

孙海飞, 於凌飞, 王小韦, 等. 基于 DAS 的桩基悬空段海缆寿命分析[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(4): 42-46. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24062703

基于 DAS 的桩基悬空段海缆寿命分析

孙海飞¹, 於凌飞¹, 王小韦¹, 丛一帆¹, 黄佳欢¹, 安博文², 陈元林², 汤吉安²

(1 江苏新能海力海上风力发电有限公司, 江苏 南通 226400; 2 上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘要: 海底电缆登陆海上风电机组时, 桩基喇叭口与海床之间有段悬挂在海水中的海缆。在海水的冲刷下, 悬空段海缆会产生一定频率的晃动, 当海缆受到的损伤值达到一定阈值时, 海缆会发生疲劳失效, 最终导致海缆故障。本文提出了一种悬空段海缆寿命的预测方法, 该方法通过分布式光纤声波传感技术 (Distributed optical fiber Acoustic wave Sensing technology, DAS) 能够解调背向瑞利散射光因外界扰动而产生的相位差, 基于相位差不仅能够转换得到海缆中铠装钢丝层的等效应力幅, 还可提取海缆的振动频率, 将两者代入寿命模型可计算出悬空段海缆的寿命。

关键词: DAS; 海底电缆; 桩基悬空段; 交变应力; 寿命分析

中图分类号: TN913.33

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)04-0042-05

Life analysis of suspended submarine cable based on DAS

SUN Haifei¹, YU Lingfei¹, WANG Xiaowei¹, CONG Yifan¹, HUANG Jiahuan¹, AN Bowen², CHEN Yuanlin², TANG Ji'an²

(1 Jiangsu Xinneng Haili Offshore Wind Power Generation Co., Ltd., Nantong 226400, Jiangsu, China;

2 College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: When the submarine cable lands on the offshore wind turbine, there is a submarine cable suspended in the sea water between the horn of the pile foundation and the seabed. Under the erosion of seawater, the suspended submarine cable will shake with a certain frequency, and when the damage value of the submarine cable reaches a certain threshold, the submarine cable will have fatigue failure, and finally lead to the submarine cable failure. This paper presents a method for predicting the life of suspended submarine cable. The Distributed optical fiber Acoustic wave Sensing technology (DAS) can demodulate the phase difference caused by the external disturbance of the back-Rayleigh scattered light. Based on the phase difference, not only the equivalent stress amplitude of the steel armor layer in the submarine cable can be converted, but also the vibration frequency of the submarine cable can be extracted, and the life of the suspended submarine cable can be calculated by substituting the two into the life model.

Key words: DAS; submarine cable; suspended section of pile foundation; alternating stress; life analysis

0 引言

海底电缆是海上风力发电的生命线, 其连接着陆上集控中心、海上升压变电站和海上风电机组, 在整个电能传输的过程之中, 负责整个发电系统的电能输送, 并承担着海上风电场的通信传输任务^[1-2]。倘若海缆发生故障, 将会导致巨大的经济损失。

当海缆登陆海上风机时, 先从海底泥土中引出, 并进入 J 型管内部。J 型管末端喇叭口处的中心夹具会固定住海缆。登陆段海缆可以分为 3 段, 分别为掩埋段、悬空段和内部段, 如图 1 所示。由于掩埋段和内部段海缆有泥土或 J 型管的保护, 受海水冲刷

的影响较小。而悬空段海缆一直暴露在海水中, 海水的流动会带动海缆产生振动, 这种持续的振动可能会导致海缆因疲劳而失效, 最终引发海缆故障^[3]。

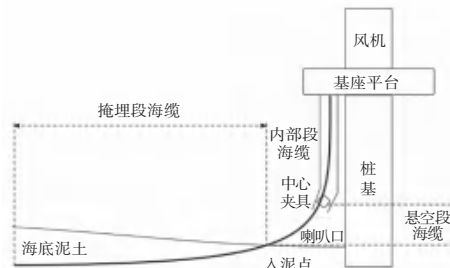


图 1 海底电缆登陆海上风机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of submarine cable landing offshore wind turbine

