

# 弯曲限制器海缆防护系统动态响应特性分析

陈震峰<sup>1</sup>, 陈达源<sup>1</sup>, 熊金帝<sup>1</sup>, 柯国华<sup>1</sup>, 付世晓<sup>2\*</sup>, 牛智搏<sup>2</sup>

(1. 国家电投集团徐闻风力发电有限公司, 广东湛江 524000; 2. 上海交通大学 海洋工程全国重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** [目的]为了解决海上风机海缆在复杂海洋环境中易因局部过度弯曲、疲劳损伤出现结构失效,以及工程常用的弯曲限制器防护系统动态响应特性研究不足、防护设计缺乏试验支撑的问题。[方法]在大比尺波浪水槽中开展弯曲限制器海缆保护系统模型试验,系统探究不同波浪入射方向、波高及波浪周期条件下海缆的动态响应特性。[结果]试验结果表明,波浪入射方向对海缆动态响应的影响最为显著,当波浪的入射方向为90°时,海缆弯曲程度最大;当波浪的入射方向为0°或180°时,海缆弯曲程度最小,且几乎不发生摆动。海缆弯曲程度随波高增大而逐渐增加,在不同波浪周期下变化不明显。海缆横向摆动的频率始终与波浪频率基本一致,表明其横向运动主要受波浪频率主导。海缆在桩基出口处存在明显的横向弯曲集中现象,该位置约束条件突变且刚度过渡不连续,导致局部弯曲曲率显著增大。[结论]研究结果可为海缆防护系统的设计优化与工程应用提供重要参考。

**关键词:** 海上风机; 弯曲限制器; 海缆; 模型试验; 动态响应

**中图分类号:** P756.1; TM614 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.05.17

## Analysis on Dynamic Response Characteristics of Submarine Cable Protection System with Bending Restrictors

CHEN Zhenfeng<sup>1</sup>, CHEN Dayuan<sup>1</sup>, XIONG Jindi<sup>1</sup>,  
KE Guohua<sup>1</sup>, FU Shixiao<sup>2\*</sup>, NIU Zhibo<sup>2</sup>

(1. State Power Investment Group Xuwen Wind Power Generation Co., Ltd., Zhanjiang 524000, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** [Purpose] To address the problem that submarine cables of offshore wind turbines are prone to structural failure due to excessive local bending and fatigue damage in complex marine environments, together with the insufficient research on the dynamic response characteristics of the bend restrictor protection system commonly used in engineering practice and the absence of experimental support for relevant protective design. [Method] Large-scale wave basin experiments are conducted to investigate the dynamic response characteristics of a submarine cable protection system with bending restrictors under different wave incidence angles, wave heights, and wave periods. [Result] The results show that the wave incidence angle has the greatest influence on the cable's dynamic response. The largest bending occurs at 90° incidence, while minimal bending and almost no motion occur at 0° or 180°. The cable's bending amplitude increases gradually with wave height but changes little with wave period. The transverse motion frequency remains nearly consistent with the wave frequency, indicating that the response is mainly governed by the dominant wave frequency. A pronounced transverse bending concentration is also observed at the pile foundation outlet, where abrupt constraint changes and non-smooth stiffness transition amplify local curvature. [Conclusion] The study reveals the dynamic response characteristics of submarine cable

收稿日期: 2025-07-10; 修回日期: 2025-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52425102, 52088102); 上海交通大学深蓝计划(SL2023ZD207)。

作者简介: 陈震峰(1988—), 男, 本科、工程师。研究方向: 海上风电运行与维护技术。

通信作者: 付世晓(1976—), 男, 博士、教授。研究方向: 海洋管缆流固耦合。E-mail: shixiao.fu@sjtu.edu.cn。

protection systems with bending restrictors under typical wave conditions and provides valuable reference for the design optimization and engineering application of offshore wind power cables.

**Key words:** offshore wind turbine; bending restrictor; submarine cable; model test; dynamic response

## 0 引言

随着全球能源结构向可再生能源转型, 海上风电作为重要的清洁能源形式得到了迅速发展。根据国际能源署于2024年发布的《全球风电发展报告》, 截至2023年底, 中国海上风电累计装机容量达39 879 MW, 占全球总量的53.06%, 全年新增装机容量为7 025 MW<sup>[1]</sup>。海底电缆是海上风机电能传输的关键设备。然而, 海缆长期处于复杂多变的海洋环境中, 受海流、波浪和潮汐等因素的持续作用, 易发生局部过度弯曲、疲劳损伤甚至断裂失效<sup>[2]</sup>, 给风电场的安全运行带来严重的经济损失<sup>[3]</sup>。在海上风电场建设过程中, 与海缆相关的成本投入仅占建设总成本的约10%, 但在已报道的海上风电相关保险理赔案件中, 与海缆故障相关的理赔金额高达90%<sup>[4]</sup>。

为防止海缆过度弯曲, 工程中普遍采用弯曲限制器进行保护。弯曲限制器由多个相同的半圆筒式子结构相互嵌套而成, 当海缆弯曲半径达到弯曲限制器的锁合阈值时, 其子结构相互锁合, 从而限制海缆的进一步弯曲变形<sup>[5-7]</sup>。关于弯曲限制器的研究始于20世纪80年代, 1990年BOET等<sup>[8]</sup>基于细长梁理论提出了一种弯曲限制器的设计形式, 并通过有限元分析验证了其能有效抑制海缆弯曲。美国石油协会(American Petroleum Institute, API)于2013年颁布了关于弯曲限制器的行业标准(API 17L1/17L2), 明确了弯曲限制器的设计流程、数值仿真方法及测试验证程序, 为相关产品的产业化应用提供了重要指导<sup>[9]</sup>。近年来, 国内外学者围绕弯曲限制器的结构强度与设计优化开展了大量研究工作。徐海超等<sup>[10]</sup>针对大连市某海上风电场35 kV海缆所用的弯曲限制器, 通过有限元仿真研究了其在不同载荷工况下的结构响应特性; 钟科星等<sup>[11]</sup>提出了一种基于神经网络的风电海缆弯曲限制器多目标优化方法, 为弯曲限制器的结构设计提供了新路径; 陶伟等<sup>[12]</sup>通过数值模拟分析了海床冲刷对海缆及弯曲限制器受力性能的影响, 结果表明, 冲刷坑几何尺寸、海缆松弛度等因素显著影响海缆及弯曲限制器的动态响应, 为工程设计与运维提供了参考依据; 田振亚等<sup>[13]</sup>基于中国南海实际的海洋环境条件, 对冲刷条件下有无保护装置的海缆分别进行了动态特性分析, 结果表明, 在桩周冲刷导致海缆悬空的情况下, 海缆保护装置能有效限制海缆的过度弯曲, 使海缆的最小弯曲半径保持在安全范围内。

