

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.003

# 光纤布拉格光栅水下钢筋腐蚀传感器

宋世德<sup>1</sup> 张作才<sup>1</sup> 王晓娜<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室 大连 116024; 2. 大连理工大学物理与光电工程学院 大连 116024)

**摘要:**基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的预应力释放和应变测量原理,提出了一种用于水下钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀监测的FBG钢筋腐蚀传感器。传感器以两根FBG为核心元件,将FBG-1预拉后紧密缠绕、固定于精细加工过的钢筋件表面,用于监测腐蚀产物流失导致的预应力松弛;将FBG-2安装于钢筋件的轴向通孔中,作为温度补偿器用于消除FBG-1的温度交叉敏感效应。为了提高传感器的成活率,将传感器封装在砂浆中,并且推导了被测钢筋件的质量腐蚀率计算公式。通过电化学加速腐蚀实验研究了传感器的工作性能,通过监测FBG的波长变化来测量钢筋的腐蚀程度。实验结果表明,FBG钢筋腐蚀传感器可以监测水下钢筋混凝土结构中的钢筋腐蚀,并且具有较大的测量范围、较高的灵敏度和稳定性,适用于港口码头、桥墩、水坝、蓄水池等钢筋混凝土结构中的钢筋腐蚀监测。

**关键词:** 光纤布拉格光栅;传感器;水下混凝土;钢筋腐蚀

**中图分类号:** TP212;TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Optical fiber grating sensor for monitoring corrosion of reinforcing steel under water

Song Shide<sup>1</sup> Zhang Zuocai<sup>1</sup> Wang Xiaona<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. School of Physics and Optoelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Based on the principle of pre-stress release and strain measurement of the fiber Bragg grating (FBG), an optical fiber grating sensor for monitoring the corrosion of underwater reinforcing steel was proposed in this paper. As the core component of the sensor, FBG-1 was pre-stretched and tightly wound on the surface of the finely fabricated reinforcing bar for monitoring the pre-stressing relaxation caused by the loss of corrosion products, and FBG-2 was installed in the axial through-hole of the reinforcing bar for eliminating the cross-sensitivity of FBG-1. In order to improve the survival rate of the sensors, the sensors were embedded into mortar specimens, and the evaluation formula to evaluate mass loss rate of steel rebar was derived. The performance of the sensor was researched in adesignedelectrochemicalcorrosionaccelerationexperiment, and the corrosion degree could be measured by detecting the wavelength of FBG. By the central wavelength, the corrosion degree of reinforcing steel would be monitored. The experimental results show that the sensor can be used to monitor the steel rebar corrosion of underwater reinforced concrete structure with large monitoring range, has high sensitivity and good stability. The sensor can be employed to monitor the steel bar corrosion in reinforced concrete structure, such as harbor and pier, bridge pier, dam, reservoir and so on.

**Keywords:** fiber Bragg grating (FBG); sensor; underwater concrete; reinforcement corrosion

## 1 引言

当钢筋混凝土结构处于海洋或除冰盐等环境时,氯离子( $\text{Cl}^-$ )会渗透进入混凝土,当 $\text{Cl}^-$ 在钢筋表面达到一

定浓度时将破坏钢筋表面的钝化膜,从而加速钢筋腐蚀。有统计表明钢筋腐蚀已经成为降低钢筋混凝土结构耐久性的首要因素<sup>[1]</sup>,带来安全隐患的同时也增加了结构的维修和加固费用,因此,实时监测钢筋的腐蚀程度具有重要的社会价值和经济价值。

