

## 激光与光电子学进展

基于弱反射布拉格光栅技术的海上钢管桩  
变形监测研究徐祎恬<sup>1</sup>, 吴静红<sup>1\*</sup>, 唐柏鉴<sup>1</sup>, 亓乐<sup>2</sup>, 孟志浩<sup>2</sup>, 刘鹏飞<sup>3</sup><sup>1</sup>苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011;<sup>2</sup>山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;<sup>3</sup>苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123

**摘要** 利用弱光栅应变监测原理,研究了两种不同封装方式的弱光栅传感器对钢梁的应变监测效果,并将其应用于海上钢管桩的变形监测。结果表明,弱光栅应变监测结果与分布式光纤结果以及理论计算结果都具有较高的一致性;推算的钢梁挠度与百分表测实值以及理论值误差在 10% 以内。海上钢管桩水平静载荷试验结果表明,桩身变形主要在海平面以下 60 m 的范围内,钢管桩挠度随着荷载的增加而增加,随着桩深的增加而减小,在 50 m 埋深后,钢管桩几乎不再受水平推力的影响;监测所得挠度与实际挠度平均误差为 16 mm。通过室内模型及实际工程应用证明了弱光栅在钢结构监测中的可行性及准确性,并为同类项目提供了一定的技术支持。

**关键词** 光栅; 海上钢管桩; 钢结构; 弱反射布拉格光栅; 应变; 挠度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1105001

Deformation Monitoring of Offshore Steel Pipe Piles Based on Weak  
Reflection Bragg Grating TechnologyXu Yitian<sup>1</sup>, Wu Jinghong<sup>1\*</sup>, Tang Baijian<sup>1</sup>, Qi Le<sup>2</sup>, Meng Zhihao<sup>2</sup>, Liu Pengfei<sup>3</sup><sup>1</sup>School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China;<sup>2</sup>Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China;<sup>3</sup>Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, Jiangsu, China

**Abstract** Two types of weak grating sensors with different packaging methods were developed using the weak grating strain monitoring technology. The strain of the steel beam after loading is measured and compared with the distributed optical fiber sensor. The experimental results show that the strain monitoring results obtained using weak grating agree well with those obtained using distributed optical fiber and theoretical calculation. The error between the calculated deflection of the steel beam and measured and theoretical values of the dial indicator is within 10%. The horizontal static load test results of an offshore steel pipe pile show that the deformation of the pile is mainly within the range of 60 m below the sea level. The deflection of steel pipe piles increases with the increase of load and decreases with the increase in pile depth. After 50 m buried depth, the steel pipe pile is almost no longer affected by horizontal thrust, and the deflection value is 0. In the horizontal static load test, the average error between the monitored deflection and actual deflection is 16 mm. Through the indoor model and practical engineering application, the feasibility and accuracy of weak grating in steel structure monitoring are proved, which provides technical support for similar projects.

**Key words** gratings; steel pipe piles at sea; steel construction; weak reflection fiber gratings; strain; deflection

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-07-26; 录用日期: 2021-07-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41907232)、江苏省自然科学基金(BK20180972)

通信作者: \*wjh@mail.usts.edu.cn

## 1 引言

钢管桩钢材材质均匀、强度高、自重轻,具有较强的抗弯能力,目前常用于海上风电桩及基础设施。海上钢管桩在沉桩运营过程中会受到多方面因素影响,其受力与变形状态复杂且直接影响上部结构的施工与运行安全,我国对桩基质量检测有严格的规范,目前对于大型钢管桩的承载能力,采用静载试桩的方式。对于风电桩基而言,不仅需要考虑竖向荷载,还需要考虑风、海浪等水平荷载带来的影响。

对于海上钢管桩的监测,传统的点式监测方式受外界的干扰较大且存在稳定性不足、耐久性差、抗干扰能力弱、布设功率复杂、存活率低且无法进行实时测量等问题<sup>[1-4]</sup>。目前海上钢管桩监测存在以下难点:1) 桩身较长对传感器长度要求高;2) 施工环境复杂,四周皆为海水,对传感器耐腐蚀性要求高;3) 运营期间受风浪及船舶撞击等影响,对传感器的监测效率要求高。

近年来,光纤感测技术凭借自身测量精度高、可长距离监测、抗电磁干扰、电绝缘性、耐腐蚀性及可实现远距离实时监测等优势<sup>[5]</sup>,为钢结构监测提供了新的监测手段,广泛应用到工程监测中。钢结构健康监测中应用较为广泛的两种光纤感测技术是基于光纤布拉格光栅(FBG)的准分布式光纤感测技术与基于布里渊、拉曼和瑞利散射光的全分布式光纤感测技术。此前已有多位学者将分布式光纤感测技术运用到钢结构与钢管桩中,证明了光纤感测技术在钢结构应变监测中的可行性和优越性。潘金炎等<sup>[6]</sup>在钢结构上安装光纤光栅传感器,运用光纤光栅感测技术与传统电阻应变片进行应变监测对比,证明了光纤光栅技术在钢材应变监测中的准确性。邓朗妮等<sup>[7]</sup>采用光纤光栅传感器对部分试件进行全程应变监测,发现光纤光栅传感器适用于微型钢管桩的受力监测。马加骁等<sup>[8-10]</sup>研究了FBG传感技术在开口管桩贯入特性实验中的适用性。郝英奇等<sup>[11-13]</sup>通过钢结构弯曲试验将分布式光纤与传统电阻应变片的应变监测数据进行对比,并将其运用到SMW法,即在水泥土桩内插入钢构件如H型钢、钢管等,将承受荷载与防渗挡水结合起来,使之成为同时具有受力与抗渗两种功能的支护结构的围护墙,应用于现场桩基项目中,证实了分布式光纤的稳定性与准确性。刘钊等<sup>[14]</sup>通过实例验