上述关于弯曲限制器的研究主要集中在静态性

能与结构设计优化等方面, 未考虑在复杂海洋环境作用下海缆及弯曲限制器保护系统的动态响应特性。工程实践表明, 由于桩基冲刷导致海缆悬空长度增加等因素影响, 部分海上风电场出现了弯曲限制器破损、脱落的问题, 进而引发海缆铠装层磨损甚至断裂<sup>[14-17]</sup>。

综上所述, 为研究海缆及弯曲限制器保护系统在复杂海洋环境中的动态响应特性, 本文在大比尺波浪水槽中开展了弯曲限制器海缆保护系统的模型试验, 系统探究了在不同波浪入射方向、波高及波浪周期条件下, 该保护系统动态响应特性的变化规律。本研究结果可为海上风电海缆及其保护系统的工程设计和运维提供重要参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验模型设计

本文以广东省湛江市某海上风电场的实际风机海缆为研究对象, 基于弗劳德相似准则开展试验模型设计。该海域水深为9.3 m, 风电基础采用直径为7.5 m的单桩结构, 海缆直径为0.133 m。单个弯曲限制器长度为0.648 m, 最大外径为0.422 m。试验在交通运输部天津水运工程科学研究所的大比尺波浪水槽中进行, 该水槽长为456 m、宽为5 m、高为12 m, 一端配备活塞式造波机, 另一端装有消波装置以减少波浪反射。综合考虑实验室的造波能力和模型制作难度, 最终确定试验模型的缩尺比 $\lambda=7.5$ , 并基于弗劳德相似准则推导各物理量之间的相似关系。原型与试验模型的具体参数及缩尺关系见表1。

表1 原型参数和试验模型参数

Tab. 1 Prototype Parameters and Test Model Parameters

参数	缩尺关系	原型值	模型值
水深/m	$\lambda$	9.30	1.24
海缆直径/m	$\lambda$	0.133 0	0.017 7
海缆干重/(kg/m)	$\lambda^2$	37.15	0.66
海缆弯曲刚度/(N·m <sup>2</sup> )	$\lambda^5$	6 380.00	0.269
海缆轴向刚度/N	$\lambda^3$	$2.72 \times 10^8$	$6.45 \times 10^5$
桩基直径/m	$\lambda$	7.5	1.0
桩基导缆孔高度/m	$\lambda$	3.0	0.4
弯曲限制器长度/m	$\lambda$	0.648 0	0.086 4
弯曲限制器最大外径/m	$\lambda$	0.422	0.056
内部防弯器长度/m	$\lambda$	2.000	0.267

试验模型主要由桩基、海缆、弯曲限制器、倒刺及内部防弯器5个部分构成，模型布置见图1。在水槽试验段底部铺设长为16 m、宽为5 m、高为1 m的混凝土层，试验水深保持为混凝土层表面以上1.24 m。桩基模型直径为1 m、高为4 m，安装于试验段中心位置。桩基底部距地面0.4 m处设有导缆孔，其中心轴线与水平面呈45°夹角。桩基底部与直径为4.4 m的圆盘相连，并固定于回转轴承上，可通过转动圆盘调整海缆走向与波浪入射方向之间的夹角。海缆模型采用聚乙烯（Polyvinyl Chloride, PVC）管制作，内部贯穿铜芯电缆，以确保模型质量满足缩尺要求。弯曲限制器模型采用树脂材料通过3D打印制作，几何形状与原型相似，以真实反映其对海缆的约束特性。内部防弯器与倒刺采用一体化开模浇筑成型，其中，内部防弯器的材质为聚氨酯，倒刺为不锈钢材质。此外，在水槽上游侧壁安装3个电容式浪高仪，用于记录波浪参数。

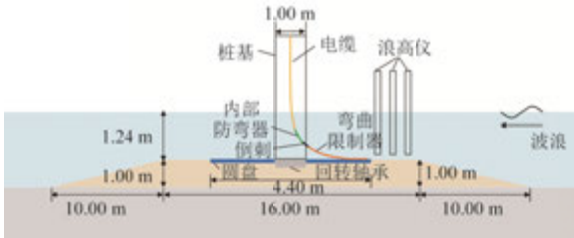
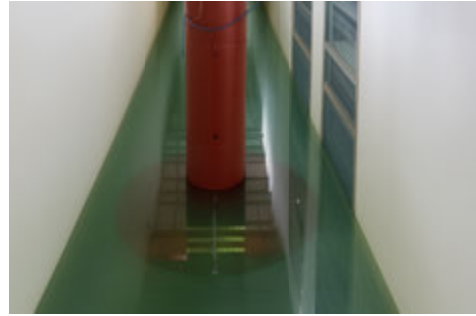


图1 试验模型布置示意图

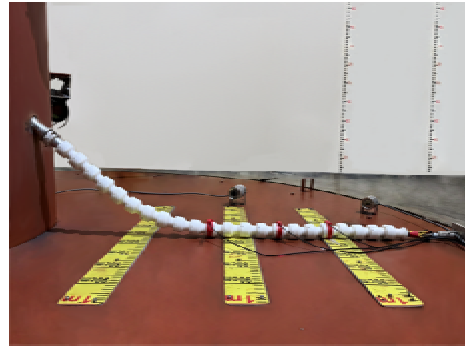
Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Model Layout

内部防弯器与倒刺固定于导缆孔内侧。海缆一端固定在桩基顶端，另一端依次穿过内部防弯器和导缆孔，最终固定于距桩基1.73 m处。弯曲限制器从倒刺位置开始，沿海缆表面逐个嵌套安装，直至完全覆盖桩基外部的海缆区段。试验模型的安装效果见图2。

试验开展前，先对弯曲限制器模型的限弯性能进行标定。根据弯曲限制器模型的设计参数，在ABAQUS中建立有限元模型进行锁合弯曲刚度计算。该有限元模型由4节相互嵌套的弯曲限制器构成，末节弯曲限制器尾端设置为完全固定约束。在首节弯曲限制器端部分两步施加弯矩：先施加5 N·m使其达到锁合状态，再施加10 N·m以计算锁合状态下的位移变形。有限元计算得到的弯曲限制器位移分布云图见图3。结果表明：弯曲限制器模型的最大位移为2.21 mm。进一步结合梁的挠度计算公式，可得弯曲限制器模型的锁合弯曲刚度为80.44 N·m<sup>2</sup>。



