

文章编号 1004-924X(2011)07-1569-11

平板式压电六维力/力矩传感器的研制

刘俊*, 秦岚, 李敏, 刘京诚, 薛联

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对弹性体式六维力/力矩传感器存在的技术瓶颈,提出了一种新型平板式压电六维力/力矩传感器。首先,介绍了传感器的结构和工作原理,提出了两种石英晶片组布置方案。然后,推导了两种布置方案的传感器的数学模型,并建立了有限元模型,仿真得到了两种结构传感器输出的电荷灵敏度、维间干扰、固有频率等重要参数,确定了石英晶片组相对合理的布置方式。最后,对传感器进行了静态和动态标定。研究结果表明:传感器结构简单合理、仿真分析方法和数学模型正确,固有频率 >25 kHz,使用退耦矩阵后传感器的维间干扰 $<3\%$,基本满足传感器的设计指标。

关键词:压电传感器;六维传感器;力/力矩传感器;有限元分析

中图分类号:TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111907.1569

Development of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor

LIU Jun*, QIN Lan, LI Min, LIU Jing-cheng, Xue Lian

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

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

Abstract: According to the technological bottleneck of elastic style six-axis force sensors, a novel parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor was proposed. Firstly, the structure and operating principle of the sensor were presented, and two different arrangements of the eight group piezoelectric quartz crystals for the sensor were put forward. Then their mathematic models were derived, the finite element model of sensor was established, and the output charge sensitivity, coupling interference and the natural frequency of the sensor were analyzed by ANSYS software. Finally, the static and dynamic characteristics of the sensor were calibrated. Research results indicate that the sensor has simple and rational structure, correct mathematic model and simulation way. Moreover, its natural frequency is more than 25 kHz and coupling interference is less than 3% after using the decoupling matrix. These results satisfy the requirements of sensor design targets.

Key words: piezoelectric sensor; six-axis sensor; force/torque sensor; finite element analysis

收稿日期:2010-09-06;修订日期:2010-11-10.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20100191110011);2010年度重庆市工业发展基金(产研专项)资助项目(10-CXY-42);中央高校基本科研业务费资助项目(No. CDJXS11122220, CDJXS11121145)

1 引言

空间全力信息(三维正交力(F_x 、 F_y 、 F_z)、力矩(M_x 、 M_y 、 M_z)和力作用点位置信息的获取在火箭发动机推力测试^[1]、火箭助飞武器气动特性测试^[2]、弹射座椅系统重心数据实时获取^[3-4]、机动工具座椅舒适性控制^[5]、机器人操作手^[6-7]等多个领域都发挥着极其重要的作用。但由于没有满足应用条件的六维力传感器,对这些信息的测试仍然采用多传感器组合测量、静态测试结合统计分析^[4]和纯粹数学建模等方法^[5],并且在某些实际工作条件下一直无法实现实时测试数据获取。

特殊的并联结构六维力传感器尤其是多点支撑结构的平板式六维力传感器^[7]可以同时实现对六维力和力作用点位置的测量^[6]。现有的弹性体式六维力传感器存在感知和测量外力信息的弹性体,导致其始终存在弹性体结构复杂程度与解耦难易^[9]、高固有频率与高灵敏度^[10]、弹性体质量大小与耦合程度^[11]等三大矛盾。这些矛盾不同程度影响着多维力传感器性能的进一步提升,制约其应用空间的拓展。为此,研究者开展了传感元件直接感知被测力这种测量原理的非弹性体式六维力传感器的研究,这类六维力传感器选用压电元件作为传感元件,结合多点支撑结构实现六维力的测量,但目前对这种测量方法的报道很少。刘巍等^[12]将压电石英晶片嵌入 Stewart 平台的 6 条腿中,每条腿通过球铰与上下平台相连,但未见其后续相关报道;孙宝元等^[13-14]提出了 4 支点结构,将 4 个三维测力单元均匀分布在同一圆周上并夹装在上下安装平台之间,实现了对大力值的测量,解耦后维间耦合干扰 $<3\%$,固有频率 <5 kHz。上述研究成果很好地克服了现有弹性体式六维力传感器的缺陷,但由于它们的设计具有针对性,故难以直接用于人椅系统重心位置和动态特性的实时测量。

为此,本文针对实时测量动态特性和作用力空间位置信息的需求,结合人椅系统重心位置和动态特性实时测量的潜在运用,提出了 8 点支撑

结构的平板式压电六维力传感器,建立了石英晶片组不同空间布置结构,推导了其数学模型,运用 ANSYS 软件对其静、动态特性进行了仿真,得出了合理的空间布局方式,并通过实验室测试进行了相应的验证,得到了预想的实测结果。

2 传感器的结构与工作原理分析

2.1 工作原理

自 Kistler 公司成功研制出电荷放大器以来,石英晶体以其优越的特性被广泛用于力和加速度的测量^[15]。按照石英晶片结构分类可以将压电式力传感器分为整体式和分列式(也叫平面展开式、阵列式、多点支撑布置结构)两种。整体式是指内部石英晶片为一个完整的圆片或圆环状片,分列式是指若干组小型晶体元件以一定规律均匀排列在力传感器内的晶片布置形式。整体式结构能够减少传感器的截面积,但设计的多维力传感器维数难以大于 3,无法用于做大尺寸传感器,且由于石英晶片为空间堆叠结构,故难以用 MEMS 工艺实现。要采用石英晶片实现四维及多维力/力矩的测量,克服整体式压电力传感器的上述缺点,须采用石英晶片多点支撑布置的形式。

