

加筋复合材料结构撞击识别的关键技术

许龙涛, 武湛君, 王奕首, 马书义

大连理工大学航空航天学院工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116024

摘要 复合材料结构在外部撞击载荷作用下容易产生目不可检的损伤,进而导致结构承载能力降低。以复合材料加筋圆筒结构为对象,研究基于系统辨识模型的外部低速撞击识别实验的两个关键问题。首先,通过数据分析阐明和完善了系统辨识方法中传递函数的模型阶次选择原则;其次,针对压电传感器生产工艺和安装工艺难以保证各传感器均一性问题,提出了一种传感器信号修正方法,以提高载荷识别精度;最后,分析和讨论了加筋结构型式对撞击识别的影响。实验结果表明,本文所提方法能有效地提高识别和重构外部撞击载荷。

关键词 复合材料结构;撞击识别;系统辨识;模型阶次;信号修正

中图分类号 TB334

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.07.006

Key Techniques of Impact Identification for Stiffener Reinforced Composite Structures

XU Longtao, WU Zhanjun, WANG Yishou, MA Shuyi

State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China

Abstract When composites structures are impacted by an external low-velocity object, the subsurface damage would occur, which is often undetectable by visual inspection. These damages will reduce the structural bearing capacity. In this paper, an experimental study is carried out for a cylindrical stiffened composite structure to investigate several key issues related with the impact load identification based on the system identification method. Firstly, the selection principle of the model order of the transfer function is employed to improve the performance. To overcome the limitation that the homogeneity of sensor responses is not ensured due to the manufacturing and installation process of the piezoelectric sensors, a sensor signal correction method is proposed to improve the accuracy of the force identification. The influence of the stiffeners on the impact identification techniques is analyzed and discussed. The experimental results indicate that the method can improve the identification and the reconstruction of the external discrete impact force on the cylindrical stiffened composite structures.

Keywords composite structure; impact identification; system identification; model order; signal correction

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,在航空航天领域得到广泛应用^[1,2]。但是复合材料结构的抗撞击能力差,其结构和部件在制造、维修和使用过程中不可避免地要受到撞击载荷,并且使结构产生目不可检

的损伤。低速撞击载荷引起的损伤表现为内部分层、基体开裂、纤维断裂、纤维与基体界面脱胶开裂等^[3,4],这将导致结构承载能力降低,结构强度及稳定性急剧下降,甚至引起整个结构的突发性破坏^[5]。对外部撞击载荷进行监测对于提高复合材料结构的安全性、使用寿命,以及降低维护费用具有重

收稿日期:2012-12-19;修回日期:2013-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(91016024);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0055);中央高校基本科研业务费项目(DUT12LK33)

作者简介:许龙涛,博士研究生,研究方向为被动式结构健康监测,电子信箱:xhfly@gmait.com;武湛君(通信作者),教授,研究方向为结构健康监测、耐极端环境复合材料、飞行器结构分析,电子信箱:wuzhj@dlut.edu.cn

要的意义^[6,7]。

外部撞击监测主要是确定撞击位置,并进而重构撞击载荷时间历程^[8]或估计撞击能量。主要方法包括两类:一是基于模型的方法,二是基于训练的方法。Seydel 和 Chang 根据撞击产生的应力波的到达时间,利用三角定位法估计撞击位置^[9],但是对于各向异性的复合材料结构而言,很难准确获取应力波到达时间和波速,特别是对于带有胶接和肋板的结构型式。神经网络法也可以用来识别撞击位置^[10]和撞击载荷时间历程^[11],但需要大量不同的撞击数据训练网络,计算量大导致撞击识别速度慢。Yan 等^[12]提出了一个同时识别撞击位置和撞击载荷时间历程的识别算法,然而这个方法需要构建结构模型,在实际中构建复杂的复合材料结构模型比较困难。为了克服上述问题,Park 等^[13]提出了一个基于系统辨识技术的撞击识别方法,只需少量的训练数据,就可较为高效地监测发生在复杂结构,如飞机的机身与机翼结构上的外部离散源撞击。但仍然存在问题,例如如何更好地确定系统辨识模型的阶次以便提高算法识别性能,如何确定应力波采集频率,如何克服传感器粘接性能不一致导致的传感信号差异大,最终导致载荷历程重构误差大。本研究采用系统辨识方法^[13]对复合材料加筋圆筒结构的撞击识别进行了实验研究,重点讨论了系统辨识模型构建的阶次选择原则、传感器信号修正方法和带肋结构型式对撞击识别的影响。

