

## 激光与光电子学进展

## 油气管道分布式光纤布里渊散射应变的仿真研究

尉婷\*, 龙万江, 吴冰冰, 刘颖刚, 罗俊

西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065

**摘要** 通过有限元分析软件对硬质聚氯乙烯材料支吊架结构管道建立模型, 采用中央竖直向下施加静态持续载荷方式进行力学仿真。将传感光纤沿轴向直线排布在模拟管道顶部、底部和侧部, 通过粘贴传感器将管道外表面应变传递至传感光纤, 并采用布里渊光时域分析仪对不同载荷下管道的应变变化进行监测。结果表明: 管道轴向方向到管道底部为拉伸正应变, 顶部为压缩负应变, 侧部中线的应变基本不变; 管道中段的应变最大, 向管道两端的应变逐渐减小, 距离管道端部 0.6 m 处的应变趋于 0。此外, 油气管道中段底部的应变灵敏度为顶部的 3.3 倍, 为支撑端的 5.5 倍。

**关键词** 光纤光学; 管道应变分布; 模拟仿真; 光纤布里渊散射; 布里渊光时域分析仪; 应变灵敏度

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2106003

## Simulation Research on Distributed Optical Fiber Brillouin Scattering Strain in Oil and Gas Pipelines

Wei Ting\*, Long Wanjiang, Wu Bingbing, Liu Yinggang, Luo Jun

Key Laboratory of Photoelectricity Gas-Oil Logging and Detecting, Ministry of Education of China, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710065, Shaanxi, China

**Abstract** In this paper, the rigid polyvinyl chloride material support and hanger structural pipeline is modeled by finite element analysis software, and the mechanical simulation is carried out by applying a static continuous load vertically downward from the center. Sensing fibers are arranged in a straight line along the axial direction on the top, bottom, and sides of the simulated pipe, the strain on the outer surface of the pipe is transferred to the sensing fiber by sticking the sensor, and the Brillouin optical time-domain analyzer is used to monitor the strain change of the pipeline under different loads. The results show that the axial direction of the pipeline to the bottom and top are tensile positive and compressive negative strains, respectively, and the strain of the side midline is unchanged. Moreover, the strain in the middle of the pipeline is the largest, whereas that towards the two ends of the pipeline gradually decreases, and the strain at 0.6 m tends to 0. Additionally, the strain sensitivity at the bottom of the middle section of the oil and gas pipeline is 3.3 and 5.5 times that at the top and support end, respectively.

**Key words** fiber optics; distribution of strain; finite element simulation; distributed optical fiber Brillouin scattering; Brillouin optical time-domain analyzer; strain sensitivity

## 1 引言

管道运输具有安全、经济、高效、节能等多种优点, 成为石油、天然气输送的首选技术方案。近年来, 国内外油气管道的建设发展迅速, 而油气管道的长跨度、多气候等特殊性质给其健康监测带来一定的挑战。因此, 对管道的应变分布进行有效监测, 使其能全天候、全时段进行油气安全运输, 对于能源持续供应具有重大意义<sup>[1-3]</sup>。布里渊光时域分析仪(BOTDA)是基于光时域

反射仪(OTDR)和受激布里渊散射(SBS)效应的分布式光纤检测法<sup>[4-8]</sup>, 具有可监测距离长、精度高等优势, 可同时得到光纤上被测量场在时间和空间上的连续分布信息, 实现远程监控, 非常适用于长距离油气管道的健康监测<sup>[9-14]</sup>。

本文采用长度为 4 m 的硬质聚氯乙烯(PVC-U)管材为模拟管道, 在管道中心环向加载竖直向下载荷, 利用有限元分析软件对管道的应变分布进行仿真分析。将裸光纤沿模拟管道直线排布, 通过 BOTDA 监测不

