

海缆敷设张力控制影响因素分析

吕方宏^{1,*} 陈晓明¹ 张锦东¹ 李鑫奎¹ 王思安¹ 李俊²

(1.上海建工集团股份有限公司,上海 200080; 2.上海市基础工程集团有限公司,上海 200438)

摘要 本文推导了承受均匀竖向荷载,考虑弯曲刚度、大变形的索静力平衡方程,以及在小变形条件下的解析解,为实际工程快速估算海缆线形提供理论支撑;分析比较了该解析解、经典悬链线解、大变形考虑弯曲刚度的数值解在不同弯曲刚度、水深条件下对海缆线形的影响。计算了海流方向、海浪方向、海浪周期对海缆触地点最小张力及最小曲率半径的影响。结果表明:在静力荷载下,海缆弯曲刚度由 $3.2 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 增大至 $320 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ (对应水深50 m)时,施工中可观测到的入水角减小;而当水深由10 m增加至50 m(弯曲刚度保持 $3.2 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$)时,入水角增大。因此,张力控制应根据不同的弯曲刚度和水深设定相应的入水角观测值。此外,当海流流向为 180° 且海浪周期引起船舶共振时,为最不利工况,在四级海况最不利工况下,海缆触地张力显著减小。海缆施工逆流时应降低放缆速度,并应避免在共振海况下作业。

关键词 海缆敷设张力控制,索弯曲刚度,悬链线理论,入水角,触地张力

中图分类号: U674 **文献标志码:** A **DOI:** 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0007

Analysis of Factors Affecting Tension Control in Submarine Cable Laying

LÜ Fanghong^{1,*} CHEN Xiaoming¹ ZHANG Jindong¹ LI Xinkui¹ WANG Sian¹ LI Jun²

(1.Shanghai Constructiup Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2.Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract This study derived the static equilibrium equation of submarine cables under uniform vertical load, taking into account bending stiffness and large deformation, along with the analytical solution under small-deformation conditions, thereby providing theoretical support for rapid estimation of cable alignment in practical engineering. The effects of the analytical solution, the classical catenary solution, and the numerical solution incorporating bending stiffness under large deformation on cable configuration were analyzed and compared under varying bending stiffness and water depth conditions. Furthermore, the influences of ocean current direction, wave direction, and wave period on the minimum tension and minimum curvature radius at the cable touchdown point were calculated. The results show that under static loading, as the bending stiffness of the submarine cable increases from $3.2 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ to $320 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ (at a water depth of 50 m), the observed water entry angle during installation decreases. When the water depth increases from 10 m to 50 m (with a bending stiffness of $3.2 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$), the water entry angle increases. Therefore, tension control should be adjusted with corresponding target entry angles depending on bending stiffness and water depth. In addition, the most critical operating condition occurs when the current direction is 180° and the wave period induces ship resonance. Under the most unfavorable sea state conditions (Sea State 4), the touchdown tension of the

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 上海市国资委企业创新发展和能级提升项目(2023019)

*联系作者: 吕方宏,男,博士,主要从事抗震研究。E-mail: lfh@scg.cn

submarine cable decreases significantly. It is recommended to reduce the cable-laying speed when operating in reverse currents and to avoid construction under wave-resonance conditions.

Keywords tension control for submarine cable laying, cable bending stiffness, chain theory, water inlet angle, ground contact tension

0 引言

随着全球海洋资源开发的深入,海底电缆(海缆)作为海上风电电力传输的核心载体,其安全高效铺设是保障海上风电开发的关键技术环节。在复杂海洋环境作用下,电缆铺设过程中承受波浪、洋流及自重等多重载荷耦合作用,其分析模型的精确性直接关系到施工安全性与服役可靠性。

悬链线理论自 Irvine^[1]系统阐述以来,已成为分析柔性缆索受力的基础工具。经典悬链线模型将缆索简化为无弯曲刚度的理想柔索,通过静力平衡方程推导形态与张力分布。然而,海底电缆通常具有多层复合结构(导体层、填充层、绝缘层、铠装层等),随着风电向深远海发展,大直径高压电缆得到大量应用^[2],其弯曲刚度不可忽略。Zhu^[3]分析了小挠度下弯曲刚度对悬链线静态轮廓的影响,悬链线跨度越小,影响越大。在铺设阶段,由于电缆张力很难测量,往往通过海缆入水角监控进行张力控制,抗弯刚度会改变海缆入水角和线型,传统悬链线模型在此类工况下存在理论局限性^[4-5]。

近年来,随着数值模拟技术的进步,考虑风、浪、流多物理场耦合模型逐渐被引入,揭示环境荷载与铺缆船之间的相互影响。闫宏生^[6]等采用简化动力学模型分析了敷设过程中波浪、海流、水深、自重等参数对铺设的影响的敏感性。卢志飞等^[7]充分考虑铺缆船与电缆间的互相影响,用 OrcaFlex 软件对“启帆 9”号铺缆船铺设过程进行了动力学分析。

