

海底电缆状态分布式光纤监测技术研究综述

马国明, 秦炜淇, 王思涵, 胡靖, 阎洁, 王伟

(新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Review of Submarine Cable Condition Monitoring Based on Distributed Optical Fiber Sensing

MA Guoming, QIN Weiqi, WANG Sihan, HU Jing, YAN Jie, WANG Wei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: With the rapid development of offshore wind power, submarine cables have been widely used. However, maintaining them poses significant challenges and involves lengthy cycles, resulting in considerable economic losses from even a single fault. Therefore, it is important to achieve accurate condition monitoring and early warning of submarine cables. In this paper, the differences between submarine cables and land cables are first analyzed in terms of length, structure, operation mode, and operating environment. The analysis shows that submarine cable accidents often occur in the cable, and the randomness of the fault location is high. Thus, distributed sensing is needed to monitor the submarine power cables. Next, methods for improving the distance and accuracy of distributed optical fiber sensing (DOFS) are reviewed and analyzed, such as topology improvement, pulse coding, noise reduction algorithms, and distributed amplification, and the main progress of DOFS in submarine cable condition monitoring is summarized. Then, the applications of different DOFS methods in the submarine cable monitoring projects are analyzed. Finally, the difficulties and opportunities in distributed optical fiber monitoring for submarine cable condition are summarized.

KEY WORDS: offshore wind power; submarine cable; condition monitoring; distributed optical fiber sensing

摘要: 随着海上风电的快速发展, 海底电缆得到广泛应用, 但其维修难度大、周期长、单次故障造成的经济损失巨大, 因此, 海底电缆状态的准确监测与预警十分重要。该文首先对比海底电缆与陆地电缆在长度、结构、绝缘可靠性、运行

环境等方面的区别, 分析表明, 海底电缆本体事故较多, 故障发生位置随机性较高, 需要进行分布式的状态监测。其次, 梳理拓扑改进、脉冲编码、降噪算法、分布式放大等提升分布式光纤传感距离与精度的方法, 总结分布式光纤传感在海底电缆状态监测方面的主要进展。然后, 分析不同分布式光纤传感方法在海底电缆工程综合监测系统中的应用情况。最后, 论述海底电缆状态分布式光纤监测研究的机遇和挑战。

关键词: 海上风电; 海底电缆; 状态监测; 分布式光纤传感

0 引言

海上风电具有风能资源好、发电效率高、不占陆地土地资源等优势, 近年来发展迅速。全球风能理事会预计, 2031 年全球海上风电累计装机容量将达到 370 GW。2021 年我国新增海上风电装机量占世界的 80%, 总装机容量世界第一^[1]。随着海上风电长距离输电需求的增长, 海底电缆近年来取得了长足的发展, 随着远海风电的发展, 海底电缆长度逐年增加, 2019 年欧洲在建海上风电离岸平均距离达到 59 km^[2], 未来我国海上风电平均离岸距离有望超过 100 km。

但在实际运行中, 由于海底电缆运行环境复杂, 地震、滑坡、船只锚害、海洋生物等破坏情况时有发生。据不完全统计, 近年来发生海底电缆事故 500 余次(含通讯电缆)。由于海底电缆维修难度大、周期长, 单次故障损失高达数亿元, 社会影响巨大。因此, 对海底电缆状态进行在线监测与预警具有重要意义。

在电缆监测方面, 肖世杰等^[3]详细介绍国内外海底电缆工程的发展历程, 分析了交、直流海底电

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377144, 52222706, U24B2095); 北京市自然科学基金项目(3222058)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377144, 52222706, U24B2095); Natural Science Foundation of Beijing (3222058).

缆的经济性和适用性,介绍了交联聚乙烯绝缘海底电缆本体及软接头技术特点及海底电缆现场绝缘试验技术的研究进展,主要聚焦海底电缆的绝缘设计与出厂试验,针对运行过程中的海底电缆在线监测讨论较少。冀大雄等^[4]分析了人工瞭望、巡视、海洋“拖鱼”、潜水员下潜、水下机器人、海岸监测站等针对海底电缆状态的主要检测与监测手段,指出上述方法的实施需要大量专业技术人员,且这些方法对海洋复杂环境的适应性低,存在应用局限性,但针对海底电缆的在线监测讨论较少。

海底电缆状态检测与监测的主要对象包括过热、变形、锚害、位置监测、局部放电等。主要包括电磁学检测方法、船舶监测技术与分布式光纤监测方法^[5]。在电磁学检测方法方面,包括时域反射技术、频域反射技术、电桥检测技术、磁场检测技术等,前 3 种方法通常难以在线监测,只能在离线情况下测量掌握电缆缺陷位置,后一种方法需要在缺陷位置附近游弋,实施难度大。由于海底电缆的多数故障来自于船舶活动(起锚导致的海底电缆损伤等),所以工程上也将船舶监测技术作为预防海底电缆事故的重要手段,包括船舶自动识别系统、视频系统和雷达系统,上述方法监测量少,监测精度差。

由于海底电缆大部分已经内置了光纤,可以方便地实现分布式在线监测,因此,近年来主要的研究热点逐渐转向分布式光纤监测。分布式光纤监测具有无需停电、监测距离远、空间分辨率高、精度高等优点。侯帅等^[6]归纳了利用光纤进行海底电缆温度、应变和扰动监测的原理与工程应用情况,对海底电缆载流量监测方面的综述有较好的参考意义,但对如何进一步提高监测距离、精度、频率等关键参量缺乏定量的综述对比。

由于海底电缆状态分布式光纤监测涉及绝缘、结构、材料力学、水声学、光学传感以及状态评估等多方面的知识,不同学科知识之间存在一定的知识壁垒,限制了这一技术的快速发展。为促进海底电缆状态分布式光纤监测技术的发展,本文首先对比分析海底电缆与陆地电缆在多个方面的区别,明确海底电缆状态监测需求;其次,在介绍分布式光纤传感原理的基础上,梳理分析近年来分布式光纤传感在传感距离与传感精度方面的主要提升方法;再次,总结分布式光纤传感在海底电缆状态监测方面的发展情况;然后,讨论目前海底电缆工程综合监测系统应用案例。最后,探讨海底电缆状态分布

式光纤监测研究的机遇与挑战。

1 海底电缆特点与运维难点

由于海底电缆与陆地电缆的运行环境不同,两者在长度、结构、绝缘可靠性、损坏原因等方面存在区别。

1) 在长度方面,目前陆地电缆工程多在 20 km 以内,而随着远海风电的发展,海底电缆长度有望突破 100 km。

2) 在接头结构方面,与陆地电缆常见的冷缩接头不同,在海底电缆中多使用软接头(如图 1 所示)。软接头的外径与本体基本相同,制造的关键点和难点包括导体银焊接、绝缘注塑、硫化等,技术难度较大,长期运行后,海底电缆接头容易发生故障^[7]。

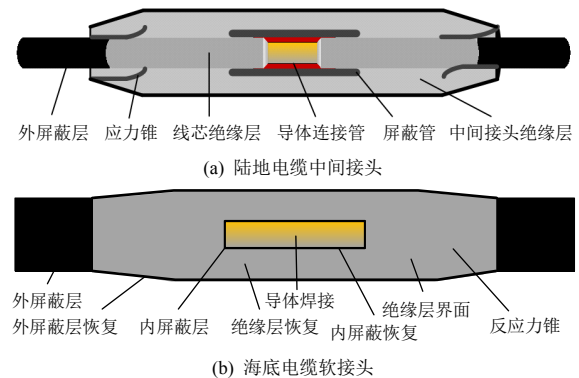


图 1 陆地电缆中间接头与海底电缆软接头结构对比

Fig. 1 Structural comparison of land cable intermediate joint and submarine cable soft joint

3) 在本体结构方面,海底电缆(下文简称海缆)需要在水下环境中运行,与陆地电缆(下文简称陆缆)采用致密挤包的塑料外护套不同,海缆外层多采用丙烯纤维绳绕包,导致其径向水密性较差。为解决这一问题,海底电缆多使用铅套等来确保径向阻水性。铅套是区别海缆和陆缆的重要特征之一。

4) 在换位布置与接地方面,由于海缆在海底运行,无法在线路中间进行类似于陆缆的换位布置及接地,只能在海缆两端登陆段各自互联接地。因此,当单芯交流海缆导体通过工作电流时,产生的交变磁场会在海底电缆的铠装和金属护套上产生感应电动势。由于在海底难以换位,导致感应电动势引发环流,增大环流损耗,扩大海缆温升,限制海缆载流量,同时容易造成单芯海缆故障^[3]。

5) 在绝缘可靠性方面,大部分陆缆是交流电缆,而远海输电工程多使用直流电缆。相比交流电缆,电缆在直流电场作用下,绝缘介质中与不同材

料的交界面会积聚空间电荷,畸变空间电场,加速绝缘老化,产生绝缘缺陷,长期运行后可能导致绝缘击穿,影响海缆安全稳定运行,因此相比交流电缆,海底直流电缆更需要进行绝缘状态监测^[3,8]。

6) 在损坏原因方面,陆缆与海缆的危害来源有较大区别,由于海缆运行环境复杂,环境造成的故障较多。据统计,大西洋通信电缆损伤中捕鱼作业造成的损伤占52%,锚害损伤占18%,海底电缆的自由悬挂和敷设船作业损伤占4%,地震或泥沙运动造成的损伤占3%,鱼类咬伤占2%,其他原因占18%。依据3家海底电缆运行商(SubCom, Alcatel Submarine Network, Global Marine System)的统计,在2007—2018年间的海缆事故中,船舶抛锚导致的占43%,渔船捕鱼作业导致的占33%,地质变化导致的占10%,磨损导致的占10%,其余4%^[9]。IEEE海缆相关铺设规范指出,渔船作业拉网与拖锚将导致电缆的外力破坏,严重情况可以导致电缆断裂,在其统计结果中,锚害(如图2所示)被认定为造成海缆损坏的首要原因^[10]。



图2 海底电缆锚害损伤照片

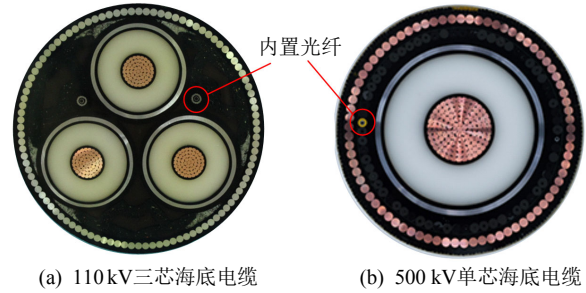
Fig. 2 Anchor damage of submarine cable

对于陆地电缆,故障多发生在电缆接头部分,本体方面的事故相对较少,因此在监测方面将重点放在电缆中间接头部分。但由于长度、结构、绝缘可靠性、损坏原因等方面的区别,海底电缆本体方面事故较多,故障发生位置随机性较高,需要对整个电缆进行分布式的状态监测。

