

一种用于海洋环境的传感光缆

林剑 魏以诺 范从阳 徐军 陆荣张 江炜
江苏通光海洋光电科技有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8911

[摘要] 本文介绍了一种适用于海洋环境的传感光缆：光缆中心为加强件，加强件外侧挤塑弹性体增敏层，以提升水下声波振动感知灵敏度，采用多根光纤等节距螺旋缠绕形成分布式传感结构，实现对水下环境的感知。增敏层外依次为包带绕包层、内护套、增强层及外护套，分别承担光纤保护、密封缓冲、抗拉增强以及海洋环境的防护功能，可满足海洋环境长期的应用需求。本文重点分析了缆体各层的结构设计，以及弹性体表面凹槽加工成型的工艺难点。

[关键词] 传感光缆；分布式光纤传感；海洋动态监测；螺旋缠绕；护套凹槽

A Sensing Optical Cable for Marine Environments

Lin Jian Wei Yinuo Fan Congyang Xu Jun Lu Rongzhang Jiang Wei
Jiangsu Tongguang Marine Optoelectronics Technology Co., Ltd.

[Abstract] This paper introduces an optical sensing cable designed for marine environments. The cable features a reinforced core surrounded by an extruded elastomer sensitization layer on the outer side to enhance sensitivity to underwater acoustic vibrations. Multiple optical fibers are spirally wound at regular intervals to form a distributed sensing structure, enabling effective monitoring of the underwater environment. Following the sensitization layer are the winding tape sheath, inner protective sleeve, reinforcement layer, and outer protective sleeve, which serve respectively to protect the fibers, provide sealing and cushioning, offer tensile strength, and safeguard against marine environmental stresses, thereby meeting long-term application requirements in marine settings. The study focuses on analyzing the structural design of each cable layer as well as the manufacturing challenges associated with forming surface grooves on the elastomer.

[Key words] sensing optical cable; distributed optical fiber sensing; marine dynamic monitoring; spiral winding; sheath groove

一、序言

近年来，随着海洋资源开发、海洋工程建设与海洋安全需求快速增长，海底地质灾害预警、海洋生态环境观测及水下声波振动探测等领域，对高灵敏度、长距离、分布式、全天候的传感技术提出了更高要求。以光纤传感为基础的传统光纤声基阵，已在水下声学探测与监测中展现出优异性能，为海洋声学感知的重要技术手段。

与此同时，常规传感光缆在大范围、长距离、连续分布式的海洋动态监测场景仍存在明显局限性：

一是声学灵敏度不足，对水下声波、微弱振动、微小应变

的感知能力难以达到声基阵级探测水平，精细监测能力受限；

二是单光纤传感信号解耦困难，应力、应变与温度交叉敏感，数据可靠性与测量精度不足；

三是海洋复杂动态载荷适应性偏弱，在潮汐、拖曳等长期受力下，结构稳定性与服役寿命难以满足工程要求。

针对上述情况，本文提出一种适用于海洋环境的传感光缆，采用多光纤协同感知、增敏层声波放大、等节距螺旋缠绕分布式传感与多层复合增强防护一体化设计，在提升灵敏度、抗干扰能力与机械强度的同时，使该传感光缆在水下声学感知、动态应变监测等方面，具备达到传统光纤声基阵功能性能的潜力，可更好满足海洋全域、连续、实时、长期可靠监测的

需求。

二、结构设计

2.1 多层复合结构设计

本文设计的传感光缆采用由内至外的多层复合结构, 将力学承载、增敏转换、分布式感知与多重环境防护功能集成于一体。具体结构如图1、图2所示。

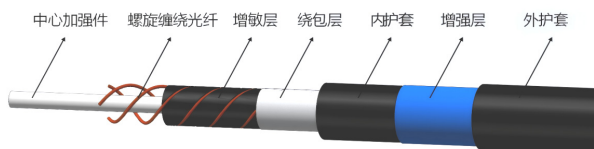


图1 传感光缆示意图

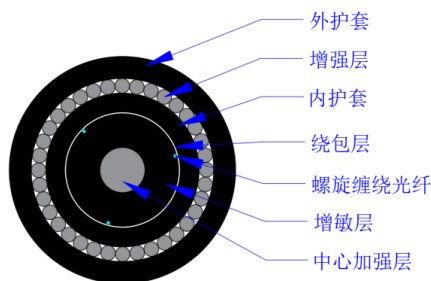


图2 传感光缆截面图

光缆中心采用金属或非金属加强件, 提供一定的结构支撑, 抵抗海洋环境中的拉伸、弯曲载荷; 非金属加强件可采用KFRP材料, 金属加强件可采用钢绞线或采用不锈钢光单元+钢丝铠装结构, 不锈钢光单元则用于常规通信信号传输。