作者简介: 孙海飞(1990—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 海洋工程管理和研究。

通信作者: 於凌飞(1989—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 工程项目管理。Email: jsxn_ylf@163.com。

收稿日期: 2024-06-27

该现象在国内某些海上风电场屡次出现,且目前国内外对悬空段海缆寿命的相关研究和分析较少。基于以上情况,本文提出一种基于 DAS 的悬空段海缆寿命预测方法。

1 悬空段海缆冲刷失效分析模型

1.1 交变应力

物体在外力作用下会产生形变,其内部各部分之间因相对位置改变而引起相互作用力,这种作用力即为内力,而单位面积上的内力被定义为应力^[4]。

随时间作周期性变化的应力称为交变应力^[5]。如图 2 所示。图 2 描述的是按正弦函数规律变化的应力 σ 和时间 t 之间的关系,由 a 到 b 应力经历了变化的全过程又回到原来的数值,称为一个应力循环^[6]。应力循环中的最大和最小应力分别用 σ_{\max} 和 σ_{\min} 表示。

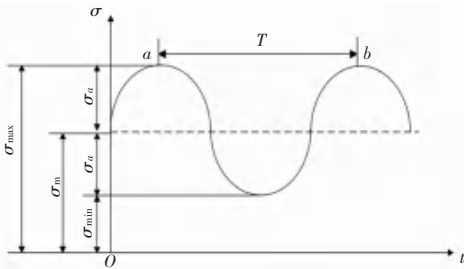


图 2 交变应力

Fig. 2 Alternating stress

σ_{\max} 与 σ_{\min} 代数之和的二分之一称为平均应力,即

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (1)$$

σ_{\max} 与 σ_{\min} 代数差的二分之一称为应力幅,即

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2)$$

若交变应力的最大应力 σ_{\max} 与最小应力 σ_{\min} 等值而反号,则称为对称循环交变应力,其余情况均称为非对称循环交变应力^[7]。

1.2 疲劳失效

在交变应力的作用下,虽然物体受到的应力低于材料的屈服极限,但在长期反复作用之后,也会突然发生断裂,这种现象称为疲劳失效^[8]。

应力-寿命曲线(S-N 曲线)是一种描述材料在对称循环交变应力作用下的疲劳强度与疲劳寿命之间关系的曲线,横坐标为可循环次数 N ,纵坐标为材料的最大应力 σ_{\max} ,如图 3 所示。

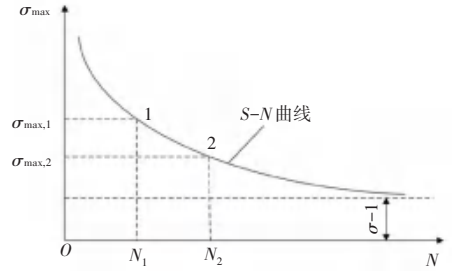


图 3 应力-寿命曲线

Fig. 3 Stress-life curve

值得强调的是,交变应力的平均应力必须为 0,即应力幅 σ_m 与最大应力 σ_{\max} 相等。若平均应力不为零,需要使用 Goodman 直线模型对非对称循环交变应力进行修正,转换成对称循环交变应力。模型的公式如下:

$$\sigma_{a_eq} = \sigma_a \times \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right) \quad (3)$$

其中, σ_{a_eq} 为修正后的对称循环应力幅,称为等效应力幅; σ_a 为非对称循环的应力幅; σ_m 为非对称循环的平均应力; σ_s 为材料的抗拉强度。

当最大应力降低至某一值后,应力-寿命曲线趋于水平,表示材料可经历无限次应力循环而不发生疲劳失效,相对应的最大应力 σ_{\max} 称为材料的疲劳极限。在曲线中,疲劳极限对应的可循环次数被定义为循环基数^[9],本文选取 10^8 。

