

风力机叶片超声波除冰理论与方法

谭海辉, 李录平, 靳攀科, 李芒芒

(长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南省长沙市 410076)

Ultrasonic De-icing Theory and Method for Wind Turbine Blades

TAN Haihui, LI Luping, JIN Panke, LI Mangmang

(Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, Hunan Province, China)

ABSTRACT: According to SH wave and Lamb wave propagation forms in composite plates as well as the de-icing mechanism of ultrasonic, with the aid of FEA software ANSYS, the coupled characteristics of piezoelectric-structure in iced wind turbine blades were analyzed. The relationship between installed intervals of transducers and optimal de-icing frequencies of ultrasonic waves were mainly investigated. By comparison, the optimal installed intervals of transducers and optimal frequencies of ultrasonic waves for de-icing of wind turbine blades were obtained. Simultaneously, taking domestic fabrication technology of piezoelectric actuators into account, the optimal de-icing scheme based on ultrasonic technology was proposed. The numerical results show that ultrasonic de-icing technology for wind turbine blades is feasible in theory. Based on the theory study results, a de-icing prototype system for wind turbine blade was developed.

KEY WORDS: wind turbine blade; ultrasonic de-icing; finite element analysis; optimized frequency

摘要: 根据 SH 波和 Lamb 波在复合板层中的传播形式及其对覆冰的作用机制, 利用 ANSYS 软件对覆冰桨叶进行压电-结构耦合分析, 计算出超声波换能器在 6 种不同安装距离下的最佳除冰频率, 通过比较得出用于风力机叶片除冰的最优安装距离与最佳除冰频率。同时, 考虑国内压电换能器的加工技术, 提出基于超声波技术除冰的最优方案。数值计算结果表明, 基于超声波的风力机桨叶除冰技术在理论上是可行的。以该结论为依据, 开发用于风力机桨叶除冰的原型系统。

关键词: 风力机叶片; 超声波除冰; 有限元分析; 最佳频率

基金项目: 长沙市科技计划项目(K0802120-11); 湖南省高校创新平台开放基金项目(10K005)。

Project Supported by Science and Technology Project in Changsha (K0802120-11); Open Fund Project on Innovation Platform of University in Hunan (10K005).

0 引言

风力发电是风能利用的主要形式, 然而安装在湿冷地区的风力发电机组, 结冰是影响风力机安全可靠性的主要因素之一。桨叶大量覆冰时, 使风力机的效率降低, 机组的输出功率减少; 严重覆冰时还将导致风力发电机组非计划停机, 影响电网系统的安全稳定运行^[1-3]。

目前, 还没有成熟的风力机桨叶除冰技术, 对于桨叶覆冰的风力机, 一般采用停机处理。基于上述原因, 研究超声波除冰技术在风力机桨叶上的应用对风力机的安全、经济、高效运行具有重要的意义。

1 超声波除冰机制

超声波在覆冰桨叶上传播时, 除了存在 Lamb 波外, 同时还存在一系列时间谐波振动, 称为水平剪切波(即 SH 波)。Lamb 波是一种板波, 分为对称型(S 型)和非对称型(A 型), 对称型(S 型)Lamb 波的特点是薄板中心质点作纵向振动, 上下表面质点作椭圆运动、振动相位相反并对称于中心; 非对称型(A 型)Lamb 波特点是薄板中心质点作横向振动, 上下表面质点作椭圆运动、相位相同, 不对称。Lamb 波和 SH 波均属于导波。这 2 种波在各向异性介质中传播时, 会在覆冰与基板界面处产生速度差, 从而在界面处产生剪切应力^[4]。

由覆冰和基板组成的双层系统如图 1 所示。根据动量方程, 位移应变关系方程和材料本构方程, 推导该双层系统中 Lamb 波和 SH 波的传播方程^[5] 见式(1)。

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \quad (1)$$

式中: ρ 为材料的密度; C_{ijkl} 为刚度张量; u_i 为位移

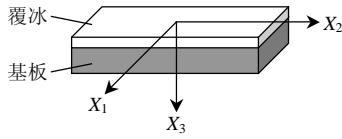


图 1 Lamb 波的传播方向为 X_2 和 X_3 , SH 波的传播方向沿 X_2 , 质点的位移沿 X_1

Fig. 1 Lamb waves propagate along X_2 and X_3 directions, SH waves propagate along X_2 and the particle moves along X_1 direction

