

复合材料结构实时撞击监测系统

范忠^{1,2}, 马书义², 武湛君²

(1. 台州职业技术学院 电子电气工程系, 浙江 台州 318000; 2. 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 116024)

摘要:为实时监测并评估发生在复合材料结构上的外部低速撞击, 研制了一套基于压电传感器的被动式传感系统。系统包括分布式压电传感器网络、便携式采集硬件及分析软件。压电传感器网络覆盖结构被监测区域, 并实时在线监测由于结构撞击而产生的应力波; 多通道采集硬件并行采集各传感器信号, 并以直接存储器访问(DMA)形式与分析软件进行数据交换; 撞击事件评估采用了系统辨识技术, 分析软件利用集成的系统辨识模型及获得的实时传感器数据对撞击位置和撞击载荷进行反问题求解。实验结果表明, 研制的被动式传感系统能够准确辨识发生在复合材料结构上的撞击事件, 并可有效估计撞击位置及撞击载荷历程。

关键词:复合材料结构; 撞击事件; 实时监测; 位置估计; 载荷历程

中图分类号:V214.8; TP302 **文献标识码:**A

A Real-time Impact Monitoring System for Composite Structures

FAN Zhong^{1,2}, MA Shuyi², WU Zhanjun²

(1. Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou 318000, China;

2. State Key Lab. of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A passive sensing system using piezoelectric sensors was developed for real-time monitoring and estimating the external low-velocity impact on composite structures. The system included distribute piezoelectric sensor network, portable acquisition hardware and data analysis software. Piezoelectric sensor network covered the focus areas of the structure, and real-time in situ monitoring the stress waves generated by the impact. Multi-channel acquisition hardware could parallel acquisition and recorded the sensor signals and exchange data with analysis software using direct memory access (DMA) technique. For evaluation the impact events, an improved system-identification method was integrated in the analysis software. Combining the integrated system-identification model and the obtained real-time sensor data, the analysis software would estimate the impact location and perform the inverse reconstruction of the impact force. Testing results showed that the developed passive sensing system could exactly identify the impact events on composite structures, and estimated the location and force time history effectively.

Key words: composite structures; impact events; real-time monitoring; location estimation; force time history

0 引言

复合材料结构具有比强度高、比刚度大及材料性能可设计等优点, 在航空航天等工程领域得到了广泛应用^[1]。然而, 复合材料结构在制造、维修和使用过程中将不可避免地受到外部撞击, 使结构产生目不可检的损伤, 如内部分层、基体开裂、纤维断裂等, 这将导致结构承载能力降低, 强度和稳定性退化, 严重时会引起结构的突发性破坏。因此, 实时监测复合材料结构遭受的外部撞击并对撞击事件进行评估, 对于保障结构安全性, 降低维护费等方面具有

重要意义。

通常, 外部撞击识别主要包括撞击位置确定及撞击载荷历程重构两个方面。撞击位置识别方面, 基于波达时间、波速与距离的关系来计算撞击位置是一种简单有效的方法^[2-3]。然而, 该方法在实际应用过程中要求传感器接收到的信号具有较低的噪声水平, 否则, 应力波的到达时间确定会带来较大误差进而影响撞击位置识别精度。撞击载荷历程重构方面, 章继峰等^[4-5]基于改进的等效刚度模型和非对称 Mindlin 板理论, 建立了平板型格栅结构复合材

收稿日期: 2013-09-18

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2008ZX05026); 国家自然科学基金资助项目(91016024); 教育部新世纪人才基金资助项目(NCE1-11-0055); 中央高校基本科研业务费基金资助项目(DUT12LK33); 浙江省教育厅科研基金资助项目(Y201432658)

作者简介: 范忠(1971-), 男, 湖南娄底人, 讲师, 硕士, 主要从事结构无损检测与健康评价, 结构健康监测技术的研究。

料的前向响应近似模型及其状态空间表达式,获得了较好的撞击识别效果;Peelamedu 等^[6]通过建立传感器输出与撞击载荷间的解析关系来重构载荷时间历程,但该方法不适用于各向异性的复合材料结构;Park 等^[7]提出了一种基于系统辨识技术的撞击识别法来确定撞击位置和重构撞击载荷,该方法无需构造结构的全尺度模型,且获取结构的训练数据较少,在复杂复合材料结构上的撞击实验结果表明,其能获得满意的撞击位置及撞击载荷。

