

文章编号:1000-582X(2011)02-101-07

## 平板式压电四维力/力矩传感器的研究与开发

刘俊, 秦岚, 刘京诚, 李敏, 薛联

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对弹性体式多维腕力传感器存在的瓶颈矛盾,提出了一种新型平板式压电四维力/力矩传感器。介绍了传感器的结构和工作原理,讨论了石英晶片组的选型和空间分布形式。推导出了传感器的数学模型,建立了传感器的有限元模型,并加工出了传感器实物。得到了传感器力/力矩输入与电压输出之间的关系曲线、电压灵敏度、电荷灵敏度、维间干扰等重要指标。结果表明:传感器结构简单合理、数学模型正确、加工工艺性好、线性度好、刚度高、固有频率大于 30 kHz、未使用退耦矩阵时的维间干扰小于 3%。满足传感器的设计指标。

**关键词:**压电传感器;力/力矩传感器;有限元;四维

**中图分类号:**TH71

**文献标志码:**A

### Research and development of a parallel piezoelectric 4-axis force/torque sensor

LIU Jun, QIN Lan, LIU Jing-cheng, LI Min, XUE Lian

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

**Abstract:** This paper proposed a novel parallel piezoelectric four-axis force/torque sensor based on the bottleneck contradictions of elastic style multi-axis wrist force sensor, It introduces the sensor's structure and operating principle and discussed the selection and spatial layout of piezoelectric quartz wafer group. Then it derives the mathematic model of the sensor. The finite element model of the sensor is established, and the prototype of the sensor is manufactured. Finally, it obtains the input and output curve, voltage sensitivity, charge sensitivity and the coupling interference. The results indicate that the sensor has advantages of simple and rational structure, correct mathematic model, nice manufacturability, good linearity, good rigidity, and natural frequency greater than 30 kHz, less than 3% of the interference error without decoupling matrix. These can meet the requirements of sensor design.

**Key words:** piezoelectric sensor; force/torque sensor; finite element; four-axis

收稿日期:2010-09-18

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100191110011);重庆市 2010 年工业发展专项资金资助项目;  
中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11122220, CDJXS11121145)

作者简介:刘俊(1977-),男,重庆大学博士研究生,主要研究方向为机器人多维力/加速度传感技术研究;  
(Tel)023-65105590, (E-mail)junliu@cqu.edu.cn。

机器人多维腕力传感器是机器人实现智能化和灵巧化、提高机器人运动稳定性和准确性的最重要的传感器之一,它安装在机器人手腕、脚腕、腰部等许多关键部位,要求其具有高刚度、高灵敏度、小维间耦合、薄厚度、轻质量的特点,目前主要有四维<sup>[1-2]</sup>和六维<sup>[3]</sup>两类腕力传感器。现有的多维腕力传感器都通过安装在弹性体上的传感元件(以应变片/电阻等为主)检测因被测力而产生变形的弹性体的形变量来间接测量外力信息,由于这种感知和测量外力信息的弹性体存在,导致其存在如下瓶颈矛盾问题:1)弹性体结构复杂程度与解耦之间的矛盾问题<sup>[4]</sup>。简化结构,难以布片和消除耦合,不能直接输出六维力信号,带来传感器标定和解耦计算上的复杂、烦琐,尤其难以满足实时计算处理的需求。为消除耦合弹性体结构设计复杂,应变片数目多,贴片和组成电桥工作量大,容易引入误差,影响传感器的测量精度;2)高固有频率与高灵敏度之间的矛盾问题<sup>[5]</sup>。提高灵敏度,将降低刚度,也就会降低传感器的固有频率、工作频带和测量范围,反之亦然;3)弹性体质量大小与解耦难易程度的矛盾问题<sup>[6]</sup>。由于弹性体质量的存在,当这类传感器被用在加速度场中时,附加惯性力的作用会产生额外的输出,这必将增加传感器的解耦难度。这些瓶颈问题在不同程度影响了传感器性能的进一步提升,制约着多维力传感器应用空间的拓展。为此,研究者开始了对直接感知被测力这种测量原理的非弹性体式多维力传感器的研究,这种传感器选用压电元件作为传感元件。如刘巍等<sup>[7]</sup>将压电石英晶片嵌入 Stewart 平台的 6 条腿内部,每条腿通过球铰与上下平台相连;孙宝元等<sup>[8]</sup>针对大力值测量的需要,将 4 个三维压电力传感器均匀分布在同一圆周上并集成在上下安装平台之间,实现了六维力测量的需要。上述研究成果虽然很好地克服了现有多维力传感器的瓶颈矛盾,但它们的尺寸大、耦合较严重、固有频率不高。