为了提高文献^[13]设计方案中传感器的刚度,进一步简化文献^[16]中传感器的结构,本文提出了 8 点支撑分布结构。8 组石英晶片组均匀分布在同一平面上,4 组 $Y(0^\circ)$ 切型石英晶片组分布在 X 、 Y 轴与圆周的交点上,承担对 F_x 、 F_y 和 M_z 3 个参量的测量;4 组 $X(0^\circ)$ 切型石英晶片组分布在其它 4 个位置,承担对参量 F_z 、 M_x 和 M_y 的测量;每组石英晶片组对应输出一路信号,对这 8 路信号进行预处理后得到 6 路信号,6 路信号经过退耦矩阵运算后得到被测量点位置信息。

整个传感器主要由盖子、石英晶片组、信号输出电极、绝缘填充剂和基座组成。基座和盖子均属于一次加工成型,在施加适当预应力后,运用电子束焊接技术将盖子和基座焊接在一起;绝缘填充剂是为了保证传感器内部信号传输线之间的高绝缘性;石英晶片组夹装在盖子和基座之间,且均匀分布在晶片安装凸台上。

2.2 传感元件的空间布置

石英晶片组的合理布置是平板式压电六维力传感器设计的关键之一,也是降低传感器各向载荷间相互干扰和提高传感器性能指标的有效途径。传感器空间布置根据对称性和解耦的要求采用空间 8 点均布的形式,主要有圆形布置(图 1(a)所示)和正方形布置两种(图 2(b)所示)。

为了保证传感器各维的相互干扰较小,石英晶片选用圆形,且石英晶片组各自的局部坐标严格按图 1(a)或(b)中箭头的方向布局,尺寸和预载荷相同、位置均布。

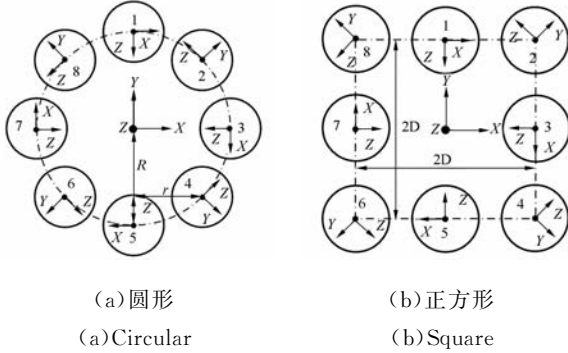


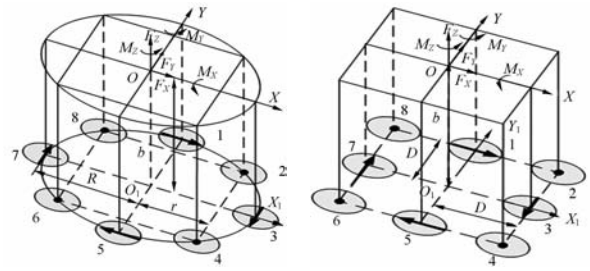
图 1 石英晶片组空间布置

Fig.1 Arrangements of piezoelectric quartz crystals

2.3 力学模型

为了简化分析,当被测力/力矩作用在传感器上时,对传感器的受力做如下假设:相同石英晶片组刚度、灵敏度相同,呈对称均匀分布;传感器盖子为刚体,各向刚度、灵敏度相等且均匀分布;力 F_z , 力矩 M_x 和 M_y 在石英晶片组之间按杠杆原则分布;力 F_x, F_y , 力矩 M_z 在石英晶片组之间平均分配。

图 2 是 2 种石英晶片组布置形式下的传感器结构简图,(a)中石英晶片组分布的圆周半径为 R ,4 组 $X(0^\circ)$ 切型石英晶片组分布在边长为 $\sqrt{2}R$ 的正方形 4 个角上,即与传感器的几何中心的距离 r 为 $\sqrt{2}R/2$;(b)中石英晶片组分布的正方形边长为 $2D$;传感器的力作用点与石英晶片表面的距离为 $b, M_x(M_y)$ 对 $F_y(F_x)$ 产生的耦合力臂系数为 $a, O-XYZ$ 为被测力作用点的坐标系, $O_1-X_1Y_1Z_1$ 是压电石英晶片的安装布局位置坐标系;设被测外力/力矩分别为 f_x, f_y, f_z, m_x, m_y 和 m_z , 石英晶片组响应输出为 F_x, F_y, F_z, M_x, M_y 和 M_z 。



(a) 圆形布局 (b) 方形布局
(a) Circular layout (b) Square layout

图 2 传感器结构简图

Fig.2 Schematic diagram of sensors

结合 8 点支撑结构,根据空间力系的平衡原理,六维力输出信号可以由传感器的 8 路输出响应信号计算得到:

$$\begin{cases} F_x = F_{Y_5} - F_{Y_1} \\ F_y = F_{Y_3} - F_{Y_7} \\ F_z = F_{Z_2} + F_{Z_4} + F_{Z_6} + F_{Z_8} \\ M_x = [(F_{Z_2} + F_{Z_8}) - (F_{Z_4} + F_{Z_6})] \times r \\ M_y = [(F_{Z_6} + F_{Z_8}) - (F_{Z_2} + F_{Z_4})] \times r \\ M_z = (F_{X_1} + F_{X_3} + F_{X_5} + F_{X_7}) \times R \end{cases} \quad (1)$$

当外力/力矩作用在传感器盖子上表面的中心上时,则圆形空间布置的石英晶片组上的分力可用如下数学关系式表示:

$$\begin{cases} F_{X_1} = -f_x/8 + m_z/8R + m_y/a \\ F_{Y_3} = f_y/8 + m_z/8R + m_x/a \\ F_{X_5} = f_x/8 + m_z/8R - m_y/a \\ F_{Y_7} = -f_y/8 + m_z/8R - m_x/a \\ F_{Z_2} = f_z/8 + [-f_y b/8 - f_x b/8 + m_x/6 - m_y/6]/r \\ F_{Z_4} = f_z/8 + [f_y b/8 - f_x b/8 - m_x/6 - m_y/6]/r \\ F_{Z_6} = f_z/8 + [f_y b/8 + f_x b/8 - m_x/6 + m_y/6]/r \\ F_{Z_8} = f_z/8 + [f_y b/8 + f_x b/8 + m_x/6 + m_y/6]/r \end{cases} \quad (2)$$

