

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107502

电磁超声检测风机叶片缺陷的有限元仿真研究*

郑浩¹ 周丽婷² 王湘明¹ 张磊³ 高珊²(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学 人工智能学院 沈阳 110870;
3. 沈阳工业大学 机械工程学院 沈阳 110870)

摘要: 针对传统风机叶片无损检测存在一定局限性的问题,提出一种电磁超声检测技术,其具有非接触、无需耦合剂、较强环境适应性等优点。该方法根据电磁超声检测原理,以13 mm厚度的无损叶片模型及脱胶、夹杂、气泡3种缺陷叶片模型为研究对象,首先利用有限元仿真软件COMSOL建立方形永磁体和跑道型线圈的电磁超声换能器,再通过换能器对各类叶片模型进行电磁超声检测得到应力云图及波形图,最后将缺陷叶片波形与无损叶片波形对比分析出叶片缺陷情况。研究表明,电磁超声仿真模型可以检测出叶片内部的3种缺陷,证明了缺陷回波与缺陷半径基本呈线性关系及底波与缺陷半径呈负相关,验证了对风机叶片缺陷进行电磁超声有限元模拟分析的可行性。

关键词: 无损检测;电磁超声;风机叶片;有限元仿真

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Finite element simulation study on electromagnetic ultrasonic detection of wind turbine blade

Zheng Hao¹ Zhou Liting² Wang Xiangming¹ Zhang Lei³ Gao Shan²(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. School of Artificial Intelligence, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
3. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In view of the limitations of traditional nondestructive testing methods for wind turbine blades, this paper proposes an electromagnetic ultrasonic testing technology. The technology has the advantages of non-contact, no coupling agent and strong environmental adaptability. In this method, according to the principle of electromagnetic ultrasonic detection, the research objects are 13 mm non-destructive blades and defective blades with bubbles, inclusions and degumming. Firstly, the electromagnetic ultrasonic transducer with square permanent magnet and track coil is built by using COMSOL. Then, the stress nephograms and waveforms of various blade models are obtained through the electromagnetic ultrasonic transducer. Finally, the defect waveform is compared with non-destructive waveform to analyze the defect condition of the blade. The results show that the simulation model can detect three kinds of defects inside the blade, which proves that the relationship between the defect echo and the defect radius is basically linear, and the relationship between the bottom wave and the defect radius is negative, and verifies the feasibility of the electromagnetic ultrasonic finite element simulation analysis of the wind turbine defects.

Keywords: nondestructive testing; electromagnetic ultrasound; wind turbine blade; finite element simulation

0 引言

风能作为绿色清洁能源在自然界分布广泛,储量巨大,且风力发电不会受燃料和水的限制,具有广阔的发展前景^[1]。风机叶片是风力发电机组最为重要的组成部分,且叶片长期受负荷运行极易发生故障^[2],因此,进行及时有效

的风机叶片缺陷检测极为重要。

电磁超声检测是一种新兴的无损检测技术。电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)是一种通过电磁耦合在试件内部激发和接收超声波的装置,具有非接触、较强环境适应性、绿色、不需要耦合剂等优点^[3],广泛应用于各个领域。屠泽焘等^[4]将电磁超声检测技术应

收稿日期:2021-08-05

* 基金项目:辽宁省教育厅项目(LFGD2019007)、辽宁省高等学校产业技术研究院重大项目(201844016)资助

能更准确地计算出磁场和感应电流等参数的值^[17]。建好的横波电磁超声换能器模型如图 3 所示。

表 1 EMAT 仿真模型参数

参数	数值	参数	数值
永磁体尺寸	30 mm×10 mm	导线宽度/mm	0.1
永磁体剩磁	1.35T	导线高度/mm	0.035
永磁体提高	0.5	导线提高/mm	0.1
永磁体电导率/ (S·m ⁻¹)	6.25×10 ⁵	铜线电导率/ (S·m ⁻¹)	6×10 ⁷