现有研究对于考虑弯曲刚度的小变形解析解与经典悬链线解的工程适用边界缺乏明确界定;同时,对风、浪、流极端耦合工况下海缆张力的敏感性与施工风险缺乏定量评估。海缆敷设作业采用张力控制埋设方式,通过对 DP 动力定位船速、电动转盘转速、布缆机出缆速度的实时监控,控制合理的海缆入水角度,使海缆以接近零张力触地。触地张力过大会引起海缆长期存在较大残余应

力,影响使用寿命;电缆触地时如果曲率半径过小容易出现绕圈或蛇形弯曲等险情,影响埋设犁正常埋设。本文分析抗弯刚度、水深、波浪、洋流等关键因素对海缆正常铺设的影响规律,为海缆铺设施工控制提供支撑。

1 海缆静力方程

DP 动力定位船在电缆敷设过程中,通常以某一恒定速度沿规划路由航行,布缆机以相同速度出缆,电缆以同样速度触地(图 1)。如果不考虑海浪、洋流、敷缆船对电缆的作用,电缆仅承受自重和水浮力,可以认为电缆处于一个静力平衡状态,采用承受竖向荷载、考虑弯曲刚度的索平衡方程进行位形分析。



图 1 海缆敷设

Fig.1 Submarine cable laying

在静力计算分析时采用以下假定:①不考虑风、海浪、洋流、水阻力、船与电缆之间的耦合作用,电缆仅承受自重与浮力;②电缆仅承受竖向荷载,且单位长度的重量、浮力均匀恒定(忽略海平面以上一小段电缆竖向荷载不同)。如图 2 所示,水深为 D , 电缆悬挂点与海平面竖向距离为 D_1 , 电缆触地点与悬挂点之间水平距离 Layback 为 L , 单位长度所受竖向荷载为 q , 张力水平分量为 H (因仅承受竖向荷载, H 不变)。坐标轴原点设在悬挂点水平线与触地点竖向线相交处, X 轴水平, Y 轴竖直向下。

取电缆微段 ds 进行受力分析,如图 3 所示。图中 H 为张力水平分量, V 为竖向剪力, M 为弯矩, ds 为微段弧长, qds 为微段所受竖向力(重力

減去水浮力)。

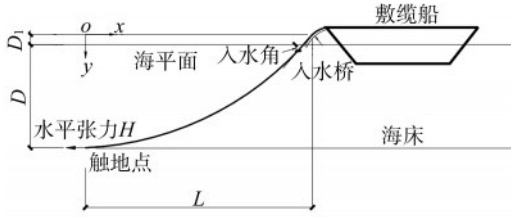


图2 海缆敷设模型

Fig.2 Submarine cable laying model

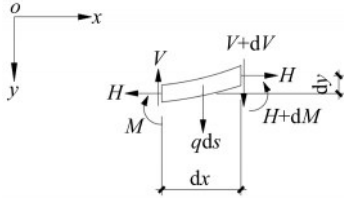


图3 电缆微元力学模型

Fig.3 Micro element mechanical model of cable

竖直方向的平衡方程如下:

$$dV = -q ds = -q \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (1)$$

对微段左端点取矩平衡:

$$(M + dM) - M - (V + dV) dx + H \cdot dy - q \cdot ds \cdot dx/2 = 0 \quad (2)$$

略去高阶小量 $dV \cdot dx$ 、 $ds \cdot dx$, 整理得:

$$V = \frac{dM}{dx} + H \frac{dy}{dx} \quad (3)$$

上式对 x 求导后得到:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{d^2 M}{dx^2} + H \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4)$$

由弯矩 M -曲率 κ 关系 $M = -EI\kappa$:

$$M = -EI \frac{d^2 y/dx^2}{\left[1 + \left(dy/dx\right)^2\right]^{3/2}} \quad (5)$$

式中: EI 为抗弯刚度。式(5)代入到式(4)并利用式(1)可得:

$$EI \frac{d^2}{dx^2} \left\{ \frac{d^2 y/dx^2}{\left[1 + \left(dy/dx\right)^2\right]^{3/2}} \right\} - H \frac{d^2 y}{dx^2} = q \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (6)$$

方程(6)为仅承受均匀竖向荷载的索考虑弯曲刚度、大变形的静力平衡方程,对于一般情况,需采用迭代法或有限元方法求解^[8]。为了比较弯曲刚度对电缆线形的影响,下面分别推导考虑弯曲刚度(小变形)及不考虑弯曲刚度的经典悬链线解析解。

1.1 考虑弯曲刚度、小变形条件下电缆线形

在小变形条件下, $dy/dx \ll 1$, 可忽略高阶非线性项, 方程(6)退化为受轴向力的欧拉-伯努利梁方程:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - H \frac{d^2 y}{dx^2} = q \quad (7)$$

其中, $-H \frac{d^2 y}{dx^2}$ 为轴力对横向变形的贡献。非齐次方程(7)对应的齐次方程为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - H \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (8)$$

