

文章编号 1004-924X(2015)增-0279-07

## 垫圈式压电六维力传感器的安装动态特性

刘俊\*, 杜晶晶, 吕华溢

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为了研究垫圈式压电六维力传感器在实际测量过程中的动态特性, 开展了传感器安装动态特性仿真方法和实验标定方法研究。根据垫圈式压电六维力传感的工作原理及结构特点, 分析了传感器动态特性的研究方法。按照带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器实验原型参数建立了数值模型, 开展了数值仿真方法和传感器动态特性仿真。最后, 对垫圈式压电六维力传感器的安装固有频率进行了标定及实验研究。实验结果表明: 垫圈式压电六维力传感器各维度上的安装固有频率大于 3.9 kHz, 且数值仿真方法和实验标定方法得到的标定结果一致。垫圈式压电六维力传感器的安装固有频率优于现有技术, 提出的仿真方法和标定方法可用于此类传感器安装固有频率的预估和标定。

**关键词:** 压电六维力传感器; 安装; 有限元法; 标定; 动态特性

**中图分类号:** TP212.12    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0279

## Mounted dynamic characteristics of washer type piezoelectric six-axis force sensors

LIU Jun\*, DU Jing-jing, LÜ Hua-yi

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: junliu@cqu.edu.cn

**Abstract:** To research dynamic characteristics of a washer type piezoelectric six-axis force sensor in a practical measurement, simulation method and calibration method of the mounted dynamic characteristics were presented. According to the working principle and the structural characteristics of the washer type piezoelectric six-axis force sensor, the research methods for mounted dynamic characteristics of the sensor were analyzed. Then, in accordance with experiment prototype parameters of the pre-stressed washer type piezoelectric six-axis force sensor, its numerical model was established, and the numerical simulation method and mounted dynamic characteristics were investigated. Finally, the dynamic calibration method for mounted resonance frequency of the sensor was developed. Experimental results indicate that the mounted resonance frequency of washer type piezoelectric six-axis force sensor is more than 3.9 kHz, and the results of the numerical simulation method are consistent with calibration results. The mounted resonance frequency of the sensor is superior to that of the available technology. The proposed simulation and calibration methods can be used in the prediction and cali-

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51475060); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 106112014CDJZR125501)

bration of the mounted resonance frequency of this kinds of sensors.

**Key words:** piezoelectric six-axis force sensor; mounting; Finite Element Method(FEM); calibration; dynamic characteristic

## 1 引言

六维力传感器能测量空间全力信息(3个正交力和3个正交力矩)和力作用点位置信息,在空间站对接仿真、火箭发动机推力测试<sup>[1]</sup>、火箭助飞武器气动特性测试<sup>[2]</sup>、弹射座椅系统重心数据实时获取<sup>[3]</sup>、机器人<sup>[4]</sup>、机床健康监测等领域都发挥着重要的作用,也逐渐成为力传感器技术研究的热点,得到了国内外学者的广泛关注<sup>[5]</sup>。

六维力传感器的动态性能是检测动态六维力及不连续力冲击时评价其响应性能的重要指标,对传感器的动态测量精度、控制实时性和准确性都有着显著的影响,因此,针对六维力传感器动态特性的研究也越来越被研究者重视。Park等<sup>[6]</sup>采用振动台、惯性质量块、加速度传感器等,通过变换传感器和惯性质量块的空间安装位置,实现了单维度力/力矩载荷条件下六维力传感器动态特性标定,但标定机构复杂,标定传感器质量和频率范围受振动台限制。Xu等<sup>[7]</sup>采用“剪绳法”在6个维度上产生了负阶跃信号,但由于此类负阶跃响应时间在20~100 ms,因此不适合高固有频率六维力传感器。Li等<sup>[8]</sup>采用有限元法分析了无预紧安装条件下大力值压电六维力传感器1阶模态频率为5 kHz,并提出以此频率的2/3作为传感器最低维度的实际固有频率,但这个估计结果与采用力锤标定得到约1.8 kHz的结果差别较大。Yao等<sup>[5]</sup>采用“剪绳法”在6个维度上产生了负阶跃信号,也利用有限元法分析了整体预紧式六维力传感器的各维度上的模态,但模态分析结果与实际标定结果相差太远。侯雨雷等<sup>[9]</sup>提出了基于Stewart平台的超静定并联式六维力传感器结构,运用动力学理论分析了传感器基本几何参数与其固有频率之间的关系,并运用有限元仿真法预估了传感器工作频带宽为0~146 Hz。王志军等<sup>[10]</sup>运用多自由度系统振动力学建立了双层预紧式并联结构六维力传感器的振动力学模型,但只得到了传感器运动微分方程与其动态响应的解析表达式。这些针对六维力传感器的动

