

文章编号: 1001-3806(2012)05-0689-04

## 风力发电中全光纤风速传感器及制作工艺研究

王 昌,倪家升,王纪强,雷 涛,刘小会

(山东省科学院 激光研究所 山东省光纤传感重点实验室, 济南 250014)

**摘要:** 为了实现风力发电场多点、远程风速检测,便于测量和风场风速物联网的构建,采用风杯来调制光纤布喇格光栅的方式,设计了一种全光纤风速传感器。通过光纤光栅波长的变化频率可以求出对应风速值,并对传感器设计结构进行了说明,介绍了传感器的制作封装工艺以及相关的设备和实验数据。结果表明,传感器运行稳定可靠,测量误差不超过0.16m/s,适合于风电场的多点大容量风速监测,对风力发电实际应用具有重大意义。

**关键词:** 传感技术; 光纤风速传感器; 波分复用; 光纤物联网; 风力发电

**中图分类号:** TP212.2<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.029

### All-fiber velocity sensors applied in wind power generation and their fabrication process

WANG Chang, NI Jia-sheng, WANG Ji-qiang, LEI Tao, LIU Xiao-hui

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Institute, Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China)

**Abstract:** In order to realize wind field multipoint and remote sensing, make it convenient to monitor wind speed and set up the internet of thing of wind field velocity, an all-fiber wind velocity sensor fabric was introduced with a wind-cup to modulate fiber Bragg grating wavelength, so that the wind velocity can be obtained based on the wavelength changing frequency. Design scheme was described in detail. Fabrication process of the probe was introduced emphatically and some experimental data were also presented. The results show that the system works stably and reliably. The system can achieve a location precision of 0.16m/s and this system is very suitable for large wind power generation in consideration of its large-capacity.

**Key words:** sensor technique; optical fiber wind velocity sensor; wavelength decision multiplexing; fiber internet of things; wind power generation

## 引 言

可再生能源特别是风能开发利用已得到世界各国的高度重视<sup>[1]</sup>。风力发电已经成为当今世界新能源开发利用中技术发展最快、最成熟和最具商业化开发前景的领域。风力发电是一种洁净、无污染的可再生能源发电方式,同时,风力发电也有一些明显的缺点,如具有间歇性和波动性、能量密度低、利用率不高等。这些缺点在风电接入电网时将产生额外费用,并影响电网的稳定运行。因此,要想很好地控制风机发电,使之跟随风的变化而获取最大发电功率从而降低成本,

就必须准确及时地掌握整个风场的风速变化情况,才能保证风能的合理利用。

由于风场往往坐落于沿海、山区等偏远地带,供电以及通讯设施较为落后,要实现风场多点信息监测,需要设立多个中继站,布线和施工难度较大,成本也非常高。电子传感器怕雷击和电磁干扰,在这种恶劣环境下使用往往问题较多。光纤传感是近几年迅速兴起的一种新型传感器技术,被广泛应用于医疗、交通、电力、机械、石油化工、航空航天、地质和岩土工程等各个领域<sup>[2-7]</sup>。本文中报道了用于风力发电的光纤风速传感器以及由其构建的风场传感网系统,并给出了相关的系统方案以及实验数据。

## 1 光纤风速传感器

光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)用于传感已经得到了广泛研究<sup>[8]</sup>,也是本文中介绍的光纤传感系统的核心器件。光纤光栅经过外部的结构设计来感知外界传感信息,外界的温度、压力、震动等变量

基金项目: 国家中小企业创新基金资助项目(09C26213704520); 国家科技支撑计划资助项目(2009BAK54B01); 山东省重大专项基金资助项目(2010ZHZX1A01)

作者简介: 王 昌(1977-),男,博士,研究员,主要研究方向为光纤传感器技术等。

E-mail: wang960100@163.com

收稿日期: 2011-11-24; 收到修改稿日期: 2012-02-11

引起光纤布喇格光栅中心波长的位移,通过检测出这些变量的变化情况进而可以演化出其它参量的检测,例如本文中的风速检测等。

应力对 Bragg 光栅中心波长的影响是由于光栅周期的伸缩以及弹光效应引起的。FBG 中心波长与应力及温度变化的关系为:

$$\lambda_B = \lambda_B (1 - \rho) \Delta\varepsilon + \lambda_B (1 + \xi) \Delta T \quad (1)$$

