

文章编号 1004-924X(2007)06-0903-07

一种新型差动式压电加速度传感器

刘俊, 秦岚, 刘京诚, 李敏

(重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

摘要:设计了一种新型的差动式压电加速度传感器。介绍了传感器的结构和工作原理, 推导了传感器的数学模型, 并分析了传感器惯性质量块和压电元件的质量对其输出特性的影响。然后, 分析了传感器处理电路的结构, 推导了该电路的设计指标。实验结果表明, 该传感器采用单个惯性质量块实现了对加速度信号的差动式测量, 其结构简单、重量轻、易于加工制造、抗干扰能力强; 线性度为 0.1%, 是普通加速度计的 1/2; 频率响应误差为 1%; 重复性为 1.27%; 测量灵敏度是普通加速度计的 2 倍, 基本达到了设计的目的。

关键词:压电传感器; 加速度传感器; 差动

中图分类号:TP212.12 **文献标识码:**A

A novel differential piezoelectric accelerating sensor

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

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, the
Ministry of Education, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel differential piezoelectric acceleration sensor was introduced. The sensor's structure and operating principle were presented and its mathematic model was established, then the relationship between the sensor's output characteristic and inertial mass and the piezoelectric components was discussed. Finally, the process circuit structure of sensor and its characteristic were discussed also. Experimental results show that the sensor with one inertial mass can realize the differential measurement of acceleration signals, and it has advantages in simple structure, light weight, simple for working and manufacturing, and better anti-interference ability. Its linearity is up to 0.1%, which is half of common accelerometer. It has satisfied the design purpose in frequency response error of 1% and repeatability of 1.27%, and its measurement sensitivity is twice of general accelerometer.

Key words: piezoelectric; sensor; acceleration sensor; differential

1 引言

加速度传感器作为测量物体运动状态的一种

重要的传感器^[1-2], 被广泛应用于医疗、体育、制造业、军事、航空航天^[3-4] (包括无陀螺稳定控制^[5]、捷联惯性导航系统的非自主式惯性导航系统、航向指示系统^[6]、目标姿态基准系统、重力测量系统

收稿日期: 2006-09-26; 修订日期: 2007-01-07.

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (No. 8597)

等)等领域。加速度传感器主要分为压阻式、电容式、应变式、液浮摆式、挠性摆式、振弦式、压电式等类型^[7]。其中,压电式^[8]加速度传感器具有体积小、重量轻、固有频率高、测量的动态范围大、线性好、安装简单的特点^[9-12],目前约占所使用的各种加速度传感器总数的 80%^[13]。50 年以来,对压电传感器的研究大都集中在单压电加速度传感器方面,目前已有 11 种不同形式的压电加速度传感器,但这些加速度传感器都存在灵敏度体积比和灵敏度重量比偏低的缺点,差动式^[14]加速度传感器可以克服这些缺点。文献^[15-17]提出了一种差动式压电加速度传感器的结构,但这些传感器的结构复杂,加工难度大,温度瞬变特性差,抗应变能力差,而且由于采用两个惯性质量块实现差动式测量,增大了传感器自身的重量,另外,由于该传感器的预紧力是通过壳体施加上去的,使得传感器容易受到外界条件(如温度、声音变化)的影响,使外界干扰信号附加到压电转换元件上,增大了测量误差。

本文提出的差动式压电加速度传感器,结构简单,重量轻,测试精度、灵敏度高,能实现对加速度信号的差动式测量^[18]。

2 传感器的工作原理

图 1 是差动式压电加速度传感器的结构图。其中,隔离基座提高了传感器抗应变的能力,降低了其自重,提高了抗温度瞬变特性;采用单个质量块实现了对加速度信号的差动测量,降低了传感器自重,提高了固有频率。预紧力通过隔离基座施加到压电元件上,增强了传感器抗外部干扰的能力。当传感器受到向下的加速度时,惯性质量块将产生向上的惯性力,这时上压电元件受压,由于预紧力的原因,下压电元件相当于受拉,结果在两个压电元件的表面上产生正负变化的电荷;反之,当本发明的传感器受到向上的加速度时,惯性质量块将产生向下的惯性力,由于预紧力的原因,这时上压电元件相当于受拉,下压电元件受压,结果在两个压电元件的表面上产生负正变化的电荷。将上下压电元件输出的两组信号引入差动式测量电路,就可以实现对被测振动加速度的差动式测量。这就是差动式压电加速度传感器的工作原理。