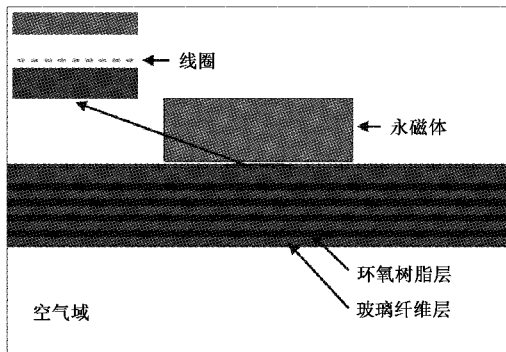


图 3 电磁超声换能器仿真图

风电叶片材料大部分为玻璃纤维增强复合材料。GFRP 具有诸多优点,例如轻量化设计、优异的机械性能、抗疲劳性能强、耐腐蚀性好、可设计便于成型。基于以上优势,GFRP 材料叶片成为现今风电叶片的主导。

风电叶片的服役环境恶劣复杂,容易受到潮湿、腐蚀、疲劳、雷击、高低温等的破坏,会产生脱胶、气孔、夹杂、蜂窝积水、冲击损伤等缺陷。本文以气孔、夹杂、脱胶 3 种缺陷为例,进行有限元仿真研究。为简化计算模型,风电叶片材料可视为近似各向同性材料,由环氧树脂层和玻璃纤维层交叉排布进行仿真,叶片厚度为 13 mm。具体参数如表 2 所示。激励信号设置为电流激励,中心频率为 2 MHz,激励电流按式(6)给定。激励电流波形如图 4 所示。

$$I(t) = \begin{cases} 10\cos(4f\pi t)(1 - \cos(4f\pi t/7)), & t < 3.5 \\ 0, & t \geq 3.5 \end{cases} \quad (6)$$

表 2 风电叶片材料参数

参数	数值
玻璃纤维层密度/(kg·m ⁻³)	1 890
玻璃纤维层泊松比	0.3
玻璃纤维层杨氏模量/Pa	41×10 ⁹
环氧树脂层密度/(kg·m ⁻³)	1 900
环氧树脂层泊松比	0.15
环氧树脂层杨氏模量/Pa	22×10 ⁹

仿真设置 3 种叶片缺陷模型,分别为树脂层气泡、树脂

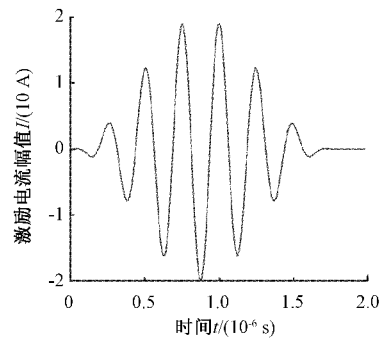


图 4 电流激励信号波形图

层脱胶和夹杂。夹杂型缺陷为在树脂层中夹杂其他材料,可采用和气泡缺陷同一种仿真模型,通过改变圆形缺陷内部材料进行仿真,仿真模型如图 5 所示。

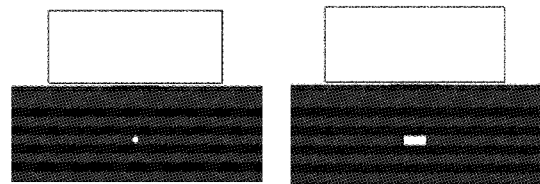


图 5 缺陷叶片模型局部放大图

图 5(a)为树脂层气泡和夹杂缺陷模型,在叶片中设置 0.7 mm 半径的圆形域。气泡缺陷的产生通常是树脂与纤维浸润不良。对树脂层气泡缺陷进行实验时,将圆形域内材料设置为空气。夹杂缺陷是由于在叶片生产过程中质量把控不严导致的,产生的原因主要是主观因素,例如浇灌树脂中的杂质、纤维层挤压时不慎落入异物。铁材料在工业生产中最为常见,在叶片制作中容易不慎掉落。因此,与正常叶片对比仿真时,将夹杂缺陷材料设置为铁。图 5(b)为树脂层脱胶缺陷模型,脱胶缺陷一般是在生产时,树脂用量不足或者压力不均匀导致的,可在叶片中设置 4 mm×1.5 mm 的矩形空气域进行仿真研究。