电化学检测技术是应用较为成熟的钢筋腐蚀检测方法,但这种方法不能实现在线、定量监测,且易受含水率、电磁场等因素干扰<sup>[2]</sup>。相比而言,光纤传感器作为新一代智能传感器,集信息传输与传感于一体,具有分辨率高、灵敏度高、可波分复用、抗电磁干扰、防水耐腐蚀、体积小巧、价格便宜等优点,适合用于海上建筑物、构筑物的长距离在线监测<sup>[3,4]</sup>。基于以上优点,海内外学者对光纤布拉格光栅(FBG)腐蚀传感器的研究已取得较大进展<sup>[5,8]</sup>。但现存FBG腐蚀传感器仍存在些许不足,例如李俊等人<sup>[5]</sup>、Zhao等人<sup>[6]</sup>、Tan等人<sup>[7]</sup>将FBG直接固定在钢筋表面,光纤固定不稳定会限制FBG预应力的大小进而限制了传感器测量范围,且需另设温度补偿器增加了成本;宋世德等人<sup>[8]</sup>未考虑钢筋腐蚀膨胀系数对传感器测量结果准确度的影响;Hu等人<sup>[9]</sup>设计的传感器工艺要求高、成本高,且镀层厚度较小限制了测量范围;此外,保护措施不足使得传感器成活率低,难以用于实际工程。

本文提出了另一种FBG腐蚀传感器设计方案:将结构钢筋精细加工为带有环形槽、轴向通槽、轴向通孔和盲孔的钢筋件,在轴向通槽内灌注环氧树脂并固化,将FBG-1预拉后缠绕在钢筋件表面的环形槽内,并用环氧树脂将其固定于固化的环氧树脂上,从而解决了光纤固定不稳定的难题,提高了传感器的测量范围和准确性;在FBG-1外紧密包裹一层湿润的滤纸,滤纸起到保护FBG、容纳腐蚀产物和过滤水泥颗粒的作用;另外,在钢筋件内部安装温度补偿传感器FBG-2,消除FBG-1的温度-应变交叉敏感效应。

## 2 FBG 传感原理

FBG是一段纤芯折射率周期性扰动的特殊光纤,长约10~20 mm。FBG相当于一段光学窄带滤波器,当有宽带入射光时,只有满足Bragg衍射条件的入射光才能被反射回来<sup>[10]</sup>。

Bragg衍射条件:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为反射光波长, $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯有效折射率, $\Lambda$ 为FBG的栅距。

FBG对应变和温度两种影响因素同时敏感,且应变和温度引起的FBG中心波长漂移具有线性叠加效应<sup>[9,11]</sup>。

$$\Delta\lambda = K_{\varepsilon}\varepsilon + K_T\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为FBG中心波长漂移, $\varepsilon$ 和 $\Delta T$ 分别为FBG轴向应变和温度变化量, $K_{\varepsilon}$ 和 $K_T$ 分别为FBG的应变敏感系数和温度敏感系数。

不同材质和中心波长的FBG,其应变敏感系数和温度敏感系数略有不同, $K_{\varepsilon}$ 和 $K_T$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} K_{\varepsilon} = (1 - P_e)\lambda \\ K_T = (\alpha + \xi)\lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为FBG原始中心波长, $P_e$ 为光纤的有效弹光系数,由光纤石英纤芯折射率决定, $P_e = 0.22$ , $\alpha$ 和 $\xi$ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。对于常用光纤上制作的FBG, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时 $K_{\varepsilon}$ 取值为 $1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ <sup>[12]</sup>, $K_T$ 取值为 $10.3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>。

用于温度补偿的FBG处于松弛状态,其中心波长只受温度影响。

$$\Delta\lambda_1 = K_{T1}\Delta T \quad (4)$$

由于FBG钢筋腐蚀传感器中的FBG-1和FBG-2所处环境温度相同,由式(2)和(4)可以消除FBG-1的温度-应变交叉敏感效应,得到FBG-1的轴向应变:

$$\varepsilon = \left( \Delta\lambda - \frac{K_T}{K_{T1}}\Delta\lambda_1 \right) / K_{\varepsilon} \quad (5)$$