态特性的研究成果对推进六维力传感器动态标定研究都有不可替代的作用,但却仍然无法用这些方法实现垫圈式压电六维力传感器动态性能的正确预估和实验标定。

本文针对垫圈式压电六维力传感器实际安装测量中动态特性预估和标定的需要,结合前期研究进展<sup>[11-12]</sup>,在研究传感器测量原理和数学模型的基础上,分析了垫圈式压电六维力传感器动态特性的研究方法;提出了面向垫圈式压电六维力传感器安装固有频率的有限元仿真方法,并运用冲击响应法完成了传感器预紧安装条件下的动态特性标定;最终验证了仿真方法和标定方法的正确性,为此类传感器安装固有频率预估和标定提供了支撑。

## 2 测量原理与数学模型

垫圈式压电六维力传感器主要由传感器盖子、石英晶组、信号输出电极、绝缘填充剂和石英晶组安装基座等组成,实际应用中垫圈式压电六维力传感器被夹装在上下预紧块之间,预紧块既是预紧部件,也是安装连接部件。图1所示为带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器实物图。

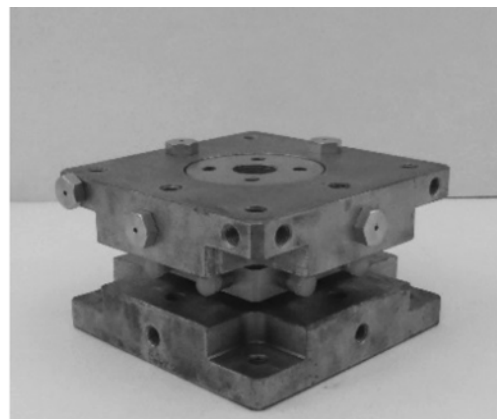


图1 六维力传感器实物图  
Fig.1 Photo of 6-DOF sensor

### 2.1 测量原理

图2所示为垫圈式压电六维力传感器内部石

石英晶组布局图。设被测力/力矩为  $f_x, f_y, f_z, m_x, m_y$  和  $m_z$ , 石英晶组响应输出为  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y$  和  $M_z$ 。所采用的 8 组石英晶组为圆形分布: 4 组  $X0^\circ$  切型石英晶组分布在  $X, Y$  轴角平分线与圆周的交点上, 用于测量  $f_x, f_y$  和  $m_z$ ; 4 组  $Y0^\circ$  切型石英晶组分布在  $X, Y$  轴与圆周的交点上, 用于测量  $f_z, m_x$  和  $m_y$ 。式(1)<sup>[11-12]</sup> 是六维力测量原理的映射关系式, 式中的  $F$  表示石英晶组响应力, 字母下标表示响应力方向, 数字下标代表石英晶组编号:

$$\begin{cases} F_x \propto (F_{x5} - F_{x1}) \\ F_y \propto (F_{y3} - F_{y7}) \\ F_z \propto (F_{z2} + F_{z4} + F_{z6} + F_{z8}) \\ M_x \propto [(F_{z2} + F_{z8}) - (F_{z4} + F_{z6})] \\ M_y \propto [(F_{x6} + F_{x8}) - (F_{x2} + F_{x4})] \\ M_z \propto (F_{x1} + F_{y3} + F_{x5} + F_{y7}) \end{cases} \quad (1)$$

