

# 振动检测技术在风力机叶片裂纹故障监测中的应用

李录平, 李芒芒, 晋风华, 李海波  
(长沙理工大学 能源与动力工程学院 湖南 长沙 410076)

**摘 要:** 将振动检测技术应用于风力机叶片裂纹损伤监测领域, 通过实验比较了风力机裂纹损伤前后、以及不同损伤程度时风力机叶片固有特性的变化情况, 当风力机叶片受到损伤时, 其各阶固有频率会下降, 而且随着损伤程度的增加, 各阶固有频率下降值也越大, 其中高阶频率下降更加明显, 并且提出了裂纹损伤定位的判断方法, 通过比较摆振方向上的前两阶振型的振型变化量  $\delta\varphi_{ij}$  可以对损伤进行定位, 为风力机叶片裂纹故障的在线监测奠定了基础。

**关 键 词:** 振动检测技术; 风力机叶片; 裂纹监测

中图分类号: TK83 文献标识码: A

## 引 言

大型风力机长期暴露在风沙、雨雪、温度骤变等恶劣环境中, 风力机叶片在复杂的服役环境中受到来自不同方向的荷载作用以及各种突发性外部因素的影响<sup>[1]</sup>, 不可避免地会在叶片的不同位置造成不同程度的损伤, 如叶片会出现磨损、表皮脱落及小砂眼、裂纹等。叶片损坏对风力发电造成了很大的经济损失, 而且风力机叶片故障对风机机组安全运行构成很大威胁, 因此对叶片进行状态检测非常重要。运行过程中由于机组振动等原因造成的裂纹是各种损伤之中较为严重的一种。叶片裂纹损伤将导致叶片动力学特性变化, 振动信号反映叶片的动力学特性, 所以本研究通过检测叶片振动信号特征的变化来监测诊断叶片的裂纹损伤故障, 研究叶片裂纹损伤前后、不同损伤位置与不同损伤程度对风力机叶片振动特性参数的影响, 找出其中的规律, 并通过振型的变化确定裂纹损伤位置。

## 1 自互谱密度法

运行模态分析方法是种基于仅有输出(响应)的模态分析方法, 也就是通过环境激励结构下的响应来提取模态参数的方法。

运行模态分析中自互谱密度法是一种简单、快捷的识别环境激励结构下模态参数的方法, 是峰值法的改进和发展<sup>[2]</sup>。

由激励  $x_i(\omega)$  与响应  $f_k(\omega)$  的关系可知, 频响函数为:

$$h_{ik}(\omega) = \frac{x_i(\omega)}{f_k(\omega)} = \sum_{r=1}^N \frac{\Phi_{ir} \Phi_{kr}}{(j\omega - \lambda_r)(j\omega - \bar{\lambda}_r)} \quad (1)$$

式中:  $\Phi_{ir}, \Phi_{kr}$  一为第  $r$  阶模态振型在  $i$  和  $k$  点处的振型矢量;  $\lambda_r$  和  $\bar{\lambda}_r$  一结构的一对共轭特征值。

在只能测得结构响应的情况下, 可以选择结构上的某点作为参考点, 同时将响应作为输入, 由于其它测点的响应与选择的参考点之间有线性相关性, 则可以通过建立响应点的传递函数来进行系统识别。在结构上取一固定点, 其传递率可以表示为:

$$a_i = x_i(\omega) / x_j(\omega) \quad (2)$$

风引起的地脉动等宽带随机, 或者自然界的脉动激励, 均可认为具有平质谱, 则满足<sup>[3]</sup>:

$$f_k(\omega) = f(\omega) = C_1 \quad (3)$$

对于有意义的频率点  $\omega_i$ , 序列  $a_i(\omega)$  就是相应频率下的工作模态, 结构上任一点的动态位移响应  $x_i(\omega)$  可以用  $k$  点的激励力  $f_k(\omega)$  和系统的传递函数  $h_{ik}(\omega)$  表示为:

$$x_i(\omega) = f(\omega) \sum_{k=1}^m h_{ik}(\omega) = C_1 h_i(\omega) \quad (4)$$