## 3 FBG 钢筋腐蚀传感器结构组成

基于FBG预应力释放和应变测量原理设计的FBG钢筋腐蚀传感器主要由精细加工的钢筋件、两根FBG和滤纸3部分组成,如图1所示。紧密缠绕在钢筋件表面

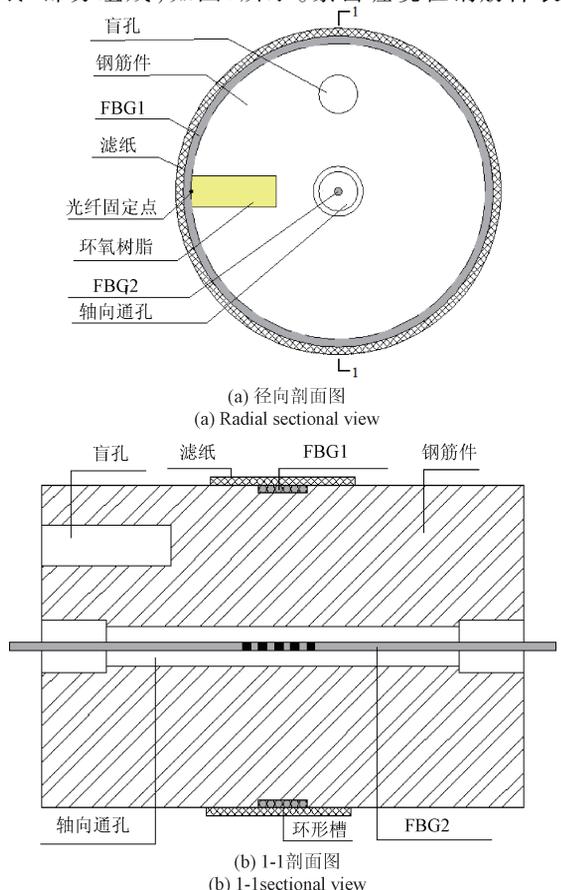


图1 FBG传感器的基本结构

Fig. 1 Basic structure of FBG sensor

的FBG-1用于监测钢筋件的腐蚀程度,由于缠绕圈数少且稀疏,钢筋腐蚀产物会溢出FBG-1进入外围的滤纸孔隙,随着FBG-1内侧的钢筋腐蚀直径逐渐变小,FBG-1的预应力逐渐被释放直至松弛,传感器失效。位于钢筋件轴向通孔内的FBG-2始终处于松弛状态,只受温度影响,用于消除FBG-1的温度-应变交叉敏感效应。

为了能够准确的反应钢筋混凝土结构中钢筋的锈蚀情况,实验所用钢筋件是以实际工程中所用结构钢筋为原材料,加工成直径20 mm、长30 mm的圆柱体。钢筋件带有轴向通槽、轴向通孔、环形槽和盲孔等细部结构,其中盲孔是为了通电加速腐蚀实验中固定导线而设置,传感器应用于实际工程时可不设。先在钢筋件一侧的轴向通槽内预埋支撑用的玻纤棒,然后灌注环氧树脂并固化,固化后的环氧树脂用于固定FBG-1,由于FBG-1固定用胶也是环氧树脂,从而解决了环氧树脂与金属材质粘接力不足导致的固定点不稳定难题。此外,所有光纤固定点位置的光纤均剥除涂覆层,提高应变传递率,减小测量误差<sup>[14]</sup>。

#### 4 被测钢筋件的腐蚀率计算公式

FBG钢筋腐蚀传感器的设计思路是利用FBG-1预应力的释放来监测钢筋件的腐蚀过程,随着钢筋件的不断腐蚀直径减小,FBG-1的预拉应变也逐渐减小,根据FBG应变传感原理可以建立钢筋腐蚀率与FBG中心波长漂移之间的定量关系。假设钢筋件发生均匀腐蚀,钢筋件的初始直径为 $D_0$ ,腐蚀后钢筋件的净直径为 $D_1$ ,钢筋件腐蚀前后的直径变化量为 $\Delta D$ ,FBG-1的缠绕圈数为 $n$ 。则钢筋件腐蚀发生后,FBG-1的轴向应变与钢筋件直径及其变化量之间的关系为:

$$\varepsilon = \frac{n\pi D_1 - n\pi D_0}{n\pi D_0} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} = -\frac{\Delta D}{D_0} \quad (6)$$

设钢筋的密度为 $\rho$ ,钢筋件的质量腐蚀率为 $\delta$ ,钢筋件的腐蚀深度为 $\Delta R$ ,则钢筋件的质量腐蚀率和腐蚀深

度与FBG-1的轴向应变 $\varepsilon$ 的关系分别为:

$$\delta = \frac{\pi D_0^2 \rho - \pi D_1^2 \rho}{\pi D_0^2 \rho} = 1 - (1 + \varepsilon)^2 \quad (7)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta D}{2} = -\frac{\varepsilon D_0}{2} \quad (8)$$

