

基于声发射技术飞机关键部件健康监测方法*

崔建国^{1,2,3}, 李明³, 陈希成³, 吕瑞³, 邱涛³, 隋福成³, 徐长君³, 范靖³

(1 沈阳航空工业学院自动化学院 沈阳 110136;

2 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004;

3 沈阳飞机设计研究所 沈阳 110035)

摘要:为解决飞机关键结构部件疲劳损伤的有效监测,及时发现潜在的安全隐患,避免灾难性事故的发生。对于采用先进声发射技术所监测到的某飞机水平尾翼的原始声发射信息,提出采用小波包分析与支持向量机相结合的方法对飞机水平尾翼的健康状况进行识别与诊断。该方法将飞机水平尾翼产生的原始声发射信号进行多级小波包分解,提取其频带能量作为特征向量,输入到由支持向量机构建的健康监测器对其进行健康识别与诊断。实验结果表明,该方法可以有效、准确地识别并诊断出飞机水平尾翼的疲劳裂纹,为飞机结构部件健康状态的有效监测提供了新途径。

关键词:飞机水平尾翼;健康监测;疲劳裂纹;小波包;支持向量机

中图分类号: TP206^{+.3} **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6530

Health monitoring of airplane key components based on acoustic emission

Cui Jianguo^{1,2,3}, Li Ming³, Chen Xicheng³, Lv Rui³, Qiu Tao³, Sui Fucheng³, Xu Changjun³, Fan Jing³

(1 Automation College, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110136, China;

2 School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

3 Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: A new health state recognition and diagnosis approach for the primordial acoustic emission signals from an aircraft horizontal tail is proposed, which uses wavelet packet transform and support vector machine to monitor effectively the aircraft key structure component fatigue damages, discover hidden trouble in early time and avoid fearful accident from occurring. The primordial acoustic emission signals are decomposed by wavelet packet transform. The energy eigenvector in frequency domain is extracted and inputted into the health state monitor. The health state monitor is designed using support vector machine (SVM) to recognize and diagnose the aircraft horizontal tail health state. Experiment results show that this method has good performance in recognizing and diagnosing the fatigue crack in the aircraft horizontal tail, which presents a new approach for monitoring the health state of aircraft structure components.

Key words: aircraft horizontal tail; health state monitoring; fatigue crack; wavelet packet; support vector machine

1 引言

飞机结构的健康监测是飞机综合健康管理的一个非常重要的组成部分。采用声发射技术对飞机结构的健康

状态进行有效监测是目前国际上对飞机结构进行健康监测的研究热点之一,在欧美一些发达国家已将其成功应用于航空航天等领域^[1-4]。在我国航空航天领域,尚处于工程应用的探索阶段。声发射(acoustic emission, AE)是一种应用日趋广泛的现代动态无损检测新技术,它可以

收稿日期:2007-08 Received Date:2007-08

* 基金项目:航空科学基金(2007ZD54006)、中国博士后科学基金(20070421062)、辽宁省教育厅科研基金(2008544)、沈阳航空工业学院博士启动基金(06YB19)资助项目

“倾听”飞机结构正在萌生和扩展的裂纹, 实时监测其结构的完整性, 避免灾难性事故的发生。从而达到诊断其健康状态的目的^[5-7]。本文采用小波包分析与支持向量机相结合的方法, 对基于声发射技术的某飞机关键结构部件——水平尾翼健康状态的监测与诊断进行了研究。

2 基于小波包分析声发射信息的特征提取

2.1 小波包分析基本原理

根据多分辨分析理论, 设 $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 为满足容许性条件的母小波, 其生成的二进离散小波为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (1)$$

相应的尺度函数为:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (2)$$

若二进离散小波序列 $\{\psi_{j,k}(t) \mid j, k \in \mathbf{Z}\}$ 构成 $L^2(\mathbf{R})$ 的标准正交基, 则 $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的正交分解为:

$$x(t) = \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \mathbf{Z}} d_k^j \psi_{j,k}(t) + \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_k^N \varphi_{N,k}(t) \quad (3)$$