2 海底电缆状态分布式光纤监测方法

绝大部分海底电缆为满足通讯需求已经内置了光纤(如图3所示),不需对海底电缆进行额外改变就可实现海底电缆状态的分布式光纤监测。

海底电缆分布式光纤监测包括分布式光纤传感以及应用传感数据进行海缆状态评估两个主要方面,其核心难点是分布式光纤传感。分布式光纤



(a) 110 kV三芯海底电缆 (b) 500 kV单芯海底电缆

图3 典型海底电缆截面图

Fig. 3 Cross section diagrams of typical submarine cables

传感主要根据光纤中瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射信号的变化实现信息感知。瑞利散射是入射光在光纤密度不均匀或折射率起伏的位置向四周发生的弹性散射,布里渊散射和拉曼散射是入射光分别与声学声子和光学声子相互作用的非弹性散射。

光纤散射中瑞利散射光频率与入射光相同,不受温度和应变影响;布里渊散射光分为斯托克斯光与反斯托克斯光,二者波长和功率均受温度和应变的影响;拉曼散射光同样分为斯托克斯光与反斯托克斯光,其中只有反斯托克斯光功率受温度影响。

利用上述散射效应可以分别实现温度、应变、振动、声音等信号的传感,如图4所示^[11-12]。由于监测对象与解调方法不同,形成了多种分布式光纤传感方法,包括光时域反射技术(optical time domain reflectometry, OTDR)、光频域反射技术(optical frequency domain reflectometry, OFDR)、拉曼光时域反射技术(Raman optical time domain reflectometry, ROTDR)、布里渊光时域反射技术(Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR)、布里渊光时域分析技术(Brillouin optical time domain analyzer, BOTDA)、相位敏感光时域反射技术(phase-sensitive optical time domain reflectometry, ϕ -OTDR)等。图5所示为海底电缆状态分布式光纤监测的研究架构。

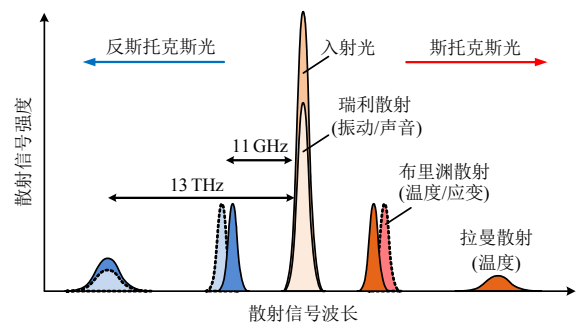


图4 光纤中典型散射频谱分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of typical scattering spectrum in optical fiber

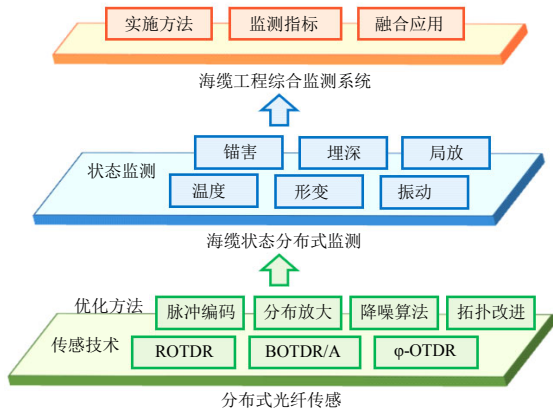


图 5 海底电缆状态分布式光纤监测研究架构

Fig. 5 Research framework of distributed optical fiber monitoring for submarine cable condition

在海底电缆监测中主要采用 ROTDR 技术、BOTDR/BOTDA 技术及 ϕ -OTDR 技术。掌握光纤温度、应变、振动情况。在此基础上，通过耦合关系反演海底电缆温度、形变、振动、锚害、埋深、局放等状态参量的在线监测。最后，通过将分布式光纤监测系统与其他监测系统融合，构建海底电缆工程综合监测系统。

2.1 海底电缆拉曼光时域反射温度监测

2.1.1 基本原理

拉曼散射分布式温度传感系统在电缆温度监测中得到了广泛的应用。拉曼测温是通过对比背向拉曼散射光的斯托克斯与反斯托克斯光分量，获知沿光纤的温度情况(如图 6 所示)。此类系统具有光路简单，定位精度高等优点。

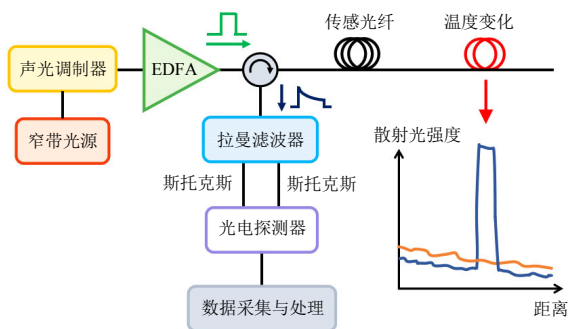


图 6 拉曼光时域反射温度传感原理

Fig. 6 Temperature sensing principle of Raman optical time domain reflectometry

然而，单模光纤中自发拉曼散射光的强度通常比入射泵浦脉冲的峰值功率低 60~70 dB，而光学非线性限制了最大可用泵浦功率^[13]。为了提高拉曼散射强度，传感光纤多选择具有高非线性阈值功率和较大后向散射系数多模光纤，但由于模间色散引起的空间分辨率恶化，系统的传感范围通常被限制在

10 km 以内^[14-15]。

1983 年，J. Dakin 等^[16]首次提出利用拉曼背向散射光实现分布式温度测量。由于当时光纤技术尚未成熟，光路中大量使用了空间光元器件。之后，随着光通讯技术的快速发展，加快了光纤元器件的发展，拉曼分布式测温技术也快速发展起来。为满足现场应用需求，研究人员开展了测温精度提升与传感距离拓展方面的研究。

2.1.2 测温精度提升方法

在测温精度提升方面，由于拉曼散射系数与光纤衰减系数在光纤中不同部位存在差别，限制了温度的测量精度。

由测量原理可知，拉曼斯托克斯光与拉曼反斯托克斯光的波长差在 200 nm 左右。由于不同波长的光在光纤中的衰减系数不同，如果直接按照测量到的光强进行计算，容易因光纤衰减系数不同导致误差。为解决上述问题，K. Suh 提出使用两个激光器进行校准的方法(如图 7(a)所示)，通过调控，使主激光器的反斯托克斯拉曼散射与副激光器的斯托克斯拉曼散射波长相同^[17]。用光开关分别接入两个不同的激光器，通过这种方法可以有效的降低不同波长光衰减系数不同造成的温度测量误差。

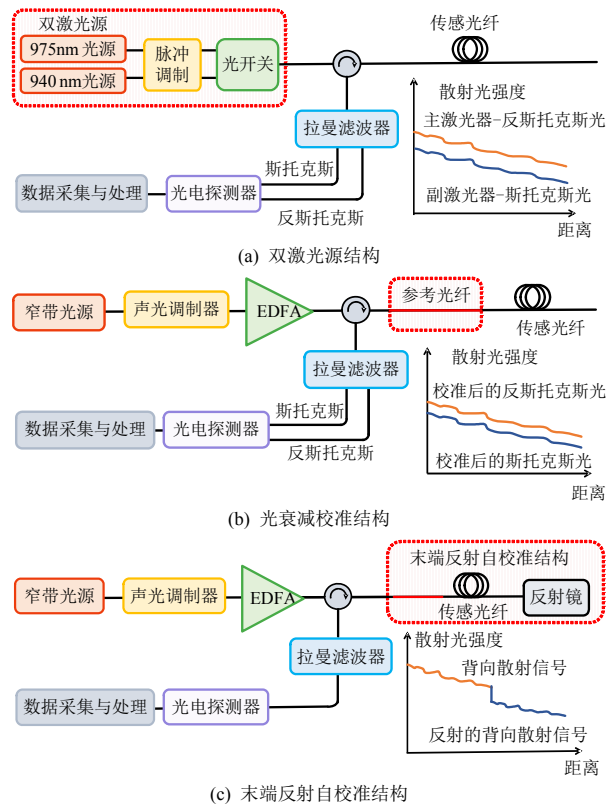


图 7 ROTDR 中光纤衰减差异补偿方案

Fig. 7 Compensation schemes for attenuation difference of ROTDR

为解决沿光纤长度拉曼散射系数不一致的问题, A. Morana 等^[18]通过提前的测量标定获得沿光纤长度不同位置的拉曼散射系数(如图 7(b)所示)。但由于已投运光纤存在弯曲、老化、衰减等问题, 难以应用。为解决已投运光纤中拉曼散射系数与光纤衰减系数沿光纤长度不一致的问题, 2010 年, D. Hwang 等^[19]提出一种自校准的测量拓扑。在传感光纤末端增加一个反光镜, 在测量时, 通过对比前向泵浦激光的背向散射反斯托克斯光与反光镜

反射回来泵浦激光的背向散射反斯托克斯光, 消除系数不一致造成的影响, 仅根据反斯托克斯光就可以准确获得温度(如图 7(c)所示)。

2.1.3 传感距离拓展方法

在提升信噪比进而拓展传感距离方面, 最简单的办法是对多次测量结果进行平均, 但会造成测量时间与信噪比之间的矛盾。为提高分布式拉曼传感的信噪比, 主要开展了编码降噪与算法降噪两方面的研究(如图 8 所示)。

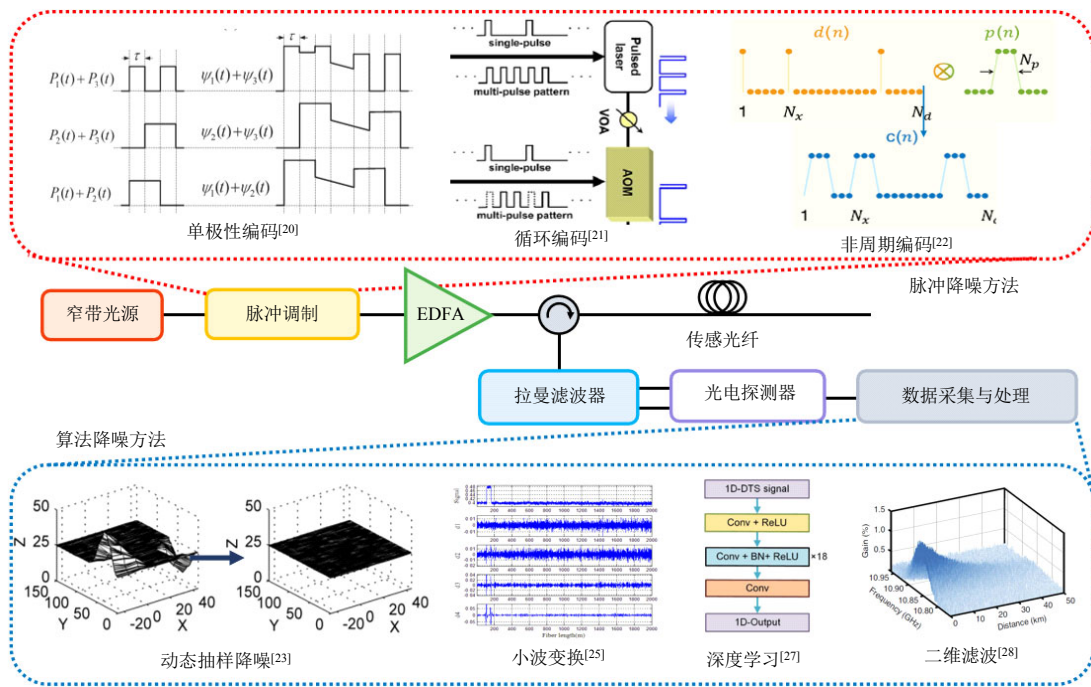


图 8 ROTDR 脉冲降噪及算法降噪方法

Fig. 8 Pulse denoising and algorithm denoising method of ROTDR

1) 脉冲编码技术。

传统上, 为增大信噪比, 只能增大光强, 但这将导致光纤的非线性效应, 增大噪声。脉冲编码降噪技术的核心是改变输入脉冲的波形, 虽然增多了注入光纤的光子数量, 但并未达到非线性效应的阈值, 因此可以避免非线性噪声。传统输入脉冲为单一方波, 而编码技术将注入特定顺序的一组脉冲, 例如编码为 101、总宽度为 3 μs 的注入脉冲, 即为第 1 μs 持续输出光信号, 第 2 μs 不输出光信号, 第 3 μs 持续输出光信号。脉冲编码降噪首先注入不同编码的脉冲, 在解耦时依据注入的编码顺序解耦获得温度信息, 可以显著提高信噪比。2004 年, D. Lee 等^[20]首次提出将 Simplex 编码技术应用于拉曼分布式温度传感, 提高了 4.5 dB 的信噪比, 实现了 37 km 的温度传感, 但其空间分辨率较差, 仅为 17 m。2011 年, M. Soto 等^[21]引入了 71 位的循环编码实现了