(a) 试验装置整体图



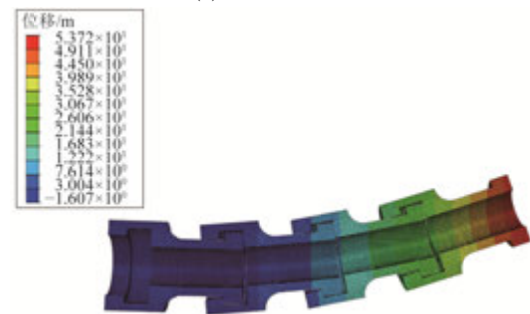
(b) 弯曲限制器安装效果图

图2 试验模型安装效果图

Fig. 2 Installation View of Experimental Model



(a) 弯矩 5 N·m



(b) 弯矩 10 N·m

图3 弯曲限制器位移云图

Fig. 3 Displacement Cloud Diagram of Bend Restrictor

梁的挠度计算公式为

$$\omega = -\frac{Ml^2}{2EI} \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为梁的挠度;  $M$  为弯矩;  $l$  为梁的长度;  $EI$  为梁的弯曲刚度。

### 1.2 试验工况

本文在规则波条件下开展弯曲限制器海缆保护系统动态响应特性模型试验, 通过改变波高、波浪周期及波浪入射方向与海缆走向之间的相对夹角, 系统探究该保护系统动态响应特性的变化规律。

结合波浪水槽的造波能力与试验水深, 为避免波浪在水槽中发生破碎, 试验选取的规则波波高为 0.200 m~0.496 m, 波浪周期为 2.51 s~3.60 s。在试验过程中, 通过转动底部圆盘调整波浪入射方向与海缆走向之间的相对夹角, 其定义见图4。试验考虑波浪入射方向与海缆走向之间的相对夹角分别为 0°、45°、90°、135°和 180°的工况。

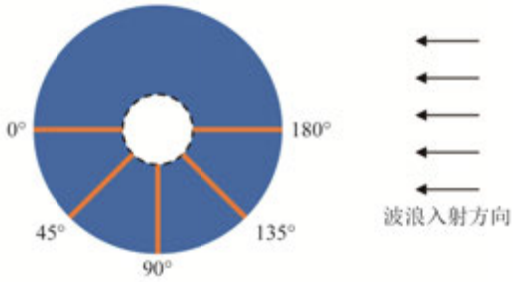


图4 波浪入射方向与海缆走向之间的相对夹角定义  
Fig. 4 Definition of Relative Angle Between Waves Incidence Direction and Cable Orientation

本文共设置了3组试验, 分别探究波浪入射方向、波高、波浪周期变化对弯曲限制器海缆保护系统动态响应特性的影响规律, 试验工况见表2。



图5 光纤光栅应变传感器布置示意  
Fig. 5 Schematic of Fiber Bragg Grating Strain Sensor Layout

光纤光栅应变传感器直接测得的应变包含拉伸应变和弯曲应变。拉伸应变由轴向张力引起, 可认为在海缆模型任意截面上, 各点的拉伸应变相等; 弯曲应变由水动力作用导致海缆弯曲产生, 在任意截面上, 关于中性层对称的两点处弯曲应变大小相等、符号相反。

基于平断面假设及梁弯曲基本理论, 海缆模型每一截面上4个光纤光栅应变传感器的测量应变可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_{IL1}(z, t) = -\kappa(z, t)R \cos \alpha_{IL1}(z, t) + \varepsilon_T(t) \\ \varepsilon_{IL2}(z, t) = \kappa(z, t)R \cos \alpha_{IL1}(z, t) + \varepsilon_T(t) \\ \varepsilon_{CF1}(z, t) = \kappa(z, t)R \sin \alpha_{IL1}(z, t) + \varepsilon_T(t) \\ \varepsilon_{CF2}(z, t) = -\kappa(z, t)R \sin \alpha_{IL1}(z, t) + \varepsilon_T(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_{IL1}$ 、 $\varepsilon_{IL2}$ 、 $\varepsilon_{CF1}$ 和 $\varepsilon_{CF2}$ 分别为同一截面上IL1、IL2、CF1和CF2这4个测点的测量应变;  $\varepsilon_T$ 为该截面上的拉伸应变;  $R$ 为海缆模型的半径;  $\kappa$ 为海缆模型在该截面处的弯曲曲率;  $\alpha_{IL1}$ 为海缆模型在该截面处弯曲方向与IL1测点径向所成夹角。

由式(2)可推导得到以下2个关系式:

表2 试验工况表

Tab. 2 Test Conditions

工况	波高/m	波浪周期/s	波浪入射角度/(°)
不同波浪入射角度	0.496	3.26	0
			45
			90
			135
			180
不同波高	0.200	3.26	90
	0.300		
	0.400		
	0.496		
不同波浪周期	0.496	2.51	135
		2.90	
		3.26	
		3.60	

### 1.3 试验数据采集与处理方法

在试验过程中, 采用光纤光栅应变传感器测量海缆模型表面的动态应变响应, 光纤光栅应变传感器布置见图5。在海缆模型表面, 沿环向间隔90°均匀布设4组光纤光栅应变传感器: 其中, 2组位于海缆横向, 分别命名为CF1和CF2; 另外2组位于海缆垂向, 分别命名为IL1和IL2。沿海缆横向, 每个方向布置16个应变测点。其中, 第1测点~11测点位于桩基内部, 第12测点、13测点位于内部防弯器区段, 第14测点~16测点位于弯曲限制器区段。前9个测点间隔0.3 m布置, 后8个测点间隔0.2 m布置。

$$v_1(z,t) = \frac{\varepsilon_{IL2}(z,t) - \varepsilon_{IL1}(z,t)}{2R} = \kappa(z,t) \cos \alpha_{IL1}(z,t) \quad (3)$$

$$v_2(z,t) = \frac{\varepsilon_{CF1}(z,t) - \varepsilon_{CF2}(z,t)}{2R} = \kappa(z,t) \sin \alpha_{IL1}(z,t) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中： $v_1$ 和 $v_2$ 分别为截面 $z$ 处海缆模型弯曲曲率在IL方向和CF方向的曲率分量。

联立式(3)与式(4)即可得到海缆模型在截面 $z$ 处的整体弯曲曲率：

$$\kappa(z,t) = \sqrt{v_1(z,t)^2 + v_2(z,t)^2} \quad (5)$$

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同波浪方向下海缆动态响应分析

在探究不同波浪入射方向对弯曲限制器海缆保护系统动态响应特性影响的过程中，固定波浪参数为波高 $H=0.496$  m、周期 $T=3.26$  s，波浪入射方向分别选取 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 和 $180^\circ$ 。