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-01-30; 录用日期: 2022-02-14

通信作者: \*yolandeweiting@sohu.com

同载荷下管道外表面的应变。该方法具有安装简单、灵敏度高、抗干扰能力强等特点,可通过在油气管道底部外侧铺设分布式光纤传感,实现对油气管道长距离健康状态的有效监测和管道应变变化的空间定位。此外,根据油气管道形变极限的阈值设定安全预警,采用 BOTDA 监测定位管道的异常位置,根据测量信息也能实现油气管道、油库以及油罐车罐体等场所的长期完整性动态检测。

## 2 有限元仿真

### 2.1 油气管道轴向应变模型的建立

用 PVC-U 管材作为模拟管道,管道长度  $L =$

4.0 m, 平均外径  $\Phi = 110$  mm, 平均壁厚  $d = 3.2$  mm, 材料的杨氏弹性模量  $E = 3.50$  GPa, 泊松比  $\nu = 0.38$ , 密度  $\rho = 1.4$  g/cm<sup>3</sup>。管道模型及其横切面如图 1 所示。管道两端采用固定支承,中央竖直向下施加静态持续载荷  $F$ 。规定管道沿轴向左视图上方为管道顶部,下方为底部,左视图右方直径方向为正面(后文统一称为侧部),左方为后面。

用 PVC-U 作为管材,对建造模型设置点状支吊架结构支撑,采用自适应网格划分,设置的仿真网格密度为  $80 \times 40$ 。考虑到管材自身质量对模拟管道设定标准的地球重力,重力方向沿 Y 轴负方向,建立并生成三维管道模型。

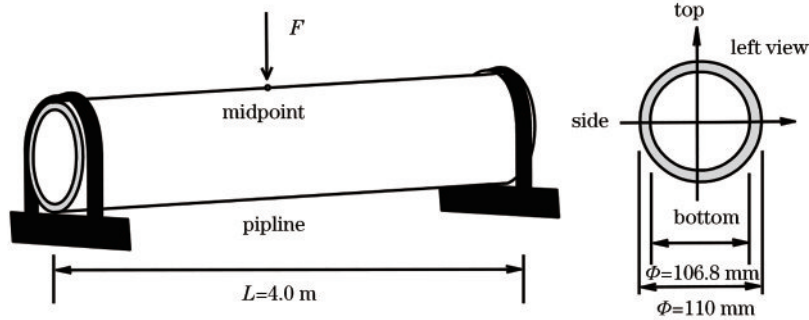


图 1 管道方位的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pipeline orientation

### 2.2 有限元仿真分析

采用系统坐标系在管道中心节点处设置集中静态持续向下载荷  $F = 100$  N, 静态载荷沿 X 方向(管道方向)为 0 N, 沿 Y 方向(垂直于管道节点处的方

向)为 -100 N, 沿 Z 方向(沿着管道径向切线方向)为 0 N。图 2 为管道外表面轴向应变模拟仿真云图的最大主应变分布。

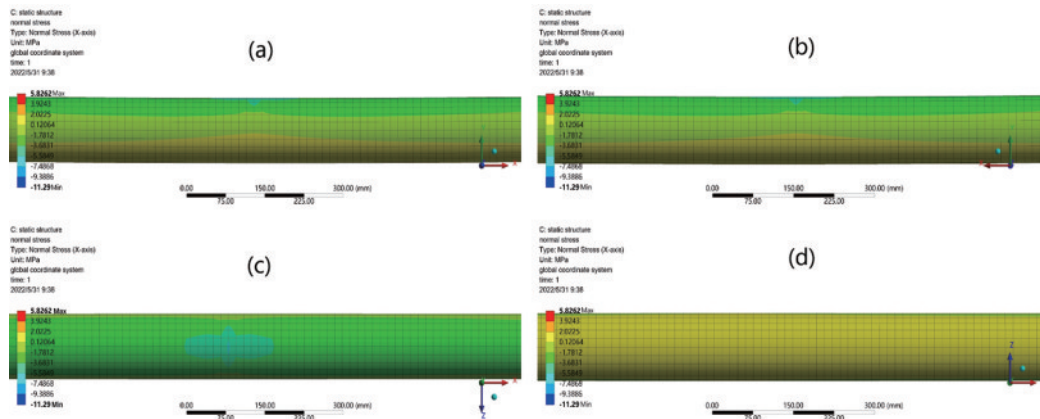


图 2 模拟管道外表面的轴向应变分布。(a)正面;(b)后面;(c)顶部;(d)底部

Fig. 2 Axial strain distribution on the outer surface of the simulated pipeline. (a) Front; (b) back; (c) top; (d) bottom