1 基于系统辨识的撞击识别方法研究

Park 等^[13]提出用系统辨识方法识别撞击位置和撞击载荷时间历程。撞击位置是利用传感器信号的功率分布面的重心法初步确定的,对于撞击载荷时间历程的重构,是利用传感器信号和传递函数获得的。首先在结构上训练获得传递函数,然后通过传递函数的插值获得整个结构的传递函数。最后在初步确定的撞击位置附近,通过多个传感器重构力误差最小化更新撞击位置及重构力。系统辨识方法的关键是构建系统辨识模型获得传递函数,所以本文通过实验分析阐述了构建系统辨识模型的模型阶次选择原则。为了提高撞击识别的精度,提出了传感器信号修正的方法。

1.1 模型阶次的选择

系统辨识的目的是利用试验获得的输入和输出数据获取相应的数学关系以对输出行为进行可靠预测。该方法的本质是获取结构的基本动态特征,避免复杂的数学或物理模型求解。对于柔性结构,一般采取基于带有本征值自动回归 (Autoregressive with exogenous, ARX) 技术的系统辨识建模。对于结构的小变形,其撞击响应 $s(k)$ 和撞击载荷 $f(k)$ 的关系可表示为线性有限差分模型^[14]。基于 ARX 模型的系统参数辨识的关键在于确定模型阶次 (n, m) ^[13],通过系统辨识模型可以获得撞击载荷时间历程和传感器信号的传递函数。Park 等没有说明模型阶次 m 的选择原则,所以本文实验研究和分析了模型阶次 m 的选择原则。如图 1(b)所示,在图中撞击点 1 的位置进行撞击测试,利用力锤信号和距离撞击点 1 最近的传

感器信号构造系统辨识模型。为了选择合适的模型阶次 (n, m) ,从 2 开始依次选择模型阶次,以查看相关性系数 R_s^2 ^[14]和 R_f^2 的结果。

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N \delta^2(k)}{\sum_{k=1}^N f^2(k)} \quad (1)$$

式中, $\delta(k)$ 为测量力信号和重力力信号的差, $f(k)$ 为测量力信号, k 为数据点序列 $(1, 2, \dots, N)$, N 为数据长度。

