

曹丹平, 律军军, 孙上饶, 等. 基于螺旋缠绕光纤的分布式声波传感三分量信号采集机理研究[J]. 石油物探, 2022, 61(1): 60-69
CAO Danping, LV Junjun, SUN Shangrao, et al. Three-component signal acquisition mechanism of distributed acoustic sensing based on helically winding fiber-optic[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(1): 60-69

基于螺旋缠绕光纤的分布式声波传感 三分量信号采集机理研究

曹丹平^{1,2}, 律军军^{1,2}, 孙上饶^{1,2}, 马国旗^{1,3}, 尹教建⁴

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)山东省深层油气重点实验室, 山东青岛 266580; 3. 哈利法大学文理学院, 阿布扎比 127788; 4. 中国石油大学(华东)理学院, 山东青岛 266580)

摘要: 常规分布式光纤声波传感(DAS)技术利用光纤对轴向应变敏感的特点开展单分量信号采集, 在开展三分量振动信号采集时, 通常需要对光纤进行螺旋缠绕布置。在采用不同的角度进行缠绕时, 光纤的轴向位置必然不同, 导致光纤对 X, Y, Z 3 个方向的振动信号具有不同的敏感性。针对上述问题, 通过建立单根螺旋缠绕光纤的数学模型, 确定了光纤轴向应变的影响因素, 推导了螺旋光纤轴向应变与光纤所在位置处 3 个方向真实应变之间的数学映射关系, 定量分析了不同缠绕角度、不同旋转角度条件下三分量振动信号对光纤轴向应变的影响, 并采用波动方程模拟的三分量数字信号对螺旋光纤轴向应变所接收到的等效信号进行了验证。分析结果表明, 螺旋光纤在轴向方向上采集到的信号强度取决于 X, Y, Z 三分量信号自身的强度、光纤缠绕角度以及缠绕过程中光纤各点的相对空间位置, 随着缠绕角度的增大, 螺旋光纤对沿缠绕轴方向的地震波信号敏感性增强, 对垂直于缠绕轴方向的信号敏感性减弱, 垂直于缠绕轴方向的两个分量地震波信号在数值上呈现出周期性和互补性变化规律, 为利用螺旋缠绕光纤开展分布式声波传感三分量振动信号的采集提供了理论基础。

关键词: 分布式光纤声波传感; 三分量振动信号; 螺旋缠绕光纤; 轴向应变; 缠绕角度

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2022)01-0060-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2022.01.006

Three-component signal acquisition mechanism of distributed acoustic sensing based on helically winding fiber-optic

CAO Danping^{1,2}, LV Junjun^{1,2}, SUN Shangrao^{1,2}, MA Guoqi^{1,3}, YIN Jiaojian⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Deep Oil & Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. College of Art and Sciences, Khalifa University, Abu Dhabi 127788, the United Arab Emirates; 4. College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Conventional distributed acoustic sensing (DAS) technology takes advantage of the sensitivity of optical fibers to axial strain to carry out single-component signal acquisition. When carrying out three-component vibration signal acquisition, a helical winding arrangement of the optical fiber is usually required. However, when different angles are used for winding, the axial position of the optical fiber is bound to be different, which leads to different sensitivities of the optical fiber to vibration signals in the three

收稿日期: 2021-10-18。

第一作者简介: 曹丹平(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事分布式声波传感、人工智能、地震反演和岩石物理等方法在油气储层地球物理领域的研究与应用工作。Email: caodp@upc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42074162, 41774137)资助。

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42074162, 41774137).

directions (X, Y, Z). In view of this issue, a mathematical model of a helically winding optical fiber was established to determine the factors affecting the axial strain of the fiber, and the mathematical mapping relationship between the axial strain of the helical optical fiber and the true strain in the three directions at the location of the optical fiber was derived. Then, the influence of the three-component vibration signal on the axial strain of the optical fiber was quantitatively analyzed under the conditions of different winding angles and rotation angles, and the equivalent signal received by the axial strain of the spiral optical fiber was verified by the three-component digital signal simulated by the wave equation. The results of the analysis showed that the strength of the three-component signal collected in the axial direction of the helical optical fiber depends on the actual strength of the X, Y , and Z three-component signals, the winding angle, and the relative spatial position of the fiber during the winding process. As the winding angle increases, the sensitivity of the helical optical fiber to the seismic wave signal along the winding axis increases, and the sensitivity to the signal perpendicular to the winding axis decreases. The two-component seismic wave signals perpendicular to the winding axis appear numerically cyclical and complementary, providing a theoretical basis for the acquisition of the three-component vibration signal of a distributed acoustic sensor by using a helically winding optical fiber.

Keywords: distributed acoustic sensing, three-component vibration signal, helical winding optical fiber, axial strain, winding angle

分布式光纤声波传感(DAS)技术是一种以光纤本身作为传感器,基于光的瑞利散射实现振动信号采集的新型光纤传感技术,具有成本低、测量精度高、不易受电磁干扰和安装简便等优点^[1]。相比于常规单点式和准分布式传感器,DAS 更适合用于长距离或时间及空间分辨率要求较高的应用场景,并在石油勘探、管道泄漏监测以及边防安全监测等方面被广泛应用。

近年来,研究人员致力于用 DAS 替代常规检波器进行微地震监测、浅地表地震勘探以及井中地震勘探等,并在基础理论、采集、处理和解释等领域取得了长足的进步^[2-8]。但分布式声波传感的原理决定了 DAS 对光纤轴向应变敏感,而对径向应变不敏感,即直光纤 DAS 只能采集到沿光纤轴向方向的单分量振动信号^[9-10]。随着地震勘探技术的进步,油气工业对三分量地震信号的采集需求越来越高,直光纤 DAS 只能采集单分量信号的特点,无法满足油气地球物理行业的地震资料采集需求。根据 DAS 光纤对轴向振动敏感的特点,如果将光纤的轴向方向分别调整到振动所在位置处的观测坐标系 X, Y, Z 3 个正交方向,即可获得对应位置处的三分量振动信号,也就是光纤检波器的原理^[11],但光纤检波器属于传统的单点探测,缺乏分布式传感技术能够开展连续采集的优势。受光纤检波器和分布式声传感技术的启发,在实际应用中,可以通过对光纤进行缠绕布置获得更加丰富的光纤轴向方向组合,即螺旋缠绕分布式光纤声波传感(HWC-DAS),从而在确保获得 X, Y, Z 3 个方向振动信号的同时实现信息的连续采集。