保持中央静态持续载荷为 100 N 不变,对模拟管道顶部、侧部和底部沿轴向的应变进行网格节点等距离采样,得到管道三个方向应变的分布曲线如图 3 所示。可以发现:管道顶部中央与加载载荷处为压缩负应变的极大值,沿管道轴线向两支撑端延伸的应变中段变化幅度较大,从中央段至支撑端应变逐渐趋近于

0;支吊架结构管道底部中段产生正拉伸应变,管道两支吊架支撑点之间中点的正应变最大,向管道两端支撑点延伸方向的应变逐渐变小,接近端点时为 0,至支撑点时应变继续减小变为负应变,原因是管道底部两侧有支撑单元面,受支撑力影响产生了压缩负应变;支吊架结构管道两支吊架之间的管道侧面中线沿轴方向

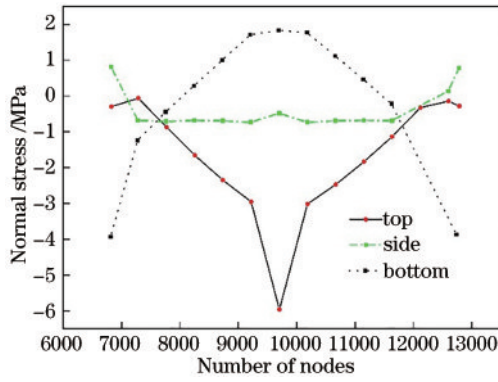


图3 管道不同方位的应变曲线( $F=100\text{ N}$ )

Fig. 3 Strain curve of different orientations of the pipeline ( $F=100\text{ N}$ )

向的应变基本不变,支撑点附近因支撑单元作用呈现正应变。总的来看,模拟管道顶部、侧部和底部的应变分布均呈现以中点为中心的左右对称分布。

### 3 分布式光纤布里渊散射应变的测量

油气管道应变分布光纤布里渊散射传感是将传感光纤沿轴向直线排布于模拟管道顶部、底部和侧部,通过粘贴传感器将管道外表面应变传递至传感光纤,通过BOTDA监测外力作用下光纤布里渊频移随载荷的变化,进而实现油气管道外表面应变分布的实时在线监测。

#### 3.1 光纤布里渊散射应变的测量原理

在BOTDA技术中,光纤两端激光器在计算机控制下分别输入泵浦激光和探测激光。当泵浦光与探测光的频差与光纤中某区域的布里渊频移相等时,该区域就会产生布里渊放大效应,两光束之间发生能量转移<sup>[1]</sup>。布里渊频移<sup>[14-15]</sup>可表示为

$$\nu_B = 2nV_a/\lambda_0, \quad (1)$$

式中: $\nu_B$ 为布里渊频移; $n$ 为光纤纤芯折射率; $V_a$ 为光纤中的声速; $\lambda_0$ 为入射光在真空中的波长。对于硅玻璃光纤: $n=1.46$ ,  $V_a=5\,945\text{ m/s}$ , 泵浦光波长 $\lambda_0=1\,550\text{ nm}$ 时, $\nu_B=11.2\text{ GHz}$ 。布里渊频移 $\nu_B$ 与光纤中的声速 $V_a$ 有关,而声速受光纤材料热光特性和弹光特性的影响,因此光纤中的温度和应变变化都会引起布里渊频移的变化。光纤中的声速可表示为

$$V_a = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}, \quad (2)$$

式中: $E$ 为材料的杨氏弹性模量; $k$ 为材料的泊松比; $\rho$ 为材料的密度。将式(2)代入式(1),得到

$$\nu_B = \frac{2n}{\lambda_0} \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}. \quad (3)$$