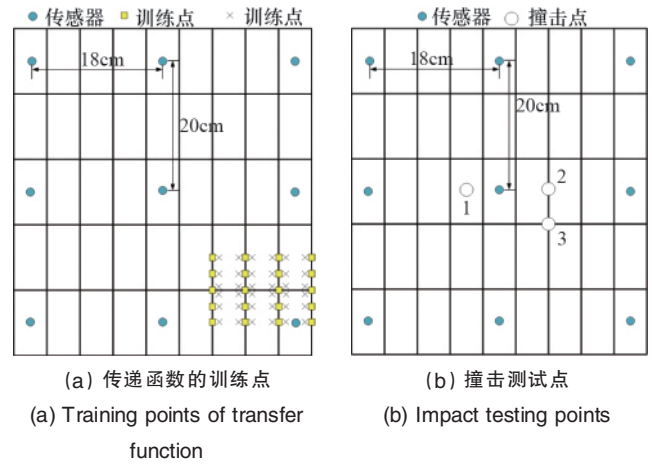


图 1 传感器布局及撞击点

Fig. 1 Sensor layout and impact points

如表 1 所示,随着模型阶次的增加,相关性系数 R_s^2 先增加后减小,相关性系数 R_f^2 则是逐渐增加的(除阶次(2,3))。阶次 n 小于阶次 m 时,虽然相关性系数 R_s^2 很大,但是相关性系数 R_f^2 很小,无法利用模型重构撞击载荷时间历程,因为对于真实物理系统,传递函数的分母多项式的次数 n 总是要大于或等于分子多项式的次数 m ^[15],所以阶次 n 不小于 m 。在一定范围内,随着模型阶次的增加,模拟的结果和测量数据匹配的越来越好。但模型阶次也不是越高越好, n 过大,可能导致传递矩阵具有奇异性; n 过小,可能导致测量数据和模型不匹配,误差或残差过大,所以要选择合适阶次。

表 1 不同阶次下的相关性系数

Table 1 Correlation coefficients of different model orders

(n, m)	R_s^2	R_f^2
(2, 2)	0.8112	0.8736
(2, 3)	0.8277	-2.2×10^{-9}
(3, 2)	0.9261	0.9032
(3, 3)	0.9324	0.9074
(4, 3)	0.9300	0.9217
(4, 4)	0.9301	0.9217

综上所述, m 阶次的选择要遵循以下原则: (1) m 阶次要不小于 2; (2) 选择尽可能小的阶次; (3) 一般情况下, $n \geq m$;

(4)当相关性系数 R_s^2 足够接近 1 时,增加模型阶次不能有效减小误差,则选取最小的模型阶次。

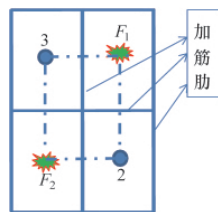
1.2 传感器信号修正

由于生产工艺和安装工艺限制,传感器的均一性差,传感器均一性的好坏直接影响撞击识别结果的精度及可靠性,所以要对传感器进行修正。两个传感器在相同的条件下可进行信号修正。以一个波形较好的传感器为标准,通过传感器信号在时域积分的一致性,使修正的传感器信号乘以一个修正系数修正信号。传感器信号在时域的积分定义为

$$E = \int_{t_0}^{t_n} |s(t)| dt \quad (2)$$

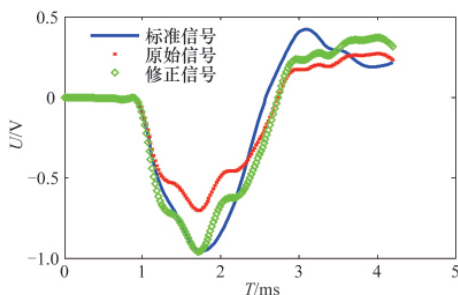
其中, t_0 和 t_n 为传感器信号的截取时间, t_0 为信号超阈值的起始时间, t_n 为信号长度截取的终止时间, $s(t)$ 为传感器的时域信号。

根据复合材料结构的特点,修正方法是不同的。当两个传感器分别位于结构的对称位置时,在两者的中心位置进行敲击,通过信号积分相等修正传感器信号。当两个传感器位于非对称位置时,通过反对称位置的两次敲击修正,如图 2(a)所示,撞击力 F_1 和 F_2 在反对称位置敲击。 E_j 表示在撞击力 F_i 作用下传感器 j 的信号积分,选择传感器 2 为标准传感器,并假定待修正传感器的修正系数为 a 。根据撞击力和传感器信号的线性关系^[3],如果撞击力 F_1 和 F_2 作用于同一点,并且撞击力 F_1 和 F_2 波形相似,只是幅值不同,则撞击力信号之比等于传感器信号之比。



(a) 修正方法

(a) Correction method



(b) 修正结果

(b) Correction result

图 2 传感器信号修正方法及结果

Fig. 2 Sensor signal correction method and its result

如图 2(a)所示,撞击力 F_1 和 F_2 满足如下关系:

$$\frac{E_{F_2}}{E_{F_1}} = \frac{E_{23} \cdot a}{E_{12}} = \frac{E_{22}}{E_{13} \cdot a} \quad (3)$$