场; C_{ijkl} 可转化为 C_{nm} ; x_j 、 x_k 分别为波沿 j 、 k 方向的分位移; t 为时间。

假设式(1)的通解为

$$u_i = U_i e^{ik(x_2 + \alpha x_3 - ct)} \quad (2)$$

式中: $U_i = U \alpha_i$, α_i 为质点位移的方向余弦, U 为位移矢量; k 为沿 x_2 方向的波数; c 为沿 x_2 方向的相速度; α 为沿 x_3 方向与 x_2 方向的波数之比。

根据 Christoffel(克里斯多菲)公式, 利用反推法^[6-8] 可得到

$$\begin{bmatrix} \lambda_{11} - \rho c^2 & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} - \rho c^2 & \lambda_{23} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & \lambda_{33} - \rho c^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{il} = C_{ijkl} n_j n_k$, n_j 、 n_k 为波前的方向余弦; U_i 为各个方向的偏振矢量。

求解上式可得 SH 波在各向异性固体弹性媒质中传播的形式解为:

$$u_1 = \sum_{k=1}^2 B_k e^{ik(x_2 + \alpha_k x_3 - ct)} \quad (4)$$

$$\sigma_{31} = \sum_{k=1}^2 B_k \alpha_k \mu(ik) e^{ik(x_2 + \alpha_k x_3 - ct)} \quad (5)$$

Lamb 波在各向异性固体弹性媒质中传播的形式解为:

$$u_2 = \sum_{k=1}^4 B_k e^{ik(x_2 + \alpha_k x_3 - ct)} \quad (6)$$

$$\sigma_{32} = \sum_{k=1}^4 B_k (\alpha_k + U_{3k}) \mu(ik) e^{ik(x_2 + \alpha_k x_3 - ct)} \quad (7)$$

式中: B_k 为部分波的加权系数; U_{3k} 为波沿 x_3 方向和 x_1 方向的极化矢量比。

为了描述 Lamb 波和 SH 波在固体弹性媒质传播过程中产生的应力分布情况, 本文定义 Lamb 波和 SH 波产生的应力集中系数 L_{ISCC} 和 S_{ISCC} ^[9]:

$$L_{ISCC} = (\sigma_{32} |_{\text{Layer/Interface}}) / \sqrt{P_{\text{power}}} \quad (8)$$

$$S_{ISCC} = (\sigma_{31} |_{\text{Layer/Interface}}) / \sqrt{P_{\text{power}}} \quad (9)$$

$$P_{\text{power}} = \int_{\text{Thickness}} \mathbf{P} \hat{x}_2 dx_3 = \int_{\text{Thickness}} P_{x_2} dx_3 \quad (10)$$

式中: P_{power} 为所需输入能量; \mathbf{P} 为结构中的能量流

即坡印廷矢量; L_{ISCC} 和 S_{ISCC} 分别为 Lamb 波和 SH 波在界面处所激发的剪切应力集中系数。 \mathbf{P} 沿某一方向的大小与应力耦合的大小有关, 而应力耦合大小受到换能器形状与安装方式的影响。

2 计算模型的建立

2.1 换能器选型与方程求解

根据风力机桨叶的外形特征, 为了便于压电换能器的安装, 将压电换能器设计为条状。利用各向异性材料与二次压电方程获得压电结构耦合分析的有限元模型, 进行多次迭代获得收敛解。

2.2 物理模型的建立

直接采用压电耦合技术来激发水平剪切波和 Lamb 波。条状压电换能器成梳状或周期阵列状分布, 安装间距等于 Rayleigh 波半波长的奇数倍。创建的实体模型和有限元模型见图 2。

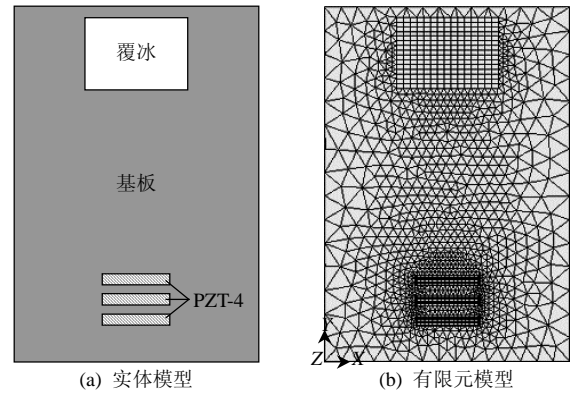


图 2 压电换能器在覆冰基板上的实体模型与有限元模型
Fig. 2 Solid model and the finite element model of the piezoelectric actuators in iced substrate

