

## Principle Study of a Six-Axis Acceleration Sensor \*

LI Min, LIN Zhiming, LIU Jun, LÜ Huayi, QIN Lan \*

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

**Abstract:** In order to overcome the deficiencies of the existing six-axis acceleration sensor, a six-axis acceleration sensor with single inertial mass is proposed and studied. The structure and working principle of the sensor are presented, and the corresponding mathematical model is derived. The characteristics including the sensitivity, coupling degree and natural frequency are simulated and analyzed by ANSYS finite element software. Research results show that, the sensor can measure six-axis acceleration, and the dimension coupling is linear which can be decoupled completely through simple matrix operations, and the natural frequency is increased three times of the existing three-axis line acceleration/angular acceleration sensor.

**Key words:** six-axis; acceleration sensor; piezoelectric; principle

EEACC: 7230; 0290T; 7310T; 7120

doi: 10. 3969/j. issn. 1004-1699. 2013. 09. 007

## 一种新型六维加速度传感器原理研究 \*

李敏, 林志明, 刘俊, 吕华溢, 秦岚 \*

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为克服现有六维加速度传感器的不足, 提出并研究了一种单惯性质量块的压电式六维加速度传感器。介绍了传感器的结构和工作原理, 推导了其数学模型, 运用 ANSYS 有限元软件对传感器的灵敏度、维间耦合度、固有频率等特性进行了仿真研究。研究表明, 该六维加速度传感器能够实现六维加速度的传感; 各维间的耦合属于线性耦合, 可通过简单的矩阵运算予以完全解耦; 固有频率有望比现有三维线加速传感器或三维角加速度传感器提高 3 倍以上。

**关键词:** 六维; 加速度传感器; 压电; 原理

中图分类号: TH7

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)09-1213-06

六维加速度传感技术是实现物体三维空间运动相对于参考惯性坐标系的三维线加速度和三维角加速度的传感和测量的多维运动传感技术, 在工业自动化控制系统、交通运输工具、机器人控制系统、导航制导设备、互动娱乐设备、医疗保健设备、地震预测装置、军事和航天航空等领域中有着广泛的需求和应用, 尤其是在无陀螺(全加速度计)捷联惯性导航系统方面的需求更激起了研究者对六维加速度传感器的研究兴趣。

现有六维加速度传感方案包括基于单一惯性质量块-弹簧-阻尼系统(简称 I 类传感方案)和基于多个单轴加速度传感器的集成系统(简称 II 类传感方案)两类<sup>[1]</sup>, 前者通过感知由弹簧和阻尼单元连接在壳体上的惯性质量块相对壳体的位移或弹簧

的变形实现六维加速度的测量, 后者通过解算按特定位置和姿态固定在刚体上的多个单轴加速度传感器的输出得到六维加速度。

根据转换元件的类别, 基于 I 类传感方案的六维加速度传感器可分为: 弹性体应变型<sup>[2]</sup>、静电悬浮型<sup>[3-4]</sup>、超导悬浮型<sup>[5]</sup>、弹簧光电型<sup>[6]</sup>等形式。这些传感器结构紧凑、集成度高, 但存在制作工艺复杂、成本高、适用范围窄、难以微型化等缺点<sup>[7]</sup>; 同时因此方案与弹性体式六维力传感器的研究思路相似, 故导致其在弹性体结构复杂程度与应变片布片及解耦、高刚度与高灵敏度之间<sup>[8-9]</sup>存在瓶颈矛盾难题。

根据采用的单轴加速度传感器的个数, 基于 II 类传感方案的六维加速度传感器可分为: 六单轴加速度传感器构型和九单轴加速度传感器构型两类。

项目来源: 重庆市科委自然科学基金计划项目(CSTC2012JJA40024)

收稿日期: 2013-03-12 修改日期: 2013-08-05

这些传感器系统成本高、体积大、结构复杂,给安装和结构微型化带来困难<sup>[10-11]</sup>。

本文在平板式压电六维力传感器的研制基础上,提出并研究了基于单惯性质量块的一种六维加速度传感器,建立了此六维加速度传感的结构模型和数值模型,借助有限元软件对其静态和动态主要性能进行了研究,得到了灵敏度、维间耦合度和固有频率等特性,验证了本六维加速度传感器原理的正确性。

