

DOI:10.11784/tdxbz202409026

光缆结构对马赫-曾德尔分布式光纤振动传感系统性能影响

沙洲, 桂婕, 封皓, 芮小博

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 光缆是马赫-曾德尔分布式光纤振动传感系统的重要组成部分, 其结构对系统的传感性能有很大影响. 实验选择了玻璃纤维增强塑料(GFRP)单芯光缆、螺旋铠装光缆、钢丝铠装光缆、层绞式复合光缆 4 种具有典型结构的光缆, 设计了 9 种光缆结构组合, 研究了各组合对单频稳态振动和宽频瞬态振动的响应特性, 分析了系统信噪比随振源频率和振幅的变化趋势, 比较了不同的光缆结构组合在相同振动激励下的响应差异. 通过数值模拟为每种光缆建立模型, 仿真得到光缆受到外界信号作用时的截面应力分布和光纤内部应力变化曲线. 研究表明, 光缆结构不同的组合比光缆结构相同的组合具有更高的灵敏度; 所有光缆组合对振动信号的频率响应没有显著差异, 且均表现出较高的信噪比; 在幅值响应方面, 双钢丝铠装光缆组合与振动信号的振幅间呈现良好的线性关系, 双 GFRP 单芯光缆组合、双层绞式复合光缆紧套光纤组合较差, 其他组合则没有线性关系; 注油光纤可以衰减高频信号, 有一定的高频滤波功能; 螺旋铠装光缆在大振幅信号下更容易产生噪声. 研究结果可为实际工程中马赫-曾德尔分布式光纤振动传感系统的光缆选型提供参考.

关键词: 光纤传感; 光缆结构; 马赫-曾德尔干涉仪; 振动

中图分类号: TH744

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)07-0726-14

Effect of Optical Cable Structures on the Performance of Mach-Zehnder Distributed Optical Fiber Vibration Sensing System

Sha Zhou, Gui Jie, Feng Hao, Rui Xiaobo

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Optical cables play a crucial role in the performance of the Mach-Zehnder distributed optical fiber vibration sensing system, as their structural characteristics greatly affect the system's sensing capabilities. This study examined four common optical cable types: glass fiber-reinforced polymer(GFRP) single-core optical cable, spiral-armored optical cable, steel wire-armored optical cable, and layer-twisted composite optical cable. Nine combinations of these optical cable structures were designed. The response characteristics of these optical cable combinations to single-frequency steady-state and wide-frequency transient vibrations were investigated. The trends in how the system's signal-to-noise ratio varies with the frequency and amplitude of vibration were analyzed, and the response differences among various optical cable structure combinations under the same vibration signals were compared. Using numerical simulations, models for each optical cable type were developed to calculate the stress distribution across the cable cross-sections and track stress variations within the fibers under external signals. The results showed that combinations of different optical cable structures are more sensitive than those with identical structures. Although no significant differences were found in the frequency response of vibration signals across all combinations, the signal-to-noise ratio remained consistently high. For amplitude response, the double steel wire-armored optical cable combination demonstrated a strong linear relationship with the vibration amplitude. The double GFRP single-core optical cable combination and the double layer-twisted composite optical cable tightly sheathed with fiber combination were less

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-12-18.

作者简介: 沙洲(1990—), 男, 博士, 副教授, shazhou@tju.edu.cn.

通信作者: 封皓, fenghao@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3203802).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3203802).

effective, whereas other combinations showed no clear linear relationship. Additionally, the study revealed that optical fibers with gel can attenuate high-frequency signals, providing a filtering effect. However, spiral-armored optical cables tended to generate noise when exposed to large amplitude signals. These insights provide valuable guidance for selecting suitable optical cables for engineering applications of Mach-Zehnder distributed optical fiber vibration sensing systems.

Keywords: optical fiber sensing; optical cable structure; Mach-Zehnder interferometer; vibration

马赫-曾德尔分布式光纤振动传感系统(Mach-Zehnder distributed optical fiber vibration sensing system, MZ-DVS)是一种典型的干涉型光纤传感系统,具有结构简单、灵敏度高、响应速度快等优点,适合长距离信号监测以及各类振动信号定位^[1-2]。现今,该技术已被广泛应用于海底线缆监测、地质变化监测、油气勘探、工业管道线网安全预警以及大范围动物活动监测等领域。此外,MZ-DVS系统还可以结合其他技术构成多机理融合系统,实现同时测量多种参数,获得被测对象更加详细的信息^[3-9]。

关于影响 MZ-DVS 系统性能因素的研究,目前已有大量工作。Liang 等^[10]研究了窄线宽半导体激光器对 MZ-DVS 系统的影响,研究表明,频率噪声对该系统定位误差的影响很大,当频率噪声(激光线宽)小于某一阈值时,激光产生的定位误差为零,超过该阈值时,激光产生定位误差。陈文静^[11]研究了温度对 MZ-DVS 系统的影响,发现温度会引起明显的波长偏移,干涉仪的相位也会随温度的变化漂移。吴俊等^[12]研究了偏振态退化对双 MZ-DVS 系统定位性能的影响,发现偏振态退化不仅会导致传感系统输出的信号衰落还会引入相位误差,从而影响定位精度。Huang 等^[13]研制了一款偏振态稳定的双 MZ-DVS 系统定位传感器,并设计了一种时延估计算法提高系统定位精度,实验结果表明,该系统的传感距离可达 100 km,定位误差在 ± 25 m 以内。尚玉峰^[14]以马赫-曾德尔光纤干涉仪为基础研究了光强失配对干涉条纹对比度的影响,研究发现两束光的光强相差越小,干涉条纹对比度越大。Sun 等^[15]发现采用对称的光纤耦合器能够提高系统的灵敏度和稳定性,光耦合器的设计和配置对传感系统的性能有显著影响。另有研究表明,光源的特性如功率稳定性和光的相干性也是影响系统性能的关键因素,功率波动和相干性差的光源都可能导致系统的长期重复性和稳定性下降^[16]。

文献调研发现,许多关于 MZ-DVS 的研究中构建系统使用的是普通单模光纤,但是在实际工程应用中,为了防止光纤受到外界冲击而损坏或断裂,需要使用光缆建造系统。

光缆结构主要根据光纤在光缆中的状态和成缆

方式分类,常见的光缆结构类型包括骨架型光缆、带状光缆、层绞式光缆、中心束管式光缆等。光缆中除去光纤外还有多种构件,起保护、固定光纤等作用。由于这些构件的存在,外界信息不能直接作用在光纤上,降低了传感系统的灵敏度,此外传感系统的响应信号也会存在一定程度的失真。因此,研究光缆结构对分布式光纤传感系统性能的影响是有必要的。

Shang 等^[17]基于 Φ -OTDR 系统对几种不同结构光缆的声压灵敏度进行了比较,结果发现使用增强塑料为中心加强件、聚乙烯塑料为外护套的蝶形光缆的声压灵敏度最高,其数值高达 69.9 mrad/Pa,比标准单模光纤提高了 40 倍。Spikes 等^[18]使用螺旋缠绕光缆、裸露单纤、铠装单股光缆分别探测近地表反射地震波,将检测结果与传统垂直地震计阵列的检测结果相比较,发现螺旋缠绕光缆能有效记录近地表反射地震信号,而裸露单纤的测量结果较差。

目前关于影响 MZ-DVS 系统传感性能因素的研究多集中在偏振退化、光源线宽、相位噪声、环境干扰等方面,对光缆结构的研究并不丰富。而研究光缆结构的论文较少关注光缆结构对 MZ-DVS 系统传感性能的影响。因为光缆是系统直接感知外界信号的部分,决定了系统所获得信号的质量,所以研究其对系统传感性能的影响很有必要。本文以 MZ-DVS 系统为基础,将不同结构的光缆接入系统,研究了 9 种光缆结构组合对振动信号的响应特性。为量化评估结果,实验采用高可重复性的激励方式,分析了系统灵敏度、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)随振源频率、强度的变化特点,对比了不同光缆结构组合在相同振动激励下的响应差异。研究结果对实际工程应用中 MZ-DVS 系统的光缆选择具有一定的参考价值。