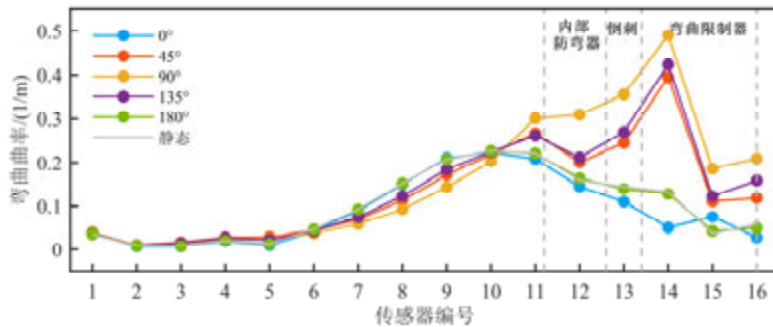
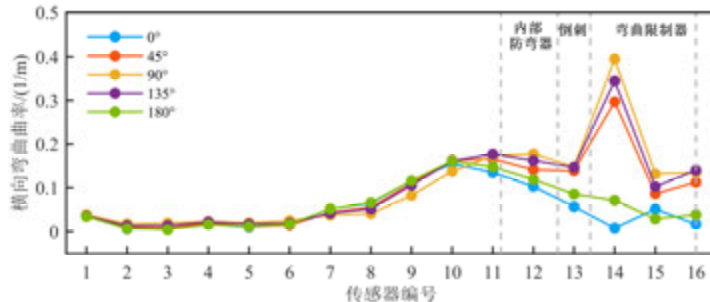


图6 不同波浪入射角度下海缆弯曲曲率RMS值沿海缆长度方向变化

Fig. 6 Distribution of RMS Bending Curvature Along Cable Under Different Wave Incidence Angles

不同波浪入射方向下，海缆横向与垂向弯曲曲率沿轴向的分布见图7。结果表明，当波浪入射方向为 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 时，桩基内部海缆的垂向弯曲曲率普遍大于横向弯曲曲率。原因在于，桩基内部海缆不受波浪直接作用，其弯曲主要源于重力及约束条件，因此以垂向变形为主。相比之下，位于桩基

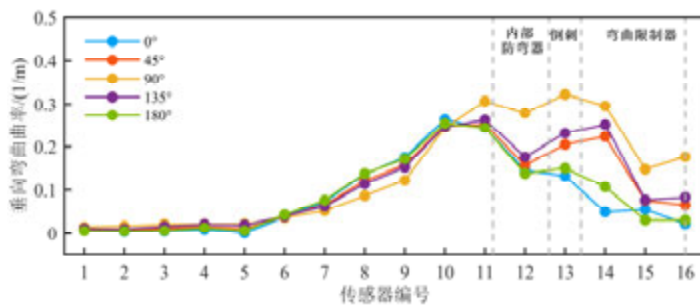
外部弯曲限制器内的海缆，其横向弯曲曲率明显大于垂向弯曲曲率，表明横向波浪作用引起的动态响应占主导地位，使横向弯曲更为显著。此外，第14号测点（海缆桩基出口处）出现了显著的横向弯曲峰值。这是因为该位置海缆的约束条件发生突变，刚度过渡不连续，导致局部横向变形明显增强。



(a) 海缆横向弯曲曲率沿长度方向变化

图7 不同波浪入射角度下海缆横向与垂向弯曲曲率沿长度方向变化

Fig. 7 Distribution of Transverse and Vertical Bending Curvatures Along Cable Under Different Wave Incidence Angles



(b) 海缆垂向弯曲曲率沿长度方向变化

图7 不同波浪入射角度下海缆横向与垂向弯曲曲率沿长度方向变化 (续)

Fig. 7 Distribution of Transverse and Vertical Bending Curvatures Along Cable Under Different Wave Incidence Angles (Continued)

不同波浪入射方向下, 海缆拉伸应变的RMS值沿海缆长度方向的分布见图8, 并与海缆静止状态下的拉伸应变进行对比。由图8可知, 当波浪入射方向为 $0^\circ$ 时, 海缆拉伸应变与静止状态下基本一致, 表明该工况下海缆的拉伸变形不显著。当波浪入射方向为 $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 和 $180^\circ$ 时, 内部防弯器与弯曲限制器区段的海缆拉伸应变有所略有增加, 但增幅较小。相比之下, 当波浪入射方向为 $90^\circ$ 时, 内部防弯器区段的海缆拉伸应变显著增大, 其中, 拉伸应变RMS值的最大值出现在位于内部防弯器内第11号测点处。

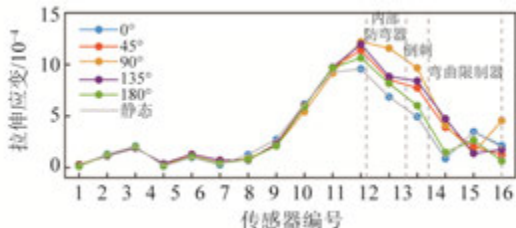
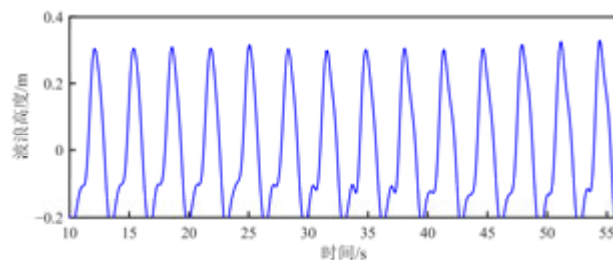


图8 不同波浪入射角度下海缆拉伸应变 RMS 值沿海缆长度方向变化

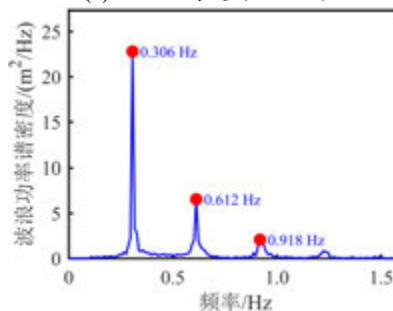
Fig. 8 Distribution of RMS Tension Strain Along Cable Under Different Wave Incidence Angles

为进一步探究不同波浪入射方向对海缆频率响应特性的影响, 分别对波面高度时历和海缆横向弯曲应变时历进行快速的傅里叶变换, 得到波浪频谱和海缆横向弯曲应变频谱。波面高度时历曲线与波浪频谱见图9。

由图9可知, 波浪呈现多频特征, 其主导频率为 $0.306\text{ Hz}$ , 且在主导频率的2倍频( $0.612\text{ Hz}$ )和3倍频( $0.918\text{ Hz}$ )处存在明显的次频成分。这表明试验波浪具有显著的非线性特征, 其原因在于试验波浪处于浅水条件, 受有限振幅效应影响, 自由水面形态偏离理想正弦波, 从而在主频基础上产生整倍频的高阶谐波成分。



(a) 波面高度时历曲线



(b) 波浪频谱图

图9 波面高度时历曲线与波浪频谱图

Fig. 9 Time History of Wave Surface Elevation and Corresponding Wave Spectrum

不同波浪入射方向下, 海缆各测点横向弯曲应变的响应频谱与海缆横向弯曲应变的响应综合频谱见图10。其中, 综合频谱由各测点横向弯曲应变信号经快速傅里叶变换得到功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 后, 再进行求和所得。由图10可知, 当波浪入射方向为 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 时, 海缆横向弯曲应变几乎无明显频率成分, 响应幅值很小, 表明此时海缆基本不发生横向摆动 (见图10(a)和图10(e))。当波浪入射方向为 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 时, 海缆横向弯曲应变响应呈现明显的多频特征, 其响应主导频率与波浪主导频率一致, 均为 $0.306\text{ Hz}$ , 且次频成分与波浪相等, 表明海缆的横向摆动频率与波浪频率保持同步。此外, 14号测点附近的频率响应幅值最大, 表明该位置附近海缆横向摆动最显著。