### 1 工作原理与数学模型

本六维加速度传感器选用石英作为转换元件,属分列式结构,主要由盖子(1)、预紧螺栓(2)、惯性质量块(3)、石英晶组(4)、基座(5)组成。信号输出电极、绝缘填充剂和基座组成;石英晶组夹装在惯性质量块和基座之间,且均匀分布在基座的石英晶组安装凸台上。图1为六维加速度传感器的结构示意图。

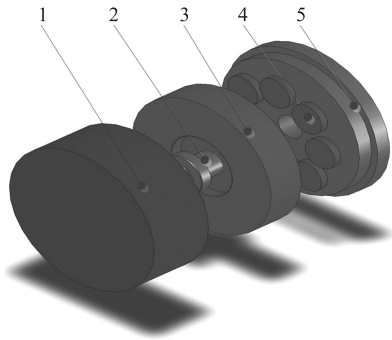


图1 六维加速度传感器结构示意图

#### 1.1 工作原理

图2是本传感器内部石英晶组的布局图。设被测线加速度和角加速度分别为  $a_x, a_y, a_z, am_x, am_y$  和  $am_z$ , 石英晶组响应输出为  $A_x, A_y, A_z, AM_x, AM_y$  和  $AM_z$ 。八组石英晶组均匀分布在同一圆周上,四组  $Y_0^0$  切型石英晶组分布在  $X, Y$  轴与圆周的交点上,承担对  $a_x, a_y$  和  $am_z$  3个参量的测量;四组  $X_0^0$  切型石英晶组分布在其他4个位置,承担对参量  $a_z, am_x$  和  $am_y$  的

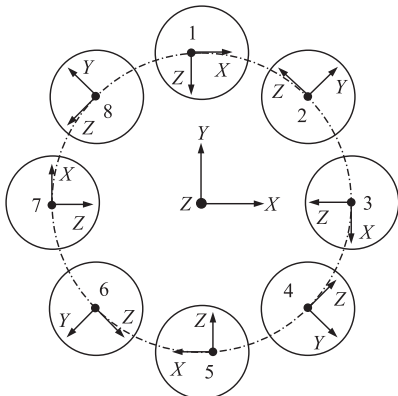


图2 石英晶组布局图

测量;每组石英晶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。式(1)是六维加速度测量原理的映射关系式,式中的  $F$  表示惯性力,字母下标表示惯性力方向,数字下标代表石英晶组编号。

$$\begin{cases} A_x \propto (F_{Y1} - F_{Y5}) \\ A_y \propto (F_{Y3} - F_{Y7}) \\ A_z \propto (F_{Z2} + F_{Z4} + F_{Z6} + F_{Z8}) \\ AM_x \propto [(F_{Z2} + F_{Z8}) - (F_{Z4} + F_{Z6})] \\ AM_y \propto [(F_{Z6} + F_{Z8}) - (F_{Z2} + F_{Z4})] \\ AM_z \propto (F_{X1} + F_{X3} + F_{X5} + F_{X7}) \end{cases} \quad (1)$$

#### 1.2 数学模型

为简化分析,假设传感器中:石英晶组刚度相同、灵敏度相等,呈对称均布配置;惯性质量块为刚体,且各向刚度相同,灵敏度相等且均匀分布; $a_z, am_x$  和  $am_y$  在石英晶组之间按杠杆原则分布; $a_x, a_y$  和  $am_z$  在石英晶组之间平均分配。

图3是本压电式六维加速度传感器结构简图。 $O-XYZ$  为惯性质量块质心点坐标系,  $O_1-X_1Y_1Z_1$  是压电石英晶组的安装坐标系;石英晶组的分布圆的圆周半径为  $R, r = R/\sqrt{2}$ , 惯性质量块质心与石英晶组表面距离为  $b$ ;加速度在晶片组上产生的响应输出可用式(2)表示,  $k$  为待标定系数。

$$\begin{cases} F_{X1} = a_x/8 + am_z/8R + kam_y/R \\ F_{X5} = -a_x/8 + am_z/8R - kam_y/R \\ F_{Y3} = a_y/8 + am_z/8R - kam_x/R \\ F_{Y7} = -a_y/8 + am_z/8R + kam_x/R \\ F_{Z2} = a_z/8 + [-a_y b - a_x b + am_x - am_y]/3r \\ F_{Z4} = a_z/8 + [a_y b - a_x b - am_x - am_y]/3r \\ F_{Z6} = a_z/8 + [a_y b + a_x b - am_x + am_y]/3r \\ F_{Z8} = a_z/8 + [-a_y b + a_x b + am_x + am_y]/3r \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可进一步得到六维加速度传感器输入和输出的结构模型关系式(3)。