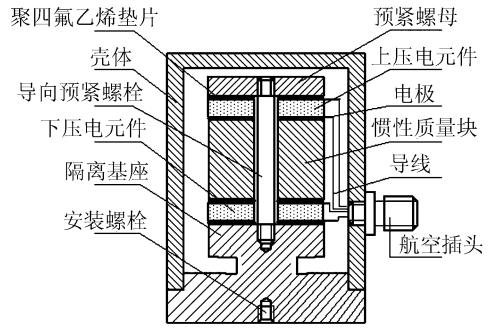


图 1 传感器结构图

Fig. 1 Structural scheme of sensor

3 传感器的数学模型

图 2 是该差动式压电加速度传感器的振动模型。设 k 为压电元件的弹性系数, c 为阻尼器的阻尼系数, m 为质量块的质量, m_0 为压电元件的

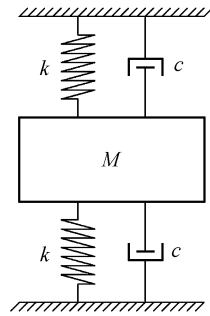


图 2 传感器振动模型

Fig. 2 Vibrating model of sensor

质量, $M = m + 2m_0$, x_M 为质量块的绝对位移, x 为被测体的绝对位移, $x_t = x_M - x$ 为质量块的相对位移, 输入量为被测加速度 $a = \ddot{x}$, 输出量为质量块与壳体(被测物体)之间的相对位移 x_t , 以质量块为隔离体, 当作用在质量块的作用力平衡时, 其动力学方程为:

$$M \frac{d^2 x_M}{dt^2} + 2c \frac{dx_t}{dt} + 2kx_t = 0, \quad (1)$$

设 $C = 2c$, $K = 2k$, 将 $x_t = x_M - x$, 代入式(1)有:

$$M \frac{d^2 x_t}{dt^2} + C \frac{dx_t}{dt} + Kx_t = -M \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (2)$$

对式(2)进行傅立叶变换有:

$$M(j\omega)^2 x_t + C(j\omega) x_t + Kx_t = -Ma, \quad (3)$$

由式(3)可以得到传感器的传递函数有:

$$\frac{x_t}{a} = \frac{-1}{(j\omega)^2 + \frac{C}{M}(j\omega) + \frac{K}{M}}, \quad (4)$$

设传感器的固有频率 $\omega_0 = \sqrt{K/M}$, 传感器的阻尼比 $\xi = C/(2\sqrt{MK})$, 代入式(4)有:

$$\frac{x_t}{a} = \frac{-1/\omega_0^2}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + 2\xi(\omega/\omega_0)}, \quad (5)$$

由式(5)可以得到传感器的幅频、相频特性为:

$$\begin{cases} A(\omega) = \frac{1/\omega_0^2}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + (\frac{2\xi\omega}{\omega_0})^2}}, \\ \varphi = \arctan \frac{2\xi\omega/\omega_0}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]} \end{cases}, \quad (6)$$

由于质量块对被测物体之间的相对位移 x_t 就是压电元件受惯性力后产生的变形。设 F 为作用于压电元件上的惯性力, 由虎克定理有:

$$F = K(x_M - x) = Kx_t = 2kx_t, \quad (7)$$

由惯性力产生的压电效应有:

$$Q = d_{11}F = d_{11}Kx_t = 2kd_{11}x_t, \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)有:

$$\left| \frac{Q}{a} \right| = \frac{2kd_{11}/\omega_0^2}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + (\frac{2\xi\omega}{\omega_0})^2}}, \quad (9)$$

$K = M\omega_0^2, \xi^2 = C^2/(4MK)$ 代入式(9)有:

$$\left| \frac{Q}{a} \right| = \frac{Md_{11}}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + \frac{C^2}{MK}(\frac{\omega}{\omega_0})^2}}, \quad (10)$$

