

海上风电海底电缆敷设动态过程关键参数影响研究

徐炽濠¹, 任年鑫¹, 李俊², 罗云峰²

(1. 海南大学海洋科学与工程学院, 海口 570228; 2. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200438)

摘 要: 基于悬链线理论和集中质量法, 对比分析海缆不同敷设入水方式下的动力响应特征, 重点针对海缆敷设动态过程中的浪流方向、敷设水深、触底点距离和敷设速度等关键参数进行敏感性分析, 揭示海缆敷设各关键参数的影响机理。通过对比不同敷设方式下海缆的最大有效张力和最小弯曲半径, 阐明各种敷设方式的动力响应特征。

关键词: 海上风电; 海底电缆; 海缆敷设; 有效张力; 弯曲半径; 动态响应; 参数敏感性

中图分类号: TM614

文献标志码: A

0 引 言

海洋蕴含丰富的可再生能源, 如风能、潮汐能、波浪能等^[1], 但此类能源的大规模开发与利用急需高效的电力传输系统支撑, 在此情形下海底电缆作为重要输电方式在跨区域能源传输中发挥了核心作用^[2-3]。由于海缆在水中敷设作业期间动态分析十分重要^[4], 目前众多研究者从不同角度对海缆敷设展开受力研究。Reda 等^[5]基于 OrcaFlex 软件针对海缆敷设张力和弯曲半径进行了模拟, 指出电缆接头引起海缆故障的原因; 曹淑刚等^[6]对敷设过程中的海缆进行动力学分析, 得出弯曲刚度、敷设船运动、入水角和海床刚度对海缆运动、张力和曲率的影响特征; 李健华等^[7]联合使用 Fluent 和 OrcaFlex 软件模拟真实海况条件下的海缆冲刷过程, 通过分析海缆裸露后的应力状态变化判断海底电缆裸露后的运行安全状态; 张大鹏等^[8-9]基于集中质量法构建海缆等效有限元模型, 分析了典型工况对海缆的张力与弯曲半径影响特征; Trapper^[10]提出一种将缆绳视为连续段, 考虑缆绳与海床相互作用的数值法, 以增量迭代求解, 揭示了入水角、张力、水深和海床刚度等参数对海缆敷设的影响规律; 匡建勋等^[11]基于“启帆 9 号”敷设船工程需求, 深入探究了海缆长度、海流速度、入射波与风向等因素对海缆敷设的影响拓展; 吕超等^[12]采用机器学习模型分析了海缆敷设水深因素的影响, 运用随机森林算法确定了水深、缆长、地理坐标与张力等关键参数的权重; 卢青针等^[13]聚焦 S 形敷设脐带缆与舷外溜槽接触力问题, 揭示了海缆的应力集中现象; 胡金鹏等^[14]选取珠海市万山海域的真实海况进行了波浪能升压站的海缆初始敷设

过程模拟, 指出电缆敷设过程需着重考虑环境载荷对张力和曲率的影响。

综上, 现有研究大都重点针对某一特定海缆入水方式开展数值模拟分析, 缺少不同海缆入水方式下关键敷设参数的对比研究。因此, 本文基于悬链线理论和集中质量法, 对比分析海缆不同敷设入水方式下动力响应特征, 重点针对海缆敷设动态过程中的浪流方向、敷设水深、触底点距离和敷设速度等关键参数进行敏感性分析, 最后通过海缆的最大有效张力和最小弯曲半径揭示出不同入水方式敷设海缆的主要力学特征。

1 理论基础及方法

1.1 悬链线理论

在海缆敷设过程中海缆敷设船在平静海面上以一定的速度敷设海缆, 从敷设船放线点至海底触地点之间的海缆可视为悬链线, 如图 1 所示。

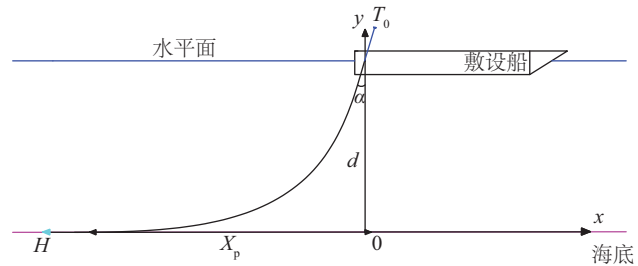


图 1 悬链线线型图

Fig. 1 Catenary line diagram

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(52368069; 52161041); 海南省重点研发计划(SQ2025SHFZ0141)