针对腕力传感器的特殊需求和研究现状,笔者提出了一种新型的平板式压电四维力/力矩传感器,讨论了其数学模型,运用有限元方法对传感器进行仿真,研制了压电式四维力/力矩传感器原理样机,并进行静动态特性测试,得到了预想的实测结果。

## 1 结构与工作原理

石英晶体无需进行人工极化,具有无热释电效应、高的力电转换效率和转换精度、线性范围宽、重复性精度高、滞后小等优点,尤其是具有十分优秀的动态品质,自振频率高,振频稳定性良好,当选择适

当的切型,可使频率温度系数在室温附近为零,稳定性极高,因此,石英晶体广泛被用于标准力和加速度的测量<sup>[9-13]</sup>。

按压电晶片的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)2种。整体式是指内部压电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,但无法用于做大尺寸多维力传感器、维数不能大于 3,而且由于为空间堆叠结构,故难以用 MEMS 工艺实现,分列式结构可以避免整体式结构的这些弱点。

根据虎克定理,可以将石英晶片简化为刚度为  $k$  的弹性元件。当有  $n$  片石英晶片堆叠在一起时(结构上相当于串联,整体式结构就属于这种情况),等同于  $n$  个刚度等于  $k$  的弹性元件串联在一起,整个测量元件的刚度  $K=k/n$ ,而当  $n$  片石英晶片分布在同一平面上时(结构上相当于并联,分列式结构就属于这种情况),等同于  $n$  个刚度等于  $k$  的弹性元件并联在一起,整个测量元件的刚度  $K=nk$ ,可以看出,在选用同样尺寸、同样数量的压电晶片作为传感器的测量元件时,分列式结构的刚度是整体式结构的  $n^2$  倍。为此在选用压电元件多点支撑的测量结构时,为了提高传感器的刚度要尽量减少压电晶片的堆叠数量,但如果支撑点过多,即压电元件分布点数过多,也将导致传感器制作工艺难度加大,在进行压电式力传感器设计时应兼顾二者。

图 1 为传感器的实物照片。传感器主要由盖子、石英晶片组、电极板、信号输出电极、预紧螺钉、粘接剂和基座组成,夹在两块电极板之间的石英晶片组安装在基座和盖子形成的腔体中,基座和盖子均属于一次加工成型,设计电极板的目的是为了解决传感器内部布线困难的问题,预紧螺钉充当传感器预紧和安装固定的双重功能,外力/力矩施加在盖子上直接传递给石英晶片组。

传感器属分列式结构,夹在两块电极板之间的石英晶片组均匀分布在同一圆周上,为了克服维间干扰,所有的石英晶片均选用圆形,为了提高文献<sup>[14]</sup>设计方案中传感器的刚度,进一步简化文献<sup>[15]</sup>中传感器的结构,提出了如图 2 所示的石英晶片组八点支撑分布结构。8 组石英晶片组均匀分布在同一圆周上,4 组  $Y0^\circ$  切型石英晶片组分布在  $X$ 、 $Y$  轴与圆周的交点上,主要承担对  $F_x$ 、 $F_y$  和  $M_z$  3 个参量的测量,4 组  $X0^\circ$  切型石英晶片组分布在其它 4 个位置,用于承担对参量  $F_z$  的测量。

