

# 张力腿浮式风机的张紧式电缆 结构与疲劳分析

李腾飞<sup>1</sup>, 沈玉琦<sup>2</sup>, 张萌萌<sup>1</sup>, 付世晓<sup>1\*</sup>, 赵园<sup>2</sup>, 许玉旺<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

**摘要:** [目的]为研究该电缆形式的力学特性与可行性, [方法]基于 Costello 钢丝绳理论推导了轴对称载荷作用下张紧式电缆力学响应解析模型, 研究了螺旋钢丝参数对张紧式电缆力学特性的影响; 形成了钢缆等效空心圆柱体的刚度等效方法, 通过 ABAQUS 建立张紧式电缆的详细有限元模型, 开展缆绳截面力学特性分析; 以某海域张紧式风机电缆设计为例, 通过与传统缓波型电缆进行对比, [结果]研究表明: 张紧式电缆的制造成本、疲劳损伤与海生物附着影响均小于传统缓波型电缆, 且具有线型简单、可避免阵列风场电缆碰撞缠绕和安装便捷等优势。[结论]张紧式电缆可为张力腿式浮式风机动态电缆的设计提供新的思路。

**关键词:** 浮式风机; 动态电缆; Costello 理论; 有限元分析 (FEM); 疲劳计算

**中图分类号:** P751 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.05.18

## Structure Design and Fatigue Analysis of the Dynamic Tensioned Cable for TLP Floating Wind Turbines

LI Tengfei<sup>1</sup>, SHEN Yuqi<sup>2</sup>, ZHANG Mengmeng<sup>1</sup>, FU Shixiao<sup>1\*</sup>,  
ZHAO Yuan<sup>2</sup>, XU Yuwang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** [Purpose] To investigate the mechanical properties and feasibility of this cable design, [Method] based on Costello's wire rope theory, an analytical model of the mechanical response of a tensioned cable under axisymmetric loading is derived, and the influence of helical wire parameters on the mechanical properties of the tensioned cable is studied. A stiffness equivalence method for steel cables as equivalent hollow cylinders is developed. A detailed finite element model of the tensioned cable is established using Abaqus to analyze the mechanical properties of the cable cross-section. Taking the design of a tensioned wind turbine cable in a specific sea area as an example, and through comparison with traditional wave-damping cables, [Result] reveals that the manufacturing cost, fatigue damage, and impact of marine biofouling of tensioned cables are all lower than those of traditional wave-damping cables. Furthermore, tensioned cables offer advantages such as a simple configuration, the ability to prevent cable collisions and entanglement in wind farm arrays, and ease of installation. [Conclusion] Tensioned cables can provide new insights for the design of dynamic cables for tension-leg floating wind turbines.

**Key words:** floating wind turbines; dynamic cable; Costello theory; finite element method (FEM); fatigue analysis

收稿日期: 2025-08-25; 修回日期: 2025-10-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFC2814803); 上海市自然科学基金面上项目 (24ZR1491600)。

作者简介: 李腾飞 (2001—), 女, 硕士研究生。研究方向: 浮式风机动态电缆设计。

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

## 0 引言

随着风电场离岸化趋势日益显著, 浮式海上风机成为风电开发中更具优势的方案。根据平台的结构形式, 浮式风机可分为张力腿式、单柱式、半潜式与驳船式<sup>[1]</sup>。其中, 张力腿式平台通过系泊系统与平台超额浮力相结合实现静态稳定, 具有稳定性好、波浪适应性强, 垂荡、横摇和纵摇运动响应较小等特点。

此外, 根据是否承受连续运动与循环载荷, 海上风电场电缆可分为静态电缆与动态电缆。工程中常用的动态电缆线型共有悬链线型、缓波型、陡波型、缓S型、陡S型和顺应式波型6种<sup>[2]</sup>。其中, 缓波型对平台运动及水动力载荷具有良好的顺应性, 是目前浮式风机中应用最广泛的电缆线型。

由于动态电缆在作业期间长期承受由平台运动引起的动态张力、弯曲和扭转载荷, 同时受到波浪、海流等复杂海洋环境载荷作用, 其在全生命周期内的结构完整性与可靠性面临着更加严峻的挑战: 1) 受设计与制造工艺限制, 动态电缆的成本通常很高; 2) 动态电缆在作业期间长时间承受变化的循环载荷, 易因疲劳损伤累积引发结构失效; 3) 易受海生物附着影响, 导致设计线型难以维持; 4) 电缆受海流影响易发生较大偏移, 存在与水下其他装置碰撞的风险, 且难以实时获取电缆空间姿态以开展应急操作与维护。

调查显示, 电缆故障会对海上风电项目造成显著的经济损失<sup>[3]</sup>, 约80%的海上风电经济损失和保险索赔均由电缆(含静态电缆和动态电缆)故障引发<sup>[4]</sup>。因此, 需要改进动态电缆的力学设计和分析方法, 以提升浮式海上风电产业的经济性与可靠性。

动态电缆由不同材料且允许相对滑移的多层结构组成, 属于复杂螺旋结构。对于此类结构, 早期针对该类结构的理论研究多以螺旋钢缆为对象展开。KNAPP<sup>[5]</sup>基于能量法, 考虑中心直钢丝的泊松比效应与大变形引起的几何非线性, 推导得到螺旋结构的拉扭耦合刚度矩阵。COSTELLO等<sup>[6]</sup>基于Love曲梁理论, 考虑由泊松比引起的钢丝直径与螺旋角度变化, 推导了由任意根数光滑钢丝组成的单层钢缆轴向刚度计算公式; 在此基础上, COSTELLO<sup>[7]</sup>进一步提出可考虑曲率及扭转变化影响的理论计算方法。UTTING等<sup>[8]</sup>在COSTELLO的研究框架上, 发展了包含层间接触变形及摩擦效应的计算模型, 并指出上述因素对钢缆整体力学行为的影响很小。此外, HOBBS等<sup>[9]</sup>将缆索中的钢丝层等效为一系列正交异性薄板, 可用于预测钢丝间接触力及滑移状态, 后续诸多学者也对该等效理论进行了拓展与完善。随着海洋工程的不断发展, 柔性管缆相关理论研究受到广泛关注。WITZ等<sup>[10]</sup>将柔性结构分为圆柱构件

与螺旋构件, 基于各层之间的相互作用, 提出了可预测柔性管、脐带缆和船用电缆轴向与扭转力学行为的解析模型。董磊磊等<sup>[11]</sup>基于虚功原理, 考虑轴向刚度与扭转刚度的耦合效应, 建立了轴对称载荷下非黏合柔性立管力学响应的理论解析模型。GUO等<sup>[12]</sup>考虑铠装层径向收缩效应, 提出无黏结脐带缆张力行为的解析模型, 并指出不考虑径向折减会高估脐带缆的抗拉刚度, 且会影响刚度分布。

随着计算机技术的发展, 有限元法(Finite Element Method, FEM)已成为研究复杂螺旋结构力学行为的有力手段。目前主要有2种方法: 1) 基于有限元理论自主开发的专用软件, 具有很强的针对性, 但通用性较弱, 如UFLEX、Helica和CABLE CAD等; 2) 基于通用有限元软件, 通过建立二维平面或三维实体模型进行数值分析, 应用范围广、计算精度高。JIANG等<sup>[13]</sup>基于ANSYS平台, 使用三维实体单元, 利用钢丝螺旋对称性施加边界条件, 同时考虑接触、摩擦和塑性屈服效应, 建立3层螺旋钢缆在轴向载荷下的有限元模型, 揭示了接触作用导致外层螺旋钢丝产生非均匀应力分布的规律。于春蕾<sup>[14]</sup>同样基于ANSYS平台, 采用两节点弹塑性梁单元对结构进行离散, 使用赫兹接触单元模拟钢丝间相互作用, 重点考虑由不连续点接触引起的钢丝非均匀弯曲与接触变形, 忽略层间摩擦, 建立了单股钢丝绳力学性能预测的梁单元有限元模型。CHANG等<sup>[15]</sup>借助ANSYS平台, 假设仅外护套和铠装钢丝承受轴向拉力与扭矩, 研究了电缆在拉扭和外压耦合作用下的力学响应。FANG等<sup>[16]</sup>基于ABAQUS, 分别采用三维实体单元和梁单元模拟圆柱层与铠装钢丝, 建立了海底电缆精细化有限元模型, 分析了其在轴对称载荷下的力学特性。邓禹等<sup>[17]</sup>基于CMOSOL Multiphysics, 研究了不同结构形式下脐带缆的力学性能与轻量化程度, 为脐带缆的轻量化设计提供了方向。WANG等<sup>[18]</sup>基于准静态分析方法, 在Abaqus中构建三维实体模型, 研究了双铠装脐带缆的滞后特性和非线性力学响应, 结果表明准静态分析可有效模拟双层铠装脐带缆的力学行为。