由于实际中上述假设条件不能完全满足,故需要引入 $k_{f_x}, k_{f_y}, k_{f_z}, k_{m_x}, k_{m_y}$ 和 k_{m_z} 等载荷传递效率(比例)的概念,这些参数由传感器的结构、石英晶片组的布置形式、数量和制作工艺水平决定。将石英晶片看成是一块薄的平行板电容器,依据式 $C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d$ (其中 ϵ_r 为石英的相对介电常数, $X(0^\circ)$ 切型石英晶片取 4.52, $Y(0^\circ)$ 石英晶片取

4.68, d 为石英晶片厚度, ϵ_0 为介电常数) 和 $Q=CU$, 结合压电系数矩阵和式(1)和(2)可以得到传感器的 6 路电荷和 6 路电势差输出数学表达式(3)和(4)。对于正方形空间布局的石英晶片组而言, 式(1)~(4)中的 $r=R=D$ 。

$$\begin{cases} Q_{F_X} = (f_X/4 - 2m_Y/a)k_{f_X}d_{26} \\ Q_{F_Y} = (f_Y/4 + 2m_X/a)k_{f_Y}d_{26} \\ Q_{F_Z} = f_Zk_{f_Z}d_{11}/2 \\ Q_{M_X} = (2m_X/3 - f_Yb/2)k_{m_X}d_{11}/r \\ Q_{M_Y} = (2m_Y/3 + f_Xb/2)k_{m_Y}d_{11}/r \\ Q_{M_Z} = m_Zk_{m_Z}d_{26}/2R \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{F_X} = (f_X/4 - 2m_Y/a)k_{f_X}d_{26}d/4.68\epsilon_0 S \\ U_{F_Y} = (f_Y/4 + 2m_X/a)k_{f_Y}d_{26}d/4.68\epsilon_0 S \\ U_{F_Z} = f_Zk_{f_Z}d_{11}/9.04\epsilon_0 S \\ U_{M_X} = (2m_X/3 - f_Yb/2)k_{m_X}d_{11}/4.52\epsilon_0 Sr \\ U_{M_Y} = (2m_Y/3 + f_Xb/2)k_{m_Y}d_{11}/4.52\epsilon_0 Sr \\ U_{M_Z} = m_Zk_{m_Z}d_{26}/9.36\epsilon_0 SR \end{cases} \quad (4)$$

3 传感器的仿真实验

根据传感器的研制指标要求(力的测量范围都为 0~1 000 N, 力矩的测量范围都为 0~100 N·m, 固有频率 ≥ 10 kHz、解耦后的维间耦合 $\leq 5\%$), 结合传感器尺寸紧凑的设计思路, 2 种石英晶片组布置形式的传感器主要部件的主要结构尺寸见表 1。

表 1 传感器模型参数

Tab. 1 Parameter of sensor's model (mm)

部件名称	圆形布置			正方形布置		
	厚度	半径	环半径	厚度	边长	环半径
石英晶片	1	5		1	5	
盖子凸台	6		12	6		20
壳体凸台	6		12	6		20
壳体侧壁	2			2		
壳体底壁	1			1		
内弹性膜	0.25		2	0.25		2
外弹性膜	0.25		2.5	0.25		2.5
晶片位置		15			34	

3.1 FEM 建模

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。在进行有限元建模过程中, 首先运用 Solidwork2006 建立传感器的结构模型, 然后将模型导入 ANSYS 中, 选用耦合单元 Solid98 作为石英晶体的单元类型, 并且输入石英晶体材料的压电系数, 弹性系数和介电常数矩阵, 同时按照图 1(a)或(b)中石英晶片组的布局要求为每一组晶片组建立局部坐标系, 选用映射方式划分网格。其它部件材料选用不锈钢, $E_X=2 \times 10^{11}$ Pa, $\mu=0.3$, 单元类型选用 Solid95, 对这些结构采用手动控制等份数和自由网格划分相结合的方式划分网格, 得到传感器结构的有限元模型。

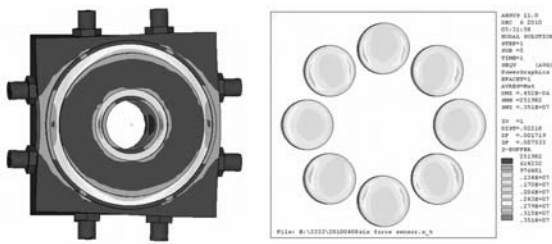
3.2 载荷施加与求解

载荷施加主要包括约束, 集中力/力矩载荷加载两部分工作, 在进行约束设置时, 完全按照传感器安装状态进行相应设置, 通过盖子的断面施加预紧力, 基座的安装面的自由度均设为 0。同时, 为了去除实际中预紧装置的影响, 研究本传感器在理想工作状态下的特性, 特将传感器盖子上表面、石英晶片和石英晶片安装面之间的接触状态设为始终绑定状态。

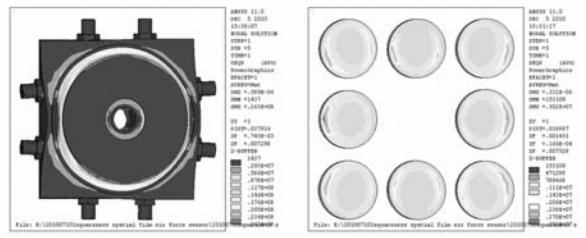
为了模拟理想的集中力/力矩载荷加载情况, 通过建立在 Z 轴上且与传感器盖子的上表面同平面上的关键点施加外载荷, 关键点与盖子上表面形成刚性区。分别在 F_X, F_Y, F_Z 3 个方向单独施加 0~1 000 N 的外力, 在 M_X, M_Y, M_Z 3 个方向单独施加 0~100 N·m 的力矩, 然后分别进行求解, 通过应力、电势差、应变云图、模态分析、谐响分析等指标对比研究 2 种石英晶片组布置形式的传感器的特性。