中心加强件外部为弹性材料增敏层, 表面加工有等节距螺旋凹槽, 用于定张力嵌入传感光纤。该增敏层采用高弹性、高声耦合效率的弹性体制备, 可将水下声波、振动与应变信号高效耦合并力学放大, 显著提升光纤对微弱信号的感知能力。

螺旋缠绕光纤组目前初步设想为采用三根功能互补的光纤等节距螺旋排布, 构成分布式传感阵列, 其构型与传统光纤声基阵的核心传感结构原理一致(具体的光纤类型后续计划和相关专业院所进行商讨, 联合开发)。

一根为相位敏感型光纤, 实现对水下声波、动态应变的高灵敏分布式感知;

一根为偏振保持型光纤, 维持光信号偏振稳定性, 抑制环境扰动对解调精度的影响;

一根为耐弯曲单模光纤, 作为参考通道, 提高测量准确性与稳定性。

通过多光纤协同工作与弹性增敏层耦合放大, 本传感光缆在水下声学感知、动态应变监测方面具备达到传统光纤声基阵功能性能的潜力。

增敏层外侧依次设置有绕包层、内护套、增强层以及外护套。

绕包层用于固定光纤的位置, 防止在光纤在缆体受力时发生松散或滑移并提供初步保护。

绕包层外侧挤制内护套, 增强径向防水和缓冲外部机械冲击。

增强层可选用芳纶纤维、碳素钢丝或FRP材料, 能提高光

缆的抗拉伸、抗剪、抗压强度, 面对海洋中水流反复冲击、拖拽等复杂受力环境, 能够显著提升缆体的结构稳定性, 降低因长期动态载荷导致的失效风险。

最外层为外护套, 具备较好的耐磨、耐水压、耐腐蚀等性能, 能充分保护好缆体, 减少海水侵蚀和机械摩擦对内层的影响。

通过上述材料选型和整体结构设计, 光缆具备高灵敏感知、高机械强度及海洋环境适应等特性, 具备了在海洋动态监测场景中持续可靠运行的能力。

2.2 螺旋凹槽结构与工艺难点

传统传感缆所缠绕的光纤往往直接绕包在增敏层表面, 光纤易滑移, 造成节距不一致, 且该方式所缠绕的光纤缺乏保护, 耐压性能、耐环境性能较差。因此, 我们提出了在增敏层表面开槽的设想, 用以缓解上述痛点。增敏层表面螺旋凹槽的设计与制造是传感缆关键的环节, 也是主要的技术难点。

从结构设计角度看, 螺旋凹槽的宽深度需要与所嵌入光纤的直径及类型相匹配, 确保光纤嵌入后能够稳定缠绕; 在反复弯折、持续拉伸及海洋环境等长期服役工况下, 仍能维持稳定可靠的状态, 不会出现松脱或移位。

凹槽的深度与宽度等参数也直接关系到应变从增敏层传递至光纤的效率。凹槽过深时, 光纤会完全埋入弹性体中, 会削弱应变传递效率, 导致感知灵敏度下降; 凹槽过浅, 则无法对光纤形成有效约束, 缆体加工或长期受力过程中光纤容易脱出凹槽, 造成光纤排布节距紊乱, 直接破坏分布式传感的结构精度和缆体安全, 大幅降低探测精度。而凹槽的节距精度同样会影响传感解调结果, 节距偏差过大会导致位置定位误差, 无法准确对应感知信号的发生位置, 满足不了分布式监测的定位要求。

从加工工艺角度来看, 增敏层采用的弹性体材料模量低、弹性变形大, 在表面加工连续螺旋凹槽的难度较高, 因此我方提出了两类方案:

(1) 先挤塑出圆柱状增敏层、再通过机加工开槽的工艺, 但弹性材料在切削过程中易发生塑性变形, 且弹性材料不同于金属材料, 硬度相差甚大, 有较大切削难度, 还容易出现槽壁毛糙、凹槽深浅不均的问题;