由式(5)、(7)和(8)可知,由于钢筋件的初始直径 $D_0$ 和FBG的应变敏感系数 $K_\varepsilon$ 、温度敏感系数 $K_T$ 已知,故只需监测FBG的中心波长漂移 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda_1$ 就可以计算钢筋件的质量腐蚀率和腐蚀深度,而不必考虑钢筋腐蚀膨胀率的影响,这在一定程度上提高了测量结果的准确度。

#### 5 FBG钢筋腐蚀传感器封装

FBG是在普通光纤上制作的,同样由纤芯、包层和涂覆层3部分组成,由于FBG制作时必须去除原有的涂覆层,因此需要在制作后重新涂覆一层聚酰亚胺,可以起到保护纤芯、增强光纤柔韧性的作用<sup>[15]</sup>。尽管如此,为确保FBG在混凝土浇筑和振捣过程中不损坏,需要对制作好的传感器进行封装保护。

考虑到通电加速锈蚀实验的需要,在传感器封装前需要使用开口端子和螺丝将防水导线固定于盲孔,并用环氧树脂保护接点位置,防止接点锈蚀而影响电连接。为了提高测量结果的准确度,减少电能的无效损耗,在原设计方案的基础上对钢筋件上下端面做防水处理,即在钢筋件的上下端面涂抹一层环氧树脂胶黏剂。

使用蓝色铠装光缆将FBG的尾纤引出,再采用水泥砂浆封装传感器,水泥砂浆配合比采用实际工程中结构钢筋保护层的配合比,但不加粗骨料,经手工振捣密实后形成尺寸为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的砂浆件,经过水泥砂浆保护的传感器即可以直接用于实际工程当中了。待砂浆件达到一定强度后再浇筑混凝土并振捣密实,混凝土件为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体。传感器封装过程如图2所示。



图2 FBG传感器的封装

Fig. 2 The packaging of FBG sensor

## 6 实验结果分析

在传感器封装前,为了研究传感器的测量范围和准确度,采用 SM130 解调仪和温控箱标定 FBG 的温度敏感系数和预拉应变。实验设置 3 组试件,由于 3 组试件所处环境温度相同,故仅在 FCS1 传感器中设置温度补偿器,测量结果如表 1 所示。3 个传感器的 FBG-1 预拉应变分别为 735.833  $\mu\epsilon$ 、790.833  $\mu\epsilon$  和 877.500  $\mu\epsilon$ ,远小于光纤的极限拉应变 10 000  $\mu\epsilon$ <sup>[8]</sup>,基于对 FBG 应变松弛进行监测从而推算钢筋腐蚀程度的设计原理,该传感器还有增大测量范围的潜力。

表 1 预拉应变和温度敏感系数

Table 1 Pretension strain and temperature sensing coefficient

	最初波长/ nm	固定波长/ nm	预拉应变/ $\mu\epsilon$	温度敏感系 数/( $\text{pm}/^\circ\text{C}$ )
FCS1	1 524.048	1 524.931	735.833	13.76
FCS2	1 559.948	1 560.897	790.833	12.77
FCS3	1 563.993	1 565.046	877.500	16.58
FCS1T	1 563.893	1 563.893	0.000	8.06

注:FCS1 代表编号为 1 的 FBG 钢筋腐蚀传感器,FCS1T 代表 FCS1 传感器中的 FBG 温度补偿器

将标准养护 28 d 的混凝土试件放入浓度为 5% 的 NaCl 溶液中,浸泡 30 d,使  $\text{Cl}^-$  充分渗透,减少钢筋钝化膜脱钝消耗的电能。电化学加速腐蚀实验装置如图 3 所示,闭合电路以传感器为阳极,碳棒为阴极,采用恒流电源提供大小为 10 mA 直流电流,根据钢筋件的表面积可以得到钢筋件表面的电流密度为 0.53  $\text{mA}/\text{mm}^2$ 。实验中电解液仍采用浓度为 5% 的 NaCl 溶液。实验中采用 MOI 公司的 SM130 解调仪监测 FBG 的波长变化,分辨率为 1  $\text{pm}$ 。