1 传感原理

1.1 马赫-曾德尔干涉原理

MZ-DVS 系统的结构如图 1 所示。光经耦合器分开后分别进入传感臂和参考臂。当来自外界的振动信号作用在作为传感臂的光纤上时会导致光纤形

变,引起光纤折射率的变化,使两条臂的光之间产生变化的相位差,该相位差携带了振动信号的信息。

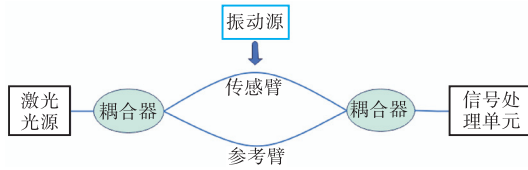


图 1 MZ-DVS 系统

Fig.1 Mach-Zehnder distributed vibration sensing system

干涉光强的表达式为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi(t) + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为传感臂和参考臂的光强; $\Delta\varphi(t)$ 为振动信号作用在光纤上时使光相位的改变量; φ_0 为 I_1 和 I_2 间的初始相位差。

光通过长度为 L 的光纤后发生的相位变化为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} nL = \beta L \quad (2)$$

式中: n 为光纤初始折射率; β 为光在光纤中的传播常数; λ_0 为光在真空中的波长; L 为受振动信号作用的光纤长度。

$\Delta\varphi(t)$ 的计算式^[19]为

$$\Delta\varphi(t) = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial D} \Delta D \quad (3)$$

式中 D 为纤芯直径。

由式(3)可知,外界振动信号对光相位的影响包括 3 种: 光纤拉伸或收缩引起的长度变化; 光纤折射率变化,即光弹效应; 光纤长度变化引起的纤芯直径变化,即泊松效应^[20]。其中,泊松效应对光相位的影响最小,可以忽略不计,故式(3)中的第 3 项可舍去^[21],光纤的制作材料通常是各向同性体,其折射率变化与应变的关系如下^[22]。

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 - B_0 \\ B_2 - B_0 \\ B_3 - B_0 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{12} & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{11} & g_{12} & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{12} & g_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: g_{11} 、 g_{12} 、 g_{14} 为光纤的弹光系数, $g_{44} =$

$0.5(g_{11} - g_{12})$; ε_1 、 ε_2 为光纤的径向应变; ε_3 为光纤的轴向应变; $B_i = \left(\frac{1}{n_i}\right)^2$, $\Delta n_i = -0.5n_i^3 \Delta B_i$ 。本文使用的光纤是各向同性的,所以 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, $n_1 = n_2 = n_3 = n$ 。由计算式(4)可得

$$\Delta n_1 = -\frac{1}{2}n^3(g_{11}\varepsilon_1 + g_{12}\varepsilon_2 + g_{12}\varepsilon_3) \quad (5)$$

$$\Delta n_2 = -\frac{1}{2}n^3(g_{12}\varepsilon_1 + g_{11}\varepsilon_2 + g_{12}\varepsilon_3) \quad (6)$$

$$\Delta n_3 = -\frac{1}{2}n^3(g_{12}\varepsilon_1 + g_{12}\varepsilon_2 + g_{11}\varepsilon_3) \quad (7)$$

综上有 $\Delta n_1 = \Delta n_2$, 此外还有 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0}n$, $\frac{\partial\beta}{\partial n} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$,

$\varepsilon_3 = \frac{\Delta L}{L}$ 。因为本文实验所用的激光是横向偏振光,所以只考虑折射率的径向变化 Δn_1 和 Δn_2 。假设光沿 n_1 方向偏振,则将式(5)代入式(3),此时式(3)可表示为

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi L}{\lambda_0} n\varepsilon_3 + \frac{2\pi L}{\lambda_0} \left[-\frac{1}{2}n^3(g_{11}\varepsilon_1 + g_{12}\varepsilon_2 + g_{12}\varepsilon_3) \right] \quad (8)$$

因为光纤是各向同性的,所以其各方向的杨氏模量 E 也一样。振动信号作用在光纤上时会使光纤内部产生应力, σ_r 设为径向应力, σ_z 为轴向应力,则由

前文得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\sigma_r}{E}$, $\varepsilon_3 = \frac{\sigma_z}{E}$, 式(8)可改写为

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi L}{\lambda_0 E} \left\{ n\sigma_z - \frac{1}{2}n^3 [(g_{11} + g_{12})\sigma_r + g_{12}\sigma_z] \right\} \quad (9)$$

1.2 信号传导过程

前文已说明,外界信号并非直接作用在光纤上,而是经过多层光缆构件传递至光纤,如图 2 所示。光缆通常由外护套、加强件、缓冲层、光纤 4 个主要部分组成。外护套的功能是防止外部环境对光缆的直接损伤,其本身的弹性和厚度能够在一定程度上缓解瞬时冲击力。加强件作为光缆的骨架,承载大部分的机械应力和变形,尤其是当光缆受到弯曲或压缩时,加强件起到主要的支撑作用,其通过自身的弹性和刚性吸收和分散外力,从而保护内部的光纤。缓冲层能够吸收部分机械变形,将外界压力均匀分散在光缆内部,避免光纤受到过大的直接压力。因此,实际上传递至光纤的是经各类构件影响后的信号,而非原始的外界信号。

设 $F_s(t)$ 为原始外界信号, $F_s(t)$ 作用在光纤之前需要经过 k 个光缆构件传导,如图 2 所示,

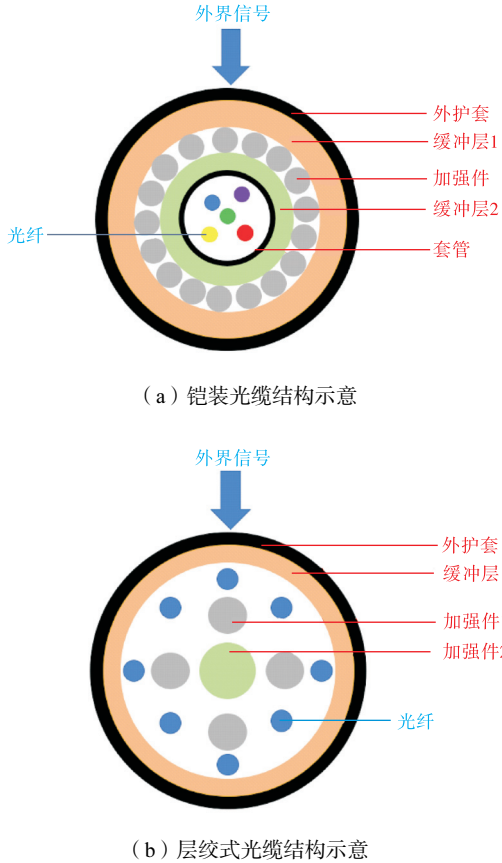


图 2 光缆结构示意图

Fig.2 Schematic of optical cable structure

$F_i(t)$ 是 $F_s(t)$ 在各构件上的分量, $i=1,2,\dots,k$, $F_{\text{fiber}}(t)$ 是 $F_s(t)$ 在光纤上的分量.

$$F_s(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t) + \dots + F_k(t) + F_{\text{fiber}}(t) \quad (10)$$

$$F_{\text{fiber}}(t) = F_s(t) - \sum_{i=1}^k F_i(t) \quad (11)$$

由于每种光缆内部结构各异,所以 $\sum_{i=1}^k F_i(t)$ 也各不相同. 因此即使 $F_s(t)$ 相同, 不同种类的光缆中光纤受到的 $F_{\text{fiber}}(t)$ 也是不同的.

当光纤受到压力时,其内部会产生应力分布. 这种应力分布通常包括径向应力(σ_r)、周向应力(σ_θ)和轴向应力(σ_z). 由于光纤的长度远大于其直径,可以近似地将光纤视为二维结构,只考虑径向应力和轴向应力的分布.