对于各向异性材料, 超声波在传播时会发生超声频散现象, 即波速是关于频率和传播方向的函数。因此波速和材料的各向弹性模量有关, 由弹性模量和泊松比推出各向异性介质中各个方向的波速, 确定条状压电陶瓷片之间的安装距离为

$$d = (n + 1/2) \lambda_f, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

式中: d 为安装间距; n 为 Rayleigh 波波长个数; $\lambda_f = c/\omega$ 为对应某种频率下的超声波波长。

2.3 数学模型的建立

基板和覆冰选择 SOLID45 单元, 压电换能器选择 SOLID5 单元, 压电换能器与基板用环氧树脂进行粘结。结构的振动有限元方程^[10]为

$$\bar{\mathbf{F}} = \{ [\mathbf{K}_{uu}] - \omega^2 [\mathbf{M}] - j\omega [\mathbf{R}] \} \bar{\mathbf{U}} + [\mathbf{K}_{u\phi}] \bar{\Phi} [\bar{\mathbf{T}} / (J\omega)] = [\mathbf{K}_{\phi u}] \bar{\mathbf{U}} + [\mathbf{K}_{\phi\phi}] \bar{\Phi} \quad (12)$$

式中: $\bar{\mathbf{F}}$ 为施加的机械应力; $\bar{\mathbf{T}}$ 为外部激励电流;

\bar{U} 为弹性位移场; $\bar{\phi}$ 为电势强度; $[K_{uu}]$ 为弹性刚度矩阵; $[K_{u\phi}]$ 为压电刚度矩阵; $[K_{\phi\phi}]$ 为介电矩阵; M 为质量矩阵; R 为耗散矩阵; ω 为角频率。

由于超声波频散现象, 因此在不同频率下, 通过压电耦合直接激发的界面应力大小不同。为找到最佳的除冰频率, 对压电结构进行谐分析, 在分析过程中, 考虑了压电陶瓷材料的介电损失和机械损失。谐分析的有限元矩阵方程^[10-11]为

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M & K_{u\phi} \\ K_{u\phi} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -Q \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: Q 为节点的极化矢量矩阵; 如果所有节点 i 属于电势 Φ_p 极化电极 p 下, 则极化电极矢量 Q_i 之和等于 Φ_p , 否则极化矢量 Q_i 等于 0。

3 计算实例

3.1 材料的特性参数

在进行数值模拟时, 换能器为锆钛酸铅(即 PZT-4)陶瓷材料, 上下表面附着电极, 其中上表面为正极, 与基板的黏贴面为负极。

压电陶瓷的介电系数矩阵(单位为 10^{-9} F/m):

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 8.93 & 0 & 0 \\ 0 & 8.93 & 0 \\ 0 & 0 & 6.92 \end{bmatrix}$$

压电陶瓷的刚度矩阵(单位为 10^{10} N/m²):

$$C = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.31 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix}$$

压电陶瓷的压电矩阵(单位为 C/m²):

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & 15.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12.7 & 0 \\ 12.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

风力机桨叶基板材料为通用玻璃钢材料, 外形尺寸为 240 mm × 350 mm × 3 mm, 玻璃钢材料的弹性模量为: $E_X = 4.26 \times 10^{10}$ Pa, $E_Y = 1.05 \times 10^{10}$ Pa, $E_Z = 2.76 \times 10^{10}$ Pa, 泊松比为 0.3, 剪切模量 $G_X = G_Y = G_Z = 1.05 \times 10^{10}$ Pa, 密度为 1950 kg/m³。

3.2 数值计算结果

当条状压电换能器的安装距离为 10 mm 时, 划

分网格后共生成 4 029 个节点, 这些节点中, 最先产生波速差的边界为覆冰的下端边界。通过节点命令查看覆冰下端边界中最具代表性节点的应力特性, 这里选择覆冰下端中点处的节点(得到 1 628 号节点)为代表性节点, 其对应的 XY, XZ 平面应力幅值-频率曲线如图 3、4 所示^[12]。

