

基于差压原理的矿用光纤光栅风速传感器

李 振^{1,2}, 王纪强^{1,2}, 赵 林^{1,2}, 张华文³, 刘统玉^{1,2}

(1. 山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250103;

2. 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250103; 3. 山东省计量科学研究院, 山东 济南 250014)

摘 要: 设计了一种新型的矿用光纤光栅风速传感器, 利用差压原理实现风速转化, 由波纹管、等强度悬臂梁和双光纤光栅组成差分敏感机构, 并通过算法进一步进行温度补偿, 有效克服了温度交叉敏感问题, 提高了应变测量的灵敏度。文中推导了光纤光栅中心波长变化量与风速的关系, 同时对敏感机构进行了水压模拟试验, 得到传感器敏感机构的灵敏度为 0.703 pm/Pa, 与理论值具有很好的吻合度; 对风速传感器样机进行风洞试验测试, 结果表明风速在 0.2~20 m/s 的情况下, 传感器测量误差可基本控制在 ± 0.3 m/s 以内, 并具有良好的线性关系。

关键词: 风速传感; 差压原理; 光纤光栅; 差分敏感机构

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0422002

Mine wind speed sensor using fiber Bragg grating based on differential pressure principle

Li Zhen^{1,2}, Wang Jiqiang^{1,2}, Zhao Lin^{1,2}, Zhang Huawen³, Liu Tongyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Jinan 250103, China;

2. Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250103, China;

3. Shandong Research Institute of Metrology, Jinan 250014, China)

Abstract: A design of mine wind speed sensor using fiber Bragg grating (FBG) was reported, which was based on differential pressure principle and differential sensitive architecture was adopted which was composed of a bellows, an equal-strength beam and two FBGs. Furthermore, an algorithm was introduced for temperature compensation. Through these methods the cross sensitivity of temperature was effectively eliminated and a high strain sensitivity was achieved. The relation between the central wavelength variation of the two FBGs and the wind speed was derived. Meanwhile, the hydraulic simulation test of sensitive architecture was carried out and the sensitivity of 0.703 pm/Pa was given, which agreed well with the theoretical value. The wind speed sensor was tested by wind tunnel and the results show that the measurement error of the sensor is within ± 0.3 m/s in the range of 0.2–20 m/s, and the wind speed sensor has good linearity.

Key words: wind speed sensing; differential pressure principle; fiber Bragg grating
differential sensitive architecture

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 山东省科技发展计划(2014GZX201016)

作者简介: 李振(1989-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光纤传感器设计方面的研究。Email: zhen.li@sdlaser.cn

通讯作者: 王纪强(1980-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事光纤传感技术在矿山安全、油气储运等领域的应用研究。

Email: jiqiang.wang@sdlaser.cn

0 引言

国内外对风速传感器的研究由来已久，并且已有比较成熟的产品。但对于煤矿井下通风应用来说，由于井下特殊的环境和风场特点，能实现准确有效监测的风速传感器却不多^[1]。国内外对矿用风速传感器的研究一般分为热线式、叶轮式、差压式与超声漩涡式^[2]。热线式风速传感器通过风流经发热元件时带走的热量与风速成正比原理测量风速，但井下环境恶劣，流体动力干扰等影响因素较多，且易损坏热线^[3]；叶轮式风速传感器则易受井下水蒸气、煤尘等影响，致使叶轮转动阻力增大，造成较大的测量误差，同时严重制约传感器的使用寿命^[4]；超声波漩涡式风速传感器是目前研究比较多的一类风速传感器，但由于其结构复杂，不易维护，受环境因素干扰大等特点，在矿井监控系统中未获得大规模推广应用^[5]。另外，传统的风速传感器都直接或间接通过电信号与风速的对应关系实现风速测量，在煤矿井下的特殊环境使用，极易引起井下瓦斯爆炸，从而存在严重安全隐患。光纤传感技术具有本质安全、抗电磁干扰等突出优点，特别适合易燃易爆等危险场合应用。目前，对光纤风速传感器的研究还处于起步阶段，国内有部分文章及专利阐述了关于光纤风速传感器的理论及制作，但大多还处于试验测试阶段^[6]。

文中设计了一种基于差压原理的光纤风速传感器，利用波纹管、等强度悬臂梁和双光纤光栅组成的敏感机构，根据光纤光栅反射中心波长变化与风速的关系得到所测风速值。该风速传感器无转动部件，结构一体化易于安装，敏感机构不受水汽、粉尘等井下环境因素影响，可靠性好。