3.3 静态特性仿真分析

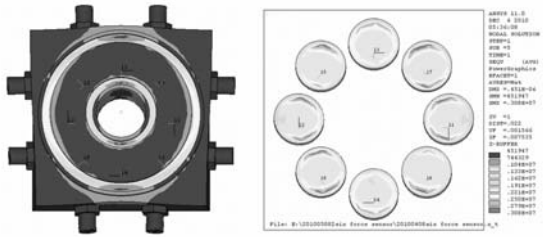
由于 ANSYS 耦合场分析得到的是传感器各组石英晶片面上的电势差, 要得到传感器的电荷灵敏度可以通过式(3)~(4)转换。图 3(a)、(b)和图 4(a)、(b)分别给出了石英晶片组圆形布置形式和正方形布置形式的传感器在 $F_X=1 000$ N, $F_Y=1 000$ N 作用下传感器本身和石英晶片组的应变云图, 图 4(c)、(d)和图 5(c)、(d)分别给出了 2 种晶片布局结构传感器未解耦前的力-电荷输入/输出曲线; 仿真结果显示 1, 5 和 3, 7 位置的



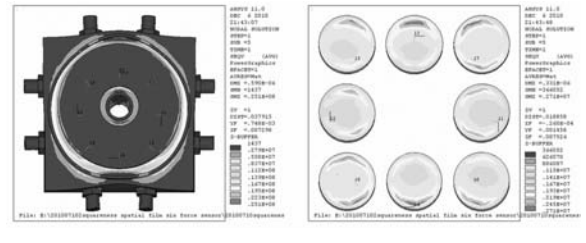
(a) F_X 向应变云图
(a) Strain contour of F_X



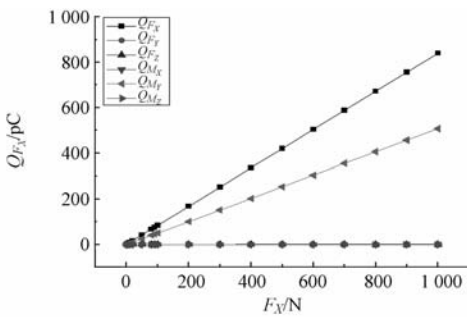
(a) F_X 向应变云图
(a) Strain contour of F_X



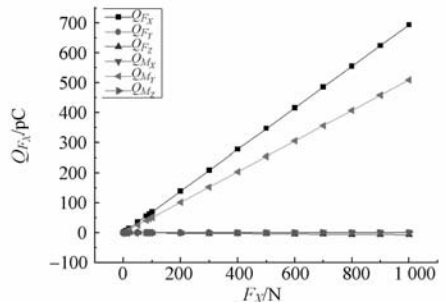
(b) F_Y 向应变云图
(b) Strain contour of F_Y



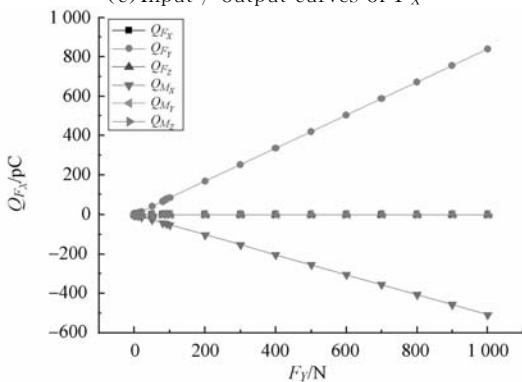
(b) F_Y 向应变云图
(b) Strain contour of F_Y



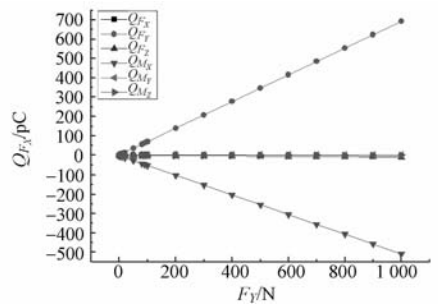
(c) F_X 向输入/输出曲线
(c) Input / output curves of F_X



(c) F_X 向输入/输出曲线
(c) Input/output curves of F_X



(d) F_Y 向输入/输出曲线
(d) Input / output curves of F_Y



(d) F_Y 向输入/输出曲线
(d) Input/output curves of F_Y

图 3 石英晶片圆形布局结构传感器部分输入输出特性

Fig. 3 Input and output characteristics of quartz sensor with square layout

图 4 石英晶片方形布局结构传感器部分输入输出特性

Fig. 4 Input and output characteristics of quartz sensor with square layout

石英晶片分别对 F_x, F_y 的响应灵敏度最高。表 2,3 分别是石英晶片组圆形/正方形布置形式的传感器未解耦前电荷灵敏度和维间干扰仿真结果,表中力灵敏度单位为 pC/N ,力矩灵敏度为单位为 $\text{pC/N} \cdot \text{m}$ 。

根据式(3)~(4)结合表 1 的数据可知,传感器的维间干扰理论上还出现在 $F_x(F_y)$ 对 $M_y(M_x)$,附加在传感器上的最大耦合力矩约为 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$,产生的耦合误差较小,故未给出其它 4 个方向的输入/输出力电荷曲线。

