

海底电缆铺设过程中受力特性数值模拟研究

许海波^{1,2}, 沙欣宇^{1,2}, 张震宇^{1,2}, 库猛³

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江华东工程咨询有限公司, 浙江 杭州 311122;
3. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: [目的]以江苏启东某海上风电场建设项目为工程背景,开展海底电缆铺设过程中的力学特性数值模拟研究,分析不同挖沟深度的工况下海缆悬跨段的局部应力分布情况。[方法]基于ABAQUS数值模拟软件,建立海底电缆铺设数值模型。[结果]研究结果显示:海底电缆后缘提升点在埋设过程中的应力相较于埋设作业前显著增大,该位置的缆线在整个埋设过程中受力最大,是最危险的位置;挖沟深度对海底电缆后缘提升点处的应力有显著影响,随着挖沟深度的增加,后缘提升点处的应力相应增大。[结论]海底电缆铺设作业中应加强保护抬升点处的缆线材料,缆线的屈服应力参数选取应着重参考埋设作业中缆线的受力分析结果。研究成果可为海底电缆铺设作业提供参考依据。
关键词: 海底电缆; 应力分析; 挖沟深度; ABAQUS; 数值模拟

中图分类号: TK89; P756.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0118-06

开放科学(资源服务)二维码:



Numerical Simulation Study on Mechanical Characteristics of Submarine Cable During Laying Process

XU Haibo^{1,2}, SHA Xinyu^{1,2}, ZHANG Zhenyu^{1,2}, KU Meng³

(1. Hydro-China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, Zhejiang, China;
2. Zhejiang East China Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 311122, Zhejiang, China;
3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

Abstract: [Introduction] Based on an offshore wind farm construction project in Qidong, Jiangsu Province, the numerical simulation study on mechanical characteristics of submarine cable during laying process was carried out and the local stress distribution of the suspension span of submarine cables under different trenching depths was analyzed. [Method] A numerical model of submarine cable laying based on ABAQUS numerical simulation software was established. [Result] Results show that the stress of the lifting point at the trailing edge of the submarine cable increases significantly during the burial process compared with that before the burial operation. This is the most dangerous position as the cable at this position has the largest stress during the whole burial process. The trenching depth has a significant effect on the stress at the lifting point at the trailing edge of the cable. With the increase of the trenching depth, the stress at the lifting point at the trailing edge increases correspondingly. [Conclusion] The selection of cable material at the lifting point should be protected in the cable laying operation, and the yield stress parameters of the cable should be mainly based on the stress analysis results of the cable in the burial operation. The research results can provide a reference for submarine cable laying operation.

Key words: submarine cable; stress analysis; trenching depth; ABAQUS; numerical simulation

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-09-01 修回日期: 2021-12-11

基金项目: 浙江省联合基金重点项目(LHZ22E090002);中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技项目“近海长距离 220 kV 海缆敷设及穿堤关键技术研究”(KY2020-ZX-13)

随着国家海洋战略的提出, 海洋风电项目建设如火如荼, 在海洋风电场建设的过程中, 海底电缆铺设环节至关重要, 因此海缆铺设逐渐成为海洋风电研究领域的重要课题^[1-3]。为了应对海洋环境的复杂性, 海底电缆需要埋设于海床之下, 以避免抛锚及拖网等海上作业对海底电缆造成损坏^[4-5]。海底电缆需要依赖于埋设机进行铺设, 埋设机首先通过机械手将海缆提升至一定高度, 随后利用挖沟设备进行海床的开挖, 最后进行海缆的放置与埋设。缆线受到机械手向上抬升之后, 会形成一个悬跨段, 这就导致缆线出现较大的挠曲和变形, 引起局部应力的增加, 进而可能造成海底电缆的损伤^[6-7]。许多学者针对埋设机挖沟埋设过程中造成的悬跨问题开展研究, 如刘可安^[4]、李修波^[8]、和刘志伟^[9]等分别通过理论研究、仿真模拟等研究方法, 对海底电缆的埋设受力进行研究。研究表明, 海底电缆在埋设过程中的屈曲程度受到挖沟深度的影响非常显著^[8-11]。

本文以江苏启东市某海上风电场建设项目为工程背景, 通过 ABAQUS 软件, 建立海底电缆铺设模型, 模拟海缆从缆线抬升至沟槽放置作业的全过程, 分析海缆在铺设作业中的应力变化规律。