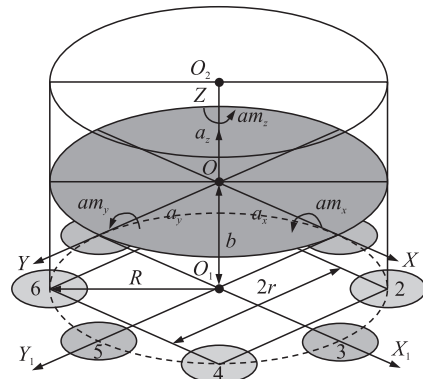


图3 传感器结构简图

$$\begin{cases} A_x = a_x/4 + 2kam_y/R \\ A_y = a_y/4 + 2kam_x/R \\ A_z = a_z/2 \\ AM_x = 4am_x/3r - 4a_y b/3r \\ AM_y = 4am_y/3r + 4a_x b/3r \\ AM_z = am_z/2R \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,由于六维加速度传感器空间结构的影响,除线加速度  $a_z$  和角加速度  $am_z$  向不

存在维间线性耦合外,  $a_y$ 、 $am_x$  和  $a_x$ 、 $am_y$  之间始终存在相互的线性耦合。

## 2 数值仿真实验

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<sup>[12]</sup>,但其物理模型的建模功能较弱,不适合建立复杂的物理模型。表 1 是本六维加速度传感器模型的主要结构参数。

表 1 传感器模型主要参数

部件	厚度/mm	内径/mm	外径/mm	材料	弹性模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
质量块	10	-	46	1Cr18Ni9Ti	210	7900
安装凸台	4	-	46	1Cr18Ni9Ti	210	7900
安装基座	4	-	50	1Cr18Ni9Ti	210	7900
压电元件	2	-	10	SiO <sub>2</sub>	80	2650

### 2.1 FEM 建模

建模过程:首先运用 CAD 软件建立六维加速度传感器的结构模型,然后借助 ANSYS 提供给 CAD 软件的接口将模型导入 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 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。其他的部件材料选用不锈钢,  $EX=2 \times 10^{11}$  Pa,  $\mu=0.3$ ,单元类型选用 SOLID95,对这些结构采用手动控制等份分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。

载荷施加与求解:载荷施加主要包括约束和加速度载荷加载两部分工作,在进行约束设置时,完全按照六维加速度传感器的安装状态进行相应设置,预紧力通过预紧螺栓的断面施加,基座的安装面的全部自由度设为 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,特将传感器惯性质量块下表面、石英晶组和石英晶组安装面之间的接触状态设为始终绑定状态。

### 2.2 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组面上的电势差,本文中就用电势和加速度之间的关系来描述传感器加速度输入和电势输出之间的关系。图 4~图 9 分别是数值仿真得到的六维加速度传感器  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$ 、 $am_x$ 、 $am_y$ 、和  $am_z$  向的输入-输出加速度-电压曲线,图中 U 标示电势;根据这些曲线可以得到本传感器的 C 矩阵(式(4))。

$$C_U = \begin{bmatrix} 6.970E-01 & 1.070E-03 & -4.00E-04 & 5.600E-03 & 4.310E-01 & -5.10E-04 \\ -2.40E-04 & 6.950E-01 & 1.800E-04 & -4.29E-01 & 2.880E-03 & -5.00E-04 \\ -1.00E-05 & -7.00E-05 & -7.92E-01 & 9.800E-04 & 7.600E-04 & 8.900E-04 \\ 0.000E+00 & -1.06E-03 & -2.00E-06 & 1.740E-03 & -9.00E-06 & 1.000E-06 \\ 1.060E-03 & 2.000E-06 & -1.00E-06 & 1.400E-05 & 1.740E-03 & -1.00E-06 \\ 2.000E-06 & 2.000E-06 & 5.000E-06 & -1.00E-06 & -1.00E-06 & -3.02E-03 \end{bmatrix} \quad (4)$$

