光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022110504

基于多模干涉与马赫-曾德尔干涉效应的光纤振动传感器研究

田　野[1]，赵　敏[2*]，张　东[1]，任国志[1]，王晓航[2]，刘　哲[2]

（1. 国家管网集团西部管道有限责任公司，乌鲁木齐 830000；2. 北京声创新技术发展有限责任公司，北京 100085）

摘　要： 提出了一种结合多模干涉效应的新型马赫-曾德尔干涉仪（MZI）结构，并将其用于振动检测研究。与基于两个3 dB单模光纤耦合器（OC）级联而成的传统MZI不同的是，文章采用多模OC与单模OC共同构成MZI。利用芯径为105 μm的阶跃折射率分布多模光纤与芯径为62.5 μm的渐变折射率分布多模光纤分别采用熔融拉锥法制作了分光比为1∶1的3 dB多模OC，并将其分别与3 dB单模OC构建了MZI，同时为了对比，也利用两个单模OC构建了MZI。分别对采用不同类型OC构建的MZI中的一个干涉臂施加振动干扰，并使用示波器进行数据采集和分析。结果表明，基于芯径为105 μm的阶跃折射率分布多模耦合器构建的MZI具有最大的可检测振动频率范围，为1～20 kHz，同时在振动频率偏差和振动频率鉴别能力上也表现最优。

关键词： 振动检测；马赫-曾德尔干涉仪；多模干涉；多模光纤；光纤耦合器

中图分类号： O329　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0053－05

Research on Fiber Optic Vibration Sensor Based on Multi-mode Interference and Mach-Zehnder Interference

TIAN Ye[1], ZHAO Min[2], ZHANG Dong[1], REN Guozhi[1], WANG Xiaohang[2], LIU Zhe[2]

(1. West Pipeline Company of PipeChina, Wulumuqi 830000, CHN;
2. Beijing Sheng Chuang New Technology Development Co. Ltd., Beijing 100085, CHN)

Abstract: A novel Mach-Zehnder interferometer (MZI) structure combined with multi-mode interference is proposed and applied to vibration detection. Different from the traditional MZI which was based on the cascade of two 3-dB single-mode optical coupler (OC), the MZI was composed of multi-mode OC and single-mode OC. A 3 dB multimode OC with the coupling ratio of 1∶1 was fabricated using the step index multimode fiber with a core diameter of 105 μm and the graded index multimode fiber with a core diameter of 62.5 μm, and the MZI was constructed with the multimode OC and another 3 dB single-mode OC respectively. For comparison, two single-mode OCs were also used to construct the MZI. Vibration was applied to an interference arm of the MZIs constructed with different types of OCs, and data acquisition and analysis were carried out by an oscilloscope. The results show that the MZI based on a step index multimode coupler with a core diameter of 105 μm has the largest detectable vibration frequency range of 1～20 kHz, and has the best performance in vibration frequency deviation and vibration frequency discrimination ability.

Key words: vibration detection; Mach-Zehnder interferometer; multimode interference; multimode fiber; fiber coupler

收稿日期：2022－11－05.

*通信作者：赵　敏 **E-mail:** zhao.min@tsinghua.org.cn

0 引言

振动测量作为安全检测的重要手段，在轨道交通、大型基础设施[1]及工程建设[2]等日常安全评估领域中具有重要应用。随着振动检测应用的日益广泛，检测环境越发复杂，这对振动传感器提出了越来越高的要求。光纤振动传感器[3]具有耐腐蚀性、灵敏度高、动态范围广、不受电磁干扰、可远程操作等优点，成为近年来安全技术领域的研究热点。

光纤振动传感器主要采用光强、相位、偏振、频率和波长等作为被调制光波参数。其中光强度调制型振动传感器的原理简单、成本低廉、体积小，但其精度低、稳定性差；基于 FBG 的光纤振动传感器通常通过波长调制实现振动检测[4-5]，需借助外部机械增敏装置[6]，将振动转化为光栅波长变化，导致传感器的体积增大，并且波长检测也比较复杂。相比之下，相位调制型光纤振动传感器通过光纤结构的设计，将振动引起光纤内光波相位的变化，其灵敏度很高，但是由于目前各类光电探测器都不能直接感知光波强度，通常利用干涉技术将相位变化转化为强度变化再进行检测。基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和迈克尔逊干涉仪的光纤振动传感器，同时存在参考臂和探测臂，可以进行大范围的振动检测[7-8]或局部检测；基于法布里珀罗腔的光纤振动传感器[9-10]，采用一根光纤进行光传输，结构紧凑，不需参考臂，不存在参考臂受干扰带来误差问题，但仅适用于小范围局部检测。萨格纳克干涉仪也可以用于振动检测[11]，文献[12]报道了一种基于探针型的萨格纳克干涉型光纤振动传感器，实现了对 8.1～11.3 kHz 频率范围内的振动信号的测量。

