

高应变载荷下压电传感器性能研究

王培德,郑跃滨,杨 雷,雷振坤,武湛君

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116023)

摘 要:压电传感器具有优良性能,可以同时应用于主、被动式结构健康监测技术中,但由于高应变载荷下压电传感器的性能会受到影响,限制了在实际工程中的应用。该文针对高应变载荷下传感器性能进行研究,提出通过增加胶层厚度和减小弹性模量,增强压电传感器的高应变承受能力。定义了阻抗信号变化指数和阻抗信号突变载荷,对压电传感器性能进行表征。实验结果表明,胶层厚度增加,弹性模量减小,会使阻抗信号突变载荷增大,压电传感器高应变承受能力提高。

关键词:结构健康监测;压电陶瓷传感器;高应变载荷;胶层;应变传递

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Study on the Performance of Piezoelectric Sensor Under High Strain Load

WANG Peide, ZHENG Yuebin, YANG Lei, LEI Zhenkun, WU Zhanjun

(State Key Lab. of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Piezoelectric sensor can be used in active and passive structural health monitoring for its excellent properties, but the applications in practical engineering is limited for the bad performance under high strain load. The performance of PZT sensor under high strain load is investigated in this paper. A new method is proposed to enhance the affordability of high strain load by increase the adhesive layer thickness or decrease the modulus. A variation index and mutation load of impedance signal is defined to characterize the performance of the piezoelectric sensor under high strain load. The experiment results show that the mutation load of impedance signal increases with the increase of the adhesive layer thickness and the decrease of the modulus, thus the affordability of high strain load is enhanced.

Key words: structural health monitoring; PZT sensor; high strain load; adhesive layer; strain transfer

0 引言

压电传感器因具有正逆压电效应,可以广泛应用于主、被动结构健康监测技术中^[1-3],而得到了广泛的重视和发展。

由于压电传感器在服役过程中会承受各种复杂的载荷,尤其结构件上的高应变区域,会影响压电传感器自身性能,使阻抗信号发生改变,进而影响监测结果的可靠性。Doane 研究发现高应变载荷会使传感器的阻抗信号发生改变,当载荷达到 $7\ 200\ \mu\text{E}$ 时压电传感器断裂^[4]。Lin 等研究发现, $4\ 000\ \mu\text{E}$ 的拉伸载荷下,压电传感器阻抗信号发生了明显的改变^[5]。Acellent 公司对他们生产的压电陶瓷换能器(PZT)集成 SMART Layer™ 进行了疲劳加载实验,结果表明疲劳载荷会使压电传感器的 Lamb 波信号幅值降低^[6]。

现有研究工作很少考虑安装方式对高应变区传

感器性能的影响,忽略了胶层这一影响因素。Qing 研究发现,胶层厚度和弹性模量的改变会影响压电传感器的阻抗信号,使谐振频率发生改变,但未考虑载荷的影响^[7]。高应变载荷下,胶层的改变会影响结构传递到压电传感器上的应变,进而影响压电传感器的性能,影响监测结果。

本文将对高应变载荷下压电传感器的性能进行研究,同时考虑胶层和载荷的影响。对高应变载荷环境下结构-胶层-传感器之间的应变传递进行分析。并在此基础上,设计两组实验对分析结果进行验证,探索胶层厚度和弹性模量对压电传感器应变承载能力的影响。

1 理论分析

高应变载荷下压电传感器性能受到影响,是由于结构载荷通过胶层传递到压电传感器上,使压电传感器产生变形。为了提高压电传感器高应变承受

收稿日期:2015-09-21

基金项目:中国国家自然科学基金资助项目(11172053,91016024,51475067)

作者简介:王培德(1990-),男,河北廊坊人,硕士生,主要从事结构强度分析与结构健康监测技术的研究。E-mail: wangpd1990@163.com。雷振坤(1973-),男,教授,博导,主要从事声光测力学的研究。E-mail: leizk@163.com。

能力,可以通过降低胶层的应变传递效率来实现。

影响应变传递的因素主要有胶层的厚度和弹性模量、传感器自身的厚度和弹性模量及传感器与结构的刚度比^[8]。Crawley 和 de Luis 最先建立了结构和压电传感器应变传递的数学模型,假定应变在结构和压电传感器上均匀分布^[9]。然后,Crawley 和 Anderson 对该模型进行了修正,假设结构和压电传感器上的应变线性分布^[10]。