图3 带螺旋凹槽弹性体示意图

(2) 采用挤塑一体成型工艺, 挤塑模具的螺旋流道加工难度大, 挤出过程中弹性体的出料稳定难以控制, 容易出现凹槽错位、节距波动等。

目前我们正针对两种加工方案开展工艺试验，优化工艺参数，解决弹性体螺旋凹槽的成型问题。

螺旋凹槽的节距、深度和截面形状需要在连续加工过程中保持稳定，任何微小的偏差都会直接影响在凹槽尺寸，进而影响光纤嵌入的可靠性和应变传递的一致性。

与此同时，弹性体材料本身具有一定的回弹和收缩特性，加工成型后的凹槽尺寸容易发生变化，如何将最终尺寸控制在设计公差之内，也是工艺控制中需要重点解决的问题。

此外，向凹槽内嵌入光纤的工序同样对生产精度要求较高，嵌入过程中的张力控制、定位精度以及避免光纤微弯或附加损耗等问题，都直接关系到传感光缆的成品质量。

上述设计与制造环节相互关联，共同构成了螺旋凹槽增敏层能否实现稳定批产的核心工艺瓶颈。

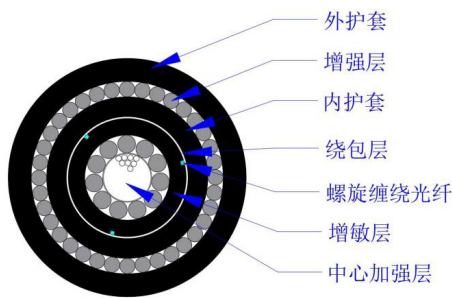


图 4 集成传感光缆的海电缆截面结构

三、多应用场景

本传感光缆具备较多的应用场景，能够根据不同的使用场合对内部结构做出相应变动，以下为该缆的常规使用场景简介：

场景 1：当作为独立的海洋传感光缆使用时，缆体中心加强件可设计为铠装光单元，截面结构如图 4 所示。

该结构设计既包含通信光单元用于传输日常通信数据，又包含了多螺旋传感光纤阵列的分布式感知功能，可直接单独布放于海底，实现大范围、长距离的水下声波探测、海底滑坡位移监测、管线振动预警等任务，尤其适用于海底活动监测、海底油气管道第三方施工破坏预警等场景，能够降低工程布线成本，简化布放施工流程。若应用于海底通信光缆线路改造，使普通通信光缆升级为兼具通信传输和分布式传感功能的一体

监测光缆，实现对海底光缆路由周边的环境动态、自身应变的安全监测，可提前发现非法抛锚拖网等对光缆的安全威胁，提升海底通信线路的安全性。

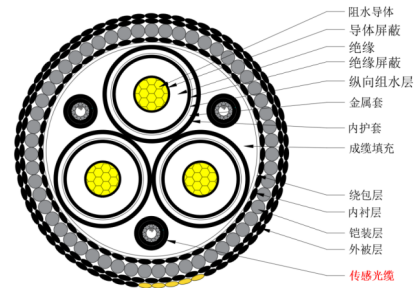


图 5 集成传感光缆的海电缆截面结构

场景 2：本光缆可以作为传感光单元，与海底电缆进行一体化集成，截面布局可参考图 5。这种设计将光纤感知功能、常规通信传输与电力输送融合在同一根缆体内，形成“通-感-一体、边传输边感知边供电”的综合功能缆。

四、工作原理

本传感光缆采用弹性增敏层应变耦合放大与多光纤分布式螺旋排布实现信号感知，其核心工作原理基于相位敏感光时域反射技术：当水下声波、振动作用于光缆时，声波压力会使缆体发生轴向压缩与径向形变，该形变通过弹性增敏层的力学放大效应，高效传递至嵌入螺旋凹槽内的相位敏感型传感光纤，引起光纤内传输光的相位变化，结合后向瑞利散射信号，即可解调得到各个位置的声波或振动信号，实现长距离分布式的水下声信号探测。

针对交叉敏感问题，本方案通过多光纤协同感知实现信号解耦：温度变化会均匀作用于整根光缆，偏振保持型光纤可通过光偏振态变化提取温度扰动信息，作为参考通道的耐弯曲单模光纤可进一步剔除环境干扰带来的信号偏差，将温度、应力应变与声波信号进行分离校准，最终提升目标信号测量的准确性与可靠性。

五、性能分析与仿真

该光缆力学性能指标如表 1 所示（指标仅供参考，可根据具体项目要求进行调整优化）。

表 1 性能指标

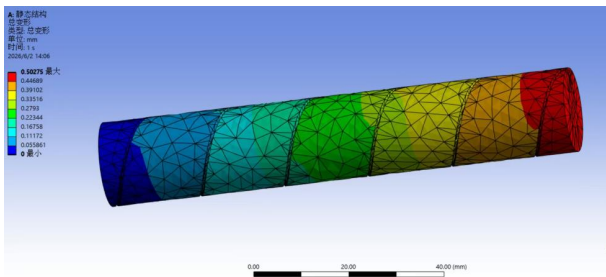
性能类别	项目	单位	指标	备注
机械性能	断裂拉伸负荷 (UTS)	kN	80	确保了光缆在海底敷设过程中可承受施工船牵引、洋流冲击等复杂力学作用
	短暂拉伸负荷 (NTTS)	kN	50	满足短期受力要求，确保光缆在敷设施工、海底打捞维修等短期高强度受力过程中，能有效抵御外力破坏，保障通信链路的可靠性和稳定性
	工作拉伸负荷 (NOTS)	kN	20	满足布放后的长期持续受力需求，确保在潮汐往复作用、水流长期拖拽等工况下，缆体结构不会发生不可逆的拉伸变形

