成的理论装配误差达到 1.01%。测力单元装配导致的偏转误差很大程度上影响了测试精度。

表 2 旧式夹具下的测力单元装配误差
Table 2 Assembly error of force measuring unit under old fixture

偏转角度	角度偏转值/(°)			
	1#	2#	3#	4#
θ_1	0.8	-1.13	-0.41	0.33
θ_2	-0.4	0.21	1.29	-1.3
$\varepsilon_{x-y}/\%$	0.31	-0.16	-1.00	1.01

采用同样的测试及计算方法,分别对新夹具装配得到的测力单元上压块和传感器进行偏转测试实验,得出

每个测力单元的角度偏转值,分别将数据代入到式(6)中求得测力单元装配造成的理论相间干扰误差,如表 3 所示。从结果可知,上压块最大偏转为 0.73°,传感器最大偏转为 0.39°,新夹具产生的最大理论装配误差仅为 0.30%。与旧夹具的装配误差相比,测试精度得到了很大的提升,表明设计的夹具能有效减少测力单元的偏转以及定心误差的产生,保证测力单元在标定之前达到最好的装配状态。

表 3 新式夹具下的测力单元装配误差
Table 3 Assembly error of force measuring unit under new fixture

偏转角度	角度偏转值/(°)			
	5#	6#	7#	8#
θ_1	0.26	0.42	0.53	-0.73
θ_2	-0.34	0.28	-0.39	-0.38
$\varepsilon_{x-y}/\%$	0.26	0.22	0.30	0.30

3.2 标定实验

测力单元静态标定系统主要包括标定加载装置、压电测力单元、电荷放大器(Sinocera Piezotronics LN5861)、数据采集卡(Data Translation DT9800)、标准力传感器(MCL-S 正开传感器)、计算机及数据采集软件(Dewesoft)等,如图 6 所示。对测力单元进行三向标定实验时,采用逐级加载的方式,主向 Z 方向采用量程为 5 000 N 的标准力传感器,侧向 X 和 Y 向采用量程为 2 000 N 的标准力传感器。重复加载 3 次实验,取其平均值。为了便于输出电压与输入载荷间的归一化处理,设置 X 和 Y 方向电荷放大器的灵敏度为 8.00 pC/N,设置 Z 向电荷放大器的灵敏度为 4.00 pC/N。针对两套不同的夹具体,分别进行了 4 套测力单元的装配以及标定实验。其中,1~4 号传感器为旧夹具装配的测力单元,5、6 号为新设计的组合式夹具装配的测力单元。

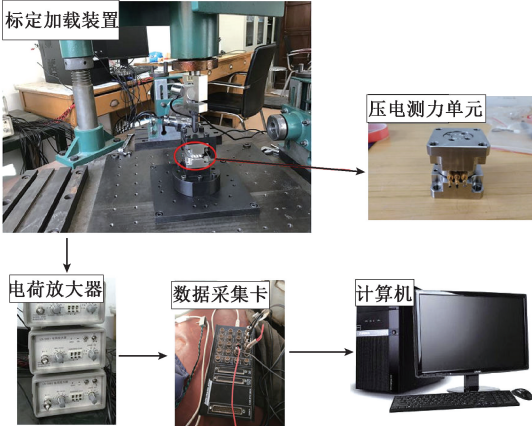


图 6 静态标定系统
Fig. 6 Static calibration system

采用集中标定的方式,统计了新旧夹具体装配的 8 套 5530 测力单元的线性度、重复性与各向相间干扰。其中,线性度与重复性的标定统计结果如图 7 所示,可以看出 8 套测力单元的三向输出均具有良好的线性度和重复性,满足小于测试基准 1% 的测试要求。三向相间干扰输出计算结果如图 8 所示,可以看到,旧夹具所装配出来的 1~4 号测力单元在相间干扰方面普遍偏高,干扰最大为 6.06%,旧式夹具体无法保证测力单元装配精度以及测试精度。新设计的组合式夹具体装配的 5~8 号测力单元的各向相间干扰均小于测试基准 3%,表明所装测力单元均满足测试要求,测试精度明显提升,夹具体能够起到减小测力单元测试误差的效果。

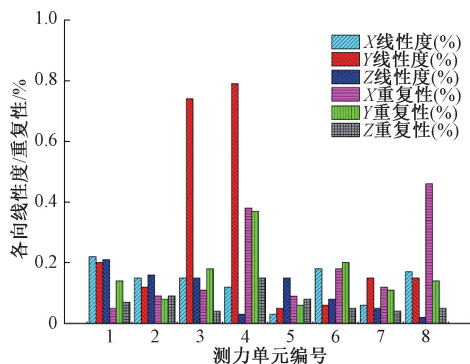


图 7 测力单元线性度与重复性误差

Fig. 7 Linearity and repeatability error of force measurement unit

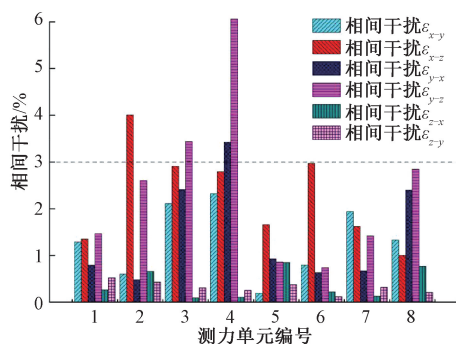


图 8 测力单元三向相间干扰

Fig. 8 Three-way interference of force measurement unit

4 结 论

本文以压电测力单元测试精度为研究对象,针对测力单元装配及施加预紧力时出现的上下压块偏转、不同轴等引起的相间干扰问题,建立了测力单元的自预紧误差理论模型,设计了测力单元夹具结构,对测力单元进行偏转测试实验以及静态标定实验。实验结果表明新旧夹具装配的 8 套测力单元的重复性与非线性度均低于 1%,与旧式夹具相比,新夹具造成的装配误差由 1.01% 降到

