

基于压电正交异性分布式 AE 技术的初步研究*

赵国旗 骆英 朱建国 顾建祖

(江苏大学理学院 镇江, 212013)

摘要 将具有压电正交异性的传感器(Orthotropic Piezoelectric Composite Materials, 简称 OPCM)作为结构健康诊断系统中的声发射传感器,通过传感器的连续分布方式和电路设计,增强了探测结构损伤的能力,并减少了测试仪器的通道数量,为实用的结构健康诊断提出了新的思路并建立了相关的理论模型。

关键词 压电正交异性 传感器 结构健康诊断 连续分布

中图分类号 TB52+6 O348.8 TB95

引言

为了保证诸如飞机、人造卫星、空间结构等高附加值产品和桥梁、高速公路、发电厂、隧道等重要的土木工程民用基础设施的可靠性,并减小其运作费用,结构健康状态的快速监测技术是保障这些设施现有生产力、降低其维护费用、避免灾害事故发生的关健举措,研究和发 展结构健康诊断(简称 SHM)技术就显得更加迫切。目前,对在役设施进行的 NDE 监测工作大部分通过手动技术操作,监测的质量取决于操作者的素质,劳动强度高,受机械停工限制,也不能可靠地记录 NDE 的数据。AE 传感器能够获得结构中最初的损伤信息,用 AE 技术来测量一个复杂结构时,往往需要配置多通道的测试仪器并且需要布置很多的专用 AE 传感器。因此,至今它们没有被广泛地应用到 SHM 中。将声发射技术(The Acoustic Emission (AE) Technique)发展应用于 SHM 中,可有效地增强对在役设施状况的监测^[1]。

本文利用具有压电正交异性的传感器接受 AE 信号。通过特殊的连接方法和电路设计构成连续型分布式传感器,它在增大探伤面积的同时,保留了单一通道特性,可成为实用 SHM 的一个关键技术。

1 OPCM 传感器的工作原理及特性^[2]

压电材料用作传感器具有响应速度快、测量精

度高、性能稳定等优点,广泛地应用于自诊断、自适应结构中。单一压电陶瓷片呈现出压电横观各向同性的特性,作为传感元件将同时感受所有方向的应力波,不具备测定特定方向应力或应力波的能力。将具有压电正交异性之特性的压电元件(压电相的 $e_{33}^p > -e_{31}^p$)粘贴在各向同性材料构件表面,应变主轴与 x 轴平行且无外加电场,则平面应变场中该元件的输出电位移 D_x 为

$$D_x = e_{xx}^p \epsilon_x + e_{xy}^p \epsilon_y = e_{33}^p \epsilon_x + e_{31}^p \epsilon_y \quad (1)$$

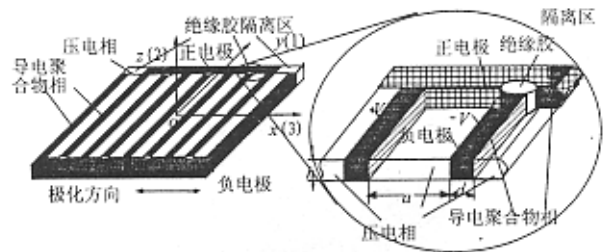


图 1 极化方向与 x 方向重合 OPCM 构造图

OPCM 材料构成的传感器用于 SHM 有如下几个优点:

(1) 在冲击载荷的作用下,OPCM 元件动态传感响应特性曲线与 PZT 元件的明显不同(图 2 所示)。PZT 元件因其具有面内各向同性,感受到的幅频响应中的谐振频率要比 OPCM 元件感受的复杂得多;而 OPCM 元件呈现正交异性传感特性,因而对冲击载荷的横向效应不敏感,对应力波的反映有方向性^[3]。

(2) OPCM 传感器保留了单一 PZT 传感器的主要刚度和带宽,同一方向传感器列阵仅可以在一

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50375069);江苏省自然科学基金重点资助项目(编号:BK2001213)。