表 2 圆形结构仿真分析结果

Tab. 2 Simulation results of circular structure

向别	灵敏度	维间干扰(%)					
		F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	0.84	—	0.04	-0.03	0.15	60.43	0.00
F_y	0.84	0.02	—	0.03	60.5	0.11	0.01
F_z	1.14	0.00	0.00	—	-0.03	-0.02	0.00
M_x	100.75	0.01	1.98	-0.02	—	0.02	0.00
M_y	100.75	-1.98	0.00	-0.03	0.01	—	0.00
M_z	66.45	0.00	0.00	-0.22	0.01	-0.02	—

表 3 正方形结构仿真分析结果

Tab. 3 Simulation results of square structure

向别	灵敏度	维间干扰(%)					
		F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	0.69	—	0.00	-1.09	0.24	73.39	0.01
F_y	0.69	-0.05	—	-1.09	-73.43	0.25	0.02
F_z	1.10	0.00	-0.01	—	0.00	0.01	0.00
M_x	114.63	0	2.71	-0.08	—	0.04	0.00
M_y	114.60	-2.71	0	-0.07	-0.04	—	0.01
M_z	46.31	0.00	0.01	-0.57	0	-0.02	—

从表 2,3 可知,石英晶片组圆形布置结构六维力传感器在 F_x, F_y, F_z, M_z 向灵敏度优于正方形布置结构,圆形结构 M_x, M_y 向的灵敏度略低于正方形结构;在使用退耦矩阵前,圆形布置结构的维间干扰程度优于正方形布置结构,其中 $M_y(M_x)$ 向对 $F_x(F_y)$ 向的影响最大,圆形结构的维间干扰高达 60.5%,正方形结构的维间干扰高达 73.43%。

3.4 动态特性仿真分析

固有频率和振型是传感器动态特性中的重要参数,运用 ANSYS 对传感器实施模态分析可以判断传感器的固有频率和振型,其一阶振动频率

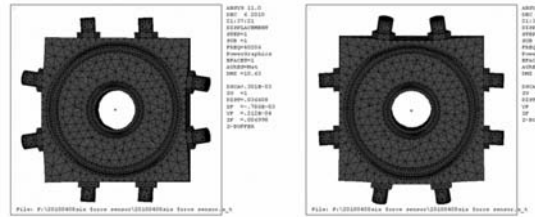
的 2/3 可作为传感器的固有频率^[17]。在 Z 向预应力条件下仿真结果见表 4。

表 4 六维力传感器振动频率的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of vibrating frequencies of six-axis force sensors

阶次	石英晶片布置方式	
	圆形	正方形
1	40 206	38 148
2	40 225	38 152
3	46 662	44 083
4	47 050	46 835
5	48 247	47 972
6	48 270	48 161

石英晶片组圆形布置结构的六维力传感器一阶到六阶振动频率分别为 40 206,40 225,46 662,

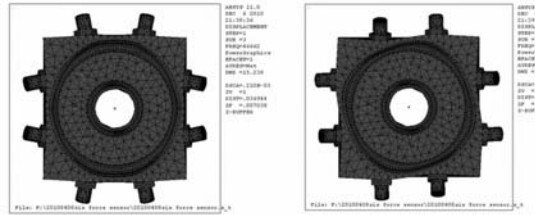


(a)一阶振型

(b)二阶振型

(a)First mode

(b) Second mode

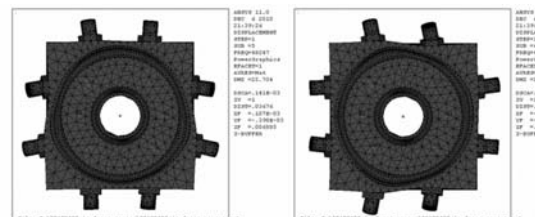


(c)三阶振型

(d)四阶振型

(c)Third mode

(d)Forth mode



(e)五阶振型

(f)六阶振型

(e)Fifth mode

(f)Sixth mode

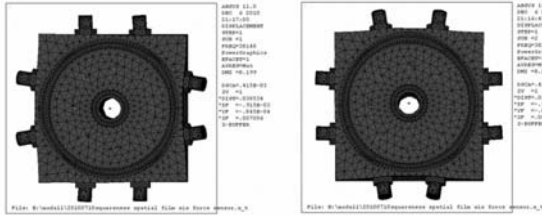
图 5 石英晶片圆形布局结构传感器振型图

Fig. 5 Mode shapes of quartz sensor with circular layout

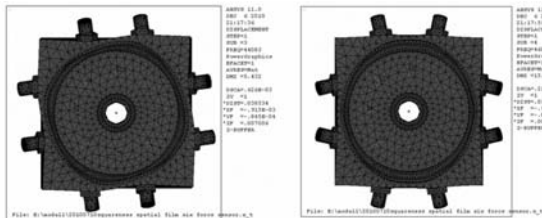
47 050,48 247,48 270 Hz,传感器的固有频率约为 26.8 kHz,如图 5 所示;正方形布置结构的一阶到六阶振动频率分别为 38 148, 38 152, 44 083,46 835,47 972,48 161 Hz,传感器固有频率约为 25.4 kHz,如图 6 所示。

由表 4 可知圆形布置传感器的固有频率约为 26.8 kHz,正方形约为 25.4 kHz。振型图如图 6,7 所示。

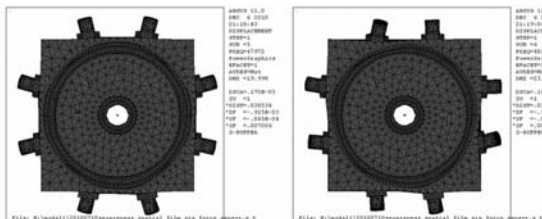
基于以上结果可作如下结论:石英晶片组不同的布置方式会影响传感器测量的灵敏度、维间干扰和固有频率等重要特性;布局在应力集中区域越趋于对称越集中,测量结果则越好,维间干扰越小,固有频率越高;圆形布置结构比正方形布置结构更为合理,测量结果也更为准确。