由于 $n$ 、 $E$ 、 $k$ 、 $\rho$ 是温度和应变的函数,当光纤的温度、应变发生变化时,布里渊频移 $\nu_B$ 也会发生改变,从而实现温度、应变的测量。背向布里渊散射模型<sup>[3]</sup>

可表示为

$$\nu_B = \nu_{B0} + C_T\Delta T + C_\epsilon\Delta\epsilon, \quad (4)$$

式中, $C_T$ 和 $C_\epsilon$ 分别为布里渊频移量随温度和应变变化的系数。若温度恒定,应变发生变化,弹光效应会引起光纤折射率的变化。假设参考温度为室温( $T_r=20\text{ }^\circ\text{C}$ ),则布里渊频移随应变的变化关系为

$$\Delta\nu_B = C_\epsilon\Delta\epsilon, \quad (5)$$

式中, $C_\epsilon=(0.0483\pm 0.0004)\text{ MHz}/\mu\epsilon$ 为布里渊频移的应变系数。可以发现,温度保持不变时,布里渊频移的变化量与应变成线性关系。当光波长为 $1550\text{ nm}$ 时,单模普通石英光纤在常温及无应变情况下的布里渊频移为 $11.2\text{ GHz}$ ,即应变每变化 $1\text{ }\mu\epsilon$ 引起的布里渊频移变化约为 $(0.0483\pm 0.0004)\text{ MHz}$ 。

#### 3.2 分布式光纤布里渊散射油气管道应变分布的实验研究

实验使用瑞士Omnisens公司的DiTeSt STA-R系列BOTDA,最大检测距离为 $50\text{ km}$ ,应变测量分辨率为 $20\text{ }\mu\epsilon$ 。激光器发出的激光脉冲宽度为 $10\text{ ns}$ ,扫描频率为 $2\text{ MHz}$ ,定位精度为 $0.2\text{ m}$ 。在距离输入端 $2\text{ m}$ 的位置接入分布式传感光纤,在 $4\text{ m}$ 长的模拟油气管道轴向直线型排布光纤,以管道两端和管道中央为中心分别粘贴长度为 $1.0\text{ m}$ 的传感光纤,采用环形悬吊方式给管道模拟施加载荷,在室温 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下,用BOTDA扫描并记录数据。

##### 3.2.1 模拟管道材料弹性蠕变特性的实验研究

在管道底部中央部分粘贴长度为 $3\text{ m}$ 的传感光纤,分别测量了 $1\text{ min}$ 内载荷为 $0$ 、 $5$ 、 $10$ 、 $15\text{ kg}$ 增重和减重过程中光纤布里渊背向散射的频率响应情况,并测试了模拟管道材料的弹性蠕变特性,结果如图4所示。

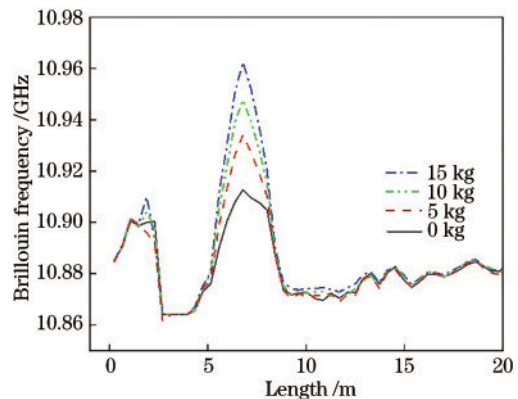


图4 BOTDA测量的光纤布里渊散射频率

Fig. 4 Fiber Brillouin scattering frequency measured by BOTDA

图5为 $1\text{ min}$ 内载荷在 $0\sim 15\text{ kg}$ 范围内每 $5\text{ kg}$ 增重或减重时粘贴在管道底部长度为 $3\text{ m}$ 传感光纤的布里渊散射频率响应曲线。可以发现,载荷减重过程中光纤的布里渊频率高于加载过程对应载荷下的布里渊散射频率。原因是管道在载荷作用下被拉伸后减少载荷