式中: N 为分解层数, d_k^j 为小波系数, c_k^N 为 N 层的尺度系数。将尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 分别记为 $u_0(t) = \varphi(t)$ 和 $u_1(t) = \psi(t)$, 则称由双尺度方程:

$$u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k u_n(2t - k) \quad (4)$$

$$u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_k u_n(2t - k) \quad (5)$$

定义的集合 $\{u_n(t) \mid n \in \mathbf{Z}\}$ 为由 $u_0(t) = \varphi(t)$ 所确定的小波包。式(5)中 $g(k) = (-1)^k h(1 - k)$, 即两系数也满足正交关系。这就把多分辨分析中的正交小波分解推广到小波包分解, 得到信号的小波包表示为:

$$g_i^j(t) = \sum_k d_{j,n}^k u_n(2^j t - k) \quad (6)$$

式中: $d_{j,n}^k$ 为分解所得系数。

小波分析是对信号在低频段内进行有效的逐层分解。而小波包分析是对小波分析的一种改进, 它不仅对低频部分进行分解, 而且还对高频部分也进行精细地划分, 使分解序列在整个时频域内都具有较高的时频分辨率和相同的带宽, 能更有效地反映信号的时频特征, 从而可以更有利于提取声发射信号健康信息的特征。

2.2 声发射信号健康信息特征的提取

由于飞机水平尾翼出现裂纹损伤时, 会对其声发射信息小波包分解后各频段信号的能量产生较大影响。因此, 可以考虑提取小波包变换系数的能量作为信号的特征, 构建特征矢量。具体过程如下:

信号经 N 层小波包分解后, 得到第 N 层从低频到高频 2^N 个频带成分的系数构成的特征信号 $Q_N^j (j = 1, 2, \dots, 2^N)$ 。各频带特征信号 Q_N^j 对应的能量为:

$$W_N^j = \sum_{i=1}^M |d_{j,n}^i|^2 \quad (7)$$

式中: N 为分解层数; j 为第 N 层的节点个数; $d_{j,n}^k$ 为分解信号 Q_N^j 的第 k 个离散点的系数; M 为分解信号序列 Q_N^j 的离散点的个数。由此则得信号特征矢量:

$$\mathbf{T} = (W_N^1, W_N^2, \dots, W_N^M) \quad (8)$$

3 支持向量机

支持向量机 (support vector machine, SVM) 分类方法是从线性可分情况下的最优分类面提出的。对于线性可分样本集 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n, x_i \in \mathbf{R}^d, y_i \in \{-1, +1\}$, d 是输入空间的维数。存在一个最优分类超平面:

$$\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b = 0 \quad (9)$$

该超平面可将上述样本集无错误地分开, 且离超平面最近的样本点与超平面之间的距离 (间隔) 最大。一般情况下, 归一化后的分类面可以描述为:

$$y_i [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b] - 1 \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

因此, 满足上述条件且使分类间隔最大的分类面就是最优分类面。其中使式(10)中等号成立的那些样本称作支持向量。引入 Lagrange 函数:

$$L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{w}) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{y_i [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b] - 1\} \quad (11)$$

式中: $\alpha_i \geq 0$ 为 Lagrange 系数。经过一系列理论推导, 可得最优分类函数为:

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i (x_i \cdot \mathbf{x}) + b^* \right\} \quad (12)$$

用内积 $K(x, x')$ 替代最优分类面中的点积, 就相当于将原特征空间变换到了另一新的特征空间, 此时相应的判别函数式(12)变为:

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x_i, \mathbf{x}) + b^* \right\} \quad (13)$$

这就是支持向量机, 此时的最优分类算法就成了支持向量机分类算法。采用不同的内积函数, 将导致不同的支持向量机算法。目前研究的内积函数常用的有线性核函数^[8]等。支持向量机分类时只与支持向量个数有关, 而与特征的维数无关。