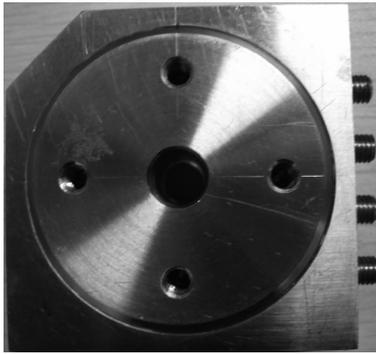


图 1 压电四维力/力矩传感器照片

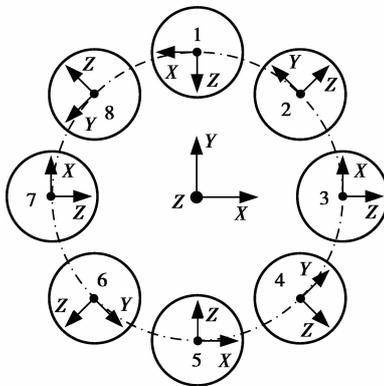


图 2 石英晶片组布局

$$F_{z4} = f_z/8 - f_y b/C + f_x b/C + m_x/C + m_y/C, \quad (6)$$

$$F_{z6} = f_z/8 - f_y b/C - f_x b/C + m_x/C - m_y/C, \quad (7)$$

$$F_{z8} = f_z/8 + f_y b/C - f_x b/C - m_x/C - m_y/C, \quad (8)$$

$$C = V(R, r) \quad (9)$$

根据空间力系的平衡原理,能够得到

$$\begin{cases} F_x = F_{x1} - F_{x5} \propto f_x/4 \\ F_y = -(F_{y3} + F_{y7}) \propto f_y/4 \\ F_z = -(F_{z2} + F_{z4} + F_{z6} + F_{z8}) \propto f_z/2 \\ M_z = -(F_{x1} + F_{x5})2R \propto m_z/4 \end{cases} \quad (10)$$

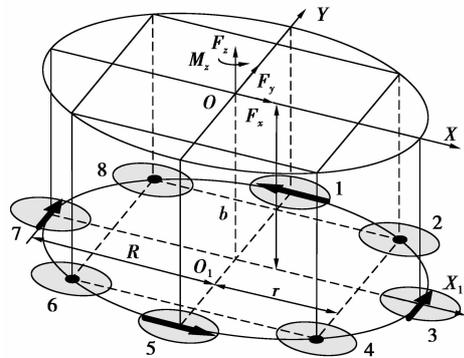


图 3 传感器结构简图

## 2 静态数学模型

图 3 是压电四维力传感器的结构简图,石英晶片组分布的圆周半径为  $R$ ,即 4 组  $X0^\circ$  切型石英晶片组分布在边长为  $\sqrt{2}R$  的正方形 4 个角上,传感器的力作用点与石英晶片表面的距离为  $b$ 。 $O-XYZ$  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。为了简化分析,对传感器的受力作如下假设:传感器盖子为刚体,且各向刚度相同,灵敏度相等且均匀分布;力  $F_z$  在 8 组石英晶片组之间按杠杆原则分布;力  $F_x$  和  $F_y$ 、力矩  $M_z$  在 8 组石英晶片组之间平均分配。设被测外力为  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  和  $m_z$ ,传感器输出响应为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  和  $M_z$ ,当外力/力矩作用在传感器盖子的中心上时,则各组石英晶片组上的分力可用如下数学关系式表示:

$$F_{x1} = f_x/8 + m_z/8R, \quad (1)$$

$$F_{x5} = -f_x/8 + m_z/8R, \quad (2)$$

$$F_{y3} = f_y/8 + m_z/8R, \quad (3)$$

$$F_{y7} = f_y/8 - m_z/8R, \quad (4)$$

$$F_{z2} = f_z/8 + f_y b/C + f_x b/C - m_x/C + m_y/C, \quad (5)$$

可以看出,理论上四维力/力矩之间没有相互的维间干扰,结合石英晶片的压电系数矩阵可知,在忽略传感器结构影响的条件下, $F_z$  方向的灵敏度与  $F_x$ 、 $F_y$  方向灵敏度相等;当  $M_z$  作用在传感器上时,各晶片组上的受力均等于  $M_z/2R$ ,  $M_z$  方向的灵敏度为  $F_x$ 、 $F_y$  方向灵敏度的  $1/2R$  倍。