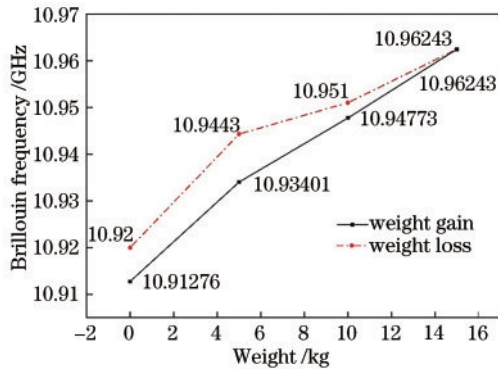


图 5 1 min 内载荷增重减重的光纤布里渊散射频率响应曲线  
Fig. 5 Optical fiber Brillouin scattering frequency response curve for weight gain and weight loss within 1 min

表面应变不能马上恢复,管道材料具有弛豫应变。为了得到稳定准确的管道应变分布,实验中每次增加或减小载荷后均需静待 10 min 以上,待管道材料力学性能稳定后再进行数据采集,以保证测量数据的精准性。

### 3.2.2 模拟油气管道中央粘贴传感裸光纤的实验结果

以模拟油气管道中点为中心粘贴长度为 1.0 m 的传感裸光纤,通过在管道中央环向悬吊重物的方式竖直向下施加 0、5、10、15 kg 静态持续载荷,用 BOTDA 监测粘贴于模拟管道中央部分顶部、侧部、底部传感光纤中布里渊散射频率随载荷变化的响应情况,结果如图 6 所示。可以发现:模拟管道中央顶部轴线方向传感光纤中布里渊散射频率随载荷增加而红移,布里渊散射频率随载荷响应的拟合曲线斜率为 1,线性度为 0.9902,这表明管道顶部为压缩应变,即管道应变随载荷增加线性增大,应变-载荷响应灵敏度为  $20.7 \mu\epsilon/\text{kg}$ ;继续增大载荷至 20、25 kg 后发现,管道顶部压缩应变线性度逐渐变差并达到饱和,原因是载荷超过了材料的弹性形变范围,因此将测量数据作为坏值从数据拟合中剔除;模拟管道中央底部传感光纤中布里渊散射频率随载荷增加而蓝移,布里渊散射频率

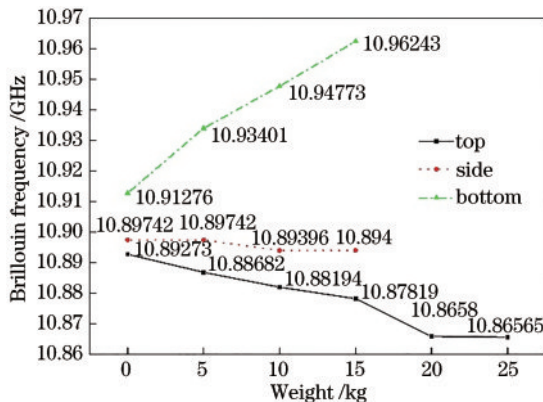


图 6 光纤布里渊散射频率随载荷的变化曲线(1.0 m 光纤在管道中央)  
Fig. 6 Variation curve of fiber Brillouin scattering frequency with load (1.0 m fiber in the center of pipeline)

随载荷响应的拟合曲线斜率为 3.3,线性度为 0.9995,这表明管道底部为拉伸应变,管道应变随载荷增加而线性增大,应变-载荷响应灵敏度为  $68.3 \mu\epsilon/\text{kg}$ ;模拟管道中央侧部中线轴线方向传感光纤中布里渊散射频率几乎不随载荷增加而变化,这表明管道侧部不受外界载荷变化影响,应变-载荷响应灵敏度接近  $0 \mu\epsilon/\text{kg}$ 。此外,管道底部的应变-载荷响应灵敏度( $68.3 \mu\epsilon/\text{kg}$ )为顶部应变-载荷响应灵敏度( $20.7 \mu\epsilon/\text{kg}$ )的 3.3 倍。