然而现有模型主要用于分析压电传感器作为驱动器时的应变传递情况,高应变载荷下需要对问题进行重新求解。

监测系统如图1所示,对结构进行受力分析,假定基底结构上的应变随厚度线性变化,应力平衡单元和应变分布如图2、3所示,可列出平衡微分方程^[11]为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_p}{\partial x} + \frac{\tau_s}{t_p} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_b^o}{\partial x} - \frac{w_p}{w_b t_b} \tau_s = 0 \\ \frac{\partial \sigma_b^u}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_b^o}{\partial x} + \frac{3w_p \tau_s}{w_b t_b} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_p 、 τ_s 分别为压电传感器和胶层结构的正应力和切应力; t_p 和 t_b 分别为压电传感器和基底结构的厚度; w_p 和 w_b 分别为压电传感器和基底结构在垂直纸面方向的尺寸,上标u和o分别为结构的上表面和轴线。

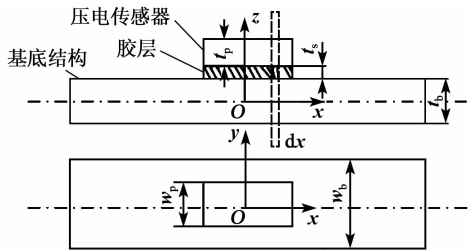


图1 监测结构示意图

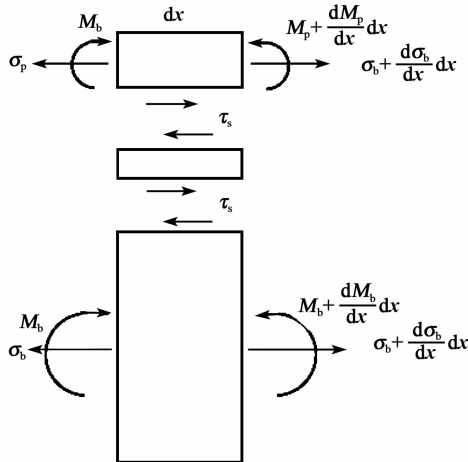


图2 应力平衡单元

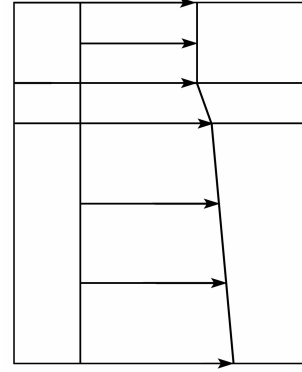


图3 截面应变分布

式(1)通解为^[11]

$$\epsilon_p(x) = C_1 + D_1 x + \frac{\Psi_s}{t_s^2 \Gamma^2} (A \cosh(\Gamma x) + B \sinh(\Gamma x)) \quad (2)$$

$$\epsilon_b^u(x) = C_2 + D_2 x - \frac{\alpha \Psi_s}{\Psi_b t_s^2 \Gamma^2} (A \cosh(\Gamma x) + B \sinh(\Gamma x)) \quad (3)$$

$$\epsilon_b^o(x) = C_3 + D_3 x - \frac{\Psi_s}{\Psi_b t_s^2 \Gamma^2} (A \cosh(\Gamma x) + B \sinh(\Gamma x)) \quad (4)$$

其中

$$\Gamma^2 = \frac{\Psi_s}{t_s^2} \left(\frac{\Psi_b + \alpha}{\Psi_b} \right) \quad (5)$$

$$\Psi_b = \frac{E_b t_b w_b}{E_p t_p w_p} \quad (6)$$

$$\Psi_s = \frac{G_s t_s w_s}{E_p t_p w_p} \quad (7)$$

式中: t_s 为胶层厚度; E_b 为基底结构的杨代模量; G_s 为基底结构的剪切模量; Γ 和 Ψ 分别为剪力滞后系数和刚度比; $\alpha=4$ 。边界条件^[12]

$$\begin{cases} \epsilon_p(\pm r) = 0 \\ \epsilon_b^o(\pm r) = \epsilon_b^u(\pm r) = \epsilon_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: r 为传感器1/2长度; ϵ_0 为传感器两端位置处基底结构的应变,代入式(2)~(4)可得传感器和基底结构上应变为