本文基于张紧式系泊下系统稳定性好、运动响应小的特点, 提出一种用于张力腿式浮式风机的张紧式动态电缆设计方案。该电缆垂直布置于平台中心位置, 作业期间保持张紧状态; 缆体内部由螺旋钢丝构成中心承载钢缆, 电缆单元布置在钢缆外侧。基于Costello钢丝绳理论, 推导了轴对称载荷作用下张紧式电缆的力学响应解析模型, 研究了钢丝螺旋角度、层数等关键参数对电缆整体刚度及金属构件应力水平的影响规律。以拉伸刚度等效为原则, 将钢缆等效为空心圆柱构件, 通过ABAQUS有限元软件建立了此类复杂螺旋结构的三维精细化建模与分

析方法。以MIT张力腿式5-MW张力腿式浮式风机为对象<sup>[9]</sup>, 完成了张紧式电缆的设计与力学特性分析, 并与传统缓波型电缆进行比较, 从制造成本、疲劳损伤及海生物附着影响等角度, 论证了张紧式电缆的可行性与工程优势。

### 1 轴对称载荷作用下张紧式电缆力学响应解析模型

本文提出的用于张力腿式浮式风机的张紧式电

缆结构见图1。该张紧式电缆垂直布置于浮式平台中间位置; 中心为螺旋钢缆, 外侧沿周向均匀布置3组螺旋电缆单元。电缆单元由铜导体、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层和护套层等组成; 单元之间设置填充物, 以减少作业期间电缆单元的相对滑移; 钢缆与电缆单元之间以及复合缆外侧分别布置内、外护套, 可起到减少功能元件磨损, 起到结构保护的作用。

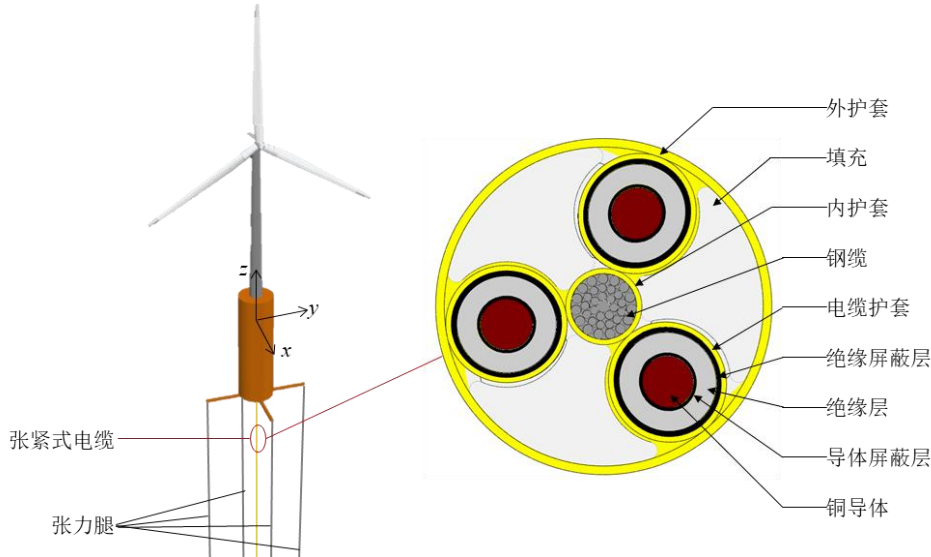


图1 张紧式电缆结构示意图

Fig. 1 Schematic of Tensioned-Cable Structure

张紧式电缆由不同材料构成, 为允许相对滑移的多层复合结构, 其主要功能部件为螺旋钢丝与电缆单元, 属于复杂螺旋结构。此类螺旋结构能够在承受较大轴向载荷的同时, 保持较低的弯曲刚度。本文以Costello钢丝绳理论<sup>[7]</sup>为基础进行理论推导, 分析此类螺旋结构的力学特性。

#### 1.1 轴对称载荷作用下钢丝绳响应控制方程

单股螺旋钢缆结构由1根中心直钢丝和 $n$ 层螺旋钢丝组成, 其几何结构见图2<sup>[7]</sup>。

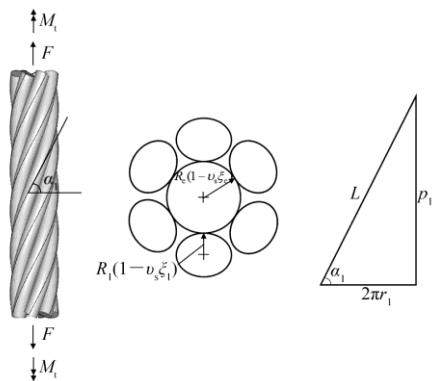


图2 钢缆几何示意图

Fig. 2 Geometrical Schematic of Spiral Strand

每层螺旋钢丝的根数为 $m_i$ , 中心直钢丝的半径为 $R_c$ , 外层螺旋钢丝的半径为 $R_i(i=1, \dots, n)$ 。由几何关系可知, 第 $i$ 层螺旋钢丝的螺旋半径 $r_i$ 为

$$\begin{cases} r_i = R_c + R_i \\ i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} r_i = R_c + 2 \sum_{j=1}^{i-1} R_j + R_i \\ i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_j$ 为第 $j$ 层螺旋钢丝的半径,  $j=1, \dots, i-1$ 。

规定螺旋钢丝的螺旋角度 $\alpha_i$ 为螺旋钢丝轴线与钢缆轴线的夹角, 可知:

$$\tan \alpha_i = \frac{p_i}{2\pi r_i} \quad (3)$$

式中:  $p_i$ 为第 $i$ 层螺旋钢丝的捻距。

讨论钢缆在轴向拉伸与扭转变形下的力学特性。轴向加载时, 摩擦为次要因素、可予以忽略<sup>[7]</sup>, 此处不考虑摩擦作用; 同时, 仅考虑钢丝间的接触压力, 但不考虑由接触压力引起的变形及应力增加。

假设钢缆不承受外部弯矩, 钢缆由单一、各向同性的弹性材料制成, 弹性模量为 $E_s$ , 泊松比为 $\nu_s$ 。

在螺旋角度变化 $\Delta\alpha_i$ 很小的前提下, 钢丝的轴向应变 $\xi_i$ 、转动应变 $\beta_i$ 、曲率变化 $\Delta k_i'$ 与单位长度扭转变化 $\Delta\tau_i$ 的表达式为

$$\xi_c = \xi_i + \frac{\Delta\alpha_i}{\tan\alpha_i} = \varepsilon \quad (4)$$

$$\beta_i = r_i\tau_s = \frac{\xi_i}{\tan\alpha_i} - \Delta\alpha_i + \frac{\Delta r_i}{r_i} \tan\alpha_i \quad (5)$$

$$\Delta k_i' = -\frac{2\sin\alpha_i \cos\alpha_i}{r_i} \Delta\alpha_i + \frac{\Delta r_i \cos^2\alpha_i}{r_i} \quad (6)$$

$$\Delta\tau_i = \frac{1-2\sin^2\alpha_i}{r_i} \Delta\alpha_i + \frac{\Delta r_i \sin\alpha_i \cos\alpha_i}{r_i} \quad (7)$$

式(4)~式(7)中:  $\varepsilon$ 为钢缆的整体轴向应变;  $\xi_c$ 为中心钢丝的轴向应变;  $\tau_s$ 为钢缆整体单位长度的扭转;  $\Delta r_i$ 为第*i*层螺旋钢丝螺旋半径的变化量。