HWC-DAS 技术增强了 DAS 对不同方向分量

振动信号的敏感性,可以采集到多分量振动信号,实现了对直光纤 DAS 技术的拓展,并推动了 DAS 技术在多分量地震勘探中的应用。在螺旋缠绕光纤多分量信号采集的基础理论研究方面,KUVSHINOV^[12]对比了 HWC-DAS 中的光纤缠绕形状对 DAS 响应的影响,并分析了光纤与井壁在完全耦合或不耦合情况下体波、面波对 DAS 的角度敏感特征。NING 等^[13-14]先后提出利用沿单根和多根光纤测量的 6 个应变投影重建全应变张量的多分量 DAS 数据重构方法,讨论了不同标距长度对多分量应变信息恢复的影响,并通过数值模拟验证了该方法的有效性。INNANEN^[15-16]在应变张量估计的背景下,提出一种沿任意弯曲的缠绕轴缠绕的螺旋光纤模型,并讨论了在多分量应变张量重建过程中标距长度和重建间隔对 P 波和 S 波信号重建的影响,该模型也被用于地震弹性波的正、反演^[17-20]。WUESTEFELD 等^[21]在复杂速度模型中使用精确的射线追踪方法确定入射角,并进一步讨论了介质物性和 DAS 光缆包裹材料与最佳缠绕角之间的关系。

同时,在利用螺旋光纤开展多分量振动信号的采集与应用方面也得到了快速发展。KARRENBACH 等^[22]进行了井中三分量 DAS 数据的采集,并与常规三分量采集的数据进行了对比,表明了多分量 DAS 技术的应用潜力。HORNMAN 等^[23-24]利用螺旋缠绕光纤进行地震波数据采集,研究了 HWC-DAS 的角度敏感性,同时,对比了垂直分量检波器、HWC-DAS 以及直光纤 DAS 采集的实际数据之间的差异,表明 HWC-DAS 对纵横波和面波均有较高的敏感性。在实际应用中,DAS 采集的是应变数据,与常规

动圈式或压电式检波器采集的数据既有联系也有差异,在地震资料处理过程中,为了实现同类型地震数据对比分析,可以将 DAS 采集到的应变信号或应变率信号转变为速度信号^[7,19]或加速度信号。YURIKOV 等^[25]利用 HWC-DAS 对地震频带内的岩石物理属性进行测量,实验结果与传统仪器的测量结果吻合度较高,表明了 DAS 在岩石物理实验中的巨大潜力。陈亚峰等^[26]采用螺旋缠绕光纤技术研究了热力管道泄漏监测系统,表明螺旋缠绕光纤技术有助于提高管线泄漏定位精度,具有良好的检测效果。

光纤的轴向敏感性导致光纤对不同类型的地震波具有不同的响应机理,从地震波的传播特征出发研究地震波入射角、速度特征和介质物性对光纤轴向应变的影响有助于更好地理解 DAS 在地震资料采集中的作用^[12,27-29]。由于纵波和横波耦合在一起,在常规三维地震勘探中,采集到的是 X, Y, Z 3 个相互正交的振动信号,需要通过对 3 个分量信号进行处理间接获得纵横波信息,因此,讨论螺旋光纤轴向应变与 X, Y, Z 三分量振动信号之间的关系有助于更好地与常规检波器采集到的资料进行对比。螺旋光纤采集到的振动信号相当于实际 X, Y, Z 3 个方向的振动信号在光纤轴向方向上的投影,厘清光纤采集信号与实际三分量振动信号之间的理论关系对分布式光纤三分量地震信号采集具有重要的理论意义和指导作用。

本文聚焦光纤缠绕方式与三分量振动信号之间的关系开展基础研究,在假设螺旋光纤与缠绕轴完全耦合的前提下,首先,推导了螺旋缠绕光纤轴向应变与三分量振动信号之间的映射关系。然后,分析了不同条件下三分量振动信号对光纤轴向应变的影响。最后,采用波动方程模拟的三分量数字信号对螺旋光纤轴向应变所接收到的等效信号进行验证,并进行敏感性分析。

1 螺旋缠绕光纤三分量信号采集理论模型

1.1 螺旋缠绕光纤轴向应变的影响因素

由于光纤只对轴向应变敏感,在研究螺旋缠绕光纤三分量信号采集机理时,需要首先明确光纤缠绕后轴向应变的影响因素。为此,建立了如图 1 所示的 DAS 螺旋光纤缠绕几何模型,图 1a 为单根光纤缠绕轴按照一定角度规则缠绕时,在一个周期内的轨迹

示意,图 1b 为图 1a 在平面上的展开。其中, OO' 表示缠绕轴; A 点表示缠绕起始点, A' 点表示缠绕结束点, AA' 构成一个缠绕周期; P 点表示光纤在该缠绕周期内的任意点; r 表示缠绕轴半径(缠绕轴半径通常为常数); e_x, e_y, e_z 分别表示光纤所在位置处由地震波振动引起的 X, Y, Z 3 个分量应变; e_z^f 表示 P 点处螺旋光纤的轴向应变; e_z^c 表示 P 点处的沿缠绕轴方向的应变; e_c^c 表示 P 点处的沿缠绕轴圆周切向方向的应变; α 表示光纤缠绕角,即 A 点处光纤轴向方向与沿圆周切线方向的夹角,相当于与 e_x 方向的夹角; θ 表示从 A 点缠绕至 P 点的过程中,局部坐标系投影在缠绕轴底面的旋转角度(简称旋转角)。 L 代表从 A 点缠绕至 A' 点的实际光纤长度; H 表示光纤从 A 点缠绕至 A' 点对应的缠绕轴高度; C 表示缠绕轴底面圆周周长; l 表示从 A 点缠绕至 P 点的实际光纤长度; h 表示光纤从 A 点缠绕至 P 点对应的缠绕轴高度; c 表示从 A 点缠绕至 P 点对应的缠绕轴底面圆周的弧长。

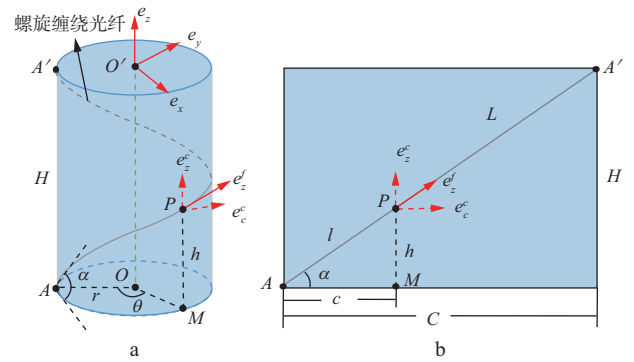


图 1 DAS 螺旋光纤缠绕几何模型

a 单根光纤缠绕轴在一个周期内的轨迹示意; b 螺旋光纤结构平面展开

根据图 1b 所示几何关系,可以得到:

$$L^2 = C^2 + H^2 \quad (1)$$

对公式两边同时进行微分得到:

$$2L \cdot dL = 2C \cdot dC + 2H \cdot dH \quad (2)$$

即

$$L \cdot \Delta L = C \cdot \Delta C + H \cdot \Delta H \quad (3)$$

等式两边同时除以 L^2 , 整理可得:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{C^2}{L^2} \frac{\Delta C}{C} + \frac{H^2}{L^2} \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta C}{C} \cos^2 \alpha + \frac{\Delta H}{H} \sin^2 \alpha \quad (4)$$