光纤在几何上是一根实心圆柱体,可以使用拉梅公式计算其横截面上径向应力和轴向应力的分布. 拉梅公式^[23]通常用于计算厚壁圆柱在内外压强作用下的应力分布,即

$$\sigma_r = \frac{p_{\text{in}} r_{\text{in}}^2 - p_{\text{out}} r_{\text{out}}^2}{r_{\text{out}}^2 - r_{\text{in}}^2} + \frac{(p_{\text{out}} - p_{\text{in}}) r_{\text{in}}^2 r_{\text{out}}^2}{(r_{\text{out}}^2 - r_{\text{in}}^2) r^2} \quad (12)$$

$$\sigma_z = \frac{p_{\text{in}} r_{\text{in}}^2 - p_{\text{out}} r_{\text{out}}^2}{r_{\text{out}}^2 - r_{\text{in}}^2} \quad (13)$$

式中: r_{in} 为内半径; r_{out} 为外半径; p_{in} 为内表面压强; p_{out} 为外表面压强; r 为径向任意位置.

实心圆柱体没有内表面,故 $p_{\text{in}} = 0$, $r_{\text{in}} = 0$, 得

$$\sigma_r = -\frac{p_{\text{out}} r_{\text{out}}^2}{r_{\text{out}}^2} = -p_{\text{out}} \quad (14)$$

$$\sigma_z = -\frac{p_{\text{out}} r_{\text{out}}^2}{r_{\text{out}}^2} = -p_{\text{out}} \quad (15)$$

因此,光纤内部的径向应力和轴向应力都由光纤外表面压强决定.

式(11)中, $F_{\text{fiber}}(t)$ 是光纤各位置所受的压力的总和,由于光缆结构的影响,光纤表面受到的压力并不均匀,每种光缆其光纤表面的压力分布各有特点. 设 ΔS 是光纤表面上的一微小面积, $\Delta F_{\text{fiber}}(t)$ 是作用在该面积上的压力,则该面积上的压强为

$$p_{\text{out}} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{\text{fiber}}(t)}{\Delta S} = \frac{dF_{\text{fiber}}(t)}{dS} \quad (16)$$

2 光缆结构

光缆常用的构件有光纤油膏、钢丝、钢管、芳纶、聚乙烯 (polyethylene, PE) 包层等. 这些构件会吸收掉一部分振动信号,导致光纤测量到的信号与原始振动信号之间存在相位、幅值等差异. 研究选择了 4 种结构常见的光缆,分别是 GFRP 单芯光缆、螺旋铠装光缆、钢丝铠装光缆以及层绞式复合光缆^[24-25].

玻璃纤维增强塑料 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 单芯光缆内只有一根单模光纤,外包 GFRP 材料,结构如图 3 所示. GFRP 的杨氏模量通常在 20 ~ 80 GPa 范围内,具有质量轻、强度高、耐腐蚀的优点. GFRP 单芯光缆结构简单,刚性高,抗拉强度高,具有良好的应力线性拟合度,外界信号经过 GFRP 包层即可直接作用在光纤上,不受过多构件影响,是一种具有代表性的单芯光缆.

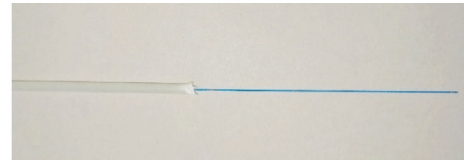


图 3 GFRP 单芯光缆

Fig.3 GFRP single-core optical cable

螺旋铠装光缆是一种中心束管式光缆,内部结构复杂,包含多种构件,外界信号作用在光纤之前会经历层层干扰. 研究选用的螺旋铠装光缆如图 4 所示,

外包可以防水、防腐蚀的 PE 护套,内有不锈钢编织网和螺旋钢管加强,在编织网和钢管之间还包有一层芳纶,使光缆具有更好的抗压性和抗拉性,螺旋钢管内有 2 根 PE 紧套单模光纤。



图 4 螺旋铠装光缆

Fig.4 Spiral-armored optical cable

钢丝铠装光缆也是一种中心束管式光缆,结构如图 5 所示. 光缆外部包裹 PE 护套,内有不锈钢丝绞合层,钢丝层内有 1 根聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 管,内注油膏,油膏内放有 4 根单模裸光纤. 油膏可以填充光纤间的空隙,缓解光纤受到外力挤压引起的变形和损伤,提高光缆耐压能力。

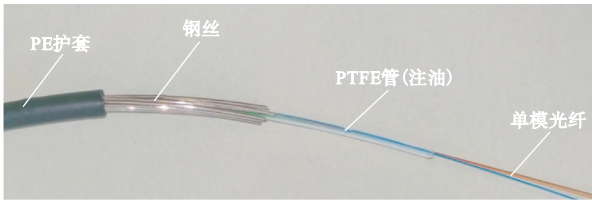


图 5 钢丝铠装光缆

Fig.5 Steel wire-armored optical cable

层绞式复合光缆与上述 3 种光缆不同,在光缆中心位置的不是光纤而是加强件,多根装有光纤束的套管分布在加强件周围. 这种光缆内部构件活动性较大,光纤受力更为复杂. 本文选用的层绞式复合光缆结构如图 6 所示,PE 护套内包有芳纶,芳纶内部是两

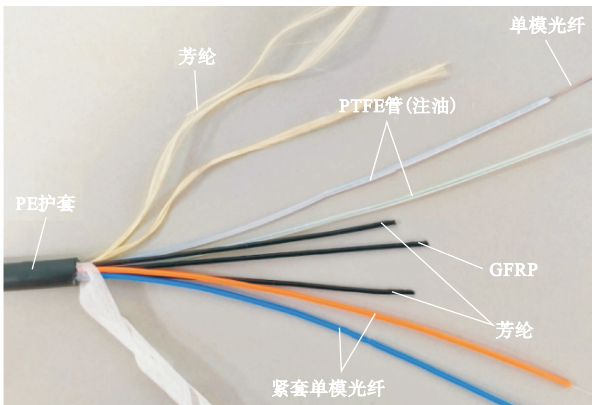


图 6 层绞式复合光缆

Fig.6 Layer-twisted composite optical cable

根紧套单模光纤和两根注油 PTFE 管,每根 PTFE 管中均有 2 根单模光纤. 加强件位于光缆中心,包括 1 根 GFRP 和 2 束芳纶,均被黑色 PE 护套包裹,以增加光缆强度和抗拉性,光纤围绕加强件排布。

3 光缆内部应力仿真分析

由本文第 1 节中的式(9)可知,光纤中的应力决定了 $\Delta\varphi(t)$ 的变化并且受光缆结构影响. 为了研究不同结构光缆的内部受力情况,本文以上述 4 种光缆为基础建立模型,分析各光缆截面的应力分布,以及光缆中的光纤在外界信号作用下的应力值. 建模使用多物理场耦合仿真软件,为了保证模型的收敛性以及降低模型求解难度减少计算时间,模型在保留各光缆结构特征的前提下做了适当的简化. 模型设置参数如表 1~表 5 所示. 在光缆左下方表面给予一载荷作为外界信号使光缆发生指定长度的位移 S ,方向为 45° 即指向光缆截面中心. 光缆的截面应力分布如图 7 所示。

表 1 GFRP 单芯光缆结构尺寸

Tab.1 GFRP single-core optical cable structure dimensions mm

构件	直径	厚度
外护套	2.0	0.85
光纤	0.3	—

表 2 层绞复合光缆结构尺寸

Tab.2 Layer-twisted composite optical cable structure dimensions mm

构件	直径	厚度
外护套	5.0	1.00
加强件	1.0	—
光纤	0.3	—

表 3 螺旋铠装光缆结构尺寸

Tab.3 Spiral-armored optical cable structure dimensions mm

构件	直径	厚度
外护套	5.0	1.00
铠装层	3.0	0.25
缓冲层	2.5	0.70
紧套层	1.1	0.40
光纤	0.3	—

表 4 钢丝铠装光缆结构尺寸

Tab.4 Steel wire-armored optical cable structure dimensions mm

构件	直径	厚度
外护套	5.0	1.00
铠装层	0.5	—
套管	2.0	0.25
缓冲层	1.5	0.60
光纤	0.3	—

表 5 材料参数

Tab.5 Material parameters

材料	密度/(g/cm ³)	杨氏模量/GPa	泊松比
PE	0.91	0.50	0.40
GFRP	2.00	60.00	0.20
不锈钢	8.00	193.00	0.25
PTFE	2.19	0.75	0.40
光纤	2.20	70.00	0.17