当 $\omega \ll \omega_0$, 即 $\omega/\omega_0 \approx 0$, 由式(9)、(10)有:

$$Q = 2kd_{11}a/\omega_0 = (m + 2m_0)d_{11}a, \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 只有当 $m \gg 2m_0$ 时才能忽略压电元件质量 m_0 对传感器的特性的影响。本差动式压电加速度传感器相对于普通压电式加速度传感器 $Q = kd_{11}a/\omega_0$ 而言, 其输出幅度和灵敏度是传统压电式加速度传感器的 2 倍。

4 信号处理电路

由于压电传感器的内阻很高, 且输出的信号微弱, 因此一般不能直接连接数字电压表直接显示和记录, 需要经过二次仪表进行阻抗变换和信号放大。根据压电传感器的等效电路可知, 压电传感器的前置放大部分有电压放大器和电荷放大器两种形式, 前者电路简单, 但与之配接的压电传感器的电压灵敏度随电缆长短、传感器自身电容

的变化而变化, 后者不但可以克服以上缺点, 还能克服因传感器绝缘电阻的下降而恶化的测量系统的低频特性的缺点。为了简化该传感器的测试电路, 实现对低频振动信号的测试, 项目研究中设计了差动式电荷放大器。

差动式电荷放大器主要由两个相同的电荷转换级、信号调理级和一个差动放大电路组成, 如图 3 所示。研究差动式电荷放大器的特性实质上就是分析电荷转换级的特性^[19]。

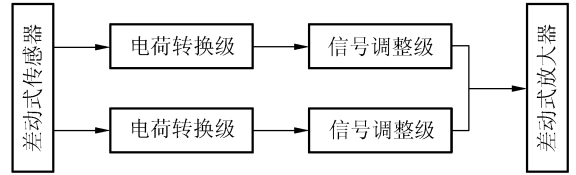


图 3 差动式电荷放大器框图

Fig. 3 Block diagram of differential charge amplifier

设 R_i 为运算放大器的差模输入电阻, R_o 为运算放大器的输出电阻, R_c 为导线的绝缘电阻, 反馈电导为 $G_f (G_f = 1/R_f)$ 。根据图 4 所示的电荷转换级交流等效电路可以得到电荷变换级的交流电路参数应该满足下式:

$$\dot{U}_{sc} \approx -j\omega \dot{Q} / (G_f + j\omega C_f), \quad (12)$$

当反馈电导增加到 $G_f = \omega C_f$ 时, 此时电荷放

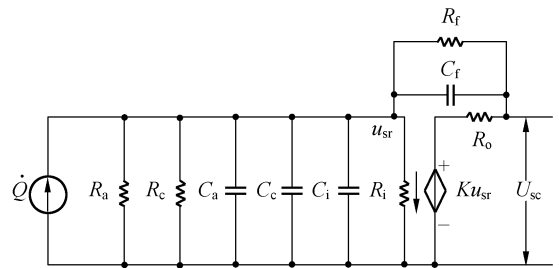


图 4 交流等效电路

Fig. 4 AC equivalent circuit

大器的下限频率 f_L 主要由 C_f 和 R_f 决定, 即下限频率 $f_L = 1/2\pi R_f C_f$ 。设 K 为运算放大器的增益, V_{id}, V_{os} 分别为运算放大器的差模输入电压和输入失调电压, I_{os}, I_B 分别为运算放大器的输入失调电流和输入偏置电流, ρ 为共模抑制比, V_{cm} 为共模输入电压, R_p 为平衡电阻。

当忽略 R_o 时, 根据图 5 所示的电荷转换级直流等效电路可得出如下方程组:

$$\begin{cases} u_o = -A_{od}(V_{id} - \frac{V_{cm}}{\rho}) \\ I_r = I_f - I_i = \frac{U_{sc} - (V_{id} + V_{os})}{R_f + R_p} \\ I_i = \frac{V_{id}}{r_{id}} + I_B - \frac{I_{os}}{2} \end{cases}, \quad (13)$$

当电荷放大级的各项性能指标满足： $K \gg 1, \rho \gg 1, R_a // R_c \gg R_f, r_{id} \gg R_f + R_p, r_{id} \gg R_f / K$ 时，设