$$\epsilon_p(x) = \frac{\Psi_b \epsilon_0}{\alpha + \Psi_b} - \frac{\epsilon_0 \Psi_b}{(\Psi_b + \alpha) \cosh(r\Gamma)} \cosh(\Gamma x) \quad (9)$$

$$\epsilon_b^u(x) = \frac{\Psi_b \epsilon_0}{\alpha + \Psi_b} + \frac{\alpha \epsilon_0}{(\Psi_b + \alpha) \cosh(r\Gamma)} \cosh(\Gamma x) \quad (10)$$

$$\epsilon_b^o(x) = \frac{\alpha + \Psi_b - 1}{\alpha + \Psi_b} \epsilon_0 + \frac{\epsilon_0}{(\Psi_b + \alpha) \cosh(r\Gamma)} \cosh(\Gamma x) \quad (11)$$

2 数值计算

为了分析胶层对应变传递的影响,定义压电传

传感器上表面最大应变与基底结构轴线方向上应变的比值为应变传递系数 β , 表征不同胶层下的应变传递情况。给定结构的基本参数如表 1 所示, 利用 MATLAB 程序编程, 计算不同胶层厚度和胶层弹性模量时的应变传递效率, 结果如图 4、5 所示。

表 1 结构模型参数

	尺寸/mm	弹性模量/GPa	泊松比
铝板	100×20×3	70	0.33
胶层	∅8×(0.1~0.5)	1~5	0.30
传感器	∅8×0.45	80	0.30

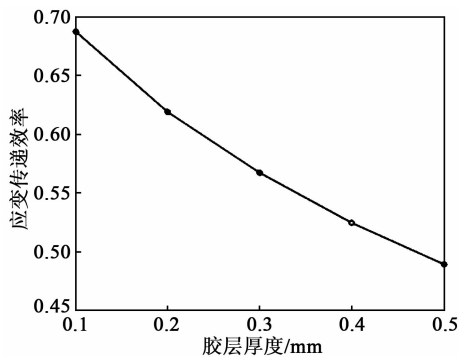


图 4 胶层厚度对应变传递效率的影响

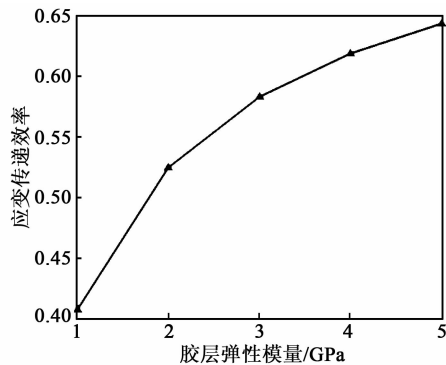


图 5 胶层弹性模量对应变传递效率的影响

从图 4、5 可知, 通过增加胶层厚度和减小胶层剪切弹性模量可降低应变传递效率, 进而提高压电传感器的高应变承受能力。

3 实验设置

理论分析和数值计算只考虑了长度和厚度方向, 没有将垂直纸面方向的应变考虑进去。在实际工程应用时, 还可能会出现各种问题, 所以在上述分析的基础上, 我们还需进行相关实验验证。

为了对比分析胶层厚度和胶层弹性模量对压电传感器高应变承受能力的影响, 设计了两组实验, 选择两种不同的环氧树脂胶, 每组 5 种胶层厚度进行对比。利用压电传感器的阻抗信号进行性能表征,

通过对比不同载荷下传感器阻抗信号, 分析胶层厚度、弹性模量对压电传感器性能的影响, 对理论分析和数值计算的结果进行验证。

拉伸试件材料为 2024-T3 铝合金, 弹性模量 72.4 GPa, 屈服强度 345 MPa。试件厚度 3 mm, 尺寸如图 6 所示。试件上共粘贴 5 个压电传感器(见图中 ①~⑤), 传感器型号为 PZT-5A, 直径为 ∅8 mm, 厚为 0.45 mm, 材料性能如表 2 所示。传感器粘贴前需确定安装位置, 使传感器位于同一条直线上, 且间隔 35 mm, 避免相互间发生干扰。