由于缠绕轴圆周周长 $C = 2\pi r$, $\Delta C/C = \Delta r/r$, 所以公

式(4)可以表示为:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta r}{r} \cos^2 \alpha + \frac{\Delta H}{H} \sin^2 \alpha \quad (5)$$

为了讨论方便,在完全各向同性介质中,可以采用从 A 点缠绕至 A' 点的整体应变来代表 P 点处的应变,即:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta L}{L} &= e_z^f \\ \frac{\Delta r}{r} &= e_z^c \\ \frac{\Delta h}{h} &= e_z^c \end{aligned} \quad (6)$$

此时,螺旋光纤的轴向应变可表示为:

$$e_z^f = e_z^c \cos^2 \alpha + e_z^c \sin^2 \alpha \quad (7)$$

当螺旋缠绕光纤与周围介质完全耦合时,有 $e_z^c = e_z$, 公式(7)可进一步简化为:

$$e_z^f = e_z^c \cos^2 \alpha + e_z^c \sin^2 \alpha \quad (8)$$

式中: $\alpha \in (0, 90^\circ)$, e_z^c 的值取决于 e_x 和 e_y 的值。

由公式(8)可定性获得螺旋光纤轴向应变与真实地震波振动引起的实际三分量应变之间的关系,即当光纤缠绕角度 α 为固定值时, $e_z \sin^2 \alpha$ 为定值,也就是说当 DAS 光纤以固定角度均匀绕轴缠绕时,螺旋光纤采集到的轴向应变中 e_z 分量的绝对数值始终保持不变,而该分量在最终采集到的轴向应变总数值中所占比重则随着光纤缠绕角度的变化而变化;当光纤缠绕角度 α 增大时, $\cos^2 \alpha$ 的值逐渐减小, $\sin^2 \alpha$ 的值逐渐增大,螺旋缠绕光纤采集到的轴向应变信号中 e_z 分量的占比增大,而 e_x 和 e_y 分量的占比则减小;即缠绕角越大, e_z 分量对螺旋缠绕光纤最终采集到的轴向应变信号影响越大,缠绕角越小时,则 e_x 和 e_y 分量对螺旋缠绕光纤最终采集到的轴向应变信号影响越大。

从图 1 中还可以看出,在一个缠绕周期内,光纤接收到的轴向应变还与光纤所在的空间位置有关。由于缠绕角 α 可以由 h, l 和 c 中的任意两个参数确定,也可以将螺旋缠绕光纤看作三维空间坐标系中由 h, r 和 θ 3 个参数决定的螺旋曲线 $X(h, r, \alpha)$, 表示为:

$$X(h, r, \alpha) = (h, r \cos \theta, r \sin \theta) \quad (9)$$

式中: θ 为旋转角,该参数与 h, r 和 α 有关。

光纤在绕轴缠绕前行的过程中导致旋转角产生周期性的规律变化,为了探究 θ 与 h, r 和 α 之间的具

体关系,由图 1 中一个缠绕周期内光纤上任意点 P 的位置可知:

$$\begin{aligned} \widehat{AP} &= |AP| = l \\ |PM| &= h \\ |AM| &= c \end{aligned} \quad (10)$$

根据图 1a 几何关系可知 $\widehat{AM}$ 与 r 和 θ 之间的关系:

$$\widehat{AM} = r \cdot \theta \quad (11)$$

由于图 1b 为图 1a 的平面展开,因此有:

$$|AM| = \widehat{AM} \quad (12)$$

根据图 1b 中几何关系有:

$$\begin{aligned} |AM| &= |AP| \cos \alpha \\ |PM| &= |AP| \sin \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

整理得:

$$\begin{aligned} r\theta &= l \cdot \cos \alpha \\ h &= l \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (14)$$

公式(14)中的旋转角 θ 可以表示为:

$$\theta = \frac{h}{r \tan \alpha} \quad (15)$$

将公式(15)带入公式(9),可以得到由 h, r 和 α 表示的螺旋缠绕光纤上任意点的三维空间位置关系公式:

$$X(h, r, \alpha) = \left[h, r \cos \left(\frac{h}{r \tan \alpha} \right), r \sin \left(\frac{h}{r \tan \alpha} \right) \right] \quad (16)$$

式中: $\alpha \in (0, 90^\circ)$ 。

由公式(16)可知,螺旋光纤缠绕后任意点 P 的位置可以由缠绕轴半径 r 、光纤缠绕角 α 和该点对应的缠绕轴高度 h 唯一确定,当然,缠绕轴高度 h 也可以用该点的光纤缠绕长度 l 代表,两个参数可以通过缠绕角直接转换,由于在每一个缠绕周期内缠绕角都是从 0 逐步增加到 2π ,因此后续的讨论将在一个周期范围内开展。

1.2 螺旋光纤轴向应变与三分量振动的映射关系

为了探究螺旋光纤轴向应变与三分量振动之间的映射关系,根据 DAS 螺旋缠绕光纤示意(图 1),建立了如图 2a 所示的 DAS 螺旋缠绕光纤局部坐标系相对关系示意,图 2b 为光纤从 A 点缠绕到任意点 P 时所对应旋转角 θ 的示意。为了方便对比,在图中标注了 A, A₁, A₂, A₃, A' 等 5 个特殊点,这 5 个点分别表示旋转角 θ 为 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 和 2π 时所对应光纤上的点,通过这 5 个点有助于更加清晰地呈现光纤轴向应

变在一个缠绕周期内的变化规律。首先定义地震波振动引起的实际三分量应变 e_x, e_y, e_z 所在方向分别代表全局坐标系 $A-xyz$ 中 x 轴、 y 轴和 z 轴的坐标方向。考虑到光纤对轴向应变敏感,为了便于讨论,沿光纤的轴向方向来定义局部坐标系, $A-l_A m_A n_A$ 表示螺旋光纤上 A 点的局部坐标系, $P-lmn$ 表示螺旋光纤上 P 点的局部坐标系。其中, n_A 和 n 方向始终沿着光纤的轴向方向。

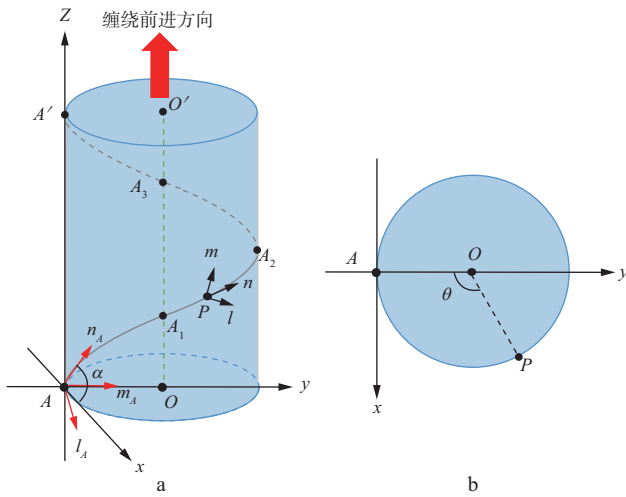


图 2 DAS 螺旋光纤坐标系相对关系示意(a)和 P 点所对应的缠绕角 θ 示意(b)