通信作者: 任年鑫(1983—), 男, 博士、教授, 主要从事海洋可再生能源利用方面的研究。rennianxin@hainanu.edu.cn

海缆敷设的悬链线模型可表示为:

$$y = c \cosh \frac{x}{c} \quad (1)$$

$$c = \frac{H}{W} \quad (2)$$

$$W = 1.08W_a - \pi r^2 \times 1000 \quad (3)$$

式中: c ——悬链线系数, m; H ——海缆落地端的张力, kN; W ——海缆在水中的重量, kN/m; W_a ——海缆在空气中的重量, kN/m; r ——海缆半径, m。

海缆离船点张力及海缆落地端的张力为:

$$T_0 = Wd + H \quad (4)$$

$$H = T_0 \sin \alpha \quad (5)$$

$$T_0 = \frac{Wd}{1 - \sin \alpha} \quad (6)$$

海缆触底点水平距离为:

$$x_p = \frac{H}{W} \operatorname{arcosh} \left(1 + \frac{W}{H} d \right) \quad (7)$$

最小弯曲半径为:

$$R = \frac{H}{W} \quad (8)$$

不同海况下最小弯曲半径变化率为:

$$\beta = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}} \quad (9)$$

式中: T_0 ——海缆离船点张力, kN; d ——曲线顶点到横坐标轴的距离, m; α ——海缆入水角, ($^\circ$); x_p ——悬链线落地点距船尾的水平距离, m; R ——最小弯曲半径, m; β ——弯曲半径变化率, %。

1.2 集中质量法

段与段之间通过有质量的节点连接, 段不具质量且视之为刚体或弹性体。常用单元模型如图 2, 表达式为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (10)$$

式中: M ——节点质量矩阵; C ——节点处阻尼系数矩阵; K ——刚度矩阵; F —— t 时刻所受外力, kN; t ——时间, s。

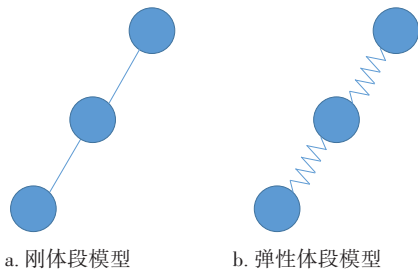


图 2 集中质量法常用单元模型

Fig. 2 Common unit model of lumped mass method

2 数值模型

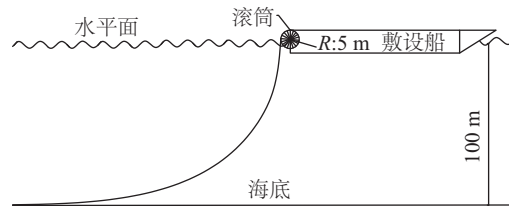
借助 OrcaFlex 软件, 分别选取并构建 3 种具有代表性的海缆入水方式(滚筒式、入水桥式和托管架式)的数值模型

(如图 3), 相关海缆敷设船和海缆的主要参数详细如表 1 所示。

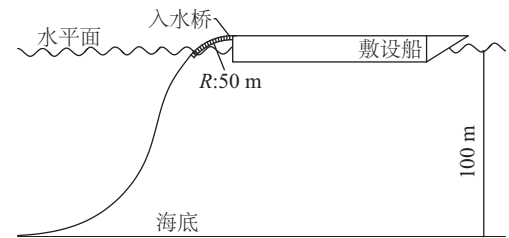
表 1 模型主要设计参数

Table 1 Main design parameters of model

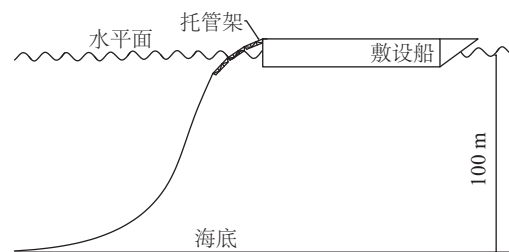
类别	参数	数值
敷设船	尺寸/m	103(长)×16(宽), 吃水 6.6
	排水量/t	9017
海缆	直径/m	0.262
	空气中质量/(kg/m)	131
	许可张力值/kN	295
	许可弯曲半径/m	3.975
	摩擦系数	0.5