证了分布式光纤在测试大型钢管桩时具有数据连续、测试距离长、抗干扰能力强等优点,分析得到的侧摩阻力可作为优化桩长的重要依据。

然而,对于海上钢管桩这类桩身较长的监测结构,虽然光纤光栅感测技术可以实现实时监测,凭借其复用性可以扩大光纤光栅传感网络规模,但受到带宽和传输损耗的限制<sup>[15]</sup>,仍无法满足复杂、大规模监测的要求。全分布式光纤传感技术虽然在大型桩基工程中得以应用,但却受限与传感光缆、解调仪的功能和成本,大多通过人工采集数据且后期处理数据量庞大,对钢管桩应变监测效率不高。因此基于弱光栅的密集准分布式光纤感测技术凭借其长距离、多测点、低成本、实时测量、铺设简单等优势,逐渐应用于实际监测中。

本文设计了钢梁的三点弯曲试验,研究了不同封装方式弱光栅传感器对钢梁变形监测的可行性,通过积分法将应变转换为挠度,并与理论挠度和实测挠度进行比较,从而验证了弱光栅传感器的稳定性和精确性。结合海上钢管桩的水平静载荷试验结果,进一步验证了弱光栅技术在现场应用中的可行性,为同类项目提供了一定的技术支持。

## 2 弱反射布拉格光栅技术原理

### 2.1 FBG 技术原理

光纤光栅的复用技术主要包括波分复用技术、时分复用技术、混合复用技术等。FBG使用的是一种波分复用技术,即光纤光栅通过波长来分辨的技术。由于光纤的紫外光敏特性,使得在一段范围内光纤纤芯折射率沿纤轴方向发生周期性变化,形成空间相位光栅。当入射光经过光纤光栅时,满足布拉格反射条件的入射光会被反射回来,其余的透射光几乎不受影响,布拉格反射条件为

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

式中: $\lambda_B$ 为反射光的中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 为光栅周期。光纤轴向向应变和沿线温度会引起反射光中心波长的漂移<sup>[16]</sup>。

波分复用技术,即传统的光纤布拉格光栅利用光栅波长的不同调制特性,使得不同中心波长的光栅占据不同的频带,各个频率入射光的功率得到充分利用。但波分复用技术受到入射光谱、光栅带宽以及待测信号动态范围的影响,复用数量有限。光纤复用数量只能在10左右<sup>[17]</sup>,光纤需要单个制备完成,焊接组网,因此焊接点过多、损耗大,很难达到

大规模的复用要求。

### 2.2 弱反射布拉格光栅复用技术

时分复用技术可以将光纤在时域上分成不同的时间间隔,将每个光纤光栅传感器的传输时间分配在不同的时间间隔内进行传输,以此达到将每个传感器分开,互不干扰的目的。

弱反射布拉格光栅复用技术将时分复用技术与波分复用技术相结合,在同一根光纤上按一定规律依次串联复用具有相同中心波长的多个光纤光栅,利用接收反射光的时差可以定位传感器的空间位置,反射光波长漂移反映该传感器位置的物理量

变化。如图 1 所示,各中心波长依次等间距刻在光纤上,中心波长可分为两至三种不同波长段,以三种不同中心波长为例,可调谐激光器输出中心波长为  $\lambda_1$  的光,可调谐激光器将窄带宽光源解调成脉冲光进入光纤中,被与中心波长相匹配的弱光栅反射回来,通过采集信号对应的时间进行位置判定,经过  $t$  时间[可调谐激光器调节  $(\lambda_n - \lambda_{n-1})\text{nm}$  的扫描时间],可调谐激光器输出中心波长为  $\lambda_2$  的光,经过解调进入光纤,通过信号采集判定光栅位置。同理激光器依次输入各中心波长,对所有光栅进行标定从而获得各弱光栅的反射光谱。

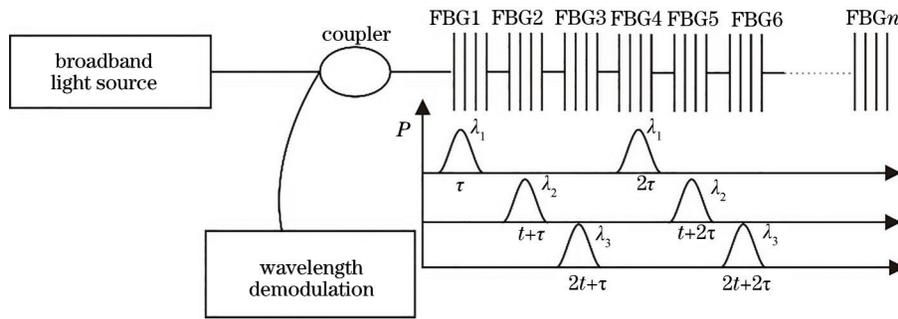


图 1 弱光栅传感原理

Fig. 1 Principle of weak grating sensing

弱反射布拉格光栅(简称弱光栅)具有窄带宽、弱反射的特点,因而光源带宽和入射光功率的限制大大减小,从而达到同一光纤上可以串联上千传感光栅点的目的。目前市场上的弱光栅按一定规格,将 FBG 的中心波长分为两至三种不同波长段,并进行标准化且批量化生产从而大大降低了生产成本。

## 3 算法分析

弱光栅所测得的是针对钢材某平面处的波长,通过波长变化可计算应变,其计算公式为

$$\epsilon = \gamma \times (\lambda - \lambda_0), \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  为应变系数;  $\lambda$  为各级荷载下波长;  $\lambda_0$  为原始波长。

由波长计算得出的应变在未确定中性面的前提下,不能代表整个钢材的变形状态,因此无法进行弯矩和挠度的计算,必须先确定中性面的位置,再进行后续计算。

### 3.1 确定中性面位置

由于钢材本身存在不均匀等不确定因素,钢材中性轴位置无法确定是否与钢材中心重合,以钢梁为例,假定钢梁纵向为  $x$  轴,取如图 2 所示截面,则光纤 1 与 1' 相对于中性面的距离分别为  $y_1$  和  $y_{1'}$ ,