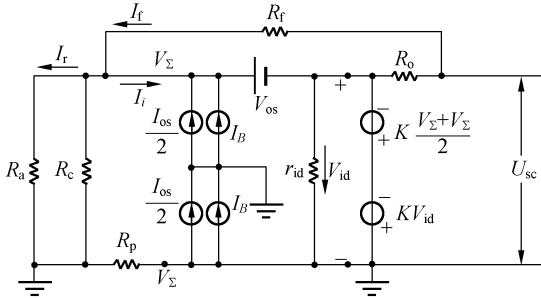


图 5 直流等效电路
Fig. 5 DC equivalent circuit

C_f 为电荷放大器的反馈电容，传感器的绝缘电阻 R_a 和运算放大器的输入阻抗 R_i 均在 $T\Omega$ 级以上， $K \approx \infty$ ，差动式电荷放大器的输出由式(14)决定：

$$U_o = -2Q/C_f, \quad (14)$$

图 6 是根据以上理论设计的单路电荷转换级电路图。

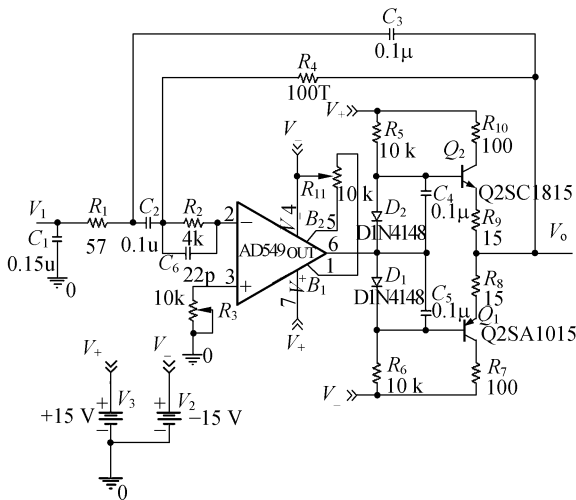


图 6 电荷转换级电路图
Fig. 6 Circuit of charge converter

5 实验与讨论

测试实验中运用的主要设备有：Tektronix TDS 224 型示波器两台，普通加速度计一只，CSY-2000 型传感器实验台(有效激振频率 1~16 Hz)，试制的差动式压电加速度传感器一只，研制的差动式电荷放大器一台。实验时将激振信号作为标准传感器的输出信号。

图 7 是激振信号为正弦信号时，该传感器接入差动式电荷放大器后从信号调理级输出的两路信号，其中，通道 1、2 分别为该传感器上下压电元件的输出曲线。可以看出，该传感器的上下两部分压电元件的输出信号的幅度相等，相位相差 90° 。

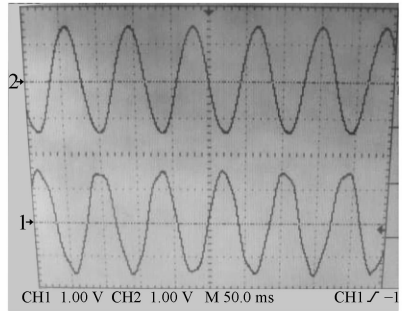


图 7 传感器输出结果
Fig. 7 Output of sensor

表 1 是激振信号频率为 10 Hz 时，通过调节激振信号的幅度，得到的普通加速度计和差动式压电加速度传感器的输出电压值，从测量结果得到普通加速度计(式(15))和本加速度传感器(式(16))的输入输出线性关系式。结合图 7 可以看出，由于试验中用的差动式压电加速度传感器的惯性质量块并不满足 $m \gg 2m_0$ 的条件，加之上下压电元件未能共用一根传输导线，使得通道 1 输出信号在峰值段少许失真，在相同条件下，其输出信号幅度只能接近普通加速度计输出幅度的 2 倍。

$$y = 0.08614x - 0.01714, \quad (15)$$

$$y = 0.17280x - 0.06407. \quad (16)$$

该传感器的幅度响应最大偏差为 0.0155，最大相对误差为 5.8%，线性度为 0.1%，普通加速度计的幅度响应最大偏差为 0.0346，最大相对误差为 13%，线性度为 0.23%。虽然振动台精度有