基于钢丝应变及材料力学, 可得作用在螺旋钢丝上的弯矩 $G_i'$ 、扭矩 $H_i$ 、剪力 $H_i'$ 以及拉力 $T_i$ , 最终得到作用在钢缆上的总轴向力 $F$ 及扭矩 $M_t$ 为

$$F = \pi E_s R_c^2 \xi_c + \sum_{i=1}^n m_i \left( T_i \sin\alpha_i + N_i' \cos\alpha_i \right) \quad (8)$$

$$M_t = \frac{\pi}{4(1+\nu)} E_s R_c^4 \tau_s + \sum_{i=1}^n m_i \begin{pmatrix} H_i \sin\alpha_i + G_i' \cos\alpha_i + \\ T_i r_i \cos\alpha_i - N_i' r_i \sin\alpha_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

不考虑接触应力, 中心钢丝的轴向应力 $\sigma_c$ 为

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi R_c^2} \quad (10)$$

第*i*层螺旋钢丝由轴向拉力 $T_i$ 引起的轴向应力 $\sigma_{i,T}$ , 由弯矩 $G_i'$ 引起的最大正应力 $\sigma_{i,G'}$ , 由扭矩 $H_i$ 引起的最大剪应力 $\sigma_{i,H}$ 分别为

$$\begin{cases} \sigma_{i,T} = \frac{T_i}{\pi R_i^2} \\ \sigma_{i,G'} = \frac{4G_i'}{\pi R_i^3} \\ \sigma_{i,H} = \frac{2H_i}{\pi R_i^3} \end{cases} \quad (11)$$

求解式(4)~式(9)可得钢缆的刚度表达式:

$$\begin{aligned} R_{cb}' &= R_{cb1} (1 - \nu_{cb1} \xi_{cb}) + \sum_{i=2}^{n_{cb}} (R_{cbi} - R_{cb(i-1)}) (1 - \nu_{cbi} \xi_{cb}) \\ &= R_{cb} - R_{cb} \frac{R_{cbn} \nu_{cbn} + \sum_{i=1}^{n_{cb}-1} R_{cbi} (\nu_{cb(i+1)} - \nu_{cbi})}{R_{cb}} \xi_{cb} = R_{cb} - R_{cb} \nu_{eq-cb} \xi_{cb} \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $\nu_{eq-cb}$ 为电缆单元整体的等效泊松比。

由式(15)和式(16)可知, 内护套与电缆单元的变形类似于第1.1节钢丝绳理论中中心钢丝与

$$\begin{bmatrix} F \\ M_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $k_{11}$ 为钢缆的拉伸刚度;  $k_{22}$ 为扭转刚度;  $k_{12}$ 和 $k_{21}$ 均为拉扭耦合刚度。

## 1.2 轴对称载荷作用下张紧式电缆响应控制方程

对于张紧式电缆结构, 当缆绳发生整体轴向变形, 钢缆以及内、外护套的轴向变形与结构整体轴向变形一致, 须确定电缆单元的轴向变形及螺旋角度变化。

为确定电缆单元的几何变化, 此处对钢缆与内护套的几何变形进行合并。当张紧式电缆发生轴向应变 $\varepsilon$ , 也即钢缆发生轴向应变 $\varepsilon$ , 钢缆产生整体径向收缩变形 $\delta_r$ 为

$$\delta_r = -R_c \nu_s \xi_c - 2 \sum_i R_i \nu_s \xi_i \quad (13)$$

根据第1.1节钢丝绳理论可知, 钢缆整体的径向收缩变形 $\delta_r$ 与其轴向应变 $\varepsilon$ 成比例, 则变形后的钢缆外半径 $R_{wr}$ 可写为

$$\begin{aligned} R_{wr}' &= R_c (1 - \nu_s \xi_c) + 2 \sum_i R_i (1 - \nu_s \xi_i) = \\ &R_{wr} - R_c \nu_s \xi_c - 2 \sum_i R_i \nu_s \xi_i = \\ &R_{wr} - R_{wr} \nu_{eq-wr} \varepsilon \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $R_{wr} = R_c + 2 \sum R_i$ 为钢缆的整体外半径;  $\nu_{eq-wr}$ 为钢缆的整体等效泊松比。

记内护套的外半径及材料泊松比分别为 $R_{is}$ 、 $\nu_{is}$ , 则变形后内护套的外半径 $R_{is}$ 可写为

$$\begin{aligned} R_{is}' &= R_{wr}' + (R_{is} - R_{wr}) - (R_{is} - R_{wr}) \nu_{is} \varepsilon = \\ &R_{is} - R_{is} \frac{R_{wr} \nu_{eq-wr} + (R_{is} - R_{wr}) \nu_{is}}{R_{is}} \varepsilon = \\ &R_{is} - R_{is} \nu_{eq-is} \varepsilon \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $\nu_{eq-is}$ 为考虑钢缆与内护套整体收缩变形后的等效泊松比。

电缆单元的外半径为 $R_{cb}$ , 共有 $n_{cb}$ 层结构, 记第*i*层的外半径及材料泊松比分别为 $R_{cbi}$ 、 $\nu_{cbi}$ , 当螺旋的电缆单元发生轴向变形 $\xi_{cb}$ 时, 可得电缆单元整体径向收缩后的外半径 $R_{cb}$ 为

外层螺旋钢丝的变形。因此, 可根据式(4)~式(9)计算得到张紧式电缆发生轴向拉伸与扭转变形时电缆单元的几何变化。

在确定张紧式电缆各单元的变形后, 参照第1.1节相关公式, 根据材料力学理论即可得到各单元受力与缆绳总体轴向力与扭矩。需要注意的是, 第1.1节推导中假定钢缆中的钢丝由同种材料构成, 且钢丝截面均为圆形; 而张紧式电缆各单元材料不同, 且部分单元截面为圆环形, 因此需考虑不同单元的泊松比、杨氏模量及截面特性, 具体公式此处不再赘述。

## 2 张紧式电缆有限元计算方法

本文基于有限元软件ABAQUS对张紧式电缆进行详细有限元分析, 设计合理的刚度等效方法, 将钢缆等效为空心圆柱体, 建立适用于螺旋钢缆、张紧式电缆等复杂螺旋结构的通用有限元建模方法。

### 2.1 螺旋钢缆等效建模方法

由于钢缆内钢丝数量较多且存在大量接触, 开展完整的有限元模拟存在较大困难。因此本文采用一种等效简化方法, 将钢缆等效为空心圆柱体进行后续设计与分析, 见图3。

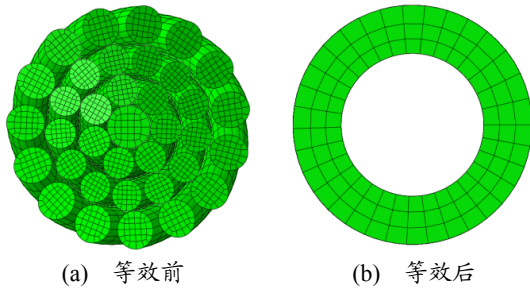


图3 钢缆等效前后示意图

Fig. 3 Schematic of the Steel Strand Before and After Equivalencing

在张力腿系泊结构中, 除环境荷载、平台及系泊特性外, 张紧式钢缆所受张力大小主要由其拉伸刚度及初始长度决定, 弯曲与扭转刚度对张力的影响可以忽略不计。此外, 钢缆受拉会产生径向收缩变形, 该径向变形将进一步影响钢缆外侧电缆单元的力学行为。因此, 本文在拉伸刚度等效的基础上, 将钢缆等效为空心圆柱体, 并通过调整材料参数使等效模型与实际钢缆的径向力学行为保持一致。

等效后的空心圆柱体材料的弹性模量 $E_{cyl}$ 与钢缆材料的弹性模量 $E_s$ 一致, 且圆柱体的外径 $R_{out}$ 与钢缆整体外半径 $R_{wr}$ 一致。基于钢缆完整有限元模型得到的钢缆拉伸刚度 $k_{11}$ , 可根据式(17)计算圆柱体的内径 $R_{in}$ 。

$$k_{11} = E_{cyl} A_{cyl} = E_{cyl} \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (17)$$