1 风速传感器设计

依据差压原理^[7]，在流体管道内设置阻力件，当流体流经阻力件时，速度增加、静压力减小，在阻力件两侧会产生压力差，该压力差的大小与流体速度有关。文中所设计的光纤差压风速传感器由风速管、前后取压口、敏感机构和壳体组成，如图1所示。

假设空气密度为 ρ ，前、后取压口截面直径分别为 d_1 、 d_2 ，风从左向右流入风速管，在前、后取压口处的速度分别为 v_1 、 v_2 ，压强分别为 P_1 、 P_2 。传感器敏感

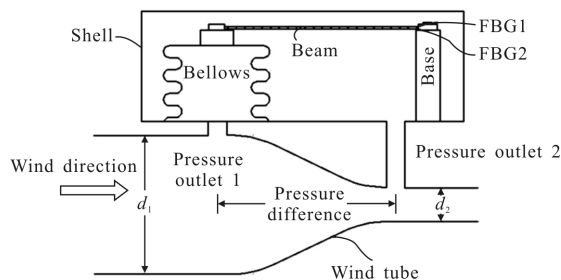


图1 差压风速传感原理

Fig.1 Differential pressure sensing principle of wind speed

机构由波纹管、等强度悬臂梁和双光纤光栅组成，固定于封闭的壳体内，用于检测前后两取压口的压力差。当波纹管内外表面受到的差压为 P 时，波纹管产生轴向位移 w ，导致悬臂梁发生轴向形变 $\varepsilon_p = \frac{6FL}{E_1 B h_1^2}$ ，此时悬臂梁下表面受到压力 F 。对波纹管和等强度悬臂梁进行受力分析^[8]：

$$\begin{cases} K_2 w = PA - F \\ K_1 w = F \end{cases} \quad (1)$$

式中： K_1 、 K_2 分别为悬臂梁和波纹管的刚度； A 为波纹管有效面积。悬臂梁表面产生的轴向应变可表示为：

$$\varepsilon_p = \frac{6LAK_1 P}{E_1 B h_1^2 (K_1 + K_2)} \quad (2)$$

式中： E_1 为悬臂梁的杨氏模量； B 、 h_1 、 L 分别为悬臂梁固定端的宽度、厚度、长度。由伯努利方程和连续性方程可知，压差 P 与进入风速管的风速平方成正比，即：

$$P = P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right] v_1^2 \quad (3)$$

因此公式(3)可变为：

$$\varepsilon_p = \frac{3LAK_1 \rho}{E_1 B h_1^2 (K_1 + K_2)} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right] v_1^2 \quad (4)$$

可见，在悬臂梁和波纹管参数选定的情况下，悬臂梁表面轴向应变 ε 与风速的平方成正比。

文中采用双光纤光栅差分结构，选用两支具有相同温度系数的光栅对称黏贴在悬臂梁的上、下表面，并施加一定的预紧力。悬臂梁受压向上弯曲时，上、下表面的光栅分别产生应变 $-\varepsilon$ 和受拉应变 ε ，则光栅中心波长变化为^[9]：

$$\begin{cases} \Delta \lambda_1 = k_{\varepsilon 1} \varepsilon + k_{T1} \Delta T \\ \Delta \lambda_2 = -k_{\varepsilon 2} \varepsilon + k_{T2} \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为两光栅的中心波长变化量。 k_{e1} 、 k_{e2} 分别为两光栅的应变系数； k_{T1} 、 k_{T2} 分别为两光栅的温度系数，取 $k_{T1}=k_{T2}=k_T$ ； ΔT 为温度变化量。根据差分测量的原理，可得：

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = (k_{e1} + k_{e2}) \varepsilon = \frac{3LAK_1\rho(k_{e1} + k_{e2})}{E_1Bh_1^2(K_1 + K_2)} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right] v_1^2 \quad (6)$$

因此，采用上述取双光栅差分结构可以消除因温度变化带来的交叉干扰问题，同时提高应变检测灵敏度。取 $C = \frac{3LAK_1\rho(k_{e1} + k_{e2})}{E_1Bh_1^2(K_1 + K_2)} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]$ ，则所测风速为：

$$v_1 = \sqrt{\frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{C}} \quad (7)$$