近年来，基于单模-多模-单模光纤结构的光学传感器因其成本低、易于制造等优势而引起了广泛关注[13-14]。这种结构也可以用于振动检测。Wu 等[15]设计了一款基于弯曲单模-多模-单模(SMS)结构的振动传感器，通过振动改变 SMS 结构的弯曲半径，实现了透射功率在 1 Hz～12 kHz 频率范围内随振动的改变。

本文通过改进传统 MZI 的结构，将多模干涉与 MZI 相结合，提出了基于多模光纤耦合器(Optical Coupler，OC)和单模光纤耦合器制作的新型 MZI 振动传感器结构。对不同类型多模光纤 OC 制作的 MZI 的振动检测效果进行了对比研究，分别从振动检测频率范围、振动频率检测准确度，以及振动频率鉴别能力三个方面进行了对比。实验结果表明，采用芯径为 105 μm 的阶跃折射率分布多模光纤制成 OC 构建的 MZI，获得的频率检测范围最大，可检测 20 kHz 以内的振动，同时在频率检测准确度以及频率鉴别能力方面也优于传统的 MZI 结构。

1 传感器原理

本文提出的振动传感器结构是通过级联两个 3 dB 光纤 OC 形成 MZI 结构来实现的，如图 1 所示，其中第一个 3 dB 耦合器 OC1 由单模光纤(SMF-28e，Corning)通过熔融拉锥技术制作而成，因此其尾纤也是单模光纤，第二个耦合器 OC2 是采用多模光纤制作而成，因此其尾纤是多模光纤。为了研究不同多模光纤对振动检测效果的影响，采用不同类型的多模光纤进行了耦合器的制作。在实验中控制两干涉臂长尽量相等。制作的三个 MZI 所用耦合器的光纤类型如表 1 所示。从表 1 中可以看出，三个 MZI 都是以单模光纤 3 dB 耦合器作为输入端，经过 3 dB 耦合器的 1∶1 的分光后，如果第二个 OC 是由多模光纤制成，如 MZI1 和 MZI2 的情况，则光进入多模光纤后会激发起多个高阶模式，这些高阶模式经过一段多模光纤的传输后，会在第二个耦合器中进行干涉耦合，因此该结构将多模干涉与 MZI 干涉原理结合在一起，使其对光纤所经历的振动干扰更加敏感，从而可获得优于传统 MZI 干涉的振动传感效果。

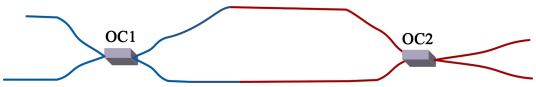


图 1 结合多模干涉的新型 MZI 振动传感器结构(标红部分为多模光纤)

表 1 制作 MZI 的光纤类型

编号	制作 OC1 的光纤类型	制作 OC2 的光纤类型
MZI-1	单模光纤	包层直径为 125 μm，芯径为 105 μm 的阶跃折射率分布多模光纤
MZI-2	单模光纤	包层直径为 125 μm，芯径为 62.5 μm 的渐变折射率分布多模光纤
MZI-3	单模光纤	单模光纤

2 实验与讨论

2.1 实验系统

振动检测实验系统的结构如图 2 所示，包含一

台单频激光器、一个由振动控制器控制的振动台、两个 OC(OC1 和 OC2)级联构成的 MZI、一个光电探测器(PD)和一台带宽为 350 MHz 的示波器(OSC)。其中单频激光器的中心波长为 1 550.76 nm，出射功率为～10 mW，线宽小于 10 MHz，振动台的振动频率可以在 20～20 kHz 连续调节，PD 在 1 550 nm 处的响应度为 0.9 A/W，饱和光功率为－14 dBm。激光器输出的激光经过可调光衰减器接入 OC1 的一个输入端从而接入 MZI 结构，将一段长度约为 7 cm 的 OC2 的尾纤固定在振动台上，用于感知振动台的振动频率。OC2 的一个输出端口连接至 PD 实现光电转换，PD 输出的电压信号由 OSC 采集并显示，使用 OSC 的频谱分析功能可以进一步实时显示 OSC 测得的频率值。