式中:  $A_{cyl}$ 为等效后空心圆柱体的横截面积。

当钢缆发生轴向应变 $\varepsilon$ , 其产生整体径向收缩变形 $\delta_r$ :

$$\delta_r = -R_c \nu_s \xi_c - 2 \sum_i R_i \nu_s \xi_i \quad (18)$$

调整空心圆柱体的泊松比使其在发生相同轴向应变 $\varepsilon$ 时, 产生与钢缆一致的径向收缩变形 $\delta_r$ 。

在本文的张紧式电缆有限元分析中, 首先建立中心钢缆的完整有限元模型, 计算其拉伸刚度及钢丝应力水平; 而后基于上述等效方法, 将钢缆等效为空心圆柱体, 建立张紧式电缆的等效有限元模型。

### 2.2 复杂螺旋结构通用有限元建模方法

对于螺旋钢缆及本文提出的张紧式电缆等复杂螺旋结构, 采用静态通用分析程序研究其在轴对称载荷下的力学行为。该程序采用隐式求解方法, 通过迭代算法求解系统平衡方程; 由于隐式求解方法可自动调整计算步长, 其在处理内部存在大量接触的非线性问题时更为稳定。

设置通用接触以模拟结构内各部件间的接触行为, 由内置程序自动判断所有部件间的接触状态; 选择“面对面”的接触离散方式, 该方式对主从面的选择不敏感, 可同时考虑主从面的几何形状, 在保证易收敛性的同时, 计算得到的接触应力也更加精确; 选择“硬接触”模拟单元间径向接触力的传递, 即当部件间间隙为0时, 接触力由0突变为满足系统平衡方程的任意大的值, 同时使用罚函数法进行近似求解, 通过设置合适的罚函数因子使计算更易收敛; 设置切向摩擦系数以模拟单元间的摩擦力, 可合理计算单元间的黏结状态与滑移状态。

将钢缆的端部分别通过刚性耦合约束与相应参考点连接, 边界条件设置为一端完全固定, 另一端通过控制参考点的位移施加载荷, 以方便在后处理中读取位移、轴向力等结果。

选择三维20结点二次完全积分单元C3D20进行网格划分。相比于常用的一次单元和减缩积分单元, 由于其形函数为二次插值函数, 可允许单元内部复杂的位移状态, 且完全积分单元的应力解精度更高, 因此C3D20单元在包含曲面、接触等问题中表现更好; 同时, 尽管C3D20单元的单步计算量较大, 但其模拟精度更高, 在同一个计算步下达到收敛所需的迭代次数更少, 因此其整体计算时长与一次单元或减缩积分单元相比并无显著差异。

## 3 张紧式电缆设计及疲劳损伤分析方法

### 3.1 张紧式电缆设计方法

浮式风机系统的运动响应主要由平台特性及系泊系统决定, 张紧式电缆的布置对平台响应影响较小。因此, 在进行电缆截面设计前, 可先根据浮式平台在极端海况下的运动响应及初步拟定的电缆长度, 计算得到电缆的最大轴向应变; 在此基础上, 通过张紧式电缆的力学响应解析模型进行截面初步设计与极限强度校核。校核满足要求后, 基于通用

有限元软件ABAQUS建立张紧式电缆的三维有限元模型，其中，将螺旋钢缆依据刚度等效原则等效为空心圆柱体，计算得到张紧式电缆的力学特性及

金属单元的载荷-应力关系；根据整体力学特性进行时域计算模拟，最终完成满足极限强度要求的张紧式电缆截面设计。计算流程见图4。

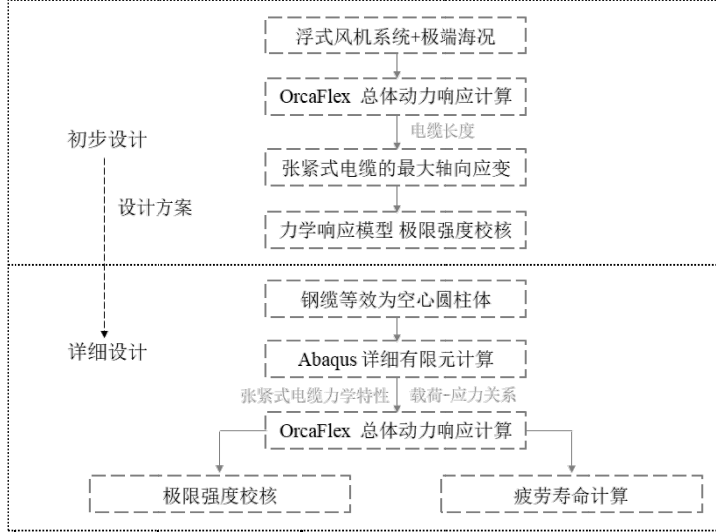


图4 张紧式电缆设计方法

Fig. 4 Design Methodology of Tensioned Cable

上述提到的浮式风机系统运动响应时域计算模拟在海洋工程动态分析软件OrcaFlex中完成。风力机部分使用OrcaFlex官方示例文件中的标准风力机；浮式平台的水动力参数通过有限元分析系统Sesam中的漂浮式结构分析模块HydroD计算得到。

### 3.2 张紧式电缆疲劳损伤分析方法

首先进行疲劳海况设计，假定风、浪、流均为平稳的随机过程，各疲劳海况计算时长统一设置为3 h。选取缆绳疲劳热点位置，提取对应的载荷时历。

海洋工程中，动态电缆的疲劳寿命主要由钢丝的疲劳损伤决定<sup>[20]</sup>。根据电缆精细化计算得到的钢丝应力与载荷关系式，将电缆的载荷时历转化为应力时历。由于海洋环境下电缆的应力时历具有随机时变特征，难以直接描述，因此采用雨流计数法对应力时程进行统计，并采用Goodman曲线进行平均应力修正，得到基于零对称循环载荷的应力幅值及循环次数。

最终，基于材料的S-N曲线及Miner线性累积损伤理论，计算各应力幅值对应的累积损伤值，并引入10倍安全系数，最终获得动态电缆的疲劳寿命。材料S-N曲线的表达式为

$$\log N_i = A + B \log \Delta \sigma_i \quad (19)$$

式中： $\Delta \sigma_i$ 为某一应力循环幅值； $N_i$ 为对应的循环极限； $A$ 和 $B$ 为材料参数。

Miner线性累积损伤理论的表达式为

$$D_L = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (20)$$

式中： $n_i$ 为某应力幅值一年内的循环次数； $D_L$ 为对

应的疲劳损伤。

## 4 张紧式电缆参数研究与案例分析

### 4.1 解析模型与有限元方法验证

选择JIANG等<sup>[13]</sup>建立的3层螺旋钢缆解析模型，进行解析模型与有限元方法的对比验证，模型计算长度设置为 $10d$ ( $d$ 为钢缆直径)<sup>[14]</sup>。计算结果见图5，ABAQUS有限元计算结果与试验结果吻合较好，验证了本文有限元方法的有效性。Costello钢丝绳理论虽然考虑了钢丝层间接触力，但未考虑由接触引起的钢丝变形，导致理论计算得到的拉伸刚度偏大<sup>[21]</sup>，偏差为12%。在本文张紧式动态电缆的计算中，拉伸刚度偏大将导致缆绳轴向受力偏大，计算结果偏于保守。

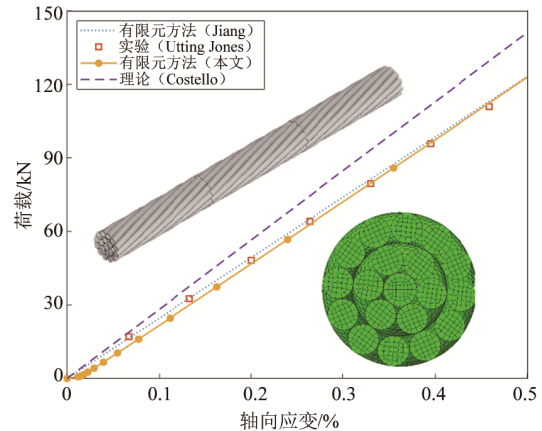


图5 3层螺旋钢缆的有限元-理论-试验轴向行为对比

Fig. 5 Comparison of Axial Behavior of Three-Layer Spiral Strand: FEM, Theoretical and Experimental