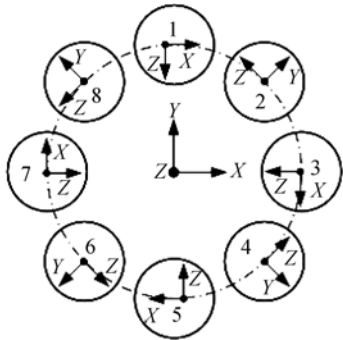


图 2 石英晶组布局图

Fig. 2 Layout of quartz group

### 2.2 数学模型

预紧后的六维力传感器仍然是一种复杂的空间结构体。为简化分析, 假设传感器盖子和上预紧块都为刚体, 且各向刚度相同, 灵敏度相等且均匀分布;  $f_z, m_x$  和  $m_y$  在石英晶组之间按杠杆原则分配,  $f_x, f_y$  和  $m_z$  在石英晶片组之间平均分配。

图 3 所示为预紧安装条件下垫圈式压电六维力传感器结构简图。O-XYZ 为位于上预紧块表面的被测力作用点坐标系,  $O_1-X_1Y_1Z_1$  为压电石英晶组的安装坐标系; 石英晶组的分布圆圆周半径为  $R, r=R/\sqrt{2}, a$  为预紧块厚度,  $b$  为传感器上盖子厚度, 被测力作用点与石英晶组表面距离为  $a+b$ ; 被测力在晶组上产生的响应输出可用式(2)

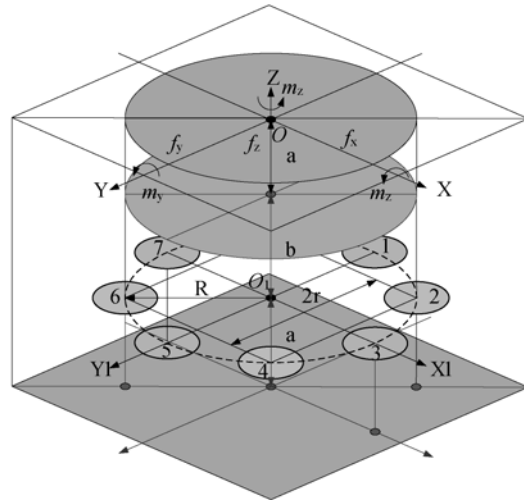


图 3 传感器结构简图

Fig. 3 Schematic diagram of sensor

表示<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{cases} F_{X1} = -f_x/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{X5} = f_x/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{Y3} = f_y/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{Y7} = -f_y/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{Z2} = f_z/8 + [-f_y h - f_x h + m_x - m_y]/(3 \times r) \\ F_{Z4} = f_z/8 + [f_y h - f_x h - m_x - m_y]/(3 \times r) \\ F_{Z6} = f_z/8 + [f_y h + f_x h - m_x + m_y]/(3 \times r) \\ F_{Z8} = f_z/8 + [-f_y h + f_x h + m_x + m_y]/(3 \times r) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_{F_x} = (f_x/2) k_{f_x} d_{26} S_e / S \\ Q_{F_y} = (f_y/2) k_{f_y} d_{26} S_e / S \\ Q_{F_z} = f_z k_{f_z} d_{11} S_e / S \\ Q_{M_x} = (8m_x - 8f_y h) k_{m_x} d_{11} S_e / 3rS \\ Q_{M_y} = (8m_y + 8f_x h) k_{m_y} d_{11} S_e / 3rS \\ Q_{M_z} = m_z k_{m_z} d_{26} S_e / RS \end{cases} \quad (3)$$