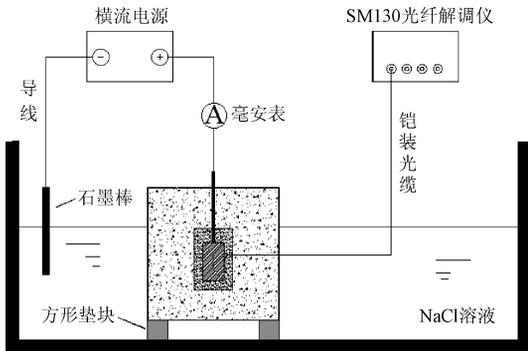
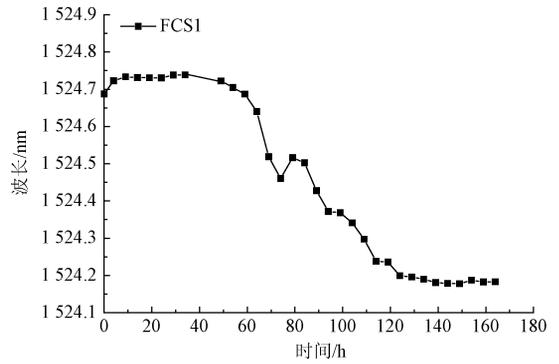


图 3 电化学加速腐蚀试验装置

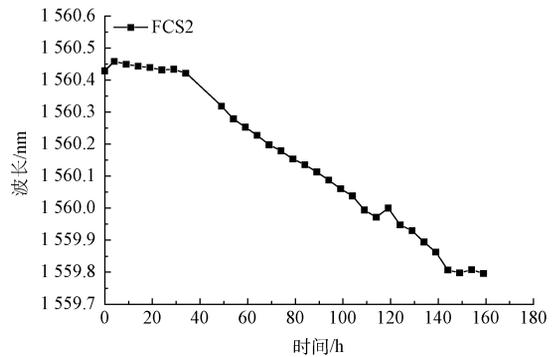
Fig. 3 Electrochemical accelerating corrosion testing device

通电腐蚀大约 120、140 和 160 h 后,3 个传感器分别失效,而温度补偿器工作正常。图 4 所示为温度补偿后

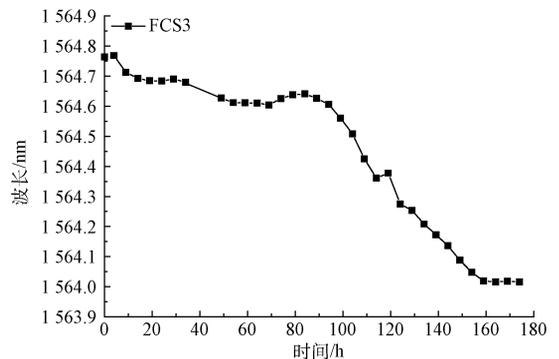
的 FBG 中心波长曲线,很明显,3 个传感器的测量结果均呈现“Z”型趋势。在通电初始阶段,FBG 中心波长基本处于稳定状态,下降非常缓慢,原因是钢筋件表面的钝化膜没有完全破坏,钢筋基本没有发生腐蚀或腐蚀比较缓慢<sup>[16]</sup>。当钢筋钝化膜完全破坏,钢筋与水 and 氧气的接触面积变大,钢筋腐蚀速率也明显加快。随着腐蚀产物逐渐溢出,腐蚀产物透过 FBG 进入到滤纸层及钢筋与砂浆保护层之间的间隙,FBG 的预应力得以释放。当 FBG 的预应力完全释放即处于松弛状态,即使钢筋继续通电腐蚀,传感器的 FBG 中心波长也不再变化,传感器失效。



(a)



(b)



(c)