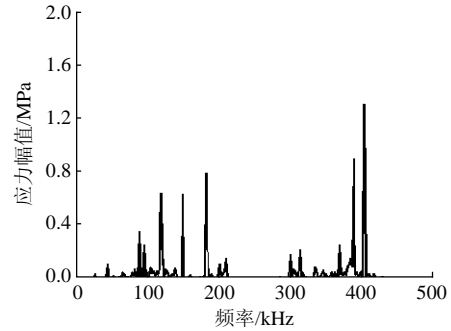


图 3 1628 号节点 XY 平面应力幅值-频率曲线
Fig. 3 Relationship curve of stress amplitude and ultrasonic frequency of 1628 node in XY plane

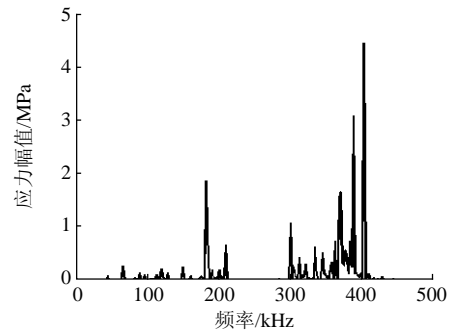


图 4 1628 号节点 XZ 平面应力幅值-频率曲线
Fig. 4 Relationship curve of stress amplitude and ultrasonic frequency of 1628 node in XZ plane

在 ANSYS 软件中, 通过 Range of Values 中的 Specified 命令重置图 3、4 横坐标参数的起始和终止范围, 得出换能器安装距离为 10 mm 时的最佳除冰频率为 405.5 kHz。此时, 覆冰边界节点处的应力值如表 1、2 所示。

由于直接利用压电耦合来激发表面剪切波和 Lamb 波, 为了得到不同安装距离下的最佳除冰频率, 分别对安装距离为 8, 12, 15, 17, 20 mm 进

表 1 覆冰下端各节点 XY 平面的剪切应力

Tab. 1 Shear stress of nodes under the iced bottom in XY plane						
节点号	1625	1626	1627	1628	1629	1630
应力值	1.2147	8.5280	9.6568	-9.4893	-8.2634	-1.1282

表 2 覆冰下端各节点 XZ 平面的剪切应力

Tab. 2 Shear stress of nodes under the iced bottom in XZ plane						
节点号	1625	1626	1627	1628	1629	1630
应力值	12.5510	-3.3054	-3.3582	-3.4533	-3.0710	13.0190

行计算，得到 1628 号节点 XY 平面应力幅值-频率曲线如图 5—9 所示。

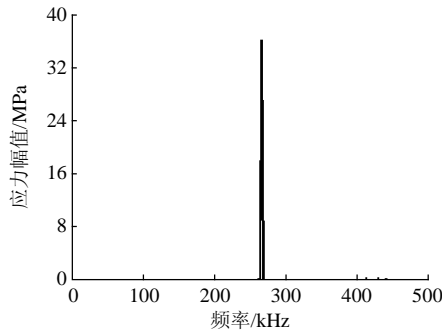


图 5 安装距离为 8 mm 的应力幅值-频率曲线
Fig. 5 Relationship curve of stress amplitude and ultrasonic frequency under 8 mm installed interval

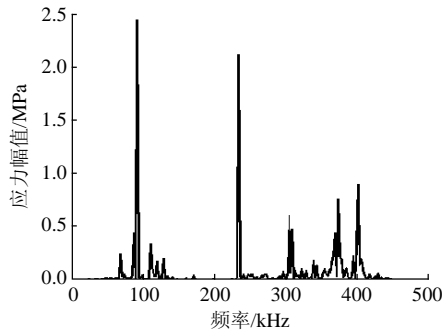


图 6 安装距离为 12 mm 的应力幅值-频率曲线
Fig. 6 Relationship curve of stress amplitude and ultrasonic frequency under 12 mm installed interval

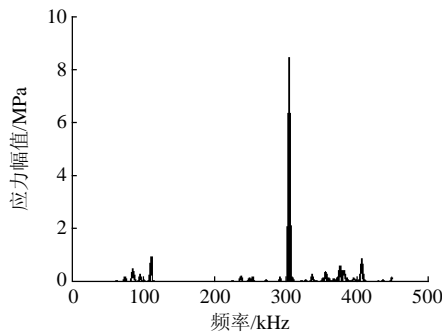


图 7 安装距离为 15 mm 的应力幅值-频率曲线
Fig. 7 Relationship curve of stress amplitude and frequency under 15 mm installed interval