1 工程概况

江苏启东市某海上风电场建设场地离岸距离约 32 km, 海上风电场区位置如图 1 所示。

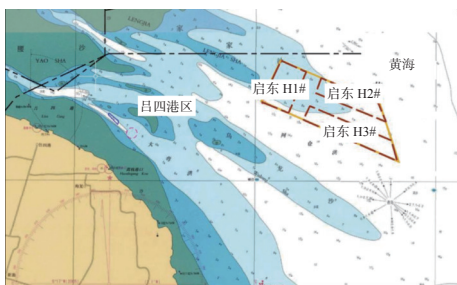


图 1 江苏启东某海上风电场

Fig. 1 An offshore wind farm in Qidong, Jiangsu province

海上风电场场区面积约 40 km², 装机容量 250 MW。场区海底地形变化较为平缓, 水深在 6 ~ 13 m 之间。场区内海底地形变化较为平缓, 属南黄海滨海相沉积地貌单元, 地基土表层以粉砂为主。

海底电缆的铺设采用 HLA-4 型海缆埋设机(如图 2 所示)。海缆在铺设的过程中要受到多种外力

的作用, 而影响海缆铺设受力的重要因素就是缆线的铺设速度。根据相关研究以及工程实践成果, 海缆若要避免张拉性破坏, 埋设速度应尽可能控制在 12 m/min 以下, 且匀速前进。当海洋作业船牵引埋设机行进时, 被动牵引力主要由埋设机雪橇以及犁体与海床土质的摩擦力、高压射水水流正面阻力组成。经过多个工程案例试验表明, 在一般软土地质以及砂层条件下, 牵引力约 120 kN。随着埋设机被牵引前进, 埋设机上的犁体装置插入土体, 进行海床土体的开挖。开挖深度可以通过变幅犁体调整, 一般的变幅犁体可开挖的深度为 0 ~ 4.2 m。埋设机的前进速度受牵引船的控制, 通常可在 0 ~ 20 m/min 的范围内调节。



图 2 HLA-4 型海缆埋设机

Fig. 2 HLA-4 submarine cable burying machine

2 海缆敷设数值模拟

海底电缆在铺设的过程中, 需要通过机械手将预先放置于海底的缆线进行抬升, 这会导致缆线形成一个悬跨段, 如图 3(a) 所示。缆线的悬跨段一直存在于铺设的过程中, 包括缆线的挖沟放置阶段, 如图 3(b) 所示。

在本文的研究中, 海底电缆是均匀连续的材料, 并且忽略上覆土对海底电缆的压力作用^[12-13]。海底电缆密度 $\rho=2\ 230\ \text{kg/m}^3$, 泊松比 $\nu=0.3$, 由于海缆内部结构复杂, 本文参考内部较为重要的铜芯导体材料的弹性模量值选取等效弹性模量^[14-15], $E=120\ \text{GPa}$, 海底电缆采用弹塑性模型; 海底电缆截面是直径 D 为 252 mm 的圆形, 如图 4 所示。海床土体密度 $\rho=1\ 800\ \text{kg/m}^3$, 泊松比为 $\nu=0.45$, 弹性模量 $E=120\ \text{GPa}$, 海底土体采用弹性模型。建立海底电缆在挖沟机作业时的数值模型, 如图 4 所示。

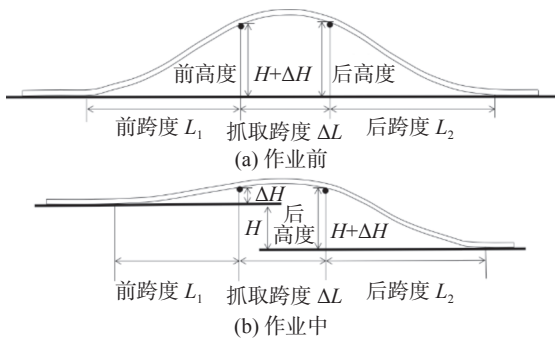


图 3 作业前和作业中海底电缆悬跨示意^[6]

Fig. 3 Schematic diagram of submarine cable suspension before and during operation^[6]