收稿日期:2003-04-01;修改稿收到日期:2003-07-14。

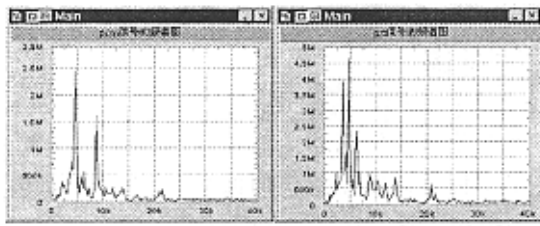


图 2 纵向冲击载荷作用下的动态幅频响应

个方向上传感。当每个传感点适当地分开并且作为独立的监测点时,其交叉式电极结构形式客观上形成了具有特定的结构振动频率带宽的滤波器,如图 3 所示。因此,用这种连续传感器可滤去掩盖 AE 响应的低频干扰。

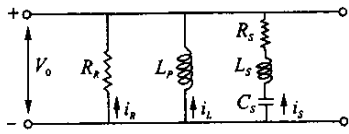


图 3 OPCM 传感器等效滤波电路

(3) 一个薄膜传感器能接受结构中在一定分布区域内的损伤信号。这省略了许多单一的传感器配线的连接,能够提高监控损伤的效率。同时,多用途传感器还能提高对结构中的裂缝、飞行器或发动机故障的监控水平及安全性,简化了维护过程。这一技术能够提高对结构的监控能力,也适合于用复合的材料制成的各种高速运行的设施。

2 OPCM 元件测量材料构件表面应变的传感方程

仿电阻应变测量原理,将 OPCM 传感元件粘贴在处于单向应力状态下的标定钢梁上,标定其应变灵敏系数 K 。设纵向灵敏系数为 $K_x = Ae_{33}^p$; 横向灵敏系数为 $K_y = Ae_{31}^p$, 则 OPCM 元件的指示应变 ϵ_x^p (与输出电位移 D 呈线性关系) 与纵向真实应变 ϵ_x 的关系为

$$\epsilon_x^p = K_x \epsilon_x + K_y \epsilon_y = K_x \epsilon_x (1 - H^p \mu_0) = K \epsilon_x \quad (2)$$

由此得到标定灵敏系数 K 与纵向灵敏系数 K_x 的关系为 $K = K_x (1 - H^p \mu_0)$ 。式(2)即为粘贴于各向同性材料构件表面的 OPCM 元件传感方程。

正交异性材料受沿材料主向(x 方向)单向应力作用时,将 OPCM 元件长轴平行粘贴于应力主向,材料主向真实应变 $\epsilon^{(x)} x, \epsilon^{(x)} y = -\mu_{yx} \epsilon^{(x)} x$, 则元件指示应变 ϵ_x^p 的表达式为

$$\begin{aligned} \epsilon_x^p &= AD_x / K = AD_x = Ae_{33}^p \epsilon_x^{(x)} + Ae_{31}^p \epsilon_y^{(x)} \\ &= K_x \epsilon_x^{(x)} + K_y \epsilon_y^{(x)} / K \end{aligned} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),则可导出正交异性材料表面的真实应变 $\epsilon^{(x)} x$ 的修正方程^[4]

$$\begin{aligned} \epsilon_x^{(x)} &= (1 - H^p \mu_0) \epsilon_x^p / (1 - H^p \mu_{yx}) \\ \sigma_x &= E_x (1 - H^p \mu_0) \epsilon_x^p / (1 - H^p \mu_{yx}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: A 为与 OPCM 传感元件的集电极形式和放大器特性有关的常数; μ_0 为标定梁的泊松比; $H^p = K_y / K_x = e_{31}^p / e_{33}^p$ 为 OPCM 传感元件的横向效应系数; $\mu_{yx} = -\epsilon^{(x)} y / \epsilon^{(x)} x$ 为宿主材料正交异性泊松比,其两个下标分别代表变形和力作用方向。