1.3 寿命计算

当材料受到的等效应力幅大于材料的疲劳极限时,每一次应力循环都会对材料产生疲劳损伤^[10]。假设材料受到的等效应力幅为 σ_i ,相应的可循环次数为 N_i 。材料按 σ_i 每循环一次造成的损伤值为 $\frac{1}{N_i}$,循环 n_i 次后形成的损伤值为 $\frac{n_i}{N_i}$ 。损伤值的总和为:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

当损伤值总和等于 1 时,材料就会疲劳失效,即

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5)$$

若一年内材料受到的损伤值总和为 value,则材料的疲劳寿命 life 为

$$\text{life} = \frac{1}{\text{value}} \quad (6)$$

2 总体方案设计

本文的研究内容基于 DAS 对悬空段海缆进行

寿命分析和预测^[11]。分析监测结构框如图4所示。DAS系统解调输出相位差,对某一监测点随时间变化的实际相位进行傅里叶变换,得到海缆的振动次数,建立相位差与光纤应力之间的线性关系,并通过Abaqus软件仿真得到得到铠装钢丝的等效应力幅,最后代入寿命模型,得到海缆的寿命值。

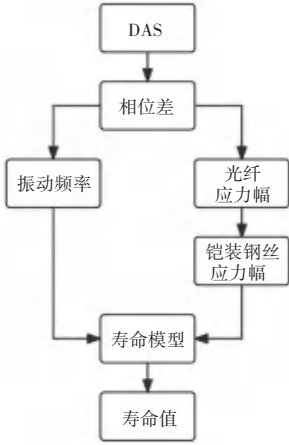


图4 分析监测系统结构框图

Fig. 4 Structure diagram of analysis and monitoring system

3 DAS探测信息提取

3.1 振动频率提取

本文采用基于外差探测^[12]和正交相位解调^[13]的DAS^[14]系统,通过对背向瑞利散射光^[15]解调分析可得因外界扰动而产生的相位差。

相位差表示相邻两个监测点间相位的差值,通过对某监测点前所有的相位差求和可得该点的实际相位。本文将实际相位平方的均值定义为能量值,由于能量值最大和最小值相差过大,故对其进行开根号处理以减小分散程度,能量值公式如下:

$$\text{能量值} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_i^2 + \dots + V_{1024}^2}{1024}} \quad (7)$$

其中, V_i 表示某监测点某时刻监测到的实际相位的平均值。

由于DAS的采样频率为10 kHz,故满足采样定理。将采样得到的实际相位序列 $\varphi(t)$ 进行傅里叶变换,可得到频谱图 $\phi(f)$, 公式如下:

$$\phi(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

式中: $\phi(f)$ 为实际相位序列 $\varphi(t)$ 经过傅里叶变换后的频谱函数, f 为频率(单位: HZ), t 为时间(单位: s), j 为虚数单位。本文选取频谱图中能量最大的信号频率 f_h 为振动频率。

3.2 相位差与应变计算

在外界扰动的作用下,光纤会发生振动,进而产生应变,如图5所示。

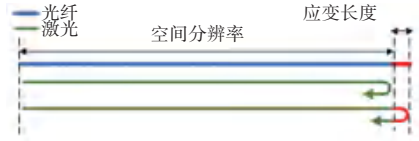


图5 光纤应变原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optical fiber strain principle

应变 V 定义为光纤空间分辨率 L 内的应变长度 dL 与空间分辨率 L 的比值,公式如下:

$$V = \frac{dL}{L} \quad (9)$$

其中,DAS的空间分辨率 L 为5 m。

由于激光通过光纤的光程和光纤的折射率会随着应变的变化而变化,故可利用两者的变化量建立与相位差间的关系^[16]。

光程差 ΔS 的表达式为:

$$\Delta S = 2[(n_{\text{eff}} + \Delta n) \cdot (L + dL) - n_{\text{eff}} \cdot L] \quad (10)$$

$$\Delta n = C_\varepsilon \cdot V \quad (11)$$

其中, n_{eff} 为光纤的有效折射率; Δn 为折射率变化量; C_ε 为折射率随应变的变化系数。

光程差 ΔS 与相位差 $\Delta\varphi$ 间的关系式为:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{\Delta S}{\lambda} \quad (12)$$