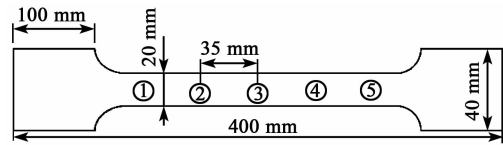


图 6 拉伸试件尺寸示意图

表 2 压电传感器材料属性

	弹性模量/ MPa	密度/ (g/mL)	压电常数		介电常数
			d_{33}	d_{31}	
PZT-5A	74 000	7.6	450	175	1 800

传感器粘贴时, 利用厚为 25 μm 的聚酰亚胺薄膜作为垫片, 使用打孔机在聚酰亚胺薄膜上打出直径 ∅7 mm 的圆孔, 将垫片圆孔中心放置在传感器安装位置处, 环氧树脂胶滴入圆孔中心后, 将直径 ∅8 mm 的传感器固定到圆孔上方, 并且利用金属柱压实, 使环氧树脂充满圆孔。通过控制薄膜层数, 将 ①~⑤号传感器胶层厚度控制为 25 μm 、50 μm 、75 μm 、100 μm 、125 μm 。

实验采用的两种环氧树脂胶为 Hysol® EA 9395 和 Araldite® 2011, 其性能分别如表 3 所示。根据两种环氧树脂胶的使用说明, Hysol® EA 9395 固化温度为 66 $^{\circ}\text{C}$, 固化时间为 1 h; Araldite 固化温度 120 $^{\circ}\text{C}$, 固化时间为 4 h。传感器完成固化后, 进行导线焊接。

表 3 环氧树脂胶材料属性

	Hysol® EA 9395	Araldite® 2011
剪切模量/MPa	1 543	1 200
强度/MPa	27.6	25.0

实验过程中, 使用 100 kN 的全数字电液伺服动静实验系统对试件进行加载, 利用引伸计测量试件应变, 进行加载控制。利用 WK6500B 阻抗分析仪对传感器的阻抗信号进行采集, 采样区间为 10 kHz~1 MHz, 试验系统如图 7 所示。

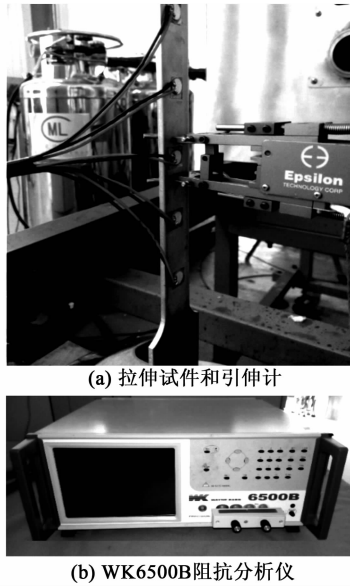


图7 试验系统

4 结果与讨论

4.1 阻抗信号幅值及谐振频率分析

粘接剂为 Hysol® EA 9395 时,不同胶层厚度传感器的阻抗信号如图 8 所示,由于拉伸载荷作用下阻抗信号的变化主要集中在谐振频率(500 kHz)附近,所以本文针对 250~820 kHz 频域范围的信号进行分析。

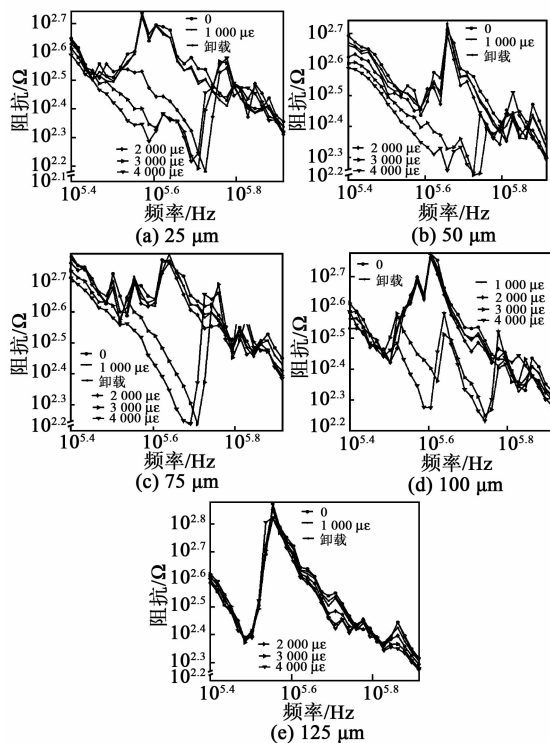


图8 不同胶层厚度的传感器阻抗信号(Hysol® EA 9395)