### 3.2.3 模拟油气管道两端粘贴传感裸光纤的实验结果

在模拟管道左右两支撑端分别粘贴长度为 1.0 m 传感裸光纤,通过在管道中央环向悬吊重物的方式竖直向下施加 0、5、10、15 kg 的静态持续载荷,用 BOTDA 监测粘贴于模拟管道两支撑端顶部、底部、侧部传感光纤中布里渊散射频率随载荷变化的响应情况(左端标记为 peak 1,右端标记为 peak 2),结果如图 7 所示。可以发现:拟管道两支撑端附近顶部传感光纤中布里渊散射频率随载荷增加而红移,布里渊散射频率随载荷响应的拟合曲线斜率均为 0.6,线性度为 0.9978,这表明管道顶部为压缩负应变且随载荷增加而线性增大,应变-载荷响应灵敏度为  $12.4 \mu\epsilon/\text{kg}$ ;底部传感光纤中布里渊散射频率随载荷增加而蓝移,布里渊散射频率随载荷响应的拟合曲线斜率均为 0.6,线性度为 0.9848,这表明管道底部为拉伸正应变且随载荷增加而线性增大,应变-载荷响应灵敏度为  $12.4 \mu\epsilon/\text{kg}$ ;模拟管道侧部中线延轴线方向传感光纤中布里渊散射频率几乎不随载荷增加而变化,这表明管道侧部不受外界载荷变化影响。此外,管道中段底部的应变-载荷响应灵敏度( $68.3 \mu\epsilon/\text{kg}$ )为支撑端顶部和底部应变-载荷响应灵敏度( $12.4 \mu\epsilon/\text{kg}$ )的 5.5 倍。

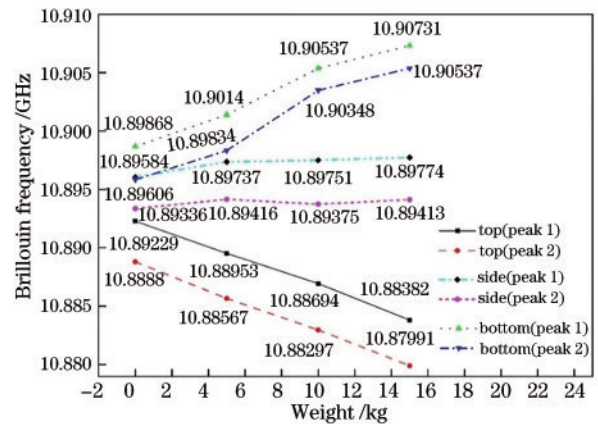


图 7 光纤布里渊散射频率随载荷的变化曲线(1.0 m 光纤分别在管道两端)  
Fig. 7 Variation curve of fiber Brillouin scattering frequency with load (1.0 m fiber at both ends of pipeline)

综上所述,模拟油气管道中央段和两支撑端顶部为压缩负应变、底部为拉伸正应变,均呈左右对称分布,其轴向应变随静态载荷的变化线性变化,且油气管

道中段底部的应变灵敏度为顶部的 3.3 倍,为支撑端顶部和底部的 5.5 倍。管道侧部应变沿轴线中央段和支撑端均为 0 且不随载荷变化而变化,实验与仿真结论一致。

## 4 结 论

通过对吊支架结构模拟油气管道环向施加静态载荷构建模型,在保持载荷不变情况下,采用有限元仿真得到管道外表面顶部、底部和侧部应变分布曲线。通过在模拟管道中心环向加载竖直向下载荷,采用 BOTDA 检测粘贴在管道上传感光纤的布里渊散射频率。结果表明,油气管道中段底部的应变灵敏度为顶部的 3.3 倍,为支撑端顶部和底部的 5.5 倍。基于该油气管道分布式光纤优化排布方案,采用沿管道底部轴向直线铺设传感光纤能获得更高的应变传感灵敏度,根据实际管道参数设定油气管道形变极限的阈值可设置安全预警,根据测量信息变化实现长距离油气管道及油库、油罐车罐体等场所的长期完整性动态应变检测以及长距离油气管道应变变化的米量级空间定位,这对保障油气运输管道的安全生产运营具有重大经济价值和社会意义。