图6给出了螺旋钢缆在0.04%轴向应变下的应力云图, 图7为钢缆中心钢丝的应力-应变曲线, 分别对应基于Costello钢丝绳理论的计算结果、ABAQUS有限元得到的中心钢丝中间位置应力, 以及中心钢丝与外层螺旋钢丝接触位置应力, 即图6中标注的1测点、2测点。基于Costello理论得到的钢丝应力小于有限元计算结果, 主要是因为理论中未考虑接触钢丝间的接触应力。当钢缆轴向载荷较小时(轴向变形小于0.01%), 钢丝间的接触力较小, 由接触引起的应力增量可以忽略不计, 此理论结果与有限元结果极为接近。

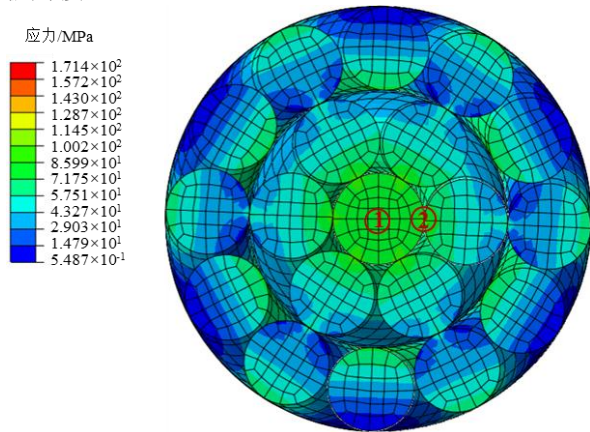


图6 3层螺旋钢缆的应力云图(轴向应变为0.04%)

Fig. 6 Stress Contour of Three-Layer Spiral Strand (Axial Strain of 0.04%)

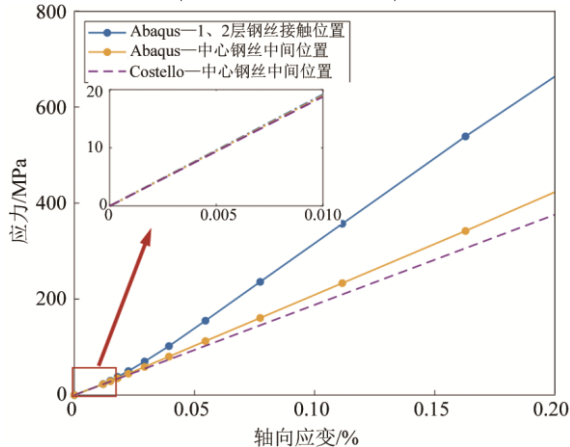


图7 3层螺旋钢缆的应力-应变关系

Fig. 7 Stress-Strain of Three-Layer Spiral Strand

#### 4.2 张紧式电缆截面参数研究

基于张紧式电缆力学响应解析模型, 研究螺旋钢丝角度、层数对电缆整体拉伸刚度、扭转刚度以及钢丝、铜导体应力水平的影响。

##### 4.2.1 钢丝螺旋角度的影响

表1列出了示例钢缆的几何参数。为了保持1~3层螺旋钢丝的角度一致, 计算钢丝螺旋角度在20°~85°范围内张紧式电缆的拉伸刚度、扭转刚度, 以及

在1 000 kN轴向拉力作用下, 钢丝与铜导体的应力水平。

表1 示例钢缆几何参数

Tab. 1 Geometrical Parameters of Steel Strand

层数	钢缆数量	直径/mm
0	1	6.70
1	7	4.95
2	13	4.85
3	15	6.00

张紧式电缆在不同钢丝螺旋角度下的拉伸刚度与扭转刚度见图8。结果表明, 随着钢丝螺旋角度的减小, 张紧式电缆的拉伸刚度逐渐降低。这是由于整体拉伸刚度主要受钢丝轴向应力分量控制, 当螺旋角度减小时, 钢丝应力水平下降, 且其在电缆轴向的应力分量也随之减小。与之不同, 张紧式电缆的扭转刚度主要受钢丝环向应力分量影响。尽管螺旋角度减小会使钢丝应力水平降低, 但其环向应力分量呈增加趋势, 使得扭转刚度随钢丝螺旋角度减小呈现先增大后减小的规律, 并在某一螺旋角度下达到最大值。

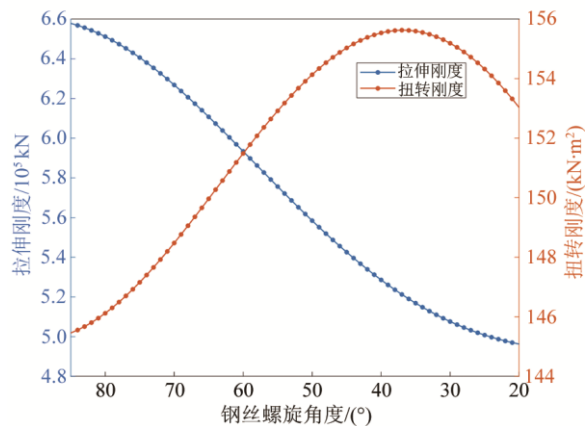


图8 不同钢丝螺旋角度下张紧式电缆的拉伸/扭转刚度

Fig. 8 Tension and Torsion Stiffness of Tensioned Cable Under Various Winding Angles of Wires

图9为不同钢丝螺旋角度下中心直钢丝、最外层螺旋钢丝与铜导体的应力水平。随着螺旋角度减小, 电缆中各部件呈现出不同的变化趋势。在轴向拉力保持不变时, 螺旋钢丝所受应力随着螺旋角度减小而降低, 相应地, 结构中其他部分的应力水平会随之上升, 如中心直钢丝与铜导体。螺旋角度减小会使张紧式电缆的弯曲刚度降低、最小弯曲半径增大, 有利于运输盘放。因此, 在实际工程应用中, 应综合考虑张紧式电缆的拉伸、扭转和弯曲性能, 各受力单元的应力水平以及运输要求, 选取合理的螺旋角度。

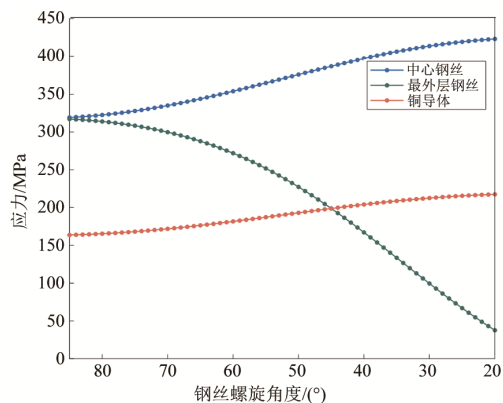


图9 不同钢丝螺旋角度下张紧式电缆中金属单元应力  
Fig. 9 Metal Stress of Tensioned Cable Under Various Winding Angles of Wires

#### 4.2.2 螺旋钢丝层数的影响

参考RAOOF等<sup>[22]</sup>提供的钢缆参数, 研究中心钢缆不同钢丝层数对张紧式电缆力学特性的影响。

图10给出了钢丝层数为1~8层时张紧式电缆的拉伸刚度与扭转刚度。由图10可知, 随着螺旋钢丝层数的增加, 张紧式电缆的拉伸刚度与扭转刚度都明显提高。图11为张紧式电缆在1 000 kN轴向拉力作用下, 不同钢丝层数对应各金属单元的应力水平。

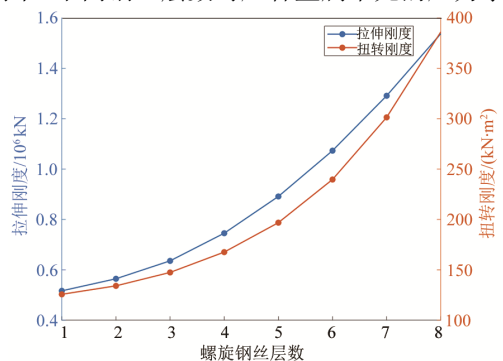


图10 不同螺旋钢丝层数时张紧式电缆的拉伸/扭转刚度  
Fig. 10 Tension and Torsion Stiffness of Tensioned Cable