3 风机叶片缺陷的电磁超声检测分析

3.1 正常叶片与缺陷叶片内部应力差异

由电磁超声原理可知,超声波在叶片中传播时,受洛伦兹力影响会引起叶片内部应力变化,因此可由叶片内部应力变化对无损叶片和缺陷叶片进行对比分析。无损叶片与 3 种缺陷叶片内部应力变化如图 6 所示。由图 6(b)可以看出,当超声波接触到脱胶缺陷时,因缺陷面的阻隔大部分超声波能量。电磁超声波遇脱胶缺陷后反射回电磁超声换能器,换能器将接收到幅值较大的缺陷回波。小部分超声波会继续向下传播直至触底反弹,换能器将接收到幅值较小的底波。

由图 6(c)可知,当超声波遇到气泡缺陷时,小部分超声波由气泡边界向四周发散,因此换能器接收到的缺陷回

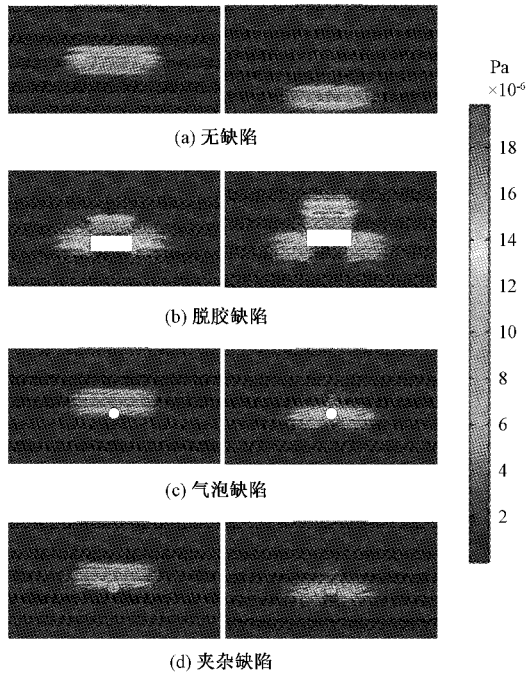


图6 无缺陷云图与3种缺陷应力云图

波幅值较小。由图6(d)可知,超声波经过夹杂缺陷时,与气泡缺陷相同,超声波由边界向四周发散。与气泡缺陷的差异是,部分能量会穿过夹杂缺陷向下继续传播。综上所述,由正常叶片与缺陷叶片的内部应力变化对比可知,缺陷叶片内部应力变化反映了电磁超声横波在缺陷叶片内部的传播规律,与正常风机叶片有较大差异。

3.2 正常叶片与缺陷叶片波形对比

在电磁超声横波的作用下,风电叶片所受洛伦兹力的 x 分量远远大于 y 分量。洛伦兹力作用于叶片,影响叶片内部质点的速度变化。因此,在探头正下方叶片中心取一点,以该点速度 x 分量变化波形作为参照,对比正常叶片与缺陷叶片的波形差异。由图7与8对比可以观察到,脱胶型缺陷的缺陷回波明显,底波幅值较小。由图7和9对比可知,气泡型缺陷在初始波与底波之间产生了幅值较小缺陷回波,成功检测出缺陷。由图7和10对比分析可以看出夹杂缺陷回波。与气泡缺陷不同之处为,夹杂缺陷波形的缺陷回波与底波之间的波型更为平缓。对气泡缺陷和夹杂缺陷分别计算缺陷回波峰值,可以得到气泡缺陷的缺陷回波峰值为 6.208×10^{-4} m/s,夹杂缺陷的底波峰值为 5.725×10^{-4} m/s,气泡缺陷的缺陷回波峰值较高。原因是当电磁超声波经过气泡缺陷时的超声波能量反射更强,符合由应力云图分析得出的结论。综上所述,经过正常叶片波形与3种缺陷叶片波形的对比,仿真符合电磁超声检测规律,缺陷回波明显,可以准确地检测出缺陷叶片。