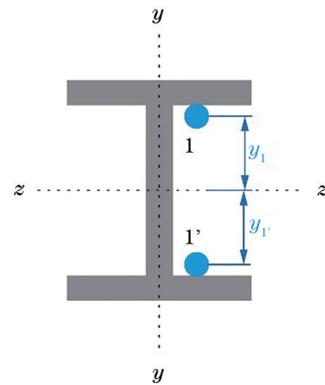


图 2 钢梁截面

Fig. 2 Steel beam section

可得

$$M(x) = \frac{I_z E \epsilon_1(x)}{y_1(x)} = \frac{I_z E \epsilon_{1'}(x)}{y_{1'}(x)}, \quad (3)$$

$$Y(x) = y_{1'}(x) - y_1(x), \quad (4)$$

$$M(x) = \frac{I_z E [\epsilon_{1'}(x) - \epsilon_1(x)]}{Y(x)}, \quad (5)$$

式中:  $M(x)$  为某光栅点所在截面钢梁的弯矩;  $I_z$  为钢梁绕  $z$  轴的惯性矩;  $E$  为弹性模量;  $\epsilon_1(x)$  为某光栅点所在截面 1 光纤受荷载作用的应变值;  $\epsilon_{1'}(x)$  为某光栅点所在截面 1' 光纤受荷载作用的应变值;

$Y(x)$ 为某光栅点处 1 光纤与 1' 光纤之间的距离。

根据(5)式所得出的弯矩可通过二次积分法计算钢梁挠度,

$$\omega(x) = \frac{-\int \left[ \int M(x) dx \right] dx + Cx + D}{EI_z}, \quad (6)$$

式中: $\omega(x)$ 为某光栅点所在截面钢梁的挠度; $C$ 和  $D$ 为根据边界条件所确定的参数。

### 3.2 温度补偿

弱光栅技术所获得波长测量值受应变与温度共同的影响,应变值为

$$\epsilon_c = \epsilon_\epsilon + \epsilon_t, \quad (7)$$

式中: $\epsilon_c$ 为弱光栅计算所得应变值; $\epsilon_\epsilon$ 为钢材受变形影响的真实应变; $\epsilon_t$ 为钢材受环境温度影响的应变值。当在同一温度环境内进行试验时,

$$\begin{aligned} \epsilon_{1'}(x) - \epsilon_1(x) &= [\epsilon_{1'c}(x) - \epsilon_{1t}(x)] - \\ &[\epsilon_{1c}(x) - \epsilon_{1t}(x)] = \epsilon_{1'c}(x) - \epsilon_{1c}(x)。 \end{aligned} \quad (8)$$

此时,在计算钢材弯矩时无需进行温度补偿。

## 4 钢梁变形监测模型试验

### 4.1 材料与设备

试验采用两种弱光栅应变感测光缆,J型紧包

护套弱光栅应变感测光缆[图 3(a)]的护套与光纤用胶紧密结合,K型铠装定点弱光栅应变感测光缆[图 3(b)]采用内定点设计,在邻近两栅点中间用胶将铠管与光纤粘紧。两种光缆的弹性护套极为柔软,易与监测物变形协调,具体参数见表 1。

采用柜式密集分布式光纤解调仪[图 3(c)]对试验过程中的应变数据进行采集,该设备基于光纤光栅传感技术和光时域定位技术(OTDR),实现了对弱光栅应变感测光缆的应变多点测量,具有长期稳定性高、测试精度高、解调速度快、实时性高、多通道扩展、实现多测线集中测试等特点。相较于全分布式的光纤感测技术,密集准分布式光纤感测技术空间分辨率精度可达 1 m,最大测量长度可达 20 km,并且密集分布式光纤解调仪相关光学元件标准、可批量生产,成本远远低于全分布式光纤感测技术。同时,它还拥有自动化的监测设备与实时在线监测设备,更适宜在恶劣条件下进行监测与数据获取。

采用 0.9 mm 高传递紧包护套应变感测光缆进行试验对比,其封装材料为聚氨酯,弹性模量为 1.75 MPa,采用 JUNNO 公司生产的 OSI-S 型光频域反射计(OFDR)分布式光纤传感仪采集分布式应变数据,仪器的空间分辨率为 1 mm,传感精度为  $\pm 1 \mu\epsilon$ 。

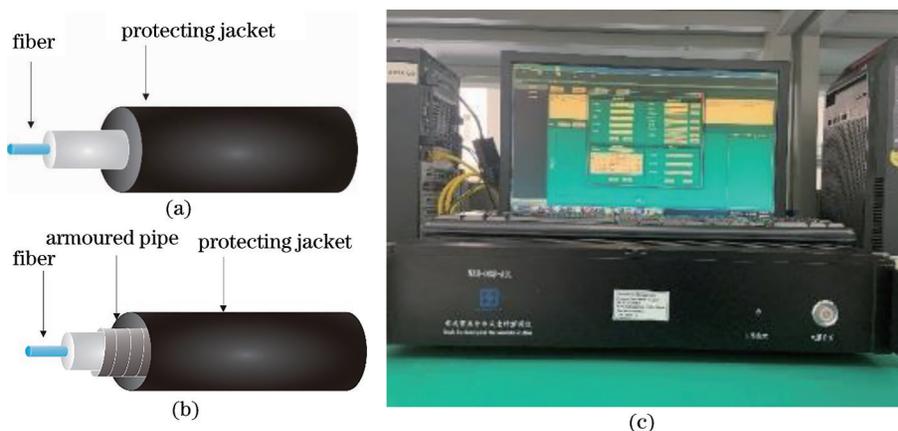


图 3 弱光栅应变感测光缆及解调仪。(a)紧包护套弱光栅应变感测光缆(J型);(b)铠装定点弱光栅应变感测光缆(K型);(c)柜式密集分布式光纤解调仪

Fig. 3 Weak grating strain sensing cable and demodulator. (a) Compact sheath weak grating strain sensing cable (type J); (b) armoured fixed-point weak grating strain sensing cable (type K); (c) cabinet dense distributed optical fiber demodulator