图 4 温度补偿后的中心波长曲线

Fig. 4 The curves of central wavelength after temperature compensation

FCS2 号传感器在 40 ~ 140 h 时间段内的中心波长曲

线斜率约为  $-5.06 \text{ pm/h}$ ，则钢筋件的腐蚀速度约为  $42.27 \text{ nm/h}$ ；曲线段的线性相关系数为  $0.9907$ ，传感器的准确度比较高，能够实现钢筋腐蚀的实时在线监测。FCS1、FCS2 和 FCS3 传感器失效后的中心波长降幅分别为  $557.84$ 、 $623.41$  和  $663.20 \text{ pm}$ ，代入式(5)可得 FBG 的应变幅分别为  $464.87 \mu\epsilon$ 、 $519.51 \mu\epsilon$  和  $552.67 \mu\epsilon$ ，则 FBG 预拉应变的利用率分别为  $63.18\%$ 、 $65.69\%$  和  $62.98\%$ ，预拉应变损失主要是由光纤涂覆层及其固定用胶蠕变和应力松弛引起的。

将温度补偿后的 FBG 中心波长带入腐蚀率计算公式可得钢筋件的质量腐蚀率，如图 5 所示。3 个传感器测得的最大质量腐蚀率分别为  $0.08\%$ 、 $0.10\%$  和  $0.12\%$ ，这与传感器中 FBG-1 的预应力大小有关，由于解决了 FBG 固定点不稳定的难题，接下来的实验可以继续增大 FBG-1 的预应力以提高传感器测量范围。

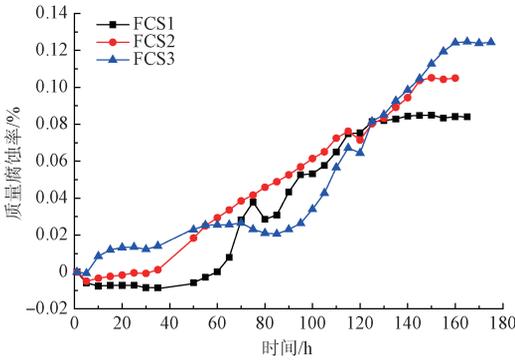
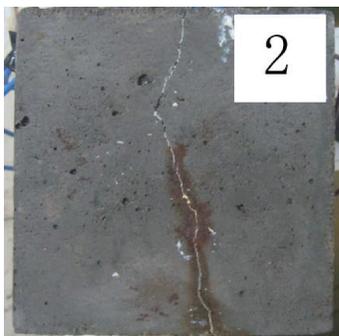


图5 质量腐蚀率  
Fig.5 Mass loss rate

实验结束后，混凝土试件有明显的侧面裂缝，裂缝自上而下贯通，如图 6 所示。这说明  $0.1\%$  的质量腐蚀率足以使厚度为  $40 \text{ mm}$  的 C30 混凝土保护层开裂<sup>[17]</sup>，传感器可以实现混凝土中钢筋的中早期腐蚀监测。剖开混凝土试件后发现滤纸中充满了红褐色铁锈，剥开滤纸可以看到缠绕在钢筋件表面的 FBG 处于松弛状态，两端固定点稳固，传感器可以实现水下钢筋腐蚀的在线监测。



(a) 试件  
(a) Specimen



(b) 传感器  
(b) Sensor

图6 腐蚀后的试件和传感器

Fig.6 Specimen and sensor after corrosion

### 7 结 论

本文通过电化学加速腐蚀实验研究了 FBG 水下钢筋腐蚀传感器的工作性能，得出如下几点结论。

1) 本文利用 FBG 预应力释放和应变测量原理来监测钢筋腐蚀，随着钢筋腐蚀直径减小，FBG 的预应力得以释放，FBG 产生负应变导致中心波长下降，根据钢筋质量腐蚀率与 FBG 中心波长之间的计算公式可以实现钢筋腐蚀的实时监测，并且不必考虑钢筋腐蚀膨胀系数的影响，提高了测量结果的准确性。

2) 使用环氧树脂将 FBG 固定在钢筋件一侧固化的环氧树脂上，而不是直接固定在钢筋表面，解决了环氧树脂与钢筋粘结力不足的问题，提高了 FBG 固定点的稳定性，增大了传感器的测量范围。

3) 在钢筋件的轴向通孔内安装了温度补偿器，该传感器集腐蚀监测、温度补偿于一体，减少了传感器数量，无需另设温度补偿器就可以用于实际工程，此外，由于受到钢筋件的保护温度补偿器的成活率和使用寿命将大大提高。

4) 该实验并没有对传感器的 FBG-1 施加足够大的预拉力，3 个传感器的 FBG-1 预拉应变分别为  $735.833 \mu\epsilon$ 、 $790.833 \mu\epsilon$  和  $877.500 \mu\epsilon$ ，远小于光纤的极限拉应变  $10\,000 \mu\epsilon$ ，接下来的实验将加大 FBG-1 的预应力，进一步增加传感器的测量范围。

### 参考文献

[ 1 ] ISLAM MR, BAGHERIFAEZ M, ALI MM, et al. Tilted fiber Bragg grating sensors for reinforcement corrosion measurement in marine concrete structure [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(12): 3510-3516.