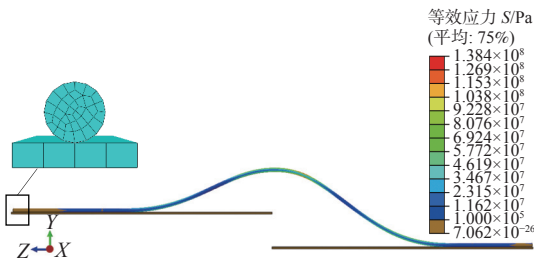


图 4 挖沟机作业时海底电缆数值模型

Fig. 4 Submarine cable numerical model in trench digger operation

模型中海底电缆右端固定, 假定右端为埋设段, 左端为自由端, 无约束; 土体完全固定。整个模型采用三维八节点减缩积分六面体单元(C3D8R)网格进行划分, 海底电缆网格尺寸为 0.05 m×0.05 m, 土体网格尺寸为 0.125 m×0.125 m(见图 4); 对电缆网格尺寸 0.4 m、0.5 m 和 0.6 m 进行网格收敛性验证, 网格尺寸对数值模拟结果几乎没有影响。网格属性设定为结构, 以保证网格质量和运算精度, 整个模型共划分网格数为 72 400。在运行海底电缆铺设的数值模型时, 首先需要对模型进行地应力平衡; 其次对缆线前后抬升点赋予相应的位移, 并通过位移时长来控制缆线抬升的速度; 最后, 通过海床土体部分的下移来模拟土体开挖, 并将缆线自然下垂, 模拟土体开挖以及缆线放置。通过模拟缆线抬升与放置的全过程, 分析海缆铺设作业的受力状态, 开展海缆作业中的力学研究。

3 作业前数值模拟分析

在进行海缆的埋设施工时, 机械臂需要通过两

个抬升点将缆线提前抬升至一定的高度, 导致海缆前后抬升点之间呈现向上的凸曲状, 如图 5 所示。机械臂将海底电缆抬升后, 海缆的凸曲变形会导致缆线材料受力增大, 所以需要分析海底电缆所能承受机械臂的最大抬升高度, 以及海缆在受到抬升后的应力特征, 以保证海底电缆在铺设过程中的安全。

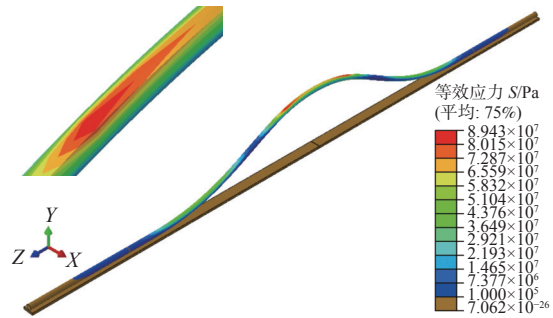


图 5 机械手抬升引起海底电缆悬跨示意图

Fig. 5 Schematic diagram of submarine cable suspension caused by lifting of manipulator

图 6 表示海底电缆受到机械手抬升后, 缆线全跨度的应力分布图。电缆整体长度为 150 m, 抓取跨度为 18 m, 提升高度 2.2 m, 挖沟机位于电缆的中间位置(75 m 处)。图 6 中对比了考虑水的浮力作用与无浮力作用下电缆的应力分布曲线图, 图中显示两者应力分布特征一致。从图中可以看出, 缆线的提升跨度段(A~C 点)应力最大, 其中前后提升点(A 和 C 点)受到局部最大的集中应力, 提升跨度段中点位置(B 点)应力较小。此外, 提升跨度两端也出现了应力较大的悬跨段。

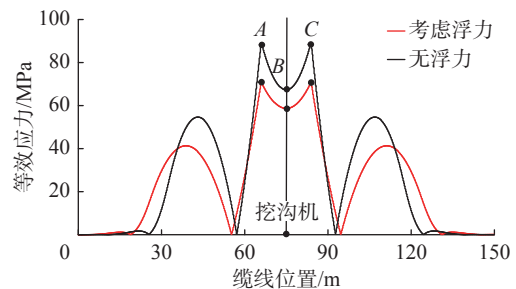


图 6 作业前海底电缆悬跨受力分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of submarine cable suspension span stress distribution before operation

对缆线提升后的应力分布来看, 缆线局部较大的应力主要集中在海底电缆抬升点(A 和 C 点), 该位置受到较大的集中应力, 可能造成缆线材料的损伤。因此, 在海底电缆铺设作业中, 应对提升点位置

处的缆线实施相应的保护措施。

4 作业中数值模拟分析

海底电缆在抬升之后, 需要使用挖沟机开挖下方的海床土体, 以便对缆线进行埋设。在埋设的过程中, 海底电缆的后抬升点出现了应力集中。海缆的应力分布情况如图 7 所示。在图 7 的数值模型中, 海缆埋设的挖沟深度为 1 m, 海缆前后提升点距离为 18 m, 机械臂对海缆的抬升高度为 2.2 m。