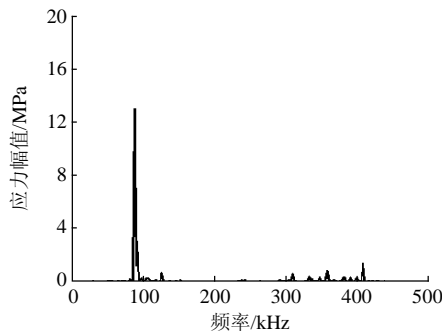


图 8 安装距离为 17 mm 的应力幅值-频率曲线
Fig. 8 Relationship curve of stress amplitude and ultrasonic frequency under 17 mm installed interval

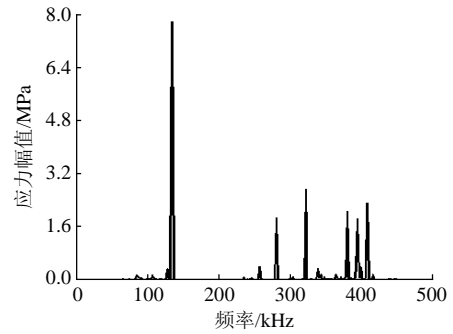


图 9 安装距离为 20 mm 的应力幅值-频率曲线
Fig. 9 Relationship curve of stress amplitude and ultrasonic frequency under 20 mm installed interval

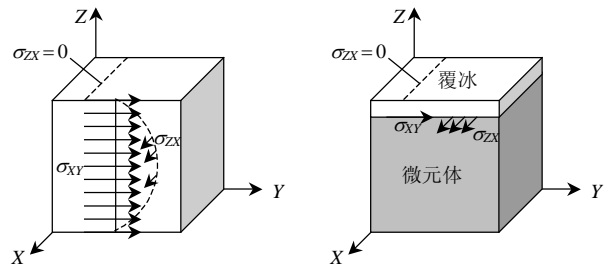


图 10 微元体应力： σ_{ZX} 在自由表面应力为 0
Fig. 10 Infinitesimal element stresses: σ_{ZX} is zero at the elements free traction surfaces

由图 5—9 可知，当条状压电换能器的安装距离不同时，最佳的除冰频率也发生相应的变化，但最佳除冰频率与安装距离之间并无相应的函数关系，呈现不规则变化。对于基板表面的覆冰，界面处不同方向的应力对覆冰的作用效果不同。

区分压电陶瓷材料在基板上激发的 ZX 平面剪切应力与 XY 平面剪切应力是十分重要的。如图 10 所示，取一个无限小单元作为研究对象，ZX 平面方向的横向剪切应力是表面应力，它是由叶片旋转产生的离心应力与压电陶瓷在 ZX 平面方向激发的剪切应力的合力，在自由表面其值为 0。而 XY 平面方向的剪切应力只由压电陶瓷片激发，其在整个有限单元厚度上不为 0。当基板表面覆冰时，表面的应力将不再为 0。ZX 平面方向剪切应力对覆冰产生剥离作用，而 XY 平面方向剪切应力对覆冰产生破碎作用，当压电陶瓷激发的剪切应力的合力大于覆冰黏附应力时，覆冰与基板发生分离，达到除冰目的。

在 ANSYS 软件中，通过 Range of Values 中的 Specified 命令通过重置图 5—9 应力幅值-频率曲线的横坐标参数的起始和终止范围，得出不同安装间距下对应的最佳除冰频率如表 3 所示。对应最佳频率下，覆冰下边界各节点处 XY 平面剪切应力值如表 4 所示。由相关文献可知^[13-14]，覆冰的最大黏附

表3 不同安装距离下的最佳除冰频率
Tab. 3 Optimal de-icing frequency under different installed interval

安装距离/mm	8	10	12	15	17	20
最佳频率/Hz	14 880	387 650	93 100	305 950	88 750	136 100

表4 不同安装间距下的XY平面剪切应力
Tab. 4 Shear stress in XY plane under different installed interval

节点号	1 625	1 626	1 627	1 628	1 629	1 630
应力值为8 mm	-6.202 5	-40.698	-18.857	32.463	42.23	-4.608 9
应力值为12 mm	2.116 3	2.450 8	-1.203 5	2.436 8	7.004 9	2.729 3
应力值为15 mm	-4.541 0	4.606 6	3.633 4	-8.443 8	-0.542 75	7.660 9
应力值为17 mm	-10.214	-7.694 5	-15.66	-12.997	-0.926 64	-6.357 5
应力值为20 mm	7.587 8	15.557	-15.391	-7.762 8	10.293	-2.884 1