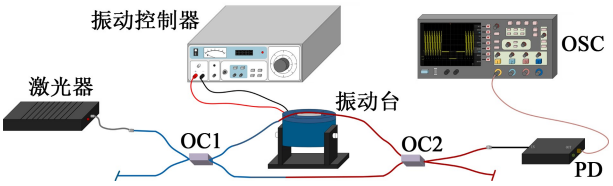
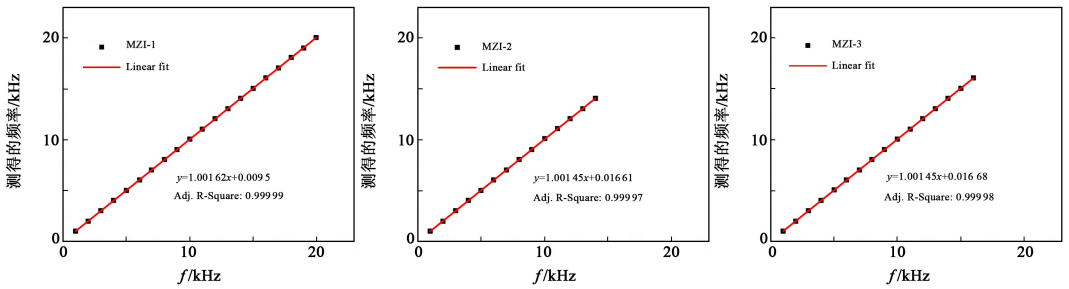


图 2　实验装置

2.2　实验结果与讨论

在实验室环境下，分别使用上述制作的三个 MZI 开展振动检测传感实验。实验时，调整可调光衰减器使得进入光电探测器的功率为－20 dBm 以防止过高的功率损坏光电探测器，振动台的振动频率从 1 kHz 增加到 20 kHz，步进长度为 1 kHz，所得的频率测量结果如图 3 所示。整体来看，示波器测得的频率随振动台施加频率的增加而增加，拟合优度均超过 0.999 9，线性度较好，表明所提出的三个 MZI 均可以实现振动频率检测。尽管拟合优度较高，但是三个 MZI 的测量频率范围各不相同。MZI-1，MZI-2 和 MZI-3 的频率测量范围分别为 1～20 kHz，1～14 kHz 和 1～16 kHz，分别如图 3(a)、(b)和(c)所示，表明在 20 kHz 频率范围内的较高频率处三个 MZI 的敏感程度不同，即 105 μm 芯径的阶跃型折射率多模光纤可以感受到 20 kHz 频率范围内的较高频率，而 8.2 μm 芯径的阶跃型折射率单模光纤次之，62.5 μm 芯径的渐变折射率多模光纤最差。原因可能是因为阶跃型折射率光纤对外界扰动更加敏感，而渐变型折射率光纤对外界扰动敏