表 1 弱光栅感测光缆参数

Table 1 Parameters of weak grating sensing cable

| Number | Number of cores | Central wavelength of grating /nm | Reflectivity /% | Strain test range / $\mu\epsilon$ | Diameter /mm | Fixed-point spacing /m |
|--------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------|------------------------|
| Type J | 1               | 1527-1568                         | 0.01            | 15000                             | 2.0          | $\geq 0.5$             |
| Type K | 1               | 1527-1568                         | 0.01            | 15000                             | 2.5          | $\geq 0.5$             |

### 4.2 传感器的布设与安装

钢梁模型采用弯曲变形较大的工字钢,截面尺寸为 120 mm×74 mm,总长度为 6 m。在钢梁不同位置布设了 J 型弱光栅感测光缆、K 型弱光栅感测光缆以及 0.9 mm 分布式应变感测光缆,实际粘贴长度为 5.8 m,光栅点分布以及光纤传感器布设如图 4 所示。沿钢梁长度方向共铺设了 5 条光纤传感回路,分别是 J 型弱光栅感测光缆的 1-1'、2-2'和 K 型弱光栅感测光缆 4-4'、5-5',以及分布式应变感测光缆 3-3'。以 1-1'回路为例,光纤从右端端部沿上翼缘

铺设至左端端部后进行 180°转角沿下翼缘铺设回右端端部。弱光栅感测光缆光栅点间隔为 1 m,1-1'号 J 型光缆与 5-5'号 K 型光缆栅点按图中数字 1~14 布设,2-2'号 J 型光缆与 4-4'号 K 型光缆栅点按图中字母 A~L 进行布设。光纤传感器布设时,均给予 1~2 nm 预拉。光纤安装时,将工字钢表面打磨除去铁锈,使传感光缆更好地与钢梁表面粘贴;用强力胶对光纤进行定位,最后沿铺设线路使用环氧粘结剂以“全面粘贴”方式将传感光纤覆盖,使其与打磨面牢固粘贴。

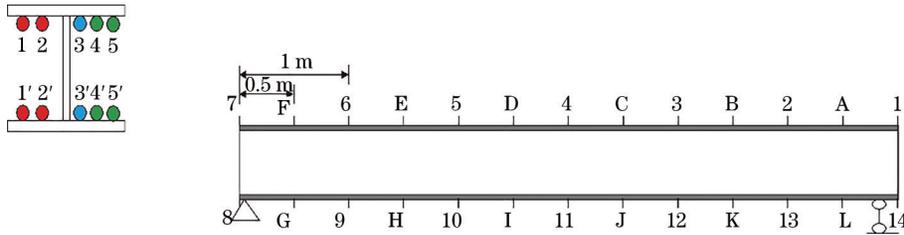


图 4 钢梁测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points of steel beam

### 4.3 试验方案

钢梁三点弯曲试验模型如图 5 所示。钢梁在构件 1/2 处受集中荷载作用。采用千斤顶对钢梁进行分级加载,每级加载 400 N,加载 7 级,加载至 2800 N 后进行卸载。通过压力传感器进行加载控制,每次加载结束后稳定 10 min 再进行数据采集。试验时

在距钢梁端部 0.5、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 m 以及跨中布置 7 个千分表,对钢梁在试验中的挠度进行测量。由于试验过程较短,在试验期间温度变化不大,因此可以忽略温度变化所产生的弱光栅波长变化,无需进行温度补偿。

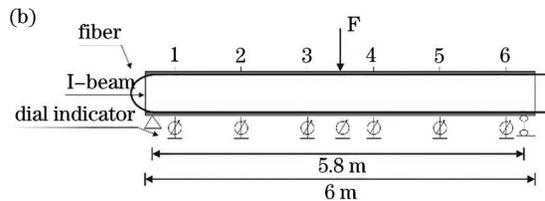
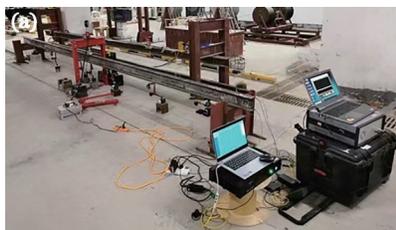


图 5 弯曲试验图。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 5 Bending test diagram. (a) Physical diagram; (b) schematic diagram

## 5 试验结果与分析

### 5.1 应变分析

选取 800、1600、2400、2800 N 荷载下 5 个光缆回路应变监测值与计算理论值进行对比分析,如图 6 所示。钢梁应变随着集中荷载的增加而增大且符合三点弯曲试验规律,在 2800 N 集中荷载下,最大应变在跨中约为 300  $\mu\epsilon$ ,最小在支座处约为 5  $\mu\epsilon$ 。弱光栅 1-1'号、2-2'号 J 型光缆,以及 4-4'号、5-5'号 K 型光缆虽然栅点布设位置不同,但是整体变化趋势相同且与全分布式光缆所测结果相接近。比较不

同型号的弱光栅可以发现,1-1'号 J 型光缆 5-5'号 K 型光缆栅点布设位置相同,其光缆应变变化规律也相同且与分布式光缆变化规律吻合,2-2'号 J 型光缆与 4-4'号 K 型光缆也有相同的结论。因此,四根弱光栅感测光缆与分布式光缆,所测得的应变值接近且符合钢梁受集中荷载作用的应变变化规律,且与理论值相近,证明了弱反射布拉格光栅这项技术在结构应变测试中的可行性与稳定性。