根据压电系数矩阵,可得到传感器四路输出电荷如式(11)所示, $d_{11} = 2.31\text{pC/N}$ 、 $d_{26} = 4.62\text{pC/N}$ 、 $k_{f_x}$ 、 $k_{f_y}$ 、 $k_{f_z}$  和  $k_{m_z}$  为载荷分布比例,由传感器的结构、石英晶片组数量和制作工艺水平决定。

$$\begin{cases} Q_{F_x} = (F_{x1} - F_{x5})d_{26}k_{f_x} \\ Q_{F_y} = -(F_{y3} + F_{y7})d_{26}k_{f_y} \\ Q_{F_z} = -(F_{z2} + F_{z4} + F_{z6} + F_{z8})d_{11}k_{f_z} \\ Q_{M_z} = -(F_{x1} + F_{x5})2Rd_{26}k_{m_z} \end{cases} \quad (11)$$

由于石英晶片可以看成是一块薄平行板电容器,依据式  $C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d$  (其中  $\epsilon_r$  为石英的相对介电常数, $X0^\circ$  切型石英晶片取 4.52, $Y0^\circ$  石英晶片取 4.68, $d$  为石英晶片厚度, $\epsilon_0$  为介电常数)、 $Q = CU$  可得到传感器四路输出电势差:

$$\begin{cases} U_{F_x} = \frac{(F_{x1} - F_{x5})d_{26}k_{f_x}d}{4.68\epsilon_0 S} \\ U_{F_y} = \frac{-(F_{y3} + F_{y7})d_{26}k_{f_y}d}{4.68\epsilon_0 S} \\ U_{F_z} = \frac{-(F_{z2} + F_{z4} + F_{z6} + F_{z8})d_{11}k_{f_z}d}{4.52\epsilon_0 S} \\ U_{M_z} = \frac{-(F_{x1} + F_{x5})2Rd_{26}k_{f_y}d}{4.68\epsilon_0 S} \end{cases} \quad (12)$$

### 3 仿真与实验测试

根据传感器的研制指标要求( $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 的测量范围都为 0~1 000 N,  $M_z$ 的测量范围都为 0~100 N·m, 维间耦合 $\leq 5\%$ ), 结合传感器尺寸紧凑的设计思路, 传感器主要部件的结构尺寸见表 1。

表 1 传感器模型参数

部件名称	厚度	半径	环半径
石英晶片	1	5	
盖子凸台	9		12
壳体凸台	8		12
壳体侧壁	4		
壳体底壁	1		
石英晶片安装中心		15	

#### 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, 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 2 中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。其它的部件材料选用不锈钢,  $E_X = 2e11$  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, 如图 4 所示。

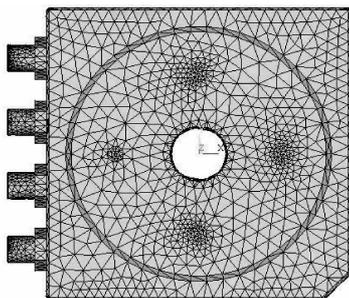


图 4 传感器有限元模型

仿真时传感器的边界约束条件完全与传感器的工作安装状态一致, 预紧力通过盖子的断面施加, 被测力通过建在 Z 轴上且与盖子施力面同平面上的关键点施加, 关键点与盖子的施力面建立刚性区。

#### 3.2 静态仿真与实验测试

整个实验测试系统主要由多维力/力矩加载装置、平板式压电四维力/力矩传感器、多路准静态电荷放大器<sup>[16]</sup>、NI 数据采集卡和研发的多维力/力矩标定软件等组成, 实验测试系统原理图如图 5 所示。测试时为了得到各路输出信号的归一化结果,  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_z$  路信号对应的各路准静态电荷放大器的电荷灵敏度选用 93 pf、93 pf、348 pf 和 3 200 pf 等不同的档位。