式中:  $C_1$  一常数。

将式(4)代入式(2)得到:

$$\begin{aligned} a_i(\omega) &= f(\omega) \sum_{k=1}^m h_{ik}(\omega) / f(\omega) \sum_{k=1}^m h_{pk}(\omega) \\ &= \Phi_{ir} / \Phi_{pr} = C_2 \Phi_{ir} = \tilde{\Phi}_{ir} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知, 通过直接读取曲线  $a_i(\omega)$  在  $\omega_r$  处的幅值和相位, 就可以得到对应频率结构的工作振型, 将它近似的看作结构的第  $r$  阶振型。

收稿日期: 2012 - 04 - 24; 修订日期: 2012 - 06 - 05

基金项目: 湖南省高校创新平台开放基金项目(10K005)

作者简介: 李录平(1963 -), 男, 湖南邵阳人, 长沙理工大学教授。

## 2 损伤检测应用

### 2.1 试验台装置布局

实验对象为 FY - 300 型风力机叶片,长度为 1.25 m,叶片材料为玻璃钢。叶片与传感器的安装方法为:将叶片尾部固定在夹具上,并且将压电加速度传感器用 502 胶粘在叶片表面;在叶片上共安装 7 个加速度传感器,依次整齐等距的将传感器粘贴在叶片表面,间距为 17 cm。整个测试共测得两个方向的振动,挥舞方向和摆振方向<sup>[4]</sup>。试验台装置以及传感器布置如图 1 和图 2 所示。

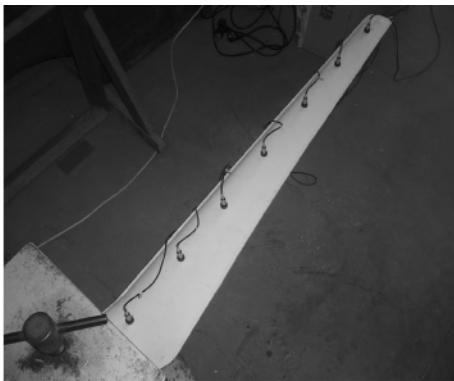


图 1 传感器纵向布置测量挥舞方向振动  
Fig.1 Vibration along the waving direction measured by the sensors arranged in the longitudinal direction



图 2 传感器横向布置测量摆振方向  
Fig.2 Vibration along the flapping direction measured by the sensors arranged in the lateral direction

### 2.2 实验结果分析

#### 2.2.1 正常状态下风力机叶片振动测试

在叶片无损伤条件下,测量叶片在瞬态激励下的自由振动信号,并对振动信号进行分析,结果如图 3 和图 4 所示。其中,图 3 为各个传感器的自功率

谱叠加图,图 4 为通道 7 与通道 1~6 之间的互功率谱叠加图。从图 3 各个传感器的自功率谱叠加图中可以粗略地得到各峰值频率,分别为 11.73、47.9、55.7、123.17、221.92 Hz。

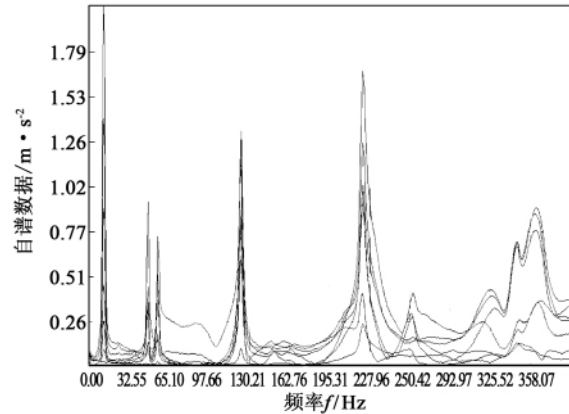


图 3 各通道自功率谱曲线图  
Fig.3 Curves showing the individual power spectrums in various channels

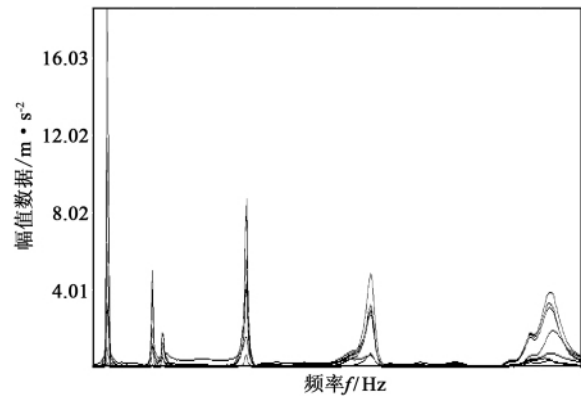


图 4 通道 7 与通道 1~6 互功率谱曲线图  
Fig.4 Curves showing the interactive power spectrums in channel No.7 and No.1~6