4 飞机水平尾翼健康监测实验研究

4.1 飞机水平尾翼声发射信息健康特征向量的提取

飞机水平尾翼是飞机的关键部件之一, 本文利用飞机水平尾翼地面疲劳实验专用平台与实验系统对某型号飞机真实的水平尾翼进行疲劳损伤实验。采用高灵敏度声发射压电传感器安装于水平尾翼表面形成一定数目的传感器阵列, 实时接收和采集来自水平尾翼的声发射信息。健康状态监测采用美国 PAC 公司先进的“全数字式

多通道 DiSP 声发射检测系统”进行健康信息的实时感知与采集。

在运用小波分解技术对采集的声发射信号进行处理时,小波基函数的选择是非常重要的。不同小波基函数提取的特征值,会产生不同的诊断结果。而目前对小波基函数如何进行选取,尚缺乏有效的理论指导,常通过实验方法来确定。通过多种小波包实验比较,发现选用 Coi3 小波基函数,得到的健康诊断效果较好。因此本文采用 Coi3 小波对 DiSP 声发射检测系统采集的原始声发射信号进行 3 层小波包分解,可得到第 3 层分解系数从低频到高频共 8 个频段,然后按式(7)与(8)可求得第 3 级分解频段能量构建的 8 维特征矢量 $T = [0.0118, 0.000313, 1.48e-05, 6.56e-05, 5.04e-06, 1.01e-05, 1.11e-05, 9.03e-06]$ 。依此类推,运用此方法,分别对疲劳试验加载循环中未产生裂纹损伤和已产生裂纹损伤的声发射信号求能量特征,得到 200 组未产生裂纹损伤的特征向量和 200 组已产生裂纹损伤的特征向量,将此特征向量作为支持向量机的输入元素,供飞机水平尾翼健康监测器进行训练与健康诊断。图 1 和图 2 分别为某次疲劳加载循环实验由飞机水平尾翼正常和开裂时实际采集的信号原始波形。

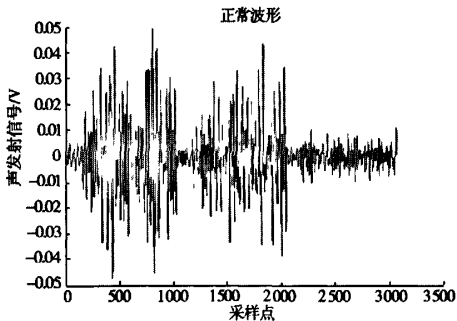


图 1 飞机水平尾翼正常时声发射传感器接收到的噪音波形
Fig. 1 The noise received from the acoustic emission sensor when

the aircraft horizontal tail is in normal state

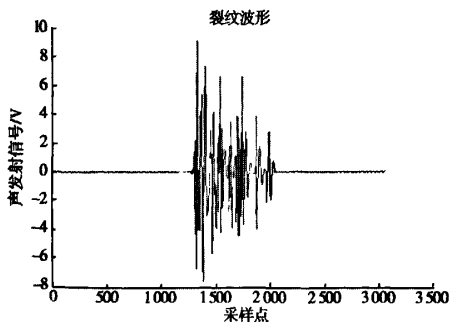


图 2 飞机水平尾翼裂纹萌生时声发射波形

Fig. 2 Acoustic emission wave when crack in aircraft horizontal tail occurs

4.2 飞机水平尾翼健康监测器的训练

由 200 组未产生裂纹损伤的特征向量任取 100 组作为水平尾翼处于健康状态训练的特征数据,由 200 组已产生裂纹损伤的特征向量任取 100 组作为水平尾翼处于不健康状态训练的特征数据。构成一个由 200 组特征向量组成的训练样本集。