由于石英晶组可以看成是一块薄平行板电容器, 可进一步得到传感器各维度上力/力矩输入和电荷输出之间的关系式(3)。S 为石英晶片面积,  $S_e$  为电极片的有效受压面积,  $d_{11}, d_{26}$  为石英晶体的压电系数,  $k_{f_x}, k_{f_y}, k_{f_z}, k_{m_x}, k_{m_y}$  和  $k_{m_z}$  为载荷传递系数, 是为了补偿数学模型假设条件偏差而设定, 由传感器预紧块和晶体盒结构参数、形式和制作工艺水平决定。

要达到传感器动态性能预估和标定的目标, 有“解析建模法+实验标定法”和“数值仿真法+

实验标定法”两种方案。前者的核心是建立精确的传感器解析模型,也就需要准确的载荷传递系数,但实现难度大,而后者相对容易;故采用数值仿真法预估传感器的安装动态特性。

预紧后的垫圈式压电六维力传感器仍然是完全对称结构; $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$  维度的测量原理相同,都是利用 X 或 Y 维度力使  $Y0^\circ$ 切型石英晶组产生形变; $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  维度的测量原理也相同,都是利用 Z 维度力使  $X0^\circ$ 切型石英晶组产生形变。如果忽略制作工艺水平影响,可以肯定预紧后垫圈式压电六维力传感器  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$  维度的固有频率相等, $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  维度的固有频率也相等。故研究预紧后的垫圈式压电六维力传感器动态特性只需要研究  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$  和  $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  中任意 2 个维度的固有频率。

表 1 传感器实验原型主要参数

Tab.1 Parameters of sensor experiment prototype (mm)

部件名称	厚度	半径	环半径	边长
石英晶片	1	5		
盖子凸台	6		12	
壳体凸台	6		12	
壳体侧壁	2			
壳体底壁	1			
内弹性膜	0.25		2	
外弹性膜	0.25		2.5	
晶片位置		15		
预紧螺栓		7.5		
预紧块	20			90

### 3 数值仿真

ANSYS 软件具有强大的耦合场分析能力,是目前压电分析的首选软件;研究带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器动态特性主要是研究其固有频率;ANSYS 软件中研究传感器固有频率的方法有模态分析、谐响应分析、阶跃响应分析等方法,最简单的是模态分析法,选择模态分析仿真研究垫圈式压电六维力传感器的安装固有频率。

表 1 所示为带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器实验原型的主要结构参数。表 2 为垫圈式压电六维力传感器有限元模型中设置的主要参

数。图 4 所示为垫圈式压电六维力传感器有限元仿真设置流程图。

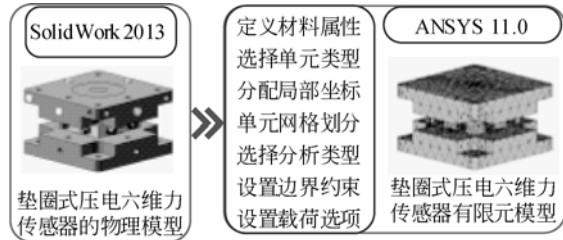


图 4 有限元仿真流程图

Fig. 4 Finite element model of sensor

表 2 FEM 模型主要参数

Tab.2 Main parameters of FEM model

部件	材料	弹性模量/ Pa	密度/ Kg/m <sup>3</sup>	单元格 类型
盖子	1Cr18Ni9Ti	$2.1 \times 10^{11}$	7 900	SOLID95
安装凸台	1Cr18Ni9Ti	$2.1 \times 10^{11}$	7 900	SOLID95
安装基座	1Cr18Ni9Ti	$2.1 \times 10^{11}$	7 900	SOLID95
石英晶组	SiO <sub>2</sub>	$8.0 \times 10^{10}$	2 650	SOLID98
预紧块	1Cr18Ni9Ti	$2.1 \times 10^{11}$	7 900	SOLID95