其中, λ 为激光的波长。

由公式(10)~(12),得

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}} VL + C_\varepsilon V^2 L + C_\varepsilon VL) \quad (13)$$

鉴于应变 V 非常小,故可忽略二次项,即

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}} + C_\varepsilon) VL \quad (14)$$

取 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $n_{\text{eff}} = 1.4679$, $C_\varepsilon = -0.32/\varepsilon$, 计算得下式:

$$V = 2.149 \times 10^{-8} \times \Delta\varphi \quad (15)$$

故相位差与光纤应变存在线性关系。

4 等效应力幅转换

4.1 悬空段海缆应力仿真

三芯光电复合海缆的主要结构包括外被层、铠装钢丝层、填充层、光纤层和铜导体。各层的材料及材料属性见表1。

本文基于Abaqus软件对悬空段海缆进行应力仿真。海缆倾斜一定的角度,两端分别固定,分别表

示中心夹具点和入泥点。将中心夹具点与入泥点之间的垂直距离称为悬空高度。海缆的初始装配如图 6 所示。

表 1 海缆材料属性

Table 1 Submarine cable material properties

结构	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/kg·m ⁻³
外被层	聚丙烯	1.4	0.40	900
铠装钢丝层	钢	210.0	0.30	7 800
填充层	聚丙烯	1.4	0.40	900
光纤层	光纤	70.0	0.17	2 600
铜导体	铜	119.0	0.33	8 900

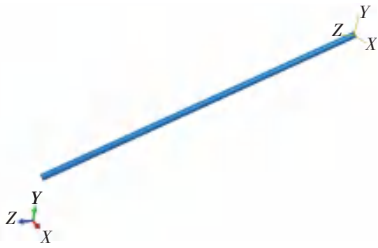


图 6 海缆装配图

Fig. 6 Submarine cable assembly drawing

4.2 海缆破损结构分析

若悬空段海缆的悬空长度为 10 m, 悬空高度为 4 m, 在海水的冲刷下, 仿真结果如图 7 所示。图中铠装钢丝层受到的应力最大, 在海缆长时间的振动下, 可能会出现损坏。因此, 铠装钢丝层是影响海缆寿命的决定性因素。

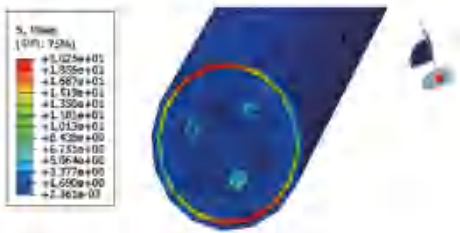


图 7 海缆仿真结果图

Fig. 7 Submarine cable simulation results

应力-寿命曲线可通过数学公式来表达^[17], 即

$$\lg N_i = a - m \lg \sigma_i \quad (16)$$

其中, N_i 为材料的可循环次数, 即疲劳寿命 (单位: 次数); σ_i 为等效应力幅值, 即 $\sigma_{a,eq}$ (单位: MPa); a, m 为材料的参数, 由表 2 给出。

表 2 铠装钢丝应力-寿命曲线参数

Table 2 Stress-life curve parameters of armored steel wire

循环次数	a	m
$N < 10^6$	15.917	4
$N > 10^6$	17.146	5

铠装钢丝的抗拉强度 σ_s 为 345 MPa, 应力-寿命曲线参数^[18]见表 2。通过计算可得, 铠装钢丝的疲劳极限为 67 MPa。

4.3 等效应力幅转换

由于 DAS 只能监测光纤的振动特性, 若要监测铠装钢丝的振动特性, 需建立两者等效应力幅^[19]之间的转换关系。

保持海缆悬空长度和悬空高度不变, 分析不同海水流速下铠装钢丝等效应力幅与光纤等效应力幅之间的关系, 仿真结果如图 8 所示。其中, 海水流速的范围在 0.2~0.5 m/s 区间内。

