

# Development in Wind Turbine Blade Sensing Technology

Shanchao Jiang

School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu  
Email: [jiangshanchao88624@126.com](mailto:jiangshanchao88624@126.com)

Received: Feb. 14<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 28<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 7<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Taking the safety and health detection of wind turbine blade as the research background, this paper summarizes and analyzes the wind turbine blade sensing technology from two aspects. One is the photoelectric detection technology and the other one is optical fiber detection technology. After the analysis, the photoelectric detection technology has some disadvantages, such as complex system, easy to be affected by noise, low sensitivity, and low efficiency of damage signal conversion. Optical fiber detection technology has achieved some research results in on-line health detection of wind turbine blade. However, it has not effectively solved the signal conversion between the dynamic blade and the static tower transmission, and has not realized the regional monitoring and achieved the synchronous monitoring of multiple blade group data, and so on. The research progress of wind turbine blade sensing technology obtained in this paper can play a guiding role in the next research direction of wind turbine blade sensing technology.

## Keywords

Wind Turbine Blade, Photoelectric Detection Technology, Optical Fiber Detection Technology

---

# 风电叶片检测技术的研究进展

蒋善超

盐城工学院, 电气工程学院, 江苏 盐城  
Email: [jiangshanchao88624@126.com](mailto:jiangshanchao88624@126.com)

收稿日期: 2019年2月14日; 录用日期: 2019年2月28日; 发布日期: 2019年3月7日

---

## 摘要

以风电叶片安全健康检测作为研究背景, 本文从风电叶片光电类检测技术及光纤检测技术两个方面对风

电叶片检测技术进行汇总分析。通过分析得出：风电叶片光电类检测技术存在着系统复杂、信号易受噪声影响、灵敏度低、损伤信号转换效率低等缺点；而光纤检测技术虽在风电叶片健康在线检测方面取得一定研究成果，但尚未有效解决动态叶片与静态塔架之间信号的转换传输，尚未实现区域监控，未做到多个叶片组数据的同步监测等。本文分析所得风电叶片检测技术的研究进展在一定程度上可对于风电叶片检测技术的下一步研究方向起到引导作用。

## 关键词

风电叶片，光电类检测技术，光纤检测技术

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风力发电因其分布范围广泛、发电技术相对比较成熟，已经成为众多新型可再生能源中最具有大规模开发和商业化发展前景的清洁能源[1] [2] [3] [4] [5]。在整个风力发电系统中，风电叶片造价很高，约占系统总价的 1/4 到 1/3，且其本身结构的可靠性及性能的好坏将直接影响整个系统的运行稳定与否。这使得风电叶片成为影响风力发电系统运行状态及发电性能的核心部件。因此，实现风电叶片安全健康状态的在线实时检测对于降低风力发电系统成本、保障系统健康稳定发展将起到至关重要的推动促进作用。为了解现有风电叶片检测技术的发展现状，本文主要从光电类检测技术、光纤检测技术及风电叶片损伤定位算法研究等几个方面进行分析汇总。这在一定程度上指出目前风电叶片检测技术存在的问题，且为指导其下一步的发展方向提供基础支持。

## 2. 风电叶片光电类检测技术

现有，风电叶片安全健康状态常用的检测方法主要有超声检测法[6]、X 射线检验法[7]、微波检测法[8]、声发射检测法[9]等。

### 2.1. 超声检测法

超声检测法是利用超声波技术进行检测工作的，因其能够检测金属、非金属和复合材料等多种试件、穿透能力强、可对较大厚度范围内的工件内部缺陷进行检测等优点而被广泛应用。王昌盛等人[10]通过分析超声场在复合材料风电叶片前缘胶接缺陷处的分布情况，设计超声波探头实现前缘胶接缺陷的有效检测。顾兴旺等人[11]针对传统超声 A 扫探伤风电叶片存在检测效率低、员工劳动强度大、仪器智能化水平低等问题，研发了一套可实时显示并保存当前位置信息、波形信息和 C 扫描彩图的超声扫查系统。该系统能够有效检测风电叶片粘接区域缺陷的种类、轮廓和位置，且运行稳定可靠。但风电叶片由于其结构复杂、材料呈各向异性等，超声检测方法难以胜任所有的检测需求，尚不能有效的保证风电叶片的安全有效检测。

### 2.2. X 射线检验法

X 射线检验法是利用 X 射线在穿透被检物各部分时强度衰减的不同，检测被检物中缺陷的，其在风电叶片检测技术方面属于最直接、最有效的无损检测技术之一，特别适合于检测风电叶片中的孔隙和夹