表 3 模态分析结果

Tab.3 Result of modal analysis

阶数	固有频率/Hz	振型	维度
1	3 450	绕 z 轴转动	$M_z$
2	3 623	绕 XY 轴负向对角线转动	/
3	3 627	绕 XY 轴正向对角线转动	/
4	7 885	绕 Y 轴转动	$M_x$
5	7 894	绕 X 轴转动	$M_y$
6	8 178	沿 z 轴线性振动	$F_z$

图 5 中给出了带预紧装置的传感器 1~6 阶振型图。表 3 给出了带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器 1~6 阶振型和固有频率。

由图 5 和表 3 可知: $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  维度固有频率大致相等,这与前面所分析的只需研究  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$  和  $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  任意 2 个维度固有频率就可以涵盖本传感器全部维度固有频率的观点一致;1~6 阶模态分析可以得到预紧后的垫圈式压电六维力传感器  $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  和  $M_z$  维度的固有频率和振型,虽然无法展示全部维度上的固有频率,但满足传感器的各维度动态特性预估研究需要。

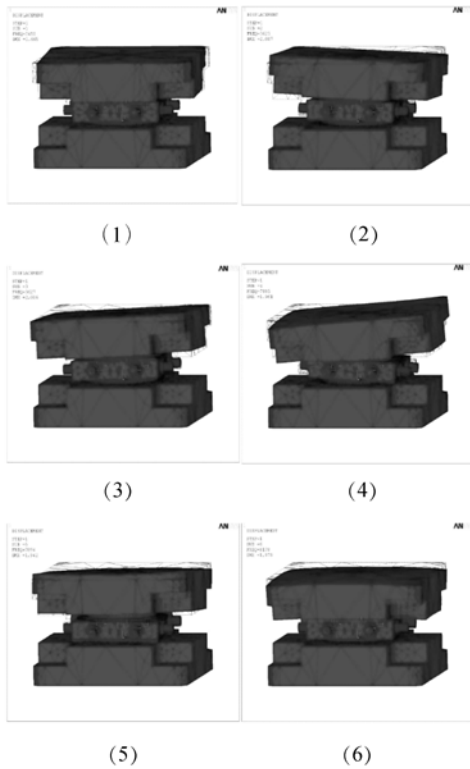


图 5 1~6 阶振型图  
Fig. 5 Vibration mode of 1~6

### 4 实验标定

传感器的动态标定方法主要有阶跃响应法、冲击响应法和频率响应法,本文采用冲击响应法。垫圈式压电六维力传感器的动态标定系统如图 6 所示。系统主要由 SIGLENT SDS 2204 示波器(A)、海绵垫(B)、带预紧垫圈式压电六维力传感器(C)、YE5850 型准静态电荷放大器(D)、冲击力锤(E)和数据处理程序(F)组成。

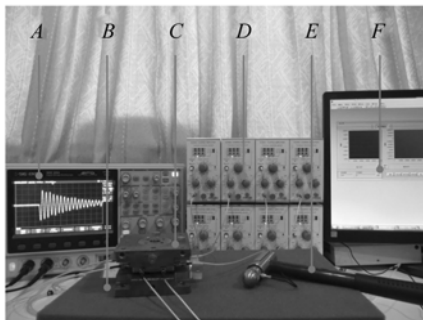


图 6 动态标定实验照片  
Fig. 6 Photo of dynamic calibration experiment

### 4.1 动态标定方法

产生 6 个维度的动态激励信号是完成六维力传感器动态标定的关键,图 7 所示为产生六维度力/力矩脉冲激励信号在上预紧块上的敲击位置图,G 为上预紧块,H 为下预紧块。X、Y、Z 三维度动态力激励信号是由冲击力锤敲击 A、B、C 位置产生;X、Y、Z 三维度动态力矩激励信号是由冲击力锤敲击 D、E、F 位置产生,产生原理是“力矩=力×力臂”。