对应特征方程 $r^4 - \frac{H}{EI} r^2 = 0$ 的根: $r = 0$ (重根), 以及 $r = \pm \sqrt{\frac{H}{EI}}$ 。令 $\lambda = \sqrt{\frac{H}{EI}}$, 因此齐次方程(8)的通解为:

$$Y(x) = C_1 + C_2 x + C_3 \cosh(\lambda x) + C_4 \sinh(\lambda x) \quad (9)$$

假设非齐次方程(7)的特解为二次多项式:

$$y^*(x) = Ax^2 + Bx + C \quad (10)$$

将式(10)代入方程(7)可得 $A = -\frac{q}{2H}$ 。

方程(7)的解 $y(x)$ 为齐次方程的通解(9)与非齐次方程的特解(10)之和, 并把常数 B 、 C 分别并入式(9)的 C_1 、 C_2 :

$$y(x) = C_1 + C_2 x + C_3 \cosh(\lambda x) + C_4 \sinh(\lambda x) - \frac{q}{2H} x^2 \quad (11)$$

由于电缆关于 Y 轴对称, 解需满足 $y(x) = y(-x)$, 因此式中常数 $C_2 = 0$, $C_4 = 0$, 方程(7)简化后的通解:

$$y(x) = C_1 + C_3 \cosh(\lambda x) - \frac{q}{2H} x^2 \quad (12)$$

因坐标轴原点设在悬挂点水平线与触地点竖直线相交处, 支座(悬挂点)坐标 $x = L$ 。由铰支座的边界条件 $y(L) = 0$, $y'(L) = 0$, 可求得 $C_1 = \frac{q}{8H} L^2 - \frac{q}{H\lambda^2}$, $C_3 = \frac{q}{H\lambda^2 \cosh(\lambda L/2)}$, 代入式(12), 整理后得到考虑弯曲刚度、小变形、铰支座条件下的电缆静态形状方程:

$$y_h(x) = \frac{q}{H\lambda^2} \left[\frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L)} - 1 \right] + \frac{q}{2H} (L^2 - x^2) \quad (13)$$

式(13)的物理意义: 第一项为水平张力 H 和弯曲刚度 EI (通过 $\lambda = \sqrt{\frac{H}{EI}}$) 耦合产生的修正项,

第二项为竖向均布荷载 q 和水平张力 H 主导的抛物线变形。已知 H 、 EI 、 q ，对于每一个竖向挠度 $D_1 + D$ ，通过式(13)及其导数，可以求出对应的 L (Layback) 及入水角 θ (电缆曲线入水点处切线与水平夹角)，也就是说在不同的海底深度 D 下，通过监控相应的入水角或 Layback，可以控制电缆触地处的张力。

同理，由固定支座的边界条件 $y(L) = 0$ ， $y'(L) = 0$ ，可以得到固定支座考虑弯曲刚度和小变形的电缆静态形状方程：

$$y_f(x) = \frac{qL}{H\lambda} \left[\frac{\cosh(\lambda x) - \cosh(\lambda L)}{\sinh(\lambda L)} \right] + \frac{q}{2H}(L^2 - x^2) \quad (14)$$

1.2 电缆经典悬链线线形

不考虑弯曲刚度，方程(6)退化为经典悬链线微分方程：

$$-\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{H} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (15)$$

令 $p = \frac{dy}{dx}$ ，分离变量并积分：

$$\int \frac{dp}{\sqrt{1+p^2}} = \int -\frac{q}{H} dx \quad (16)$$

可得：

$$p = \sinh\left(-\frac{q}{H}x + C_1\right) \quad (17)$$

再次积分可得：

$$y(x) = -\frac{H}{q} \cosh\left(-\frac{q}{H}x + C_1\right) + C_2 \quad (18)$$

将坐标原点设于悬链线中间最低点，简化悬链线方程，边界条件为 $y(0) = 0$ ， $y'(0) = 0$ ，可得 $C_1 = 0$ ， $C_2 = \frac{H}{q}$ 。最终悬链线方程为

$$y_c(x) = -\frac{H}{q} \left[\cosh\left(\frac{q}{H}x\right) - 1 \right] \quad (19)$$

令 $a = \frac{H}{q}$ ， a 称为悬链线参数。 a 是水平张力与竖向荷载的比值，决定了悬链线的平坦度。 a 越大，曲线越平缓，反之则下垂更显著。已知 H 、 q ，式(19)也确定了不同海底深度 D 与 Layback 或入水角的对应关系。按照悬链线理论，最大曲率位于最低点，曲率随高度增加而逐渐减小，满足最小曲率半径要求的水平张力值为施工要控制的触地点最小张力值。

由式(19)可得：

$$\begin{cases} y'(x) = -\sinh\left(\frac{q}{H}x\right) \\ y''(x) = -\frac{q}{H} \cosh\left(\frac{q}{H}x\right) \end{cases} \quad (20)$$