(a)一阶振型 (a)First mode (b)二阶振型 (b) Second mode



(c)三阶振型 (c)Third mode (d)四阶振型 (d)Forth mode



(e)五阶振型 (e)Fifth mode (f)六阶振型 (f)Sixth mode

图 6 石英晶片方形布局结构传感器振型图

Fig. 6 Mode shapes of quartz sensor with square layout

4 标定实验

为了证实上述研究结论的正确性,本课题组依据上述仿真参数研制了石英晶片圆形布局结构平板式压电六维力传感器样机(如图 7 所示),传感器壳体材料采用柔韧性好、迟滞性小的 1Cr18 Ni9Ti。

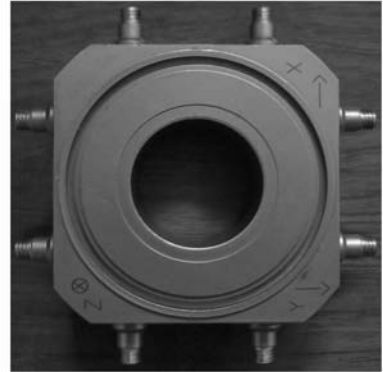


图 7 六维力/力矩传感器照片

Fig. 7 Photograph of 6-axis force/torque piezoelectric sensor

4.1 静态标定

对平板式压电六维力传感器的静态标定采用“逐级加/卸载法”,分别施加 6 个单维力/力矩进行六维力标定,图 8 是静态标定的系统原理图。该系统主要由多维力/力矩加载设备、8 通道 YE5850A 型准静态电荷放大器、自制 8 路转 6 路预处理电路、美国 NI 公司 PCI-6259 高速数据采集卡和基于 LabView 和 Matlab 软件平台开发的标定软件组成,选用聚四氟乙烯高绝缘电缆作为

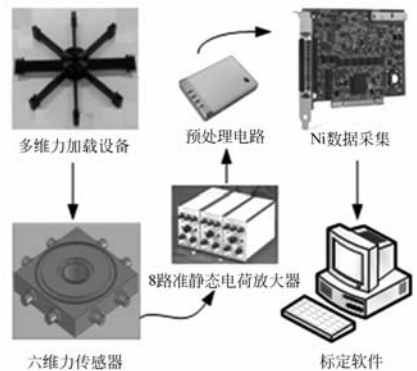


图 8 静态标定系统原理图

Fig. 8 Block diagram of static calibration system

信号传输电缆。为了保证静态标定的准确性,静态标定时采用间隔采样方式对 6 路输入信号进行“并行”采样,实验表明每个通道的被采样信号频率高于 13 kHz,基本满足实验的要求。

根据传感器在 $f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z$ 分别为

$$\begin{bmatrix} 1.237\ 9 & -0.000\ 2 & 0.000\ 0 & 0.000\ 1 & 0.025\ 3 & 0.000\ 0 \\ -0.000\ 4 & 1.238\ 2 & -0.000\ 0 & -0.025\ 3 & -0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 1 & -0.000\ 2 & 0.902\ 4 & 0.000\ 2 & -0.000\ 3 & 0.002\ 0 \\ -0.000\ 0 & 0.006\ 2 & 0.000\ 0 & 0.010\ 7 & -0.000\ 0 & -0.000\ 0 \\ -0.006\ 2 & -0.000\ 0 & 0.000\ 0 & -0.000\ 0 & 0.010\ 7 & 0.000\ 0 \\ -0.000\ 0 & -0.000\ 0 & -0.000\ 0 & 0.000\ 0 & -0.0000 & 0.015\ 8 \end{bmatrix}$$

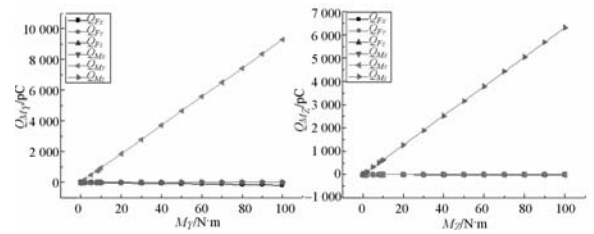
矩阵中对角元素表示传感器退耦前力/力矩电荷灵敏度,其余剩余元素与主对角元素的比值百分比为维间耦合误差。测试结果如表 5 所示,图9(a)~(f)是石英晶片圆形布局结构传感器各

表 5 静态标定结果

Tab. 5 Results of static calibration

向别	灵敏度	维间干扰(%)					
		F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
F_X	0.8	—	0.04	-0.03	0.02	58.5	0.00
F_Y	0.8	0.02	—	0.03	-58.6	0.11	0.01
F_Z	1.1	0.00	0.00	—	-0.02	0.04	0.01
M_X	92.7	-0.01	2.05	-0.02	—	0.02	0.00
M_Y	92.7	-2.05	0.00	-0.03	0.01	—	0.00
M_Z	63.1	0.00	-0.00	-0.22	0.01	-0.01	—

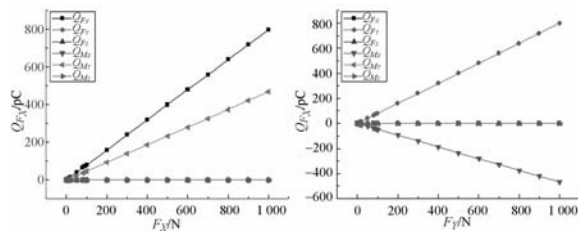
1 N 或 1 N·m 作用下的输出电荷,结合式(1)可构建 6×6 方阵 Q_{ij} 。根据式 $C_{ij} = [(Q_{ij})^T]^{-1}$ 可以得到平板式压电六维力传感器的退耦矩阵如下:(矩阵中的数据 0,只表示该数据小数点后 4 位前都等于 0,并不表示该数值一定等于 0。)