杂等体积型缺陷。Jasiuniene E 等人[12]采用两个传感器获取 X 射线照相技术信息, 实验结果证实 X 射线检验法能够检测体积缺陷, 如缺乏胶水和内部结构不规则。Holub W [13]采用层析成像的方法为旋转动态风电叶片的三维图像的获得提供了一种有效的解决方法。旋转动态风电三维图像可用于分析获得旋转叶片不同类型的缺陷, 尤其是复合叶片内部的波浪形缺陷。然而, X 射线检验法存在辐射性、操作复杂、需要各种扫描设备, 现场应用性受限。

### 2.3. 微波检测法

微波是一种电磁辐射信号, 其波长变化范围从 1 m 到 1 mm 即频率变化范围为 300 MHz 到 300 GHz。与超声波信号不同, 微波信号可以在较低损耗的前提下透射入介电材料内部且与其内部结构相互作用。Pieraccini M [14]将微波检测技术应用于风电叶片检测。实验结果证实微波检测法可以实现风电叶片内部缺陷的检测。Zhen Li [15]等人通过分析微波层析图像获得复合材料风电叶片 T 形接头材料内部的缺陷, 通过实验获得: 1) 微波反射系数相位的变化可以用于判定接头分层, 而层析图强度的变化可以用于反映接头胶结厚度的差异; 2) 从检测灵敏度曲线可得, 微波检测最佳检测频率范围为 18~19.5 GHz。然而, 微波检测法需要高频发射器及扫描器、操作复杂, 其现场应用前景受到一定限制。

### 2.4. 声发射检测法

材料中因裂缝扩展、塑性变形或相变等引起应变能快速释放而产生的应力波现象称为声发射。声发射检测法就是通过接收和分析材料的声发射信号来评定材料性能或结构完整性的无损检测方法, 因其可实现围微观裂纹发展趋势的判断、损伤机制构建、可现场在线监测等特点近年来在大型结构体健康监测中应用越来越广。Tsopelas N [16]等人将多波段声发射检测系统安装于实际运行中的风电叶片且声发射检测系统稳定运行六个月。实验数据证实多波段声发射检测系统可以实现多种工作环境状态下的风电叶片的有效检测。李梅[17]等人重点研究了风电叶片在不同疲劳程度的声发射特性和损伤状况, 得出声发射波垂直于纤维方向传播过程中, 由于纤维—树脂循环界面的存在, 使得声发射波更容易出现衰减, 横向衰减比纵向衰减快很多; 多向玻璃纤维复合材料在拉伸载荷作用下的主要失效模式有沿纤维方向撕裂、纤维断裂、纤维/基体脱粘和纤维分层; 声发射信号可以很好地表征风电叶片复合材料损伤破坏的动态过程, 通过声发射信号的分析参数和波形分析可以定性描述声发射源的特征。然而, 声发射检测法易受噪声影响, 且实现定量的分析需要大量的数据作为支持。

综上所述, 表 1 给出了上述几种风电叶片光电类检测技术的优缺点, 以期为其进一步的研究发展指明方向。

**Table 1.** Advantage and disadvantage comparison of Wind Turbine Blade photoelectric detection technology

**表 1.** 风电叶片光电类检测技术的优缺点对比

检测技术	优点	缺点
超声检测法	检测厚度大、灵敏度高、速度快、成本低、对人体无害, 能对缺陷进行定位和定量	超声波检测对工作表面要求平滑, 对于风电叶片(结构复杂、材料呈各向异性等)超声波检测存在局限性
X 射线检验法	能较直观地显示工件内部缺陷的大小和形状	辐射性、操作复杂、需要各种扫描设备, 现场应用性受限, 可实现定性非定量检测
微波检测法	非接触测量; 检测速度快、灵敏度高, 可以进态检测与实时处理	微波检测法需要高频发射器及扫描器、操作复杂, 且微波检测仪表的零点漂移和标定问题尚未很好的解决
声发射检测法	动态检验方法; 对线性缺陷较为敏感; 可提供缺陷随载荷、时间、温度等外变量而变化的实时信息	只能给出声发射源的部位、活性和强度, 不能给出声发射源内缺陷的性质和大小, 易受噪声影响, 且实现定量的分析需要大量的数据作为支持

除上述风电叶片光电类检测技术外,还有激光超声技术[18]、太赫兹[19]等检测技术。然而,风电叶片光电类检测技术存在着系统复杂、信号易受噪声影响、灵敏度低、损伤信号转换效率低等缺点。