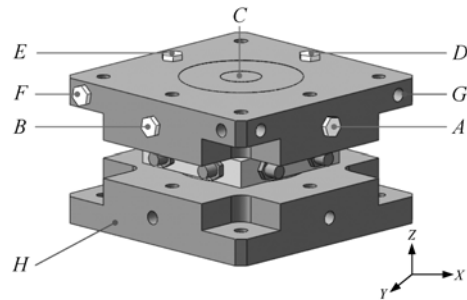


图 7 六维动态力冲击激励点  
Fig. 7 Impact points of six axis dynamic force

图 8 所示为带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器动态标定原理图。实验中,数字存储示波器设置为上升沿触发;用冲击力锤敲击垫圈式压电六维力传感器的上预紧块不同点产生不同维度的脉冲激励信号;传感器输出信号通过准静态电荷放大器进行转换、放大,若达到示波器所设置的触发电平,则触发示波器存储传感器输出信号,否则重新激励;将示波器存储的信号进行快速 FFT 变换后,便得到传感器各维度的固有频率。

### 4.2 动态特性分析

图 9(A-1~A-6)为带预紧装置的垫圈式压电六维力传感器在冲击信号激励下  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y$  和  $M_z$  维度的响应曲线;图 9(B-1~B-6)为图 9(A-1~A-6)经过 FFT 变换后得到的幅频率响应曲线,幅值最高峰值点对应的频率值为该维度的固有频率值。表 4 为带预紧安装的垫圈式压电六维力传感器各维度的固有频率实验结果。

由表 4 和图 9 可知,带预紧装置的垫圈式压电六维力传感器  $F_z, M_x, M_y$  和  $M_z$  维度固有频率的实验标定结果与数值仿真结果基本一致; $F_x, F_y, M_z$  维度固有频率一致, $F_z, M_x, M_y$  向固有频率一致;理论分析、数值仿真和实验标定的结论一致。

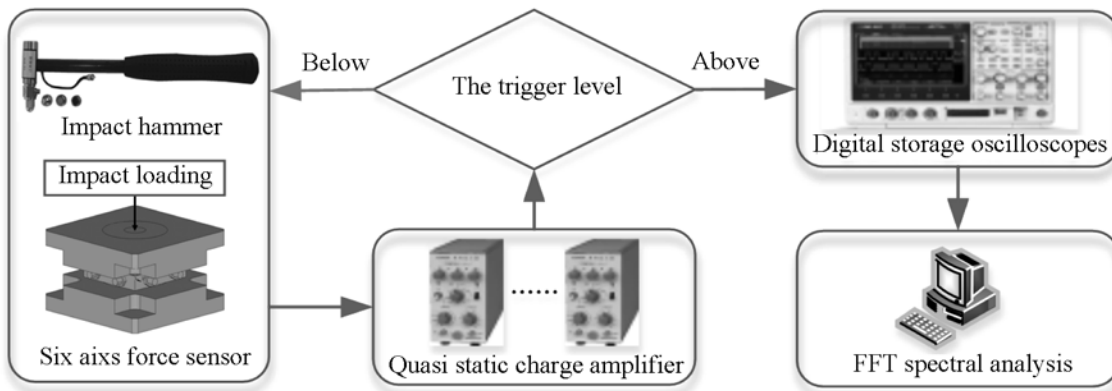


图 8 压电式六维力传感器动态标定原理图

Fig. 8 Dynamic calibration schematic diagram of piezoelectric six-axis force sensor