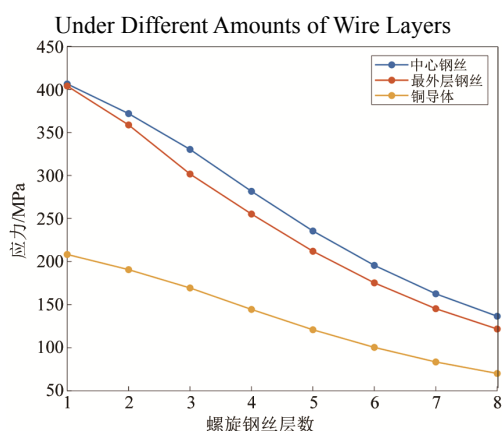


图11 不同螺旋钢丝层数时张紧式电缆中金属单元应力  
Fig. 11 Metal Stress of Tensioned Cable Under Different Amounts of Wire Layers

结果表明, 在相同轴向载荷下, 螺旋钢丝层数的增加可有效降低中心直钢丝、外层螺旋钢丝及铜导体等关键受力部件的应力水平。然而, 张紧式电缆的自身质量与制造成本也会随钢丝层数增加而上升。因此在工程应用中, 应综合考虑缆绳成本、自重与力学性能等进行合理设计。

#### 4.3 张紧式电缆设计案例

##### 4.3.1 张紧式电缆设计参数

本文选取MATHA<sup>[19]</sup>在MIT<sup>[23]</sup>张力腿式5 MW浮式风机基础上改进的风机模型, 进行张紧式电缆设计。其中, 风力涡轮机为国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)公开的5 MW风机; 浮式平台为圆柱形结构, 底部设有混凝土; 系泊系统为4×2根垂直布置的张力腿, 通过导缆器控制与平台的相对位置, 由于系泊系统的公开资料较少, 本文基于课题组以往项目经验对张力腿的相关参数作了部分调整, 具体见表2。

表2 系泊系统参数

Tab. 2 Parameters of Mooring System

参数	设计值
数量	8
直径/m	0.14
线密度/(kg/m)	89.53
导缆器距中心距离/m	27
长度(未拉伸)/m	151.73
等效泊松比	0.27
拉伸刚度/kN	1 915 000
扭转刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	522.47
弯曲刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	5.4

对于上述浮式风机模型, 基于极限强度设计的张紧式电缆参数见表3~表6<sup>[24]</sup>。其中, 电缆单元的组成参考JANOCHA等<sup>[24]</sup>提出的适用于66 kV额定电压的电缆模型。

表3 张紧式电缆物理参数

Tab. 3 Physical Parameters of Tensioned Cable

层数	物理模型	材料	外径/mm	螺旋角度/(°)
1	钢缆	钢	38.3	—
2	内护套	HDPE (高密度聚乙烯)	44.3	—
3	电缆单元	—	70.4	80
4	填充	MDPE (中密度聚乙烯)	—	80
5	外护套	HDPE	195.1	—

表 4 钢缆几何参数

Tab. 4 Geometrical Parameters of Steel Strand

层数	数量/根	直径/mm	螺旋角度/(°)
0	1	6.70	—
1	7	4.95	-82.47
2	13	4.85	-77.85
3	15	6.00	-72.01

表 5 电缆单元物理参数

Tab. 5 Physical Parameters of Conductor Bundle

层数	物理模型	材料	外径/mm
1	铜导体	铜	29.9
2	导体屏蔽层	铜	33.9
3	绝缘层	XLPE (交联聚乙烯)	57.7
4	绝缘屏蔽层	铜	64.0
5	护套	MDPE	70.4

表 6 张紧式电缆材料属性

Tab. 6 Material Properties of Tensioned Cable

材料	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	杨氏模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
钢	7 850	210 000	0.30	1 350
铜	8 890	112 200	0.34	300
XLPE	925	1 000	0.40	—
MDPE	956	1 000	0.40	—
HDPE	980	1 000	0.40	—

铜的屈服强度通常被定义为产生0.2%残余应变时的应力; 铜导体的屈服强度除受材料本身的影响外, 还受到铜丝排列方式与制备工艺等因素的影响, 本文选择NASUTION等<sup>[25]</sup>通过试验测试得300 mm<sup>2</sup>铜导体屈服强度, 该导体由直径为3.21 mm的电解韧铜 (Electrolytic Tough Pitch, ETP) 铜丝制成。

#### 4.3.2 张紧式电缆力学特性分析

根据第2.1节提出的等效方法, 将螺旋钢缆等效为空心圆柱体, 其内径 $R_{in}=11.89$  mm, 材料泊松比由0.300调整为0.276。等效后张紧式电缆的计算结果见图12。考虑焊接折减及结构极限承载能力后, 钢丝及铜导体允许承受的最大应力分别为972 MPa和216 MPa。张紧式电缆中铜导体与钢丝的应力-张力关系见图13, 铜导体先于钢丝达到最大许用应力, 张紧式电缆的极限强度主要受铜导体的约束, 本例中极限强度为1 153 kN。此外, 基于钢缆的完整有限元计算结果, 得到张紧式电缆中心直钢丝应力 $\sigma_{steel}$ 与缆绳拉力 $F$ 的关系式为

$$\sigma_{steel} = \alpha F \quad (21)$$

式中:  $\alpha$ 为中心直钢丝的应力-载荷系数, 取值为0.435 37 MPa/kN。

张紧式钢缆的物理参数见表7。

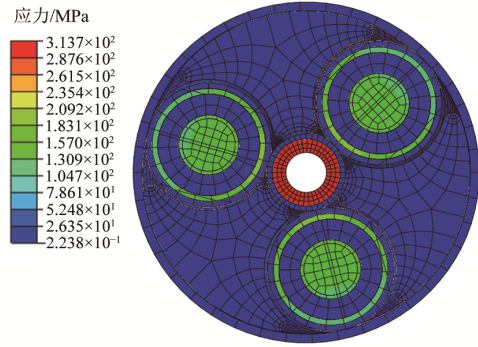


图 12 张紧式电缆的应力云图 ( $T=900$  kN)

Fig. 12 Stress Contour of Tensioned Cable ( $T=900$  kN)

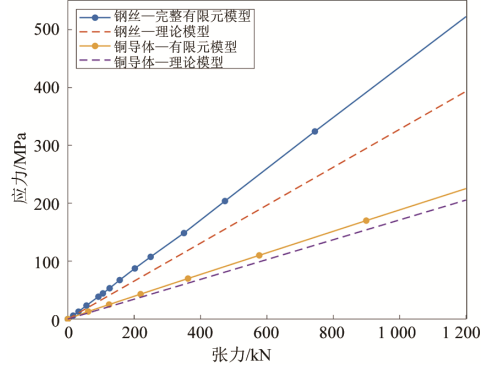


图 13 张紧式电缆中铜导体及钢丝的应力-张力关系图  
Fig. 13 Stress-Tension Relationship for Copper Conductor and Steel Wires in Tensioned Cable

表 7 张紧式电缆物理特性

Tab. 7 Physical Characteristics of Tensioned Cable

属性	数值	属性	数值
外径/mm	195.10	拉伸刚度/kN	633 680.26
未拉伸长度/m	152.13	扭转刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	147.59
线密度/(kg/m)	52.85	弯曲刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	123.14

#### 4.3.3 张紧式电缆极限强度校核

考虑到NERL 5 MW风机在风特性, 其在风速为11 m/s时达到其最大推力与扭矩载荷<sup>[23]</sup>, 因此本文选择11 m/s作为极限工况风速, 并采用美国石油学会 (American Petroleum Institute, API) 风谱进行模拟。该浮式风机按10 m波高设计, 且10 m有效波高为公海典型极端设计条件, 故选此作为极限海况, 采用JONSWAP谱进行波浪模拟。海流模型参考DNV-RP- C205规范<sup>[26]</sup>, 由潮流和风海流2个部分组成。极限工况详细参数见表8, 风、浪、流同向, 且垂直于风机叶片旋转时的平面。