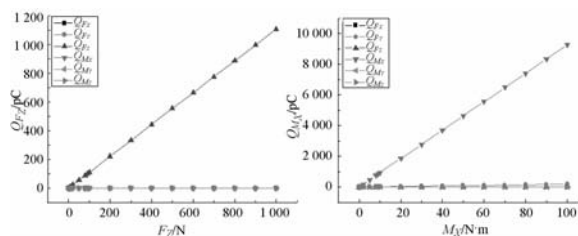
(e) M_Y 向输入/出曲线 (f) M_Z 向输入/出曲线
(e)Input/output curves of M_Y (f)Input/output curves of M_Z

图 9 石英晶片圆形布局结构传感器输入/出力-电荷曲线

Fig. 9 Input and output force/torque-charge characteristics of quartz sensor with circular layout



(a) F_X 向输入/出曲线 (b) F_Y 向输入/出曲线
(a)Input/output curves of F_X (b)Input/output curves of F_Y



(c) F_Z 向输入/出曲线 (d) M_X 向输入/出曲线
(c)Input/output curves of F_Z (d)Input/output curves of M_X

维输入输出力/力矩-电荷曲线。由于传感器制作工艺的影响,传感器的输出灵敏度均有所下降,但同时也降低了 $M_X(M_Y)$ 对 $F_Y(F_X)$ 的维间干扰。

设六维力传感器 8 路输出信号经预处理电路后的 6×1 电压输出响应矩阵为 U_{i1} ,传感器解耦后的被测力/力矩矩阵根据式 $f_{i1} = C_{ij} C_f U_{i1}$ 得到 (C_f 为准静态电荷放大器的档位)。

4.2 动态标定

平板式压电六维力传感器的主要特性都与其固有频率有关,与输入信号无关,试验中校准传感器的动态特性采用传统的冲击响应法,图 10 是动态标定系统的原理框图。整个动态标定实验系统与静态标定系统的主要区别在于:将多维力/力矩加载设备换成了淬火钢球,标定软件中采用单通道“串行”采集的方式。由式(1)可知, M_Z 方向的动态特性与 F_X, F_Y 方向的动态特性直接相关,

M_X 和 M_Y 方向的动态特性一致,且与 F_Z 方向的动态特性直接相关,故对动态特性的研究只需研究 F_X, F_Y, F_Z 3 个力方向的动态特性即可^[13]。

图 12~14 是传感器在 F_Z 向预应力条件下, F_X, F_Y, F_Z 3 个方向上的幅频响应特性曲线,曲线显示传感器在 X, Y, Z 3 个方向的固有频率分别约为 27, 27, 54 kHz, 与仿真结论一致,满足设计要求。

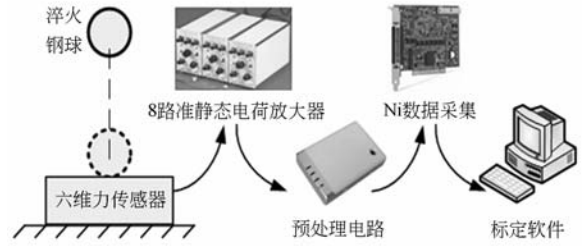
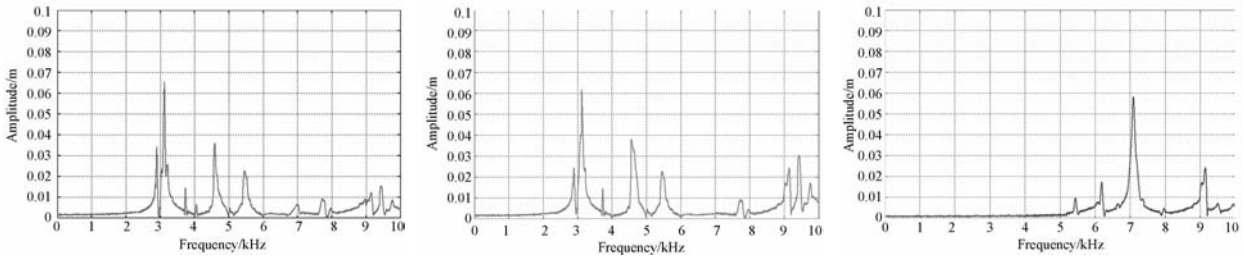


图 10 动态标定系统原理图

Fig. 10 Block diagram of dynamic calibration system



(a) F_X 向的动态标这

(b) F_Y 向的动态标这

(c) F_Z 向的动态标这

(a) Result of F_X dynamic calibration

(b) Result of F_Y dynamic calibration

(c) Result of F_Z dynamic calibration

图 11 预紧力 F_Z 向的频率响应曲线特性

Fig. 11 Curves of frequency response characteristic with preload F_Z

5 结论

本文提出了一种新型平板式压电六维力/力矩传感器,运用 Solidwork 软件建立了石英晶片组圆形布置和正方形布置的两种传感器的物理模型,推导了它们的静态数学模型,采用 ANSYS 对它们的静、动态性能进行了对比仿真实验研究,根据得到的结论研制了石英晶片组圆形分布的平板

式压电六维力传感器,并对其静态特性和动态特性进行了实验测试。研究表明:传感器结构满足设计要求,仿真分析方法和数学模型正确、固有频率 > 25 kHz、使用退耦矩阵后传感器的维间干扰 $< 3\%$ 。由于其内部石英晶片组平面分布,故而该方案亦适合研制基于 MEMS 工艺微六维力/力矩传感器^[18],但 F_X, F_Y 和 F_Z 向灵敏度较低,还需要进一步对传感器的结构展开深入研究,以期进一步提高其性能。

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 型火箭助推鱼雷雷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座椅动力学特性研究[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] 孙明照,吴铭,苏迅,等. 飞行员人体参数与人椅组