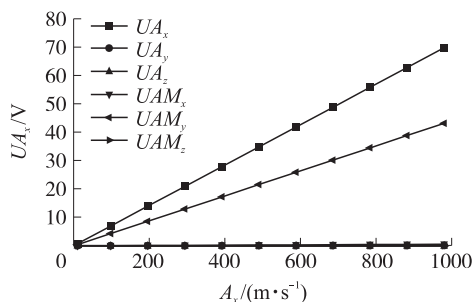


图 4 Ax 输入/出线加速度-电压曲线

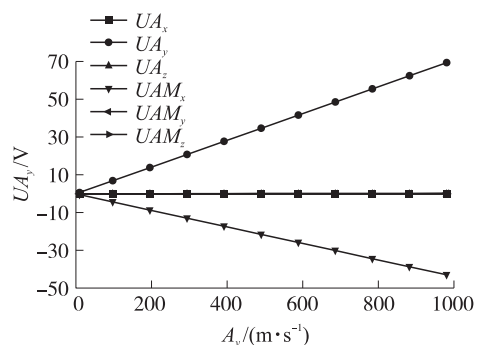


图 5 Ay 输入/出线加速度-电压曲线

根据图4~图9和式(4)得到表2所示的六维加速度传感器的灵敏度特性和维间耦合结论,本加速度传感器各维的灵敏度分别为 $0.697\text{ V/g}_n$ 、 $0.695\text{ V/g}_n$ 、 $0.792\text{ V/g}_n$ 、 $0.00174\text{ V}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-2})$ 、 $0.00174\text{ V}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-2})$ 、 $0.00302\text{ V}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-2})$ ,维间耦合只体现在 $a_y$ 、 $a_m_x$ 和 $a_x$ 、 $a_m_y$ 之间,且均为线性耦合,这与前述结构模型的研究结论一致。

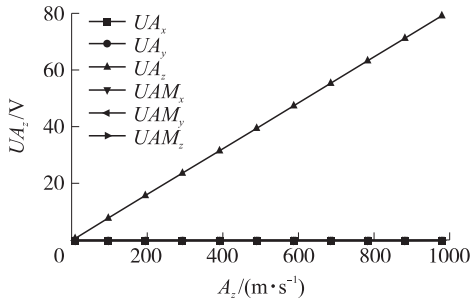


图6 Az输入/出线加速度-电压曲线

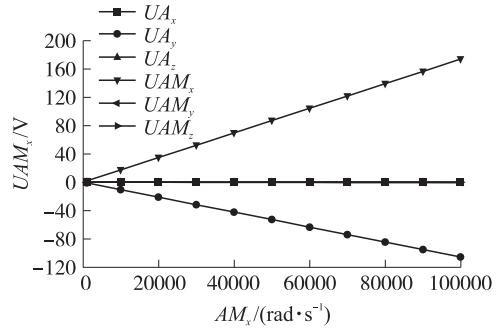


图7 AMx输入/出角加速度-电压曲线

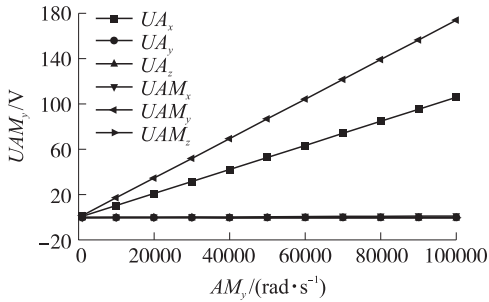


图8 AMy输入/出角加速度-电压曲线

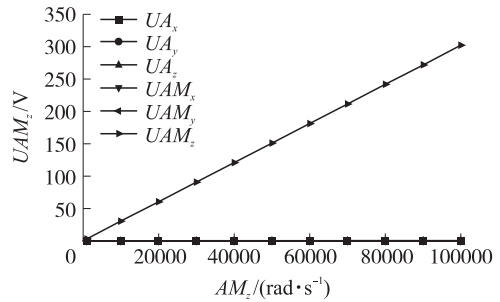
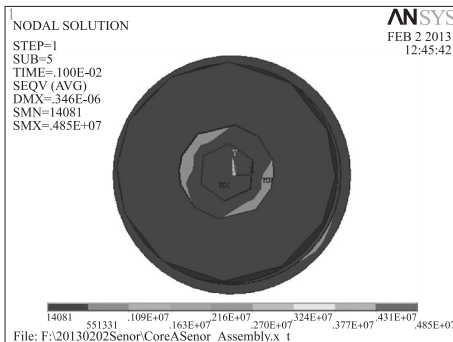