为了进一步验证弱光栅获取应变数据的准确性,提取了跨中截面 1-1'、3-3'、5-5'号光缆在各级荷载作用下的应变值与理论值,见表 2,其中 3-3'为全

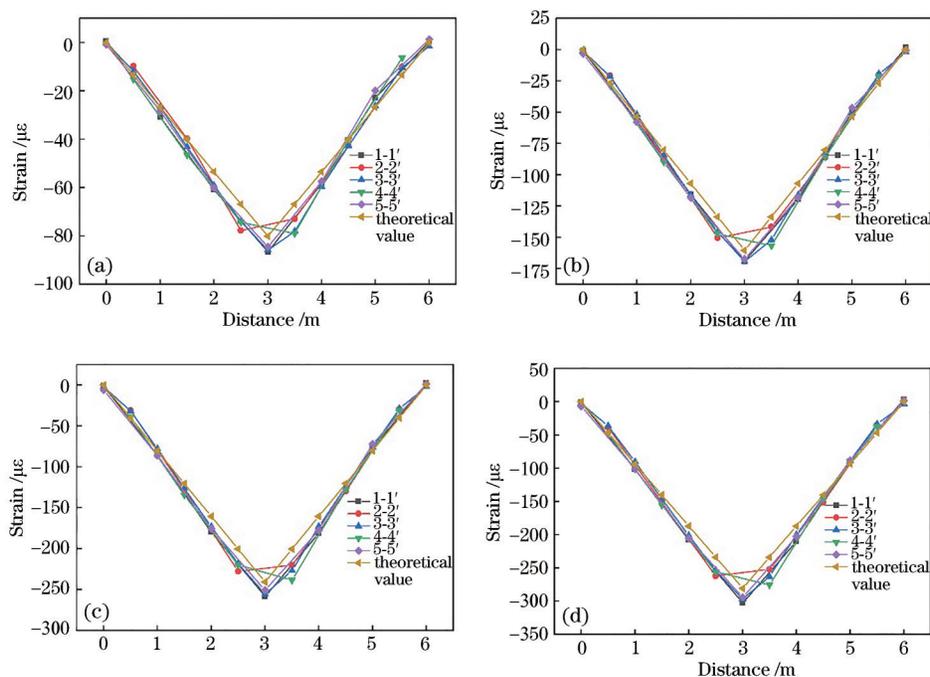


图 6 应变数据结果对比。(a) 800 N; (b) 1600 N; (c) 2400 N; (d) 2800 N

Fig. 6 Comparison of strain data results. (a) 800 N; (b) 1600 N; (c) 2400 N; (d) 2800 N

表 2 跨中截面应变值

Table 2 Strain values of midspan section

| Load / N | Midspan measuring point / $\mu\epsilon$ |         |         | Theoretical value | Error / %   |             |
|----------|---|---------|---------|-------------------|-------------|-------------|
|          | 1-1'                                    | 5-5'    | 3-3'    |                   | 1-1' & 3-3' | 5-5' & 3-3' |
| 400      | -39.34                                  | -37.61  | -45.24  | -40.08            | 13.05       | 16.88       |
| 800      | -86.56                                  | -84.50  | -85.86  | -80.16            | 0.81        | 1.58        |
| 1200     | -125.63                                 | -125.06 | -128.01 | -120.25           | 1.86        | 2.31        |
| 1600     | -169.15                                 | -167.32 | -169.14 | -160.33           | 0.00        | 1.08        |
| 2000     | -212.27                                 | -211.37 | -212.33 | -200.41           | 0.03        | 0.45        |
| 2400     | -258.32                                 | -250.78 | -255.51 | -240.49           | 1.10        | 1.85        |
| 2800     | -302.53                                 | -294.34 | -296.64 | -280.57           | 1.98        | 0.78        |

分布式光纤传感器。对两种不同封装方式的弱光栅与分布式光纤进行误差分析可以发现,荷载在 400 N 时误差较大,约在 10%~20%,这是因为此时钢梁应变较小且光纤预拉不充分。去除 400 N,在其他荷载下误差很小,最大值为 5-5'号 K 型光缆在 1200 N 荷载下,误差为 2.31%,最小值为 1-1'号 J 型光缆在 1600 N 荷载下,误差为 0.00%。1-1'号 J 型光缆的平均误差为 0.96%,5-5'号 K 型光缆平均误差为 1.34%,说明弱光栅传感器的精确性以及不同的封装方式对于测量结果的影响可忽略。值得注意的是,表 2 中 4 截面所得的最大微应变为 -302.53,根据应力应变公式可以计算出,本次试验所需的最大应力为 62.32 MPa,小于钢材的屈服值,说明钢梁在试验中为弹性阶段。

除此之外,选取图 4 中 B、C、3、4 截面进行误差分析,如图 7 所示,由图 7 可知,1-1'号 J 型光缆、2-2'号

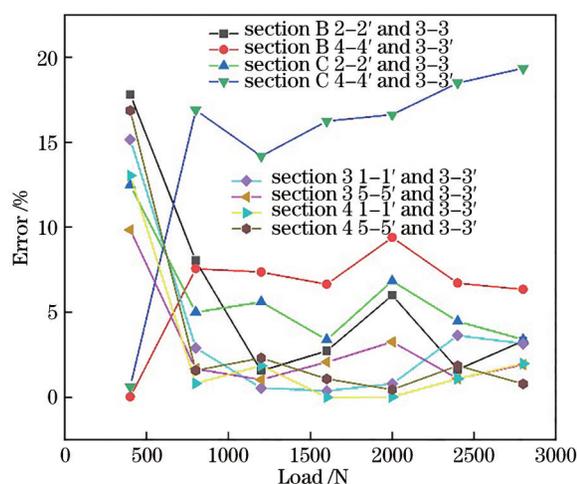


图 7 应变误差

Fig. 7 Strain error

J型光缆与5-5'号K型光缆的误差有相同的趋势,在400 N时存在较大的误差,误差在9.5%~20%之间,而除去400 N后,应变误差大多保持在5%以下,仅2-2'号光缆误差保持在5%左右。而4-4'号K型光缆在400 N时误差较小,随着荷载的增大,误差也随之增加,最大误差在2800 N时C界面处,达到19.36%,其原因可能与光纤的敷设方式以及试验前预拉有关。从表2可以看到,由于材料受加工以及锈蚀等不确定因素影响,应变测试值较比理论值偏大。