由图 8(a)可知,当应变为 1 000 $\mu\epsilon$ 时阻抗信号的

变化不明显。当应变达到 2 000 $\mu\epsilon$ 后,阻抗信号发生了突变,信号的谐振频率也发生了改变^[13]。由图 8 (b)~(d)可知,阻抗信号随应变增加同样出现了突变的情况,但突变发生在应变为 3 000 $\mu\epsilon$ 时。当胶层厚度为 125 μm 时,阻抗信号并未随应变的增加而发生突变。上述实验结果证明了应变传递效率随着胶层厚度的增加而减小。卸载后的阻抗信号与加载前的阻抗信号基本重合,谐振频率基本恢复到初始状态,说明加载过程并未对传感器造成永久性的损伤。

图 9 是粘接剂为 Araldite® 时,不同胶层厚度下传感器阻抗信号。当胶层厚度小于 125 μm 时,随着应变增加,传感器阻抗信号同样出现了谐振频率改变的情况。且胶层厚度较小时,卸载后,阻抗信号与加载前的阻抗信号有较明显的变化,如图 9(a)~(c)所示。胶层厚度为 125 μm 时,加载过程中阻抗信号未发生突变。与前一组信号对比可发现,加载条件及试件相同的条件下,卸载后阻抗信号未完全恢复到初始状态主要是由于胶层性能的影响,Araldite® 环氧树脂胶强度较低,在加载过程中可能会产生更多的损伤,导致卸载后阻抗信号没有恢复到加载前的状态。

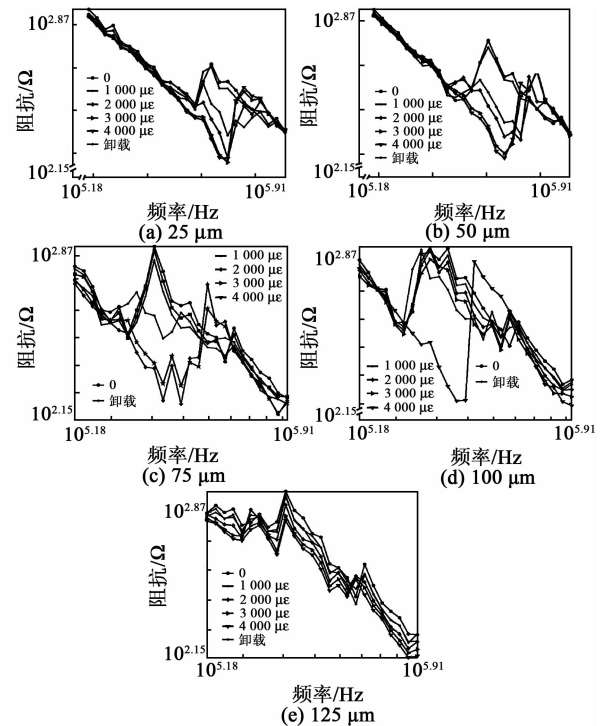


图9 不同胶层厚度的传感器阻抗信号(Araldite®)

4.2 胶层影响性分析

为了直观的表征载荷对传感器阻抗信号的影响,定义传感器阻抗信号变化指数 V ,计算传感器谐振频率局部范围内信号变化指数,对信号的稳定性

进行表征,计算方式为

$$V_h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(I_h(n) - I_h^0(n))^2}{I_h^0(n)^2}} \quad (12)$$

式中: N 为阻抗信号采样点数; I_h 是胶层厚度为 h 时的信号幅值; I_h^0 为加载前信号的幅值。分别对两组实验阻抗信号数据进行计算后,得到的结果如图10所示。