### 3. 风电叶片光纤检测技术

光纤检测技术因其本身防电磁扰动、抗腐蚀、测量精确、复用能力强、便于组网等特性备受关注。短短几十年时间,光纤检测技术已经成为发展最为迅猛的监测技术手段,且在航空航天[20]、土木工程[21]、风力发电[22]、石油化工[23]、复合材料[24]、食品检测[25]等行业取得了广泛的应用。这为实现风电叶片多参数的在线检测提供了一种有效的解决方法,且国内外学者在此方面已作了大量的研究工作。

目前,国际上针对光纤检测技术的性能和可靠性及风电叶片的损伤识别开展了一系列的研究,其中比较有代表性的研究成果:德国 Kerstin Schroeder 等人通过波分复用的组网方式将光纤光栅传感器应用到功率为 0.5 MW,叶片长度为 53 m 的风电叶片检测,在技术层面上肯定的评估了光纤光栅传感器在风电叶片检测中的性能和可靠性[26]。日本 Eum S.H.等人通过采用光纤光栅与长光纤光栅组成多路复用网络成功的实现了风电叶片制造和结构健康的损伤检测[27]。韩国 Chang-Hwan Kim 等人通过对比应变片及光纤光栅传感器在小型风电叶片中的应用,证实了光纤光栅在风电叶片检测中的优势[28]。韩国 Ki-Sun Choi 等人采用带有温度补偿功能的光纤光栅传感器实现了风电叶片静态载荷施载的测量[29]。哥伦比亚 Julian Sierra Perez 等人对比分析了 FBGs (Fiber Bragg gratings)、OBR (Optical Backscatter Reflectometer)及应变片,并应用模式识别实现了风电叶片的损伤及非线性检测[30]。美国 Austin Downey 等人通过多传感器信息融合和特征提取网络重构的方法实现了的静态风电叶片的损伤检测[31]。

国内针对光纤检测技术在风电叶片健康检测方面同样做出了较多的研究工作。哈尔滨工业大学张志春等人将光栅盘绕粘贴在叶片表面,对比分析光纤光栅与应变片测试结果确定了光纤光栅单点应变监测的优点[32]。邹洁等人将光纤光栅组网布设于风电叶片的内部并用小波包能量谱分析损伤信号,实现了静态风电叶片的无损检测[33]。中国航空工业集团公司北京长城计量测试所采用内置光纤传感器实现了叶片在疲劳试验中应变场的检测。基于此,王文娟等人[34]进一步实现了叶片根部摆振和挥舞方向的弯矩随风速变化情况的检测,陈文光[35]等人提出了一种基于光纤传感技术的载荷测量系统,能够有效地测量风力发电机运行中叶片的载荷数据。这为实现风电叶片安全健康状态的在线实时检测奠定了一定的理论及实践基础。

基于上述风电叶片光纤检测技术的分析,光纤检测技术在风电叶片表面应变及其损伤检测方面发挥了广泛而重要的作用,其中光纤光栅检测技术已经相对较为成熟,已经在静态风电叶片表面应变及其损伤检测方面取得了较为广泛的应用。然而,有关实现风电叶片安全健康状态在线实时检测的光纤系统报告非常有限,其原因在于:①现有的光纤检测系统多数针对静态风电叶片对象而研发的,而受限于动态风电叶片与静态塔架间光信号的有效转换连接,光纤在风电叶片实时在线系统的研发涉及较少;②风电叶片所处的工作环境及其巨大尺寸对于光纤检测元件的稳定可靠性及其组网方式提出了更高的要求;③风电叶片多区域损伤导致的混合信号为光纤检测系统信号提取造成了一定的困扰;④现已发表的具有较高损伤定位精度的算法多数基于二维复合材料[36] [37] [38] [39]而将其单纯的应用于实现风电叶片曲面三维复合材料的定位存在一定的局限性,会大大降低算法的计算精度,影响损伤定位的结果。

### 4. 总结

风电叶片安全健康状态在线实时检测的实现对于降低风力发电系统成本、保障系统健康稳定发展将起到至关重要的推动促进作用。本文主要从风电叶片光电类检测技术及光纤检测技术两个方面总结目前风电叶片检测技术的发展研究现状。风电叶片光电类检测技术目前主要有超声检测法、X 射线检验法、