[ 2 ] LI W J, Ho S C M, SONG G B. Corrosion detection of steel reinforced concrete using combined carbon fiber and fiber Bragg grating active thermal probe [ J ]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(4): 1-9.

[ 3 ] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流

- 传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1806-1812.
- JIA D P, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12):1806-1812.
- [4] 马丹, 葛俊峰, 叶林, 等. 光纤点式液位传感技术的研究现状[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 92-95.
- MA D, GE J F, YE L, et al. Review on fiber optic point liquid-level sensors[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9):92-95.
- [5] 李俊, 吴瑾, 高俊启. 一种监测钢筋腐蚀的光纤光栅传感器的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 283-286.
- LI J, WU J, GAO J Q. Study of an optical fiber grating sensor monitoring corrosion of reinforcing steel [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1): 283-286.
- [6] ZHAO X F, GONG P, QIAO G F, et al. Brillouin corrosion expansion sensors for steel reinforced concrete structures using a fiber optic coil winding method[J]. Sensors, 2011, 11(11):10798-10819.
- [7] TAN C H, SHEE Y G, YAP B K, et al. Fiber Bragg grating based sensing system: Early corrosion detection for structural health monitoring[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2016, 246(8):123-128.
- [8] 宋世德, 李鹏, 周卫杰, 等. 一种基于光纤布拉格光栅的金属腐蚀传感器[J]. 光电子·激光, 2015, 26(10):1866-1872.
- SONG SH D, LI P, ZHOU W J, et al. Research on a fiber Bragg grating based corrosion sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(10):1866-1872.
- [9] HU W B, CAI H L, YANG M H, et al. Fe-C-coated fibre Bragg grating sensor for steel corrosion monitoring [J]. Corrosion Science, 2011, 53(5):1933-1938.
- [10] 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.
- ZOU J, HE CH, ZHU Y K. Research on the NDT of fan blade based on fiber Bragg grating and wavelet packet energy spectrum technology[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(3):133-138.
- [11] MAO J H, CHEN J Y, CUI L, et al. Monitoring the corrosion process of reinforced concrete using BOTDA and FBG sensors[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8866-8883.
- [12] 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 33(8): 1744-1750.
- LI H, ZHU L Q, LIU F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 33(8):1744-1750.
- [13] 李宏男, 任亮. 结构健康监测-光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:17, 77.
- LI H N, REN L. Structural health monitoring-fiber Bragg grating sensing technology [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:17, 77.
- [14] 黄肖迪, 王源, 孙阳阳, 等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1233-1240.
- HUANG X D, WANG Y, SUN Y Y, et al. Mechanism analysis on the impact of coating to fiber Bragg grating strain transfer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):1233-1240.
- [15] 吴入军, 郑柏林, 贺鹏飞, 等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):24-30.
- WU R J, ZHENG B L, HE P F, et al. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1):24-30.
- [16] ZHANG N, CHEN W, ZHENG X, et al. Optical sensor for steel corrosion monitoring based on etched fiber Bragg grating sputtered with iron film [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(6): 3551-3556.
- [17] WU F, GONG J H, ZHANG Z. Calculation of corrosion rate for reinforced concrete beams based on corrosive crack width [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2014, 15(3):197-207.

## 作者简介



宋世德, 1974年出生, 分别在1997年、2006年于大连理工大学获得学士学位和博士学位, 现为大连理工大学讲师, 主要研究方向为光纤传感器及其在结构健康监测中的应用和新材料的应用研究。

E-mail: peterssd@163.com

**Song Shide** was born in 1974, received B. Sc. and Ph. D. from Dalian University of Technology in 1997 and 2006, respectively. Now he is lecturer in Dalian University of Technology. His main research interests include application of optical fiber sensors, structural health monitoring and application of new materials.