26 km 传感距离、1 m 空间分辨率和 3℃ 的温度分辨率。此后, 2020 年, X. Sun 等^[22]提出一种新的非周期性平铺解码技术, 实现了 40 km 传感距离和 1.9℃ 测温精度的分布式拉曼传感。

2) 数字信号处理算法降噪技术。

在算法降噪方面, 主要是对测量结果进行数据处理, 这种方法的优点是不需要增加硬件投入。目前研究包括动态抽样降噪^[23]、小波降噪^[24-26]、降噪卷积神经网络^[27]等。特别是文献^[28]提出, 可以将不同次一维测量结果拼接成二维图像, 引入图像处理二维滤波降噪的方法显著提高了信噪比。

2.1.4 海底电缆拉曼光时域反射温度监测研究进展

在海底电缆拉曼温度监测方面, 电力公司与光学传感公司合作开展了一定的研究。1995 年, 日本关西电力公司与藤仓公司开发了集成有多种光

缆的 6.6 kV 三芯交联聚乙烯海底电缆^[29]，温度感知光纤安装在两相电缆之间的填充层内，由聚乙烯垫片和护套保护。机械试验表明，安装过程的电缆弯曲导致的光纤损失较小，不影响温度测量。开展了大电流实验，掌握了光纤温度与电缆芯温度之间的耦合关系。相比电缆安装在空气环境下，由于海底电缆安装环境的导热性能好，水下安装时，光纤温度与电缆芯温度更为接近(如图 9 所示)。在上述基础上，最终在日本和歌山县实现了 6.2 km 海底电缆的温度监测。

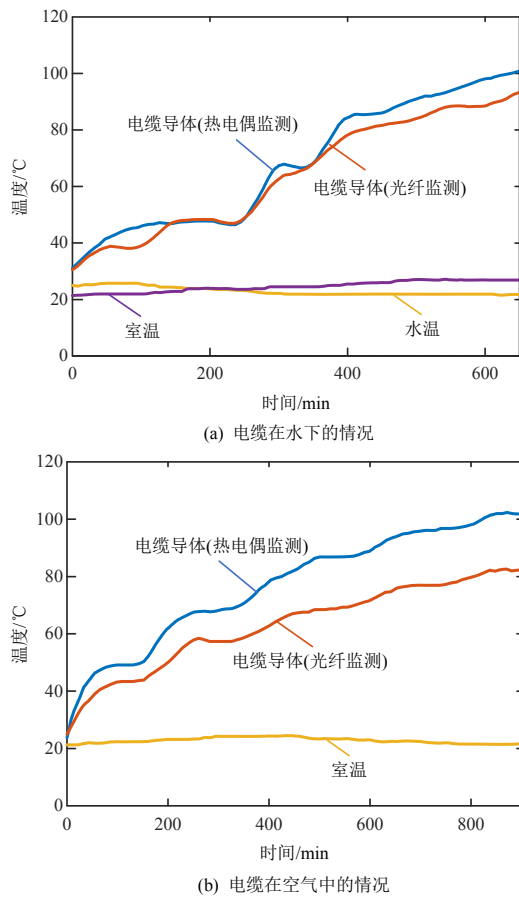


图 9 海底电缆中光纤测得温度与导体温度的关系
Fig. 9 Relationship between temperature measured by optical fiber and that of conductor in submarine cable

1999 年，日本关西电力公司的 T. Hara 等^[30]利用双端拉曼测温技术实现了 54 km 长、500 kV 直流海底电缆的温度监测。为实现远距离测量，将光源波长从 1 310 nm 调整为 1 550 nm，降低了光纤衰减系数，测温精度达到 1℃，空间分辨率为 5 m；开展了模拟海底环境的电缆温升试验，由于光纤安装位置与聚乙烯层很接近，结果表明，两者的温度测量结果差别很小，可以利用分布式光纤温度传感结果计算获得电缆运行温度情况。

受限于温度测量的距离以及只能进行温度单

一状态量的监测，海底电缆拉曼光时域反射温度监测应用较少，需要通过进一步与其他方法的结合拓展监测距离以及监测状态量。

2.2 海底电缆布里渊光时域反射/分析温度及应变监测

2.2.1 基本原理

拉曼光时域反射技术只能实现温度测量，与之相比，布里渊光时域反射技术与布里渊光时域分析技术可以实现温度和应变的传感，近年来该领域研究成果较多^[31-32]。

布里渊光时域反射技术通过解调光纤中的背向自发布里渊散射光完成温度和应变的传感，在传感光纤两端分别打入脉冲泵浦光和连续探测光，利用光纤中的受激布里渊散射完成温度和应变的传感(如图 10 所示)。布里渊散射的功率和频移会受到光纤温度和应变的影响，通过求解式(1)，可以获得光纤的温度和应变变化^[33]。

$$\begin{bmatrix} \Delta \nu_B(T, \epsilon) \\ \Delta P_B(T, \epsilon) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\nu,T} & C_{\nu,\epsilon} \\ C_{P,T} & C_{P,\epsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $\Delta \nu_B(T, \epsilon)$ 为频移的变化量，MHz； $\Delta P_B(T, \epsilon)$ 为布里渊散射功率的变化量，mW； $C_{\nu,T}$ 、 $C_{\nu,\epsilon}$ 分别为布里渊频移随温度和应变的变化系数； $C_{P,T}$ 、 $C_{P,\epsilon}$ 分别为布里渊功率随温度和应变的变化系数； ΔT 、 $\Delta \epsilon$ 分别为温度变化量和应变变化量。

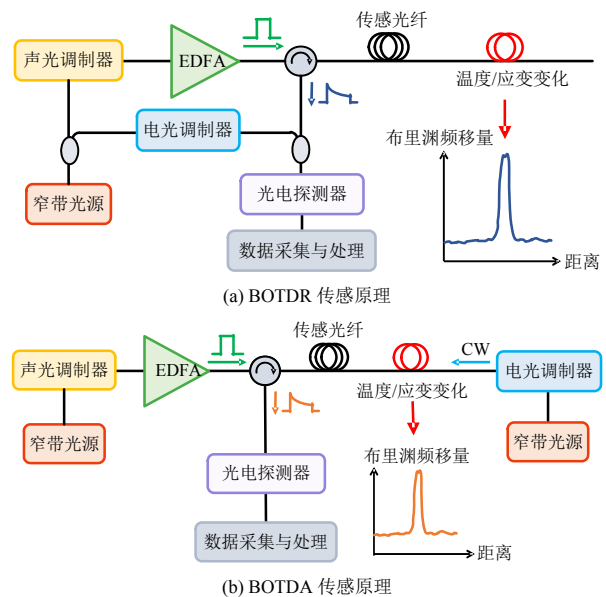


图 10 BOTDR 和 BOTDA 温度及应变传感原理
Fig. 10 Temperature and strain sensing principles of BOTDR and BOTDA

BOTDR 具有单端测量的优点，但自发布里渊散射信号较小，传感距离与精度低于 BOTDA。

BOTDA 通过引入反向连续探测光激发光纤中的受激布里渊散射,增大了信噪比、延拓了传感距离,但需构成复杂环形系统,占用双倍光通道。

1989年,日本芝浦工业大学 T. Horiguchi 等和英国肯特大学 D. Culverhouse 等^[34-35]分别测量了光纤中的受激布里渊散射信号,证明了其频移量和传感光纤应变、温度变化成正比,验证了布里渊散射用于光纤应变、温度传感的可行性。1990年, T. Kurashima 等^[36]提出基于受激布里渊散射的 BOTDA 传感方法。1993年, T. Kurashima 等^[37]提出基于自发布里渊散射的 BOTDR 传感方法。

测量距离对于海底电缆状态监测至关重要。为拓展传感系统的测量距离,主要采用脉冲编码技术和采用分布式拉曼放大 (distributed Raman amplification, DRA) 技术两种方式以改善长距离测量的信噪比。

2.2.2 脉冲编码技术

与拉曼分布式传感类似,光脉冲编码技术相比其他技术更好地改善了 BOTDR/BOTDA 信噪比。首先,在发射端对发送的脉冲激光进行编码,接收端则反变换解码。与相同脉冲注入、平均多次测量结果相比,这种编码技术可以在相同的平均次数条件下取得更高信噪比,即不降低监测时间间隔的情况下提高测量精度,因此受到了极大关注。前沿研究方向是探索不同编码与解码技术与信噪比的关联关系,优化编码方案进一步拓展监测距离。

2008年, M. Soto 等^[38]提出一种 Simplex 码的布里渊分布式温度测量方法,使用 127 位的 Simplex 码脉冲实现了 21 km 传感距离、40 m 空间分辨率的温度测量。2010年, M. Soto 等^[39]进一步发展了该技术,使用 511 位 Simplex 码脉冲,实现了 50 km、1 m 空间分辨率的温度测量。2012年,梁浩^[40]比较了不同编码长度对系统信噪比的影响,采用 Hadamard 码实现了 37 km 距离下的分布式光纤温度传感,降低了系统对光源功率和放大器的要求。2022年,文献^[41]进一步拓展了编码数量,在相同脉冲光强的情况下,采用 512 位随机编码将探测距离从 4.93 km 拓展到 64.76 km。

2.2.3 分布式光放大技术

在分布式拉曼光放大方面,主要通过应用泵浦光源分布式注入能量,提高布里渊散射信号的强度,不同的放大原理如图 11 所示。2003年,南安普敦大学 T. Newson 等^[42]将拉曼放大技术引入