现有撞击监测系统多针对原理性实验设计,通道少,集成度不高,尚难满足大型复合材料结构的实时撞击监测需求。为此,本文研制了一套基于压电传感器的被动式多通道集成监测系统。撞击事件评估采用了系统辨识技术,分析软件利用集成的系统辨识模型及获得的实时传感器数据对撞击位置及撞击载荷进行反问题求解。在玻璃纤维复合材料板上进行了系统功能验证,并对得到的撞击位置和撞击载荷进行了分析。

1 现有基础

1.1 撞击监测原理

结构承受低速撞击载荷时的响应一般认为与撞击载荷线性相关,即撞击过程中结构变形在线弹性范围内变化^[7]。图 1 为典型的结构撞击监测示意图。研究表明,对于复合材料结构的低速撞击载荷历程可用半正弦波形式来表征,只是在加载和卸载阶段略有不同^[7]。假设某一撞击载荷 f 施加于结构上的某一点 X ,该点在依据结构定义的坐标系中的位置记为 (x, y) ,则撞击发生后会产生以 X 点为波源向结构二维方向传播的应力波。布设于结构中的各传感器实时接收结构中传播的应力波,并将其转化为脉冲序列 s 。通过分析和处理各传感器接收到的脉冲响应信号,并结合相应的撞击识别算法即可评估撞击发生的位置并重构撞击载荷历程。

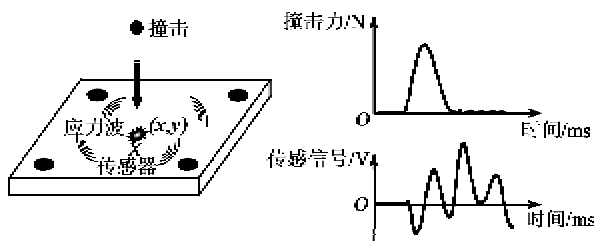


图 1 结构撞击监测原理图

1.2 基于系统辨识的撞击识别方法

基于系统辨识的被动式撞击识别方法实施过

程^[8]如下:

1) 对被监测结构施加已知撞击载荷,对应传感器网络获得的撞击响应序列,利用系统辨识技术构造系统辨识模型。

2) 真实撞击发生时,传感器网络采集结构中的应力波信号,根据结构中每个位置的传感器信号功率通过插值获得整个传感器围成区域的功率分布面并求其重心作为初始撞击位置。

3) 利用构建的系统辨识模型及获得的实时传感器信号对撞击载荷进行反问题求解。

4) 利用多个传感器重构载荷的误差最小化更新撞击位置,同时输出撞击位置及撞击载荷历程。

2 监测系统设计

监测系统主要用于应力波信号的采集与处理、撞击位置与载荷估计及监测结果的显示与存储。因此,撞击监测系统总体上由分布式传感器网络,数据采集、处理与传输硬件子系统及分析软件 3 部分组成。

2.1 分布式传感器网络

压电陶瓷传感器由于其灵敏度高,可用频率范围宽及适用性好等特点在结构健康监测领域得到了广泛应用。考虑撞击产生的应力波在结构二维方向上传播,为使传感器能对各方向的应力波均产生响应,本文选择了电场方向和极化方向一致的薄圆片型压电陶瓷晶片作为应力波接收传感器。压电晶片直径为 $\varnothing 8$ mm,厚为 0.45 mm,其通过环氧树脂粘接于被监测结构表面。

在实际复合材料结构撞击监测中,通常需在结构表面布设多个压电传感器组成分布式传感器网络,进而实现原型结构或结构重点区域的监测。压电传感器网络优化布设是获得良好监测结果的重要前提,其布设过程一般需考虑如下问题:

1) 应力波衰减:撞击产生的应力波在不同材质的复合材料结构或结构的不同区域衰减特性不同,根据结构自身特性及被监测区域结构特点合理预测应力波衰减特性,进而优化设置各压电传感器间距,有助于获得高信噪比的应力波信号。

2) 传感器与结构的耦合性能。各传感器与结构耦合的均一性将直接影响撞击识别结果的精度及可靠性。因此,各传感器在安装过程中应采取措

以尽量保证与结构的耦合性能一致,如采用相同模量的环氧树脂胶,控制胶层厚度等,在此基础上,可对安装后的各传感器性能进行补偿^[8]。

2.2 硬件子系统

硬件子系统主要完成压电传感器信号的采集,并把实时采集的数据传送至预装分析软件的PC,其由主控模块、信号调理采集模块、数据存储模块、数据传输模块及必要的电源模块组成。系统实物图如图2所示,系统参数指标如表1所示。