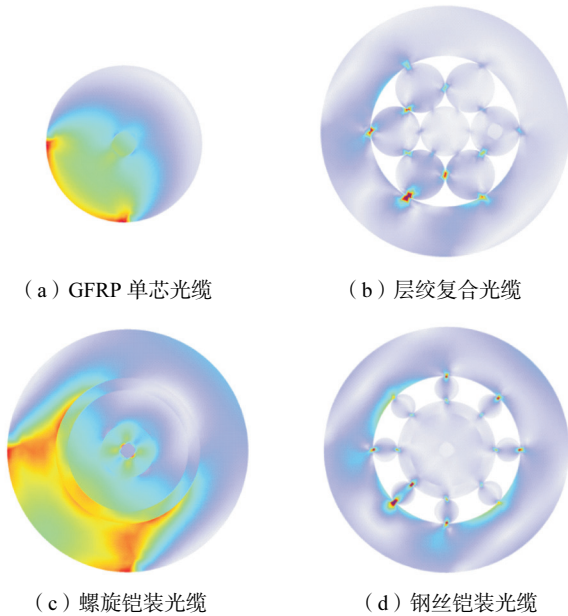
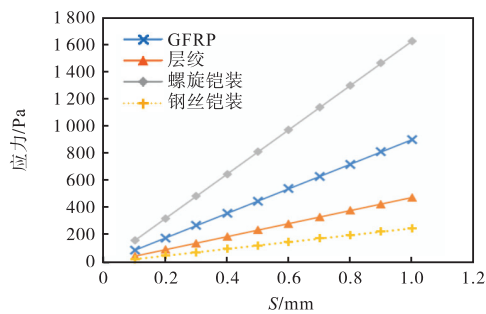


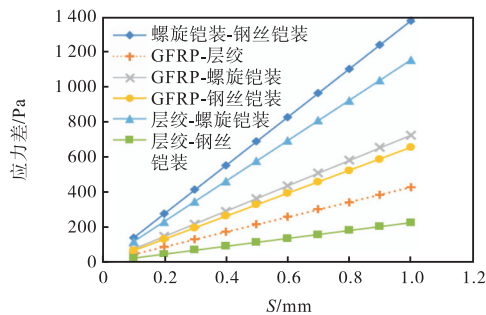
图 7 光缆截面应力分布

Fig.7 Stress distribution in cross-section of optical cables

图 8(a)展示了位移 S 从 0.1 mm 增大至 1.0 mm 过程中,单根光缆光纤应力的变化曲线.可以观察



(a) 单根光缆



(b) 2 根光缆间光纤应力差

图 8 光纤应力随位移 S 变化的曲线

Fig.8 Curves of stress in optical fibers with displacement S

到,4 种光缆的光纤应力均随 S 的增大而增大,呈现出良好的线性关系,其中在发生相同长度的位移下,螺旋铠装光缆的光纤应力最大,层绞复合光缆和钢丝铠装光缆的光纤应力偏小且数值相近,GFRP 单芯光缆的光纤应力处于中间水平.这表明本研究所选择的 4 种光缆的光纤应力与光缆位移之间存在良好的线性关系,可以有效反映被测信号的信息.

考虑到马赫-曾德尔干涉仪的双干涉臂结构,研究 2 根光缆间的光纤应力差值是有必要的.将图 8(a)中的 4 根光缆曲线两两组合并相减,取结果绝对值,得到图 8(b)中 6 个组合的应力差值曲线,图中曲线的斜率代表光缆组合对位移变化的灵敏度.结果显示,不同的光缆组合之间灵敏度存在显著差异,选则合适的光缆组合可以有效提高 MZ-DVS 系统的传感性能.

4 实验设置

实验需要用到的设备有台式电源、激光光源、信号发生器、功率放大器、模态激振器、光衰减器、光纤耦合器、光电探测器、数据采集卡等.

信号发生器输出信号经功率放大器放大后送到模态激振器,使激振器产生相同频率且振幅与其电压成正比的稳定周期振动信号.激振器的振动部件上固定有 1 根铁质横杆,将实验所用的光缆用塑料扣绳平行固定在该铁质横杆上,可以使光缆与激振器更好地耦合,每条光缆长 1 m.实验所用激光光源是波长为 1550 nm 的窄线宽单频光纤激光器,输出光频谱线宽小于 3 kHz,具有超低的频率噪声和强度噪声特性,输出光谱边模抑制比超过 55 dB,波长稳定性范围为-10 ~ 10 pm.

实验系统结构如图 9 所示,光从激光源发出经耦合器 1 分成两束,这两束光经过光缆后在耦合器 2 中叠加干涉,干涉光由光纤送至光电探测器.光衰减器用来控制光功率大小,使干涉光具有良好的条纹对比度并且防止光功率超过光电探测器量程.光电探测器的光谱响应范围是 800 ~ 1700 nm,光敏有效直径 75 μm ,-3 dB 带宽 40 kHz,响应时间 140 ps,光波长 1550 nm 时的响应度是 0.9 mA/mW,输出信号范围为 0 ~ 10 V.数据采集卡的输入范围为 0 ~ 10 V.图 10 为 MZ-DVS 系统实物图.

MZ-DVS 系统具有 2 条干涉臂,每条干涉臂可采用一种结构的光缆,用不同结构的光缆构成 MZ-DVS 系统的 2 条干涉臂,2 根光缆成一个组合.考虑到上述 4 种光缆的适用场景与实验的合理性,本文设

计了 9 个组合, 如表 6 所示. 为了方便叙述, 后文提及及光缆组合时统一使用表 6 中的组合序号.