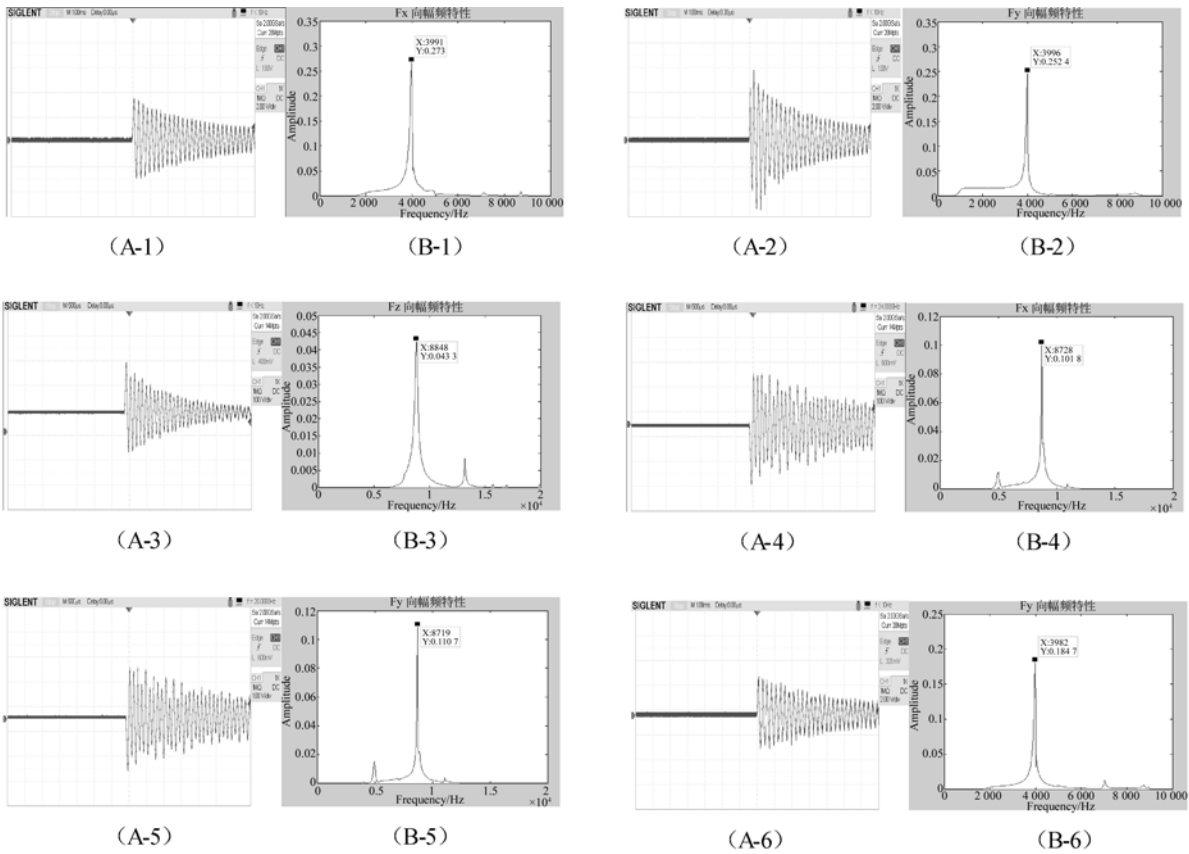


图 9 垫圈式压电六维力传感器动态标定实验结果

Fig. 9 Dynamic calibration experimental results of piezoelectric six axis force sensor

表 4 固有频率的实验结果

Tab. 4 Experimental results of natural frequencies (Hz)

方法	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
实验测试	3 991	3 996	8 848	8 726	8 719	3 982
数值仿真	3 450	3 450	8 178	7 885	7 894	3 450

## 5 结 论

本文针对垫圈式压电式六维力传感器安装测量中动态特性预估和标定的需要,提出了传感器安装固有频率的研究方法,并分析了安装预紧条件下传感器的工作原理和数学模型。然后研究了

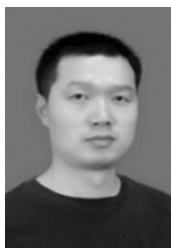
传感器的模态分析方法,模拟得到传感器各维度安装固有频率。最后给出了基于冲击力锤的六维力传感器脉冲激励动态标定法。实验结果证明:基于 ANSYS 的模态分析方法可以实现垫圈式压电六维力传感器安装固有频率的预估;采用脉冲激励法,通过变换垫圈式压电六维力传感器预紧