a. 滚筒式



b. 入水桥式



c. 托管架式

图 3 不同入水方式模型

Fig. 3 Models of different water entry modes

3 模拟结果与分析

3.1 典型海况下海缆敷设动态响应分析

结合 500 kV 海南联网工程, 对典型工况下不同入水方式敷设海缆进行模拟分析, 此工程经过琼州海峡, 起于广东省湛江市港城变电站, 止于海南省澄迈县。海域施工作业波高

为 1~2 m, 施工窗口期是水流速度 0.5 m/s、风速 10 m/s^[15]。选取的环境载荷和敷设速度如表 2 所示, 敷设水深为 100 m。

表 2 环境载荷与敷设速度参数

Table 2 Environmental load and laying speed parameters

类别	数值	方向/(°)
波浪 JONSWAP	$H_s=1\sim 2\text{ m}; T_p=4\sim 8\text{ s}$	180
流速/(m/s)	0.5	180
风速/(m/s)	10	180
敷设船速度/(m/s)	0.2	0
放缆速度/(m/s)	0.2	180

以有义波高 1 m、谱峰周期(4~8 s)为例, 在不同波浪周期下对不同入水方式敷设海缆进行动态分析。图 4 为有效张力和弯曲半径沿缆长分布图。由图 4 可知, 海缆的最大有效张力和最小弯曲半径都出现在离船点, 可根据式(4)和式(8)得到最大有效张力(T_0)和最小弯曲半径(R)。由图 5a 可看出, 不同入水方式敷设海缆的 T_0 随周期的增大而增大。在同一波浪周期下, 周期为 4 s 时, 滚筒式敷设海缆的 T_0 最大, 托管架式最小; 周期为 6 s 和 8 s 时, 托管架式敷设海缆的 T_0 最大, 滚筒式最小。滚筒式敷设海缆的 T_0 最大变化率为 5.22%; 入水桥式敷设海缆的 T_0 最大变化率为 43.00%; 托管架式敷设海缆的 T_0 最大变化率为 165.45%, 可见滚筒入水方式敷设海缆的 T_0 对周期最不敏感。由图 5b 可看出, 入水桥式和托管架式敷设海缆的 R 都随波浪周期的增大而增大, 滚筒式敷设海缆的 R 不受波浪周期的影响。同一波浪载荷下滚筒的 R 均为最小, 入水桥最大。根据式(9), 滚筒式敷设海缆的 R 最大变化率为 0%; 入水桥式敷设海缆的 R 最大变化率为 16.57%; 托管架式敷设海缆的 R 最大变化率为 26.90%, 可见滚筒入水方式敷设海缆的 R 对周期最不敏感。因此, 针对不同波浪载荷的环境下敷设海缆入水方式建议选取滚筒式。

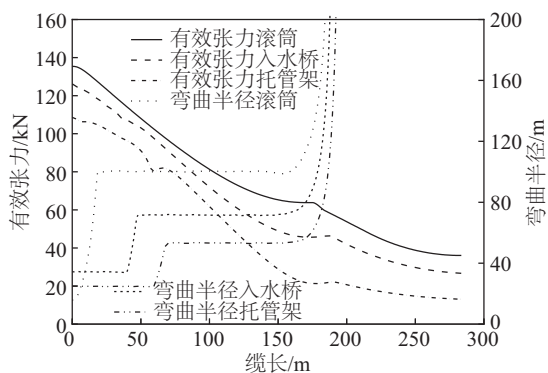
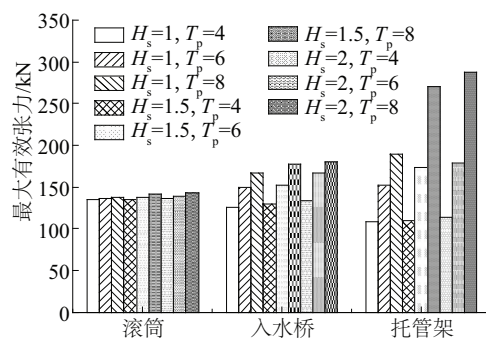
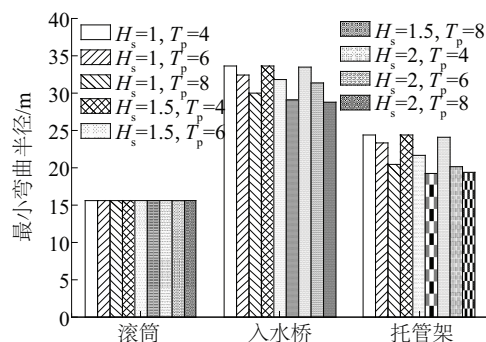