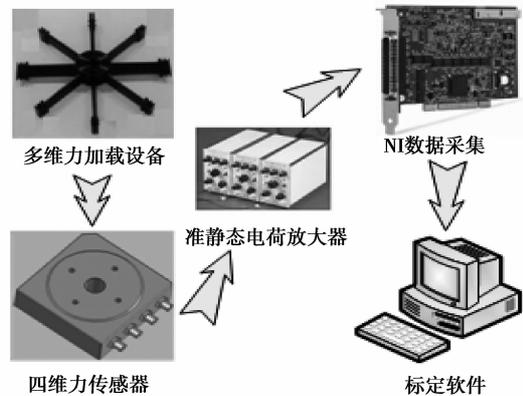


图 5 实验测试系统原理图

实验和仿真过程均采用同样的加载方式, 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  $M_z$  方向单独施加 0~100 N·m 的力矩。依据式(10)~(12), 分别求解得到 4 个方向上力/力矩的输入输出曲线(参见图 6、7、8、9, 图中 S 表示仿真测试, T 表示实验测试, 如  $SUF_x$  表示  $F_x$  向在仿真条件下的电压归一化输出结果)。

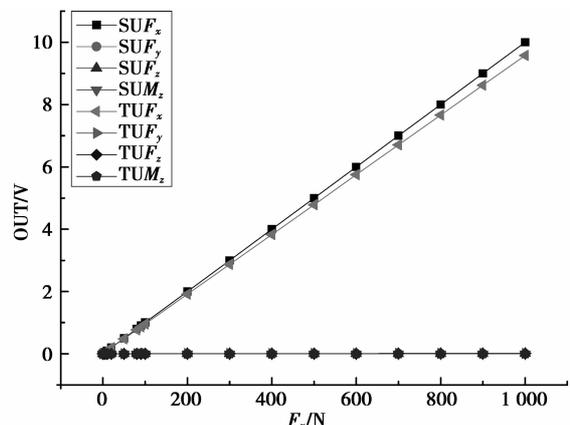


图 6  $F_x$  输入/出力-电压曲线

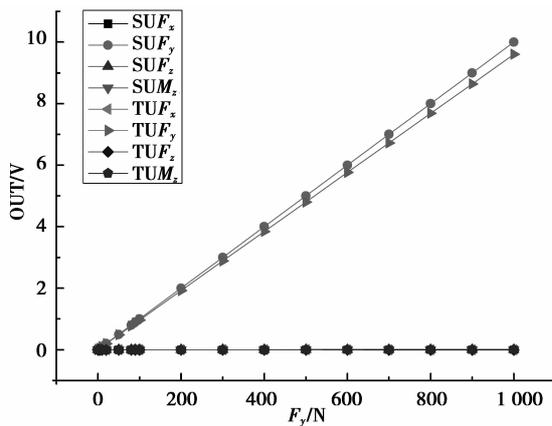


图 7  $F_y$  输入/出力-电压曲线

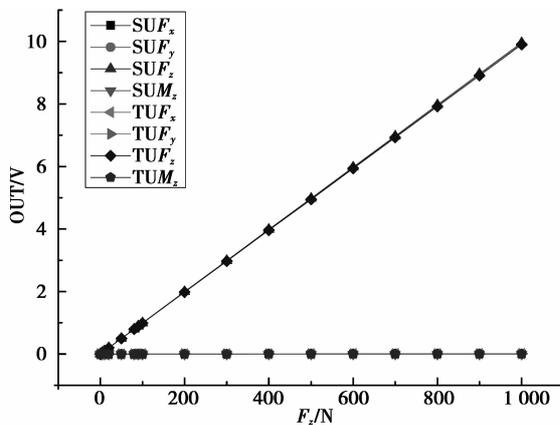


图 8  $F_z$  输入/出力-电压曲线

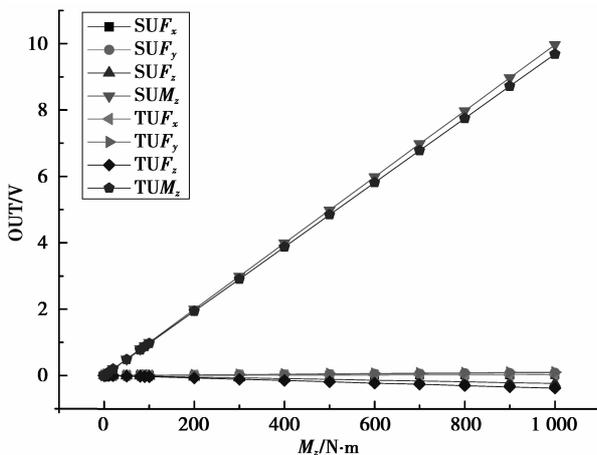


图 9  $M_z$  输入/出力-电压曲线

由于实验测试和仿真结果均采用了归一化标定方法的原因,得到的传感器系统仿真分析和实验测试的力-电压灵敏度及维间干扰情况见表 1 和表 2。

可见本四维力传感系统的各向灵敏度约为 0.01 V/N 或 0.01 V/N·m,在未使用退耦矩阵时各向输出维间干扰小于 3%。

表 1 仿真分析结果(电压)