健康监测器对于训练样本的输出结果存放在矩阵 $Y(1 \times 200) = (1 \ 1 \ \dots \ 1 \ -1 \ -1 \ \dots \ -1 \ -1)$ 中,其中 1~100 组的训练输出结果均为 1,表示水平尾翼无开裂现象,即飞机水平尾翼处于健康状态。而 101~200 组的训练输出结果均为 -1,表示飞机水平尾翼已出现裂纹萌生或裂纹扩展现象,即飞机水平尾翼处于不健康状态。由于支持向量机中的 linear 核函数为线性核函数,运算速度快、实时性好,因此飞机水平尾翼健康监测器中的支持向量机采用 linear 核函数。依次选取训练样本集中的各组特征向量作为水平尾翼健康监测器的输入,从对应输出结果矩阵 $Y(1 \times 200)$ 中选取健康监测器的输出结果(1 或 -1),依次训练此健康监测器,直到 200 组特征向量全部训练完毕。此时飞机水平尾翼健康监测器训练结束。

4.3 飞机水平尾翼健康监测器的测试实验

由 200 组未产生裂纹损伤的特征向量余下的 100 组作为飞机水平尾翼处于健康状态的测试样本,由 200 组已产生裂纹损伤的特征向量余下的 100 组作为飞机水平尾翼处于不健康状态的测试样本,构成一个由 200 组特征向量组成的测试样本集。对经过训练后的飞机水平尾翼健康监测器进行测试实验时,从测试样本集中任取一组特征向量,将此组特征向量输入健康监测器进行测试,若该监测器输出结果为 1,则将该测试样本对应的飞机水平尾翼状态诊断为未产生裂纹损伤的健康状态。若该监测器输出结果为 -1,则将该测试样本对应的水平尾翼状态诊断为已产生裂纹损伤的不健康状态。如此,将 100 组飞机水平尾翼处于健康状态的测试样本分别输入到健康监测器中,实验结果为该监测器输出均为 1,表明飞机水平尾翼处于健康状态,诊断准确率为 100%;将 100 组水平尾翼处于不健康状态的测试样本分别输入到健康监测器中,实验结果为该监测器输出均为 -1,表明飞机水平尾翼处于不健康状态,诊断准确率为 100%。

为体现支持向量机的有效性,对于上述样本,本文尚采用了 RBF 神经网络作为健康监测器对飞机水平尾翼的健康状态进行监测。实验时选取 $goal = 0.02$, $spread = 1$, $mn = 20$; $df = 1$; 所得实验效果较好,其诊断准确率为 86%。而支持向量机健康监测器的诊断准确率为 100%。说明了支持向量机健康监测器的优越性。

5 结 论

研究表明,将小波包分析与支持向量机相融合所设计的健康监测器用于飞机水平尾翼的健康监测是非常有效的。由小波包频域分解飞机水平尾翼声发射信号构建的能量特征向量,能准确反映飞机水平尾翼的健康状态。将该特征向量输入由 linear 核函数构建的支持向量机健康监测器可成功地实现对水平尾翼的健康监测与识别,对有无疲劳裂纹损伤的健康状态正确诊断率均达到了100%。该健康监测方法不需对数据进行预处理,便可准确诊断其健康状态,达到令人满意的效果,为飞机结构部件采用先进的声发射技术监测其疲劳裂纹的萌生与扩展提供了很好的健康监测手段,具有重要的科学意义及广阔的应用前景。