曲率数学表达式为：

$$\kappa = \frac{|y''|}{\left[1 + (y')^2\right]^{3/2}} \quad (21)$$

代入 $x=0$ 处 y' 、 y'' ，可得悬链线最小曲率半径：

$$R_{\min} = \frac{1}{\kappa} \Big|_{x=0} = a = \frac{H}{q} \quad (22)$$

2 静力下海缆线形影响因素

海缆铺设需要控制海缆以小张力触地，同时曲率半径要大于规定的限制；海缆入水桥处的张力是整根电缆最大值，也要控制该处张力小于电缆许可张力。从上面分析可知，可以通过监控入水角间接监控触地张力，而弯曲刚度、海底深度均影响线形，有必要分析它们对入水角、Layback 最小弯曲半径的影响。

国内常用的交联聚乙烯海底电缆典型截面如图4所示，由导体、光纤、屏蔽层、绝缘层、护套、填充层、铠装层、外被覆层等组成，直径为 120~300 mm。铠装层由高强镀锌钢丝缠绕而成，为主要的拉、弯受力构件。弯曲刚度等力学性能可通过实验方法得到^[9-11]，工程上也有采用近似计算方法^[12-13]。由于海缆为多层复合结构，在弯曲状态层与层之间会产生滑移；铠装由钢丝螺旋缠绕而成，需考虑材料各向异性；三芯电缆三根导体呈三角形分布，三角形的底边位于水平还是垂直也影响弯曲刚度，导致不同文献海缆弯曲刚度数值有数量级差别(扣除直径大小影响)^[5-7]，有必要考虑弯曲刚度变化对海缆位形影响。

以下以某电缆的铺设为例进行分析，电缆参数见表1^[7]，比较解析解式(19)(悬链线理论)、式(13)(铰支座、小变形、考虑 EI 影响)、式(14)(固定支座、小变形、考虑 EI 影响)、OrcaFlex 海工软件计算结果的差异。为了方便比较，触地点张力统一为按式(22)由允许曲率半径 3.663 m 反推得到的张力 $3.663 \times 484.12 = 1773$ N。解析解计算时假定电缆悬挂点距海平面距离 D_1 为 0，OrcaFlex 计算时电缆采用船尾滚筒式入水方式，滚筒直径为 10 m(图5)。

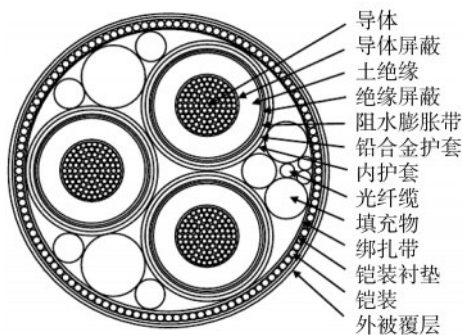


图4 海缆截面示意图

Fig.4 Schematic diagram of submarine cable cross-section

表1 电缆参数
Table 1 Cable parameters

参数	数值
外径/m	0.182 3
空气中单位长度重量/(N·m ⁻¹)	743.43
水中单位长度重量/(N·m ⁻¹)	484.12
轴向刚度EA/N	1.02×10 ⁸
弯曲刚度EI/(N·m ²)	3.2×10 ³
扭转刚度GJ/(N·m ²)	7.0×10 ³
允许曲率半径/m	3.663
许可张力/N	1.12×10 ⁵

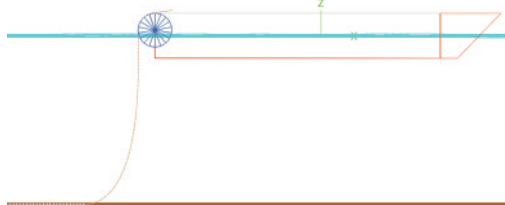


图5 OrcaFlex海缆敷设模拟

Fig.5 OrcaFlex submarine cable laying simulation

2.1 弯曲刚度影响

为了比较不同EI对电缆线形影响,分别计算了水深50 m时,弯曲刚度分别为3.2×10³、1.6×10⁴、3.2×10⁴、1.6×10⁵、3.2×10⁵ N·m²的入水角、Layback,计算结果如图6所示(固定支座边界处入水角为0,图中未标示)。

从图6中可以看出:由于计算假定的不同,计算结果有一定的差别。实际敷缆船边界更接近铰支:式(14)固支边界处入水角(曲线切线与水平夹角)恒定为0;随着EI增大,式(13)解和OrcaFlex软件计算差异在缩小,而式(14)差异在增大。小变形总体上要求索竖向挠度(水深)与水平跨度(2倍Layback)的比值要小,在50 m水深条件下无法满足这个要求,特别是在低EI时,电缆的实际

弯曲变形显著,小变形假定低估了弯曲变形影响。式(13)解析解假定支座为铰接,实际上由于电缆的弯曲刚度存在部分转动约束作用,入水角与滚筒直径也有很大关系。OrcaFlex软件能够通过迭代计算考虑几何非线性、电缆与滚筒及海床间接触与摩擦等因素影响,计算结果有更高的精度。