## 参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 三版. 北京: 电子工业出版社, 2002: 222-240.  
Agrawal G P. Applications of nonlinear fiber optics[J]. 3rd ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2002: 222-240.
- [2] 蔡永军, 杨士梅, 李妍, 等. 基于光纤传感的管道线路复杂状态监测技术[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 434-440.  
Cai Y J, Yang S M, Li Y, et al. Monitoring technology for complex state of pipeline route based on optical fiber sensing[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 434-440.
- [3] Zaoui W S, Lauber T, Pohl C, et al. Machine-learning distributed-temperature-sensing-based pipeline leak detection [C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, November 9-12, 2020, Abu Dhabi, UAE. Richardson: SPE, 2020.
- [4] 蒋朋, 闫连山, 周银, 等. 格雷编码布里渊光时域分析传感器中偏振随机噪声影响及其抑制方法[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0706002.  
Jiang P, Yan L S, Zhou Y, et al. Effect and elimination of polarization random noise in Golay-coded Brillouin optical time domain analysis fiber sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0706002.
- [5] 蔡威斌, 张家洪, 赵振刚. 基于双对称受激布里渊散射效应的瞬时微波频率测量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0906001.  
Cai Q B, Zhang J H, Zhao Z G. Measurement and analysis of instantaneous microwave frequency based on bisymmetric stimulated Brillouin scattering effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0906001.
- [6] 田鑫, 王蒙, 王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006002.  
Tian X, Wang M, Wang Z F. Stimulated Brillouin scattering filters based on tilted fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1006002.
- [7] 陈浩, 徐阳, 钱森, 等. 分布式光纤超声传感器用于检测电缆接头放电故障[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0306001.  
Chen H, Xu Y, Qian S, et al. Distributed fiber-optic ultrasonic sensor applied in detection of discharging fault of power cable joint[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306001.
- [8] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.  
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [9] Wu Q, Nair S, van Oort E, et al. Concurrent real-time distributed fiber optic sensing of casing deformation and cement integrity loss[C]//The SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, March 5-7, 2019, The Hague, The Netherlands. Richardson: SPE, 2019.
- [10] 宋牟平, 赵斌, 章献民. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1053-1056.  
Song M P, Zhao B, Zhang X M. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptic modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1053-1056.
- [11] 杨馥, 陈唐嘉利, 陆彦宇, 等. 基于布里渊散射的海水参数测量反演算法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0404001.  
Yang F, Chen T, Lu Y Y, et al. Investigation on inversion algorithm of seawater parameters measurement based on Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0404001.
- [12] Raab T, Reinsch T, Aldaz Cifuentes S R, et al. Real-time well-integrity monitoring using fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. SPE Journal, 2019, 24(5): 1997-2009.
- [13] Muanenda Y, Taki M, Pasquale F D. Long-range accelerated BOTDA sensor using adaptive linear prediction and cyclic coding[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5411-5414.
- [14] 尉婷. 基于布里渊光时域分析分布式光纤漏油传感器[J]. 光电子·激光, 2017, 28(5): 492-496.  
Wei T. Distributed optical fiber oil leakage sensor based on Brillouin optical time-domain analysis[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2017, 28(5): 492-496.
- [15] 赵雨娟, 王贺晴, 徐志钮, 等. 基于相似匹配方法的光纤布里渊频移提取准确性影响因素分析[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0506003.  
Zhao L J, Wang H Q, Xu Z N, et al. Analysis of factors affecting accuracy of Brillouin frequency shift extraction based on similarity matching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506003.