正交异性材料构件承受平面应力场作用时,在材料主向 $0^\circ, 90^\circ$ 以及 45° 等三轴方向粘贴 OPCM 元件,如图 4 所示。

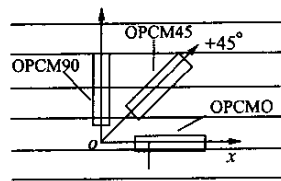


图 4 平面应力状态下 OPCM 贴片

设 $\epsilon_{0}^p, \epsilon_{45}^p, \epsilon_{90}^p$ 分别为 OPCM 元件在三方向的指示应变; $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 分别为 x 和 y 方向真实正应变和剪应变,由式(4)中的第一式可推得

$$\epsilon_x = (1 - H^p \mu_0) (\epsilon_0^p - H^p \epsilon_{90}^p) / (1 - H^p \mu^2) \quad (5)$$

$$\epsilon_y = (1 - H^p \mu_0) (\epsilon_{90}^p - H^p \epsilon_0^p) / (1 - H^p \mu^2)$$

由文献[4]中方程(3-44),可得 45° 和 135° 方向的应变为

$$\begin{aligned} \epsilon_{45} &= (\epsilon_x + \epsilon_y + \gamma_{xy}) / 2 \\ \epsilon_{135} &= (\epsilon_x + \epsilon_y - \gamma_{xy}) / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

进而有

$$\epsilon_{45}^p = [(1 + H^p)(\epsilon_x + \epsilon_y) + (1 - H^p)\gamma_{xy}] / 2(1 - H^p \mu_0) \quad (7)$$

联列求解式(7)和式(5)可得构件表面真实剪应变

$$\gamma_{xy} = (1 - H^p \mu_0) (2\epsilon_{45}^p - \epsilon_0^p - \epsilon_{90}^p) / (1 - H^p \mu^2) \quad (8)$$

由文献[5]中方程(2-16)知,正交异性材料主轴方向应力计算表达式为

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E_x}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}} (\epsilon_x + \mu_{xy}\epsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E_y}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}} (\epsilon_y + \mu_{yx}\epsilon_x) \\ \tau_{xy} &= G_{xy} \gamma_{xy} \end{aligned} \quad (9)$$

其中: G_{xy} 为正交异性材料面内剪切弹性模量。

将式(5)和式(8)代入式(9),注意 $E_x/E_y = \mu_{yx}/\mu_{xy}$, 则用指示应变表示的应力表达式

$$\sigma_x = \frac{E_x(1-H^p\mu_{xy})(1-H^p\mu_0)}{(1-\mu_{xy}\mu_{yx})(1-H^{p^2})}(\epsilon_0^p + \frac{\mu_{xy}-H^p}{1-H^p\mu_{xy}}\epsilon_{90}^p)$$

$$\tau_{xy} = \frac{G_{xy}(1-H^p\mu_0)}{1-H} (2\epsilon_{45}^p - \epsilon_0^p - \epsilon_{90}^p)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y(1-H^p\mu_{xy})(1-H^p\mu_0)}{(1-\mu_{xy}\mu_{yx})(1-H^{p^2})}(\epsilon_0^p + \frac{\mu_{yx}-H^p}{1-H^p\mu_{yx}}\epsilon_{90}^p)$$

(10)

式(10)即为应用 OPCM 元件测量正交异性材料构件表面应力的传感方程。

3 连续分布式 AE 技术的工作原理

AE 技术中,被检测的信号一般都工作在数百赫兹频率段,在结构内传播时衰减比较快,AE 传感器信号的幅值可用函数 $V = (A_0)e^{-kd}$,其中 A_0 是初始信号的幅值, K 是衰减常数。单一的 AE 传感器能够监测到的结构损伤区域有限^[5]。在对结构监测过程中,常需采用多传感器同时参与阵列监测工作。

连续分布式 AE 传感技术沿传感器分布方向有许多传感点,这些点通过电路相连,可连续输出所有点监测信号,见图 5。假设 d 是 AE 信号传播的最大距离,监测损伤时,以往需要配置 N 个信号通道的 N 个传统的传感器,现在只需用一个连续传感器代替就足够了。在图 5 所示的传感器阵列中,仅需配置 $3n$ 个数据采集通道就可完成对 n^2 检测区域的损伤监测工作。由前面得到的式(5),式(7)和式(10),可依据测试数据判断出结构中的损伤的具体位置及损伤强度的大小。