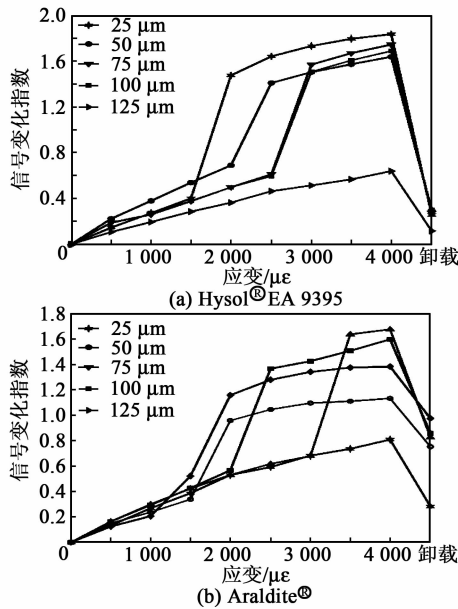


图10 传感器阻抗信号变化指数

由图10可知,随着载荷增加阻抗信号变化指数也在逐渐增大。①~④号传感器的阻抗信号变化指数都出现了突然增大的情况,⑤号传感器阻抗信号未出现突变的情况。定义传感器阻抗信号变化指数突然增大的载荷为阻抗信号突变载荷,对传感器监测系统高应变承受能力进行表征,不同胶层厚度时,阻抗信号突变载荷如表4所示。由于加载时每隔500 $\mu\epsilon$ 进行一次数据采集,所以实验结果出现了胶层厚度不同,而阻抗信号突变载荷相同的情况,但这并不影响规律性的体现。

表4 阻抗信号突变载荷

胶层厚度/ μm	阻抗信号突变载荷/ $\mu\epsilon$	
	Hysol® EA 9395	Araldite®
25	2 000	2 000
50	2 500	2 000
75	3 000	2 500
100	3 000	3 500
125	未突变	未突变

由表4可知,随胶层厚度增加传感器阻抗信号突变载荷也在逐渐增大。当胶层厚度增加到12 μm 时,

4 000 $\mu\epsilon$ 的拉伸载荷并未使传感器阻抗信号发生突变,即阻抗信号突变载荷大于4 000 $\mu\epsilon$ 。胶层厚度的增加可提高传感器监测系统的高应变承受能力,主要是由于应变传递效率随胶层厚度增加而降低^[8]。因此,可以通过增加胶层厚度或选择低弹性模量的环氧树脂胶来降低应变传递效率,减小传递到传感器上的应变,使传感器监测系统可以应用于结构的高应变区域,提高结构高应变区监测结果的可靠性。

卸载后阻抗信号变化指数并未回复到0,胶粘剂为Araldite®时残余阻抗信号变化指数更大。两个试件经历完全相同的加载过程,并且在加载过程中试件保持弹性变形,卸载后弹性变形消失。两个试件的区别主要是粘接剂的不同,因此,残余阻抗信号变化指数可能是由粘接剂损伤造成。在拉伸过程中,由于边缘处应力集中胶层可能会发生断裂或脱粘等情况,Hysol® EA 9395环氧树脂胶的强度为27.5 MPa,Araldite®环氧树脂胶的强度为25 MPa,所以拉伸载荷作用下Araldite®胶层更易出现损伤,导致卸载后残余阻抗信号变化指数更大。通过提高胶层的强度,可以减少胶层在高应变载荷作用下产生的损伤,减小其对监测结果的影响,提高结构高应变区监测结果的可靠性。

5 结束语

本文针对高应变载荷下压电传感器的性能进行了研究。由于胶层的应变传递作用,高应变载荷下传感器的性能受到影响,阻抗信号会发生改变。理论分析发现,通过增加胶层厚度和选择低弹性模量的环氧树脂胶可降低应变传递效率,提高压电传感器在高应变载荷下的性能。

通过定义阻抗信号变化指数和阻抗信号突变载荷,表征了传感器监测系统的高应变能承受能力。实验对比不同胶层厚度、不同弹性模量时,压电传感器阻抗信号随载荷的变化。结果表明阻抗信号突变载荷随胶层厚度增加、弹性模量减小而增大,压电传感器应变承受能力得到了提高。

实验结果对理论分析结果进行了验证,使压电传感器可以应用于结构高应变的监测,扩大了使用范围,提高了监测结果的可靠性。

参考文献:

- [1] SHANKER R, BHALLA S, GUPTA A, et al. Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(16): 1841-1856.