在OrcaFlex中进行极端海况下系统的动态响应计算, 提取张紧式电缆的最大拉伸载荷 $T_{max}=425$  kN,

本例中张紧式电缆可承受的极限拉伸载荷 $T_{\text{极限}}$ 为1 153 kN, 满足如下极限校核要求:  $T_{\text{max}}/T_{\text{极限}}=0.37 < 1.00$ 。

表 8 极限工况

Tab. 8 Ultimate Limit State

水深/ m	风速/ (m/s)	有义 波高/ m	谱峰 周期/s	潮流 流速/ (m/s)	风海 流流 速/ (m/s)
200.00	11.00	10.00	17.64	0.20	0.24

#### 4.4 张紧式电缆与传统缓波型电缆比较

为进一步研究本文所提张紧式电缆的可行性与优势, 将其与传统缓波型电缆的制造成本、疲劳寿命及海生物附着影响进行对比分析。缓波型电缆的截面参数及布置形式等具体参考JANOCHA等<sup>[24]</sup>提出的适用于66 kV额定电压下的电缆结构, 其电缆单元组成参数及螺旋角度与第4.3节设计案例中的张紧式电缆完全一致。缓波型电缆的布置形式及结构组成见图14。

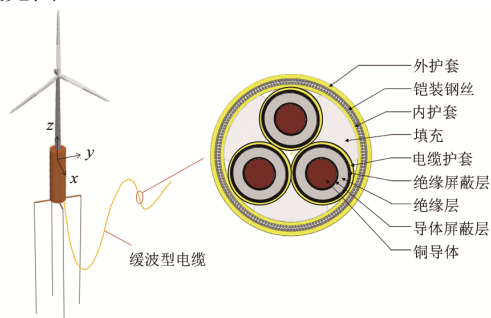


图 14 缓波型电缆布置及组成示意图

Fig. 14 Profile and Component Schematic of Lazy-Wave Cable

##### 4.4.1 制造成本比较

张紧式电缆与缓波型电缆单位长度的用钢量 $S_t$ 与 $S_w$ 如下:

$$S_t = \rho_s \left( \pi R_c^2 + \sum_{i=1}^n \pi R_i^2 \frac{1}{\sin \alpha_i} m_i \right) \quad (22)$$

$$S_w = \rho_s \left( \pi R_{il}^2 \frac{1}{\sin \alpha_{il}} m_{il} + \pi R_{ol}^2 \frac{1}{\sin \alpha_{ol}} m_{ol} \right) \quad (23)$$

式(22)和式(23)中:  $\rho_s$ 为钢材密度;  $R$ 、 $\alpha$ 和 $m$ 分别为钢丝的半径、螺旋角度和数量; 下角标c、i、il和ol分别对应了张紧式电缆中心直钢丝、第*i*层螺旋钢丝、缓波型电缆中的内层铠装钢丝与外层铠装钢丝。

经过计算可得:  $S_t=6.77 \times 10^{-3}$  kg/m、 $S_w=1.86 \times 10^{-2}$  kg/m。由此可知: 张紧式电缆单位长度的用钢

量约为缓波型电缆的1/4。

对于本文的张力腿式浮式风机, 张紧式动态电缆的长度为152 m, 缓波型动态电缆的长度为530 m。总体看来, 张紧式电缆的整体用钢量仅为缓波型电缆的1/10。除用钢量降低外, 由于动态电缆的制造成本通常很高, 长度的大幅减少可降低浮式风机电缆系统的整体制造成本。

##### 4.4.2 疲劳损伤比较

选择孔令澎等<sup>[20]</sup>根据南海实测环境数据建立的疲劳工况作为本文浮式风机系统计算的疲劳工况, 具体工况组合及发生概率见表9, 其中, 规定方向N与总体坐标系中y轴正向一致。

表 9 疲劳分析工况

Tab. 9 Fatigue Analysis Load Cases

风速/ (m/s)	风 向	特征波 高/m	谱峰周 期/s	波 向	一年内发 生概率/%
8.89	NE	2.20	7.30	NE	4.84
		1.30	6.80	E	10.75
		1.60	5.70	S	10.15
6.53	E	2.20	7.30	NE	9.55
		1.30	6.80	E	20.85
		1.60	5.70	S	20.08
6.18	S	2.20	7.30	NE	5.53
		1.30	6.80	E	9.24
		1.60	5.70	S	9.08

由前述理论可知, 张紧式电缆承受轴向载荷时, 中心直钢丝的应力最大。因此, 选择钢缆中心直钢丝应力 $\sigma_{\text{steel}}$ 与缆绳拉力 $F$ 的关系式(21), 计算张紧式电缆中钢丝的应力时历; 缓波型电缆中的应力-载荷关系详见JANOCHA等<sup>[24]</sup>的计算。对于钢丝而言, 式(19)中的材料参数 $A$ 和 $B$ 分别为17.446和-4.700<sup>[27]</sup>。

计算张紧式电缆与缓波形电缆的疲劳损伤。2种电缆中钢丝的应力幅值及其1 a内的循环次数及累积损伤见图15和图16。

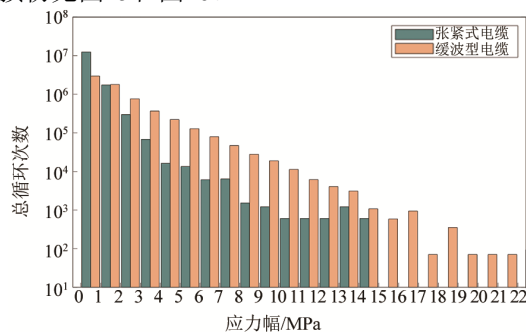


图 15 动态电缆中钢丝各应力幅值一年内循环次数

Fig. 15 Number of Cycles for Each Stress Amplitude in Steel Wires of Dynamic Cables Over One Year

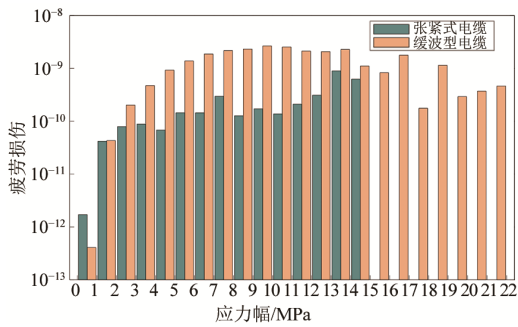


图 16 动态式电缆中钢丝各应力幅值一年内累积损伤  
Fig. 16 Cumulative Damage for Each Stress Amplitude in Steel Wires of Dynamic Cables Over One Year

在相同环境条件下，张紧式电缆所承受的应力幅值显著低于缓波型电缆。对本例而言，张紧式电缆的最大应力幅值为 15 MPa，而缓波型电缆的应力循环分布在 1 MPa~22 MPa。

对于张紧式电缆，其超过 1/3 的应力循环幅值低于 1 MPa，该部分低应力循环对疲劳损伤的贡献很小；其余分布在 1 MPa~15 MPa 区间内的应力循环次数及其引起的疲劳损伤均低于缓波型电缆。总体上，张紧式电缆 1 a 内的疲劳损伤约为缓波型电缆的 1/10。

#### 4.4.3 海生物影响比较

动态电缆长期暴露于海洋环境中，易发生海生物附着。海生物的附着会改变电缆的直径、质量以及水动力外形，从而影响其作业过程的力学表现。参考规范 DNV-OS-E301<sup>[28]</sup>，研究海生物附着厚度对张紧式电缆与缓波型电缆力学特性的影响。其中，海生物的密度为 1.3 t/m<sup>3</sup>，附着厚度为 0~50 mm（间隔为 10 mm）。

2 种电缆在不同海生物附着厚度下的疲劳寿命见图 17。由图 17 可知，海生物附着会不同程度地降低张紧式电缆与缓波型电缆的疲劳寿命。由于整体线型的差异，缓波型电缆的疲劳损伤主要由曲率变化主导，而张紧式电缆的疲劳损伤主要由张力变化主导。对于张紧式电缆，海生物附着厚度在 30 mm 以内时，其疲劳寿命几乎不受影响；海生物附着厚度超过 30 mm 时，电缆的疲劳寿命随附着厚度增加而降低。这主要是因为，海生物的附着会增大电缆自重，从而使张紧式电缆的张力水平提高，当张力水平超过一定范围时，疲劳寿命随之降低。对于缓波型电缆，海生物的附着一方面会增加其载荷水平，另一方面会使其线型发生变化。图 18 为不同海生物附着厚度下缓波型电缆的静平衡位置，其中，横坐标为电缆距浮式平台中心的水平位置，纵坐标为电缆距海平面的垂直位置。由图 18 可知，随着附着厚度的增加，缓波型电缆的设计线型发生改变，甚至出现触底风险。因此，缓波型电缆的疲劳寿命随海生物附着厚度增大持续降低。