3.3 气泡缺陷半径对波形的影响

为进一步研究缺陷大小与波形幅值的关系,取气泡缺陷半径0.4、0.5、0.6、0.7 mm作为研究对象,结果如图11

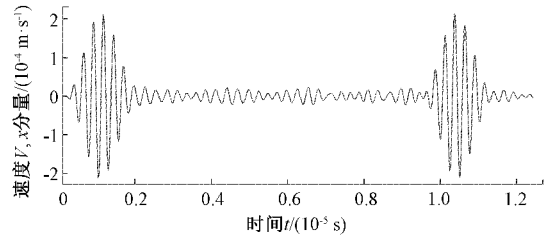


图7 无缺陷波形图

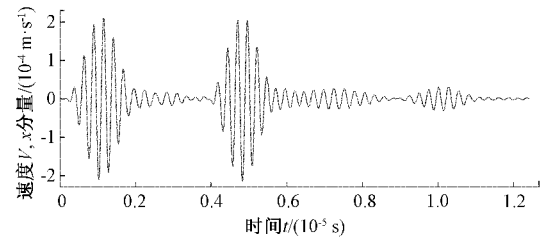


图8 脱胶缺陷波形图

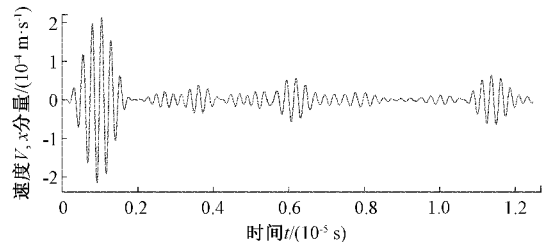


图9 0.7 mm 气泡缺陷波形图

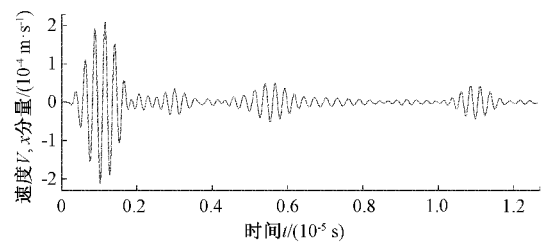


图10 0.7 mm 夹杂缺陷波形图

和12所示。从图11可以看出,底波峰值随着缺陷半径的增大而减小,缺陷回波的变化并不明显。为确定缺陷回波幅值与缺陷半径的关系,绘制图12进行定量分析。绘制底波和缺陷回波的峰值随缺陷半径变化图,可以看出,缺陷半径越大则缺陷回波幅值越大,近似线性正相关,而底波随着缺陷半径的增大而减小近似线性负相关。

3.4 不同材料的夹杂缺陷回波峰值分析

夹杂缺陷的产生使得风电叶片力学性能降低,铁材料和PVC(polyvinyl chloride)材料在工业生产中最为常见,易在制作过程中落入CFRP中,破坏叶片结构^[18],且CFRP在制备和长期服役过程中易产生积水^[19]。为深入研究叶片夹杂缺陷波形,选取铁、PVC和水3种典型材料进行仿真分析,缺陷半径设置为0.7 mm,得到的缺陷回波与底波情况如表3所示。