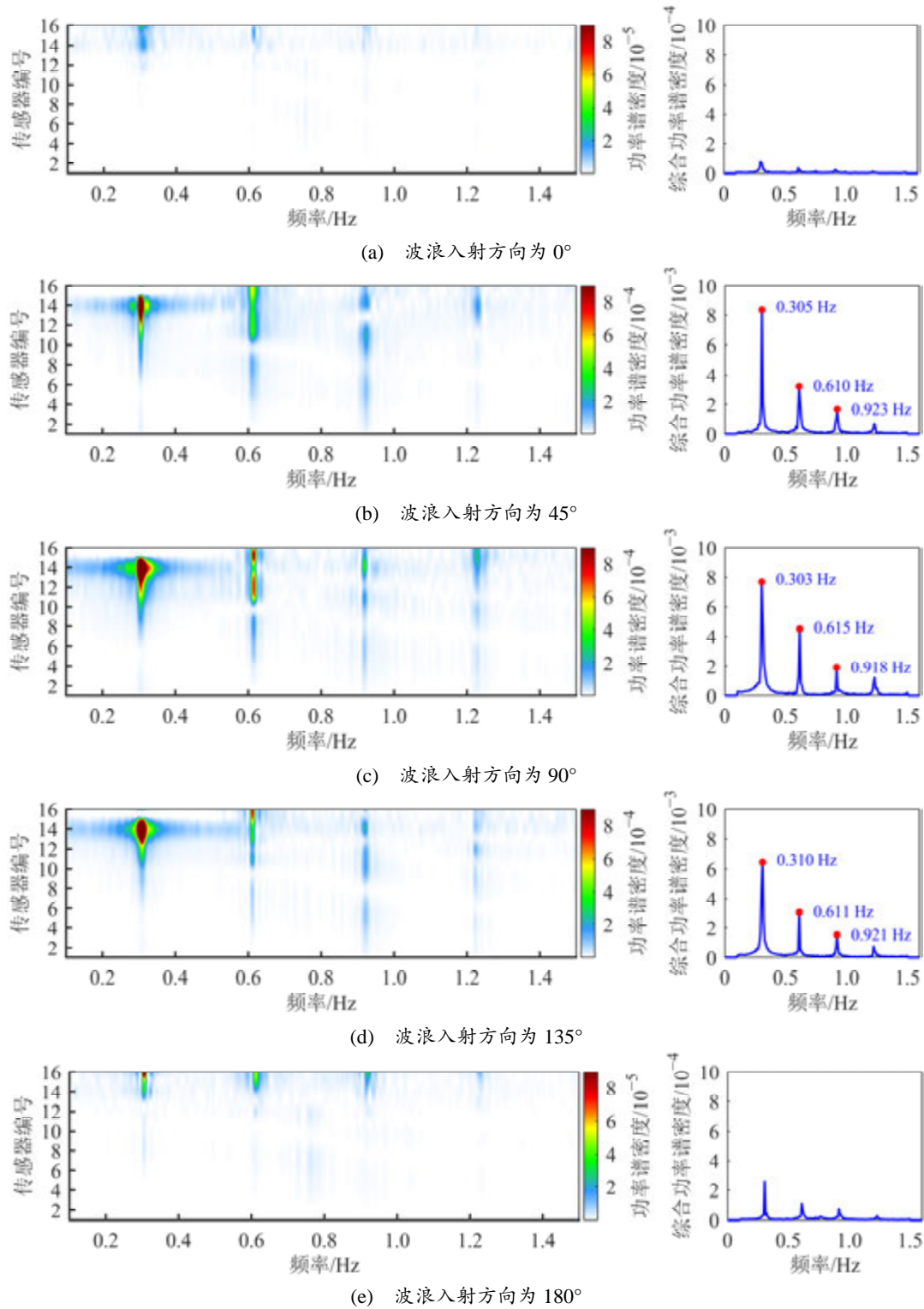


图 10 不同波浪入射角度下，海缆横向弯曲应变频谱

(左图：海缆各测点横向的弯曲应变响应频谱；右图：海缆横向弯曲应变响应综合频谱)

Fig. 10 Transverse Bending Strain Spectrum of Cable Under Different Wave Incidence Angles

(Left: Strain Response Spectra at Different Measurement Points; Right: Overall Transverse Strain Response Spectrum)

## 2.2 波高对海缆动态响应特性的影响

在探究不同波高对弯曲限制器海缆保护系统动态响应特性影响的过程中，固定波浪周期 $T=3.26\text{ s}$ 、

入射方向为 $90^\circ$ ，波高分别选取 $0.200\text{ m}$ 、 $0.300\text{ m}$ 、 $0.400\text{ m}$ 和 $0.496\text{ m}$ 。不同波高下海缆弯曲曲率RMS值沿海缆长度方向的变化见图11。

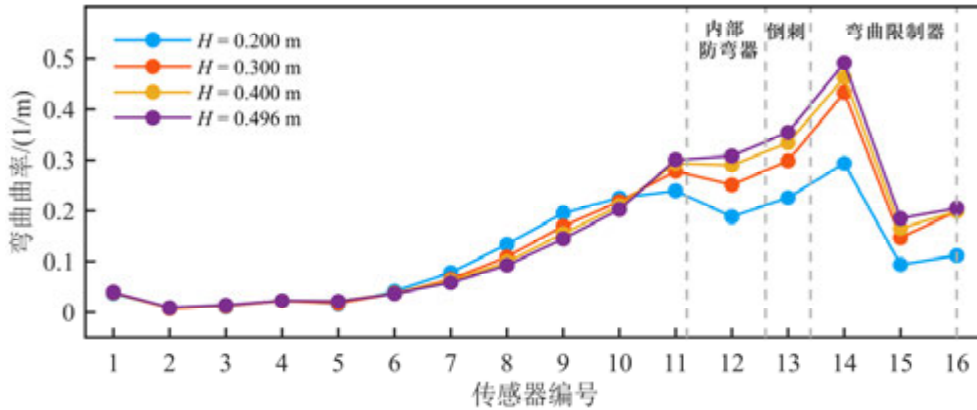


图 11 不同波高下海缆弯曲曲率 RMS 值沿海缆长度方向变化

Fig. 11 Distribution of RMS Bending Curvature Along Cable Under Different Wave Heights