图 4 不同入水方式敷设海缆有效张力和弯曲半径的分布

Fig. 4 Distribution of effective tension and bending radius of submarine cable laying in different water entry modes



a. 最大有效张力



b. 最小弯曲半径

图 5 不同入水方式敷设海缆最大有效张力和最小弯曲半径数值对比

Fig. 5 Comparison of maximum effective tension and minimum bending radius of submarine cable laying in different water entry modes

3.2 影响海缆张力关键参数敏感性分析

敷设环境参数的变化在海缆敷设过程中会对海缆的主要力学特征造成影响, 由于海缆的有效张力 T_0 过大和最小弯曲半径 R 过小都会造成海缆损坏, 其中 T_0 和最小弯曲半径变化率 β 是衡量参数敏感度的主要标准。选取不规则波 ($H_s=2\text{ m}, T_p=8\text{ s}, \lambda=3.3$) 下对敷设过程中风浪流方向、海缆的敷设水深、海缆触底点水平距离 (x_p) 和敷设速度对海缆的最大有效张力进行参数敏感性分析。

3.2.1 风-浪-流载荷作用方向对海缆张力的影响

代表性风、波浪和海流载荷同向 ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) 作用下对不同入水方式敷设海缆的力学特征进行研究, 水深为 100 m, 敷设船速度与放缆速度一致为 0.2 m/s、方向 0° 。由图 6 所示, 在 90° 方向环境载荷作用下不同入水方式敷设海缆 T_0 和 R 出现转折, 滚筒式和入水桥式 T_0 在 180° 最小、 R 在 180° 最大, 托管架式 T_0 在 90° 最小、 R 在 90° 最大。在不同方向载荷作用下滚筒式 T_0 (142.60 kN) 和最小弯曲半径变化率 β 都为最小 (7.33%), 所以在不同方向的环境载荷下敷设海缆, 入水方式建议选取滚筒式。

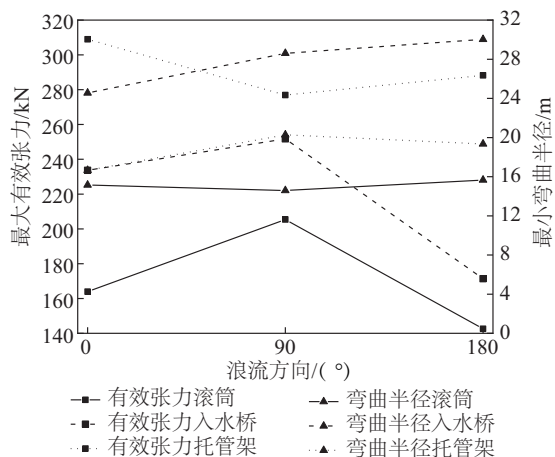


图6 风-浪-流方向对不同入水方式敷设海缆的影响

Fig. 6 Influence of wind-wave-current direction on laying submarine cables with different water entry modes