然后,分别查看通道 7 与通道 1~6 之间相位图以及相干函数图,进一步判断这几个峰值频率的正确性,从而确定风力机的固有频率,如表 1 和表 2 所示。

表 1 挥舞方向风力机叶片频率测试结果(Hz)

Tab.1 Measuring results of the frequency of the blades of the wind turbine along the waving direction

	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
风力机叶片(A)	11.73	47.9	55.72	123.17	221.92
风力机叶片(B)	11.73	47.9	56.7	124.14	220.92

表 2 摆振方向风力机叶片频率测试结果 (Hz)

Tab.2 Measuring results of the frequency of the blades of the wind turbine along the flapping direction

	第一阶	第二阶	第三阶
风力机叶片(A)	47.9	56.7	203.32
风力机叶片(B)	46.7	56.7	207.23

最后通过读取传递率曲线上相应频率对应的值便可得到各阶模态的振型幅值,将每个传感器振型幅值进行归一化处理,通过振型曲线的拟合方法便可得到完好叶片结构振型曲线拟合图。图 5 和图 6 为正常状态下叶片部分振型拟合曲线图,主要是风力机叶片的挥舞方向和摆振方向上第二阶振型。根据 IEC614000-23 标准、JBT 10194-2000 我国机械行业标准,风电叶片一般只需测试前两阶振型即可<sup>[5~6]</sup>。

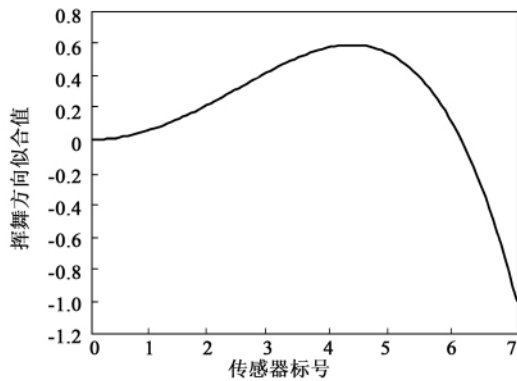


图 5 二阶挥舞方向振型拟合曲线图

Fig.5 Chart showing the fitting curves of the second order vibration modes in the waving direction

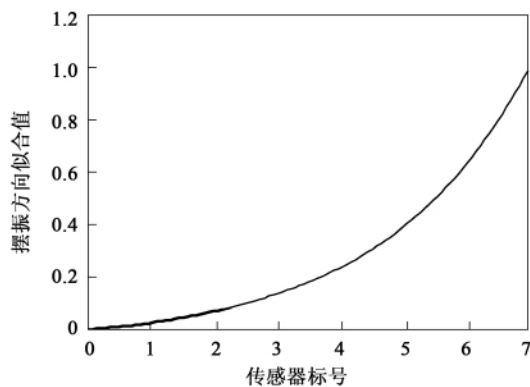


图 6 二阶摆振方向振型拟合曲线图

Fig.6 Chart showing the fitting curves of the second order vibration mode in the flapping direction

2.2.2 裂纹损伤状态下风力机叶片振动测试

风力机叶片在实际运行过程当中受到的损伤主要是裂纹,并且以横向裂纹为主,裂纹主要出现在叶片前缘处。因此,实验中共用了两块同种型号风力机叶片来做模拟裂纹损伤实验,以风力机叶片(A)、风力机叶片(B)进行标注区分。将风力机叶片根部固定,裂纹所在位置如图 7 和图 8 中的箭头所指位置。利用线切割的方法在风力机叶片上切割裂纹来模拟损伤,开裂的方式为内背弧都开裂。分两种不同情况模拟叶片损伤:(1)在相同位置切割出不同长度的裂纹,以此模拟叶片损伤程度;(2)在不同位置切割相同长度的裂纹,以此模拟裂纹发生的位置;实验中,选取的裂纹长度为 10、20、30、40、50 mm。然后,利用上述相同方法对损伤的风力机叶片进行运行模态分析,得到不同损伤程度下风力机叶片的动态特性,如表 3~表 6 所示。