	最小弯曲半径	m	0.5	满足打捞维修、路由调整过程中的弯曲工况要求
	抗侧压	kN/100mm	10	适配海底长期侧向承压要求或施工设备的短期挤压作用
环境适应性	渗水性能 (5MPa 水压, 14d)	m	<120	避免海水持续渗入, 侵蚀缆体与结构材料

为了充分验证缆设计的合理性, 我们做了相关性能仿真, 首先针对缆体拉伸情况开展仿真分析, 构建缆体三维结构模型, 对短暂拉伸载荷下各层结构的应力分布、应变传递效率进行模拟计算, 验证对拉伸载荷的承载能力, 确认在此拉伸载荷范围内, 光纤的附加损耗、应变变化是否处于可控范围, 避免出现光纤应变过大导致信号解调失效或结构破坏的问题。

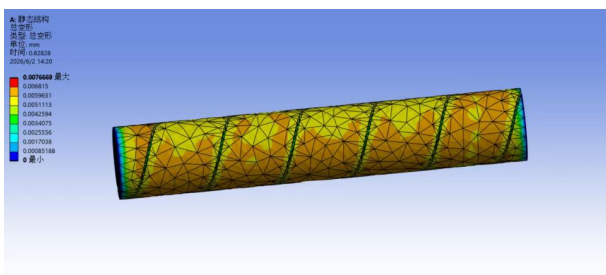
其次模拟海底水压条件下, 缆体各层的形变情况, 验证增敏层的防护效果, 分析螺旋凹槽的受力状态, 确认水压作用下不会对光纤造成过度挤压产生额外损耗, 保证传感信号稳定。后续我们还计划针对不同凹槽参数的增敏层开展声学仿真, 分析凹槽深度、节距对声波信号传递效率的影响, 验证弹性增敏层的声波放大效果, 优化结构设计参数, 进一步提升传感光缆的感知灵敏度。

(1) 拉伸性能仿真



在 50kN 的短暂负荷作用下, 仿真缆体整体伸长 5%, 最大轴向应变主要由中心加强件承担, 外层弹性增敏层与传感光纤的应变呈线性同步变化。此时, 螺旋凹槽内的传感光纤轴向伸长量约为 4.8%, 远小于光纤本身的断裂伸长阈值, 不会影响光信号传输与传感解调的稳定性, 能够保障传感信号输出的可靠性。

(2) 水压仿真



在 5MPa 水压的作用下, 缆体整体发生均匀径向压缩, 中

心加强件的形变几乎可以忽略, 弹性增敏层因自身模量较低发生一定的压缩形变, 此时螺旋凹槽的截面尺寸会产生微小收缩, 凹槽对光纤的包裹贴合度会进一步提升, 不过缆体仿真的压缩变形量仅 0.007mm, 不会造成光纤破碎或产生过高附加损耗, 传感信号的传输与解调不会受到影响, 能够满足该海洋水深环境下的长期使用要求。

六、结语

本文针对海洋环境下分布式动态监测的应用需求, 针对常规传感光缆灵敏度不足、交叉敏感、环境适应性差的问题, 提出了一种多层复合结构的螺旋缠绕分布式传感光缆, 通过弹性增敏层耦合放大、多光纤协同感知、多层增强防护的一体化设计, 兼顾了高灵敏度感知性能与海洋复杂环境下的结构可靠性。梳理了该光缆的整体结构设计思路, 分析了各层结构的功能作用, 同时针对核心的螺旋凹槽成型工艺难点, 明确了当前工艺研发需要解决的关键问题。该传感光缆可适配独立布放监测、海缆一体化集成等多种应用场景, 在海底灾害预警、水下声学探测、海洋工程安全监测等领域具备良好的应用前景, 后续将通过工艺试验、样品试制与海上性能测试进一步优化结构参数, 完善加工工艺, 推进该传感光缆的工程化应用。

[参考文献]

[1]中国人民解放军总装备部. GJB 4489--2002 海底光缆通用规范[S].2003.

[2]中华人民共和国工业和信息化部. YD/T 2283-2020 深海光缆[S].2020.

[3]光纤光缆的设计和制造[M].第三版.杭州:浙江大学出版社.2016.

[4]张磊, 王浩, 董凤良. 分布式光纤传感技术在海洋监测中的应用进展[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2022(03): 1-5.

[5]王照勇, 卢斌, 叶蕾, 应康, 孙延光, 程楠, 鲁湛, 叶青, 蔡海文. 分布式光纤声波传感及其地震波检测应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (13): 1306006

[6]夏菁, 江俊峰, 王双, 丁振扬, 刘铁根. 用于分布式光纤声传感的薄壁圆筒声增敏实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (7): 0706003.