光纤上 P 点处的局部坐标系 $P-lmn$ 可以看作是全局坐标系 $A-xyz$ 通过坐标系旋转得到的。整个坐标旋转的过程可以分解为两步:①先沿着 y 轴正方向,将全局坐标系 $A-xyz$ 的 $A-xz$ 平面绕 y 轴顺时针旋转 $\pi/2 - \alpha$,获得缠绕光纤在 A 点处的局部坐标系 $A-l_A m_A n_A$;②再沿着 z 轴正方向,将坐标系 $A-l_A m_A n_A$ 绕 z 轴顺时针旋转 θ ,即可获得 P 点处的局部坐标系 $P-lmn$ 。

由于光纤对轴向应变敏感,因此,螺旋光纤上任意点处所测得的轴向应变实际上是地震波振动引起的 X, Y, Z 三分量应变在螺旋光纤所在点的轴向方向上的投影。根据本文定义,由地震波振动引起的实际三分量应变的方向和光纤轴向应变的方向分别为全局坐标系中 3 个坐标轴的方向和局部坐标系中 n 轴的方向,因此,求解该投影关系的关键在于准确确定局部坐标系中的 n 轴与全局坐标系中 x 轴、 y 轴和 z 轴之间的位置关系(图 3)。

图 3a 展示了图 2a 中光纤轨迹上任意点所处局部坐标系中 n 轴绕 z 轴旋转的轨迹,其中 A, A_1, A_2

和 A_3 分别表示旋转角 θ 为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 时, n 轴所处位置点,根据图 3 中标注的关系可知, AA_2 平行于 x 轴, A_1A_3 平行于 y 轴, n_A 表示螺旋光纤缠绕起点 A 的轴向方向, n 表示螺旋光纤上任意点 P 的轴向方向,红实线箭头表示局部坐标系中 n 轴绕 z 轴旋转的运动方向;图 3b 中 θ_{nx}, θ_{ny} 和 θ_{nz} 分别表示局部坐标系中的 n 轴分别与全局坐标系中的 x 轴、 y 轴和 z 轴之间的夹角。

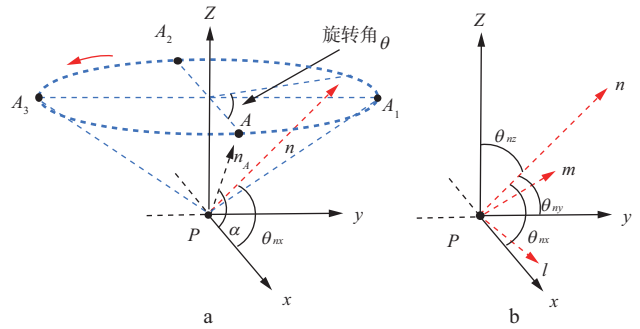


图 3 局部坐标系中 n 轴绕 z 轴旋转轨迹示意(a)和 n 轴与全局坐标系坐标轴之间的夹角关系(b)

由图 3a 中局部坐标系中 n 轴绕 z 轴的旋转轨迹可知,局部坐标系中的 n 轴与全局坐标系 z 轴的夹角 θ_{nz} 不随旋转角 θ 的变化而变化,且仅与光纤的缠绕角有关,即

$$\theta_{nz} = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (17)$$

在局部坐标系 n 轴绕 z 轴旋转的同时, n 轴分别与 x 轴和 y 轴的夹角 θ_{nx} 和 θ_{ny} 随着旋转角 θ 以正弦(余弦)规律呈现出连续的均匀变化趋势,为了建立该变化规律,表 1 列出了光纤中任意点 P 缠绕至 A, A_1, A_2, A_3 和 A' 点时,旋转角 θ 和夹角 θ_{nx} 之间的对应关系。

根据表 1 呈现出的规律性角度关系,可以采用三

表 1 螺旋光纤旋转 θ 后旋转角与 θ_{nx} 之间的角度对应关系

位置点	θ	θ_{nx}
A	0	α
A_1	$\pi/2$	$\pi/2$
A_2	π	$\pi - \alpha$
A_3	$3\pi/2$	$\pi/2$
A'	2π	α

角函数重建出如下的 θ_{nx} 随缠绕角 α 和旋转角 θ 之间的变化关系表达式:

$$\theta_{nx} = \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \cos \theta + \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

同理可得:

$$\theta_{ny} = \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \theta + \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

将公式(15)代入公式(18)和公式(19)可得:

$$\begin{cases} \theta_{nx} = \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{h}{r \tan \alpha} \right) + \frac{\pi}{2} \\ \theta_{ny} = \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \left(\frac{h}{r \tan \alpha} \right) + \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (20)$$

在获得局部坐标系 n 轴与全局坐标系坐标轴之间的夹角之后,可以构建全局坐标系 $A-xyz$ 与局部坐标系 $P-lmn$ 之间的旋转映射关系,采用上述所得的 n 轴与 x 轴, y 轴和 z 轴之间的方位角关系,可以将坐标旋转矩阵表示为^[30]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{lx} & R_{ly} & R_{lz} \\ R_{mx} & R_{my} & R_{mz} \\ R_{nx} & R_{ny} & R_{nz} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: $R_{lx}, R_{ly}, R_{lz}, R_{mx}, R_{my}, R_{mz}, R_{nx}, R_{ny}$ 和 R_{nz} 分别表示 l 轴, m 轴, n 轴与 x 轴, y 轴和 z 轴之间的方向余弦。其中,影响光纤轴向应变的 3 个系数为:

$$\begin{aligned} R_{nx} &= \cos \theta_{nx} \\ R_{ny} &= \cos \theta_{ny} \\ R_{nz} &= \cos \theta_{nz} \end{aligned} \quad (22)$$

通过矩阵乘法,可以将全局坐标系 $A-xyz$ 与局部坐标系 $P-lmn$ 之间的映射关系表示为:

$$\begin{Bmatrix} l \\ m \\ n \end{Bmatrix} = \mathbf{R} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (23)$$

光纤上任意点的轴向应变与光纤所在位置处由地震波振动引起的实际三分量应变之间的关系可以表示为^[30-31]:

$$\mathbf{e} = \mathbf{R} \mathbf{e}_0 \mathbf{R}^T \quad (24)$$

式中: $\mathbf{e}$ 表示局部坐标系中对应的应变张量; $\mathbf{e}_0$ 表示全局坐标系中对应的应变张量; $\mathbf{R}$ 表示坐标旋转矩阵; $\mathbf{R}^T$ 表示坐标旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 的转置。