由图11可知, 在不同波高作用下, 海缆弯曲曲率的RMS值沿海缆长度方向均呈先逐渐增大、在位于弯曲限制器内的14号测点处达到峰值、随后迅速减小的趋势。随着波高增大, 靠近内部防弯器的11~13号测点及弯曲限制器内的14号测点~16号测点的海缆弯曲曲率RMS值逐渐增大。然而, 当波高从0.300 m增大至0.496 m时, 弯曲曲率RMS值增幅减小, 这可能是因为当波高大于0.3 m时, 海缆轴向拉力随之增大, 限制了海缆的进一步弯曲变形。

各波高条件下弯曲曲率的最大值均出现在14号测点, 表明该位置海缆弯曲程度最剧烈。因此, 选

取该测点的横向弯曲应变响应进行深入分析, 对不同波高条件下的横向弯曲应变时历进行快速傅里叶变换, 得到海缆横向弯曲应变频谱。

不同波高下, 该测点的横向弯曲应变时历曲线及其频谱分布见图12。由图12左侧可知, 海缆横向弯曲应变随波高的变化趋势与弯曲曲率一致: 当波高从0.2 m增大至0.3 m时, 海缆横向弯曲应变明显增加; 当波高从0.300 m增大至0.496 m时, 海缆横向弯曲应变增幅较小。由图12右侧可知, 海缆横向弯曲应变的频率与波浪频率基本保持一致, 表明波高变化对海缆横向摆动频率的影响甚微。

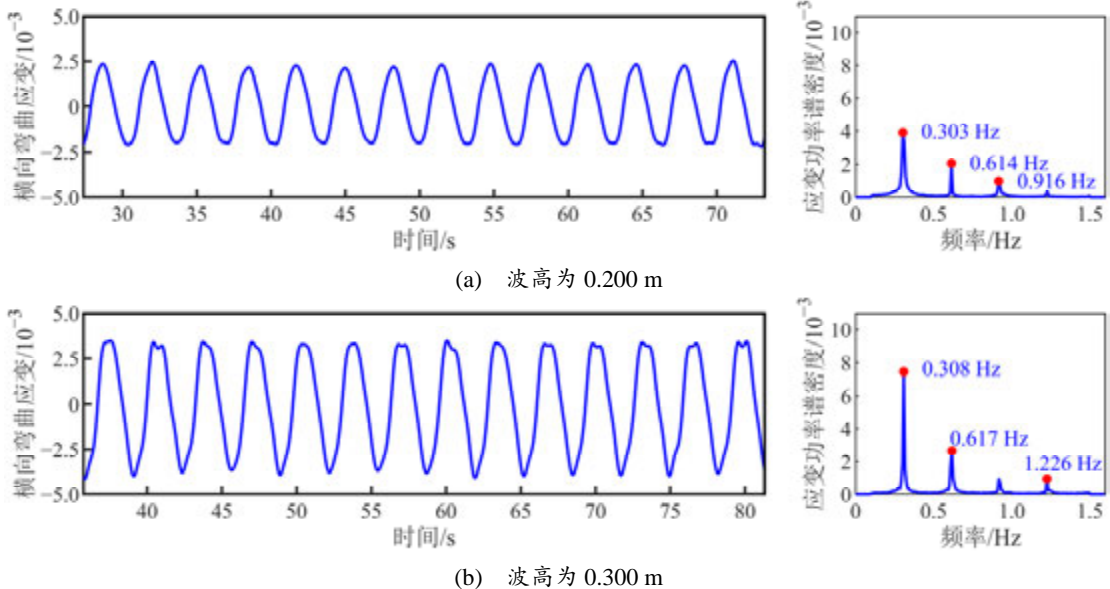


图 12 不同波高下, 海缆横向弯曲应变时历和综合频谱

(左图: 海缆在第 14 测点的横向弯曲应变时历曲线; 右图: 海缆横向弯曲应变响应综合频谱)

Fig. 12 Time History and Overall Spectrum of Transverse Bending Strain of Cable Under Different Wave Heights (Left: Time History of Transverse Bending Strain at Measurement Point 14; Right: Overall Frequency Spectrum)

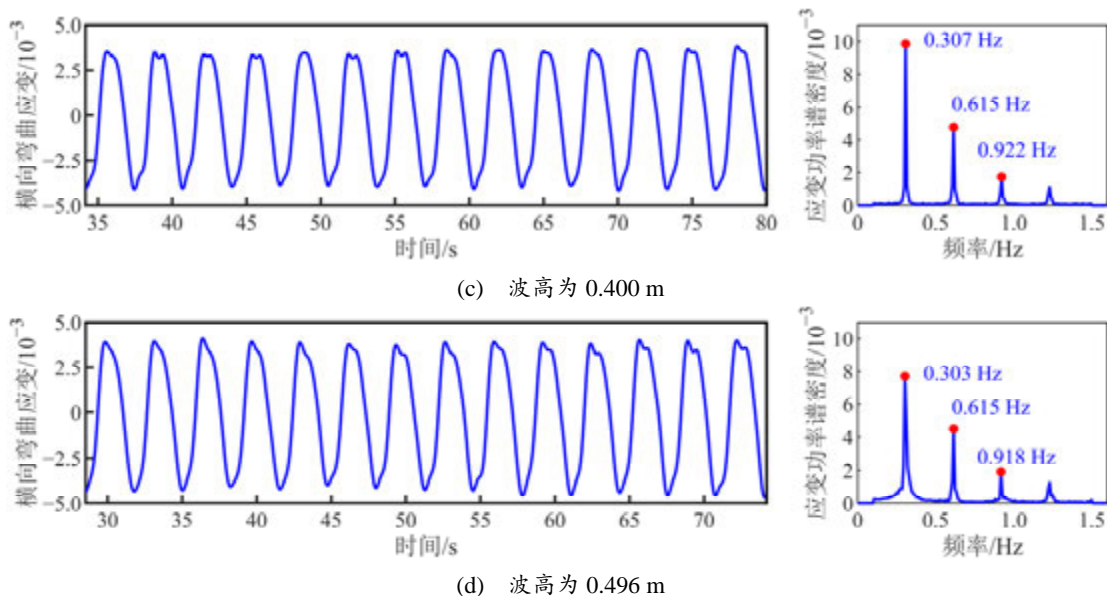


图 12 不同波高下, 海缆横向弯曲应变时历和综合频谱

(左图: 海缆在第 14 测点的横向弯曲应变时历曲线; 右图: 海缆横向弯曲应变响应综合频谱) (续)

Fig. 12 Time History and Overall Spectrum of Transverse Bending Strain of Cable Under Different Wave Heights (Left: Time History of Transverse Bending Strain at Measurement Point 14; Right: Overall Frequency Spectrum) (Continued)