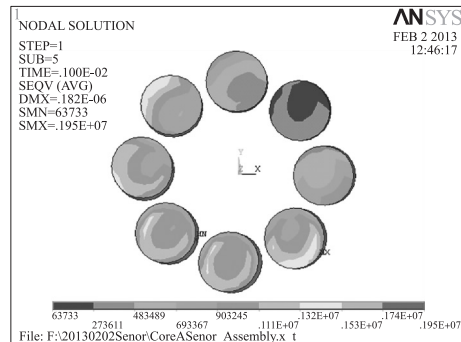
图9 AMz输入/出角加速度-电压曲线

表2 仿真分析结果(电势)

载荷向别	维间耦合					
	Ax	Ay	Az	AMx	AMy	AMz
Ax	6.97E-01	0.15%	-0.06%	0.80%	61.84%	-0.07%
Ay	-0.03%	6.95E-01	0.03%	-61.78%	0.41%	-0.07%
Az	0.00%	-0.01%	7.92E-01	0.12%	0.10%	0.11%
AMx	0.00%	-60.93%	-0.12%	1.74E-03	-0.52%	0.06%
AMy	60.93%	0.11%	-0.06%	0.80%	1.74E-03	-0.06%
AMz	0.07%	0.07%	0.17%	-0.03%	-0.03%	3.02E-03



(a)



(b)

图10 复合加载时的应变云图

表 3 是复合加载后的输入输出和解耦结果,由于线性耦合而非传统多维加速度传感器或多维力传感器涉及的非线性耦合,通过简单的计算就实现了完全的解耦。

表 3 复合载荷加载结果分析

载荷向别	输入值	电势差输出值	解耦后值	相对误差
Ax	490 m/s <sup>2</sup>	133.111 V	488.70 m/s <sup>2</sup>	0.27%
Ay	490 m/s <sup>2</sup>	-62.731 V	491.09 m/s <sup>2</sup>	-0.22%
Az	490 m/s <sup>2</sup>	-39.512 V	489.48 m/s <sup>2</sup>	0.11%
AMx	92395 rad/s <sup>2</sup>	140.746 V	92464.11 rad/s <sup>2</sup>	-0.07%
AMy	92395 rad/s <sup>2</sup>	182.008 V	92501.62 rad/s <sup>2</sup>	-0.12%
AMz	65333 rad/s <sup>2</sup>	-197.244 V	65332.21 rad/s <sup>2</sup>	0.00%

### 2.3 动态特性仿真分析

研究六维加速度传感器动态特性主要是研究其固有频率,固有频率和振型是承受动态载荷结构设计中的重要参数,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。图 11 给出了本传感器 1~6 阶的振型图。

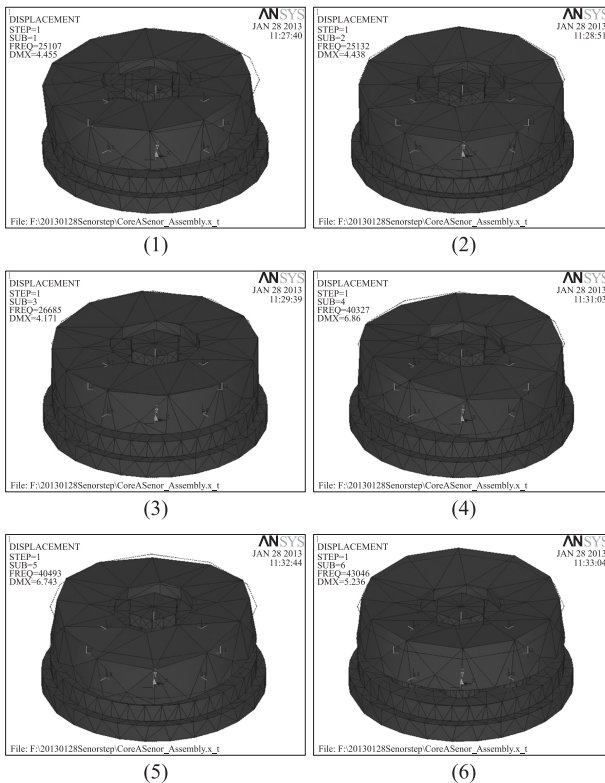


图 11 1~6 阶振型图

表 4 给出了六维加速度传感器 1~6 阶振型和固有频率,结合前期研究结论可知,本加速度传感器的固有频率理论上可达 25 kHz。

表 4 模态分析结果

阶次	固有频率/Hz	振型
1	25107	质量块沿 X 轴作线性振动
2	25132	质量块沿 Y 轴作线性振动
3	26685	质量块沿 Z 轴作扭转振动
4	40327	质量块沿 X 和 Y 轴的平分线作折叠振动
5	40493	质量块沿 Y 轴作折叠振动
6	43046	质量块外沿沿 Z 轴作振动