可获得修正系数 a :

$$a = \sqrt{\frac{E_{22} \cdot E_{12}}{E_{23} \cdot E_{13}}}$$

如图 2(b)所示,其中, T 表示时间 (ms), U 表示电压 (V),待修正信号和标准信号存在一些差异,修正后的信号和标准信号匹配得很好,从而提高了传感器的均一性,提高了撞击识别的精度。

2 实验及结果

2.1 实验设备

为了研究撞击识别方法,构建了被动式撞击识别监测系统。本文研究中,使用复合材料加筋圆筒结构模拟机身结构,复合材料是碳纤维环氧树脂材料。圆筒结构的高、内径、壁厚分别为 60.5、40、0.4cm。加筋网格为 4.5cm×10cm,加筋网格的宽度在横向和纵向分别为 0.3 和 0.4cm,高度均为 0.5cm。粘贴在圆筒内壁的压电陶瓷传感器的直径和厚度分别为 8 和 0.45mm。撞击产生的传感器信号由数据采集系统获得。力锤信号由高速数据采集系统记录。本撞击监测系统的采集频率为 25kHz,传感器的采集电压范围是±10V。本研究中,所有撞击力均垂直于圆筒表面,并且撞击后结构没有明显损伤。

2.2 撞击识别结果

如图 1(a)所示,在肋条和间隔区域分别进行训练,通过训练点构建传递函数。由于结构的对称性和多个传感器监测一个撞击点,传递函数的训练区域可以覆盖整个撞击识别区域,这个区域由传感器围成。撞击测试点如图 1(b)所示,分别为间隔区域(点 1),单个肋条区域(点 2),多个肋条区域(点 3)。

为了估计撞击位置,在图 1(b)的撞击测试点进行了撞击测试。每个点测试 10 次,位置误差 Δx 和 Δy 定义如式(4)所示,其中 Δx_{sensor} 和 Δy_{sensor} 分别为传感器的横向和纵向间距。

$$\Delta x = \frac{|x_{\text{calculated}} - x_{\text{real}}|}{\Delta x_{\text{sensor}}} \quad \Delta y = \frac{|y_{\text{calculated}} - y_{\text{real}}|}{\Delta y_{\text{sensor}}} \quad (4)$$

撞击点 1 的位置估计的平均误差很小,误差为 (1%, 6%);而撞击点 2 和 3 的误差较大,分别为 (14%, 23%) 和 (15%, 16%)。这是因为撞击在加筋肋上,筋条对应力波会产生复杂影响,包括反射、能量吸收等,这使传感器的功率分布面的分布产生偏差,所以在撞击点 2 和 3 的位置估计不准确。在撞击位置 1 点的重构撞击载荷时间历程和测试力信号匹配较好,而在 2 点和 3 点的重构力误差较大,1 点和 2 点重构力如图 3 所示。误差较大的原因主要有两点:首先,当撞击在肋板上时,肋板吸收了部分撞击能量,使得传感器信号能量不稳定,所以重构力的误差大;其次,肋板影响位置估计,重构力是使用估计位置的传递函数,而非真实撞击位置的传递函数,所以造成重构撞击载荷时间历程误差较大。