参考文献

- [1] BRIEN E. British aerospace airbus "Development in remote crack detection and monitoring by acoustic emission for aircraft application" [C]. 22nd European Conference on Acoustic Emission Testing, 1996.
- [2] GRONDEL S. Fatigue crack monitoring of riveted aluminum strap joints by lamb wave analysis and acoustic emission measurement techniques [J]. NDT&E International 2002, 35:137-146.
- [3] MURRY N. An application in the proof pressure testing of aircraft structures using acoustic emission [C]. ASNT 1994 Spring Conference, 1994.
- [4] OBRIEN E W, ENG C, MIPHYS F C P. Developments in remote crack detection and monitoring by acoustic emission for aircraft applications [C]. 22nd European Conference on Acoustic Emission Testing. Aberdeen, 1996:165-169.
- [5] HORIKAWA K, KOBAYASHI H, TAKEUCHI Y, et al. Acoustic emission of fatigue-deformed aluminum alloys for automotive panels [C]. Proceeding of the 26th European Conference on Acoustic Emission Testing Berlin, 2004, 1:323-330.
- [6] ENNACEUR C, LAKSIMI A, HERVE C, et al. Acoustic emission technique and potential difference method for detecting the different stages of crack propagation in carbon and stainless steel [C]. Proceeding of the 26th European Conference on Acoustic Emission Testing Berlin, 2004, 1:639-645.
- [7] 金文,陈长征,金志浩,等. 声发射源识别中的三比值特征提取方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 530-534.
JIN W, CHEN CH ZH, JIN ZH H, et al. Study on three-parameter-ratio method in AE source recognition [J]. Chinese Journal of scientific instrument, 2008, 29(3):530-534.
- [8] BIAN ZH Q, ZHANG X G. Pattern recognition [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 284-304.

作者简介




崔建国, 1986 年于沈阳航空工业学院获得学士学位, 1995 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 2006 年于东北大学获得博士学位, 现为沈阳航空工业学院教授, 主要研究方向为飞行器综合健康管理、信息处理与识别等。

E-mail: gordon_cjg@163.com

Cui Jianguo received BSc degree from Shenyang Institute of Aeronautical Engineering in 1986, MSc degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1995 and PhD from Northeast University in 2006. Now he is a professor in Shenyang Institute of Aeronautical Engineering. His main research interests include aircraft integrated health management, signal processing and recognition, and etc.

E-mail: gordon_cjg@163.com

基于声发射技术飞机关键部件健康监测方法

作者: 崔建国, 李明, 陈希成, 吕瑞, 邱涛, 隋福成, 徐长君, 范靖, Cui Jianguo, Li Ming, Chen Xicheng, Lv Rui, Qiu Tao, Sui Fucheng, Xu Changjun, Fan Jing
作者单位: 崔建国, Cui Jianguo(沈阳航空工业学院自动化学院, 沈阳, 110136; 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳, 110004; 沈阳飞机设计研究所, 沈阳, 110035), 李明, 陈希成, 吕瑞, 邱涛, 隋福成, 徐长君, 范靖, Li Ming, Chen Xicheng, Lv Rui, Qiu Tao, Sui Fucheng, Xu Changjun, Fan Jing(沈阳飞机设计研究所, 沈阳, 110035)
刊名: 仪器仪表学报 
英文刊名: CHINESE JOURNAL OF SCIENTIFIC INSTRUMENT
年, 卷(期): 2008, 29(10)
引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. BRIEN E British aerospace airbus"Development in re-mote crack detection and monitoring by acoustic emission for aircraft application" 1996
2. GRONDEL S Fatigue crack monitoring of riveted aluminum strap joints by lamb wave analysis and acoustic emission measurement techniques 2002
3. MURRY N An application in the proof pressure testing of aircraft structures using acoustic emission 1994
4. OBRIEN E W. ENG C. MIPHYS F C P Developments in remote crack detection and monitoring by acoustic emission for aircraft applications 1996
5. HORIKAWA K. KOBAYASHI H. TAKEUCHI Y Aeomtie emission of fatigue-deformed Muminum alloys for automotive panels 2004
6. ENNACEUR C. LAKSIMI A. HERVE C Acous-tie emission technique and potential difference method for detecting the different stages of crack propagation in car-bon and stainless steel 2004
7. 金文. 陈长征. 金志浩 声发射源识别中的三比值特征提取方法研究[期刊论文]-仪器仪表学报 2008(03)
8. BIAN ZH Q. ZHANG X G Pattern recognition 2000

相似文献(0条)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yqyb200810021.aspx

下载时间: 2010年5月27日