微波检测法、声发射检测法、激光超声技术、太赫兹等检测技术。上述光电类检测技术在实现风电叶片健康检测方面存在诸多缺点,如系统复杂、信号易受噪声影响、灵敏度低、损伤信号转换效率低等。经过几十年的发展,光纤检测技术因其本身抗电磁干扰、易组网等特性在风电叶片方面取得了较为显著的研究成果,但其距离实际大范围推广应用还存在一定的弊端,如尚未有效解决动态叶片与静态塔架之间信号的转换传输,尚未实现区域监控,未做到多个叶片组数据的同步监测等。本文分析所得风电叶片检测技术的研究进展,可为将来风电叶片检测技术的研究方向提供基础数据支持。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(61803325),江苏省自然科学基金(BK20181049),江苏省教育厅面上项目(18KJB510046)。

## 参考文献

- [1] Caselitz, P. and Rotor, J.G. (2005) Condition Monitoring for Improved Operational Safety of Offshore Wind Energy Converters. *Journal of Solar Energy Engineering*, **127**, 253-261. <https://doi.org/10.1115/1.1850485>
- [2] Xia, C.L. and Song, Z.F. (2009) Wind Energy in China: Current Scenario and Future Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **139**, 1966-1974. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.004>
- [3] Jiang, L.P., Chi, Y.N., Qin, H.Y., et al. (2011) Wind Energy in China. *IEEE Power and Energy Magazine*, **9**, 36-46. <https://doi.org/10.1109/MPE.2011.942350>
- [4] Zhang, W.Q., Zhang, X.Y., Xia, Y.K., et al. (2016) An Evolution Model with High Proportion of Renewable Energy. *35<sup>th</sup> Chinese Control Conference*, Chengdu, 27-29 July 2016, 10073-10078.
- [5] Gao, Z.Q., Tang, C., Zhou, X.S., et al. (2016) An Overview on Development of Wind Power Generation. *2016 Chinese Control and Decision Conference*, Yinchuan, 28-30 May 2016, 435-439. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2016.7531024>
- [6] Tsukuda, K., Egawa, T., Taniguchi, K., et al. (2012) Average Difference Imaging and Its Application to Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Wind Turbine Blade. *2012 IEEE International Conference on SMC*, Seoul, 14-17 October 2012, 2601-2604.
- [7] Yang, R.Z., He, Y.Z. and Zhang, H. (2016) Progress and Trends in Nondestructive Testing and Evaluation for Wind Turbine Composite Blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **60**, 1225-1250. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.026>
- [8] Li, Z., Haigh, A., Soutis, C., et al. (2016) Delamination Detection in Composite T-Joints of Wind Turbine Blades Using Microwaves. *Advanced Composites Letters*, **25**, 83-86.
- [9] Tang, J.L., Soua, S., Mares, C., et al. (2016) An Experimental Study of Acoustic Emission Methodology for in Service Condition Monitoring of Wind Turbine Blades. *Renewable Energy*, **99**, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.048>
- [10] 王昌盛. 风电叶片前缘超声检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [11] 顾兴旺, 李婷, 龙士国, 等. 风电叶片智能高效便携式 C 扫描超声检测系统开发[J]. *测控技术*, 2018, 37(8): 121-125.
- [12] Jasiuniene, E., Raisutis, R., Sliteris, R., Voleisis, A., Vladisaukas, A., Mitchard, D., et al. (2009) NDT of Wind Turbine Blades Using Adapted Ultrasonic and Radio Graphic Techniques. *Insight*, **51**, 477-483. <https://doi.org/10.1784/insi.2009.51.9.477>
- [13] Holub, W. and Haßler, U. (2014) Evaluation of Acquisition Geometries for Imaging of Ondulations in Glass-Fiber Reinforced Materials. *Proceedings of the International Conference on Industrial Computed Tomography*, Wels, Austria, 53-54.
- [14] Pieraccini, M., Parrini, F., Fratini, M., et al. (2008) In-Service Testing of Wind Turbine Towers Using a Microwave Sensor. *Renew Energy*, **33**, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.02.001>
- [15] Li, Z., Soutis, C., Haigh, A., et al. (2016) Microwave Imaging for Delamination Detection in T-Joints of Wind Turbine Composite Blades. *2016 46th European Microwave Conference*, London, UK, 4-6 October 2016, 1235-1238.
- [16] Tsopelas, N., Kourousis, D., Ladis, I., et al. (2012) Health Monitoring of Operating Wind Turbine Blades with Acoustic Emission. In: Paipetis, A.S., et al., Eds., *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V*, CRC Press, Boca Raton, 347-352.