- [2] AI D, ZHU H, LUO H, et al. An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 97-104.
- [3] 蔡金标, 李忠良, 楼旦丰, 等. 基于压电阻抗的混凝土裂缝深度发展定量研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(1): 79-84.
CAI Jinbiao, LI Zhongliang, LOU Danfeng, et al. Quantitative study on crack development in concrete based on EMI[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(1): 79-84.
- [4] DOANE J, GIURGIUTIU V. An initial investigation of the large strain and fatigue loading behavior of piezoelectric wafer active sensors[C]// San Diego, CA: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil*, 2005: 1148-1159.
- [5] LIN B, GIURGIUTIU V, POLLOCK P, et al. Durability and survivability of piezoelectric wafer active sensors on metallic structure[J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(3): 635-643.
- [6] KUHN J D. Changes in structural health monitoring system capability due to aircraft environmental factors[D]. PhD thesis: Air Force Institute of Technology, 2009.
- [7] QING X P, CHAN H L, BEARD S J, et al. Effect of adhesive on the performance of piezoelectric elements used to monitor structural health[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2006, 26(8): 622-628.
- [8] MORADI M, SIVOTHAMAN S. Strain transfer analysis of surface-bonded MEMS strain sensors[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2013, 13(2): 637-643.
- [9] CRAWLEY E F, DE LUIS J. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures[J]. *AIAA Journal*, 1987, 25(10): 1373-1385.
- [10] CRAWLEY E F, ANDERSON E H. Detailed models of piezoceramic actuation of beams[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990, 1(1): 4-25.
- [11] PARK C, WALZ C, CHOPRA I. Bending and torsion models of beams with induced-strain actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(1): 98-113.
- [12] GIURGIUTIU V. Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(4): 291-305.
- [13] 吴迪, 李继承, 林莉, 等. 考虑粘结层和阻抗解析表达式的压电阻抗模型[J]. *压电与声光*, 2012, 34(1): 61-64.
WU Di, LI Jicheng, LIN Li, et al. A modified electromechanical impedance model considering bonding layer and impedance analytical expression[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012, 34(1): 61-64.

(上接第 587 页)

- [3] 鲁浩, 位晓峰, 庞秀枝. 惯性技术在精确制导武器中的应用与发展[J]. *电光与控制*, 2007, 14(3): 45-47.
LU Hao, WEI Xiaofeng, PANG Xiuzhi. Application and development of inertial technology in precision guided weapons[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(3): 45-47.
- [4] 祝彬, 郑娟. 美国惯性导航与制导技术的新发展[J]. *中国航天*, 2008(1): 43-45.
ZHU Bin, ZHENG Juan. New development of inertial navigation and guidance technology in the United States[J]. *China Aerospace*, 2008(1): 43-45.
- [5] 张延豫, 时振彬, 李士光, 等. 新型倾角传感器设计[J]. *科技创新导报*, 2013(22): 63.
ZHANG Yanyu, SHI Zhenbin, LI Shiguang, et al. New type of angle sensor design[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2013(22): 63.
- [6] 朴林华, 崔雪梅, 王星, 等. 微机械全方位水平姿态传感器的研究[J]. *压电与声光*, 2012, 34(2): 207-209.
PIAO Linhua, CUI Xuemei, WANG Xing, et al. The research of micromachined airflow omnibearing level posture sensor[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012, 34(2): 207-209.
- [7] 林宇, 朴林华, 张福学. 全方位气体摆式倾角传感器的结构原理[J]. *电子元件与材料*, 2006, 25(5): 19-22.
LIN Yu, PIAO Linhua, ZHANG Fuxue. Structure principle of gas pendulum tilt sensor with full range[J]. *Electronic Components and Materials*, 2006, 25(5): 19-22.
- [8] 郭应时, 王畅, 张亚岐. 噪声方差对卡尔曼滤波结果影响分析[J]. *计算机工程与设计*, 2014, 35(2): 641-645.
GUO Yingshi, WANG Chang, ZHANG Yaqi. Analysis of noise variance's effect on Kalman filter result[J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 35(2): 641-645.
- [9] 关吉. 卡尔曼滤波器的 MATLAB 仿真实现[J]. *东南传播*, 2014(6): 178-181.
GUAN Ji. MATLAB simulation implementation of Kalman filter[J]. *East Spread*, 2014(6): 178-181.
- [10] 刘爱华, 李邓化, 董必政. 高精度双轴倾角检测装置的设计与实现[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(5): 51-55.
LIU Aihua, LI Denghua, DONG Bizheng. Design and implementation of high accuracy dual-axis inclination detection device[J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University (Natural Science)*, 2013, 28(5): 51-55.