3.2.2 不同敷设水深对海缆张力的影响

琼州海峡的最大水深约 100 m^[16],为更好地面向深远海上风电电缆敷设的需求,本节选取代表性的敷设水深分别为 100、150、200 m。由图 7 所示,不同入水方式的 R 随水深的增加逐渐降低,降幅各不相同,其中入水桥式敷设海缆 β 最小(7.92%),滚筒式敷设海缆 β 最大(18.35%)。不同入水方式 T_0 随水深的增加而增大,滚筒式增幅大于入水桥式,当水深为 100、150 m 时,滚筒式 T_0 最小;当水深为 200 m 时,入水桥式 T_0 最小。由于滚筒式和入水桥式 T_0 差异影响低于二者 β 的影响,所以对于大水深电缆敷设时,入水方式建议采取入水桥式。

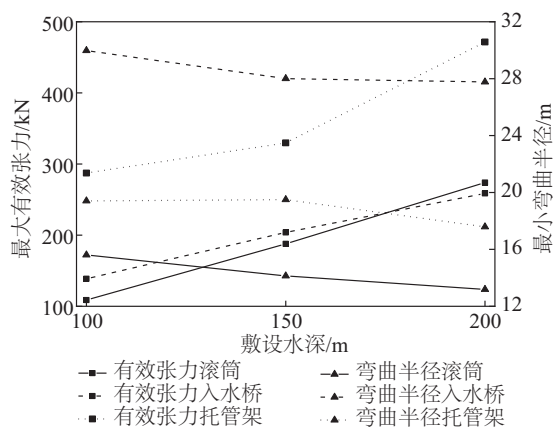


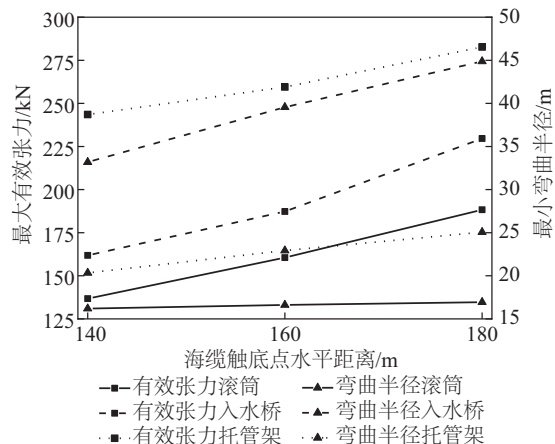
图7 水深对不同入水方式敷设海缆影响

Fig. 7 Influence of water depth on laying submarine cables in different water entry modes

3.2.3 海缆触底点水平距离对海缆张力的影响

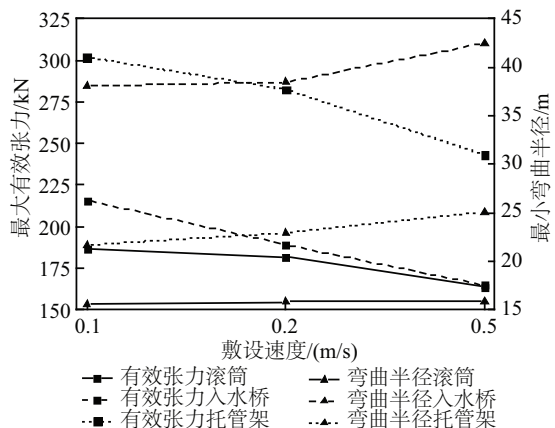
选取代表性海缆敷设落地点距船尾的水平距离: x_p (140、160、180 m),进一步研究不同海缆敷设方式下 x_p 对其主要动力响应参数的影响,水深为 100 m,如图 8 所示。由图 8 可知,不同入水方式 T_0 和 R 随 x_p 的增加逐渐增大, T_0 最小为滚

筒式(188.32 kN),最大为托管架式(282.71 kN); β 最小为滚筒式(4.57%),最大为入水桥式(35.23%)。因此,在不同 x_p 下敷设海缆,入水方式建议选取滚筒式, x_p 尽量取小值为宜。

图8 x_p 对不同入水方式敷设海缆影响Fig. 8 Influence of x_p on laying submarine cable in different water entry modes