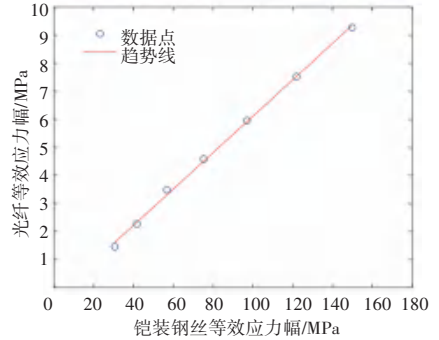


图 8 铠装钢丝-光纤等效应力幅转换

Fig. 8 Armored steel wire - fiber equivalent stress amplitude conversion

由图 8 可知, 铠装钢丝等效应力幅与光纤等效应力幅之间存在线性关系, 即

$$\sigma_{of} = 0.0649 \sigma_{sw} - 0.3788 \quad (17)$$

其中, σ_{of} 为光纤的等效应力幅, σ_{sw} 为铠装钢丝的等效应力幅。

假设光纤受到的是对称循环交变应力, 则等效应力幅值与最大应力值相等。通过胡克定律, 最大应力值可转换得到最大应变值, 即光纤完成 1/4 周期振动的应变值。光纤应变值可通过公式 (15) 计算出相位的变化量^[20]。

DAS 系统可提取海缆的振动频率 f_h , 海缆完成 1/4 周期的时间为 $\frac{1}{4f_h}$ 。由于 DAS 的采样频率为 10 kHz, 故海缆在 1/4 周期内被采样 $\frac{1}{4f_h} \times 10^4$ 次。最后, 将光纤相位的变化量除以采样次数, 得到每次采样的相位变化量, 该值就是前文提及的能量值。数学表达式如下:

$$\text{能量值} = \frac{\sigma_{of}}{E_{of}} \cdot \frac{10^8}{2.149} \cdot \frac{4f_h}{10^4} \cdot \frac{256}{\pi} \quad (18)$$

其中, E_{of} 为光纤的弹性模量, 大小为 70 GPa, 为了直观性, 使用 256 替代相位值 π 。

将公式(17)代入公式(18),得

$$\text{能量值} = \frac{1.024(0.0649\sigma_{sw} - 0.3788) \cdot 10^4 f_h}{2.149E_{of} \cdot \pi} \quad (19)$$

该公式建立了铠装钢丝等效应力幅 σ_{sw} 与能量值和海缆振动频率 f_h 间的关系。

5 悬空段海缆疲劳寿命分析实例

以江苏某海上风电场某号风机为例,其悬空段海缆的悬空长度为 10 m,悬空高度为 4 m,在不同风速下,已知某侧悬空段海缆中铠装钢丝层的能量值和振动频率,代入公式(18)计算得到等效应力幅 σ_{sw} ,结果见表3。

表3 铠装钢丝等效应力幅

Table 3 Equivalent stress amplitude of armored steel wire

风速/m · s ⁻¹	能量值	振动频率/Hz	等效应力幅/MPa
7	492.97	4.88	71.836
6	392.84	4.88	57.245

由表3可知,在6 m/s的风速下,铠装钢丝受到的等效应力幅小于疲劳极限67 MPa,故不会受到疲劳损伤。在观察时间内,平均每天风速达到7 m/s的时间为1 h。

当海缆受到疲劳损伤时,海缆的振动频率为4.88 Hz,则一天内受到疲劳损伤振动的次数约为17 658次。海缆中铠装钢丝层受到的等效应力幅为71.836 MPa,代入公式(16),计算得可循环次数为 7.3163×10^7 次。故该侧悬空段海缆的寿命约为4 143天,即11年。