式中  $\lambda_B$  是应力和温度变化引起的反射光中心波长的改变;  $\Delta\varepsilon$  为应力的变化;  $\Delta T$  为温度的变化量;  $\rho$  是光纤的光弹系数;  $\xi$  为光纤的热光系数。在 1550nm 波段,FBG 对应变的敏感系数大约为  $1.2\text{pm}/\mu\varepsilon$ 。

光纤光栅受到应力后,其中心波长会随之发生变化,根据此原理,可以通过风速来带动机械部件,机械部件联动光纤光栅,从而机械部件随风速的变化情况可以传导转换为光纤光栅的波长变化,实现风速测量。利用光纤光栅的窄带特性,在宽谱光源(带宽超过 40nm)中,每个光纤光栅带宽仅 0.2nm 左右,因此可以据此发挥波分复用技术,实现大容量、多探头的融合,达到简化系统结构、降低风场光缆铺设工程量和传感网的成本的目的。

### 1.1 光纤风速传感器原理

光纤风速仪探头如图 1 所示,其由风杯、轴承、转轮、偏心凸轮、光纤光栅以及弹性臂等组成,风场内的风对风杯产生扭矩力,带动转轴转动,偏心凸轮固定在转轴上,因此随转轴一起转动,由于贴有光纤布喇格光栅的弹性臂紧压在偏心凸轮上,而偏心凸轮每转动一周均会对布喇格光栅产生不同的压力,从而产生调制。风场内风速不同造成风杯转动速度不同,故布喇格光栅的波长调制频率也不同,通过检测出波长的调制周期,则可以推算出此时的风速值。本文中设计的光纤风速传感器探头实际图如图 2 所示。

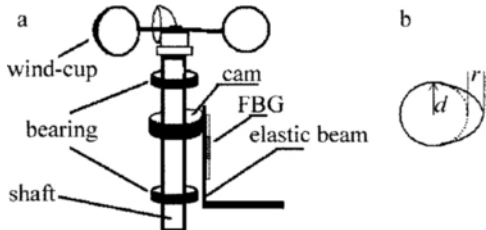


Fig. 1 a—probe internal structure diagram b—cam structure diagram

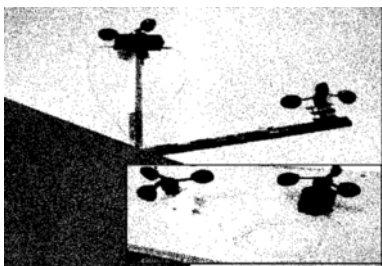


Fig. 2 Sensor diagram

图 3 是解调系统的结构示意图,图中采用放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)光源,光通过光纤耦合器和光缆到达探头,探头由光纤布喇格光栅作为核心器件构成,反射信号经过原路返回到光纤耦合器,然后进入 FBG 解调系统,通过计算机获取 FBG 的波长调制周期,可以反演出风速值。

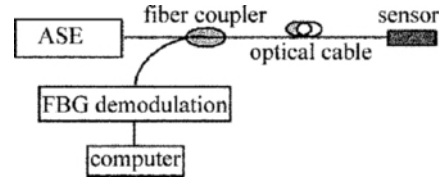


Fig. 3 System structure diagram

由于采用了光纤布喇格光栅的波长调制频率作为传感器计算风速值的基本原理,因此,FBG 解调仪采样速率要求达到高速,本文中介绍了系统实际实验中采用的是解调速度为 1kHz 的 MOI-FBG 光栅解调仪,能够满足实际需要。

### 1.2 传感器制作关键工艺

本文中设计的风速传感器,由于使用环境为野外大型风力发电场,外界环境较为恶劣,对传感器的使用寿命也提出了很高要求,因此,传感器的设计与制作,特别是制作工艺非常关键。

由于本设计中采用了凸轮来旋转压迫光纤弹性梁实现 FBG 的波长调制,因此,弹性梁与凸轮间的摩擦力必须要考虑,如果弹性梁与凸轮间摩擦力过大,就会造成传感器测量最小值升高,误差加大。本方案中采用厚度为 0.2mm 的不锈钢弹片,弹片与凸轮间有润滑剂减小摩擦。由于弹性梁非常薄,实际试验经过多次反复验证,其相对凸轮的扭力而言,摩擦力在高风速值下可以完全忽略,在低风速值下产生的测量误差影响能够控制在测量需求范围之内(在测试结果中给出了实验数据),这就保证了该结构不影响风杯结构的正常运转。