### 5.2 挠度分析

利用加载至800、1600、2400 N时的应变数据进行挠度计算,与分布式光缆3-3'所得挠度、理论挠度以及实际挠度进行对比,如图8所示。随着荷载的增大,梁挠度逐渐增大,不同荷载下弱光栅感测光缆所测值与分布式光纤所测挠度基本吻合,且与理论挠度及实测挠度基本一致,因此,弱光栅传感技术监测所得应变值通过二次积分法计算挠度值是可靠的,与分布式光纤计算挠度相吻合。值得注意的是,理论挠度与光纤所测挠度相比偏小,实测值相比光纤所测挠度则偏大。理论挠度相对偏小的原因可能与钢材的锈蚀以及加工和储存环境有关。通过千分表所测得的挠度偏大,产生这种差异的原因可能是千分表所测得的是

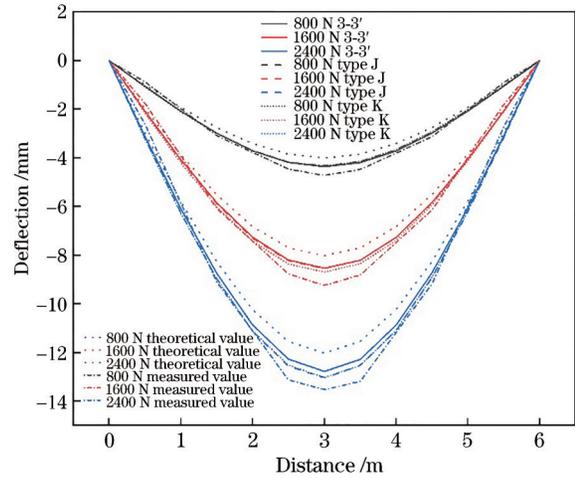


图8 挠度结果对比

Fig. 8 Comparison of deflection results

下翼缘下表面在受集中荷载时的位移,而弱光栅传感器计算所得的是中性面的位移。

提取跨中截面1-1'、3-3'、5-5'号光缆在各级荷载作用下的挠度值与理论值的对比分析,见表3。除此之外,选取图4中B、C、4截面进行误差分析,如图9所示。可以看出,400 N时误差较大的原因可能是集中荷载传力较小,钢梁变形较小,光纤的预拉不足以及千分表精度不够等。而除400 N外弱光栅光纤传

表3 跨中截面挠度值

Table 3 Deflection value of midspan section

| Load /N | Midspan measuring point /mm |         |         |                   | Error /%       |                            |                            |
|---------|-----------------------------|---------|---------|-------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|
|         | Type J                      | Type K  | 3-3'    | Theoretical value | Measured value | Type J and measured values | Type K and measured values |
| 400     | -2.017                      | -2.034  | -2.319  | -2.004            | -2.527         | 20.198                     | 19.516                     |
| 800     | -4.334                      | -4.332  | -4.363  | -4.008            | -4.724         | 8.266                      | 8.296                      |
| 1200    | -6.481                      | -6.462  | -6.447  | -6.012            | -6.982         | 7.177                      | 7.446                      |
| 1600    | -8.549                      | -8.693  | -8.535  | -8.016            | -9.248         | 7.557                      | 6.004                      |
| 2000    | -10.972                     | -10.999 | -10.664 | -10.020           | -11.222        | 2.232                      | 1.985                      |
| 2400    | -13.049                     | -13.030 | -12.774 | -12.025           | -13.526        | 3.530                      | 3.669                      |
| 2800    | -15.142                     | -15.164 | -14.832 | -14.029           | -15.754        | 3.883                      | 3.745                      |

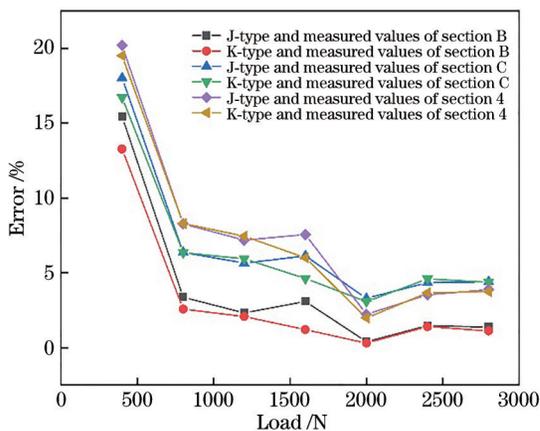


图9 挠度误差

Fig. 9 Deflection error

感器与实测挠度之间的误差均保持在10%以内,由此可以验证弱光栅在计算挠度时的精确性。

## 6 工程实例

某海上风电场工程进行海上钢管桩桩身应变测试试验。试验桩长为97 m,桩顶标高+12 m,桩尖标高-85 m,桩径为2000 mm,桩壁厚为24~30 mm。试验场地工程地质条件如下:①号地层深度36~43 m,为淤泥质粉质黏土,灰、灰褐色,流塑,含少量有机质。②号地层深度43~69 m,为淤泥质粉质黏土,灰色,流塑,局部层面夹薄层状粉砂,含少量有机质。③号地层深度69~77.5 m,为粉砂,灰色,中密为主,

局部密实,夹粉。④号地层深度 77.5~96.5 m,为粉砂,灰、灰黄色,中密~密实,含石英、长石、云母等矿物及少量贝壳碎屑,局部层面夹薄层粉质黏土,夹粉土。⑤号地层深度 96.5~118.5 m 为粉砂,灰色,密实,含石英、长石、云母等矿物碎屑。

### 6.1 传感光缆的植入与试验装置

钢管桩施工期间在桩内侧通过“全面粘贴”的方式布设J型的弱光栅传感光缆,光缆按U型布设,光栅间隔为1 m,有效光栅的数量为102个,光缆反射率为0.1%。由于桩基工程中,应变导致的波长变化远大于温度的影响,因此在本次大型工程中不考虑温度的影响。