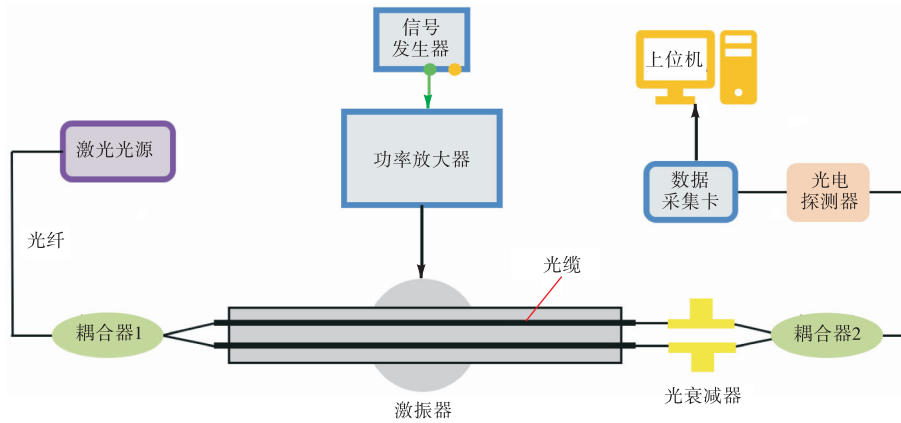


图 9 MZ-DVS 系统结构
Fig.9 MZ-DVS system structure

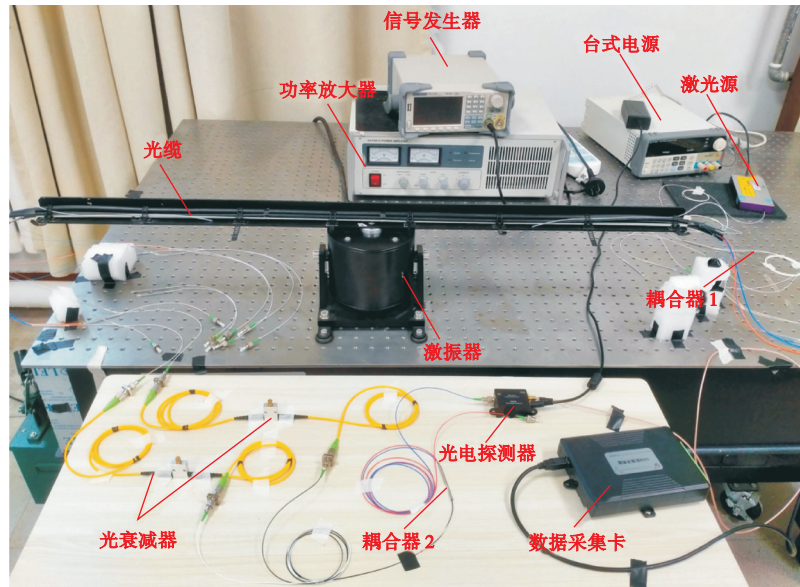


图 10 MZ-DVS 系统实物图
Fig.10 Photo of prototype of MZ-DVS system

表 6 光缆组合

Tab.6 Optical cable combinations

组合序号	干涉臂 1	干涉臂 2	组合简称
1	层绞式复合缆紧套光纤	层绞式复合缆紧套光纤	层绞双紧
2	层绞式复合缆注油光纤	层绞式复合缆注油光纤	层绞双油
3	层绞式复合缆注油光纤	层绞式复合缆紧套光纤	层绞油-层绞紧
4	螺旋铠装光缆紧套光纤	螺旋铠装光缆紧套光纤	螺旋双紧
5	钢丝铠装光缆注油光纤	钢丝铠装光缆注油光纤	钢丝双油
6	钢丝铠装光缆注油光纤	螺旋铠装光缆紧套光纤	钢丝油-螺旋紧
7	GFRP 单芯光缆	GFRP 单芯光缆	GFRP-GFRP
8	GFRP 单芯光缆	钢丝铠装光缆注油光纤	GFRP-钢丝油
9	GFRP 单芯光缆	螺旋铠装光缆紧套光纤	GFRP-螺旋紧

5 实验结果与分析

实验依据系统响应信号的频谱计算信噪比, 设 x 为携带噪声的原始信号, S_{signal} 为有用信号, f 为激振

器产生的振动信号的频率, S_f 为频率为 f 的信号, S_{noise} 为噪声. 信噪比 (R_{SN}) 计算公式为

$$S_{\text{signal}} = S_f + \sum_{i=2}^{20} S_{if} \tag{17}$$

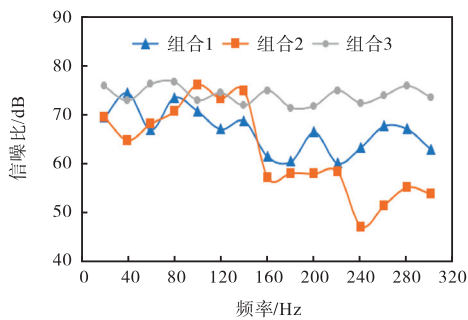
$$S_{\text{noise}} = x - S_{\text{signal}} \quad (18)$$

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \left(\frac{\left(\frac{N}{2} - 20 \right) S_{\text{signal}}}{x - S_{\text{signal}}} \right) \quad (19)$$

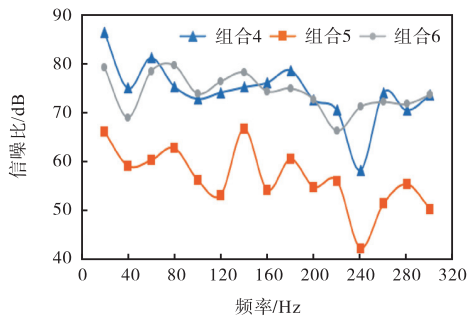
式中: S_{if} 为响应信号中 S_f 的 i 次谐波, 根据经验, 所有光缆组合的响应信号中 S_f 的谐波不会超过 20 次, 故 S_{signal} 为 S_f 与其 2~20 次谐波之和; N 为采样点数。

5.1 光缆结构组合的频率响应

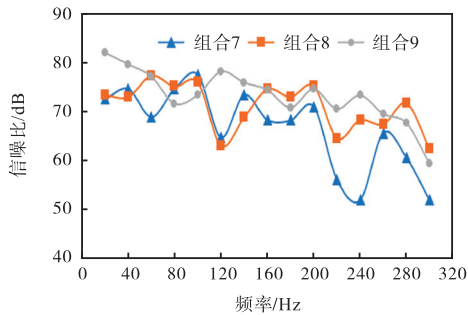
实验中, 信号发生器输出正弦信号, 使激振器产生稳定的振动信号, 振幅固定, 频率变化范围为 20~300 Hz, 每隔 20 Hz 采集 1 组数据。图 11 是表 1 中的 9 个组合在不同频率下对振动信号频率响应的信噪比。



(a) 组合 1~3



(b) 组合 4~6



(c) 组合 7~9

图 11 光缆结构组合频率响应的信噪比

Fig.11 Frequency response SNRs of optical cable combinations

从图 11 可知, 9 个组合在不同的频率下均表现

出较大的信噪比, 且信噪比的变化与频率之间没有明显的数学关系。但从组合间的比较中可以发现, 图 11 (a) 中, 20~220 Hz 范围中组合 1、组合 2 的信噪比相近, 当振动信号频率大于 220 Hz 后, 组合 2 的信噪比明显小于组合 1 的信噪比。这一现象可以归因于组合 2 的 2 根光纤都是注油光纤, 油膏具有阻尼, 导致在油膏中传递的信号存在能量耗散、振幅衰减, 起到对光纤缓冲、保护的作用。一般情况下, 阻尼力与物体振动频率成正相关, 阻尼力越大, 振动衰减得越多^[26], 因此 220 Hz 之后信噪比明显变小。此外, 图 11 (a) 中组合 3 的信噪比在各个频率下都大于其他 2 个组合, 说明该组合具有更好的传感性能, 灵敏度更高。

图 11 (b) 中, 组合 4 与组合 6 的信噪比相近, 而组合 5 的信噪比明显偏小。原因除了油膏对光纤有缓冲保护作用外, 钢丝铠装光缆的光纤外部还包裹着紧密的钢丝层, 这些构件较为坚硬, 使钢丝铠装光缆发生的形变量较其他光缆更小。图 11 (c) 中 3 个组合在各频率下的信噪比相近, 但总体而言组合 8 和组合 9 的信噪比略大于组合 7 的信噪比。

从上述现象中可以发现, 信噪比偏大的组合中, 除去组合 4 外, 其余均是光缆结构不同的组合。理想的 MZ-DVS 系统应当如图 1 所示, 振动信号只作用在传感臂上, 参考臂不受影响。但现实中, 不可能完全将参考臂与振动信号隔离, 而且在长距离的光纤传感监测系统中, 因为成本、技术等因素, 更难实现对参考臂的信号隔离, 所以实际应用中通常将参考臂与传感臂一同铺设。由于充当两条干涉臂的光纤不可能完全相同, 所以当外界信号同时作用在两条干涉臂时会引起不同的相位变化, 从而产生相位差。因此, 系统 2 条干涉臂的相位变化差异越大, 响应信号就越强, 信噪比越大。

由此可见, 上述现象可以解释为不同结构的光缆具有各自独特的强度、抗冲击性和内部应力分布。当它们受到同一外界信号作用时, 引起的光的相位变化亦存在差异。因此, 不同结构光缆间的相位差会明显大于相同结构光缆间的相位差, 从而使响应信号更显著。在 MZ-DVS 系统中, 两条干涉臂使用不同结构光缆会比使用相同结构光缆具有更大的信噪比和更高的灵敏度。

5.2 光缆结构不同的组合对微小振幅信号的传感性能研究

由前文可知, 光缆结构不同的组合比光缆结构相同的组合的信噪比更大, 灵敏度更高。为进一步区分

各组合的灵敏度水平,本文使用微小振幅信号对组合 3、组合 6、组合 8、组合 9 这 4 个组合做极限测试. 激振器产生稳定正弦信号,加速度峰峰值为 $3.04 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$, 因为实验中存在一些低频噪声,为了防止信号不被淹没,频率不能过低,所以频率设为 220 Hz. 每个组合重复采样 10 次,计算平均信噪比,结果如图 12 和表 7 所示.

由图 12 和表 7 可知,在监测微小振幅信号时,4 个组合中,组合 3 的平均信噪比最大,灵敏度最高;组合 8 的平均信噪比略小且数据呈现左偏分布;组合 6 和组合 9 的平均信噪比数值几乎相同,其中组合 9 的信噪比最小,灵敏度最低.

综上所述,若需要检测微小振动信号,可以通过使用光缆结构不同的组合来提高系统的灵敏度,其关键在于尽可能增大 2 条光缆中光纤形变量之间的差异.