3.2.4 不同敷设速度对海缆张力的影响

进一步深入研究敷设速度对海缆敷设动力响应特征的影响,敷设水深为 100 m,主要结果如图 9 所示。从图 9a 可看出,在敷设船航行速度与放缆速度一致时,随着速度的增大不同入水方式 T_0 逐渐减小, R 逐渐增大。在不同敷设速度下滚筒式 T_0 (163.76 kN) 和 β (2.06%) 都最小。由于在海缆敷设过程中敷设船受到环境载荷的影响无法保持理想化匀速,为了研究敷设船速度变化对海缆 T_0 和 R 的影响,进行敷设船航速与放缆速度差异对比研究。由图 9b 可知,当敷设船航速大于放缆速度 10% 时,不同入水方式敷设海缆的 T_0 和 R 都显著增加,此时 T_0 远大于二者速度一致时的 T_0 (增幅近 1 倍);当放缆速度大于敷设船速度 10% 时,不同入水方式敷设海缆的 T_0 和 R 都小于二者同速的 T_0 与 R 。因此,在进行海缆敷设时,建议尽量控制船速不超过放缆速度,以确保电缆的受力安全。



a. 相对速度一致

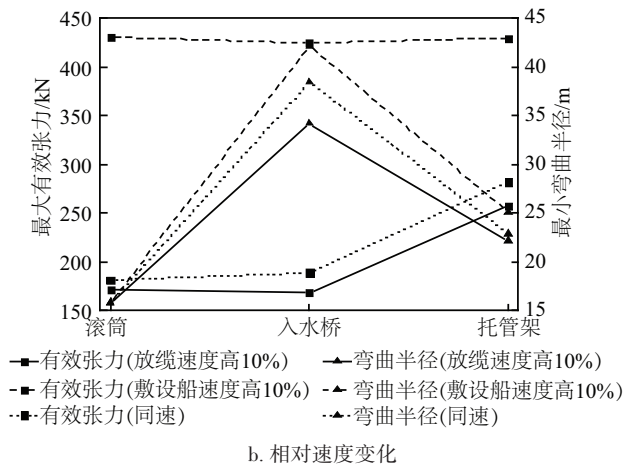


图9 不同敷设速度对不同入水方式敷设海缆影响

Fig. 9 Influence of laying speed on laying submarine cable in different water entry modes

4 结 论

在复杂海况下,为进一步优化海缆敷设方案,本文对海缆不同入水方式进行了典型海况的动态分析及多参数的敏感性分析,通过对比海缆的最大有效张力和最小弯曲半径变化率,得到主要结论如下:

1)在波浪载荷作用下,采用滚筒入水方式敷设海缆的最大有效张力(T_0)和最小弯曲半径变化率(β)对波高和周期最不敏感。在考虑不同环境载荷作用方向时,滚筒式敷设 T_0 和 β 最小,并在 90° 方向下 T_0 达到峰值。在不同 x_p 方面,不同入水方式敷设海缆 T_0 和 R 随 x_p 的增加逐渐增大,但滚筒式 T_0 和 β 均为最小。因此,建议选取滚筒式敷设方式。

2)在不同敷设水深时,随水深的增加不同入水方式敷设海缆的 T_0 和 R 分别对应增大和减小,当水深100、150 m时,滚筒式 T_0 最小;当水深200 m时入水桥式 T_0 最小。由于滚筒式和入水桥式 T_0 差异不大,而入水桥式 β 比滚筒式小10.43%,所以大水深时建议采用入水桥式敷设。

3)当敷设船航速与放缆速度一致时,随着速度的增大不同入水方式敷设海缆的 T_0 逐渐减小, R 逐渐增大,在不同的敷设速度下滚筒式 T_0 和 β 都为最小,入水方式建议选取滚筒式。敷设船航速大于放缆速度会显著增加海缆的 T_0 和 R ,反之,海缆的 T_0 和 R 会有所降低,因此建议尽量控制船速不超过放缆速度,以确保电缆的受力安全。

[参考文献]