### 3 结论

本文介绍了基于单质量块的六维加速度传感器的原理与结构,建立了相应的数学模型,并在运用 ANSYS 有限元技术对传感器的静态传感特性进行了仿真研究,得到如下结论:

(1) 本六维加速度传感原理及传感器结构能够有效实现对被测载体的六维加速度传感。

(2) 依据文献[8]的单维微型化压电加速度传感器研究方案本方案可知,本方案亦适合研制基于 MEMS 工艺的微六维加速度传感器。

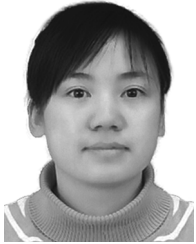
(3) 由于空间结构的影响,传感器各维输出之间存在线性耦合,并非传统意义上的非线性耦合,故可以通过简单的矩阵运算进行解耦。

(4) 虽然各维输出灵敏度略低于现有线加速度传感器或角加速度传感器,但固有频率有望在实际中提高 2 倍~5 倍。

### 参考文献:

- [1] Wang D H, Yuan G A. Six-Degree-of-Freedom Acceleration Sensing Method Based on Six Coplanar Single-Axis Accelerometers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1433-1442.
- [2] Durand, Didier. Six-Axis Accelerometer [P]. EP Patents, EP1352251B1, 2009.05.27.
- [3] 唐富荣,薛大同. 六轴加速度计的结构原理与阻尼振动设计 [J]. 传感技术学报, 2002, (4): 287-292.
- [4] 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.
- [5] Canavan E R, Paik H J, Parke J W. A Superconducting Six-Axis Accelerometer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(2): 3253-3256.
- [6] Vladimir Chapsky, Vladimir T Portman, Ben-Zion Sandler. Single-Mass 6-DOF Isotropic Accelerometer with Segmented PSD Sensors [J]. Sensors and Actuators, 2007, 135(A): 558-569.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Qin Lan, Jiang Chao, Liu Jun, et al. Design and Calibration of a Novel Piezoelectric Six-Axis Force/Torque Sensor [C]// Proceedings of SPIE, 2011, V8321, 83210G1-8.
- [10] 丁明理, 王祁. 无陀螺惯性测量组合研究现状概述[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4): 83-88.

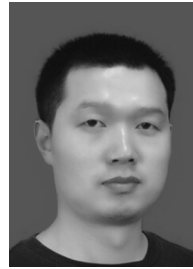


李敏(1978-), 女, 讲师, 2008年获得精密仪器及机械国家重点学科硕士学位, 主要研究方向为多维力传感器、多维加速度传感器、精密仪器及机械和太阳光照明技术, limin780815@cqu.edu.cn;



秦岗(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。重庆市“322重点人才”工程人选, 重庆市第二批学术技术带头人。主要研究方向为光电精密测量与控制的理论与方法。先后兼任全国高等学校机电类专业教学指导委员会委员, 中国仪器仪表学会机械量测试仪器分会第四届理事会副理事长, 全国测量误差与不确定度研究会副理事长, 中国计量测试学会第五届理事会理事, 全国互换性与测量技术研究会常务理事、副秘书长等。

- [11] Nemirovsky Y, Nemirovsky Z A, Muralt P, et al. Design of a Novel Thin Film Piezoelectric Accelerometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, (56): 239-249.
- [12] 刘俊, 秦岗, 李敏, 等. ANSYS在平板式压电四维力/力矩传感器设计中的应用[J]. 传感技术学报, 2010, 23(11): 1580-1585.



刘俊(1977-), 男, 博士。2005~2011年获得精密仪器及机械国家重点学科硕士、博士学位。主要研究方向为多维力传感器、多维加速度传感器、精密仪器及机械相关领域, 近年来, 申请发明专利13项, 已获权11项, 申请实用新型专利2项, 已获权2项, 在《Applied Mechanics and Materials》、《Applied Mathematics and Computation》《光学精密工程》、《仪器仪表学报》、《传感技术学报》等高水平期刊上发表论文20余篇;