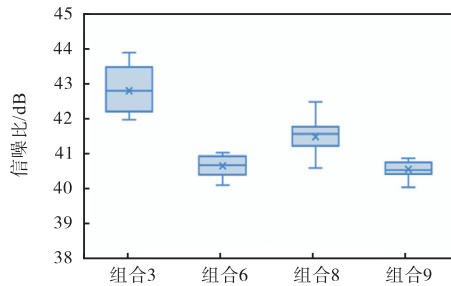


图 12 微小振幅信号下光缆结构不同组合的信噪比

Fig.12 SNRs of combinations with different optical cable structures under the small amplitude signal

表 7 微小振幅信号下光缆结构不同组合的平均信噪比

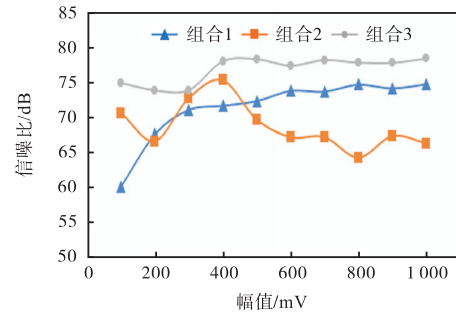
Tab.7 Average SNR of combinations with different optical cable structures under the small amplitude signal

组合	平均信噪比/dB
3	42.787 1
6	40.648 7
8	41.479 2
9	40.553 0

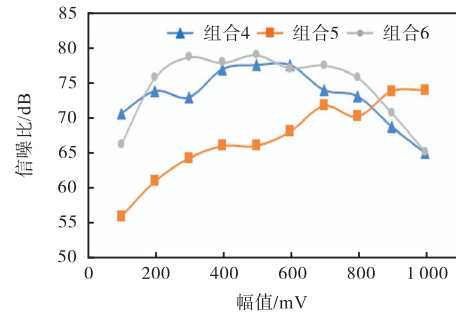
5.3 光缆结构组合的幅值响应

实验中,信号发生器输出正弦信号,使激振器产生稳定的振动信号,频率固定在 220 Hz,可以减少低频噪声的干扰. 激振器产生的振动信号峰峰值与信号发生器输出信号电压峰峰值成正比,因此,设置信号发生器输出的电压峰峰值在 100 ~ 1 000 mV 范围变化,每隔 100 mV 做 1 组测量. 图 13 是 9 个组合在不同电压峰峰值下对振动信号的幅值响应信噪比.

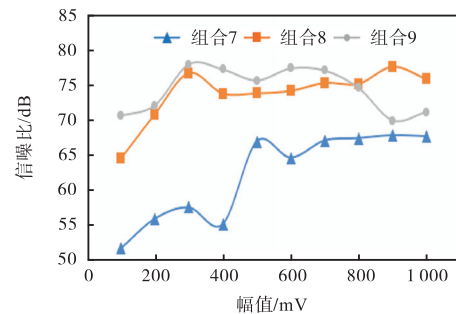
图 13(a)中,组合 1 的信噪比与电压的线性关系较好,组合 3 的信噪比则与电压没有明显的关系. 组合 2 在电压大于 400 mV 之后,其信噪比开始随着电



(a) 组合 1 ~ 3



(b) 组合 4 ~ 6



(c) 组合 7 ~ 9

图 13 光缆结构组合的幅值响应信噪比

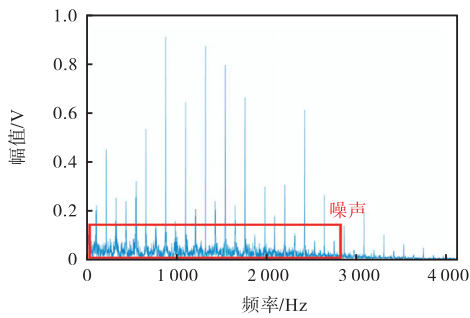
Fig.13 Amplitude response SNR of optical cable structure combinations

压的增大而减小. 发生该现象的原因是油膏是一种黏弹性材料,其动力特性在小应变下为线性特性,当受到较大应变时就会显示出非线性特性^[27],导致被油膏包裹的光纤不能与光缆同步形变,从而使系统的线性减弱,信噪比降低.

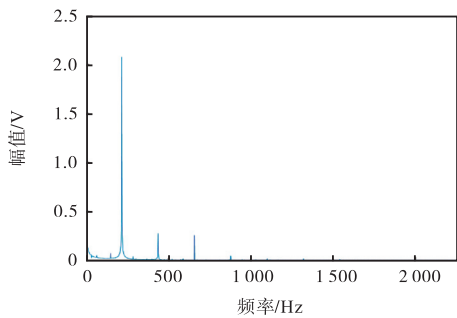
图 13 (b)中,组合 5 的信噪比随着电压的增大而增大,线性最好. 由于钢丝铠装光缆结构的特性,比起层绞复合光缆其更难发生应变,所以实验中当其与层绞复合光缆都受到同等振幅的振动信号作用时,钢丝铠装光缆中油膏发生的应变会小于层绞复合光缆,使得油膏的动力特性一直处于线性区域. 因此组合 5 的信噪比随着电压的增大而增大,不会像组合 2 一样信噪比在电压大于 400 mV 之后减小. 此外,组合 4 和组合 6 的信噪比先是随着电压的增大而增大,但从 600 mV 之后,这两个组合的信噪比随着电压的增大

减小。

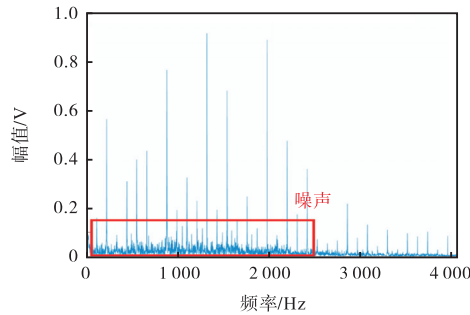
图 14(a) ~ (c) 分别是图 13(b) 中组合 4 ~ 6 在振动信号频率 220 Hz、峰峰值 1 V 时的响应频谱。可以看到组合 4 和组合 6 的频谱存在较多噪声, 而组合 5 的频谱中噪声很少。原因在于螺旋铠装光缆的独特结构, 如第 2 节图 4 所示, 该光缆的光纤外部包裹有螺旋钢管、芳纶、不锈钢编织网, 这些构件结构松散、间隙大, 当光缆受到一定强度的振动后, 这些构件会相互碰撞、摩擦, 产生噪声, 从而影响光纤对振动信号的监测, 降低信噪比。



(a) 组合 4



(b) 组合 5



(c) 组合 6

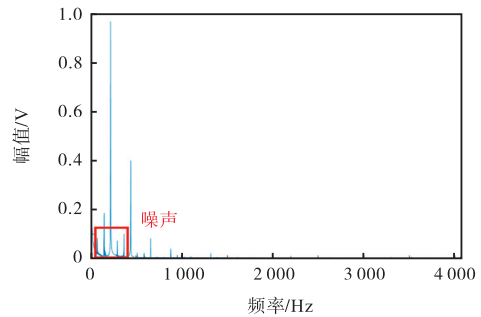
图 14 振动信号频率 220 Hz、峰峰值 1 V 时组合 4 ~ 6 的响应频谱

Fig.14 Spectra of combinations 4—6 response when vibration signal frequency is 220 Hz and the peak-to-peak value is 1 V

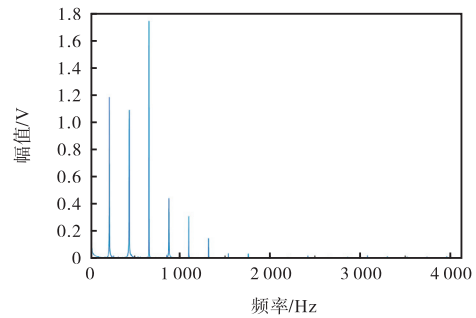
图 13(c) 中, 组合 7 的信噪比与电压的线性关系较好, 但是组合 8 和组合 9 的信噪比与电压没有确定