BOTDR 中,实现了 50 km 传感距离、15 m 空间分辨率的温度测量。2010年,饶云江等^[43]提出分布式拉曼光放大方案,实验获得了 75 km 传感距离、10 m 空间分辨率、 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 的测量精度。2012年, M. Gonzalez-Herraez 等^[44]将此方法推广至二阶拉曼放大,实现了 100 km 传感距离、2 m 空间分辨率的分布式测量。2013年,饶云江等^[45]提出利用随机光纤激光(Random fiber laser, RFL)实现分布式拉曼放大方法,传感距离达到了 154.4 km,温度传感精度为 $\pm 1.4^\circ\text{C}$,空间分辨率为 5 m。2022年,杨智生等^[46]研究了混合拉曼放大与掺铒光纤放大的 BOTDA 距离延拓方法,将传感距离进一步延长至 200 km。对上述研究进行对比分析,结果如表 1 所示^[47]。可以看出,随着研究的不断发展,测量距离持续拓展,测量空间分辨率逐渐提高。

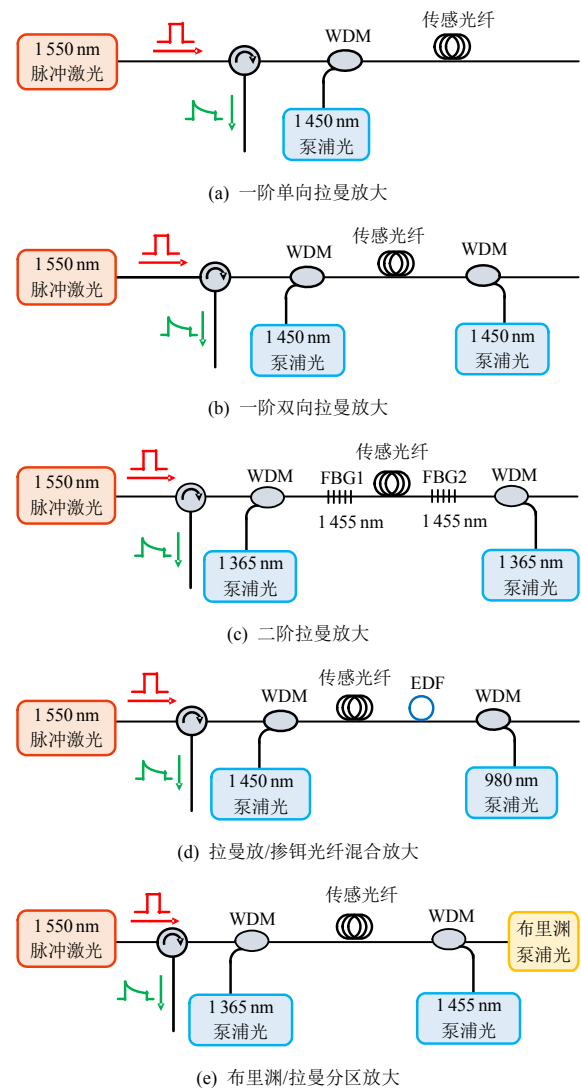


图 11 分布式光纤传感的分布式放大方案
Fig. 11 Distributed amplification schemes of distributed optical fiber sensing

表 1 BOTDR/A 传感距离延拓研究成果

Table 1 Research achievements in BOTDR/A sensor distance extension method

文献 年度	研究机构	方法	测量距 离/km	空间分 辨率/m
[38] 2008	聖安娜高等研究院	127 位 Simplex 码	21	40
[39] 2010	洛桑联邦理工学院	511 位 Simplex 码	50	1
[40] 2012	南京大学	512 位 Hadamard 码	50	1
[41] 2022	太原理工大学	512 位随机编码	64.76	2
[42] 2003	南安普敦大学	一阶前向拉曼放大	50	15
[43] 2010	电子科技大学	一阶双向拉曼放大	75	10
[44] 2012	阿尔卡尔大学	二阶拉曼放大	100	2
[45] 2013	电子科技大学	分布式拉曼放大	154.4	5
[46] 2022	北京邮电大学	拉曼放大与掺铒 光纤放大混合	200	2

2.2.4 海底电缆布里渊光时域反射/分析温度及应变监测研究进展

对于海底电缆的布里渊光时域反射/分析温度及应变监测，目前大部分应用的还是传统的传感拓扑与处理方法。

1996 年，洛桑瑞士联邦理工学院 L. Thévenaz 等^[48]利用布里渊频移的应变敏感性，通过测量光纤中的布里渊频移分布来监测水下通信光缆的应变情况，实现了日内瓦湖底 6.8 km 海底电缆的监测，空间分辨率为 20 m。

2009 年，蒋奇等^[49]使用 BOTDR 技术对 35 kV 三芯海底电缆试样进行温度和应变测量实验，结合有限元仿真掌握了三芯海底电缆运行温度、外力与传感光纤处温度、应变的关系。2014 年，李永倩等^[50]实现了 110 kV 海底电缆温度监测，其监测距离为 3.5 km，空间分辨率为 1 m，温度精度为 2℃。该成果在福建平潭成功应用，从应用结果可以看出，受到海缆安装环境的影响，在海缆布置后，出现了 5 处光纤布里渊频移较大的位置，这将影响测量结果，因此有必要在海底电缆铺设后且在电缆正式投运前，记录若干天的光纤布里渊频移数据，作为该系统的测量初始值。

2017 年，林晓波等^[51]通过有限元方法分析了船锚钩挂与光纤应变的耦合关系，掌握了特定情况下的钩挂判据；但仅是某种特定类型船锚导致海缆受力的结果，为建立不同类型机械损伤与分布式光纤应变传感结果之间的耦合关系，需要进一步的开展理论与试验验证。

2020 年，成永红等^[52-53]搭建了 500 kV 海底电缆岸上模拟实验平台，使用 BOTDA 技术监测海底电缆的表面温度，并将监测数据用于内部温度分布

计算优化。其研究实现了 31 km 500 kV 电缆的温度测量，其空间分辨率为 2 m，测温精度为 3℃。由于 BOTDA 系统在实际应用时需要在传感光纤两端分别放置传感设备，或将电缆中两路光纤末端熔接形成环路，因此该技术更适用于近距离岛屿供电电缆的温度/应变监测，对于远距离海上风电场应用受限。

当海底电缆上方的掩埋泥沙被海水冲刷后可能会形成悬挂的情况，在水流的作用下发生涡激振荡，导致海底电缆的疲劳寿命急剧下降^[54]。因此，对海底电缆埋深状态的监测至关重要。目前，对海底电缆埋深进行直接测量难度大、效率低。为此国内外提出可以基于分布式光纤温度测量结果进行埋深的反演。2018 年，NKT 公司 J. Lux 等^[55]利用分布式光纤监测实现了 40 km 155 kV 三芯海底交流电缆的埋深探测，其基础为分布式布里渊温度传感，传感空间分辨率为 3 m，测温精度为 0.5℃。尽管建立了埋深与温度、负荷电流之间的解析计算关系，但从现场测量结果看，其误差在 1 m 以上，需要进一步的优化。为此，郝艳捧等^[54]针对 ±500 kV 直流交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘海底电缆提出一种结合等效回路模型与分布式光纤测温的电缆埋深实时监测方法，建立了从内置光纤到外护套的等效热回路，利用 BOTDR 光纤温度测量结果计算外护套温度，然后根据 IEC 60287 标准中海底土壤热阻与埋深的关系计算海底电缆的埋深。可知，当埋深在 0.5~1.5 m 范围内时，在任何电流负载下，监测的最大误差不超过 8 cm。

对海底电缆 ROTDR、BOTDR 与 BOTDA 在线监测系统总结。一方面，在分布式光纤传感部分，从图 12 中可以看出，空间分辨率与监测距离

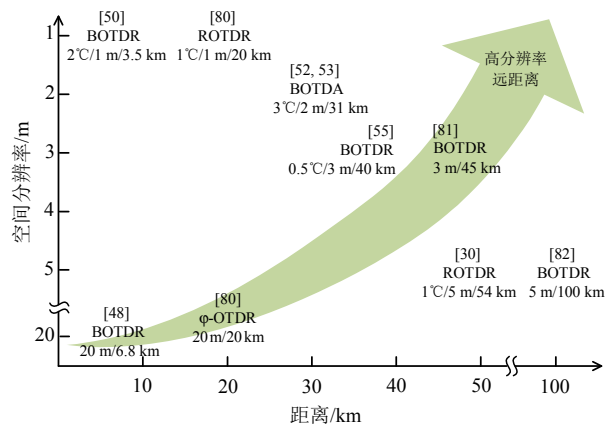


图 12 海底电缆分布式温度监测研究现状
Fig. 12 Status of submarine cable distributed temperature sensing technologies

之间存在明显的矛盾，实现远距离，高分辨率的海底电缆状态监测是未来的发展方向。以上先进的信噪比提升与距离拓展方法在海底电缆状态监测领域应用较少，这些研究可以为后续远距离海底电缆状态监测研究奠定必要基础。另一方面，在基于传感数据的海缆状态评估方面，温度的反演已经比较成熟；埋深的反演尽管起步晚，但精度也满足工程需求；需要进一步完善建立不同类型机械损伤与分布式光纤应变传感结果之间的耦合关系。

2.3 海底电缆相位敏感光时域反射特殊事件及局放监测

2.3.1 基本原理

ROTDR、BOTDR 与 BOTDA 技术只能实现稳

态状态量的监测，为实现锚害等暂态状态量的监测，需使用相位敏感光时域反射技术(ϕ -OTDR)。

1993 年，美国德州农工大学 H. Taylor 等率先提出相位敏感光时域反射技术^[56]，实现了长距离振动信号的传感，其基本原理如图 13 所示。窄带光源发出的探测光被声光调制器调制成光脉冲注入光纤中，经过掺铒光纤光放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)放大进入传感光纤。当外界振动作用于传感光纤时，对应振动位置的光纤长度与折射率发生变化，导致探测光脉冲范围内的背向瑞利散射光的干涉相位发生变化。在接收端主要采用干涉仪或 3×3 耦合器进行光信号探测，之后反演相位变化反应外界振动情况。