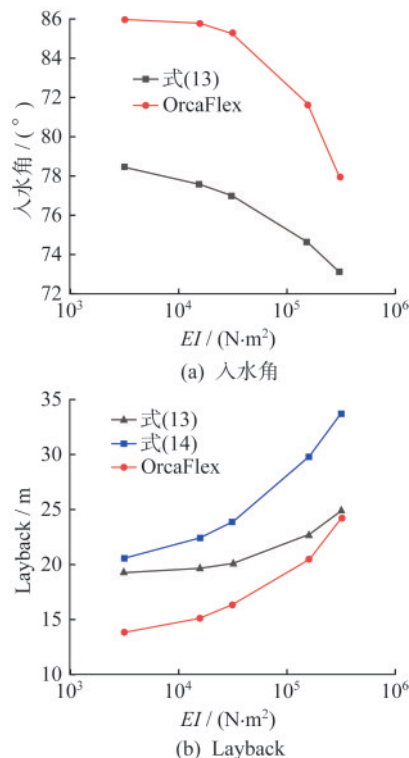


图6 EI对入水角、Layback影响

Fig.6 The impact of EI on inlet angle and Layback

在触地点张力相同的条件下,随着弯曲刚度增大,软件计算和铰支边界解析解的差异逐渐减小,且均呈现以下趋势:入水角减小,Layback增大。EI增大时,海缆整体弯曲刚度提高,导致悬垂段趋向于更平缓曲线,要更长的距离才能达到相同水深,Layback增大;同样地,高EI导致入水处电缆弯曲更平缓,入水角减小。

海缆弯曲刚度由3.2 kN·m²增加到16 kN·m²时,OrcaFlex解的入水角减小0.2°,变化较小;弯曲刚度由3.2 kN·m²增大到320 kN·m²(对应水深50 m),OrcaFlex解的入水角减小8°,随刚度增加,变化幅度加大。

2.2 海底深度影响

电缆弯曲刚度按表1取为3.2×10³ N·m²,分别计算了水深从10~50 m每隔5 m变化时入水角、Layback,计算结果如图7所示。随着水深增加,

入水角、Layback 相应增大。由于弯曲刚度的值比较小, EI 影响较小, OrcaFlex 与悬链线的结果相对比较接近; 随水深增加, 两者入水角差异减小, 水深超过 40 m 时, 两者差异小于 0.2° 。水深由 10 m 增加到 50 m, OrcaFlex 解的入水角增大 12.1° 。

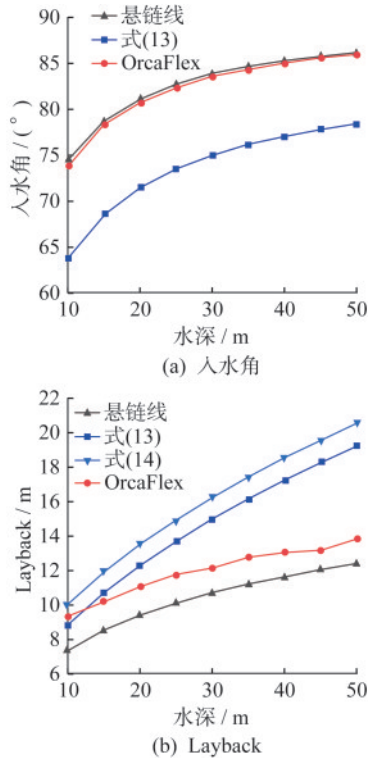


图7 水深对入水角、Layback 影响

Fig.7 The influence of water depth on inlet angle and Layback

3 海洋环境荷载下海缆张力敏感性分析

海缆敷设施工作业周期长, 环境影响因素多, 在电缆型号、敷缆船、海床地质条件确定情况下, 海缆线形和张力除了受水深影响外, 还受到风、海浪、海流等海洋环境荷载影响。风会导致船舶横荡和纵荡, 使电缆铺设路径偏离设计路径, 现今敷缆船配备了 DP 定位系统, 能够精确保持船的位置和航向, 对海缆敷设的影响基本可以忽略。因海缆敷设以接近零张力触底, 以下主要讨论海流、海浪对触底点最小张力及触底段最小曲率半径的影响。电缆参数见表 1, 水深取 50 m, 静力平衡状态下触地点张力统一为 1 773 N, 采用 OrcaFlex 软件计算。

本文采用 JONSWAP 波浪谱进行海浪动力对

比计算, 谱峰增强因子 γ 统一取 1。图 8 为有效波高 (H_s) 1.0 m、上跨平均周期 (T_z) 8 s、 γ 为 1 的 JONSWAP 谱(退化为 Pierson-Moskowitz 谱)。图 8 横轴为波浪频率 f , 纵轴为频率 f 下的能量谱密度 $S(f)$ (单位: m^2/Hz), $S(f)$ 的表达式^[14]:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi f)^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right] \quad (23)$$

式中: α 为能量尺度参数, 用于调节谱的幅值, 与有效波高 (H_s)、谱峰周期 (T_p) 相关; $f_p = 1/T_p$ 为谱峰频率; γ 为谱峰增强因子; g 为重力加速度; σ 为谱宽参数, 分两段取值: $\sigma = 0.07$ (当 $f \leq f_p$), $\sigma = 0.09$ (当 $f > f_p$)。