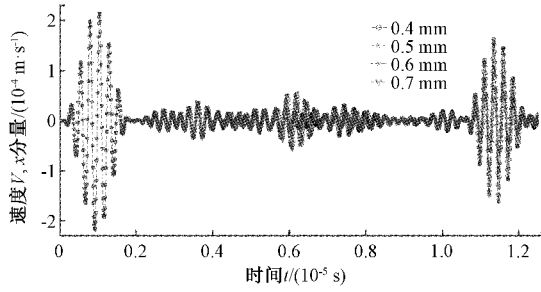


图 11 改变气泡缺陷半径波形对比

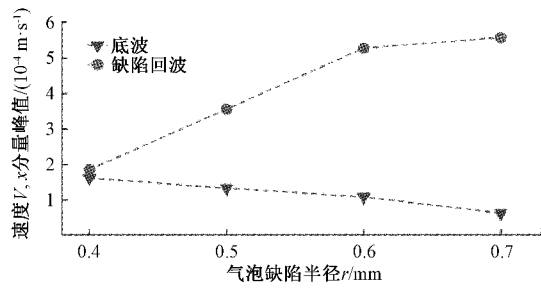


图 12 底波与缺陷回波随气泡缺陷半径变化图

从表 3 可以看出,半径为 0.7 mm 的 3 种材料夹杂缺

表 3 不同材料缺陷回波与底波峰值

材料	缺陷回波峰值/ ($10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	底波峰值/ ($10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
铁	5.725	4.183
PVC	5.579	5.011
水	5.568	4.562

陷回波峰值在 $5.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 至 $5.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 范围内,变化浮动不大。将表 3 的缺陷回波峰值数据与 3.2 节中的半径为 0.7 mm 的气泡缺陷回波峰值比较可以看出,3 种材料的缺陷回波峰值全部低于气泡缺陷回波的峰值 $6.208 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。因此,在区分夹杂缺陷和气泡缺陷时,能够以缺陷回波峰值作为判断依据。峰值低的为夹杂缺陷,峰值高的为气泡缺陷。

4 各类缺陷量化分析

为排除上述各类缺陷分析结论的偶然性和仿真量较少的局限性,改变脱胶缺陷尺寸、气泡缺陷半径、夹杂缺陷材料等参数,完成多组仿真实验对其深入分析。结果如表 4 所示。

表 4 各类缺陷的缺陷回波与底波峰值

类型	缺陷材料	缺陷尺寸/ mm	缺陷回波峰值/ ($10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	底波峰值/ ($10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
无缺陷	—	—	—	21.300
脱胶缺陷	空气域	5(宽)×1.5(高)	20.530	2.956
脱胶缺陷	空气域	4(宽)×1.5(高)	19.801	3.255
脱胶缺陷	空气域	3(宽)×1.5(高)	19.143	3.682
脱胶缺陷	空气域	2(宽)×1.5(高)	18.216	4.791
气泡缺陷	空气域	半径 0.35	1.336	2.049
气泡缺陷	空气域	半径 0.55	4.932	1.168
气泡缺陷	空气域	半径 0.75	6.643	0.531
夹杂缺陷	铁	半径 0.55	4.399	1.268
夹杂缺陷	PVC	半径 0.55	4.012	1.371
夹杂缺陷	水	半径 0.55	3.999	1.655
夹杂缺陷	铁	半径 0.75	6.001	0.699
夹杂缺陷	PVC	半径 0.75	6.369	0.521
夹杂缺陷	水	半径 0.75	6.143	0.639

表 4 共列出了 14 组对照仿真实验结果,根据结果可以分析出:脱胶缺陷的缺陷回波峰值随着宽度的减小而减小,但缺陷回波峰值在各类缺陷中最高,仅略低于无缺陷底波;气泡缺陷和夹杂缺陷在半径相同的情况下,夹杂缺陷无论是何材料,缺陷回波峰值都略低于气泡缺陷;3 种缺陷的缺陷回波可以由峰值确定其缺陷类型。综上所述,14 组对照仿真实验验证了可以对电磁超声检测得到的缺陷回波与底波进行定量分析,从而判断出叶片的缺陷类型。

5 结 论

本文研究风力发电机叶片的缺陷检测,针对传统无损检测方法存在的局限性,以及传统压电超声检测需要涂抹耦合剂限制应用等问题,提出了电磁超声检测方法。该方法利用 COMSOL 对电磁超声发射过程进行模拟,求解缺陷应力云图及波形图。研究结果表明,对风机叶片的电磁场超声检测仿真可以有效地检测出风机叶片内部缺陷,根

据正常叶片和缺陷叶片波形的量化分析,可以进一步分析出缺陷类别。缺陷半径变化仿真实验分析验证了缺陷回波和缺陷半径基本呈线性关系,而底波与缺陷半径呈负相关的电磁超声检测规律。综上所述,电磁超声检测技术具有更直观、更快速实时的优势,更具有可靠性。分析结果验证了所提出检测方法的合理性和有限元分析用于电磁超声缺陷检测的可行性。