向别	灵敏度	维间干扰/%			
		$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_z$
$F_x$	0.01 V/N		0.08	0.08	0.01
$F_y$	0.01 V/N	0.03		0.01	0.00
$F_z$	0.01 V/N	0.07	0.01		0.01
$M_z$	0.01 V/N·m	0.23	0.79	2.40	

表 2 实验测试结果(电压)

向别	灵敏度	维间干扰/%			
		$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_z$
$F_x$	0.009 6 V/N		0.12	0.13	0.03
$F_y$	0.009 6 V/N	0.10		0.09	0.03
$F_z$	0.01 V/N	0.14	0.08		0.03
$M_z$	0.009 7 V/N·m	0.23	0.79	2.40	

表 3 实验测试结果(电荷)

向别	灵敏度	维间干扰/%			
		$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_z$
$F_x$	0.93 pC/N		0.08	0.32	0.04
$F_y$	0.93 pC/N	0.03		0.04	0.01
$F_z$	3.48 pC/N	0.02	0.00		0.01
$M_z$	32.03 pC/N·m	0.07	0.23	2.60	

### 3.3 动态仿真与实验测试

平板式压电四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, $M_z$  方向的动态特性与  $F_x$  方向的动态特性相关,见式(10),故而只需要研究 3 个力方向的动态特性就可以了。对传感器动态特性的研究主要采用模态分析的仿真分析方法和落球试验 2 种方法。

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,运用其一阶振型的 2/3 可以作为传感器的固有频率<sup>[1]</sup>。仿真结果显示本传感器 1~6 阶振动频率分别为 54 242、57 584、58 341、63 547、63 776、64 313 Hz,因此传感器的固有频率约为 36 kHz。

图 10 是为了试验校准传感器的固有频率搭建的动态校准实验系统原理图,平板式压电四维力/力矩传感器将淬火钢球的冲击信号输入多路准静态电荷放大器,通过 NI 数据采集设备将信号输入计算机,通过标定软件的滤波和定标运算等,可以得到传感器的幅度-频率曲线,标定软件由 Labview 和 Matlab 2 种软件编制实现。试验中通过改变传感器的安装位置可以得到如图 11 所示的 X、Y、Z 3 个方向的固有频率特性曲线,可以看出:传感器的固有频率约为 35 kHz,由于传感器结构对称,X 和 Y 方向的固有频率基本一致。