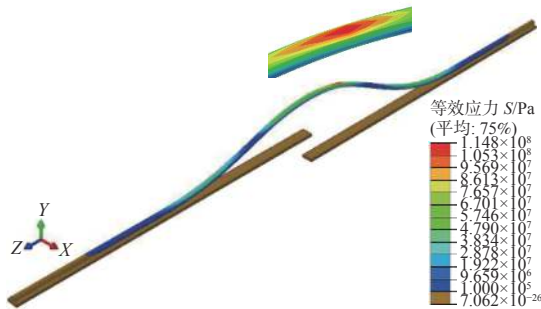


图 7 埋设过程中海底电缆应力分布云图

Fig. 7 Diagram of stress distribution of submarine cable during burial

海底电缆埋设过程缆线的应力分布如图 8 所示。相比于缆线抬升阶段的应力分布情况(图 6), 海底电缆埋设过程中的缆线主要由后抬升点(图 8 点 C)支撑。相应地 C 点在埋设作业中相比于埋设作业前的应力显著增大, 埋设作业前 C 点应力为 89 MPa, 埋设作业中 C 点应力增大到 114 MPa。这种埋设作业造成的后缘提升点应力增大的情况可能使缆线发生塑性破坏。

在不同挖沟深度 H 的工况下, 海底电缆数值模拟的分析情况如图 9 所示。图 9 中分别选取挖沟深度为 1 m, 2 m, 3 m 的工况进行数值分析。

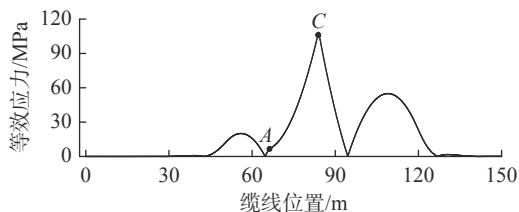
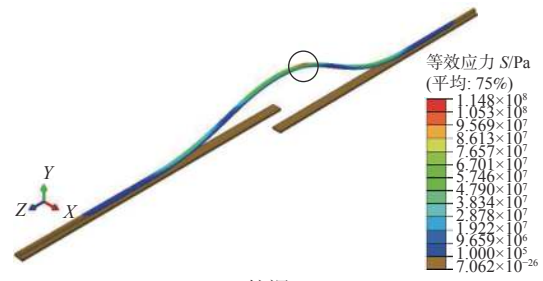
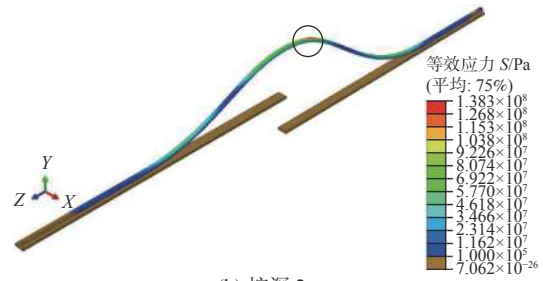


图 8 作业中海底电缆应力分布图

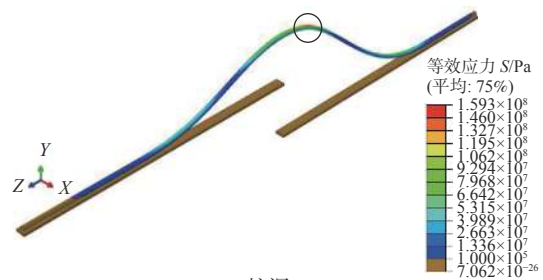
Fig. 8 Diagram of stress distribution of submarine cable during operation



(a) 挖深 1 m



(b) 挖深 2 m



(c) 挖深 3 m

图 9 不同挖沟深度下海底电缆应力分布云图

Fig. 9 Diagram of stress distribution of submarine cable at different trenching depths

从图 9 中可以看出, 随着挖沟深度 H 的增加, 海缆悬跨段局部最大应力(图 9 黑色圆圈标识, 图 8 点 C)变化非常明显。挖深 1 m 时局部最大应力为 114 MPa, 挖深 2 m 时, 局部最大应力增大到 138.3 MPa, 挖深 3 m 时局部最大应力为 159.3 MPa。相比于挖深 1 m 的工况, 挖深 3 m 的局部最大应力增大了约 39.7%, 相比于作业前海床未开挖时海底电缆的局部最大应力 89 MPa, 海缆埋设作业中 C 点的应力增大了 79%, 受力显著增大。