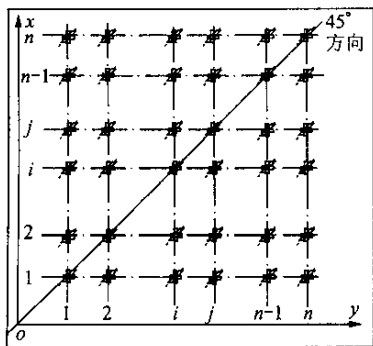


图 5 连续分布式传感器

连续分布式 AE 传感器阵列能够覆盖有着声学路径的一块很大的面积,在保留单一通道特性的同时,能明显地简化 AE 仪器,并且为实际的 SHM 形成一个关键的技术。该技术既适用于已在役的结构,也可用于在建的设施。然而,这类技术要实用化,还有许多技术难题需要人们去克服和解决。

4 结束语

连续分布式传感器通过特殊的传感点布置,增大了单个传感器探测损伤的面积,能够依据列阵分布判断损伤位置及强度。尽管传统的 AE 传感器适合在一些“敏感点”对飞行中的裂缝监控,但是这个技术却不容易监控复杂结构中的多个位置,特别是监测相对较小的裂缝生长。使用连续分布式传感器克服了这一限制。同时,连续分布式传感器还减少了在使用传统的 AE 传感器中存在的硬件和通讯限制。通过特殊的电路设计,这些传感器类似于“神经”,能够从裂缝的传播中滤出需要的高频波。

将这种传感器层合到复合结构中或粘贴在金属结构的表面,可以在设备运行过程中收集有关损伤的 AE 数据,并利用附属的或集成的传感器系统自动地记录下损伤的位置、发生的时间。当损伤出现时自动系统就会提示操作人员或者技术人员,因而能够及时地并更为成功地发现损伤,从而提高了设备的安全可靠性。

参 考 文 献

- 1 宁志威,孙良新. 声-超声技术在碳-碳复合材料薄板损伤检测中的应用. 振动、测试与诊断,2001,21(1):15~20
- 2 Luo Ying, Tao Baoqi. The OPCM strain gauges for strain and stress measurement of orthotropic material structures. Acta Mechanica Solida Sinica, 2000, 13(4): 337~345
- 3 骆 英,陶宝祺. 片状正交异性压电复合材料的研究. 材料导报,2001,15(3):59~62
- 4 李顺林. 复合材料力学引论. 上海:上海交通大学出版社,1986
- 5 Mannur J S, Anindya G, Mark J S. A continuous sensor for damage detection in bars. Smart Mater. Struct., 2002, 11: 475~488



第一作者简介:赵国旗 男,1965年10月生,讲师。现主要从事无损检测技术和智能材料与结构的研究。曾发表“1-1型 OPCM 驱动元件的研究”(《江苏大学学报(自然科学版)》2002年第23卷第5期)等论文。

E-mail: flagzhao@163.com

基于压电正交异性分布式AE技术的初步研究

作者: [赵国旗](#), [骆英](#), [朱建国](#), [顾建祖](#)
 作者单位: [江苏大学理学院, 镇江, 212013](#)
 刊名: [振动测试与诊断](#) **ISTIC EI PKU**
 英文刊名: [JOURNAL OF VIBRATION, MEASUREMENT & DIAGNOSIS](#)
 年, 卷(期): 2003, 23(4)
 引用次数: 4次

参考文献(5条)

1. [李志威, 孙良新](#) 声-超声技术在碳-碳复合材料薄板损伤检测中的应用[期刊论文]-[振动测试与诊断](#) 2001(01)
2. [Luo Ying, Tao Baoqi](#) The OPCM strain gauges for strain and stress measurement of orthotropic material structures 2000(04)
3. [骆英, 陶宝祺](#) 片状正交异性压电复合材料的研究[期刊论文]-[材料导报](#) 2001(03)
4. [李顺林](#) 复合材料力学引论 1986
5. [Mannur J S, Anindya G, Mark J S](#) A continuous sensor for damage detection in bars 2002

相似文献(3条)

1. 期刊论文 [刘琼华, 骆英, 朱步银, 朱建国, LIU Qiong-hua, LUO Ying, ZHU Bu-yin, ZHU Jian-guo](#) 基于OPCM声发射传感器的新的SHM技术 -[江苏大学学报\(自然科学版\)](#) 2006, 27(2)