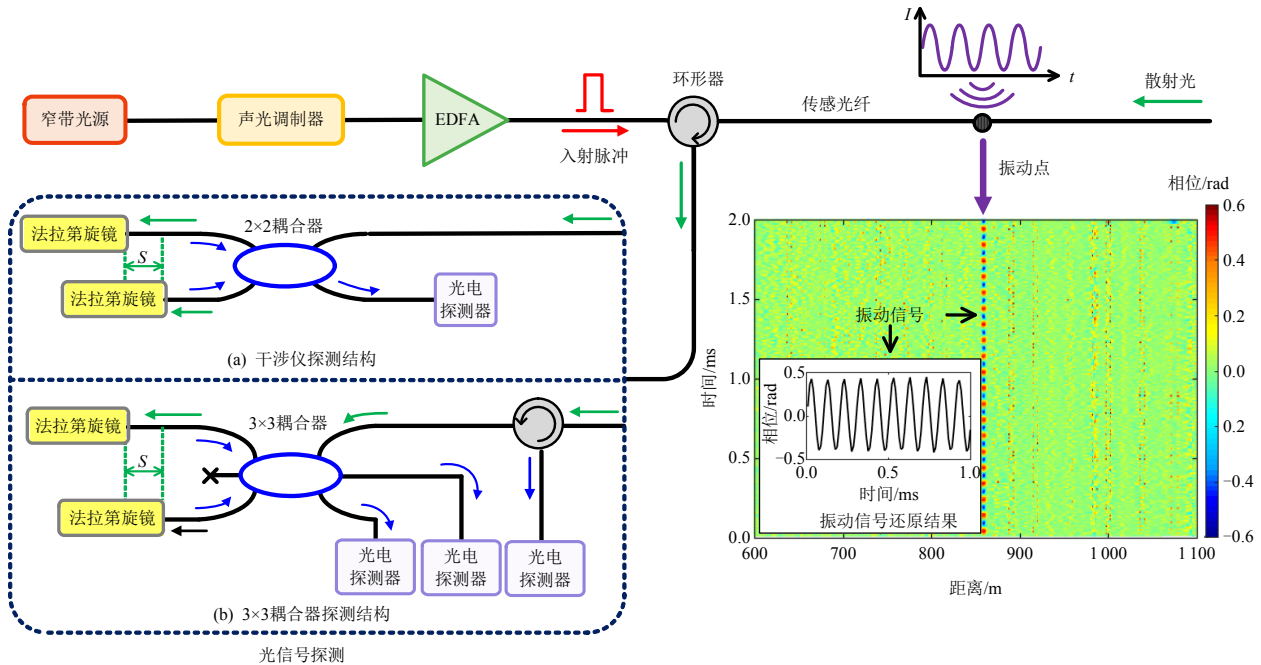


图 13 直接探测型相位敏感光时域反射技术(ϕ -OTDR)振动传感原理

Fig. 13 Vibration sensing principle of direct detection ϕ -OTDR

该技术可以根据注入光脉冲与接收到背向瑞利散射信号之间的时间差实现振动点定位，因此 ϕ -OTDR 技术具有分布式振动信号传感与定位的优点。近年来，研究人员在灵敏度、信噪比及检测频率等方面开展了卓有成效的研究，在油气管道、地理环境、安全监控等领域取得了良好的应用效果^[57-59]。

2.3.2 分布式光放大技术

在保持空间分辨率的基础上，如何延伸传感距离是 ϕ -OTDR 研究领域的热点问题。传统的 ϕ -OTDR 通过 EDFA 提高泵浦光功率来提高信噪比，但是当光强过大时容易引发受激布里渊散射，反而降低传感距离^[60]。

受到拉曼分布式放大在 BOTDR 传感中成功应

用的启发，研究人员开始将拉曼放大应用到 ϕ -OTDR 传感中，文献[61]利用一阶拉曼对泵浦光和信号光进行放大，实现了 62 传感距离、100 m 空间分辨率的分布式入侵监测。文献[62]在一阶拉曼放大的基础上，融合外差探测技术，将系统的传感距离提升至 103 km(15 m 空间分辨率)。2014 年，他们应用混合分区放大技术替代一阶拉曼放大，仍结合外差探测技术，实现了 175 km 的 ϕ -OTDR 传感^[47]。各种分布式光放大方法的原理如图 11 所示，这些方法虽可实现百 km 以上的传感距离，但检测频率较低，仅为百 Hz 级别。

2.3.3 频分复用技术

为提高系统检测频率，传统方法是降低脉冲间

的间隔,但这将导致相邻脉冲返回散射信号的叠加,降低传感距离。为解决这一问题,何祖源等^[63]将频分复用技术引入了 ϕ -OTDR,使用4个不同光频率的脉冲,在相同探测距离的情况下,将检测频率提升了4倍(如图14所示),且随着频分复用脉冲数量的增加,可进一步提高检测频率^[64-65]。

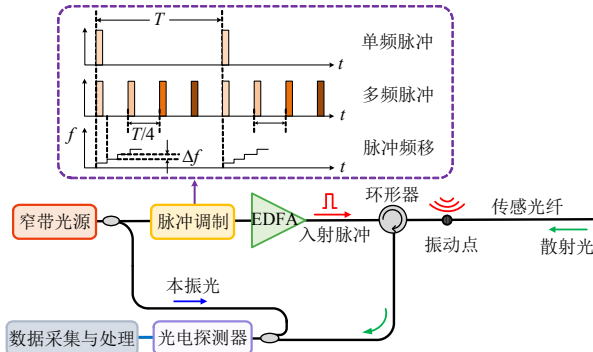


图 14 外差探测型相位敏感光时域反射技术传感原理

Fig. 14 Vibration sensing principle of heterodyne detection ϕ -OTDR

2.3.4 海底电缆相位敏感光时域反射特殊事件及局放监测研究进展

1) 通信光缆领域。

在海底通信光缆 ϕ -OTDR感知领域,研究人员改进 ϕ -OTDR技术,探索了光缆沿线落锚、挂缆、拖曳和抛锚等动态事件的监测方法,实现了百 km 传感距离、100 Hz 以下低频信号的监测^[66]。这一领域进一步快速发展,2019年,美国劳伦斯伯克利国家实验室 J. Ajo-Franklin 等^[58]提出利用海底光缆与 ϕ -OTDR实现海底事件探测的方法,实现了20 km、10 Hz 海底水声信号的监测。2021年,日本海洋科学与技术研究院的 H. Matsumoto 等^[67]改进 ϕ -OTDR技术,利用海底通信光缆中的光纤实现了50 km 传感距离下海底0.1 Hz 到数十 Hz 水声信号的监测。2021年,美国加州理工学院 Z. Zhan 等与 Google 公司合作,进一步提高该方法的监测范围,实现了10 000 km 海底通信光缆附近10 mHz 至5 Hz 地震信号的监测^[68]。

2) 海底电力电缆领域。

不同于海底通信光缆 ϕ -OTDR感知领域的研究,在海底电力电缆可靠性监测方面的研究较少,近年来才随着海底电力电缆的广泛应用而得到重视。2017年,德国联邦材料试验研究所的 K. Hicke 等^[69]将光纤布置在电缆外侧,在实验室实现了外部机械冲击的监测,其最大监测距离达到58.6 km,监测频带低于1.7 kHz。2018年,吕安强等^[70]实现

了35 kV 三芯海底电缆锚害 ϕ -OTDR监测,其监测频率为1.6 kHz。弗劳恩霍夫应用光学研究中心(Fraunhofer CAP)的 S. Sørensen^[71]实现了电缆温度与扰动事件的同时测量,其监测距离是83 m,监测频率是10 kHz。2019年,CIGRÉ TB 773^[72]介绍了海底电缆故障点 ϕ -OTDR测量方法,对于50 km 的监测距离,其监测频率均小于2 kHz。

尽管 ϕ -OTDR技术在海底电缆状态监测领域取得了上述进展,但集中于锚害等高强度、低频振动监测领域,对于长距离海底电缆的局放声波监测研究极少。德国联邦材料试验研究所 P. Rohwetter 等^[73]采用随机正交解调技术进行了增敏研究,解调出了 nC 级的局放信号,但该研究传感距离仅为400 m。2020年,徐阳等^[74]成功利用 ϕ -OTDR技术对电缆接头局放进行传感,将5个光纤环绕制在电缆接头上,测到了3.5 nC 的局放信号,该方法有效提高了传感灵敏度,但是该研究传感距离仅为700 m,无法满足长距离海底电缆局放监测需求。2022年,马国明等^[75]针对高压电缆局放分布式监测困难的问题,开发了双频探测脉冲 ϕ -OTDR分布式声传感方法,有效抑制了传统 ϕ -OTDR系统衰落噪声的影响,在1.1 km 的传感距离上测到了频率达71.36 kHz 的微弱火花放电声发射信号。在此基础上,在10 km 范围内实现了对10 kV 电缆接头缺陷引发局部放电的多点传感^[76]。2023年,文献^[77]进一步将两级光放大与上述双频探测脉冲的 ϕ -OTDR相结合,通过优化光放大器泵浦电流提高末端信噪比,将传感距离拓展到20 km,测量到127 pC 局部放电。

对上述海底通讯光缆、电缆 ϕ -OTDR分布式监测研究成果进行归纳总结,结果如表2所示。在 ϕ -OTDR传感中,传感距离、检测频率、传感灵敏度三者之间相互制约,尽管国内外已经开展了一些电缆、光缆 ϕ -OTDR监测研究,实现远距离锚害等低频振动的监测,但仍然无法同时满足百公里、数十 kHz、微小局放信号的监测需求。

3 海缆工程综合监测系统应用案例

随着国内外海上风电技术的快速发展,大量海底电缆投入使用,诸多状态监测手段取得了工程应用^[78],分布式光纤传感技术在海底电缆状态监测中体现出了良好的适用性和发展潜力^[6]。

3.1 国内海缆工程综合监测系统应用案例

福建平潭 110 kV 跨海输电工程应用综合监测

表2 海底通讯光缆、电缆 ϕ -OTDR 分布式传感研究成果Table 2 Research achievements in distributed sensing of submarine communication optical cables and power cables based on ϕ -OTDR

文献	年度	研究机构	测量对象	测量距离/km	监测频率	测量信号
[58]	2019	美国劳伦斯伯克利国家实验室	通讯光缆	20	10 Hz	地震
[66]	2021	南京大学	通讯光缆	127	100 Hz	落锚振动
[67]	2021	日本海洋科学与技术研究院	通讯光缆	50	0.1 Hz~数十 Hz	水声信号
[68]	2021	美国加州理工学院	通讯光缆	10 000	0.01~5 Hz	地震
[69]	2017	德国联邦材料试验研究所	电缆	58.6	1.7 kHz	机械冲击振动
[70]	2018	华北电力大学	电缆	0.66	1.6 kHz	锚害振动
[71]	2018	弗劳恩霍夫应用光学研究中心	电缆	0.083	10 kHz	电缆扰动
[72]	2019	CIGRE	电缆	50	2 kHz	机械冲击振动
[73]	2015	德国联邦材料试验研究所	电缆	0.4	72 kHz	nC 级局放
[74]	2020	西安交通大学	电缆	0.7	100 kHz	3.5 nC 局放
[75]	2022	华北电力大学	电缆	1.1	180 kHz	火花放电
[77]	2023	华北电力大学	电缆	20	10 kHz	127 pC 局放

系统,利用平潭 110 kV 光电复合海底电缆的冗余备用光纤,构建了布里渊光时域反射系统,实现了 110 kV 光电复合海缆分布式应变/温度监测;建立海缆光纤长度、经纬度、埋深三维信息数据库,融合了船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS)、视频监测系统,实现对海缆故障隐患综合监测。该工程每相海缆长度约 3.3 km。海底电缆 BOTDR 在线监测系统的空间分辨率达到 1 m,通过分别测量布里渊频移量与功率实现了温度/应变分离。在现场测量时,研究人员对电缆中集成的 8 根 G.652 光纤的温度系数、应变系数及布里渊初始频移量进行了校准,以提高温度和应变的测量精度^[50, 79],应变与海拔测量结果如图 15 所示。