限(有效测试范围 $>3\text{ g}$),但从测试数据仍然可以看出:本差动式加速度传感器的测试精度是普通加速度计的2倍。

表1 幅度测试结果

Tab.1 Amplitude test results

激振信号(V)	普通加速度计(V)	普通加速度计拟合值(V)	普通加速度计相对误差	本加速度计(V)	本加速度计拟合值(V)	本加速度计相对误差
1.0	0.070	0.0690	1.5%	0.115	0.1087	5.8%
2.0	0.135	0.1551	13%	0.275	0.2815	2.3%
3.0	0.245	0.2413	1.5%	0.460	0.4543	1.3%
4.0	0.350	0.3274	6.9%	0.620	0.6271	1.1%
5.0	0.410	0.4136	0.9%	0.790	0.7999	1.2%
6.0	0.495	0.4997	0.9%	0.985	0.9727	1.2%
7.0	0.570	0.5858	2.7%	1.130	1.1455	1.4%
8.0	0.670	0.6720	0.3%	1.310	1.3183	0.6%
9.0	0.780	0.7580	2.9%	1.500	1.4911	0.6%
10	0.830	0.8440	1.7%	1.650	1.6639	1.8%
11	0.965	0.9304	3.7%	1.850	1.8367	0.7%
12	1.000	1.0650	1.6%	2.000	2.0095	0.5%
13	1.095	1.1027	0.7%	2.200	2.1923	0.3%
14	1.210	1.1888	1.8%	2.350	2.3551	0.2%
15	1.255	1.2750	1.6%	2.530	2.5279	0.08%

表2是激振信号幅度等于10V,在不同频率下得到的差动式压电加速度传感器的输出信号的频率值,可以看出:相对标准激振信号而言,其最

大频率响应偏差为0.072,最大相对误差为3.8%,如果消除振动台对测试的影响,其最大频率响应偏差为0.048,最大相对误差为1.0%。

表2 频率测试结果

Tab.2 Frequency test results

激振信号频率(Hz)	本传感器响应频率(Hz)	相对误差	激振信号频率(Hz)	本传感器响应频率(Hz)	相对误差
1.058	1.018	3.78%	9.488	9.484	0.04%
2.080	2.051	1.39%	10.005	9.957	0.48%
3.102	3.030	2.3%	11.025	11.004	0.19%
4.051	4.008	1.0%	12.016	12.011	0.04%
5.041	5.000	0.8%	13.036	13.018	0.14%
6.022	6.020	0.03%	14.056	14.026	0.21%
7.053	7.044	0.1%	15.116	15.116	0.00%
7.959	7.958	0.01%	16.037	16.025	0.07%

表 3 是激振信号幅度和频率分别为 10 Hz、10 V 时,差动式压电加速度传感器输出信号的多 次测量结果,可以得到其平均值为 1.651,进而求得传感器在该点的重复性为 1.27%。

表 3 重复性测量结果

Tab. 3 Repeatability test results

测量次数	正行程测量值(V)	反行程测量值(V)
1	1.65	1.66
2	1.64	1.65
3	1.66	1.65
4	1.65	1.66
5	1.65	1.65
6	1.66	1.66
7	1.63	1.64
8	1.65	1.65
9	1.67	1.65
10	1.65	1.64

6 结 论

本文根据实际测试的要求,提出并设计了一种采用单惯性质量块对加速度实现差动式测量的差动式压电加速度传感器和处理电路,并介绍了传感器的工作原理,推导了其数学模型和其处理电路的设计指标。实验结果证明:处理电路的设计指标正确;传感器的线性度为普通压电加速度计的 1/2,灵敏度约是普通压电加速度传感器的 2 倍,重量约为文献[12]中所述差动式加速度传感器的 1/2,频率响应相对误差优于 3.8%,重复性优于 0.015,其结构简单,易于加工制造,温度瞬变特性好,抗环境(如温度、湿度)变化能力强,基本满足设计的要求。

参考文献:

- [1] 解旭辉,刘危,张明亮,等.微惯性测量组合关键技术与应用[J].光学精密工程,2002,10(2):154-159.
XIE X H, LIU W, ZHANG M L, *et al.*. Key technologies and applications of micromechanical inertial measurement units[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(2):154-159. (in Chinese)
- [2] 刘危,解旭辉,李圣怡.微机械惯性传感器的技术现状及展望[J].光学精密工程,2003,11(5):425-429.
LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(5):425-429. (in Chinese)
- [3] 刘国嵩,赵宏伟,曾平,等.新型压电步进型精密直线驱动器[J].光学精密工程,2005,13(3):291-297.
LIU G S, ZHAO H W, ZENG P, *et al.*. Novel sophisticated stepping linear piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3): 291-297. (in Chinese)
- [4] 杨树臣,刘建芳,杨志刚,等.外驱动双向推力型压电步进精密驱动器研究[J].光学精密工程,2006,14(4):652-657.
YANG SH CH, LIU J F, YANG ZH G, *et al.*. Study on outer driving precision PZT linear step actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4): 652-657. (in Chinese)
- [5] 刘向,王连明,葛文奇.用线性加速度计实现无陀螺平台稳定的理论研究[J].光学精密工程,2004,12(1):21-25.
LIU X, WANG L M, GE W Q. Application of linear accelerometer for stabilization of nongyroscopic platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):21-25. (in Chinese)
- [6] 张春京,齐玉祥.加速度计的设计和应用领域[J].导航与控制,2003,2(3):60-65.
ZHANG CH J, QI Y X. Accelerometer designs and fields of application[J]. *Navigation and Control*, 2003, 2(3): 60-65. (in Chinese)
- [7] 李科杰.新编传感器技术手册[M].北京:国防工业出版社,2002:598-598.
LI K J. *New sensor technology manual*[M]. Beijing: National Defence Press, 2002:598-598. (in Chinese)
- [8] 田延岭,张大卫,闫兵.二自由度微定位平台的研制[J].光学精密工程,2006,14(1):94-99.
TIAN Y L, ZHANG D W, YAN B. Development of a 2-DOF micropositioning table[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):94-99. (in Chinese)
- [9] IULA A, LAMBERTI N, PAPPALARDO M. Analysis and experimental evaluation of a new planar piezoelectric ac-

- celerometer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999,4(2): 207-212.
- [10] LEVINZON F A. Fundamental noise limit of piezoelectric accelerometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2004, 4(1): 108-111.
- [11] LEVINZON F A. Noise of piezoelectric accelerometer with integral FET amplifier[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005,5(6): 1235-1242.
- [12] WLODKOWSKI P A, DENG K, KAHN M. The development of high-sensitivity, low-noise accelerometers utilizing single crystal piezoelectric materials[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001,90:125-131.
- [13] 彭军. 传感器与检测技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
PENG J. *Sensors and detecting technology*[M]. Xi'an: Xi'an University Press,2003. (in Chinese)
- [14] 金世龙, 李晓红, 杨开勇, 等. 四频差动激光陀螺法拉第旋光片的加工[J]. *光学精密工程*, 2006, 2(1):22-25.
JIN SH L, LI X H, YANG K Y, *et al.*. Arts of faraday effect element of the four model RLG[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,2(1):22-25. (in Chinese)
- [15] 安迪生. 差动压力传感器[J]. *国外传感技术*, 2002,2:54-56.
AN D SH. Differential pressure force sensor[J]. *Foreign Transcluction Technology*, 2002,2:54-56. (in Chinese)
- [16] 粟合营, 俞梅, 徐文胜, 等. 差动式压电加速度传感器[P]. 中国:ZL01218061.0,2002.
LI H Y, YU M, XU W SH, *et al.*. *The differential piezoelectric accelerometer* [P]. China:ZL01218061.0, 2002. (in Chinese)
- [17] 邱飞燕, 赵采凡. 压电加速度计[J]. *导航与控制*, 2005,4:57-59.
QIU F Y, ZHAO C F. Piezoelectric accelerometer[J]. *Navigation and Control*, 2005,4:57-59. (in Chinese)
- [18] 刘俊, 刘京诚, 秦岚, 等. 一种差动式压电加速度传感器[P]. 中国:200610054356.9,2006.
LIU J, LIU J CH, QIN L, *et al.*. *A differential piezoelectric accelerometer* [P]. China: 200610054356.9,2006. (in Chinese)
- [19] 刘俊. 基于差动式压电多维力(6维)传感器的研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.
LIU J. *Research based on the differential piezoelectric multi-axis sensor* [D]. Chongqing:Chongqing University, 2005. (in Chinese)

作者简介:刘俊(1977-),男,四川遂宁人,博士研究生,主要从事精密仪器及机械、传感器技术和机器人技术方面的研究。E-mail: junliu@cqu.edu.cn。