由于 DAS 测量到的螺旋光纤轴向应变来源于光纤所在位置处由地震波振动引起的实际三分量应变在该点沿光纤轴向方向上的投影,所以光纤轴向应变 e_z^f 可表示为:

$$e_z^f = \begin{bmatrix} R_{nx}^2 & R_{ny}^2 & R_{nz}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} \quad (25)$$

整理公式(25)可以得到螺旋光纤轴向应变与实际三分量应变之间的映射关系公式:

$$e_z^f = R_{nx}^2 e_x + R_{ny}^2 e_y + R_{nz}^2 e_z \quad (26)$$

公式(26)也可以简写为:

$$\mathbf{m} = \mathbf{G} \mathbf{m}_0 \quad (27)$$

式中: $\mathbf{m}$ 表示螺旋光纤轴向应变; $\mathbf{G}$ 代表由旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 得到的扩展矩阵; $\mathbf{m}_0$ 表示光纤所在位置处的实际三分量应变。

公式(27)代表了从实际三分量信号到螺旋光纤轴向应变之间的投影过程,反过来,在实际应用中就可以使用采集到的光纤轴向应变 $\mathbf{m}$ 重构光纤所在位置处的真实三分量应变 $\mathbf{m}_0$,且理论上可以通过求取最小二乘解得到:

$$\mathbf{m}_0 = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{m} \quad (28)$$

因此,在实际应用中,可以通过公式(28)来实现由螺旋光纤采集到的轴向应变重构出光纤所在位置处的实际地震波振动的三分量应变,此即利用螺旋缠绕光纤开展三分量信号恢复的理论依据。

2 螺旋缠绕光纤轴向应变对三分量应变的系数敏感性分析

螺旋缠绕光纤轴向应变来源于光纤所在位置处由地震波振动引起的实际三分量应变(e_x, e_y 和 e_z)在该点处沿光纤轴向方向上的投影,且该投影关系满足公式(26),每一个应变分量在螺旋光纤采集到的轴向应变中所占的比重取决于 3 个分量所对应的系数($R_{nx}^2, R_{ny}^2, R_{nz}^2$)的数值,数值越大代表对应分量在光纤轴向应变中所占比重越大,表明螺旋光纤轴向应变对该应变分量具有更高的敏感性。为了考察不同缠绕角和不同旋转角下 DAS 螺旋光纤对实际三分量应变的敏感性,针对公式(26)的系数进行了数值分析。对均匀间隔的 6 个不同缠绕角度进行对比测试,其中缠绕角度分别为 $5^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 50^\circ, 65^\circ$ 和 80° ,缠绕半径为 0.02 m ,测试区间为一个缠绕周期,即 $\theta \in (0, 2\pi)$,图 4 给出了螺旋光纤采集到的轴向应变中 3 个应变分量的权重系数随缠绕角 α 和旋转角 θ 的变化趋势。

由图 4 可知,在缠绕角度 α 一定的条件下,螺旋光纤采集到的轴向应变中 e_z 分量的值始终保持不

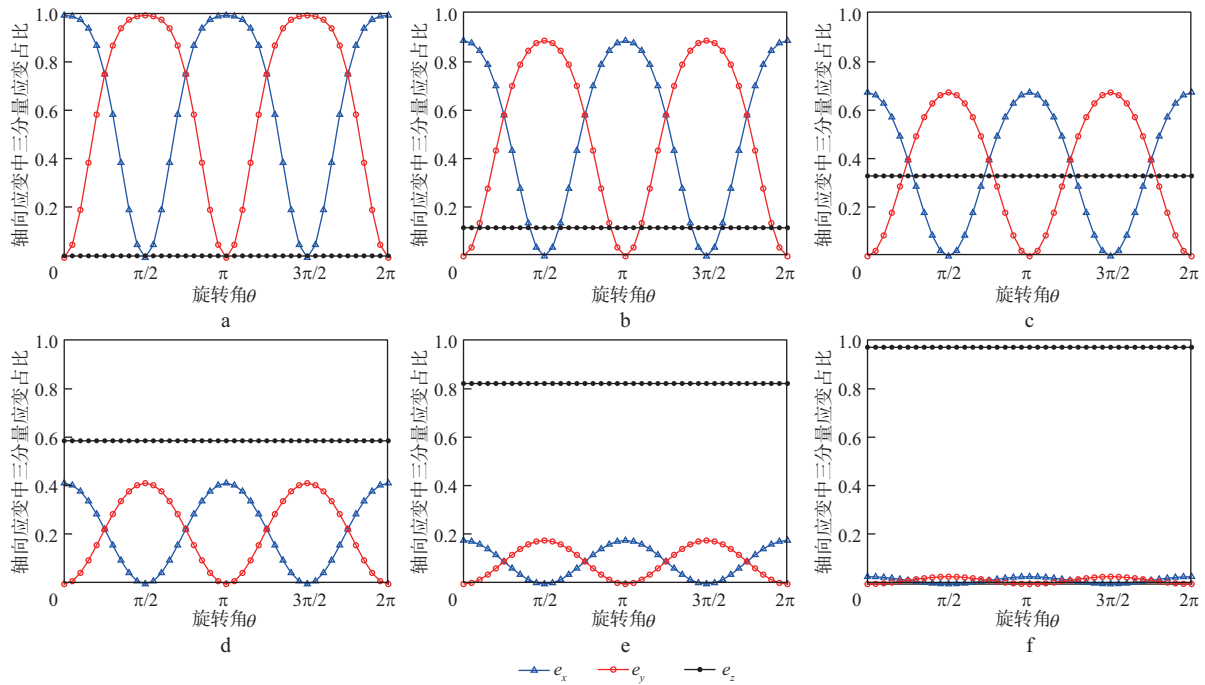


图 4 缠绕角 α 分别为 5° (a), 20° (b), 35° (c), 50° (d), 65° (e) 和 80° (f) 时, 螺旋光纤采集到的轴向应变中 e_x , e_y 和 e_z 3 个分量的比重变化趋势

变, e_x 和 e_y 分量随着旋转角度的变化分别呈余弦和正弦的周期性变化, 且无论在多大的缠绕角度下, 两个分量随旋转角度的正余弦的变化规律不会改变, 但幅度会随着缠绕角度的增大而减小。随着缠绕角度 α 增大, 螺旋光纤采集到的轴向应变中 e_z 分量的值增大, 但在一个旋转周期内的值均相同, 而 e_x 和 e_y 分量的值逐渐减小, 其值随旋转角的周期性变化规律保持不变。根据该变化规律可知, 当缠绕角度较小时, 光纤轴向应变中 e_z 分量的影响较小, 而 e_x 和 e_y 分量的影响较大, 特别是当缠绕角度为 0° 时, 光纤轴向应变中采集到的 e_z 分量为 0, 光纤轴向应变全部由 e_x 和 e_y 分量来确定, 表明此时 DAS 光纤只能采集到径向应变信息; 当缠绕角度较大时, 光纤轴向应变中 e_z 分量的影响增大, 而 e_x 和 e_y 分量的影响减小, 特别是当缠绕角度为 90° 时, 此时螺旋缠绕光纤为直光纤, 光纤轴向应变中只存在 e_z 分量, 无 e_x 和 e_y 分量。由此可见, 随着缠绕角度 α 的增大, DAS 螺旋光纤对地震波振动应变的 e_z 分量敏感性逐渐增强, 对 e_x 和 e_y 分量的敏感性逐渐减弱。