应力为 0.4 MPa, 而表 4 中, 每个节点的应力值都大于覆冰的最大黏附应力为 0.4 MPa。因此, 基于超声波的风力机桨叶防、除冰技术在理论上是可行的。

安装距离为 12 mm 的 XY、XZ 平面剪切应力云图如图 11、12 所示, 其他安装距离下的应力云图分布类似。

由图 11 可以看出, 最大的 XY 平面剪切应力产生在覆冰上边界的左右 2 个角点处, 覆冰区域内, 应力正负交替出现, 交变的应力更有利于覆冰的去

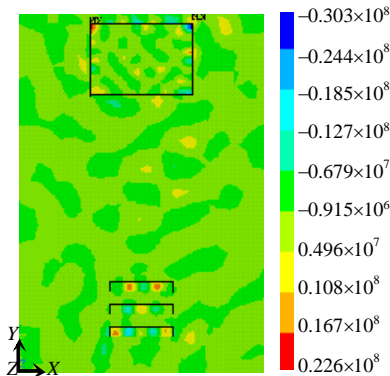


图 11 安装距离为 12 mm 的 XY 平面应力云图
Fig. 11 Stress diagram in XY plane under 12 mm installed interval

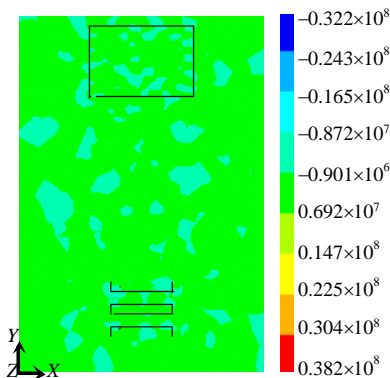


图 12 安装距离为 12 mm 的 XZ 平面应力云图
Fig. 12 Stress diagram in XZ plane under 12 mm installed interval

除, 维护风力机的安全运行。

在不同的安装间距下, 压电换能器的最佳除冰频率不同, 变化趋势也不同, 没有一定的规律, 如图 13 所示。产生这种现象的主要原因是超声波在固体中传播时发生的频散现象, 导致波长的变化, 从而影响到压电耦合的效果。

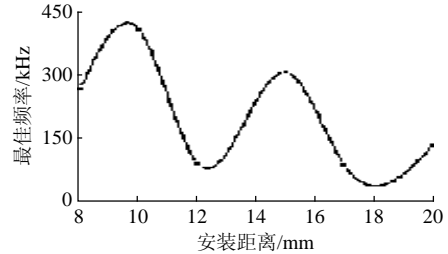


图 13 不同安装间距下的最佳除冰频率
Fig. 13 Optimal de-icing frequencies under different install intervals

3.3 换能器安装的初步设计

按照风力机桨叶的气动特性分析, 覆冰部位主要集中于桨叶前缘的上、下表面, 并且上表面多于下表面, 覆冰面积约占整个桨叶面积的 1/3, 因此, 换能器只需贴在桨叶最容易形成覆冰的部位, 黏贴面积不是很大。黏贴的密度与单个换能器的功率以及单位功率下换能器激发的剪切应力所能达到的除冰面积大小有关。根据已有的试验数据, 当换能器的功率为 100 W 时, 换能器激发的剪切应力大约能除掉 0.12 m² 面积上的覆冰(在加上压电陶瓷的热效应、超声空化效应, 以及桨叶在旋转状态下产生的剪切应力, 则影响的除冰面积会更大)。

对于换能器在风力机桨叶上的安装, 初步设计安装布局如图 14 所示。图 14 为桨叶截面翼型展开示意图, OO₁ 表示前缘中心线, 红色和蓝色分别表示换能器的正负接线柱, 2 条粗线表示主接线柱, 换能器的正负极焊接在横向细接线柱上, 安装宽度