可见所测环境风速值与两光纤光栅的波长变化量差值的算术平方根成线性关系。

2 温度补偿

在实际设计加工过程中，很难得到温度系数完全相同的两只光栅，同时，温度变化会引起敏感机构中的波纹管、悬臂梁底座等发生伸缩变形，进而导致两光栅发生形变，因此需要对传感器测试数据进行进一步修正^[10]。

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = k_{e1}\varepsilon_p + k_{e1}\varepsilon_T + k_{T1}\Delta T \\ \Delta\lambda_2 = -k_{e2}\varepsilon_p + -k_{e2}\varepsilon_T + k_{T2}\Delta T \end{cases} \quad (8)$$

式中： ε_p 为外力引起的光栅应变； ε_T 为敏感机构中的波纹管、悬臂梁底座受热伸缩导致的光栅应变。由于敏感机构选择的波纹管、悬臂梁底座材料一旦选定，两者综合的有效热膨胀系数 α 就确定了^[11]，则

$$k_e\varepsilon_T = k_e\alpha \cdot \Delta T = \beta \cdot \Delta T \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(8)得：

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = k_{e1}\varepsilon_p + (k_{e1}\alpha + k_{T1})\Delta T \\ \Delta\lambda_2 = -k_{e2}\varepsilon_p + (-k_{e2}\alpha + k_{T2})\Delta T \end{cases} \quad (10)$$

取 $k = \frac{k_{e1}\alpha + k_{T1}}{-k_{e2}\alpha + k_{T2}}$ ，则由

$$\Delta\lambda_1 - k \cdot \Delta\lambda_2 = (k_{e1} + k \cdot k_{e2}) \varepsilon_p \quad (11)$$

可更好地消除温度交叉干扰。因此，所测风速值可表示为：

$$v_1 = \sqrt{\frac{\Delta\lambda_1 - k \cdot \Delta\lambda_2}{C}} \quad (12)$$

其中 $C = \frac{3LAK_1\rho(k_{e1} + k \cdot k_{e2})}{E_1Bh_1^2(K_1 + K_2)} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right]$ 。

将上述传感器敏感机构封装固定于壳体内，进行 0~50℃ 温度循环试验，试验中保持两取压口的压力差固定为零，图 2 为两光栅中心波长随温度变化的情况。

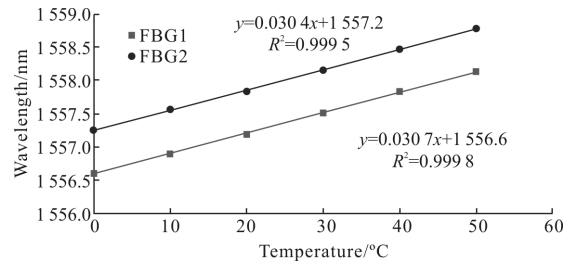


图 2 光栅温度系数

Fig.2 Temperature coefficient of grating

可以看出，敏感机构的两个光栅都表现出较好的温度线性度，如果认为两光栅温度系数相同，且忽略温度变化对波纹管、悬臂梁底座的影响，根据公式(5)直接进行差分处理，将会产生较大测量误差。以 50℃ 测试数据为例，得到的两光栅波长差为 14 pm，这将引起较大的风速测量误差，特别是在低风速情况下。采用上述方法取 $k = k_{T1}/k_{T2} = 30.7/30.4 = 1.0099$ ，进行温度补偿，则两光栅波长差的测量误差基本控制在 1 pm 以内，可在很大程度上减小风速测量误差。将补偿前后测试数据对比分析，结果如图 3 所示。

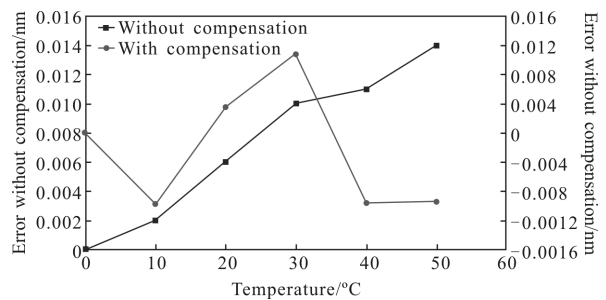


图 3 温度补偿算法对敏感结构测量结果的影响

Fig.3 Effect of temperature compensation algorithm on measurement results of sensitive structures

可以看出，补偿前两光栅的中心波长差随温度增加而增加，与上述分析基本一致；补偿后两光栅波长差在 0~50℃ 范围内无明显变化，说明该方法能够有效地抑制温度交叉干扰问题，提高传感器测量精度。