3 基于三分量振动信号的螺旋光纤轴向应变敏感性数值分析

为了进一步验证 DAS 螺旋光纤对地震波振动产

生的三分量应变的敏感性变化规律, 采用各向同性介质三维波动方程数值模拟得到的振动信号开展数值测试。为了便于对比和分析, 选择了一个相位一致但振幅存在差异的三分量信号进行对比。其中, X , Y , Z 3 个分量的振动信号如图 5a 所示, 3 个分量所对应的振幅谱如图 5b 所示。

通过将 X , Y , Z 3 个分量的振动信号投影到螺旋光纤的轴向应变方向上, 即可获得螺旋光纤轴向方向上的应变特征, 图 6a 对比了缠绕角度 α 分别为 5° , 35° 和 80° 时螺旋光纤上采集到的轴向应变, 图 6b 对比了 3 个不同缠绕角度下所采集到的信号振幅谱。

由图 6a 可知, 当缠绕角度为 5° 时, 螺旋缠绕光纤轴向应变振幅最大值明显低于 e_z 分量应变的振幅最大值, 但与 e_x 和 e_y 分量振幅最大值接近 (类似图 5a), 且在图 6b 的振幅谱也具有相同的特点, 即缠绕角较小时, 螺旋缠绕光纤轴向方向上采集到的信号主要以 X 和 Y 分量成分为主, Z 分量的影响较小。当缠绕角度增大到 35° 时, 螺旋光纤轴向方向上获得的信号幅值和振幅谱特征开始逐渐接近 e_z 分量的信号和振幅谱特征。而当缠绕角度增大到 80° 时, 螺旋光纤轴向方向上获得的信号幅值十分接近 e_z 分量的幅值, 同时在振幅谱上也具有非常明显的接近趋势, 即当缠绕角较大时, 螺旋光纤轴向方向采集到的信号

以 Z 分量信号为主。由此可见,随着缠绕角度 α 增大,螺旋光纤轴向方向采集到的信号中, Z 分量的成分逐渐增多,而 X 和 Y 分量的成分逐渐减少。

由此可见, X 和 Y 分量在缠绕角较小的时候对螺旋光纤轴向方向的应变影响较大,由于 X 和 Y 两

个分量随旋转角具有正余弦变化规律,为了进一步厘清 X 分量和 Y 分量对螺旋光纤轴向方向应变特征的影响,在小缠绕角条件下分别对两个特殊旋转角和 π 的位置开展数值测试。图 7a 展示了缠绕角度 α 为 5° ,旋转角度 θ 分别为 $\pi/2$ 和 π 时螺旋光纤轴向应变

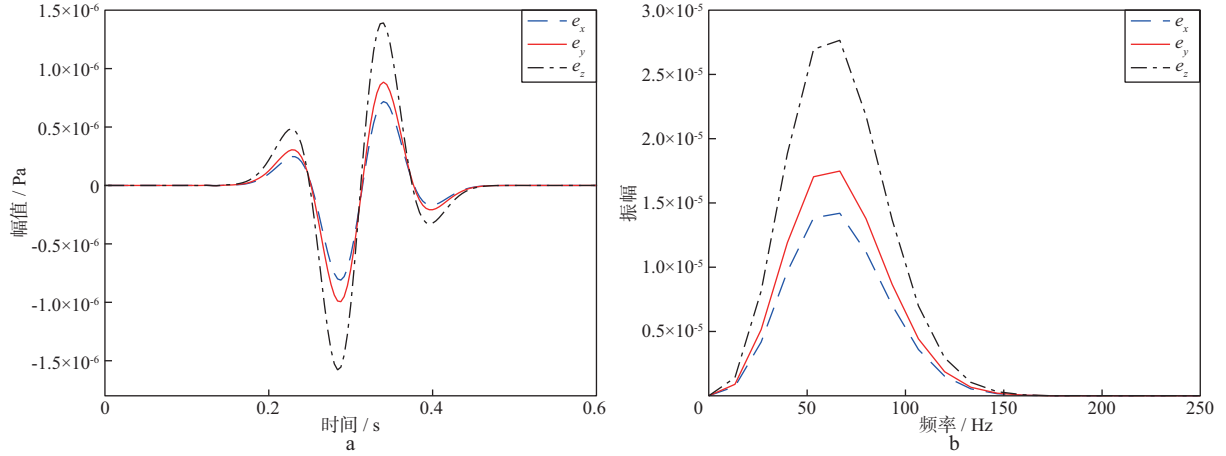


图 5 DAS 光纤所在位置处由地震波振动产生的三分量应变信号(a)及对应的振幅谱(b)

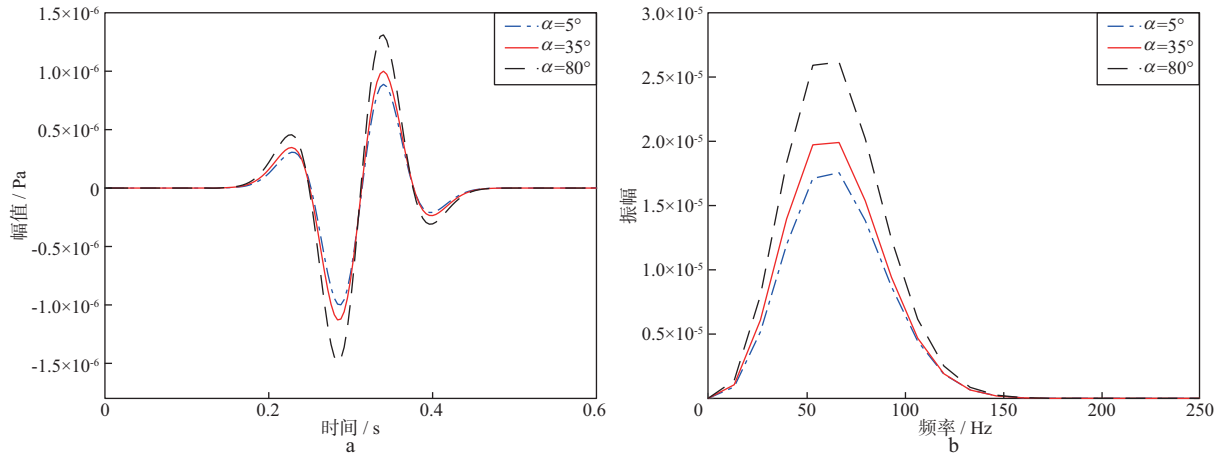


图 6 不同缠绕角度时螺旋光纤轴向方向上采集到的信号(a)及对应振幅谱(b)