因此, 海底电缆在铺设的过程中首先应在合理的范围内尽量降低埋设深度, 其次海底电缆的屈服强度参数的设计应着重参考缆线埋设作业中的受力分析结果, 尽量避免作业中缆线受力过大而导致的材料损伤。

5 结论

本文采用 ABQUS 数值模拟方法,以江苏启东某海上风电场项目为工程背景,开展了海缆在埋设过程中的受力分析,得到以下研究结论:

1)海底电缆受到抬升形成悬跨段,抬升点处出现应力集中的情况,海缆埋设作业过程中,后缘抬升点的应力显著增大。因此,在铺设作业中应在海底电缆的抬升点处,尤其是海底电缆埋设阶段,加强对抬升点位置材料的保护。

2)挖沟深度 H 主要影响海底电缆的后缘提升点应力,对于本文工况当挖沟深度从 1 m 增大到 3 m 时,缆线后缘提升点处的应力增大了 39.7%。因此,海底电缆埋设深度应在合理的范围内尽量减小,以避免埋设深度过大引起的缆线损伤。

3)埋设前抬升阶段中缆线受到的局部最大应力小于埋设阶段,本文工况中埋设前缆线局部最大应力为 89 MPa,而埋设过程中该处应力增大了 79%。因此,海底电缆的屈服应力参数选取应着重参考埋设作业中缆线的受力分析结果。

参考文献:

- [1] 吴荣辉,沈佳轶,库猛,等.海底电缆悬跨段应力分布数值模拟研究[J].*科技通报*,2021,37(9):60-63. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2021.09.011.
WU R H, SHEN J Y, KU M, et al. Numerical simulation of stress distribution of submarine cable [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2021, 37(9): 60-63. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2021.09.011.
- [2] 林航,方宁.大口径海底电缆的敷设及检验注意事项[J].*中国水运*,2019,19(6):83-84.
LIN H, FANG N. Points for attention in laying and inspection of large diameter submarine cables [J]. *China Water Transport*, 2019, 19(6): 83-84.
- [3] 邱巍,鲍洁秋,于力,等.海底电缆及其技术难点[J].*沈阳工程学院学报(自然科学版)*,2012,8(1):41-44. DOI: 10.13888/j.cnki.jsie(ns).2012.01.017.
QIU W, BAO J Q, YU L, et al. Submarine cable and its technical difficulties [J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science*, 2012, 8(1): 41-44. DOI: 10.13888/j.cnki.jsie(ns).2012.01.017.
- [4] 王亚东,伍林伟,高彬,等.砂质海床条件下海底电缆埋深研究[J].*南方能源建设*,2020,7(3):81-88. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.010.
WANG Y D, WU L W, GAO B, et al. Research on the burial depth of submarine cable in sandy seabed [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(3): 81-88. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.010.
- [5] 罗楚军,李健,吴庆华,等.高压海底电缆锚害事故风险评估[J].*南方能源建设*,2021,8(1):67-73. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.010.
LUO C J, LI J, WU Q H, et al. Risk assessment method for anchoring accident of high voltage submarine cable [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 67-73. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.010.
- [6] 刘可安,李修波,王华昆,等.犁式挖沟机后挖沟埋管对海底管道屈曲压溃压力影响分析[J].*中国造船*,2020,61(1):101-108. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.01.010.
LIU K A, LI X B, WANG H K, et al. Analysis of buckling pressure of submarine pipeline after trenching and burying pipe by plough trenching machine [J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(1): 101-108. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.01.010.
- [7] THOMAS W. 海底电力电缆:设计、安装、修复和环境影响[M].北京:机械工业出版社,2011.
THOMAS W. *Submarine power cables: design, installation, rehabilitation and environmental impact* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [8] 李修波,刘可安,王华昆,等.后挖沟深度对深海海底管道屈曲影响数值分析[J].*海洋工程*,2020,38(3):152-160. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2020.03.016.
LI X B, LIU K A, WANG H K, et al. Numerical analysis of the influence of post-trench depth on buckling of deep sea submarine pipeline [J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(3): 152-160. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2020.03.016.
- [9] 刘志伟,肖波,杜永兵,等.海底电缆铺设作业的数值仿真及工程应用[J].*海洋工程装备与技术*,2019,6(3):579-583. DOI: 10.12087/oet.2095-7297.2019.03.06.
LIU Z W, XIAO B, DU Y B, et al. Numerical simulation of submarine cable laying operation method and engineering application [J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2019, 6(3): 579-583. DOI: 10.12087/oet.2095-7297.2019.03.06.
- [10] 张太估,胡晓为.海底电缆在敷设中的受力分析[J].*船舶*,2009,20(3):15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9855.2009.03.004.
ZHANG T J, HU X W. Tension analysis in submarine cable laying [J]. *Ship & Boat*, 2009, 20(3): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9855.2009.03.004.
- [11] 张磊,王振宁,甘浪雄,等.基于有限元法的海底管道埋深计算[J].*船舶工程*,2017,39(11):93-98. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2017.11.093.
ZHANG L, WANG Z N, GAN L X, et al. Buried depth calculation of subsea pipeline based on finite element method [J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(11): 93-98. DOI: 10.13788/j.cnki.