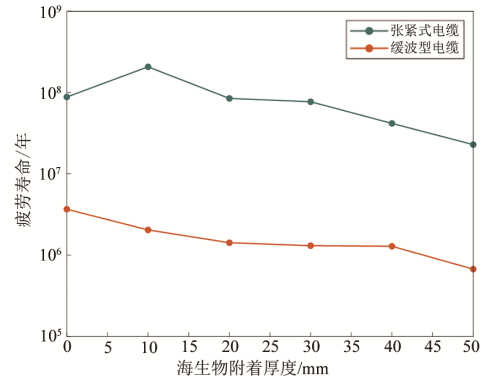


图 17 不同海生物附着厚度下动态电缆的疲劳寿命  
Fig. 17 Fatigue Life of Dynamic Cables with Different Thickness of Marine Growth

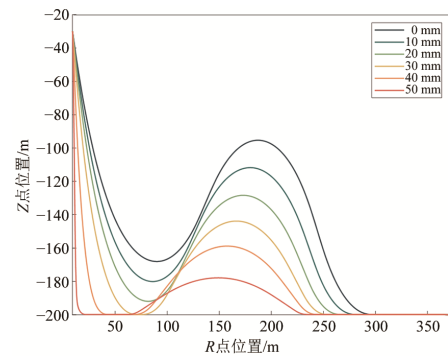


图 18 不同海生物附着厚度下缓波型电缆的静平衡位置  
Fig. 18 Static Position of Lazy-Wave Cable with Different Thickness of Marine Growth

## 5 结论

本文基于张力腿式浮式风机，提出一种新型的张紧式电缆，其截面形式及总体线型均区别于传统的缓波型电缆，主要有以下 2 个特点。

- 1) 钢丝螺旋为单股钢缆，布置于张紧式电缆的中心，电缆单元螺旋布置在钢缆外侧。
- 2) 张紧式电缆垂直布置于浮式平台中心，作业期间始终保持张紧。

基于 Costello 钢丝绳理论，推导了轴对称载荷下张紧式电缆的力学响应解析方程，研究了螺旋钢缆参数对张紧式电缆力学特性的影响；设计了刚度等效方法，将钢缆等效为空心圆柱体，通过 ABAQUS 建立了张紧式电缆的详细有限元模型。针对 MIT 张力腿式 5-MW 浮式风机设计并分析了张紧式电缆的力学特性。与传统的缓波型电缆相比，本文提出的张紧式电缆具有以下 3 点优势。

- 1) 单位长度用钢量少且长度大幅缩短，减低了动态电缆的制造成本。
- 2) 作业过程中应力循环集中在低应力幅值范围内，疲劳损伤较小。
- 3) 线型和疲劳寿命对海生物附着的敏感性较低。

## 参考文献:

- [1] 郝红彬. 浮式风机气垫驳船型平台概念设计与风浪

- 耦合试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- HAO H B. Conceptual Design on Air-Cushion Barge Platform for FOWT and Experimental Researches on Their Wind-Wave Coupling[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [2] SU Q, ZHANG Q, XU Q, et al. Deep Learning-Driven Optimization Design for the Configuration of Lazy-Wave Umbilical Cables[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 150: 104097.
- [3] WARNOCK J, MCMILLAN D, PILGRIM J, et al. Failure Rates of Offshore Wind Transmission Systems[J]. *Energies*, 2019, 12(14): 2682.
- [4] DE WILD F. Offshore Wind Industry Joins Forces to Reduce Costs of Cable Failures[OL]. [2018-04-23]. <https://www.dnv.com/news/2018/offshore-wind-industry-joins-forces-to-reduce-costs-of-cable-failures-117811/>.
- [5] KNAPP R H. Derivation of a New Stiffness Matrix for Helically Armoured Cables Considering Tension and Torsion[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1979, 14: 515-520.
- [6] COSTELLO G A, PHILIPPS J W. A More Exact Theory for Twisted Wire Cables[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1974, 100(5): 1096-1099.
- [7] COSTELLO G A. *Theory of Wire Rope*[M]. 2nd ed. New York: Springer Science & Business Media, 1997.
- [8] UTTING W S, JONES N. The Response of Wire Rope Strands to Axial Tensile Loads-Part I. Experimental Results and Theoretical Predictions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1987, 29(9): 605-619.
- [9] HOBBS R E, RAOOF M. Interwire Slippage and Fatigue Prediction in Stranded Cables for TLP Tethers[J]. *Sustainability*, 2024, 16(7): 2899.
- [10] WITZ J, TAN Z. On the Axial-Torsional Structural Behaviour of Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables[J]. *Marine Structures*, 1992, 5(2-3): 205-227.
- [11] 董磊磊, 张崎, 黄一. 基于能量法的非黏合柔性立管轴对称响应分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 122-126.
- DONG L L, ZHANG Q, HUANG Y. Energy Approaches Based Axisymmetric Analysis of Unbonded Flexible Risers[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2013, 41(5): 122-126.
- [12] GUO Y, CHEN X, FU S, et al. Mechanical Behavior Analysis for Unbonded Umbilical under Axial Loads[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(6): 739-749.
- [13] JIANG W, HENSHALL J, WALTON J. A Concise Finite Element Model for Three-Layered Straight Wire Rope Strand[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2000, 42(1): 63-86.
- [14] 于春蕾. 单股钢丝绳力学性能高效数值模拟技术研究[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- YU C L. Research on Efficient Numerical Simulation Technique for Mechanical Behavior of Wire Strands[D]. Qinhuangdao, Hebei: Yanshan University, 2017.
- [15] CHANG H C, CHEN B F. Mechanical Behavior of Submarine Cable Under Coupled Tension, Torsion and Compressive Loads[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106272.
- [16] FANG P, JIANG X, HOPMAN H, et al. Mechanical Responses of Submarine Power Cables Subject to Axisymmetric Loadings[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109847.
- [17] 邓禹, 夏辉, 高建东, 等. 脐带缆轻量化设计及其力学性能[J]. *船舶工程*, 2022, 44(3): 150-157.
- DENG Y, XAI H, GAO J D, et al. Lightweight and Mechanical Properties of Umbilical Cable[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(3): 150-157.
- [18] WANG W, MAO T, YAN F, et al. Investigation on Mechanical Properties of Double-Armoured Umbilical[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2024: 1-10.
- [19] MATHA D. Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts: April 2009[R]. 2010.
- [20] 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.
- KONG L P, WANG T T, LIANG X, et al. Fatigue Life Analysis of Dynamic Cable in Floating Offshore Wind Turbine[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(2): 23-27.
- [21] MENG F, CHEN Y, DU M, et al. Study on Effect of Inter-Wire Contact on Mechanical Performance of Wire Rope Strand Based on Semi-Analytical Method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 115: 416-427.
- [22] RAOOF M, DAVIES T J. Determination of the Bending Stiffness for a Spiral Strand[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2004, 39(1): 1-13.
- [23] TRACY C C H. *Parametric Design of Floating Wind Turbines*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [24] JANOSCHA M J, ONG M C, LEE C F, et al. Reference Power Cable Models for Floating Offshore Wind Applications[J]. *Sustainability*, 2024, 16(7): 2899.
- [25] NASUTION F P, SAEVIK S, BERGE S. Experimental and Finite Element Analysis of Fatigue Strength for 300 mm<sup>2</sup> Copper Power Conductor[J]. *Marine Structures*, 2014, 39: 225-254.
- [26] DNV. Environmental Conditions and Environmental Loads: DNV-RP-C205[S]. 2017.
- [27] DNV. Fatigue Design of Offshore Steel Structures DNV-RP-C203[S]. 2017.
- [28] DNV. Position Mooring DNV-OS-E301[S]. 2021.