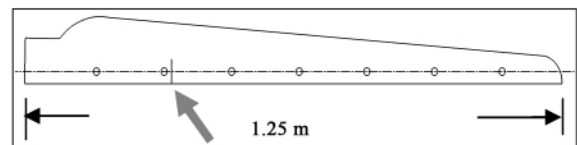


图 7 风力机叶片(A)裂纹所在位置

Fig.7 Location of the crack on the blade(A) of the wind turbine

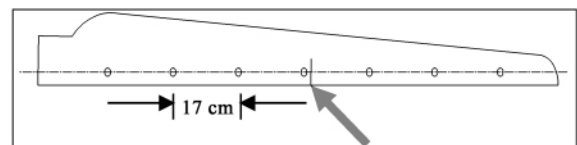


图 8 风力机叶片(B)裂纹所在位置

Fig.8 Location of the crack on the blade(B) of the wind turbine

表 3 损伤后挥舞方向风力机叶片(A)的频率(Hz)测试结果  
Tab.3 Measurement and test results of the frequency (Hz) of the blade(A) of the wind turbine in the waving direction after the damage

损伤程度	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
10 mm	11.73	47.9	55.72	123.17	220.92
20 mm	11.73	47.9	55.72	123.17	220.92
30 mm	11.73	46.92	54.74	122.19	219.94
40 mm	11.73	46.92	54.74	122.19	219.94
50 mm	11.73	46.92	54.74	122.19	219.94

表 4 损伤后挥舞方向风力机叶片 (B) 的频率 (Hz) 测试结果  
 Tab.4 Measurement and test results of the frequency (Hz) of the blade (B) of the wind turbine in the waving direction after the damage

损伤程度	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
10 mm	11.73	47.9	56.7	122.19	217.99
20 mm	11.73	47.9	56.7	122.19	216.03
30 mm	11.73	47.9	56.7	122.19	216.03
40 mm	11.73	46.92	55.72	121.21	215.05
50 mm	11.73	43.99	54.74	118.28	212.12

表 5 摆振方向不同损伤程度的风力机叶片 (A) 频率 (Hz) 测试结果

Tab.5 Measurement and test results of the frequency (Hz) of the blade (A) of the wind turbine in the flapping direction to various damage extents

损伤程度	第一阶	第二阶	第三阶
10 mm	47.9	55.72	203.32
20 mm	47.9	55.72	198.44
30 mm	46.92	55.72	193.55
40 mm	46.92	54.74	191.59
50 mm	45.94	53.76	191.59

表 6 摆振方向不同损伤程度的风力机叶片 (B) 频率 (Hz) 测试结果

Tab.6 Measurement and test results of the frequency (Hz) of the blade (B) of the wind turbine in the flapping direction to various damage extents

损伤程度	第一阶	第二阶	第三阶
10 mm	45.94	56.7	202.35
20 mm	45.94	55.72	198.44
30 mm	45.94	55.72	195.5
40 mm	44.97	55.72	190.62
50 mm	43.99	54.74	180.84

2.2.3 裂纹损伤程度的判断

从模态分析结果可以看出: 当风力机叶片受到损伤时, 除挥舞方向的第一阶频率基本不变, 其余各阶固有频率均会下降, 尤其是风力机叶片刚出现裂缝时, 频率有很明显的变化, 而且随着损伤程度的增加, 各阶固有频率下降值也越大, 其中高阶频率下降更加明显。挥舞方向没有摆振方向的频率变化明显。

图 9 和图 10 为风力机叶片 (A) 损伤前后频率

改变情况分析曲线图, 其中横坐标为裂纹长度, 纵坐标表示损伤后固有频率改变的相对值。频率改变的相对值为:

$$\delta\omega_i = \frac{\omega_{0i} - \omega_i}{\omega_{0i}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\delta\omega_i$ —某阶频率相对变化值;  $\omega_{0i}$ —某阶频率正常值;  $\omega_i$ —某阶频率异常值。从图中的曲线我们可以更直观地看到随着损伤程度的增加, 无论是挥舞方向还是摆振方向, 其各阶固有频率改变的绝对值都增大, 其中摆振方向较挥舞方向的变化情况明显, 高阶较低阶频率变化情况明显。从挥舞方向看, 当裂纹损伤达到一定程度时, 频率才会有比较明显的下降变化。