### 2.3 波浪周期对海缆动态响应特性的影响

在探究不同波浪周期对弯曲限制器海缆保护系统动态响应特性影响的过程中, 固定波高 $H=0.496\text{ m}$ 、波浪入射方向为 $135^\circ$ , 波浪周期分别选取 $2.51\text{ s}$ 、 $2.90\text{ s}$ 、 $3.26\text{ s}$ 和 $3.60\text{ s}$ 。不同波浪周期下海缆弯曲曲率RMS值沿海缆长度方向的变化见图13。

由图13可知, 不同波浪周期下, 海缆弯曲曲率RMS值沿海缆长度方向的变化趋势基本一致: 均先

逐渐增大, 在位于弯曲限制器内的14号测点处达到峰值, 随后迅速减小。随着波浪周期增加, 前10个测点的弯曲曲率基本保持不变, 第11~16号测点中仅14号测点的弯曲曲率有明显增大, 其余测点的弯曲曲率增幅较小。当波浪周期 $T=3.26\text{ s}$ 时, 海缆弯曲曲率RMS值达到最大, 表明波浪周期对海缆弯曲响应特性的影响较小。

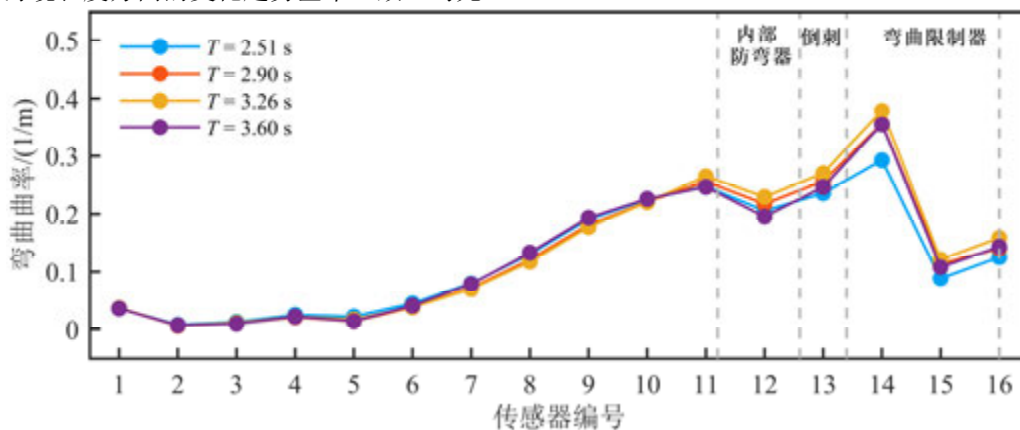


图 13 不同波浪周期下, 海缆弯曲曲率 RMS 值沿海缆长度方向变化

Fig. 13 Distribution of RMS Bending Curvature Along Cable Under Different Wave Periods

各波浪周期下弯曲曲率的最大值同样出现在14号测点, 因此选取该测点的横向弯曲应变响应进行深入分析。不同波浪周期下, 海缆在第14测点的横向弯曲应变时历曲线、横向弯曲应变响应综合频谱与波浪频谱的对比见图14。由图14可知, 不同波浪

周期下, 海缆横向弯曲应变幅值变化不大, 且海缆横向弯曲应变的频率与波浪频率基本保持一致, 表明海缆的横向摆动幅值受波浪周期影响较小, 摆动频率始终与波浪频率保持一致。

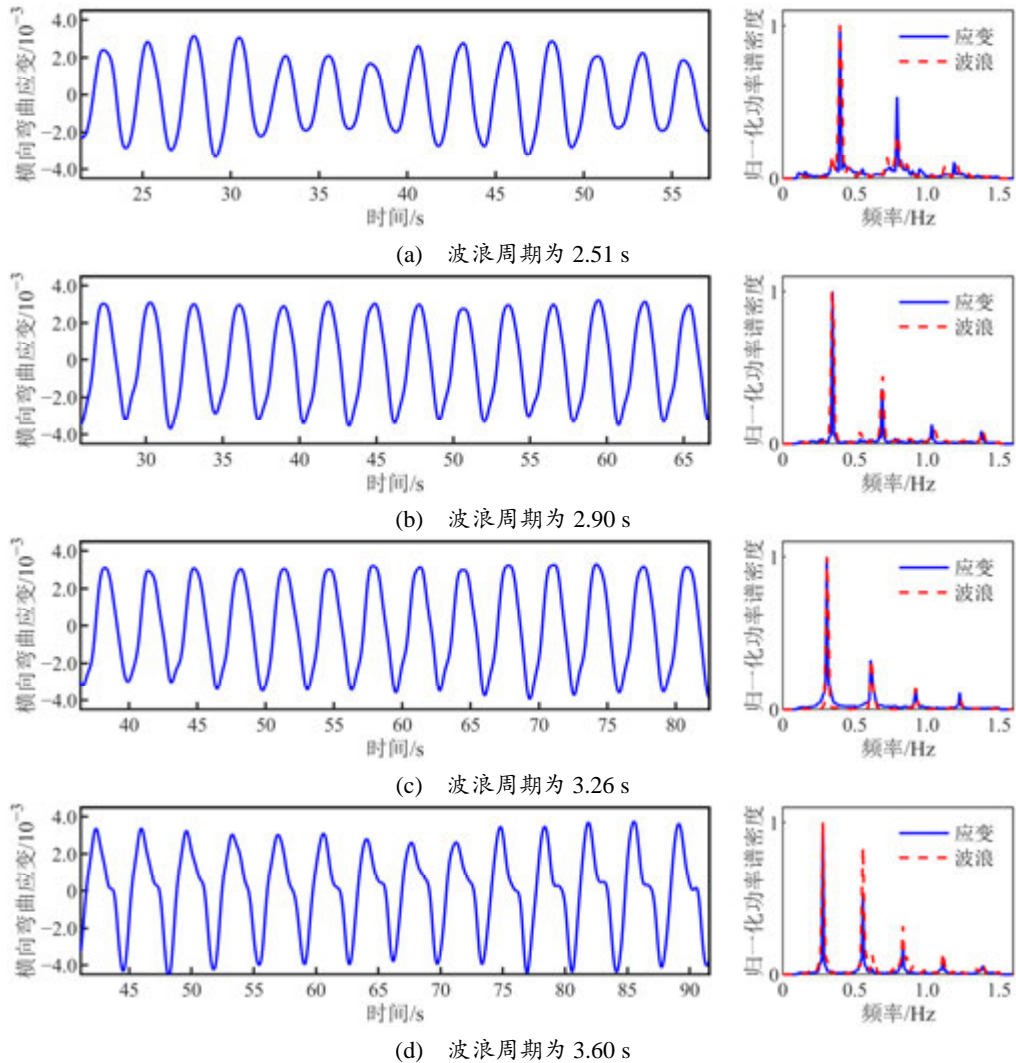


图 14 不同波浪周期下, 海缆横向弯曲应变时历和综合频谱

(左图: 海缆在第 14 测点的横向弯曲应变时历; 右图: 横向弯曲应变综合频谱与波浪谱对比)