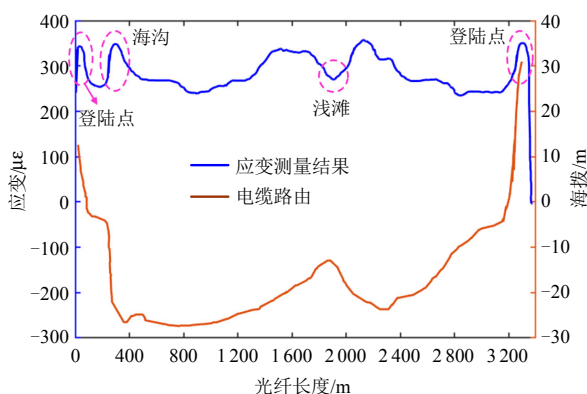


图 15 海底电缆温度/应变 BOTDR 监测结果

Fig. 15 Results of submarine cable temperature and strain monitoring based on BOTDR

南澳±160 kV 直流海缆工程采用了分布式光纤综合在线监测系统^[80],该系统于 2014 年投入使用,集成了 ϕ -OTDR、ROTDR 和 BOTDA 技术,分别用于监测海底电缆的温度、扰动和应变情况,并建

立船舶自动识别系统(AIS 系统),监测来往船只,系统结构如图 16 所示。其中,电缆扰动监测系统的监测距离为 20 km,定位精度为 50 m;温度监测系统的监测距离同样为 20 km,定位精度为 1 m,测温精度 $\leq 1^\circ\text{C}$,上述两个子系统的光纤均为单端连接;应变监测系统的监测距离为 40 km,应变测量精度为 $\pm 20 \mu\text{e}$ 。

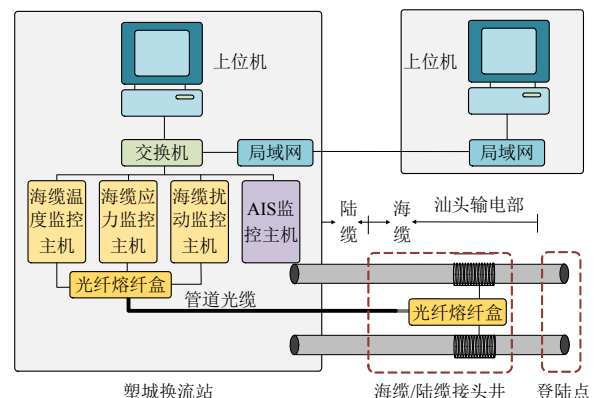


图 16 南澳直流海底电缆工程在线监测系统框架图

Fig. 16 Framework diagram of the comprehensive online monitoring system for submarine cables in Nan'ao HVDC project

3.2 国外海缆工程综合监测系统应用案例

丹麦 Horns Rev 3 海上风电场针对海底电缆运行状态监测需求,开发了 ROTDR、 ϕ -OTDR 及 AIS 系统集成解决方案。通过 ROTDR 和 ϕ -OTDR 实现了百 km 电缆的温度、张力、断裂、外部破坏监测。结合 AIS 监测电缆所在区域内的船舶交通,可以在电缆出现损坏后确认涉事船只。根据温度传感数据能够实现动态载流量控制和电缆埋深监测。

NKT 公司为德国北海风电场一条 45 km 长的海

底电缆配备了布里渊分布式温度监测系统^[81]，为电缆负载率控制提供了温度数据。该系统采用单端测量方式，利用偏振分集技术提高监测灵敏度，每 10 min 记录一次电缆的温度分布情况，空间分辨率为 3 m，温度分辨率优于 1℃。系统监测结果表明，电缆满负荷运行时的温度较无负荷时平均高出 6.3℃，同时在运行时电缆上存在 4 处温度热点和 3 处温度冷点。

位于英国外默里湾的 Beatrice 海上风电场于 2019 年投入运营，海底电缆长度超过 90 km。瑞士 Omnisens 公司为其提供了布里渊散射分布式光纤温度监测系统，确保电缆温度保持在安全运行范围内^[82]。该系统的温度监测距离可在 100 km 距离上实现 5 m 的空间分辨率，监测通道数可达 20 个。该系统参考 IEC60287 标准，通过光纤感知的温度计算电缆导电体的温度，可以对电缆载流量进行动态评级。

德国 AP Sensing 公司为丹麦西海岸的 Horns Rev 3 海上风电场一条 36 km 长的 220 kV 海底电缆及一条 45 km 长的 220 kV 地埋陆地电缆提供了状态监测系统^[83]。该系统结合了 ROTDR 和 ϕ -OTDR 功能，其中 3 套 ϕ -OTDR 系统负责对电缆故障进行监测与定位，监测距离为 40 km，可将电缆中或电缆周围产生的声信号在瀑布图中实时显示，并对故障进行报警；两套 ROTDR 系统分别具有 2 个通道、50 km 范围与 4 个通道、30 km 范围的监测能力。

对上述典型工程案例进行总结分析，结果如表 3 所示。可知，国内工程中海缆长度较小，采用传统分布式光纤测量方法就可以达到技术需求。国外工程中部分已实现了百 km 距离的海底电缆监测，但受限于商业秘密或技术封锁，未对其使用的技术进行公开报道，亟需国内相关研究人员开展深入研究。现有工程应用中，ROTDR、BOTDR/BOTDA 分布式温度监测较为普及，这对保证电缆在安全温度范围内运行具有重要作用。尽管 BOTDR/BOTDA 分布式应变监测能够对一些低频机械故障进行定位，但是由于受到监测频带限制，对于故障的预警和识别能力严重不足。 ϕ -OTDR 技术具有更高的检测频带，能够对电缆受到的扰动进行实时定量监测，可以实现对故障的识别和预警，是海底电缆状态监测的发展方向。随着海底电缆使用年限增长，绝缘老化问题将日益突出，对海底电缆局部放电进行监测的需求将凸显。但是，由于局

放声发射信号微弱，且频率较高，监测难度较大，需要进一步提高 ϕ -OTDR 技术的长度带宽积与监测灵敏度，目前尚无工程案例。

表 3 典型工程案例监测系统总结

Table 3 Summary of monitoring systems on typical projects

文献	时间	地点	电缆长度	监测系统	实现功能
[50, 79]	2014	福建	110 kV AC 3.3 km	BOTDR	温度测量 应变测量
[80]	2014	南澳	160 kV DC 20 km	ROTDR BOTDA ϕ -OTDR	温度测量 应变测量 扰动测量
[81]	2016	德国	320 kV DC 45 km	BOTDR	温度
[82]	2017	英国	220 kV AC 100 km	BOTDR	温度
[83]	2019	丹麦	220 kV AC 36 km	ROTDR ϕ -OTDR	温度测量 故障定位

4 挑战与展望

由于分布式光纤状态监测具有测量距离远、定位精度高等优点，近年来发展较快，但仍存在一些亟待解决的关键问题，未来研究建议重点发展的方向如下。

1) 光纤干涉中的相干衰落抑制方法。

分布式光纤传感系统在复杂环境应用中，存在偏振衰落与相位衰落问题。式(2)为简化的光纤相干公式：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta_0) \cos(\theta_0 + \Delta\theta) \quad (2)$$

式中： I 为输出光强； I_1 与 I_2 分别为两路相干光的光强； δ_0 为初始偏振相位差； θ_0 为初始相干相位差； $\Delta\theta$ 为待测的信号。在分布式光纤传感中主要是解调 $\Delta\theta$ ，海底环境变化多端，温度、振动噪声等因素将改变初始偏振相位差与初始相关相位差，造成 $\Delta\theta$ 解调误差，严重时 δ_0 为 $\pi/2$ ，导致输出信号过小(偏振衰落)，导致无法解调待测信号 $\Delta\theta$ ，难以准确反映输入信号的真实特征。

因此，需要开展研究降低偏振衰落、相位衰落造成的噪声与误报警。在光路拓扑与解调方法方面应重点研究以下几个方面：①研究偏振分集方法，结合偏振控制器与偏振分束器，分别采集传感光信号中两束垂直的线偏光分量，再通过矢量求和的方法降低偏振衰落；②研究基于反馈控制的工作点调控方法，实时采集分析光纤传感系统的工作点，通

过动态调整控制避免较大的相干衰落；③研究频复用降噪方法，由于不同频率散射光的偏振衰落位置不同，可以通过结合不同频率探测光的背向散射结果来抑制相干衰落。

2) 高空间分辨率约束下的传感距离拓展方法。

对于电缆相位敏感光时域反射技术，需要在背向瑞利散射光接收完成后注入下一个探测光脉冲，否则将发生信号混叠。而上述光接收时间正比于光纤长度，因此传感距离越长，探测脉冲间的间隔越大，造成检测频率频带下降。因此，对于电缆相位敏感光时域反射技术，空间分辨率、检测频率、传感距离、灵敏度之间存在制约关系，具体如图 17 所示。图中： f_{max} 为最大检测频率； c 为真空光速； n_0 为折射率； L 为传感距离； Δz 为空间分辨率； T_p 为脉冲宽度。由图 17 可知，传感距离与空间分辨率成反比，增大脉冲宽度将提高传感距离与灵敏度、但将削弱空间分辨率。

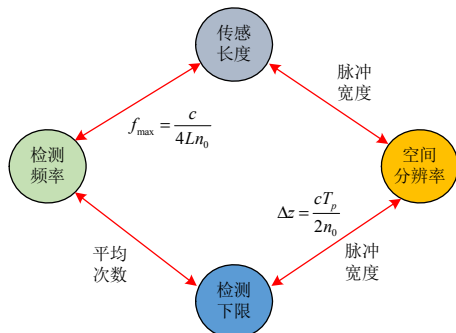


图 17 相位敏感光时域反射传感中空间分辨率、检测频率、传感距离、灵敏度之间的关系
Fig. 17 Relationship among spatial resolution, detection frequency, sensing distance, and sensitivity in ϕ -OTDR sensing

因此，需要在确保光纤缺陷、故障定位精度的前提下，进一步提高探测距离，满足海底电缆百公里监测需求。应重点研究以下几个方面：①研究两级掺铒光纤放大技术，功率过高的单级掺铒光纤放大容易引发受激布里渊散射信号，对待测的瑞利散射信号造成影响，降低信噪比，因此应研究两级掺铒光纤放大技术，优选掺铒光纤放大器泵浦电流值，消除上述影响，拓展监测距离；②研究拉曼放大技术，应用泵浦光源分布式注入能量，探索前向、后向、双向等不同拉曼泵浦结构下的光增益分布，分布式的提高探测光散射信号强度，拓展监测距离；③研究基于泵浦脉冲光与探测脉冲光时间差调控的时分复用光放大方法，降低泵浦光强度、将探测光从连续光调制为脉冲光，减少受激布里渊散射长度。

调控泵浦脉冲与探测脉冲时间延迟，实现不同位置光信号的分时分区受控放大，拓展监测距离。

3) 超声感知灵敏度提升方法。

海底电缆信号感知中，锚害、外力破坏等产生的相位变化较大，容易测量，但是对于电缆局部放电等微小信号，其作用在光纤上产生的应变为 ne 纳应变量级，难以感知。为提高信号感知灵敏度，需要采用光放大技术，但是传统掺铒光纤放大技术受到非线性效应限制，信号增强能力有限，不能实现远距离探测光信号的均匀放大，远距离传感末端信噪比低(如图 18 所示)。