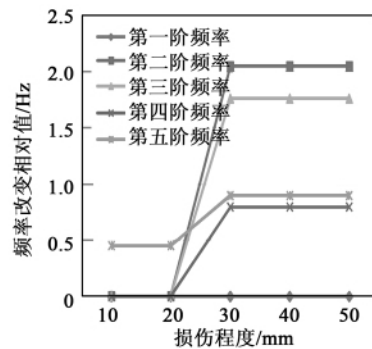


图 9 挥舞方向损伤后固有频率改变情况曲线图  
 Fig.9 Curves showing a change of the intrinsic frequency of the blade along the waving direction after the damage

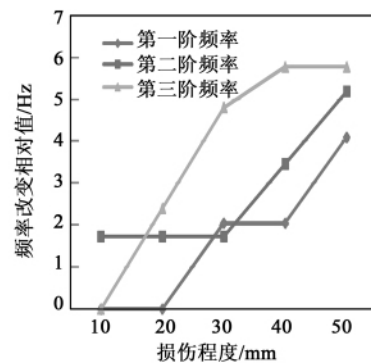


图 10 摆振方向损伤后固有频率改变情况曲线图  
 Fig.10 Curves showing a change of the intrinsic frequency of the blade along the flapping direction after the damage

模态频率改变的相对值与损伤程度之间很难用一个表达式来表示, 而 BP 神经网络具有强大的非

线性映射能力、自学习和自组织能力,因此可以利用神经网络的学习功能来获得它们之间的联系。以风力机叶片(A)的改变情况为例:选取风力机叶片(A)出现 10、30、50 mm 的裂纹时,挥舞方向第四、五阶以及摆振方向的第一~三阶模态频率改变的相对值作为神经网络的训练样本。神经网络输入向量由挥舞方向第四、五阶,以及摆振方向第一~三阶模态频率改变的相对值组成,即输入层节点为 5;输出层为裂纹损伤程度,节点数为 1。由此构成神经网络的输入输出对,进行 BP 神经网络训练。用裂纹损伤程度 10、30、50 mm 情况时的学习样本,再加上 20、40 mm 的检验样本,一同来检测网络的回想记忆与推演的能力。结果如表 7 所示。表 7 中的识别误差  $E_i$  反映了 BP 神经网络对结构损伤位置和损伤程

度的综合辨识能力,其定义为:

$$E_i = \sqrt{\frac{(V_{Ri} - V_{Li})(V_{Ri} - V_{Li})^T}{n(V_{Li})(V_{Li})^T}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $i$ —样本编号; $V_{Ri}$ —对应第  $i$  个样本的网络实际输出; $V_{Li}$ —第  $i$  个样本的网络期望输出; $n$ —输出向量的维数,在本例中  $n$  取 1。

从表 7 可以看出,BP 神经网络对风力机叶片(A)的裂纹损伤程度的识别是非常精确的。采用模态频率改变的相对值作为 BP 神经网络的训练样本,体现出 BP 神经网络具有优异的泛化能力,说明 BP 神经网络可以很好地对风力机叶片结构裂纹损伤程度进行辨识。

表 7 BP 神经网络对风力机叶片(A)裂纹损伤程度的识别结果

Tab.7 Identification results of the crack damage extent of the blade (A) of the wind turbine by using the BP neural network

挥舞第四阶	挥舞第五阶	摆振第一阶	摆振第二阶	摆振第三阶	实际损伤大小/mm	网络识别大小/mm	识别误差/%
0	0.45265	0	1.72839	0	10	10.0005	0.005
0	0.45265	0	1.72839	2.40015	20	19.5567	2.2163
0.7956	0.89625	2.04592	1.72839	4.8052	30	30	0
0.7956	0.89625	2.04592	3.45679	5.76923	40	40.4481	3.6203
0.7956	0.89625	4.09185	5.18518	5.76923	50	50.0001	0.0001

2.2.4 裂纹损伤定位的判断

假设对结构已获得了完好状态和实际状态的振型测量数据,设结构位移模态振型的第  $i$  阶在节点  $j$  的改变量为:

$$\delta\varphi_{ij} = \frac{|\Phi_{ij}^A - \Phi_{ij}^B|}{\sum_{i,j=1}^n |\Phi_{ij}^A - \Phi_{ij}^B|} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $\Phi_{ij}^A$  和  $\Phi_{ij}^B$ —结构在健康状态和损伤状态下第  $i$  阶位移模态在节点  $j$  处的分量。