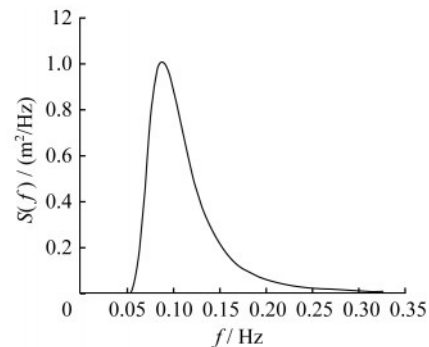


图8 JONSWAP 波浪谱

Fig.8 JONSWAP wave spectrum

通过数值积分 JONSWAP 谱, 获取不同 γ 值与 T_z/T_p 的关系, 进行参数化拟合后有如下 T_z/T_p 的近似表达式^[15]:

$$\frac{T_z}{T_p} = 0.6063 + 0.1164\gamma^{1/2} - 0.01224\gamma \quad (24)$$

如 $T_z = 8$ s、 $\gamma = 1$ 的 JONSWAP 谱, 代入上式可以得到对应的谱峰周期 $T_p = 11.26$ s。

OrcaFlex 通过位移 RAO (Response Amplitude Operator, 响应幅值算子) 或荷载 RAO 来确定船舶在波浪作用下运动响应的频域特性参数。RAO 表示单位波幅(或波高)的规则波作用下, 船舶在某一自由度(横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇)上的稳态响应幅值及相位延迟:

$$RAO(\omega) = \left| \frac{R(\omega)}{W(\omega)} \right| \cdot e^{i\phi(\omega)} \quad (25)$$

式中: ω 为波浪圆频率; $R(\omega)$ 为船舶响应幅值; $W(\omega)$ 为波浪幅值(或波高); $\phi(\omega)$ 为响应相对于波浪的相位角。

RAO 通过频域水动力分析计算得到, 在以下

的海浪影响分析中,采用OrcaFlex软件中缺省船舶Vessel type1的位移RAO,船长103 m,排水量为9 017.95 t。由傅里叶级数(截断)展开生成JONSWAP谱的海浪时程,将海浪输入传递给RAO,得到船舶的位移响应,由海缆与船舶的耦合关系,可以得到海缆时域内的动力响应。

3.1 海流方向影响

水深50 m,海流流速1 m/s,触地点最小张力和最小曲率半径随流向的变化见图9。电缆触地点最小张力和最小曲率半径随流向角度增大呈下降趋势,流向180°为最不利情况,电缆受压、最小曲率半径小于允许曲率半径。海流流向180°时,对电缆施加图2触地水平张力相同方向荷载,引起触地张力和曲率半径减小。

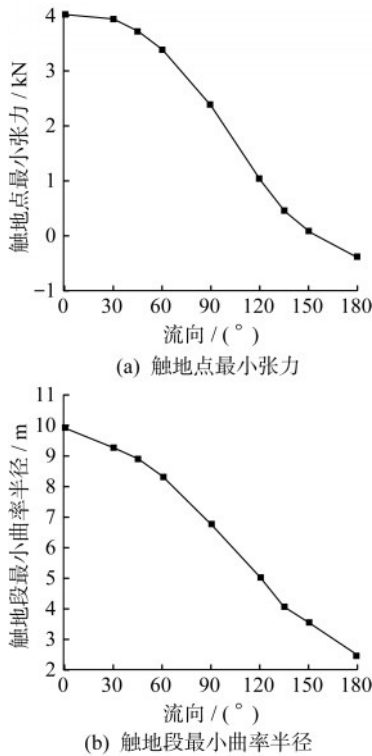


图9 最小张力和曲率半径随海流流向的变化
Fig.9 The variation of minimum tension and curvature radius with the direction of ocean currents

3.2 海浪方向影响

图10为 H_s 取1 m和1.5 m、 T_z 取8s、 γ 取1的JONSWAP波浪谱作用下,电缆触地点最小张力和最小曲率半径随波浪作用方向的变化。当波浪方向成90°时触地点最小张力和最小曲率半径最大,135°时最小。这与90°的横浪会引起船舶剧烈的

横摇(类似于跳绳时左右摆动使绳张紧),以及不同波浪作用角度横摇与纵摇的相位差有关。

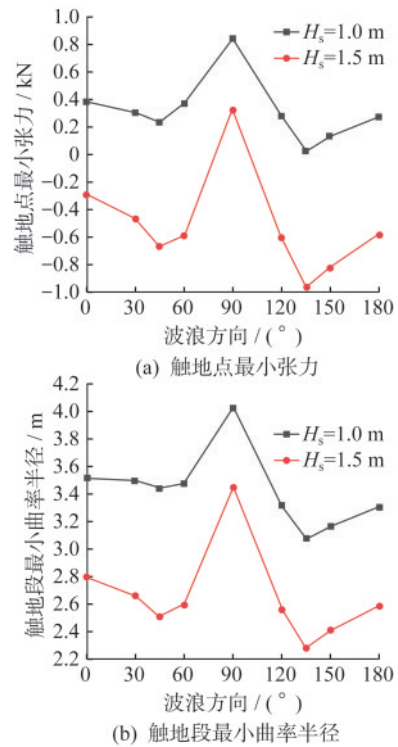


图10 最小张力和曲率半径随海浪方向的变化
Fig.10 The variation of minimum tension and curvature radius with wave direction