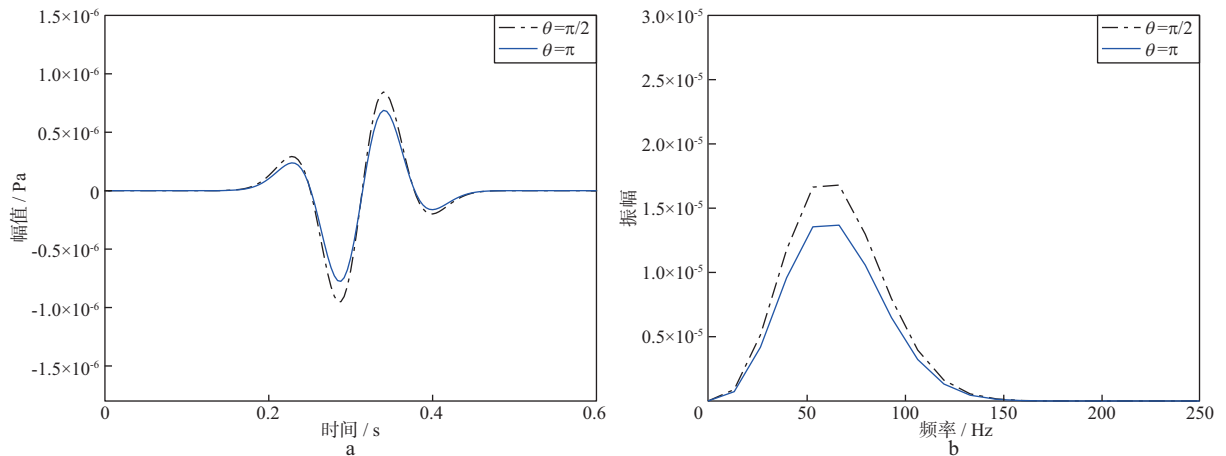


图 7 相同缠绕角度不同旋转角条件下螺旋光纤轴向方向上采集到的信号(a)及对应的振幅谱(b)

上所采集到的应变,图 7b 展示了对应的振幅谱。

由图 7a 可知,当旋转角度 θ 从 $\pi/2$ 变化到 π 时,螺旋光纤轴向方向上采集到的应变幅值减小,同时振幅谱幅值也相应减小。依据图 5 可知,本例中由地震波振动产生的 Y 分量信号的幅值和振幅谱幅值均大于 X 分量信号,表明当旋转角度 θ 从 $\pi/2$ 变化到 π 时,螺旋光纤轴向方向上获得的信号中 X 分量信号的影响增大,而 Y 分量信号的影响减小。同理当旋转角度 θ 从 π 增大到 $3\pi/2$ 时,螺旋光纤轴向方向上获得的信号中 X 分量信号的影响减小,而 Y 分量信号的影响增大。由此可见,当缠绕角固定时,在一个缠绕周期内螺旋光纤轴向方向上采集的信号中的 X 分量信号的影响增大时, Y 分量信号的影响将减小;而 X 分量信号的影响减小时, Y 分量信号的影响将增大,两个分量信号对螺旋光纤轴向方向上采集到的信号特征具有一定的周期性和互补性。

4 结论

本文通过建立单根光纤螺旋缠绕的数学模型,推导了螺旋光纤轴向应变的表达式和螺旋光纤上任意点的三维空间位置关系式,明确了螺旋光纤轴向应变与光纤所在位置处 3 个方向真实应变之间的数学映射关系,并在螺旋光纤的一个缠绕周期内,定量分析了不同缠绕角度、不同旋转角度条件下三分量振动信号对光纤轴向应变的影响,并通过模拟的三分量数字信号对螺旋光纤轴向方向所接收到的有效信号进行了验证,得出如下结论:

1) 螺旋缠绕光纤通过轴向方向的改变能够采集到光纤所在位置处的三分量振动特征,在光纤轴向方向上采集到的信号强度与实际三分量信号强度、光纤缠绕角度和光纤缠绕过程中各点所在的相对空间位置有关。

2) 当光纤缠绕轴方向与 Z 分量信号方向一致时,随着光纤缠绕角度 α 增大,DAS 螺旋光纤对沿缠绕轴方向的地震波振动(即 Z 分量)信号的敏感性增强,而对垂直于缠绕轴方向的(即 X 和 Y 分量)信号的敏感性减弱。当螺旋光纤的缠绕角度固定不变时,螺旋光纤获得的信号中 Z 分量信号不受旋转角度 θ 的影响,而 X 和 Y 分量信号则分别以余弦和正弦关系随旋转角度 θ 呈现出周期性的变化规律,两个分量在数值上具有互补性。

3) 螺旋光纤采集到的信号取决于光纤上任意点的轴向方向与 X, Y, Z 3 个分量之间的投影关系,上述结论在讨论时假设光纤缠绕轴方向与 Z 方向一致,可以直接适用于在直井中开展井中地震观测时的情况,而在地面地震勘探时通常可以将光纤缠绕轴方向调整至与地面平行的方向进行观测。在实际资料观测时,光纤缠绕轴方向与 X, Y, Z 3 个分量可能均存在一定的夹角,但上述结论依然成立,不过规律性变化特征会减弱。

本文重点在均匀介质假设条件下讨论了 X, Y, Z 3 个正交分量振动信号对螺旋缠绕光纤轴向应变的影响,对不同类型地震波在三维空间 3 个方向的振动信号具有普适性。实际地震勘探中广泛发育纵波、横波和面波等多种类型的波,不同类型的波在不同的传播方向上的振动分量差异较大甚至相位相反,容易导致螺旋光纤轴向应变上接收到的信号发生更加剧烈的变化,今后需要有针对性的单独讨论不同介质条件下不同类型地震波的传播特征和入射角等差异对光纤应变特征的影响,还应该充分考虑螺旋缠绕光纤的物性、标距长度以及光纤与缠绕轴之间的耦合程度等因素对螺旋光纤轴向应变响应的影响,从而有效提高螺旋缠绕光纤对不同类型地震波振动信号的采集能力,为真实三分量振动信号的有效恢复提供更加合理的依据。