计算各个位置的位移模态改变率值  $\delta\varphi_{ij}$ , 并进行比较,若结构某一部局出现损伤,则结构损伤前后的第  $i$  阶位移模态应在这一部位出现较其它部位更为显著的变化。 $\delta\varphi_{ij}$  值发生较大变化的位置即为发生损伤的位置。图 11 和图 12 为风力机叶片(A)、风力机叶片(B)在摆振方向上损伤程度不同时第二阶振型各对应点的改变量曲线图。根据摆振方向上的前两阶振型,可以清晰的看到,裂纹所在位置与曲线峰值点处相吻合,也就是裂纹所在位置为峰值点处所代表的传感器的区域附近。

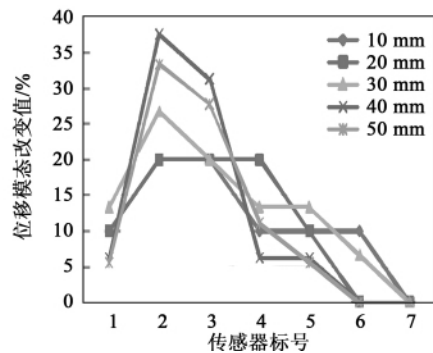


图 11 风力机叶片(A)摆振方向不同损伤程度第二阶振型改变量曲线图

Fig.11 Curves showing a change of the second-order vibration mode of the blade(A) of the wind turbine along the flapping direction to various damage extents

3 结 论

(1) 当风力机叶片受到损伤时,其各阶固有频

率会下降,尤其是风力机叶片刚出现裂缝时,固有频率有很明显的变化,而且随着损伤程度的增加,各阶固有频率下降值也越大,其中高阶频率下降更加明显。但是,挥舞方向的一阶频率基本不变,而且挥舞方向的频率变化没有摆振方向的频率变化明显。

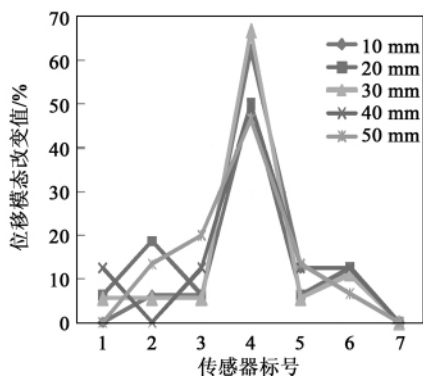


图 12 风力机叶片 (B) 摆振方向不同损伤程度第二阶振型改变量曲线图

Fig. 12 Curves showing a change of the second-order vibration mode of the blade (B) of the wind turbine along the flapping direction to various damage extents

(2) 损伤定位时,通过比较摆振方向上的前两阶振型的振型变化量  $\delta\varphi_{ij}$  可以对损伤进行定位,从风力机振型改变量曲线图中可以清晰的看到,裂纹

所在位置与曲线峰值点处相吻合,也就是裂纹所在位置为峰值点所代表的传感器的区域附近。

参考文献:

[1] Dolinski L, Krawczuk M. Damage detection in turbine wind blades by vibration based methods[J]. Journal of Physics: Conference Series 2009, 181(1): 1-8.

[2] 姜大正,洪明. 运行模态分析技术在船舶结构振动中的应用[J]. 中国舰船研究 2010, 6(5): 22-26  
JANG Da-zheng, HONG Ming, et al. Application of the operation modal analytic technology in the structural vibration of a vessel [J]. Journal of China Warship Research 2010, 6(5): 22-26

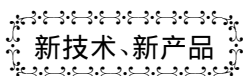
[3] 刘宗政,陈恩,郭隆德,等. 基于环境激励的桥梁模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断 2010, 3(30): 300-303  
LIU Zong-zheng, CHEN Ken, GUO Long-de, et al. Identification of the modal parameter of a bridge based on an environment excitation [J]. Vibration, Testing and Diagnosis 2010, 3(30): 300-303.

[4] 毛火军,石可重. 大型风电叶片的模态测试与数值模拟[J]. 工程热物理学报 2009, 4(30): 601-604.  
MAO Huo-jun, SHI Ke-zhong, et al. Modal testing and numerical simulation of the blade of a large-sized wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2009, 4(30): 601-604.

[5] IEC 61400-23 Full-Scall Structural Testing of Wind Turbine Blades ICE 2003[S].