3.3 海浪周期影响

图11为 H_s 取1 m、波浪作用方向取0°、 γ 取1的JONSWAP波浪谱作用下,电缆触地点最小张力和曲率半径随上跨平均周期 T_z 的变化。 T_z 为7s时触地点最小张力和最小曲率半径最小,与7s对应的 T_p 为9.85 s以及船舶在周期9.85 s的纵摇RAO值位于峰值段,引起船舶纵摇响应加剧有关。

3.4 风浪流多参数耦合影响

海缆敷设通常要求在四级海况下进行^[5],按四级海况风速8 m/s以及波浪有效波高 $H_s=2$ m、 $T_z=7$ s、作用方向135°的不利情况,分别计算了不同海流条件下(流速分别为0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s以及垂直方向表层流1 m/s线性递减到底层流0.5 m/s)的海缆触地点最小张力与最小曲率半径随流向的变化规律,相关结果见图12。从图中可以看出,在多参数耦合的不利情况下,海缆触地点最小张力均为负(受压),最小曲率半径均小于允

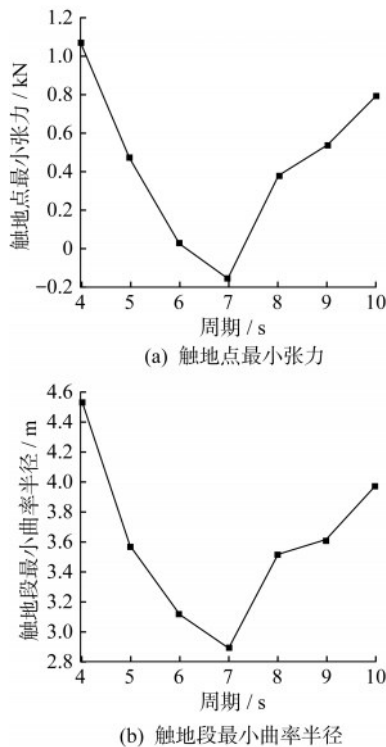


图 11 最小张力和曲率半径随海浪周期的变化
Fig.11 The variation of minimum tension and curvature radius with wave period

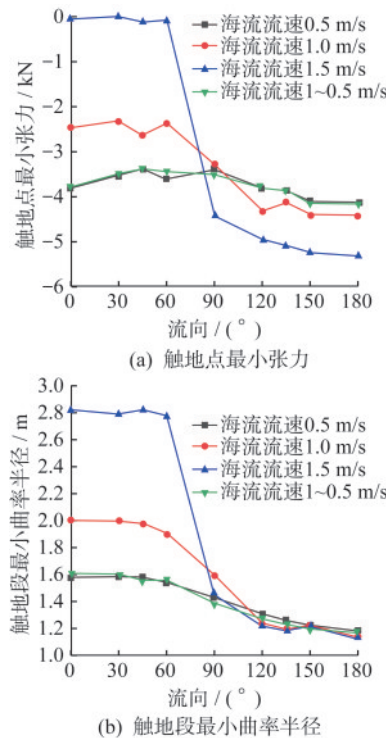


图 12 风浪流耦合下最小张力和曲率半径随海流流向的变化

Fig.12 The variation of minimum tension and curvature radius with the direction of ocean current under the coupling of wind, waves and currents

许曲率半径;海流流向 180°时张力和曲率半径最小;流速 1.5 m/s、流向 180°时触地最小张力减小的幅度达初始值 1.773 kN 的 400%。最小曲率半径在海流流向大于 90°时趋同,这与海缆在触地受压时容易绕圈相关,最小曲率半径发生在绕圈处(图 13)。

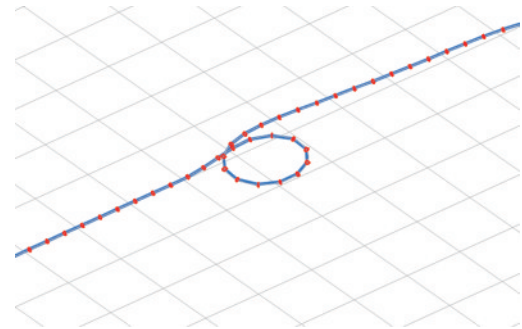


图 13 海缆在海床绕圈

Fig.13 The submarine cable coiled on the seabed

4 结 语

本文推导了承受均匀竖向荷载、考虑弯曲刚度、大变形的索静力平衡方程,以及在小变形条件下的解析解;比较了该解析解、经典悬链线解、大变形考虑弯曲刚度的数值解(采用 OrcaFlex 计算)在不同弯曲刚度、水深条件下对海缆线形的影响。计算了海流方向、海浪方向、海浪周期对海缆触地点最小张力及最小曲率半径的影响。得出以下结论:

(1) 静力荷载下,海缆弯曲刚度由 3.2 kN·m² 增大到 320 kN·m²(对应水深 50 m),施工张力控制中可观测到的入水角减小 8°;水深由 10 m 增加到 50 m(弯曲刚度保持 3.2 kN·m²),入水角增大 12.1°。在海缆单位长度重量确定情况下,应根据不同的弯曲刚度、水深设定相应的入水角观测值,以控制海缆触地张力。弯曲刚度应通过可靠的计算或实验方法得到准确值。

(2) 工程中有时需要快速估算海缆线形,在小挠度下,可采用考虑弯曲刚度、小变形的解析解;当弯曲刚度较小(<10 kN·m²)且水深较深(>40 m)时,静力计算数据(弯曲刚度为 3.2 kN·m²、水深>40 m 时悬链线与 OrcaFlex 解的入水角偏差小于 0.2°;水深 50 m,弯曲刚度由 3.2 kN·m² 增加到 16 kN·m² 时,OrcaFlex 解的入水角减小 0.2°)表明,经典悬链线解精度满足工程需求,可优先采用以提高效率。

(3) 当海流流向为 180° 且海浪周期引起船舶共振时,为最不利工况。在四级海况最不利工况下,海流流速为 1.5 m/s 、流向 180° 时触地最小张力减小的幅度达初始值 1.773 kN 的 400% 。海缆施工逆流时应降低放缆速度,并应避免在共振海况下作业。

参 考 文 献

- [1] IRVINE H M. Cable structures [M]. Cambridge: MIT Press, 1981.
- [2] 李俊. 深远海超长距离 220 kV 海底电缆先敷后埋施工关键技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(6): 841-847.
- LI Jun. Research on key technologies for laying first then burying 220 kV submarine cables in the deep sea [J]. Building Construction, 2024, 46(6): 841-847. (in Chinese)
- [3] ZHU J J, REN B, DONG P, et al. Natural vibration characteristics of short-span submarine power cables with bending stiffness and sag [J]. Marine Structures, 2023, 87: 103328.
- [4] BOUAANANI N, IGHOUBA M. A novel scheme for large deflection analysis of suspended cables made of linear or nonlinear elastic materials [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(12): 1009-1019.
- [5] 曹淑刚, 张吉, 孙小钗, 等. 考虑弯曲刚度的高压海缆敷设受力分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 3009-3016.
- CAO Shugang, ZHANG Ji, SUN Xiaoqian, et al. Force analysis of high-voltage submarine cable laying considering bending stiffness [J]. Journal of Solar Energy, 2019, 40(10): 3009-3016. (in Chinese)
- [6] 闫宏生, 刘昊天, 汪雅薇, 等. 海底电缆铺设的安装条件和敏感性[J]. 船舶工程, 2019, 41(8): 126-133.
- YAN Hongsheng, LIU Haotian, WANG Yawei, et al. Installation conditions and sensitivity of submarine cable laying [J]. Ship Engineering, 2019, 41(8): 126-133. (in Chinese)
- [7] 卢志飞, 孔令澎, 郑新龙, 等. 铺缆船与电缆耦合系统动力学分析[J]. 船舶工程, 2023, 45(7): 60-70.
- LU Zhifei, KONG Lingpeng, ZHENG Xinlong, et al. Dynamics analysis of cable laying ship and cable coupling system [J]. Ship Engineering, 2023, 45(7): 60-70. (in Chinese)
- [8] 吕方宏, 沈祖炎. 修正的循环迭代法与控制索原长法结合进行杂交空间结构施工控制[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 92-97.
- LÜ Fanghong, SHEN Zuyan. The combination of modified cyclic iteration method and control cable original length method for hybrid spatial structure construction control [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 92-97. (in Chinese)
- [9] MÉNARD F, CARTRAUD P. A computationally efficient finite element model for the analysis of the non-linear bending behaviour of a dynamic submarine power cable [J]. Marine Structures, 2023, 91: 103465.
- [10] HU H T, YAN J, SÆVIK S, et al. Nonlinear bending behavior of a multilayer copper conductor in a dynamic power cable [J]. Ocean Engineering, 2022, 250: 110831.
- [11] LI X, LIU Z J, JIANG X L, et al. RVE model development for bending analysis of three-core submarine power cables with dashpot-enhanced periodic boundary conditions [J]. Ocean Engineering, 2024, 309: 118588.
- [12] 夏峰, 陈凯, 张永明. 海底电力电缆铠装结构机械强度分析及设计[J]. 电线电缆, 2011(3): 8-11.
- XIA Feng, CHEN Kai, ZHANG Yongming. Mechanical strength analysis and design of underwater power cable armor structure [J]. Wire and Cable, 2011(3): 8-11. (in Chinese)
- [13] KNAPP R H. Torque and stress balanced design of helically armored cables [J]. Journal of Engineering for Industry, 1981, 103(1): 61-66.
- [14] EELTINK D, BRANGER H, LUNEAU C, et al. Nonlinear wave evolution with data-driven breaking [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 2343.
- [15] GODA Y. Random seas and design of maritime structures [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010.