- 合重心的回归分析研究[J]. 人类工效学, 2005, 11(2):23-25.
- SUN ZH M, WU M, SU X, *et al.*. The regression analysis of pilot dimensions and combined gravity center of pilot-seat system[J]. *Chinese Ergonomics*, 2005, 11(2):23-25. (in Chinese)
- [5] 李宝峰, 薛红军, 宋笔锋. 基于 SIMULINK 的弹射救生人椅系统六自由度仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(6):1379-1382.
- LI B F, XUE H J, SONG B F, *et al.*. 6-DOF trajectory simulation of ejection seat and occupant system with SIMULINK[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(6):1379-1382. (in Chinese)
- [6] CHUNG W Y, WALDRON K J. Wrench reconstruction by using a six-axis force sensor[J]. *Mech. Mach. Theory*, 1995, 30(3):383-389.
- [7] LUO M H, MASANORI I, ETSURO S, *et al.*. Development of a six-axis force/tactile sensor for robot finger by employing spring beams[C]. *Industrial Electronics Society*, 2003, *IECON'03, The 29th Annual Conference of the IEEE*, 2-6 November, 2003, 2:1505-1510.
- [8] 韩壮志, 王田苗, 张玉茹, 等. 基于指端 6 维力传感器的接触点测量算法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(5):400-404.
- HAN ZH ZH, WANG T M, ZHANG Y R, *et al.*. Selection of calculation model for contact sensing of robot hand using force/torque measurement [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(5):400-404. (in Chinese)
- [9] 张为公. 一种六维力传感器的新型布片和解耦方法[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(2):221-222.
- ZHANG W G. A new distributing and decoupling method of six degree of freedom force sensors[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1999, 31(2):221-222. (in Chinese)
- [10] CHAO L P, CHEN K T. Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, 63(2):105-112.
- [11] 吴宝元, 吴仲城, 申飞. 多维加速度场中六维力传感器惯性耦合特性研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(10):1686-1690.
- WU B Y, WU ZH CH, SHEN F. Study on inertia coupling characteristics of 6-Axis force sensor in multi-dimensional acceleration field [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2008, 21(10):1686-1690. (in Chinese)
- [12] 刘巍, 林盛, 贾振元, 等. 压电式六维大力传感器: 中国, No. 200710157931. 2[P]. 2008-03-26; 1-8.
- LIU W, LING SH, JIA ZH Y, *et al.*. Piezoelectric six axis heavy force sensor; China, No. 200710157931. 2[P]. 2008-03-26; 1-8. (in Chinese)
- [13] LI Y J, SUN B Y, ZHAN J, *et al.*. A novel parallel piezoelectric six-axis heavy force/torque sensor [J]. *Measurement*, 2009, 42(5):730-736.
- [14] 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(6):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(6):73-77. (in Chinese)
- [15] 刘俊, 秦岚, 刘京诚, 等. 一种新型差动式压电加速度传感器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):903-909.
- LIU J, QIN L, LIU J CH, *et al.*. A novel differential accelerating sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):903-909. (in Chinese)
- [16] 刘俊, 秦岚, 刘京诚, 等. 一种平板式压电六维力传感器: 中国, ZL200810069720. 8[P].
- LIU J, QIN L, LIU J C, *et al.*. A parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor; China, ZL200810069720. 8[P]. (in Chinese)
- [17] SONG A G, WU J, QIN G, *et al.*. A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor[C]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, November/December, 2007, 40(9-10):883-891.
- [18] NEMIROVSKY Y, NEMIROVSKY A Z, MURALT P, *et al.*. Design of a novel thin film piezoelectric accelerometer [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, (56):239-249.

作者简介:



刘俊(1977—),男,四川遂宁人,博士研究生,2002年、2005年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为多维力(加速度)传感器技术和太阳光照明技术。E-mail:junliu@cqu.edu.cn



薛联(1968—),女,云南石屏人,博士研究生,副教授,1991年、2003年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光电精密测试技术及系统。E-mail:xuelian@cqu.edu.cn



李敏(1978—),女,四川遂宁人,博士研究生,讲师,2002年、2008年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为多维力(加速度)传感器标定技术和太阳光照明技术。E-mail:limin780815@163.com

导师简介:



秦岚(1966—),男,重庆合川人,教授,博士生导师,1988年、1990年、1994年于重庆大学分别获得学士、硕士及博士学位,主要研究方向为光电精密测量与控制的理论与方法。E-mail:qinlan@cqu.edu.cn



刘京诚(1962—),男,湖南安化人,教授,1988年、1995年、2003年于重庆大学分别获得学士、硕士及博士学位,主要研究方向为多维力(加速度)传感器技术和动态检测技术。E-mail:jcliu@cqu.edu.cn

● 下期预告

单站光电雷达三维姿态测量

王晓明^{1,2}, 乔彦峰¹, 宋立维¹, 王守印¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

利用光学跟踪测量技术在三维空间中对飞行目标进行姿态测量是当代武器系统对测量领域提出的新要求,而利用传统的光电经纬仪多站交汇测量方法对仪器的测量精度要求很高,而且实时数据处理难度很大,并且受到光学测量设备布站的极大限制。为充分发挥高精度光学测角性能和高精度雷达测距性能,应用在光电经纬仪上加装测距雷达的方法搭建了光电雷达三维姿态测量系统,不仅能够实现对目标的单站定位、实时获取其三维姿态信息,还能增加仪器布站灵活性并提高三维姿态测量精度。依据选取的三维姿态解算算法确定系统的关键技术指标后,计算系统对模拟目标的作用距离,分析其三维姿态测量精度,分析结果表明:系统对模拟目标的作用距离不小于60 km,实时三维姿态测量总误差不大于 $120'$ 。利用外场现有仪器的校飞试验来进行单站三维姿态解算实验,实验结果表明:利用单站光电雷达一体化测量系统来测量飞行目标的三维姿态信息方法切实可行,解算数据真实可靠。