[6] JBT 10194-2000, 风电机组风能叶片, 中华人民共和国机械行业标准 2000[S].  
JBT 10194-2000, Blades of wind turbines, Mechanical industry standard of the People's Republic of China 2000 [S].

( 辉 编辑)



### 新一代气垫登陆艇的 M17 燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2012 年 12 月刊报道, Rolls-Royce 公司已与美国海军签订了一项供给 M17 燃气轮机的协议。这项协议是 Rolls-Royce 公司到目前为止得到的第二个最大的海军燃气轮机供货合同。

美国计划将要建造 73 艘气垫登陆艇。如果都要建造的话, Rolls-Royce 公司将要供应 300 多台发动机。

每艘气垫登陆艇将使用 4 台 M17 燃气轮机。M17 是经由美国 Marine Corps(海军陆战队) Osprey 倾斜-旋翼飞机的 AE1107 航空发动机改装而成的。

与上一代发动机比较, 装用 M17 将使气垫登陆艇的功率增加 25%, 使得在 35 节航速下每艘艇最多能运输 67 t 货物。同时可使发动机的燃料效率改进 11%。

在每艘气垫登陆艇上, M17 燃气轮机将被连接到既提供推进又提供垫升的齿轮箱系统。

M17 可以提供 4~5 MW 的功率。它具有双轴轴流设计, 它包括 1 个 14 级压气机、1 个喷射冷却的环形燃烧室、1 个二级燃气发生器涡轮、1 个二级动力涡轮。

预期第一台 M17 发动机将在 2015 年年初交付使用。

( 吉桂明 摘译 )

不同工况下条浒苔的快速热裂解制取生物油试验研究 = **Experimental Study of the Quick Pyrolysis of Enteromorpha Clathrata to Prepare Bio-oil Under Various Conditions** [刊 汉] WANG Shuang ,WANG Qian ,JI Heng-song ( College of Energy Power and Engineering ,Jiangsu University ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 212023) ,JIANG Xiu-min ( Thermal Energy Engineering Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 2) . - 202 ~ 206

Studied was the quick pyrolytic process of the seaweed substance and its kind ( Enteromorpha clathrata) and analyzed was the law governing the influence of various conditions on the pyrolytic characteristics. The pyrolytic reaction temperature has certain influence on the Enteromorpha clathrata bio-oil productivity. To heighten the reaction temperature can be favorable to the formation of pyrolytic gases but unfavorable to the formation of carbon. At around 500 °C ,there exists a maximum oil productivity. The residence time ( carrier gas flow rate) has little influence on the seaweed bio-oil productivity. To reduce the residence time can slightly increase the bio-oil productivity. To heighten the pyrolytic reaction temperature can lower the proportion of the volatile in the carbon produced in the pyrolytic process but the proportion of the fixed carbon will increase ,indicating that at a relatively high temperature , there will be more volatile substances to be precipitated. The testing results show that compared with common biomass on land ,the seaweed bio-oil has a relatively high hydrocarbon content and a relatively low oxygen content. **Key words:** seaweed ,pyrolysis ,protein ,bio-oil ,temperature

振动检测技术在风力机叶片裂纹故障监测中的应用 = **Applications of the Vibration Detection Technologies in Monitoring the Blade Crack Fault of Wind Turbines** [刊 汉] LI Lu-ping ,LI Mang-mang ,JIN Feng-hua ,et al ( College of Energy Power and Engineering ,Changsha University of Science and Technology ,Changsha ,China ,Post Code: 410076) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 2) . - 207 ~ 212

The vibration detection technologies are used for monitoring the crack destruction of the blades of wind turbines. Through the tests ,changes of the intrinsic characteristics of the blades of a wind turbine were compared before and after the crack destruction of blades of the wind turbine at various destruction degrees. When the blades of the wind turbine were destructed ,the intrinsic frequencies at various orders will go down and with an increase of the destruction degree ,their decrease will be bigger ,among them ,the decrease of the frequencies at high orders will be more conspicuous. Furthermore ,the authors also presented a method for judging the location of cracks and destruction. By comparing the vibration mode variation magnitude of the first two-order vibration modes along the swaying direction , one can locate the destruction and cracks ,thus laying a foundation for on-line monitoring the blade crack fault of a wind turbine. **Key words:** vibration detection technology ,wind turbine blade ,crack monitoring