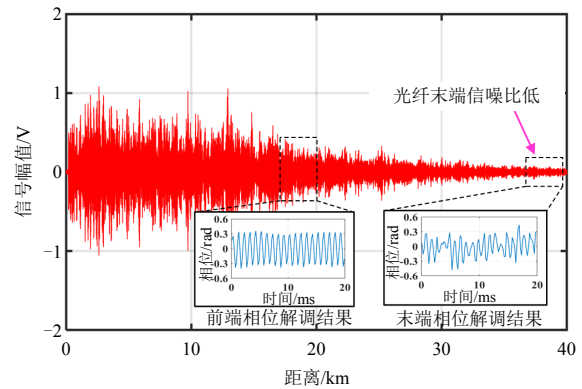


图 18 距离对 ϕ -OTDR 光纤传感解调结果的影响
Fig. 18 Effect of distance on the demodulation result of ϕ -OTDR

因此，需要进一步提高分布式光纤传感的微弱信号感知灵敏度。应重点研究以下几个方面：①研究弱反射光栅阵列增敏技术，弱反射光纤光栅是指反射率低于 0.1%，甚至 0.01% 的光栅，在单根光纤上可以复用成千上万个弱光栅，通过特定解调方法可以提高分布式测量的灵敏度；②研究光纤应变耦合效率提升技术，改变光纤在电缆中的位置，采用应变感测光缆等方式提高光纤对电缆应变的耦合效率，进而提升微弱信号感知灵敏度。

4) 基于分布式光纤声振监测结果的海底电缆绝缘状态反演技术。

在海底电缆监测中，锚害、水流、温度、局放、地震等都可能引发光纤散射信号强度和频率的变化，导致分布式光纤声振监测系统响应。在典型的海缆光纤监测结果中，除待测参量外，分布式光纤传感系统自身噪声或水流、温度的变化引发的强度、相位改变都可能成为假信号，造成监测系统误报警，增大维护工作量。

此前，通过加速老化试验，初步掌握了脉冲电流局放信号、介电谱、频域反射技术等与电缆老化、

劣化的对应关系^[84-87]。但由于分布式光纤缺陷监测尚处于起步阶段,因此尚未有成熟研究揭示缺陷严重程度与光纤测量信号之间的耦合关系,绝缘老化、劣化状态反演缺乏分析基础,目前尚无法利用光纤相位信息反演电缆绝缘缺陷。

因此,需要开展基于分布式光纤声振监测结果的海底电缆绝缘状态反演技术研究,应重点研究以下几个方面:①研究海底电缆典型绝缘缺陷产生的声振信号特征,通过理论分析掌握不同缺陷类型的频带与强度,为后续分析奠定基础;②研究声振信号在海底电缆内部的传播规律,通过仿真计算结合模型试验,掌握声振信号在电缆交联聚乙烯绝缘、半导体层、铅护套、光纤护套等多层介质中的传播特性,明确声振信号的传播衰减规律;③研究典型信号与噪声的时频特征,探索掌握锚害、水流、地震、绝缘缺陷等不同外部、内部状态激发的光信号时频特征。进而基于信号与噪声的特征针对性实现噪声抑制,获取正确的绝缘状态信息。

5) 融合多源信息的海底电缆综合监测预警技术。

目前,基于分布式光纤监测结果的海底电缆状态监测预警系统与其他监测系统多独立运行,融合程度低。因此,应重点开展以下两个方面的研究:

①研究不同类型分布式光纤监测结果融合技术,绝缘老化、劣化过程会导致温度、应变、声发射等信号的变化,因此,需要开展研究,掌握绝缘老化、劣化过程中多特征参量的变化规律,提出表征老化、劣化状态的特征量,实现海底电缆状态的准确评估;②研究多种状态信息感知系统深度融合技术,利用AIS系统监测海底电缆走廊区域船只情况,对区域内船只发送警告信息,防止船只对海底电缆造成破坏;采用远距离视频系统跟踪船舶画面,保存视频,有利于在海底电缆受到损伤后确定肇事船只;采用分布式光纤传感系统进行温度、应变、声振信号协同感知,掌握海底电缆绝缘状态与异常事件信息;对于可能出现了严重缺陷或故障的电缆,综合采用光纤定位结果、AIS与视频系统历史记录、海底机器人磁场与声场测量结果实现海底电缆故障点定位。

5 结语

1) 本文讨论了海底电缆与陆地电缆在长度、结构、绝缘可靠性、损坏原因等方面的区别,指出海底电缆本体方面事故较多,故障发生位置随机性

较高,需要进行分布式的监测。

2) 介绍了针对海底电缆温度、应变、特殊事件及局放的光纤分布式监测国内外主要研究进展。系统梳理分析了拓扑改进、脉冲编码、降噪算法、分布式放大等提升分布式光纤传感距离与精度的方法。

3) 分析了海缆工程综合监测系统应用案例,目前基于拉曼散射和布里渊散射的分布式温度监测较为普及,基于布里渊散射的分布式应变监测能够定位一些机械故障,但受限于监测频带,故障识别和预警能力不足。基于瑞利散射的 ϕ -OTDR技术监测频带高,能够对电缆扰动进行实时定量测量,但由于局发声发射信号微弱,且频率较高,监测难度较大,目前尚无工程案例。

4) 在未来发展方向方面,建议重点开展光纤干涉中的相干衰落抑制方法,高空间分辨率约束下的传感距离拓展方法,超声感知灵敏度提升方法,基于分布式光纤声振监测结果的海底电缆绝缘状态反演技术,融合多源信息的海底电缆综合监测预警技术的研究。

参考文献

- [1] WILLIAMS R, ZHAO Feng, LEE J. Global offshore wind report 2022[R]. Belgium: Global Wind Energy Council, 2022.
- [2] PINEDA I, RAMÍREZ L, BRINDLEY G. Offshore wind in Europe: key trends and statistics 2019[R]. Belgium: WindEurope, 2020.
- [3] 肖世杰, 胡列翔, 周自强, 等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆应用及试验监测技术评述[J]. 绝缘材料, 2018, 51(1): 1-9.
XIAO Shijie, HU Liexiang, ZHOU Ziqiang, et al. Applications and test monitoring technology of cross-linked polyethylene insulated submarine cable[J]. Insulating Materials, 2018, 51(1): 1-9(in Chinese).
- [4] 冀大雄, 周佳龙, 钱建华, 等. 海底电缆检测方法发展现状综述[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 36-49.
JI Daxiong, ZHOU Jialong, QIAN Jianhua, et al. Current development review of submarine cable detection methods[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 36-49(in Chinese).
- [5] BAWART M, MARZINOTTO M, MAZZANTI G. Diagnosis and location of faults in submarine power cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(4): 24-37.
- [6] 侯帅, 王毅松, 朱闻博, 等. 高压海底电缆监测技术与应用综述[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 49-58.

- HOU Shuai, WANG Yisong, ZHU Wenbo, et al. Review of high voltage submarine cable monitoring technology and applications[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(5): 49-58(in Chinese).
- [7] 孟繁博, 陈向荣, 徐星, 等. 不同粗糙度界面和脱气处理对 500kV XLPE 直流电缆工厂接头的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6499-6510.
- MENG Fanbo, CHEN Xiangrong, XU Xing, et al. Effect of different roughness interface and degassing treatment on 500kV XLPE DC cable factory joint[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6499-6510(in Chinese).
- [8] 彭小圣, 陈玉竹, 贾诗媛, 等. 多物理场下的高压直流电缆局部放电研究展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(3): 1210-1221.
- PENG Xiaosheng, CHEN Yuzhu, JIA Shiyuan, et al. Research prospects for partial discharge of high voltage DC cables under multi-physics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 1210-1221(in Chinese).
- [9] ELEFTHERAKIS D, VICEN-BUENO R. Sensors to Increase the security of underwater communication cables: a review of underwater monitoring sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 737.
- [10] IEEE Power Engineering Society. IEEE Std 1120—2004 IEEE guide for the planning, design, installation, and repair of submarine power cable systems[S]. New York: IEEE, 2005.
- [11] UKIL A, BRAENDLE H, KRIPPNER P. Distributed temperature sensing : review of technology and applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 885-892.
- [12] 李东阳, 刘云鹏, 范晓舟, 等. 基于带状光纤分布式传感的变压器绕组轴向与辐向形变区分及程度检测[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2024: 1-11[2024-03-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231918>.
- LI Dongyang, LIU Yunpeng, FAN Xiaozhou, et al. Discrimination and degree detection of axial and radial deformation in transformer windings based on distributed sensing of ribbon optical fibers[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2024: 1-11[2024-03-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231918>(in Chinese).
- [13] WANG Meng, WU Hao, TANG Ming, et al. Few-mode fiber based Raman distributed temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4907-4916.
- [14] 刘云鹏, 李欢, 高树国, 等. 分布式光纤传感在大型变压器温度和绕组变形监测中的应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 6126-6135.
- LIU Yunpeng, LI Huan, GAO Shuguo, et al. Research on application of distributed optical fiber sensing in monitoring of temperature and winding deformation of large transformer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 6126-6135(in Chinese).
- [15] THÉVENAZ L. Review and progress in distributed fiber sensing[C]//*Optical Fiber Sensors*. Cancun, Mexico: Optica Publishing Group, 2006.
- [16] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, et al. Distributed antistokes ratio thermometry[C]//*Optical Fiber Sensors*. San Diego, USA: Optica Publishing Group, 1985.
- [17] SUH K, LEE C. Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed-temperature sensor[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1845-1847.
- [18] MORANA A, GIRARD S, MARIN E, et al. Performances of radiation-hardened single-ended Raman distributed temperature sensors using commercially available fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(1): 305-311.
- [19] HWANG D, YOON D J, KWON I B, et al. Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-stokes Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 9747-9754.
- [20] LEE D, YOON H, KIM N Y, et al. Analysis and experimental demonstration of simplex coding technique for SNR enhancement of OTDR [C]//*Proceedings of the Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conference*. Palisades, USA: IEEE, 2004.
- [21] SOTO M A, NANNIPIERI T, SIGNORINI A, et al. Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2557-2559.
- [22] SUN Xizi, YANG Zhisheng, HONG Xiaobin, et al. Genetic-optimised aperiodic code for distributed optical Fibre sensors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5774.
- [23] YU Miao, LIU Ye, CUI Hongliang, et al. Ambient condition desensitization of a fiber Raman temperature sensing system based on a dynamic sampling-correction scheme[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4823-4827.
- [24] WANG Zongliang, CHANG Jun, ZHANG Sasa, et al. Application of wavelet transform modulus maxima in Raman distributed temperature sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(2): 142-146.
- [25] WANG Zongliang, CHANG Jun, ZHANG Sasa, et al. An improved denoising method in RDTS based on wavelet transform modulus maxima[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(2): 1061-1067.
- [26] LI Jian, LI Yunting, ZHANG Mingjiang, et al. Performance improvement of Raman distributed temperature system by using noise suppression[J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 103-113.
- [27] ZHANG Zhongshu, WU Hao, ZHAO Can, et al.