参考文献

- [1] 马国旗,曹丹平,尹教建,等.分布式声传感井中地震信号检测数值模拟方法[J].石油地球物理勘探,2020,55(2):311-320
MA G Q, CAO D P, YIN J J, et al. Numerical simulation of detecting seismic signals in DAS wells[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 311-320
- [2] 宋政宏,曾祥方,徐善辉,等.分布式光纤声波传感系统在近地表成像中的应用 I: 主动源高频面波[J].地球物理学报,2020,63(2):532-540
SONG Z H, ZENG X F, XU S H, et al. Distributed acoustic sensing for imaging shallow structure I: Active source survey [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2): 532-540
- [3] 林融冰,曾祥方,宋政宏,等.分布式光纤声波传感系统在近地表成像中的应用 II: 背景噪声成像[J].地球物理学报,2020,63(4):1622-1629
LIN R B, ZENG X F, SONG Z H, et al. Distributed acoustic sensing for imaging shallow structure II: Ambient noise tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(4): 1622-1629
- [4] 隋微波,刘荣全,崔凯.水力压裂分布式光纤声波传感监测的应用与研究进展[J].中国科学(技术科学),2020,51(4):371-387
SUI W B, LIU R Q, CUI K. Application and research progress of distributed optical fiber acoustic sensing monitoring for hy-

- draulic fracturing[J].*Science Sinica Technologica*, 2020, 51(4): 371-387
- [5] 李彦鹏, 李飞, 李建国, 等. DAS 技术在井中地震勘探的应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(2): 242-249
- LI Y P, LI F, LI J G, et al. Application of distributed acoustic sensing in borehole seismic exploration[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(2): 242-249
- [6] MESTAYER J, GRANDI K S, COX B, et al. Distributed acoustic sensing for geophysical monitoring[J]. *Expanded Abstracts of 74th EAGE Conference and Exhibition*, 2012: 4253-4257
- [7] DALEY T M, MILLER D E, DODDS K, et al. Field testing of modular borehole monitoring with simultaneous distributed acoustic sensing and geophone vertical seismic profiles at Citronelle, Alabama[J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(5): 1318-1334
- [8] LELLOUCHA S R, LINDSEY N J, et al. Low-magnitude seismicity with a downhole distributed acoustic sensing array-examples from the FORGE geothermal experiment[J]. *JGR Solid Earth*, 2021, 126(1): 10.1029/2020JB020462
- [9] LUMENS P G E. Fibre-optic sensing for application in oil and gas wells; PhD thesis[D]. Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2014
- [10] BAKKU S K. Fracture characterization from seismic measurements in a borehole; PhD thesis[D]. America: Massachusetts Institute of Technology, 2015
- [11] 张发祥, 王昌, 吕京生, 等. 三分量激光检波器阵列及其实验研究[J]. *光电子(激光)*, 2017, 28(4): 371-375
- ZHANG F X, WANG C, LV J S, et al. 3-component fiber laser geophone array and experimental study[J]. *Journal of Optoelectronics(Laser)*, 2017, 28(4): 371-375
- [12] KUVSHINOV B N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves[J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(3): 671-688
- [13] NING L C I, SAVA P. Multicomponent distributed acoustic sensing: Concept and theory[J]. *Geophysics*, 2018, 83(2): P1-P8
- [14] NING L C I, SAVA P. High-resolution multi-component distributed acoustic sensing[J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(6): 1111-1122
- [15] INNANEN K. Determination of seismic-tensor strain from helical winding cable-distributed acoustic sensing cable with arbitrary and nested-helix winds[J]. *Expanded Abstract of 87th Annual Internat SEG Mtg*, 2017: 926-930
- [16] INNANEN K. A parameterization of a helical DAS fibre winding about an arbitrarily curved cable axis[J]. *Expanded Abstract of 79th EAGE Conference and Exhibition*, 2017: 1-5
- [17] EAID M V, LI J X, INNANEN K A. Modeling the response of shaped DAS fibres to microseismic moment tensor sources[J]. *Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg*, 2018: 4698-4702
- [18] EAID M V, KEATING S D, INNANEN K A. Multi-parameter seismic elastic fullwaveform inversion with combined geophone and shaped fiberoptic cable data[J]. *Geophysics*, 2020, 85(6): 1-66
- [19] EGOROV A, CORREA J, BÓNA A. Elastic full-waveform inversion of vertical seismic profile data acquired with distributed acoustic sensors[J]. *Geophysics*, 2018, 83(3): R273-R281
- [20] EGOROV A, CHARARA M, ALFATAIERGE E, et al. Realistic modeling of surface seismic and VSP using DAS with straight and shaped fibers of variable gauge length[J]. *Expanded Abstracts of 1st IMAGE*, 2021: 437-441
- [21] WUESTEFELD A, WILKS M. How to twist and turn a fiber: Performance modeling for optimal DAS acquisitions[J]. *The Leading Edge*, 2019, 38(3): 226-231
- [22] KARRENBACH M, YARTSEV V, EMUH M, et al. Field testing a three-component fiber-optic borehole seismic sensor array[J]. *Expanded Abstracts of 84th Annual Internat SEG Mtg*, 2014: 5019-5023
- [23] HORNMAN K, KUVSHINOV B, ZWARTJES P, et al. Field trial of a broadside-sensitive distributed acoustic sensing cable for surface seismic[J]. *Expanded Abstracts of 75th EAGE Conference and Exhibition*, 2013: cp-348-00928
- [24] HORNMAN J C. Field trial of seismic recording using distributed acoustic sensing with broadside sensitive fibre-optic cables[J]. *Geophysical Prospecting*, 2017, 65(1): 35-46
- [25] YURIKOV A, PEVZNER R, TERTYSHNIKOV K, et al. Laboratory measurements with DAS: A fast and sensitive tool to obtain elastic properties at seismic frequencies[J]. *The Leading Edge*, 2021, 40(9): 655-661
- [26] 陈亚峰, 张晓明, 张睿平, 等. 基于光纤螺旋缠绕技术的热力管道泄漏监测系统研究[J]. *自动化与仪表*, 2017, 32(10): 1-5
- CHEN Y F, ZHANG X M, ZHANG R P, et al. Research on Thermal pipeline leakage monitoring system based on optical fiber spiral winding technology[J]. *Automation & Instrumentation*, 2017, 32(10): 1-5
- [27] WILLIS M E, BARFOOT D, ELLMAUTHALER A, et al. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data[J]. *The Leading Edge*, 2016, 35(7): 605-609
- [28] WILLIS M E, WU X, PADHI A, et al. Effect of the angular response of a fiber-optic cable on DAS VSP recordings in lateral wells[J]. *Expanded Abstract of 80th EAGE Conference and Exhibition*, 2018: 1-5
- [29] BAIRD A F, STORK A L, Horne S A, et al. Characteristics of microseismic data recorded by distributed acoustic sensing systems in anisotropic media[J]. *Geophysics*, 2020, 85(4): KS139-KS147
- [30] YOUNG W C, BUDYNAS R G. Roark's formulas for stress and strain[M]. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2002: 1-854
- [31] BUDYNAS R G. Advanced strength and applied stress analysis[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1977: 1-960

(编辑:任 鹏)