参考文献

- [1] 杨家欢,宗哲英,王祯,等. 风机叶片检测的研究现状及进展[J]. 复合材料科学与工程,2020(6):109-113.
- [2] GALAPPATHTHI U I K D, SILVA A K M, MACDONALD M, et al. Review of inspection and quality control techniques for composite wind turbine blades[J]. INSIGHT,2017,54(2):82-85.
- [3] SUN H, URAYAMA R, HASHIMOTO M, et al. Novel electromagnetic acoustic transducer for measuring the thickness of small specimen areas[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018:1-10.
- [4] 屠泽熹,涂君,袁宁,等. 聚氨酯夹芯板发泡缺陷电磁超声导波快速检测[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):270-279.
- [5] 叶至灵. 燃气管道腐蚀缺陷电磁超声检测方法[J]. 仪表技术与传感器,2020(8):100-103.
- [6] 吴国境,王健,张永,等. 自然激励下风电叶片损伤的红外热像检测研究[J]. 太阳能学报,2020,41(9):353-358.
- [7] DAVID G, DMITRI T. An experimental study on the data-driven structural health monitoring of large wind turbine blades using a single accelerometer and actuator [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,127(5):102-119.
- [8] 曹弘毅,姜明顺,马蒙源,等. 复合材料层压板分层缺陷相控阵超声检测参数优化方法[J]. 材料工程,2020,48(9):158-165.
- [9] 刘嘉同,金永,张浩亚,等. 基于多层界面脱粘的超声检测方法研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(9):58-62.
- [10] KANG L, ZHANG C, STEVE D, et al. Enhancement of ultrasonic signal using a new design of Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT and E International,2017,86(11):36-43.
- [11] CUI X, PEI P, XIAO S Q, et al. Development of a flexible film electromagnetic acoustic transducer for nondestructive testing[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2017(258):68-73.
- [12] 金亮,冯时,杨庆新,等. 基于改进 NSGA-III 的电磁超声换能器多目标优化[J]. 仪器仪表学报,2021,42(1):49-59.
- [13] 杨理践,邢燕好,张佳. 电磁超声导波在管道中螺旋向传播的机理研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):60-69.
- [14] 钦峰,谢国利. 电磁超声换能器金属缺陷探测有限元仿真研究[J]. 电子测量技术,2016,39(7):39-43.
- [15] 王志春,孙雪冬. 连铸坯尾端电磁超声横波换能机制分析[J]. 声学技术,2019,38(5):532-536.
- [16] SUN H Y, PENG L S, HUANG S L, et al. Analytical model and optimal focal position selection for oblique point-focusing shear horizontal guided wave EMAT [J]. Construction and Building Materials, 2020,258:120375.
- [17] 岑鑫,潘高,王雪梅,等. 横波测厚电磁超声换能器的优化设计及试验研究[J]. 电子测量技术,2021,44(5):176-182.
- [18] 王新. 风电叶片典型缺陷的性能评估与模式识别[D]. 湘潭:湘潭大学,2019.
- [19] 卜迟武,刘涛,赵博,等. CFRP/Al 蜂窝结构缺陷红外热图特征的多结构形态学-PCNN 识别[J/OL]. 电子测量与仪器学报,2021:1-8[2021-12-17].

作者简介

郑浩,讲师,博士,主要研究方向为机器视觉与模式识别。
E-mail: zhenghao@sut.edu.cn

周丽婷(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为风机叶片缺陷的电磁超声检测技术。
E-mail: zltandzl@163.com

王湘明,教授,硕士,主要研究方向为风力发电、自控技术。
E-mail: weisut@126.com

张磊,硕士研究生,主要研究方向为旋转设备故障诊断与寿命预测。
E-mail: 15042015310@163.com

高姗,硕士研究生,主要研究方向为风电机组螺栓应力电磁超声检测技术。
E-mail: 1006640261@qq.com