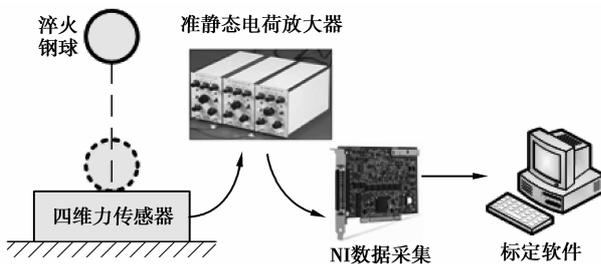


图 10 动态校准实验系统

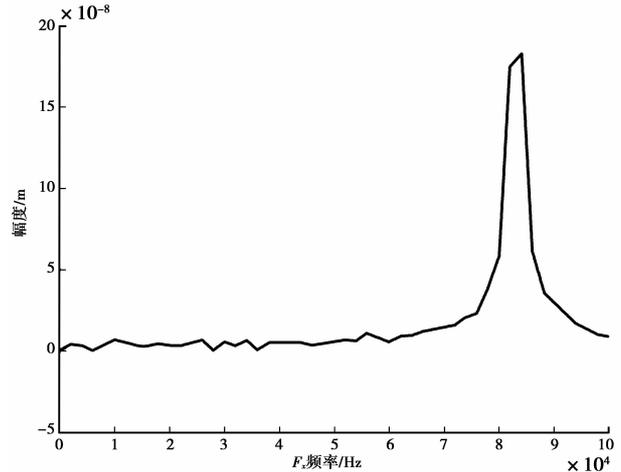
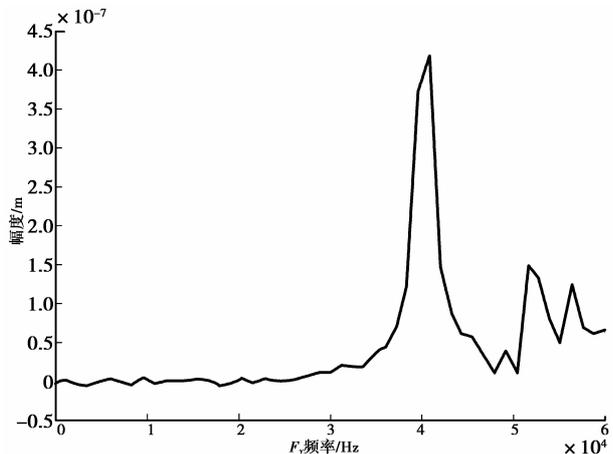
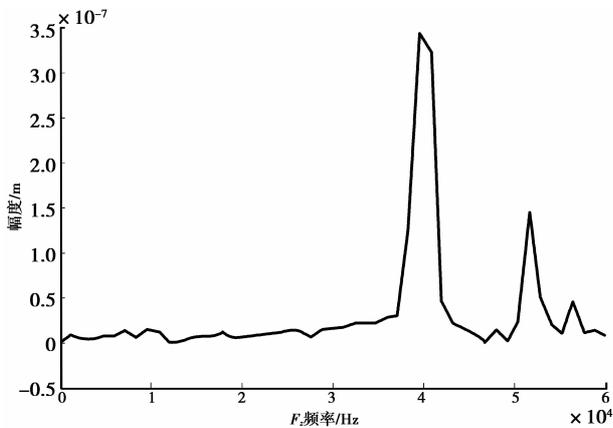


图 11 幅度-频率曲线

### 3.4 误差分析

1)石英晶体的转换效率:主要由传感器的结构决定,由合表 3 的数据可以计算得到单片 X<sup>0°</sup> 和 Y<sup>0°</sup> 切型石英晶片的力-电荷灵敏度  $1.74 \times 10^{-12}$  C/N 和  $1.86 \times 10^{-12}$  C/N,即石英晶体的机电转换效率分别为 75.32% 和 40.26%,这也是  $F_x, F_y$  灵敏度同  $F_z$  灵敏度的关系不满足前述推论的原因。

2)最大测量误差:表 4 给出了  $F_x, F_y, F_z, M_z$  4 个方向单独施加 1 000 N 或 100 N·m 时传感器的输出电荷量。根据这些数据可以得到传感器各输出的最大测量误差如下:

$$E_r(F_x) = \frac{0.72 + 2.94 + |-0.35|}{929.55} = 0.43\%$$

$$E_r(F_y) = \frac{|-0.26| + |-0.35| + 0.13}{929.52} = 0.08\%$$

$$E_r(F_z) = \frac{0.64 + 0.11 + 0.34}{3\,479.93} = 0.03\%$$

$$E_r(M_z) = \frac{2.14 + 7.27 + |-83.43|}{3\,203.16} = 2.90\%$$

表 4 传感器的输出电荷

向别	$QF_x/P_c$	$QF_y/P_c$	$QF_z/P_c$	$QM_z/P_c$
$F_x$	929.55	0.72	2.94	-0.35
$F_y$	-0.26	929.52	-0.35	0.13
$F_z$	0.64	0.11	3 479.93	0.34
$M_z$	2.14	7.27	-83.43	3 203.16