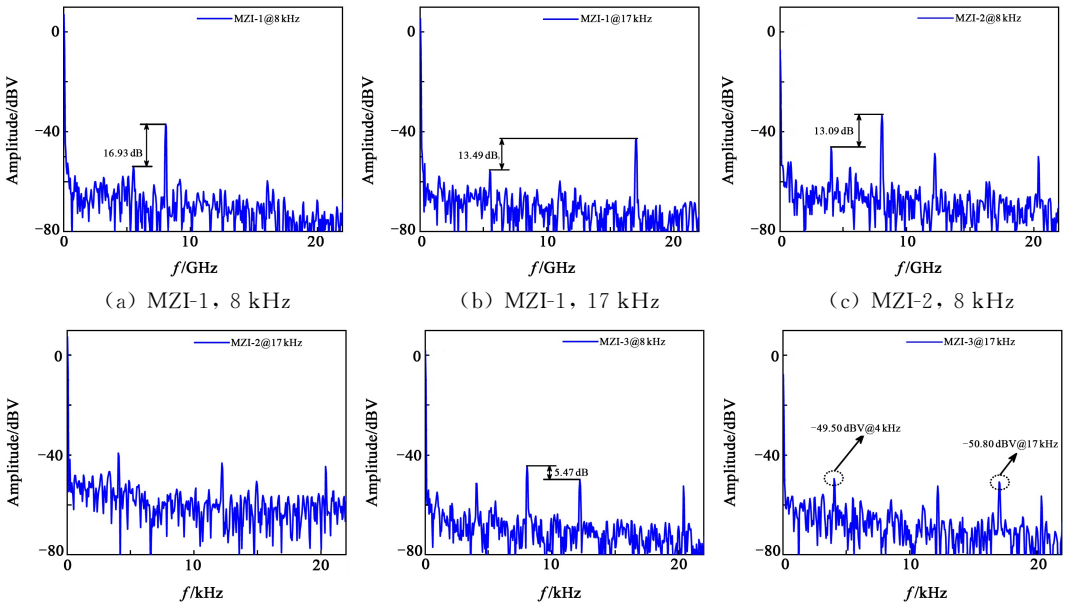
(a) MZI-1　　(b) MZI-2　　(c) MZI-3

图 3　测得的频率随振动台施加频率的变化

感性较差，并且同样使用阶跃型折射率光纤时，芯径越大，光纤对外界扰动也会更加敏感。

对 MZI-1 的多模干涉臂施加 8 和 17 kHz 频率时，使用示波器的频谱分析功能记录的频谱如图 4(a)和(b)所示，使用 MZI-2 时，记录的频谱如图 4(c)和(d)所示，使用 MZI-3 时，记录的频谱如图 4(e)和(f)所示。在实验中，零频外峰值强度最高频率被认为是被测频率，并且频谱中主峰和次级峰的强度差差别越大，说明主峰的鉴别能力越强。当施加频率为 8 kHz 时，使用 MZI-1，MZI-2 和 MZI-3 获得的主峰和次级峰的强度差分别为 16.93，13.09 和 5.47 dB，如图 4(a)，(c)和(e)所示，因此使用 MZI-1 测量特定频率时的主峰鉴别能力最强。使用 MZI-1 测量时，当施加频率由 8 kHz 变为 17 kHz 时，主峰和次级峰的强度差由 16.93 dB 下降至 13.49 dB，如图 4(a)和(b)所示，表明在高频处该 MZI 的频率鉴别能力有所下降。使用 MZI-2 测量时，当施加频率为 8 kHz 时，主峰和次级峰的强度差为 13.09 dB，当施加频率为 17 kHz 时，观测不到与施加频率对应的频率峰值，因此 MZI-2 的测量范围在较高频率处受限。使用 MZI-3 测量时，当施加频率为 8 kHz 时，主峰和次级峰的强度差为 5.47 dB，当施加频率为 17 kHz 时，17 kHz 处的频率峰值为－50.80 dBV，小于 4 kHz 处的频率峰值－49.50 dBV，表明测量较高频率值时仍然无法分辨。因此从振动频率鉴别能力角度来看，MZI-1 的性能也是最优的，尽管 MZI-2 的振动

频率测量范围较窄，但是振动频率鉴别能力相较于 MZI-3 而言较强。



(a) MZI-1，8 kHz (b) MZI-1，17 kHz (c) MZI-2，8 kHz

(d) MZI-2，17 kHz (e) MZI-3，8 kHz (f) MZI-3，17 kHz

图 4 使用示波器记录的频谱

使用本文提出的三个 MZI 结构进行振动频率测量后得到的各个振动频率下的频率偏差如图 5 所示。MZI-1，MZI-2 和 MZI-3 的最大频率偏差分别为 0.057，0.057 和 0.067 kHz，最小频率偏差为 0.007，0.002 和 0.001 kHz。因此从最大振动频率偏差角度考虑，MZI-1 和 MZI-2 的振动频率偏差小于 MZI-3 的振动频率偏差，显示出更为准确的振动频率测量能力。