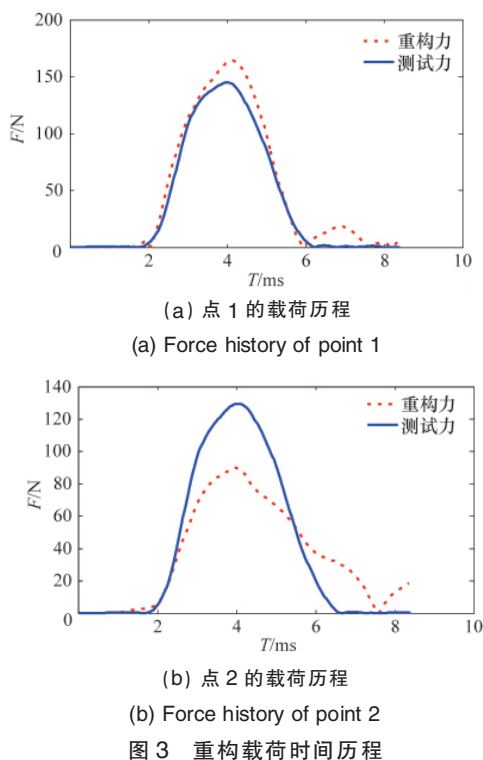


Fig. 3 Reconstruction force time history

3 结论

本文采用基于系统辨识的外部撞击载荷识别方法,对加筋复合材料圆筒结构进行了撞击识别实验,旨在解决该外部撞击识别方法中的一些共性问题,结论如下:

(1) 系统传递函数的模型阶次对载荷识别具有重要的影响,分析了模型阶次和相关性系数之间的关系,提出了模型阶次选择的原则。

(2) 提出了一种传感器修正方法克服各传感器性能均一性难以保证的问题。该方法是基于实验分析得到的撞击力和传感器信号的线性关系,通过传感器信号的修正,提高了传感器的均一性和撞击识别精度。

(3) 复合材料结构的各向异性和加筋肋板对撞击产生的应力波传播具有重要影响,会导致撞击位置估计和撞击载荷重构的误差增大。因此,需要进一步研究撞击产生的应力波在复杂复合材料结构上传播的规律和表征方法以提高撞击监测精度。

参考文献 (References)

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
Du Shanyi. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] Cheng H X. Composite material application and development in pressure vessels[J]. Advanced Materials Research, 2011, 321: 222-225.
- [3] Volnei T, Jonas D C, Dirk V. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches [J]. Composite Structures, 2008, 83(4): 413-428.

- [4] Dzenis Y A, Qian J. Analysis of microdamage evolution histories in composites [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38 (10-13): 1831-1854.
- [5] Banerjee S, Ricci F, Baid H, et al. Dynamic based damage detection in composite structures [C]//Kundu T. Proceedings of the SPIE 7295: Health Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, CA: SPIE, 2009, doi: 10.1117/12.816214.
- [6] Roy S, Mueller I, Janapati V, et al. Real-time prediction of impact-induced damage for composite structures based on failure analysis and efficient database methods [C]//Kundu T. Proceedings of the SPIE 8348: Health Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, CA: SPIE, 2012, doi: 10.1117/12.917528.
- [7] 莫寿农. 复合材料主动多激励结构健康监测系统应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Mo Shouong. Active multiple actuating structural health monitoring system application in composite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [8] Chen C L, Yuan F G. Impact source identification in finite isotropic plates using time-reversal method: Theoretical study [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(10): 10528.
- [9] Seydel R, Chang F K. Impact identification of stiffened composite panels: I. System development [J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(2): 354-369.
- [10] Sharif-Khodaei Z, Ghajari M, Aliabadi M H. Determination of impact location on composite stiffened panels [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(10): 105026.
- [11] Akhavan F, Watkins S E, Chandrashekhara K. Prediction of impact contact forces of composite plates using fiber optic sensors and neural networks [J]. Mechanics of Composite Materials and Structures, 2000, 7 (2): 195-205.
- [12] Yan G, Zhou L. Impact load identification of composite structure using genetic algorithms [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(3-5): 869-884.
- [13] Park J, Ha S, Chang F K. Monitoring impact events using a system-identification method [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2009, 47(9): 2011-2021.
- [14] Juang J N. Applied system identification [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1994.
- [15] 李先允. 现代控制理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 29.
Li Xianyun. Fundamentals of modern control theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 29.

(责任编辑 许冰, 吴晓丽)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。