3 敏感机构灵敏度测试

根据公式(2)、(5)可知,敏感机构压力灵敏度 k_s 为:

$$k_s = \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{P} = (1 - p_e) \cdot \frac{6LAK_1}{E_s B h_1^2 (K_1 + K_2)} (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (13)$$

该传感器敏感机构所用两光栅中心波长分别为 $\lambda_1 = 1\,539.4211\text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1\,539.747\,7\text{ nm}$, 有效弹光系数 $p_e = 0.22^{[12]}$; 波纹管的材料选用锡青铜, 刚度为 $1\,800\text{ N/m}$; 等强度悬臂梁相关参数如表 1 所示。将以上参数代入上式, 可得该敏感机构的灵敏度 $k_s = 0.711\text{ pm/Pa}$ 。

图 1 中传感器利用前后取压口在波纹管内外形成压力差, 通用敏感机构检测该压差大小。为验证该敏感机构的灵敏度, 此节利用向 U 型计中注入一定量的水, 来模拟产生波纹管内外压差(0~800 Pa)进行

试验 (如图 4 所示), 同时将波纹管外大气压与水柱上方大气压相互抵消, 则 U 型管两端水柱的高度差即为波纹管内外压差值, 如表 2 所示。经过多次试验得到光纤光栅中心波长的偏移量与压力的拟合曲线如图 5 所示。



图 4 U 型计压力测试结构

Fig.4 U type pressure gage

表 1 悬臂梁参数

Tab.1 Parameters of cantilever beam

Parameters	Value
Length/mm	30
Width at the fixed side/mm	8
Thickness/mm	1.2
Material	Copper alloy
Young's modulus/Pa	1.2×10^{11}

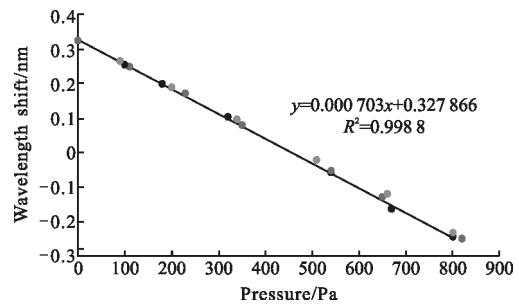


图 5 压力与波长变化曲线

Fig.5 Pressure vs wavelength shift

表 2 压力与波长变化关系

Tab.2 Relationship between pressure and wavelength shift

First experimental data			Second experimental data			Third experimental data		
Pressure/Pa	Long wavelength/nm	Short wavelength/nm	Pressure/Pa	Long wavelength/nm	Short wavelength/nm	Pressure/Pa	Long wavelength/nm	Short wavelength/nm
0	1 539.747 7	1 539.422 1	0	1 539.747 3	1 539.422	0	1 539.748 2	1 539.423 1
100	1 539.727 7	1 539.472 1	90	1 539.729 3	1 539.463 8	110	1 539.723 8	1 539.474 2
180	1 539.711 7	1 539.512 1	200	1 539.707 3	1 539.518 6	230	1 539.706 2	1 539.534 1
320	1 539.679 0	1 539.575 4	340	1 539.679 3	1 539.583 8	350	1 539.678 2	1 539.598 1
540	1 539.632 0	1 539.688 0	510	1 539.645 3	1 539.666 4	540	1 539.645 2	1 539.698 1
670	1 539.598 9	1 539.760 8	660	1 539.615 3	1 539.734 2	650	1 539.618 2	1 539.746 1
800	1 539.574 1	1 539.817 6	800	1 539.587 3	1 539.818 7	820	1 539.584 2	1 539.833 1

由以上实验数据可得, 敏感机构的线性度和重复性较好, 具有较高的灵敏度为 0.703 pm/Pa , 与理

论计算值基本吻合。

4 传感器试验

将所研制的传感器样机固定于 DHS-500×500/830×830-Ⅷ型环形风洞测风段,控制风速变化范围为 0.2~20 m/s,如图 6 所示,试验时,环境温度为 13.4℃,且基本保持不变;风速取值点依次为 0.2、1、2、3、...、19、20 m/s,结果如图 7 所示。