[1] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 26-30.
WANG Y S. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide [J]. Southern power system

technology, 2012, 6(2): 26-30.
[2] 黄小卫, 李晓骏, 左干清. 国内外海底电缆工程现状及展望[J]. 电线电缆, 2023, 66(1): 1-6.
HUANG X W, LI X J, ZUO G Q. Application status and prospect of submarine cable projects at home and abroad [J]. Electric wire & cable, 2023, 66(1): 1-6.
[3] TAORMINA B, BALD J, WANT A, et al. A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 96: 380-391.
[4] SHEN J Y, LIANG Y J, HONG H B, et al. Numerical investigation of burial depth effects on tension of submarine power cables [J]. Journal of marine science and engineering, 2024, 12(11): 1972-1972.
[5] REDA A M, AL-YAFEI A M S, HOWARD I M, et al. Simulated in-line deployment of offshore rigid field joint: a testing concept [J]. Ocean engineering, 2016, 112: 153-172.
[6] 曹淑刚, 张吉, 孙小钎, 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 S G, ZHANG J, SUN X Q, et al. Tension analysis of high voltage submarine cable laying considering bending stiffness [J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(10): 3009-3016.
[7] 李健华, 黄亚珏, 李争霖, 等. 基于 Fluent-OrcaFlex 联合数值模型的海上风电场海底电缆冲刷及应力状态研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 574-579.
LI J H, HUANG Y J, LI Z L, et al. Research on scouring and stress state of submarine cable in offshore wind farm based on Fluent-OrcaFlex joint numerical model [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(10): 574-579.
[8] ZHANG D P, BAI Y, ZHAO W Q, et al. Dynamic analysis of submarine cable during the process of laying back to the seabed [J]. Ships and offshore structures, 2020, 15(2): 153-161.
[9] ZHANG D P, ZHAO B W, ZHU K Q, et al. Dynamic analysis of towed cable with variable length during turning maneuvers [J]. Scientific reports, 2023, 13: 3525.
[10] TRAPPER P A. Feasible numerical method for analysis of offshore pipeline in installation [J]. Applied ocean research, 2019, 88: 48-62.
[11] KUANG J X, CHEN G D, YUAN Z L, et al. Dynamic interactions of a cable-laying vessel with a submarine cable during its landing process [J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(6): 774.
[12] LYU C, ZHOU X Q, LIU S. Analysis of weighted factors

- influencing submarine cable laying depth using random forest method [J]. Applied sciences, 2024, 14 (18): 8364-8364.
- [13] LU Q Z, FAN Y M, SU Q, et al. Study on contact force between umbilical and overboarding chute in deepwater S-lay process[J]. Ocean engineering, 2024, 302: 117693.
- [14] HU J P, LI Z L, ZHANG Y Q. Numerical study on initial laying process of submarine cables for wave energy booster station in real sea states [J]. Journal of coastal research, 2020, 99(S1): 60-66.
- [15] 吴庆华, 马凌, 岳浩, 等. 500 kV 海南联网工程海底电缆线路设计[J]. 上海电气技术, 2021, 14(3): 5-9, 43.
- WU Q H, MA L, YUE H, et al. Design of submarine cable line of 500 kV Hainan power link project[J]. Journal of Shanghai electric technology, 2021, 14(3): 5-9, 43.
- [16] 邓卫红, 刘凡. 多波束系统在 500 kV 福港线海底电缆路由地形变化分析中的应用[J]. 南方能源建设, 2019, 6 (增刊1): 119-123.
- DENG W H, LIU F. Application of multibeam system in the analysis of the terrain change of the 500 kV Fugang high-voltage submarine cable [J]. Southern energy construction, 2019, 6(S1): 119-123.

RESEARCH ON INFLUENCE OF KEY PARAMETERS OF DYNAMIC PROCESS OF SUBMARINE CABLE LAYING FOR OFFSHORE WIND POWER

Xu Chihao¹, Ren Nianxin¹, Li Jun², Luo Yunfeng²

(1. School of Marine Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

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

Abstract: Based on the catenary theory and the lumped mass method, a comparative analysis of the dynamic response characteristics of submarine cables under diverse laying modes is carried out. Special attention is given to the sensitivity analysis of pivotal parameters, including wave direction, laying depth, touchdown point distance, and laying speed during the dynamic laying process of submarine cables. Thereby, the influence mechanism of each key parameter in submarine cable laying is unveiled. By contrasting the maximum effective tension and minimum bending radius of submarine cables under different laying methods, the dynamic response traits of various laying methods are elaborated.

Keywords: offshore wind power; submarine cable; electric cable laying; effective tension; bending radius; dynamic response; parameter sensitivity