块的敲击位置,可以实现对传感器的安装固有频率标定,得到各维度的固有频率分别为 3.99、4.00、8.85、8.73、8.72 和 3.98 kHz;垫圈式压电六维力传感器的动态特性优于现有文献研究结果,满足垫圈式压电六维力传感器安装固有频率的预估和标定研究要求。

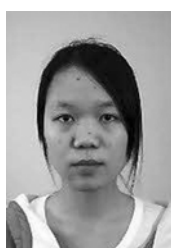
### 参考文献:

- [1] 王栋,余陵,武晓松. 火箭发动机六分力试验系统力学和误差特性[J]. 弹道学报,2009,21(3):23-25,47.  
WANG D, YU L, WU X S. Mechanical and error characteristics of rocket engine thrust vector test system[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(3): 23-25,47. (in Chinese)
- [2] 彭超,史玉杰. XX 型火箭助推鱼雷火箭分离高速风洞试验测力天平研制[J]. 实验流体力学,2006,20(2):82-84,96.  
PENG CH, SHI Y J. Balance development of XX torpedo using the rocket boosting in the separation test of the torpedo and the rocket in high speed wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(2): 82-84,96. (in Chinese)
- [3] 王春洁,曾福明. 弹射座椅动态舒适性与人椅动力学特性研究[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(4):375-378.  
WANG CH J, ZENG F M. Research of human-seat dynamics model and ejection seat dynamic comfort [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(4): 375-378. (in Chinese)
- [4] WEN Y CH, KENNETH J W. Wrench reconstruction by using a six-axis force sensor[J]. *Mech. Mach. Theory.*, 1995, 30(3):383-389.
- [5] 姚建涛,孙锐,李立建,等. 整体预紧式六维力传感器动态特性分析[J]. 仪器仪表学报,2014,35(5):1037-1043.  
YAO J T, SUN K, LI L J, et al.. Dynamic characteristic analysis of pre stressed washer type Stewart structure six-axis force sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1037-1043. (in Chinese)
- [6] PARK Y K, KUMME R, KANG D I. Dynamic investigation of a binocular six-component force-moment sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(8):1311-1318.
- [7] XU K J, LI CH, ZHU ZH N. Dynamic modeling and compensation of robot six-axis wrist force/torque sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(5): 2094-2100.
- [8] LI Y J, WANG G C, ZHANG J, et al.. Dynamic characteristics of piezoelectric six-dimensional heavy force-moment sensor for large-load robotic manipulator [J]. *Measurement*, 2012, 45(5):1114-1125.
- [9] 侯雨雷,曾达幸,姚建涛,等. 超静定并联式六维力传感器动力学[J]. 光学精密工程,2009,17(7):1594-1601.  
HOU Y L, ZENG D X, YAO J T, et al. Dynamics of hyperstatic washer type six component force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 33(6): 898-905. (in Chinese)
- [10] 王志军,姚建涛,王航,等. 并联预紧式六维力传感器动态力响应分析[J]. 机器人,2011,33(4):455-460.  
WANG ZH J, YAO J T, WANG H, et al. Dynamic force response analysis on washer type pre-stressed six-axis force sensor[J]. *Robot*, 2011, 33(4): 455-460. (in Chinese)
- [11] 刘俊,秦岚,李敏,等. 平板式压电六维力/力矩传感器的研制[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1569-1579.  
LIU J, QIN L, LI M, et al.. Development of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1569-1579. (in Chinese)
- [12] LIU J, LI M, QIN L, et al.. Active design method for the static characteristics of a piezoelectric six axis force torque sensor [J]. *Sensors*, 2014, 14(1):659-671.

### 作者简介:



刘俊(1977—),男,四川遂宁人,博士,副研究员,硕士生导师,2005年于重庆大学获得硕士学位,2011年于重庆大学获得博士学位,主要从事多维力、加速度传感技术及精密测量等方面的研究。E-mail: junliu@cqu.edu.cn



杜晶晶(1991—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,2013年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,主要从事六维力、加速度传感器方面的研究。E-mail: dujingjing6693@163.com