cbgc.2017.11.093.

- [12] 李黎, 程志远, 王腾飞, 等. 海底电缆抛石保护层抗锚害能力的数值仿真研究 [J]. *土木工程与管理学报*, 2013, 30(2): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2013.02.001.
- LI L, CHENG Z Y, WANG T F, et al. Numerical simulation study on the degree of submarine cable protection by rock fill against anchor [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, 30(2): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2013.02.001.
- [13] 于贵芙. 海底挖沟机管道力学分析及调整机构设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013. DOI: 10.7666/d.D429631.
- YU G F. Pipeline stress analysis and pipe handling structures design of the pipeline plough [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. DOI: 10.7666/d.D429631.
- [14] 陈大勇, 张慧蕊, 董小松, 等. 海底电缆抗拉性能数值分析 [J]. *电线电缆*, 2021(4): 19-22. DOI: 10.16105/j.cnki.dxdl.2021.04.005.
- CHEN D Y, ZHANG H M, DONG X S, et al. Numerical analysis of tensile properties of submarine cables [J]. *Wire & Cable*, 2021(4): 19-22. DOI: 10.16105/j.cnki.dxdl.2021.04.005.
- [15] 崔东岭, 江春, 史忠秋, 等. 大型海上风电项目中的集电海缆研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 98-102. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.015.
- CUI D L, JIANG C, SHI Z Q, et al. Research on array submarine cables in large offshore windfarm [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(2): 98-102. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.015.

作者简介:



许海波

许海波 (第一作者)

1991-, 男, 河南驻马店人, 高级工程师, 学士, 主要从事海上风电研究 (e-mail) xu_hb@hdec.com。

沙欣宇

1994-, 男, 江苏如皋人, 助理工程师, 学士, 从事海上风电管理 (e-mail) sha_xy@hdec.com。

张震宇

1997-, 男, 湖南郴州人, 助理工程师, 学士, 从事海上风电管理 (e-mail) zhang_zy20@hdec.com。



库猛

库猛 (通信作者)

1995-, 男, 河南许昌人, 浙江大学水利工程硕士, 主要从事海洋岩土工程研究 (e-mail) 851889106@qq.com。

项目简介:

项目名称 近海长距离 220 kV 海缆敷设及穿堤关键技术研究

承担单位 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

项目概述 本项目将系统地研究海缆敷设施工技术的一系列问题, 尤其解决浅滩敷设过程的难点, 优化敷缆方式, 提高敷缆效率, 降低敷缆风险, 保证敷缆精度, 形成一整套海缆浅滩敷设施工方案, 对后续风电场工程浅滩敷缆施工具有重要的技术指导意义。

主要创新点 (1) 浅滩海缆敷设可行性分析, 分析 220 kV 海缆敷设过程中的各项性能参数, 在浅滩施工段海缆敷设中是否具备可行性; (2) 海缆敷设路由精度控制, 研究如何控制敷缆船使海缆准确敷设在预定路径; (3) 研究电缆张力计算公式, 研究适合风电场 220 kV 电缆在不同的外界条件下(水深、波浪、水流、重力、张力、船行速度等)的海缆张力计算模型; (4) 海缆穿堤工艺研究, 按照跨越式钢梁桥形式进行海缆穿堤实施工艺, 研究适合类似风电场 220 kV 海缆在不同外界条件下, 考虑到登陆段拖拽、过钢桥拐点较多、弯曲半径、海缆裕量等施工条件, 分析方案实施的适用性。

(编辑 李辉)