- [17] 李梅. 基于声发射技术的风电叶片疲劳损伤监测研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [18] 郭佳, 李四海, 宁宁, 等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 487-490.
- [19] Hsu, D.K., Im, K.H., Chiou, C.P. and Barnard, D.J. (2011) An Exploration of the Utilities of Terahertz Waves for the NDE of Composites. *AIP Conference Proceedings*, **1335**, 533-540. <https://doi.org/10.1063/1.3591897>
- [20] Giurgiutiu, V. (2015) Structure Health Monitoring (SHM) of Aerospace Composite. In: Irving, P.E. and Soutis, C., Eds., *Polymer Composite in the Aerospace Industry*, Elsevier, Waltham, 449-507.
- [21] Shen, W., Yan, R., Xu, L., et al. (2015) Application Study on FBG Sensor Applied to Hull Structural Health Monitoring. *Optik*, **126**, 1499-1504. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.04.046>
- [22] Choi, K.S., Huh, Y.H., Kwon, I.B., et al. (2012) A Tip Deflection Calculation Method for a Wind Turbine Blade Using Temperature Compensated FBG Sensors. *Smart Materials and Structures*, **21**, Article ID: 025008.
- [23] Ren, L., Jia, Z.-G., Li, H.-N., et al. (2014) Design and Experimental Study on FBG Hoop-Strain Sensor in Pipeline Monitoring. *Optical Fiber Technology*, **20**, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.11.004>
- [24] Jiang, S., Wang, J., Sui, Q., et al. (2016) Measurement of CFRP Elastic Modulus Based on FBG Reflectance Spectrum Analysis. *Measurement*, **77**, 240-245. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.012>
- [25] Coelho, L., Viegas, D., Santos, J.L., et al. (2016) Optical Sensor Based on Hybrid FBG/Titanium Dioxide Coated LPPG for Monitoring Organic Solvents in Edible Oils. *Talanta*, **148**, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.10.067>
- [26] Schroeder, K., Ecke, W., Apitz, J., et al. (2006) A Fibre Bragg Grating Sensor System Monitors Operational Load in a Wind Turbine Rotor Blade. *Institute of Physics Publishing*, **17**, 1167-1172.
- [27] Eum, S.H., Kageyama, K., Murayama, H., et al. (2008) Process/Health Monitoring for Wind Turbine Blade by Using FBG Sensors with Multiplexing Techniques. *Proceedings of SPIE*, Perth, 7004 (70045B-1). <https://doi.org/10.1117/12.786240>
- [28] Kim, C.H., Paek, I. and Yoo, N. (2010) Monitoring of Small Wind Turbine Blade Using FBG Sensors. *International Conference on Control Automation and Systems*, Gyeonggi-do, South Korea, 1059-1061.
- [29] Choi, K.S., Huh, Y.H., Kwon, I.B., et al. (2012) A Tip Deflection Calculation Method for a Wind Turbine Blade Using Temperature Compensated FBG Sensors. *Smart Materials and Structures*, **21**, 1-9. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/2/025008>
- [30] Perez, J.S., Torres-Arredondo, M.A., et al. (2016) Damage and Nonlinearities Detection in Wind Turbine Blades Based on Strain Field Pattern Recognition. FBG2, OBR and Strain Gauges Comparison. *Composite Structures*, **135**, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.137>
- [31] Downey, A., Ubertini, F. and Laflamme, S. (2017) Algorithm for Damage Detection in Wind Turbine Blades Using a Hybrid Dense Sensor Network with Feature Level Data Fusion. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **168**, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.016>
- [32] 陈娟子. 基于光纤光栅的风机叶片应变监测关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [33] 邹洁, 何超, 朱永凯. 基于 FBG 和小波包能量谱的风机叶片无损检测[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 133-138.
- [34] 王文娟, 宋昊, 盛楠, 等. 基于光纤光栅传感的风电叶片监测技术浅析[J]. 风能, 2016(6): 78-81.
- [35] 陈文光, 谭银银, 代勇波. 基于光纤传感技术的风电叶片载荷实时监测技术初探[C]//中国农机工业协会风能设备分会风能产业. 2015.
- [36] 赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅阵列和 MVDR 算法的声发射定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3012-3017.
- [37] Sai, Y., Jiang, M., Sui, Q., et al. (2016) Multi-Source Acoustic Emission Localization Technology Research Based on FBG Sensing Network and Time Reversal Focusing Imaging. *Optik*, **127**, 493-498. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.067>
- [38] Lu, S., Jiang, M., Sui, Q., et al. (2015) Damage Identification System of CFRP Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Composite Structures*, **125**, 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.038>
- [39] Liang, T., Ren, W., Tian, G.Y., et al. (2016) Low Energy Impact Damage Detection in CFRP Using Eddy Current Pulsed Thermography. *Composite Structures*, **143**, 352-361. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.039>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)