张作才,1989年出生,2010年于山东农业大学获得学士学位,现在大连理工大学攻读硕士学位,主要研究方向为光纤传感器及其在结构健康监测中的应用。

E-mail: zczzd163@163.com

**Zhang Zuocai** was born in 1989, received B. Sc. from Shandong Agricultural University in 2010. Now he is M. Sc. candidate in Dalian University of Technology. His main research interest includes application of optical fiber sensors and structural health monitoring.



王晓娜,1976年出生,2008年于大连理工大学获得博士学位,现为大连理工大学高级工程师,主要研究方向为光电检测、光纤传感器和生物光子学

E-mail: 8239731@qq.com

**Wang Xiaona** was born in 1976, received Ph. D. from Dalian University of Technology in 2006. Now she is senior engineer in Dalian University of Technology. Her main research interests include photoelectric detection, optical fiber sensors and bio-photonics.

## 是德科技 SystemVue 仿真平台有助应科院降低 NB-IoT 收发信机的成本和功耗要求

SystemVue 仿真平台提供分析结果,以助应科院就修订 NB-IoT 标准提出正式申请,令业界研发更低成本/功耗的收发信机

是德科技(NYSE:KEYS)宣布其系统设计和验证仿真平台推出最新版本 SystemVue 2017。SystemVue 仿真平台可以帮助用户将基带、射频和信道模型整合到一起,用于评测整个系统性能。SystemVue 2017 能够助力优化 NB-IoT 标准,加速低功耗 NB-IoT 终端芯片的实施,经过优化的 NB-IoT 标准将编入 3GPP 标准第 13 版(修订版本)和第 14 版中。

NB-IoT 是一种新兴的窄带无线通信标准,能够支持广泛的新物联网设备和服务。该标准规定了有利于实现大规模部署和长电池使用寿命的低成本和低功耗方案的实施。

在设计 NB-IoT 终端收发信机时,香港应用科技研究院(应科院)的专家发现在 NB-IoT 标准的接收机宽带互调要求中有一个定义不合适。该要求比 LTE 标准的相应要求更严格,这与提供低成本/低功耗 NB-IoT 终端的承诺背道而驰。

基于 Keysight EEs of EDA SystemVue 软件和 NB-IoT 程序库(与应科院合作开发)的系统级仿真平台为应科院提供了所需的关键证据,帮助其于 2 月在希腊雅典举行的 3GPP RAN4 #82 会议上成功申请标准变更。该变更得到了许多企业的代表的全力支持。

是德科技设计工程师软件组织总经理 Tom Lillig 表示:“作为很早便积极参与 3GPP NB-IoT 标准化的企业,

应科院在为全球市场开发 NB-IoT 终端收发信机 IP 方面一直走在前列。SystemVue 软件一直在其开发工作中发挥着重要作用并将继续保持这一地位,为应科院提供强大的测试能力,支持其对收发信机 IP 进行全面的系统级评测。如若没有这些能力,像 NB-IoT 标准定义不合适这样的问题很可能被忽略,给标准的使用和传播带来不利影响。”

应科院首席科技总监杨美基博士表示:“在 NB-IoT 终端收发信机 IP 和芯片开发过程中,应科院从是德科技及时提供的高效 SystemVue 仿真平台中获益匪浅。我们与是德科技的合作不仅改进了全球 NB-IoT 标准,而且还帮助我们抓住了 NB-IoT 终端市场中的良机。”

### 关于是德科技

是德科技是一家领先的技术公司,致力于帮助工程、企业和服务提供商客户优化网络,进而将其电子产品以更低的成本、更快地推向市场。从设计仿真到原型验证、再到生产测试以及网络和云环境的优化,是德科技提供了全方位电子信号测试与分析解决方案。客户遍及全球通信、航空航天与国防、汽车、能源、半导体和通用电子终端市场。2017 年 4 月,是德科技完成对 Ixia 的收购。Ixia 公司在网络测试、可见性和安全解决方案领域具有十分雄厚的实力。更多信息,请访问 [www.keysight.com](http://www.keysight.com)。