的数学关系, 并且 700 mV 之后组合 9 的信噪比随着电压的增大而减小。

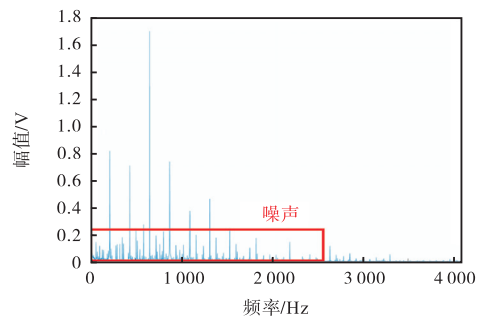
图 15 是组合 7 ~ 9 在振动信号频率 220 Hz、峰峰值 1 V 时的响应频谱。组合 9 的信噪比下降的原因是该组合使用的光缆在受大振幅信号作用时会产生噪声, 组合 8 虽然不产生噪声但该组合与电压的线性关系不好, 组合 7 在大振幅信号作用时存在少量噪声, 所以该组合的信噪比曲线在 700 mV 之后变化率减小。



(a) 组合 7



(b) 组合 8



(c) 组合 9

图 15 振动信号频率 220 Hz、峰峰值 1 V 时组合 7 ~ 9 的响应频谱

Fig.15 Spectra of combinations 7—9 response when vibration signal frequency is 220 Hz and the peak-to-peak value is 1 V

综上所述, 实验所研究的 9 个光缆组合中, 组合 5 的幅值响应与电压的线性关系最好, 组合 7 在小振幅信号区域幅值响应线性良好但不适合测量振幅过

大的振动信号,组合 1 的幅值响应线性较差. 其余 6 个组合与振动信号幅值没有确定的数学关系,不适合做振幅测量.

5.4 光缆结构组合对断铅信号响应的特点

自然界中,比起稳定的周期信号,非周期信号更加普遍. 前文已经研究了 9 个光缆结构组合对周期信号的响应特性,这里以自动铅笔芯折断的信号为监测对象,研究各光缆组合对非周期信号的响应特性. 制造断铅信号示意如图 16 所示,在承载光缆的铁质横杆上压断铅笔芯制造断铅信号,每个光缆组合重复 5 次断铅实验. 图 17~19 是各光缆组合测到的

断铅信号时域波形,图 20 是断铅信号频谱.



图 16 制造断铅信号示意

Fig.16 Schematic of generating lead break signal

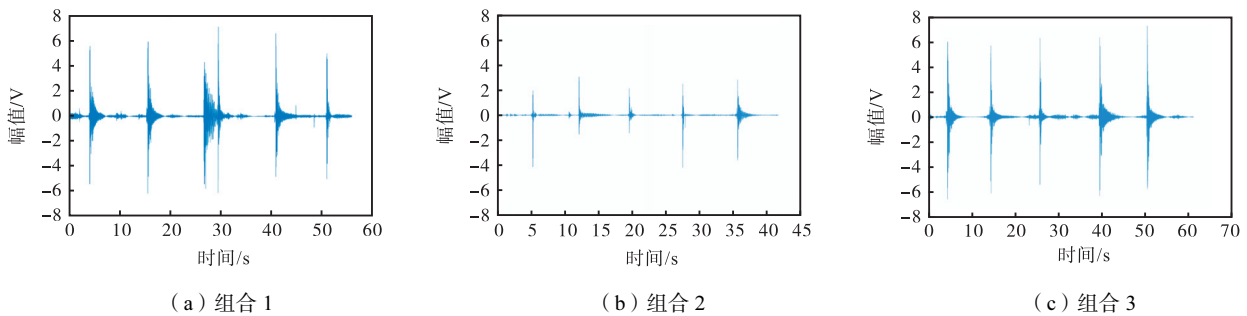


图 17 光缆组合 1~3 的断铅信号时域波形

Fig.17 Time-domain waveforms of lead break signal of optical cable combinations 1—3

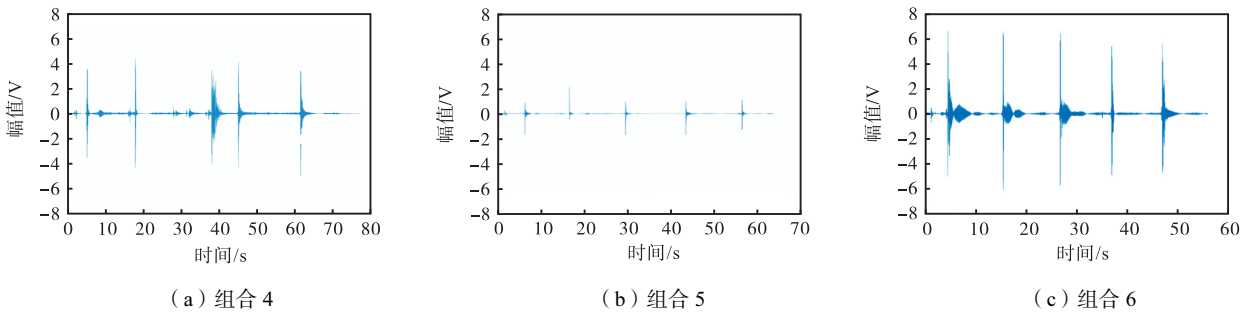


图 18 光缆组合 4~6 的断铅信号时域波形

Fig.18 Time-domain waveforms of lead break signal of optical cable combinations 4—6

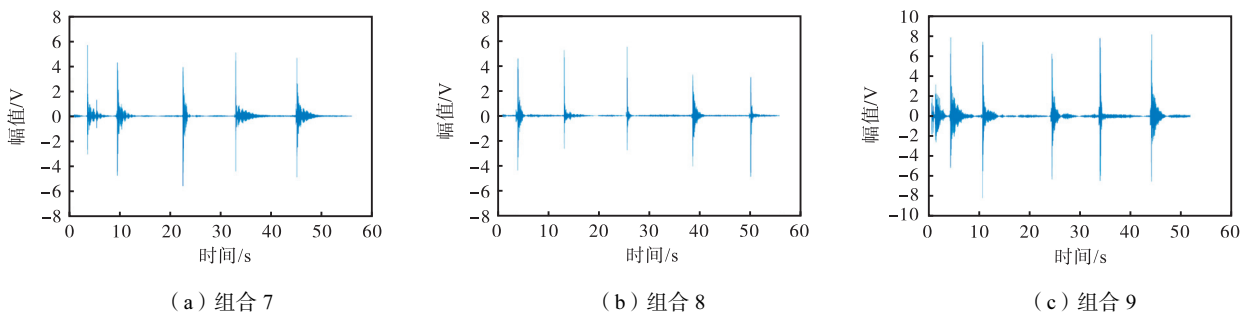


图 19 光缆组合 7~9 的断铅信号时域波形

Fig.19 Time-domain waveforms of lead break signal of optical cable combinations 7—9

频域分析发现,各组合所测断铅信号的频率成分没有显著差异,如图 20 所示. 时域上,取每组实验中的 5 个断铅信号时域波形的峰峰值(V_{pp})计算平均值,各组合的峰峰值如图 21 所示,平均峰峰值如表 8

所示.

由图 21 和表 8 可知,组合 5 测得的断铅信号平均峰峰值最小,数据离散程度也最低. 原因是油脂和钢丝等构件的存在很大程度上阻隔了振动信号的传

播,使得作用在光纤上的能量比其他光缆的更小,而且组合 5 是相同光缆结构的组合,灵敏度较不同光缆结构的组合更低.



图 20 断铅信号频谱

Fig.20 Spectra of lead break signal

组合 3、组合 6、组合 9 测得的断铅信号平均峰峰值都比较大,其中组合 9 的平均峰峰值最大,灵敏度最高.此 3 个组合均是不同光缆结构的组合,灵敏度较相同光缆结构的组合更高.前文的结论在这里得到了更多的验证.