图2 硬件子系统实物图

该硬件子系统具有如下特点:

1) 系统具有64通道的单端压电传感信号调理和采集模块,各通道为独立并行工作模式,可满足大型复合材料结构的实时撞击监测需求。

2) 系统采用FIFO模式数据缓冲存储技术,并以直接存储器访问形式(DMA)将实时采集的数据经PCI总线传输至PC机内存。这种设计特点既保证了对于任意时刻发生的撞击事件能实时采集,同时也将采集到大量数据快速地传送至PC内存以供分析和处理。

表1 硬件子系统参数指标

特性	描述
I/O通道	单端64通道,差分32通道
工作模式	并行采集
模拟信号输入	$\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, 可选
采样率	每通道最大200 KSPS
分辨率	16 bit ADC
存储器	1 MByte, FIFO缓冲器
数据传输	DMA模式, PCI总线
物理尺寸(长×宽×高)	204 mm×138 mm×43 mm

2.3 分析软件

分析软件主要完成被监测结构及压电传感器数量与位置定义、撞击监测参数设置、原始采集数据显示与处理、撞击位置识别与撞击载荷重构及撞击结果的显示与历史数据查询等功能,撞击监测结果显示界面如图3所示。

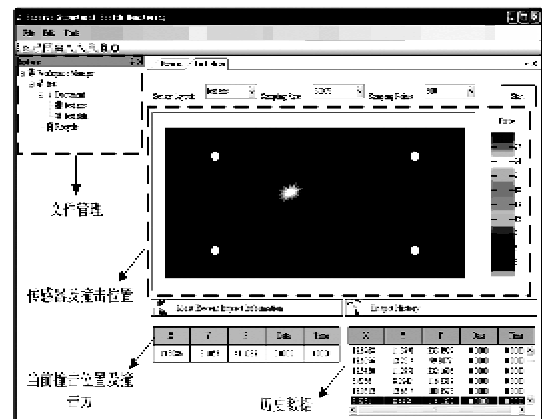


图3 撞击监测结果显示界面

分析软件具有如下特点:

1) 能定义被监测结构的形状及传感器网络在结构中的布设位置,进而能直观地显示撞击监测结果。

2) 集成了传感器性能补偿算法,撞击位置及撞击载荷识别算法。

3) 主程序采用多线程技术,使数据采集、处理、显示与存储能够同步进行,满足了系统对于撞击监测实时性的要求。

4) 软件界面以文件形式集中管理,具有良好的人机交互性。

3 撞击监测功能验证

撞击实验在一块环氧树脂基玻璃纤维板中进行。板长61 cm,板宽54 cm,板厚3 mm,层板铺层为 $[0^\circ/90^\circ]_k$ 的角铺层,铺层总数 $k=10$ 。如图4所示,在平板中央安装4个压电传感器,并以1#传感器为原点建立直角坐标系,以厘米为单位,4个压电传感器坐标分别为1#(0,0),2#(20,0),3#(20,20),4#(0,20),对应通道依次为1~4通道。系统采样频率设为40 KSPS。撞击实验开始前利用实验方法在传感器围成的区域选择训练点构建传递函数,并根据结构的对称性和多个传感器监测一个撞击点,使传递函数的训练区覆盖整个撞击识别区域。

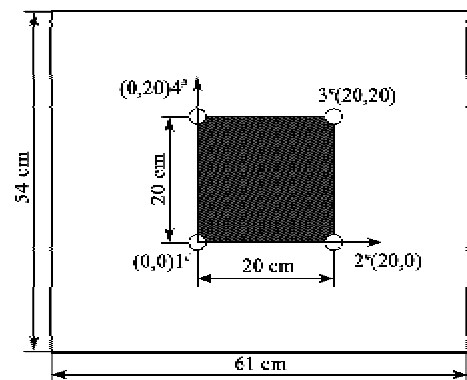


图4 撞击监测实验件尺寸及传感器布置

撞击实验利用力锤来模拟撞击物,力锤撞击传感器围成区域的不同位置,一方面采集力锤信号获得真实的撞击载荷,另一方面利用研制的监测系统采集传感器信号进而估计撞击位置和重构撞击载荷。表 2 为多次撞击得到的估计撞击位置与真实撞击位置结果对比及真实撞击载荷与估计撞击载荷结果对比。由表可知,撞击位置估计误差均在 1 cm 内,即小于传感器间距的 5%,重构的撞击载荷误差小于 7.7%。分析软件直接显示的第一次撞击实验监测结果如图 3 所示,载荷重构结果如图 5 所示。从图 5 可看出,二者匹配较好。