Fig. 14 Time History and Overall Spectrum of Transverse Bending Strain of Cable Under Different Wave Periods  
(Left: Time History of Transverse Bending Strain at Measurement Point 14; Right: Comparison Between Overall Spectrum and Wave Spectrum)

### 3 结论

本文针对海上风机海缆在复杂海洋环境中的动态响应特性, 依托大比尺波浪水槽开展了弯曲限制器海缆保护系统模型试验, 系统研究了波浪入射方向、波高及波浪周期对弯曲限制器海缆保护系统动态响应特性的影响规律, 主要结论如下:

1) 波浪入射方向对海缆动态响应特性影响显著。当波浪入射方向为 $90^\circ$ 时, 海缆弯曲程度最大; 当波浪入射方向为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时, 弯曲程度最小, 海缆几乎不发生摆动。因此, 建议在工程设计中尽可能使海缆布设方向与所在海域的主浪向一致, 以有效降低波浪作用下的动态响应。

2) 在不同波高和波浪周期作用下, 海缆横向摆动频率均与波浪频率基本保持一致, 表明海缆横向运动主要受波浪频率主导。随着波高增大, 海缆弯

曲程度逐渐增加; 而波浪周期变化对弯曲程度的影响相对较小。

3) 试验发现, 海缆在桩基出口处存在明显的横向弯曲集中现象。该位置约束条件发生突变且刚度过渡不连续, 导致局部弯曲曲率显著增大, 从机理上解释了工程中弯曲限制器常在倒刺位置发生断裂的现象, 可为海缆防护结构的优化设计提供参考。

综上所述, 本文通过模型试验揭示了弯曲限制器海缆保护系统在典型波浪条件下的动态响应特性, 所得规律可为实际工程中海缆防护设计与优化提供依据。未来, 可进一步结合工程实际, 针对复杂流场及多因素耦合作用下海缆的动态响应特性, 开展新型防护装置的研发与优化研究, 为海上风电场的安全稳定运行提供更加全面的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 吴磊. 海上风电技术发展综述[J]. 机械制造, 2024, 62(10): 1-15.  
WU L. Development Overview of Offshore Wind Power Technology[J]. Machinery, 2024, 62(10): 1-15.
- [2] 沈光. 海上风机海缆上平台部分的保护装置研究[J]. 建筑施工, 2016, 38(6): 800-801.  
SHEN G. Study on Partial Platform Protective Device for Connection of Offshore Wind Turbine Submarine Cable[J]. Building Construction, 2016, 38(6): 800-801.
- [3] AHMAD M, THIES P R, RECKER M, et al. Failure Mechanisms and Reliability Factors for Submarine Cable Failures[J]. Innovations in Renewable Energies Offshore, 2024: 1025-1035.
- [4] THIES P R, JOHANNING L, BASHIR I, et al. Accelerated Reliability Testing of Articulated Cable Bend Restrictor for Offshore Wind Applications[J]. International journal of marine energy, 2016, 16: 65-82.
- [5] 张聪. 海上风电海缆弯曲保护装置设计技术研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.  
ZHANG C. Research on Design Techniques of Offshore Wind Power Cable Bending Protection Device[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018.
- [6] 谢宗伯. 海洋柔性管缆弯曲限制器设计与制造技术研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2017.  
XIE Z B. Research on Design and Manufacturing for Bend Limiter of Marine Flexible Risers and Umbilicals[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017.
- [7] 邓俊儒, 张青云. 基于多种桩型的海缆保护系统研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 91-97.  
DENG J R, ZHANG Q Y. Research on Several Subsea Cable Protection Systems Based on Different Foundations[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2): 91-97.
- [8] BOET W J C, OUT J M M. Analysis of a Flexible-Riser Top Connection with Bend Restrictor[C]//Offshore Technology Conference. 1990.
- [9] API. API Recommended Practice 17L1/17L2: Design and Operation of Subsea Umbilicals, Risers and Flowlines-Bend Restrictors[S]. 2013.
- [10] 徐海超, 阮建, 赵琳, 等. 海上风电工程弯曲限制器受力特性数值模拟研究[J]. 水力发电, 2022, 48(11): 115-118.  
XU H C, RUAN J, ZHAO L, et al. Numerical Simulations on Mechanical Characteristics of Submarine Bending Restrictor of Offshore Wind Power Engineering[J]. Water Power, 2022, 48(11): 115-118.
- [11] 钟科星, 丁乐声, 张聪, 等. 基于神经网络的风电海缆弯曲限制器优化设计[J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(1): 70-76.  
ZHONG K X, DING L S, ZHANG C, et al. Optimization Design of Marine Cable of Wind Farm Bend Restrictor Based on Neural Network[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2024, 11(1): 70-76.
- [12] 陶伟, 刘滨江, 周国栋, 等. 海床冲刷对海上风电海缆及弯曲限制器的影响研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 186-193.  
TAO W, LIU M J, ZHOU G D, et al. Influence of Scour on Subsea Cables and Bend Restrictors of Offshore Wind Farm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(11): 186-193.
- [13] 田振亚, 朱嵘华, 张美阳, 等. 海上风电基础海底电缆动态特性分析[J]. 船舶工程, 2023, 45(1): 47-50.  
TIAN Z Y, ZHU R H, ZHANG M Y, et al. Dynamic Characteristics Analysis of Submarine Cables for Offshore Wind Power Foundation[J]. Ship Engineering, 2023, 45(1): 47-50.
- [14] 姜华平. 海上风电场 35 kV 海缆接入端防护措施探讨[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(8): 52-53.  
JIANG H P. Protective Measures for 35 kV Submarine Cable Termination in Offshore Wind Farms[J]. China Water Transport, 2021, 21(8): 52-53.
- [15] 陈伟球, 颜云, 曾东, 等. 外罗二期海上风电场 220 kV 海缆整体系统数值模拟分析[J]. 自动化应用, 2023, 64(23): 73-75.  
CHEN W Q, YAN Y, ZENG D, et al. Numerical Simulation Analysis of 220 kV Submarine Cable Whole System in Wailuo Phase-II Offshore Wind Farm[J]. Automation Application, 2023, 64(23): 73-75.
- [16] 黄书踪, 曹宁. 海缆故障分析与探测实践[J]. 船舶工程, 2022, 44(增刊 1): 14-17.  
HUANG S Z, CAO N. Sea Cable Fault Analysis and Detection Practice[J]. Ship Engineering, 2022, 44 (Suppl. 1): 14-17.
- [17] 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(增刊 1): 28-30.  
CAO N, HUANG S Z, LAI H L, et al. Analysis and Prevention of Submarine Cable Insulation Failure in Offshore Wind Farm[J]. Ship Engineering, 2022, 44(Suppl. 1): 28-30.