3)载荷有效传递比例:定义为载荷的实际分布比例与理论分布比例的比值,与石英晶片的机电转换效率直接相关,由传感器的结构决定。

$$E_r(k_{f_x}) = \frac{0.93Pc/N}{2 \times 4.62Pc/N} / \frac{1}{4} = 40.26\%,$$

$$E_r(k_{f_y}) = \frac{0.93Pc/N}{2 \times 4.62Pc/N} / \frac{1}{4} = 40.26\%,$$

$$E_r(k_{f_z}) = \frac{3.48Pc/N}{4 \times 2.31Pc/N} / \frac{1}{2} = 75.32\%,$$

$$E_r(k_{m_z}) = \frac{32.03Pc/N}{(1/0.03) \times 2 \times 4.62Pc/N} / \frac{1}{4} = 41.60\%.$$

虽然根据式(10),传感器的载荷有效传递比例只与石英晶片组的分布位置和数量有关系,但实际中由于传感器结构的影响, $F_x$ 、 $F_y$ 方向与 $M_z$ 方向的载荷有效传递比例存在微小差异。

## 4 结 论

运用 ANSYS 对平板式压电四维力/力矩传感器的静、动态性能进行了仿真分析,推导了传感器的静态数学模型。研究表明:传感器固有频率  $>30$  kHz,在未使用退耦矩阵时的维间干扰  $<3\%$ ,但传感器内部的石英晶片转换效率较低,还有待进一步对传感器的结构展开深入研究,进一步提高本传感器的灵敏度。

### 参考文献:

- [1] 秦冈,曹效英,宋爱国,等. 新型四维腕力传感器弹性体的有限元分析[J]. 传感技术学报,2003(3):238-241.  
QIN G, CAO X Y, SONG A G, et al. Finite element analysis for elastic body of new 4 axis wrist force sensor[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2003(3):238-241.
- [2] SONG A G, WU J, QIN G, et al. A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor[J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2007,40(9/10):883-891.
- [3] YAO J T, HOU Y L, CHEN J, et al. Theoretical analysis and experiment research of a statically indeterminate pre-stressed six-axis force sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, (150):1-11.
- [4] 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 WEI-GONG. 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.
- [5] CHAO L, CHEN K. Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1997,63(2):105-112.
- [6] 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 BAO-YUAN, WU ZHONG-YUE, SHEN FEI. 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.
- [7] 刘巍,林盛,贾振元,等. 压电式六维大力传感器:中国, ZL200710157931.2[P]. 2009-06-03.
- [8] LI Y, SUN B, ZHANG J, et al. A novel parallel piezoelectric six-axis heavy force/torque sensor [J]. Measurement, 2009,42(5):730-736.
- [9] 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 JUN, QIN LAN, LIU JING-CHENG, et al. A novel differential piezoelectric accelerating sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2007,15(6):903-909.
- [10] 刘京诚,刘俊,秦岚,等. 基于压电式新型三维力传感器设计[J]. 压电与声光,2005,27(6):643-645.  
LIU JING-CHENG, LIU JUN, QIN LAN, et al. The design of a new type three-dimension power transducer based on piezoelectricity [J]. Piezoelectrics Acousto-optics, 2005,27(6):643-645.
- [11] 刘京诚,刘俊,李敏,等. 压电式三维力传感器:中国, ZL200320123985.4[P]. 2006-07-26.
- [12] 刘俊,秦岚,刘京诚,等. 一种压电式三维加速度传感器:中国, ZL200610095012.2[P]. 2008-10-29.
- [13] 刘俊,秦岚,刘京诚,等. 差动式压电三维力传感器:中国, ZL200610054314.5[P]. 2008-07-16.
- [14] YAO J T, HOU Y L, CHEN J, et al. Theoretical analysis and experiment research of a statically indeterminate pre-stressed six-axis force sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 150(1):1-11.
- [15] 黄亮,秦岚,刘俊,等. 压电式四维力传感器的有限元分析[J]. 国外电子测量技术,2008(12):18-21,35.  
HUANG L, QIN L, LIU J, et al. Finite element analysis of four-axis piezoelectric force sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2008(12):18-21,35.
- [16] 刘俊,刘京诚,秦岚,等. 准静态电荷放大器的研究[J]. 压电与声光,2007,29(2):156-157,160.  
LIU JUN, LIU JING-CHENG, QIN LAN, et al. Research on the quasi-static charge amplifier [J]. Piezoelectrics Acousto-optics, 2007,29(2):156-157,160.

(编辑 陈移峰)