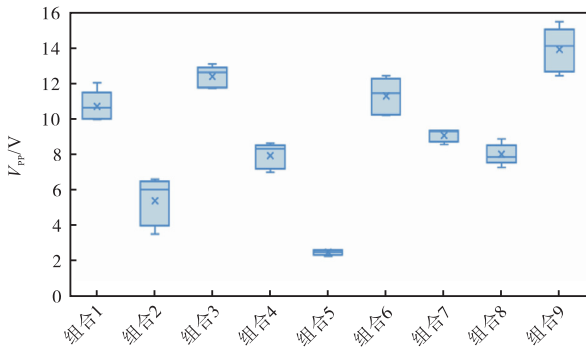


图 21 断铅信号峰峰值

Fig.21 V_{pp} of lead break signal

表 8 各组合的断铅信号平均峰峰值

Tab.8 Average V_{pp} of the lead break signal for each combination

组合	断铅信号平均峰峰值 V_{pp}/V
1	10.754 2
2	5.456 4
3	12.407 0
4	7.980 4
5	2.556 8
6	11.323 8
7	9.123 8
8	8.036 4
9	13.920 8

6 结 论

为探索不同结构的光缆对马赫-曾德尔分布式光纤振动传感系统性能的影响,本文选取了 4 种具有典型结构的光缆,两两相配共组成 9 种组合,实验研究了每个光缆结构组合对周期信号和非周期信号的响应特性.研究结论如下.

(1) 本文研究的所有光缆结构组合频率响应的信噪比与周期信号频率间没有明显的数学关系,系统的频率响应较平坦,信噪比变化范围在 45 ~ 90 dB 之间.但异构干涉臂灵敏度皆明显高于同构干涉臂的灵敏度,原因是结构不同的光缆在受到同一个外界信号作用时,两条干涉臂间的相位差会比结构相同的光缆更大.

(2) 注油光纤不适合测量高频信号和大振幅信号.当振动信号频率大于 220 Hz 时,由于油膏的特性会使信号衰减,传感系统的线性变差、灵敏度降低.但是如果在有高频噪声的环境中测量低频信号时,注油光纤可以使 MZ-DVS 系统更不容易受高频信号干扰,有一定的高频滤波作用.

(3) 组合 1、组合 5、组合 9 的幅值响应信噪比与振动信号的幅值间存在明显的线性关系,其中组合 5 的线性最好.螺旋铠装光缆和 GFRP 单芯光缆受到大振幅信号作用时会产生噪声,但是在同等振幅下 GFRP 单芯光缆的噪声远少于螺旋铠装光缆.此外,钢丝铠装光缆很难产生噪声.

(4) 本文研究的所有光缆结构组合对断铅信号的响应在频域上均没有明显差异.从幅值响应上看,组合 9 的灵敏度最高,组合 3、组合 6 的灵敏度次之.组合 5 的灵敏度最差,该组合不适合用于检测断铅类型的信号.

本文以马赫-曾德尔分布式光纤振动传感系统为基础设计了 9 个光缆结构组合,详细研究了每个组合对周期信号和非周期信号的频率响应特性与幅值响应特性.研究结果可为实际工程中设计马赫-曾德尔分布式光纤传感系统时选择光缆提供参考作用.

参考文献:

[1] Ding Z Y, Liu T G, Meng Z, et al. Note: Improving spatial resolution of optical frequency-domain reflectometry against frequency tuning nonlinearity using non-uniform fast Fourier transform[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 066110.

- [2] 陈沁楠. 双马赫-曾德型分布式光纤振动传感若干关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
Chen Qinnan. Research on Some Key Technologies of Dual Mach-Zehnder Distributed Optical Fiber Vibration Sensing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015(in Chinese).
- [3] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5778.
- [4] Sladen A, Rivet D, Ampuero J P, et al. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid earth interactions on seafloor telecom cables[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5777.
- [5] Cheng F, Chi B X, Lindsey N J, et al. Utilizing distributed acoustic sensing and ocean bottom fiber optic cables for submarine structural characterization[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5613.
- [6] Kobayashi Y, Uematsu Y, Mochiji S, et al. A field experiment of walkaway distributed acoustic sensing vertical seismic profile in a deep and deviated onshore well in Japan using a fibre optic cable deployed inside coiled tubing[J]. *Geophysical Prospecting*, 2020, 68(2): 501-520.
- [7] Bouffaut L, Taweessintanon K, Kriesell H J, et al. Eavesdropping at the speed of light: Distributed acoustic sensing of baleen whales in the Arctic[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 901348.
- [8] 贾盼龙, 王蕊, 谷国剑, 等. 管道泄漏报警定位技术应用综述[J]. *仪器仪表用户*, 2021, 28(5): 97-100.
Jia Panlong, Wang Rui, Gu Guojian, et al. Summary of application of pipeline leakage alarm locating technology[J]. *Instrumentation Users*, 2021, 28(5): 97-100 (in Chinese).
- [9] Rao Y J, Wang Z N, Wu H J, et al. Recent advances in phase-sensitive optical time domain reflectometry(Φ -OTDR) [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 1-30.
- [10] Liang S, Zhang C X, Lin B, et al. Influences of semiconductor laser on fibre-optic distributed disturbance sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(12): 124217.
- [11] 陈文静. 双偏振光纤干涉仪噪声与温度的影响及其抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Chen Wenjing. Research on Influence and Suppression Methods of Noise and Temperature of Dual-Polarization Optical Fiber Interferometer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019(in Chinese).
- [12] 吴俊, 陈伟民, 谭靖, 等. 偏振态退化对双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位性能的影响分析[J]. *激光杂志*, 2008, 29(6): 33-35.
Wu Jun, Chen Weimin, Tan Jing, et al. Analysis on the influence of polarization state degradation to the performance of Mach-Zehnder distributed optical-fiber sensing system[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(6): 33-35(in Chinese).
- [13] Huang J W, Chen Y C, Song Q H, et al. Distributed fiber-optic sensor for location based on polarization-stabilized dual-Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24820-24832.
- [14] 尚玉峰. 非等振幅高斯光束干涉研究[J]. *大学物理实验*, 2023, 36(4): 41-46.
Shang Yufeng. Study on interference of Gaussian beams with unequal amplitudes[J]. *Physical Experiment of College*, 2023, 36(4): 41-46(in Chinese).
- [15] Sun Q Z, Liu D M, Wang J, et al. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6): 1538-1544.
- [16] Yin G L, Fu Q J, Yang P X, et al. Direction-discriminating torsion sensor based on optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108461.
- [17] Shang Y, Wang C, Ni J S, et al. Discussion on the sensitivity of optical cables based on distributed acoustic sensing[J]. *Optical Review*, 2019, 26(6): 659-663.
- [18] Spikes K T, Tisato N, Hess T E, et al. Comparison of geophone and surface-deployed distributed acoustic sensing seismic data[J]. *Geophysics*, 2019, 84(2): A25-A29.
- [19] Butter C D, Hocker G B. Fiber optics strain gauge[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(18): 2867-2869.

- [20] 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 Guoqi, Cao Danping, Yin Jiaojian, et al. Numerical simulation of detecting seismic signals in DAS wells[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 311-320 (in Chinese).
- [21] 彭飞. 相位敏感型光时域反射仪及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
Peng Fei. Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry & Applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015 (in Chinese).
- [22] 陈纲, 廖理几, 郝伟. 晶体物理学基础[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007.
Chen Gang, Liao Liji, Hao Wei. Fundamentals of Crystal Physics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese).
- [23] 舒同林, 李凤斌. 弹性力学中拉梅问题的讨论[J]. 力学与实践, 1991, 13(4): 58-59.
Shu Tonglin, Li Fengbin. Discussion on Lamé's problem in elasticity[J]. Mechanics in Engineering, 1991, 13(4): 58-59 (in Chinese).
- [24] 张旭莘, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73.
Zhang Xuping, Zhang Yixin, Wang Liang, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 11-73 (in Chinese).
- [25] 黄晓炜, 陈坚. 光缆结构与压扁冲击性能初探[J]. 现代传输, 2019(6): 74-76.
Huang Xiaowei, Chen Jian. Study on structure and flattening impact performance of optical cable[J]. Modern Transmission, 2019(6): 74-76 (in Chinese).
- [26] Xiao Z L, Jing X J, Cheng L. The transmissibility of vibration isolators with cubic nonlinear damping under both force and base excitations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(5): 1335-1354.
- [27] 周云. 黏弹性阻尼减震结构设计理论及应用[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2013.
Zhou Yun. Design Theory and Application of Viscoelastic Damping Structure[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2013 (in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)