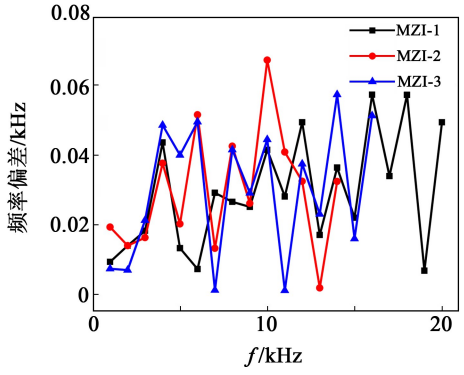


图 5 三个 MZI 测量的频率偏差

3 结论

本文提出了一种基于级联单模 OC 和多模 OC 构成的新型 MZI 型振动传感器，分别利用芯径为 105 μm 的阶跃折射率分布多模光纤、芯径为 62.5 μm 的渐变折射率多模光纤以及 SMF-28e 光纤制作了分光比为 1∶1 的 3 dB OC，并制作了三个振动传感器(MZI-1，MZI-2 和 MZI-3)。在实验室条件下分别对三个振动传感器的第二个 OC 的一段尾纤施加 1～20 kHz 的振动干扰，并使用示波器对输出信号进行采集和处理。实验结果表明 MZI-1，MZI-2 和 MZI-3 可测量的振动频率范围分别为 1～20 kHz，1～14 kHz 和 1～16 kHz，即 MZI-1 的可测量振动频率范围相较于 MZI-2 和 MZI-3 更宽；从测量振动频率准确度的角度考虑，MZI-1，MZI-2 和 MZI-3 的测量的振动频率偏差分别为 0.057，0.057 和 0.067 kHz，即 MZI-1 测量振动频率的准确度较高；从振动频率鉴别能力角度来看，MZI-1 的性能也是最优的，尽管 MZI-2 的振动频率测量范围较窄，但是振动频率鉴别能力相较于 MZI-3 而言较强。总的来说，这种基于阶跃折射率分布多模光纤耦合器制成的多模干涉结合 MZI 干涉的振动传感结构可以获得优于传统 MZI 干涉结构的振动频率测量范围，同时振动频率测量准确度和振动频率鉴别能力都有所提升，该研究工作对振动传感器的设计提供了一种新的思路。

参考文献：

[1] Ye X W，Su Y H，Han J P，et al. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology：A comprehensive review[J]. Scientific World J.，2014，2014：652329.

[2] Kageyama K，Ohsawa I，Kanai M，et al. Development of a new fiber-optic vibration sensor and its application to structural

health monitoring of composite structures[J]. Proc. SPIE, 2003, 5046: 115-123.

[3] Ruzicka M, Jabloncik L, Dejdar P, et al. Acoustic and mechanical vibration sensor: new approach for monitoring of fiber optic infrastructures[C]// 2022 45th Inter. Conf. on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2022: 21975748.

[4] Wu H, Lin Q J, Han F, et al. Design and analysis of high-frequency fiber Bragg grating vibration sensor [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(2): 025108.

[5] Zhang S, He J, Yu Q, et al. Multi-scale load identification system based on distributed optical fiber and local FBG-based vibration sensors[J]. Optik, 2020, 219: 165159.

[6] 张发祥，吕京生，姜邵栋，等. 高灵敏抗冲击光纤光栅微振动传感器[J]. 红外与激光工程，2016，45(8)：61-66.
Zhang Faxiang, Lv Jingsheng, Jiang Shaodong, et al. High sensitive fiber Bragg grating micro vibration sensor with shock resistance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 61-66.

[7] Tong Y, Li Z, Wang J, et al. Improved distributed optical fiber vibration sensor based on Mach-Zehnder-OTDR[C]// 2017 Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2017: 1-2.

[8] Yuan H, Wang Y, Zhao R, et al. An anti-noise composite optical fiber vibration sensing system[J]. Opt. Lasers Eng., 2021, 139: 106483.

[9] Zhang Q, Zhu T, Hou Y, et al. All-fiber vibration sensor based on a Fabry-Perot interferometer and a microstructure beam[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2013, 30: 1211-1215.

[10] Wu S, Wang L, Chen X, et al. Flexible optical fiber Fabry-Perot interferometer based acoustic and mechanical vibration sensor[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(11): 2216-2221.

[11] Culshaw B. The optical fibre Sagnac interferometer: An overview of its principles and applications[J]. Meas. Sci. Technol., 2006, 17: R1-R16.

[12] 曹世才，邹正峰，付　雷，等. 萨格纳克型的光纤振动传感器[J]. 光学技术，2019，45(5)：586-589.
Cao Shicai, Zou Zhengfeng, Fu Lei, et al. Fiber optic vibration sensor based on Sagnac effect[J]. Optical Technique, 2019, 45(5): 586-589.

[13] Li C, Ning T, Wen X, et al. Strain and temperature discrimination using a fiber Bragg grating and multimode interference effects[J]. Opt. Commun., 2015, 343: 6-9.

[14] Luo Y, Xia L, Yu C, et al. Multi-parameter optical fiber sensor based on enhanced multimode interference[J]. Opt. Commun., 2015, 344: 120-124.

[15] Wu Q, Semenova Y, Wang P, et al. The use of a bend singlemode-multimode-singlemode (SMS) fiber structure for vibration sensing[J]. Opt. & Laser Technol., 2014, 63: 29-33.

作者简介：

田　野(1987—)，男，高级工程师，主要从事管道完整性研究工作；

赵　敏(1966—)，男，光电工程专业博士，研究员，主要从事输油气管道安全检测与监测技术研究。