- High-performance Raman distributed temperature sensing powered by deep learning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2): 654-659.
- [28] SOTO M A, RAMIREZ J A, THÉVENAZ L. Intensifying the response of distributed optical Fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10870.
- [29] TAYAMA H, FUKUDA O, YAMAMOTO K, et al. 6.6 kV XLPE submarine cable with optical fiber sensors to detect anchor damage and defacement of wire armor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(4): 1718-1723.
- [30] HARA T, TERASHIMA K, TAKASHIMA H, et al. Development of long range optical fiber sensors for composite submarine power cable maintenance[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(1): 23-30.
- [31] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 074207.
- RAO Yunjiang. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 074207(in Chinese).
- [32] BAI Qing, WANG Qinglin, WANG Dong, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1862.
- [33] LUO Jianbin, HAO Yanpeng, YE Qing, et al. Development of optical fiber sensors based on Brillouin scattering and FBG for on-line monitoring in overhead transmission lines[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(10): 1559-1565.
- [34] CULVERHOUSE D, FARAHI F, PANNELL C N, et al. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(14): 913-915.
- [35] HORIGUCHI T, KURASHIMA T, TATEDA M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1989, 1(5): 107-108.
- [36] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, TATEDA M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [37] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, IZUMITA H, et al. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 1993, 76(4): 382-390.
- [38] SOTO M A, SAHU P K, BOLOGNINI G, et al. Brillouin-based distributed temperature sensor employing pulse coding[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(3): 225-226.
- [39] SOTO M A, BOLOGNINI G, DI PASQUALE F, et al. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 259-261.
- [40] 梁浩. 基于序列编码探测脉冲的布里渊光纤传感器的研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- LIANG Hao. Research of Brillouin distributed optical fiber sensor based on coded pulses[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011(in Chinese).
- [41] WANG Qinglin, BAI Qing, LIANG Changshuo, et al. Random coding method for SNR enhancement of BOTDR[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11604-11618.
- [42] CHO Y T, ALAHBABI M, GUNNING M J, et al. 50-km Single-ended spontaneous-Brillouin-based distributed-temperature sensor exploiting pulsed Raman amplification [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(18): 1651-1653.
- [43] JIA Xinhong, RAO Yunjiang, CHANG Liang, et al. Enhanced sensing performance in long distance Brillouin optical time-domain analyzer based on Raman amplification: theoretical and experimental investigation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(11): 1624-1630.
- [44] MARTIN-LOPEZ S, ALCON-CAMAS M, RODRIGUEZ F, et al. Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18769-18778.
- [45] JIA Xinhong, RAO Yunjiang, YUAN Chengxu, et al. Hybrid distributed Raman amplification combining random fiber laser based 2nd-order and low-noise LD based 1st-order pumping[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24611-24619.
- [46] SUN Xizi, YANG Zhisheng, HONG Xiaobin, et al. Ultra-long Brillouin optical time-domain analyzer based on distortion compensating pulse and hybrid lumped-distributed amplification[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(12): 126107.
- [47] WANG Zinan, ZENG J, LI J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5866-5869.
- [48] NIKLES M, THEVENAZ L, SALINA P, et al. Local Analysis of stimulated Brillouin interaction in installed fiber optics cables[R]. Boulder: NIST Special Publication, 1996: 111-114.
- [49] JIANG Qi, SUI Qingmei. Technological study on distributed fiber sensor monitoring of high voltage power cable in seafloor[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics. Shenyang, China: IEEE, 2009.
- [50] ZHAO Lijuan, LI Yongqian, XU Zhiniu, et al. On-line monitoring system of 110 kV submarine cable based on BOTDR[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 216: 28-35.

- [51] 林晓波, 何旭涛, 汪洋, 等. 三芯光纤复合海底电缆船锚钩挂有限元建模[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(11): 43-48.
LIN Xiaobo, HE Xutao, WANG Yang, et al. Finite element modeling of anchor hooking of three-core optical fiber composed submarine power cable[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(11): 43-48(in Chinese).
- [52] CHEN Yu, WANG Shuang, HAO Yi, et al. The 500 kV oil-filled submarine cable temperature monitoring system based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology[C]//International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence. Xi'an, China: IEEE, 2020.
- [53] CHEN Yu, WANG Shuang, HAO Yi, et al. Temperature monitoring for 500 kV oil-filled submarine cable based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology: method and application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3504510.
- [54] LI Qishun, HAO Yanpeng, ZHANG Peng, et al. A method for detecting the burial depth of ± 500 kV XLPE DC submarine cables based on equivalent thermal circuit and optical fiber monitoring temperature[DB/OL]. (2023-04-04)[2023-11-13]. <https://www.authorea.com/>.
- [55] LUX J, OLSCHESKI M, SCHÄFER P, et al. Real-time determination of depth of burial profiles for submarine power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1079-1086.
- [56] LEE E C, TAYLOR F H. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, 5194847A[P]. 1993-03-16.
- [57] JOUSSET P, CURRENTI G, SCHWARZ B, et al. Fibre optic distributed acoustic sensing of volcanic events[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1753.
- [58] LINDSEY N J, DAWE T C, AJO-FRANKLIN J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. Science, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [59] MA Guoming, SHI Cheng, QIN Weiqi, et al. A non-intrusive electrical discharge localization method for gas insulated line based on phase-sensitive OTDR and michelson interferometer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1324-1331.
- [60] PENG Fei, WU Han, JIA Xinhong, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [61] RAO Yunjiang, LUO Jun, RAN Zengling, et al. Long-distance fiber-optic Φ -OTDR intrusion sensing system[C]//20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh, UK: SPIE, 2009.
- [62] 彭正谱, 饶云江, 彭飞, 等. 基于外差检测和前向拉曼放大的新型长距离相敏光时域反射仪[J]. 光电子·激光, 2014, 25(4): 724-729.
PENG Zhengpu, RAO Yunjiang, PENG Fei, et al. Long distance phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on heterodyne detection and forward Raman amplification[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(4): 724-729(in Chinese).
- [63] YANG Guangyao, FAN Xinyu, LIU Qingwen, et al. Frequency response enhancement of direct-detection phase-sensitive OTDR by using frequency division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1197-1203.
- [64] PAN Zhengqing, WANG Zhaoyong, YE Qing, et al. High sampling rate multi-pulse phase-sensitive OTDR employing frequency division multiplexing[C]//OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors. Santander, Spain: SPIE, 2014.
- [65] WANG Zhaoyong, PAN Zhengqing, FANG Zujie, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [66] 张旭苹, 陈晓红, 梁蕾, 等. 长距离海缆在线监测改进型 C-OTDR 系统[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306001.
ZHANG Xuping, CHEN Xiaohong, LIANG Lei, et al. Enhanced C-OTDR-based online monitoring scheme for long-distance submarine cables[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306001(in Chinese).
- [67] MATSUMOTO H, ARAKI E, KIMURA T, et al. Detection of hydroacoustic signals on a fiber-optic submarine cable[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 2797.
- [68] ZHAN Zhongwen, CANTONO M, KAMALOV V, et al. Optical polarization - based seismic and water wave sensing on transoceanic cables[J]. Science, 2021, 371(6532): 931-936.
- [69] HICKE K, KREBBER K. Towards efficient real-time submarine power cable monitoring using distributed fibre optic acoustic sensors[C]//25th Optical Fiber Sensors Conference. Jeju, Korea: IEEE, 2017.
- [70] LV Anqiang, LI Jing. On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on Φ -OTDR[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 273: 134-139.
- [71] SØRENSEN S T, SHANKS A, BUCK E, et al. Simultaneous distributed temperature and disturbance sensing in single-mode Fibre for power cable monitoring[C]//Fiber Optic Sensors and Applications XV. Orlando, USA: SPIE, 2018.
- [72] DONAGHY R, BAWART M, MACPHAIL A, et al. TB 773 Fault location on land and submarine links(AC and

- DC)[R]. Paris: CIGRÉ, 2019.
- [73] ROHWETTER P, EISERMANN R, KREBBER K. Distributed acoustic sensing: towards partial discharge monitoring[C]//International Conference on Optical Fibre Sensors. Curitiba, Brazil: SPIE, 2015.
- [74] 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 Hao, XU Yang, QIAN Sen, 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(in Chinese).
- [75] QIN Weiqi, WANG Sihan, GUO Tengjun, et al. Spark discharge distributed detection based on coherent optical time-domain reflectometer[C]//IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications. Chongqing, China: IEEE, 2022.
- [76] QIN Weiqi, MA Guoming, WANG Sihan, et al. Distributed discharge detection based on improved COTDR method with dual frequency pulses[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 9001308.
- [77] QIN Weiqi, MA Guoming, WANG Sihan, et al. Improving SNR and sensing distance of COTDR for distributed partial discharge detection in power cable joints[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 9004309.
- [78] 吴文庚, 林雪倩. 海底电缆综合监测关键技术及应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 129-135.
- WU Wengeng, LIN Xueqian. Application and key technologies of submarine cable integrated monitoring[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 129-135(in Chinese).
- [79] 吕安强, 李永倩, 李静, 等. 基于 BOTDR 的光纤复合海底电缆应变/温度监测[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 533-539.
- LÜ Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Strain and temperature monitoring of 110 kV optical fiber composite submarine power cable based on Brillouin optical time domain reflectometer[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 533-539(in Chinese).
- [80] 张畅生, 郭旭敏, 刘龙春, 等. 高压直流海缆综合在线监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 27-33.
- ZHANG Changsheng, GUO Xumin, LIU Longchun, et al. Study on integrated online monitoring system of HVDC submarine cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(22): 27-33(in Chinese).
- [81] MARX B, RATH A, KOLM F, et al. Brillouin distributed temperature sensing system for monitoring of submarine export cables of off-shore Wind Farms[C]//Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors. Limerick, Ireland: SPIE, 2016.
- [82] Omnisens SA. Beatrice offshore windfarm export cables to be monitored by Omnisens-UK[EB/OL]. (2017-10-09) [2023-11-13]. <https://www.omnisens.com/news/>.
- [83] AP Sensing. Optical fault location and temperature monitoring of a 220 kV power cable[EB/OL]. (2020-04-16)[2023-11-13]. https://www.apsensing.com/fileadmin/001__PORTAL_/001_documents/Success_Stories/Success_Stories_Power_Cable/Offshore_Windpark_DTS_and_DAS_Monitoring_Denmark_2020-04-15.pdf.
- [84] WEN SHU E, BOGGS S. Dispersion and PD detection in shielded power cable[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1): 25-29.
- [85] 谢敏, 周凯, 赵世林, 等. 新型基于反射系数数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083-3089.
- XIE Min, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. A new location method of local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3083-3089(in Chinese).
- [86] 李蓉, 周凯, 饶显杰, 等. 基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3236-3245.
- LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Identification and location of cable faults based on input impedance spectrum[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3236-3245(in Chinese).
- [87] 王昊月, 孙茂伦, 赵凯杰, 等. 电缆绝缘老化的高压频域介电谱诊断评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3630-3641.
- WANG Haoyue, SUN Maolun, ZHAO Kaijie, et al. High voltage FDS diagnosis and evaluation method for cable insulation aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3630-3641(in Chinese).



马国明

在线出版日期: 2024-04-23。

收稿日期: 2024-01-02。

作者简介:

马国明(1984), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电气设备状态信息感知方面的研究, ncepumgm@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 胡琳琳)