6 结束语

本文开展了基于分布式光纤声波传感技术的悬空段海缆寿命预测研究。首先,构建了悬空段海缆冲刷失效模型,分析了海缆发生故障的原因。将海缆某监测点的实际相位均值定义为能量值,对随时间变化的能量值进行傅里叶变化,得到海缆的振动频率。接着,基于光纤的物理特性,建立DAS系统解调输出相位差与光纤微应变之间的模型。最后,通过软件仿真,得出影响海缆寿命的决定性结构,且仿真结果表明,光纤等效应力幅与铠装钢丝等效应力幅之间存在线性关系。将振动频率和铠装钢丝等效应力幅代入寿命模型,得到海缆的预测寿命。

本文提出将分布式光纤声波传感技术应用于悬

空段海缆的监测中,能够有效地预测海缆的使用寿命。该方法不仅准确性较高,且成本较低,具有工程应用推广价值。

参考文献

- [1] 曹宁,黄书踪,赖海龙,等.海上风电场海底电缆绝缘故障分析及预防[J].船舶工程,2022,44(S1):28-30.
- [2] 胡朝阳.海上风电场布机及线缆优化设计[D].西安:西安理工大学,2023.
- [3] 李新宏,朱玉娇,李成成,等.贫数据条件下海底电缆故障概率评估方法[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):224-229.
- [4] 刘鸿文,林建兴,曹曼玲.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [5] 苏凯,赵鑫蕊,朱洪泽,等.基于能量守恒原理的海缆结构力学特性理论分析研究[J].太阳能学报,2024,45(6):661-672.
- [6] 贾翔宇,吕中亮,李玲凤,等.基于振动信号的柔性薄壁轴承故障特征提取综述[J].轴承,2025,58(2):8-18.
- [7] 刘惠玲,张洪,张森华,等.基于磁谱振的预应力钢绞线交变应力监测试验研究[J].振动与冲击,2023,42(14):189-197.
- [8] 曹正,柴艳,何光宇,等.压气机抗冲蚀涂层对钛合金疲劳性能的影响[J].航空学报,2024,45(19):318-330.
- [9] 巴宁,张苗苗,汪菁,等.深海钢悬链线立管腐蚀疲劳性能分析[J].武汉理工大学学报,2024,46(6):46-53.
- [10] 孔令澎,王体涛,梁旭,等.漂浮式风电平台动态电缆疲劳寿命分析[J].船舶工程,2022,44(2):23-27.
- [11] 刘可为,谢俊杰,吴冰冰,等.通感一体化光网络的技术、应用与展望[J].光通信研究,2025,51(2):13-23. DOI: 10.13756/j.gtxyj.2025.240046.
- [12] 王凯出,丁青峰,周奇,等.基于AlGaIn/GaN HEMT外差探测器的太赫兹阵列矢量探测系统[J].红外与激光工程,2024,53(6):175-184.
- [13] 宋宪晨,唐东林,丁超.基于正交信号融合计算的相位解调算法[J].光学学报,2023,43(22):133-143.
- [14] 盛学文,杨文辉,徐亚磊,等.基于深度学习的光纤振动信号分类研究[J].智能计算机与应用,2025,15(1):59-64. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250109.
- [15] 陈家豪,刘庆文,常晏铭,等.基于瑞利散射强度谱动态扩展的大量程分布式光纤传感系统[J].光学学报,2024,44(11):259-265.
- [16] 王子恒,景洪.分布式光纤声波传感系统的研究与工程应用[J].传感器世界,2020,26(12):12-18.
- [17] 张振国,袁振钦,孙亚峰,等.浮式风电动态缆疲劳分析方法研究[J].应用科技,2022,49(6):71-77.
- [18] DET NORSKE VERITAS. Fatigue design of offshore steel structures[C]//Proceedings of the Recommended Practice DNV-RPC203. Oslo:DNV, 2012:126.
- [19] 张禄,周炜,张学文.基于应力等效关系的汽车零部件疲劳寿命预测模型[J].公路交通科技,2024,41(5):171-177.
- [20] 温宏波,王春意,施吉,等.高温疲劳应变变量测量调研及分析[J].中国仪器仪表,2019,38(8):66-70.