图 6 风洞实验

Fig.6 Wind tunnel tests

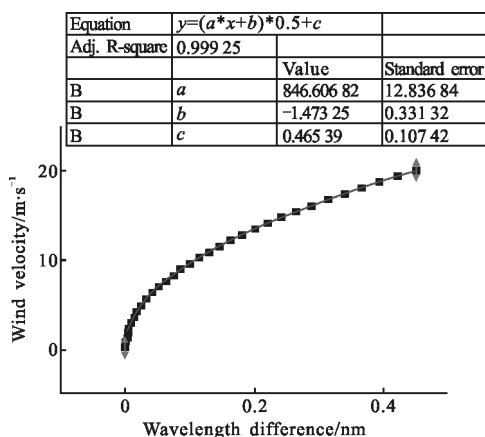


图 7 风速与两光栅波长差关系曲线

Fig.7 Wind velocity vs wavelength difference of two gratings

用最小二乘法将风速与两光栅波长差进行拟合,拟合系数为 0.999 3,因此传感器光栅波长变化与风速呈较好的二次关系。

对传感器输出的风速值进行重复性测试,调节风洞风速从 0.2 m/s 上升到 20 m/s 然后再从 20 m/s 调到 0.2 m/s,分别记录传感器风速读数和风洞风速,按照上述方法进行两次往复测试,得到测量误差如图 8 所示。传感器测量误差基本可控制在±0.3 m/s 以内,符合煤炭行业标准对矿用风速传感器的要求^[13]。下一步可通过选用刚度系数较小的波纹管 and 悬臂梁材料,以及增大波纹管内外径以及波纹数等方法提

高传感器灵敏度,进一步减小低风速段的测量误差。

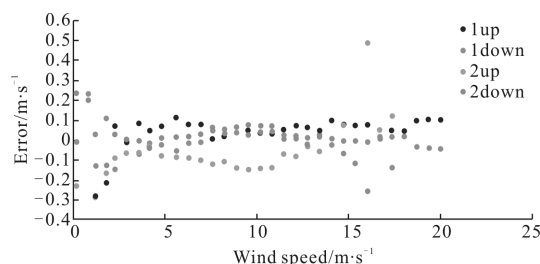


图 8 风速测量误差分布

Fig.8 Measurement error distribution of wind speed

5 结论

文中基于差压原理,设计了一种光纤光栅风速传感器,空气流体通过差压结构体时,在两个取压口产生压力差,采用由波纹管、等强度悬臂梁和双光纤光栅组成的敏感机构检测压差值,并通过算法进一步进行温度补偿,克服了温度交叉敏感问题,提高了测量精度。理论计算与水压法测量得到的敏感机构灵敏度分别为 0.711 pm/Pa 和 0.703 pm/Pa;两者具有较好的吻合度。对传感器进行风洞试验,结果表明当风速为 0.2~20 m/s 的情况下,其测量误差基本在±0.3 m/s 以内。

参考文献:

- [1] Pan Jingtao, Zhao Dan, Li Zongxiang, et al. Fault source diagnosis for ventilation system and air velocity transducer placement in Daming Mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S1): 153-158. (in Chinese)
- [2] Wang Chang, Ni Jiasheng, Wang Jiqiang, et al. All-fiber velocity sensors applicated in wind power generation and their fabrication process [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 689-692. (in Chinese)
- [3] Liu G, Han M, Hou W. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity[J]. *Opt Express*, 2015, 23: 7237-7247.
- [4] Ma Guoming, Li Chengrong, Jiang Jian, et al. Development of fiber Bragg grating wind sensor for icing-monitoring of overhead transmission lines [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2011, 31(13): 128-134. (in Chinese)
- [5] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130001. (in Chinese)

- [6] Zhou W, Zhou Y, Dong X. Fiber-optic curvature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by fiber multimode interferometer [J]. *IEEE Photon J*, 2012, 4(3): 1050–1057.
- [7] Sun Huaqing, Wang Jianzhong. Flow Measurement Throttling Device Design Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] Yang Baiyuan, Zhang Yitong. Engineering Elasticity and Plasticity [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)
- [9] Wang Jiqiang, Zhao Lin, Liu Tongyu, et al. Novel negative pressure wave-based pipeline leak detection system using fiber Bragg grating-based pressure sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 35(16): 3366–3373
- [10] Di Sante Raffaella, Bastianini Filippo. Temperature-compensated fibre Bragg grating-based sensor with variable sensitivity [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 75: 5–9.
- [11] Li Yunkai. Metal Materials Science [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [12] Liao Yanbiao, Li Min, Zhang Min, et al. Optical Fiber Sensing Techniques and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [13] Standard coal mine wind speed sensor for coal industry in People's Republic of China [S]. State Administration of Work Safety, MT488–2008. (in Chinese)