光纤光栅对于应力十分敏感,因此在将 FBG 粘贴到弹性梁时,为避免产生光栅的啁啾现象,要求 FBG 部分不能沾有胶水,采用两段固定中间悬空的固定结构模式,如图 4 所示。考虑到传感器的长期稳定性和可靠性,采用 EPOTEK 353ND 作为胶粘剂,EPOTEK 353ND 是为高温条件下研制的一种双组分热固化环氧树脂胶,对多种溶剂和化学品具有优异的抵抗性,是一种理想的用于固定光纤、金属、玻璃、陶瓷和多数塑料的粘接剂,混合后寿命长、附着力强等优点。

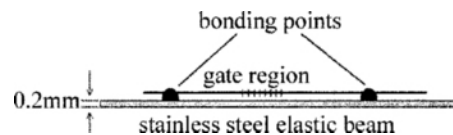


Fig. 4 Diagram of FBG fixer

首先将 EPOTEK 353ND 按照 10:1 的比例混合均匀,室温下成粘稠糊状,使用离心机将气泡去除,防止固化后对光纤受力不均匀。将调配好的粘胶涂覆在 FBG 一端的光纤和弹性梁上,二者固定在一起,光纤要求去除涂覆层,防止光纤受力后蠕变,为保证固化效果,一般需要放置在 150℃ 环境下 1min 以上固化,或者 100℃ 环境下 5min ~ 10min 固化。考虑到 FBG 需要预加预应力,因此等一端固化稳定后,再在对光纤施加一定的预应力情况下完成另一端的固化。

## 2 实验及测试结果

实际测量时,对于光纤光栅的波长变化无需精确地测出,即波长分辨率可以不要求很高,例如某探头采用 1550nm 光纤光栅时,当凸轮转至弹片形变量最大处时,波长为 1551nm,则可以根据此光栅情况划定一个阈值,低于 1550.5nm 的波长则认为正常情况,信号记为“0”,高于 1550.5nm 则认为凸轮转动 1 周的标志,记为“1”。虽然温度、振动等会影响光栅的波长稳定,这种设置标志阈值的方法可以使得 ± 0.5nm 以内影响被有效消除。

该传感器采用了山东省计量科学研究院的标准小型风洞作为风速标准测试环境,使用传统微压差法对本文中设计的传感器进行了比对实验,再分别通过换算后的标准风速与传感器解调仪的检测结果进行比较,结果如图 5 所示。

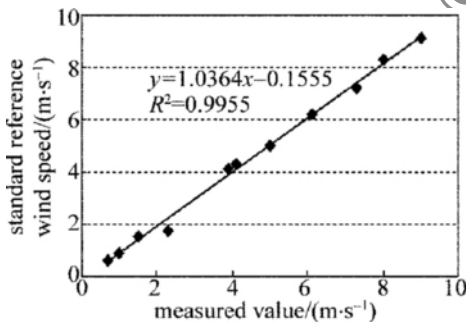


Fig. 5 Calibration curve diagram

对传感器的长期稳定性进行测试验证,建立一个风速稳定并且能够长期匀速提供某种固定风速值的风场环境,将探头置于其中进行长期稳定性检测实验。经过长达 10d 的连续运行,记录数据如图 6 所示,横坐标为时间,纵坐标为风速值。

图 6 中前段为 11.1m/s 标准风速下的长期记录结果,其检测结果平均值  $\bar{x}_1 = 11.076$ ,均方根偏差  $\delta_1 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = 0.0369$ ; 后段为 1m/s 时的长期记录结果,  $\bar{x}_2 = 0.8313$ ,均方根偏差  $\delta_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = 0.16459$ 。

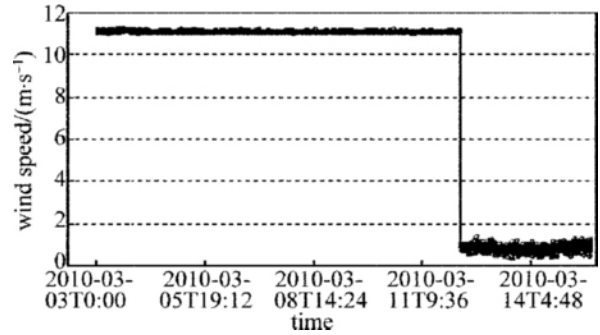


Fig. 6 Stability experiment test of system

以上两种风速下的标准误差明显差别较大,在高速风速下误差较小,在低速风下误差较大。其中一个重要原因是由于采用的机械转动部件具有动摩擦力和静摩擦力,并且弹性梁摩擦力也考虑在内。当风速较低时,风杯扭矩力相对摩擦力而言较小,因此这两个摩擦力就无法完全被忽略,从而造成较大误差。但是由于风场现实条件要求的检测精度误差并不高,此系统即便是低风速下的误差依然能够满足风场对风速检测的需求。检测结果表明,在长期的运行过程中,传感器探头没有出现故障,另外检测输出值一直稳定可靠。