提出将地震工程中反射地震法与新型正交异性压电复合材料OPCM声发射(AE)传感技术相结合,应用到土木工程结构健康监测SHM系统中.用细观力学方法分析OPCM AE传感元件的正交异性特征,此特征克服了传统的单一压电陶瓷(PZT)换能器在监测过程中无法避免的土木工程结构构件侧面反射信号干扰的难题,采用椭圆损伤定位法确定损伤位置,使反射地震法与AE传感技术应用于SHM系统成为可能.设计了性能对比实验,在混凝土试件表面分别布置PZT元件和OPCM元件,验证了新的SHM技术应用于混凝土SHM系统的可行性以及OPCM元件避免侧面反射信号干扰的能力.

2. 期刊论文 [徐红星, 骆英](#) 新型压电复合材料OPCM传感性能试验研究 -[江苏大学学报\(自然科学版\)](#) 2003, 24(5)

传统的压电传感器不具有压电正交异性,因此不适合用于检测构件特定方向应力和应变.将压电陶瓷材料与环氧树脂基材料相复合,构造出具有压电正交异性的新型压电复合材料,并对其传感性能进行标测.试验研究表明这种新型压电复合材料不但具有灵敏度高、线性度好和性能稳定等优点,可用作传感元件和驱动元件;而且还具有非常明显的正交各向异性,更适合于测定构件任一方向的应力和应变.

3. 学位论文 [沈毅](#) 压电正交异性复合材料用于AE传感的初步研究 2005

众所周知,声发射(AE)是材料在受到形变或外力作用时,迅速释放能量而产生的瞬态应力波,是进行结构诊断的重要依据.声发射的检测过程可以归纳为:从声发射源发出的应力波信号经介质传播后达到声发射传感器,输出电信号,根据这些电信号对声发射源作出正确的解释,从而达到对结构的损伤检测的目的.声发射信号的频率分量可以从次声频扩展到50MHz,因此需要传感器具有较宽的频带,高的灵敏度才能有效地抓住结构损伤的特征信号.

目前人们一般用压电材料研制传感器,因为压电材料感应应力波时具有响应速度快、频带宽、测量精度高、性能稳定等优点.然而普通压电材料作为传感元件它将同时感受所有方向应力波,不具备测定特定方向应力波的能力[1],因此也不能分辨不同方向的AE信号.

压电正交异性复合材料OPCM(OrthotropicPiezoelectricCompositeMaterials,简称OPCM)传感器除了具有普通压电复合材料柔韧性好、强度高、极限应变大、重量轻等优点外,还具有平面横观各向异性的特点,可以区分平面结构中的各个应力波分量.本文用OPCM研制AE传感元件,通过有限元方法对传感元件的构造方式,尺寸和性能等进行设计和优化,包括(1)研究在有限元中压电元件电极模拟方法,讨论了读取电压自由度值的可行性和优越性;(2)通过数值方法模拟结构中一种特定的AE源评价传感元件的特性,该方法具有简单,无噪声干扰的特点;(3)基于MATLAB的信号处理方法对传感元件模拟输出信号进行分析.

通过设计相关的实验方法对传感元件的正交异性特性进行检测,并把所得信号和数值模拟结果进行分析比较,在验证理论方法可行的基础上,对影响传感元件传感特性的因素作了详细的研究;并同时研究了OPCM传感元件的加工制作工艺.最后对该传感元件的应用前景作了阐述.

引证文献(4条)

1. [金挺, 孙智, 孙利民](#) 裂缝扩展声发射有限元模拟及其信号时频分析[期刊论文]-[振动测试与诊断](#) 2007(4)
2. [顾建祖, 王鑫伟, 骆英, 龚仁荣](#) 正交异性压电传感器在结构健康诊断中的应用[期刊论文]-[振动工程学报](#) 2007(4)
3. [沈毅](#) 压电正交异性复合材料用于AE传感的初步研究[学位论文]硕士 2005
4. [赵国旗, 沈毅](#) OPCM在管道监测中的AE数值模拟研究[期刊论文]-[排灌机械](#) 2004(6)