了 0.30%,各向相间干扰均小于 3%,并且干扰项最大值由 6.06% 减少为 2.97%,测试精度得到很大提高,说明测力单元装配夹具体能够起到很好的精度控制效果,有效减少了测力单元精度损失,进而证明了装配误差理论的正确性和可行性。本文为组成测力仪或者单个测力单元的测试提供了保障。

参考文献

- [1] 姚斌,张建勋,代煜,等. 用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 147-153.
YAO B, ZHANG J X, DAI Y, et al. Research on decoupling method of multidimensional force sensor for minimally invasive surgical robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 147-153.
- [2] 钟晓玲,张晓霞. 面向机器人的多维力/力矩传感器综述[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(5): 1-4.
ZHONG X L, ZHANG X X. Summarization of robot-oriented multidimensional force/torque sensors [J]. Sensors and Microsystems, 2015, 34(5): 1-4.
- [3] DUAL J, MOLLER D. Acoustofluidics 4: Piezoelectricity and application in the excitation of acoustic fields for ultrasonic particle manipulation. [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(3): 506-514.
- [4] 张艳华,陈玉玲,史岩峰,等. 高可靠性压力传感器的设计方法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(1): 109-113.
ZHANG Y H, CHEN Y L, SHI Y F, et al. Design method of high reliability pressure sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(1): 109-113.
- [5] QIN L, JIANG C, LIU J, et al. Design and calibration of a novel piezoelectric six-axis force/torque sensor[C]. Seventh International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2011: 83210G-83210G-9.
- [6] 刘明尧,邴俊俊,周伟剑,等. 基于光纤光栅的三维铣削力测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 49-57.
LIU M Y, BING J J, ZHOU W J, et al. Research on 3D milling force measurement method based on fiber grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 49-57.
- [7] PANZERA T H, SOUZA P R, RUBIO J C C, et al. Development of a three-component dynamometer to measure turning force[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9-12): 913-922.
- [8] 任宗金,贾振元,王浩然,等. 基于压电式传感器的力

- 矢量测量模型研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(3): 380-383.
- REN Z J, JIA ZH Y, WANG H R, et al. Research on force vector measurement model based on piezoelectric sensor [J]. Piezoelectric and Acousto-Optic, 2012, 34(3): 380-383.
- [9] LIU W, LI Y, JIA Z, et al. Research on parallel load sharing principle of piezoelectric six-dimensional heavy force/torque sensor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing. 2011, 25(1): 331-343.
- [10] XING Q, ZHANG J, QIAN M, et al. Design, calibration and error analysis of a piezoelectric thrust dynamometer for small thrust liquid pulsed rocket engines [J]. Measurement, 2011, 44(2): 338-344.
- [11] 齐亚州. 小工作空间压电式六维力传感器研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- QI Y ZH. Research on piezoelectric six-dimensional force sensor in small working space [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [12] 王浩宇. 一种压电式四维力传感器的结构优化和多维力传感器标定方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- WANG H Y. Research on the structure optimization of a piezoelectric four-dimensional force sensor and the calibration method of multi-dimensional force sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [13] 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 X SH, LI Y J, WANG G C, et al. Design of piezoelectric six-dimensional force sensor with spoke structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(12): 2655-2664.
- [14] 赵延治, 焦雷浩, 牛智, 等. 机械解耦自标定并联六维力传感器设计及仿真[J]. 中国机械工程, 2017, 28(7): 771-778.
- ZHAO Y ZH, JIAO L H, NIU ZH, et al. Design and simulation of mechanical decoupling and self-calibrating parallel six-dimensional force sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(7): 771-778.
- [15] 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. Study on the influence of piezoelectric force sensor chip and electrode contact stiffness [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 15-23, 30.
- [16] 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-dimensional force sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 901-910.
- [17] LUO Q T, TONG L Y. Design and testing for shape control of piezoelectric structures using topology optimization [J]. Engineering Structures, 2015, 97: 90-104.
- [18] 肖才伟. 基于切削力感知的智能切削刀具设计及其关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- XIAO C W. Intelligent cutting tool design based on cutting force perception and its key technology research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [19] TIAN Y, ZHANG J, REN Z J, et al. A novel calibration method based on Kirchhoff theory for piezoelectric dynamometer [J]. Sensor Review, 2018, 38(2): 137-145.
- [20] 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 method of three-dimensional force sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 181-187.
- [21] LIU J, QIN L, LI M, et al. Development of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor [J]. Chinese Academy of Sciences, 2011, 19(7): 1569-1579.

作者简介



张军, 现为大连理工大学教授, 主要研究方向为传感测控。

E-mail: Zhangj@dlut.edu.cn

Zhang Jun is a professor at Dalian University of Technology. His main research interest includes sensor measurement and control.



于婧, 现为大连理工大学硕士研究生, 主要研究方向为推力矢量测试系统。

E-mail: 1518274528@qq.com

Yu Jing is a M. Sc. candidate at Dalian University of Technology. Her main research interest includes thrust vector test system.