如图 10 所示,水平荷载试验由专用卧式千斤顶施加荷载,千斤顶一端架设在与反力梁接触的基座上,另一端与压力传感器相连,通过压力传感器控制荷载。单桩水平静荷载试验控制最大试验荷载为 1000 kN,本次试验在 500 kN 前按 100 kN 一级进行分级加载,加载至 500 kN 后加密分级,按 50 kN 每级进行分级加载。在桩顶水平力作用点处设双层位移计监测钢管桩桩顶位移。

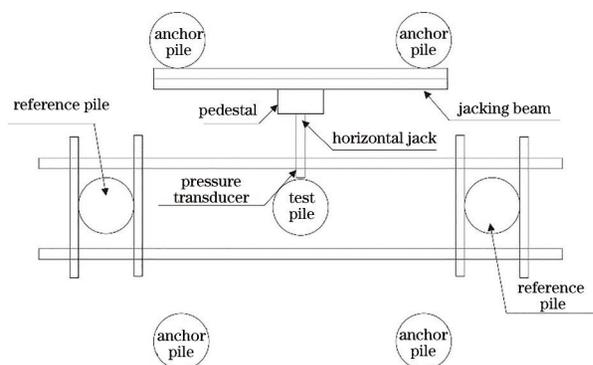


图 10 水平静荷载装置示意图

Fig. 10 Diagram of horizontal static load device

### 6.2 监测结果与分析

由弱光栅感测光缆测得的钢管桩应变曲线如图 11 所示,由图 11 可知,桩身在水平荷载的作用下,桩头的应变随着荷载的增加而增加,在 45 m 后随着深度的逐渐增加而减少,在 60 m 后桩身不受水平推力的影响,其应变最大值在①层与②层之间。

桩身弯矩曲线如图 12 所示,桩身的弯矩主要分布在海平面以下 60 m 的范围内,随着桩深的不断增加,呈现先增大后减小的趋势。随着荷载的增大,最大弯矩点逐渐向更深层转移,这是因为荷载的增加使得桩身拉应力刚度降低从而由下部桩土继续承担。

钢管桩在水平荷载下的挠度曲线如图 13 所示。

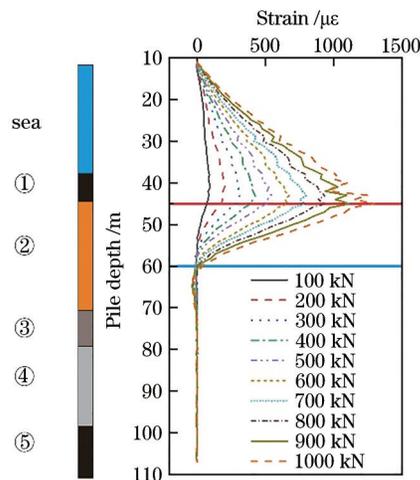


图 11 桩身弯曲应变曲线图

Fig. 11 Bending strain curves of pile

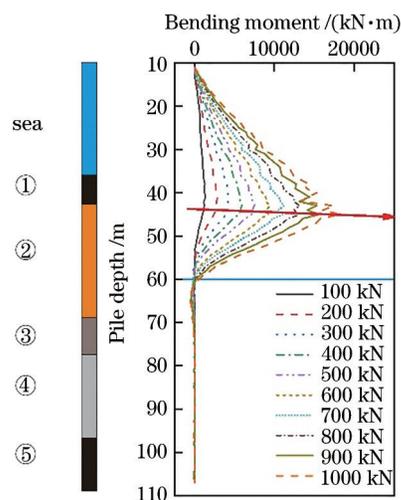


图 12 桩身弯矩图

Fig. 12 Moment diagram of pile

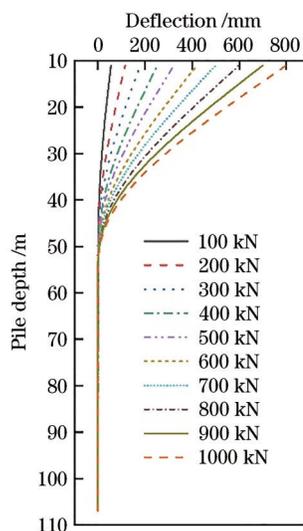


图 13 桩身挠度

Fig. 13 Pile deflection

由图 13 可知,钢管桩的挠度随着荷载的增加而增加,随着桩深的增加而减小,在 50 m 埋深后,钢管桩几乎不再受水平推力的影响,挠度值为 0。弱光栅计算所得的挠度与位移计所测得的实际挠度值结果对比显示(图 14),两者数值在 600 kN 之前基本吻合,600 kN 以后实测值略大于监测值,其最大偏差为 75 mm,最大相对偏差 11%,平均误差为 16 mm,平均相对误差为 5.8%。

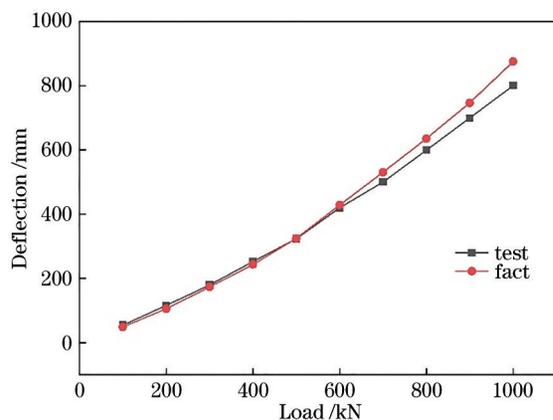


图 14 不同荷载下桩身挠度

Fig. 14 Pile deflection under different loads

## 7 结 论

本文介绍了弱光栅传感原理,通过钢梁室内试验验证弱光栅技术在钢材变形监测中的可行性并将其应用到海上钢管桩水平静载荷试验中,得到如下结论:

1) 室内钢梁弯曲试验中,两种不同封装方式的弱光栅感测光缆监测结果表明,在各级荷载的作用下弱光栅所测得的钢梁弯曲应变与全分布式光纤传感器结果、理论值接近,且符合钢梁的变形规律。弱光栅光纤传感器在钢结构健康监测方面有较高的可靠性。

2) 由弱光栅的波长测量值计算所得的钢梁挠度与实际挠度相吻合,不同的封装方式对弱光栅传感器的精度和特性并没有明显的影响,可根据实际环境的不同选择适合的封装方式。

3) 海上钢管桩水平荷载试验监测结果显示,桩身变形主要在海平面至 60 m 深处,随着水平荷载的增大,桩身荷载随之增大,最大弯矩点也有向深部移动的趋势。

4) 弱光栅监测海上钢管桩挠度随着荷载的增加而增加,随着桩深的增加而减小,在 50 m 埋深后,钢管桩几乎不再受水平推力的影响,其监测结果平

均误差为 16 mm。

## 参 考 文 献

- [1] 缪长健, 施斌, 郑兴, 等. 海上超长 PHC 管桩 BOFDA 内力测试[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(6): 1057-1063.  
Miao C J, Shi B, Zheng X, et al. The inner force test of super-long PHC pile at sea based on BOFDA [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018, 54(6): 1057-1063.
- [2] 雷元新, 邓坚, 黄胜文. 软土基坑中深层位移监测技术及误差的分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2019(5): 17-23, 29.  
Lei Y X, Deng J, Huang S W. Deep displacement monitoring technology and error analysis in soft soil foundation pit[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2019(5): 17-23, 29.
- [3] 严伯铎, 苏玉玺, 王宇平, 等. 基坑工程监测常用方法精度分析[J]. 工程勘察, 2018, 46(3): 1-5, 67.  
Yan B D, Su Y X, Wang Y P, et al. Precision analysis of the common used method for excavation engineering monitoring[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 1-5, 67.
- [4] 陈卫南, 褚伟洪, 戴加东. 基于 MEMS 传感器的可回收式侧向位移测试系统[C]//第十五届全国工程物探与岩土工程测试学术大会论文集. 成都: 中国建筑学会工程勘察分会, 2017: 258-262.  
Chen W N, Chu W H, Dai J D. Recoverable lateral displacement test system based on MEMS sensors [C]//15th National Congress of Engineering Geophysical Exploration and Geotechnical Engineering. Chengdu: Engineering Investigation Branch of Chinese Architecture Association, 2017: 258-262.
- [5] 施斌, 张丹, 王宝军. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[C]//工程地质力学创新与发展暨工程地质研究室成立 50 周年学术研讨会论文集. 北京: 中国地质学会, 2008: 124-131.  
Shi B, Zhang D, Wang B J. Distributed optical fiber monitoring technology for geology and geotechnical engineering and its development[C]//50th Anniversary of the Innovation and Development of Engineering Geology Mechanics and the Establishment of Engineering Geology Laboratory. Beijing: Geological Society of China, 2008: 124-131.
- [6] 潘宏炎, 刘亚辉, 王立. 光纤光栅传感器监测钢梁应变的试验研究[C]//第四届建筑结构抗震技术国际会议论文集. 北京:《建筑结构》编辑部, 2014: 5.  
Pan J Y, Liu Y H, Wang L. Experimental study on

- strain monitoring of steel beams by fiber grating sensors[C]//4th International Conference on seismic technology of building structures. Beijing: Building structure Editorial Department, 2014: 5.
- [7] 邓朗妮, 马骏, 彭来, 等. 微型钢管桩抗弯性能及受力监测试验研究[J]. 混凝土, 2016(8): 130-132, 135.  
Deng L N, Ma J, Peng L, et al. Experimental study on flexural behavior and stress monitor of micro-steel-pipe piles[J]. Concrete, 2016(8): 130-132, 135.
- [8] 马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感技术的开口管桩贯入特性实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130602.  
Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Experimental study on penetration characteristics of open pipe pile based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130602.
- [9] 马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感技术的不同桩径静压桩贯入特性研究[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0504003.  
Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Penetration characteristics of jacked piles with different pile diameters based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504003.
- [10] 马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的PHC管桩现场静压贯入试验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1206004.  
Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Static-pressure penetration field test of PHC pipe pile based on fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206004.
- [11] 郝英奇, 丁勇, 何宁. 分布式光纤传感测试系统(BOTDA)用于H型钢梁变形监测的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(4): 447-456.  
Hao Y Q, Ding Y, He N. Experimental study of H steel beam deformation monitoring based on BOTDA[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4): 447-456.
- [12] 丁勇, 王平, 何宁, 等. 基于BOTDA光纤传感技术的SMW工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 719-724.  
Ding Y, Wang P, He N, et al. New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 719-724.
- [13] 何宁, 王平, 丁勇, 等. 分布式光纤传感技术应变测量试验研究[J]. 中国测试, 2011, 37(2): 92-96.  
He N, Wang P, Ding Y, et al. Experimental study of distributed fiber optic sensing techniques for the measurement of strain[J]. China Measurement & Test, 2011, 37(2): 92-96.
- [14] 刘钊, 田韩续, 黎双邵. 一种海上风电大直径超长钢管桩的内力测试方法[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(11): 42-45.  
Liu Z, Tian H X, Li S S. An internal force testing method for large diameter and super long piles of offshore wind power[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(11): 42-45.
- [15] Valente L C G, Braga A M B, Ribeiro A S, et al. Combined time and wavelength multiplexing technique of optical fiber grating sensor arrays using commercial OTDR equipment[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 31-35.
- [16] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [17] 朴春德, 施斌, 朱友群, 等. 钻孔灌注桩压缩变形BOTDR分布式检测[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 80-83.  
Piao C D, Shi B, Zhu Y Q, et al. Distributed monitoring of bored pile compression deformation based on BOTDR[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 80-83.