## 3 风速传感网

图 7 所示为一典型的由全光纤风速传感器构成的光纤传感网,系统由宽带光源、光纤耦合器、光开关、分路器、风速传感器、解调仪等构成。作者采用 ASE 光源作为宽带光源,功率和带宽均达到了项目要求。

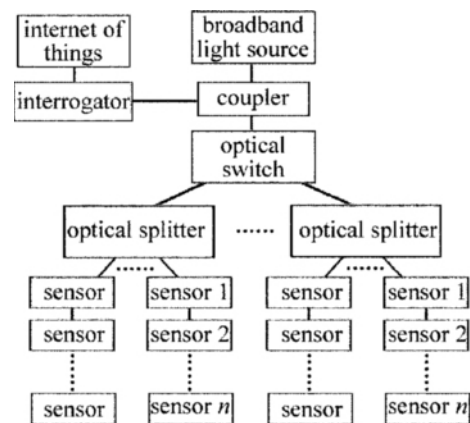


Fig. 7 All-fiber velocity sensor network

光源发出的光经过耦合器进入到光开关,光开关可以自由切换通道,实现系统的分时复用功能,将系统传感口由 1 路扩展为多路,大大增加了系统的容量。分路器将光分为多路,用于实现传感器的并联,同时,传感器也可以串联,无论并联还是串联,要求同一个分路器下所携带的探头光栅波长不同,从而避免了信道串扰问题。传感器携带风速信息返回光经过耦合器进入到解调仪,解调仪输出波长信息,如图 8 所示。图 8 中每一个尖峰均为一个传感器返回的光栅信号,由图

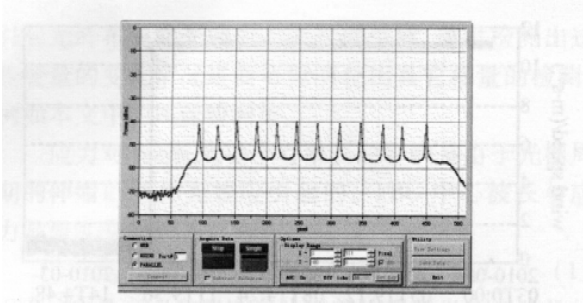


Fig. 8 Interface of multipoint measuring system

中可以看出,一台解调仪可以同时多个传感器采用波分复用技术达到同步解调。根据每个传感器的标定数据反推出风速信息后,将信息进行后续处理,与光纤物联网连接,实现整个风力发电风场的风场风速传感网信息覆盖。

#### 4 结论

针对风力发电风场风速检测,设计了一种全光纤风速传感器,并使用波分复用技术和时分复用技术建立了覆盖整个风场的光纤传感网。传感器探头可以通过串联和并联方式进行连接,可以在风场内构建一个传感网络,实时监测整个风场的变化情况,从而为风力发电的优化设计提供大量风场信息。该研究对于提高风力发电效率、提高风电设备

安全性能以及推动新能源发展具有重大意义和应用潜力。

#### 参考文献

- [1] LI J, SONG J H, WANG W Sh. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(6): 100-105( in Chinese).
- [2] SUN S M, CHEN H Y, YIN G Sh. The basic principle and applications on medical of fiber optic sensors [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2008, 25(5): 846-850( in Chinese).
- [3] ZHU J, FAN D. Application of fiber technology grating in intelligent transportation [J]. Transportation Business Management, 2007, 22(12): 46-47( in Chinese).
- [4] CHANG J, HUO D H, MA L Zh, et al. Interrogation a fiber Bragg grating vibration sensor by narrow line width light [J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2008, 6(4): 373-376.
- [5] CHANG J, HUO D H, MA L Zh, et al. Interrogation a fiber Bragg grating vibration sensor narrow line width light [J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2008, 6(4): 1-4.
- [6] LI X R. Application of fiber sensor in electrical power system [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29(7): 49-52.
- [7] WANG Y, LIANG D K, ZHOU B. Measurement of steel corrosion in concrete structures by analyzing long-period fiber grating spectrum character [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(11): 2660-2664( in Chinese).
- [8] KERSEY A D, DAVIS M A. Fiber grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1460.

版权所有 ©