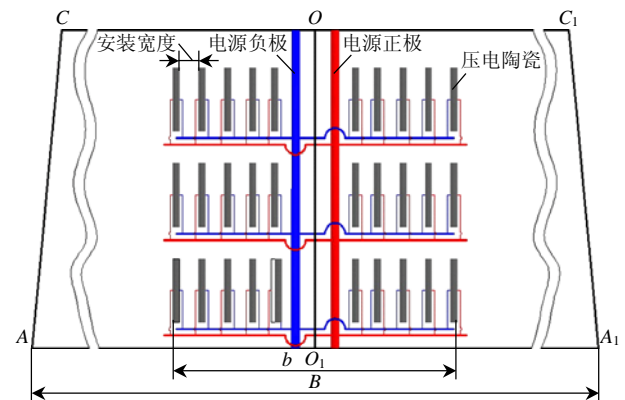


图 14 风力机桨叶展开内部压电换能器安装结构示意图
Fig. 14 Installation of internal piezoelectric transducer in an expanded wind turbine blade

由公式 $d=(n+1/2)\lambda_f$ 与换能器有效除冰面积决定。桨叶加工时, 将换能器埋嵌于桨叶前缘表面, 超声波发生器安装于风力机的机舱内, 接线柱与发生器通过滑环相连。

4 结论

1) 覆冰的最大黏附应力为 0.4 MPa, 而计算得出的 XY、XZ 方向界面剪切应力远远大于 0.4 MPa。因此, 基于超声波的风力机桨叶除冰技术在理论上是可行的。

2) 如果换能器的安装距离刚好为 Rayleigh 波半波长的奇数倍, 应力峰值方向相同, 水平剪切应力的激发效率最高。并且在覆冰区域内出现正负交替应力, 更有利于覆冰的剥落。

3) 考虑到压电换能器的加工、功率, 体积, 选择时尽量选择最佳除冰频率较低的。因为频率越高, 换能器的体积就越小, 功率也就相应地减小, 同样的面积上换能器的安装数量增加, 增加了安装成本与安装难度。建议选取安装距离为 12 mm, 频率为 93.1 kHz。

参考文献

- [1] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 3-8. Wang Chengxu, Zhang Yuan. Wind power generation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 3-8(in Chinese).
- [2] Clement Hochart, Guy Fortin, Jean Perron, et al. Wind turbine performance under icing conditions[J]. Wind Energy, 2008, 11(4): 319-333.
- [3] Jungyong Wang, Ayhan Akinturk, Stephen J Jones. Ice loads acting on a model Podded propeller blade[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2007, 129(3): 236-245.
- [4] Palacios J L, Zhu Yun, Smith E C. Ultrasonic shear and lamb wave interface stress for helicopter rotor de-icing purposes[C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Newport, RI, United States, 2006, 11: 8131-8142.
- [5] Venna S, Lin Y, Botura G. Piezoelectric transducer actuated leading edge de-icing with simultaneous shear and impulse forces[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(2): 509-515.
- [6] Rose J L. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2004: 20-56. Rose J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. He Cunfu, Wu Bin, Wang Xiuyan, translation. Beijing: Beijing Science Press, 2004: 20-56(in Chinese).
- [7] Auld B A. Acoustic fields and waves in solids[M]. 2nd Edition. Krieger Pub Co, 1990: 87-95.
- [8] Centolanza L R, Smith E C, Munsky B. Induced-shear piezo-electric actuators for rotor blade trailing edge flaps[J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11(1): 24-35.
- [9] Zhu Yun, Palacios J L, Rose J L, et al. De-icing of multi-layer composite plates using ultrasonic guided waves[C]//49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Schaumburg, IL, United States, 2008.
- [10] Kandagal S B, Venkatraman K. Piezo-actuated vibratory deicing of a flat plate[C]//46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/AS C Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, TX, United States, 2005: 3907-3914.
- [11] Magsoft Corporation. ATILA finite-element code for piezoelectric and magnetostrictive transducer modeling vesion 5.03 user's manual[M]. MAGNASOFT Co., 1993: 50-179.
- [12] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 156-235. Gong Shuguang, Xie Guilun, Huang Yunqing. Manual programming and command parameters of ANSYS[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009: 156-235(in Chinese).
- [13] Raraty L E, Tabor D. The adhesion and strength properties of ice[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Royal Society-Proceedings, 1985, 245(1241): 184-201.
- [14] Chu M C, Scavuzzo R J. Adhesive shear strength of impact ice[J]. AIAA Journal, 1991, 29(11): 1921-1926.



谭海辉

收稿日期: 2010-07-26。

作者简介:

谭海辉(1984), 男, 硕士研究生, 从事风力机故障诊断研究工作, xy_thh@163.com;

李录平(1963), 男, 教授, 研究生导师, 从事动力机械状态监测与故障诊断研究工作, cs_liluping@yahoo.com.cn。

(责任编辑 张媛媛)