表 2 撞击位置及撞击载荷估计

实验编号	撞击位置/cm	预测位置/cm	位置误差/cm
	(x, y)	(x, y)	(x, y)
1	(10, 17.5)	(9.3, 16.6)	(-0.7, -0.9)
2	(5, 17.5)	(5.8, 16.7)	(0.8, -0.8)
3	(2.5, 10)	(1.9, 9.5)	(-0.6, -0.5)
4	(5.1, 5.0)	(5.6, 5.5)	(0.5, 0.5)

实验编号	撞击载荷/N	估计载荷/N	载荷误差/N
1	58.6	63.0	4.4
2	61.9	66.7	4.8
3	57.0	58.6	1.6
4	75.1	79.1	4.0

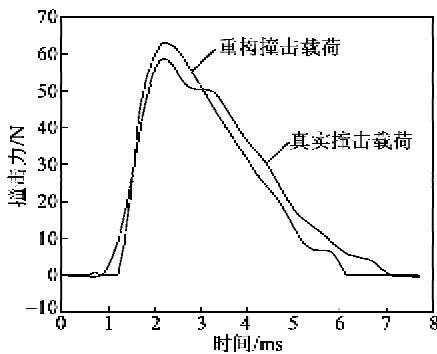


图 5 撞击载荷历程重构结果

4 结束语

为满足大型复合材料结构的实时撞击监测需求,发展了一套基于压电传感器的被动式多通道集成监测系统。系统主要包括分布式压电传感器网络、便携式采集硬件及分析软件。压电传感器网络覆盖结构被监测区域,并实时在线监测由于结构撞击而产生的应力波。多通道采集硬件并行采集各传感器信号接收到的应力波信号并通过直接内存访问形式与分析软件进行数据交换。分析软件集成了基于系统辨识技术的撞击识别算法,能实时进行撞击位置和撞击载荷计算。实验结果表明,研制的被动

式撞击监测系统能够准确辨识发生在复合材料结构上的撞击事件,并可有效估计撞击位置及撞击载荷历程。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007(1):1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007(1):1-12.
- [2] HAJZARGARBASHI T, NAKATANI H, KUNDU T, et al. Detecting the point of impact on an anisotropic cylindrical surface using only four acoustic sensors[C] //Lancaster; DEStech Publications Inc, 2011; 562-569.
- [3] 苏永振,袁慎芳,周恒保. 基于三角测量和最优化技术的复合材料冲击定位两步法[J]. 宇航学报, 2009, 30(3):1201-1206.
SU Yongzhen, YUAN Shenfang, ZHOU Hengbao. Impact localization in composite using two-step method by triangulation technique and optimization technique [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3):1201-1206.
- [4] 章继峰,张博明,武湛君,等. 平板型复合材料格栅结构载荷重构研究 I: 前向响应模型[J]. 复合材料学报, 2007, 24(4):154-160.
ZHANG Jifeng, ZHANG Boming, WU Zhanjun, et al. Study of load reconstruction on an advanced composite grids (AGS) plate I: Forward response model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4):154-160.
- [5] 章继峰,王振清,武湛君,等. 平板型复合材料格栅结构载荷重构研究 II: 反演模型与验证[J]. 复合材料学报, 2008(5):134-140.
ZHANG Jifeng, WANG Zhenqing, WU Zhanjun, et al. Load reconstruction on advanced composite grids structure (AGS) II: Inverse model and verification [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008(5):134-140.
- [6] PEELAMEDU S M, CIOCANEL C, NAGANATHAN N G. Impact detection for smart automotive damage mitigation systems[J]. Smart Material and Structures, 2004, 13(5):990-997.
- [7] PARK J, HA S, CHANG F K. Monitoring impact events using a system-identification method[J]. AIAA Journal, 2009, 47(9):2011-2021.
- [8] 许龙涛,武湛君,王奕首,等. 加筋复合材料结构撞击识别的关键技术[J]. 科技导报, 2013, 31(7):42-45.
XU Longtao, WU Zhanjun, WANG Yishou, et al. Key techniques of impact identification for stiffener reinforced composite structures[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(7):42-45.