

基于有限元仿真的三芯海缆扭转研究

张雅君, 贾茹宾, 解瑞云, 张嘉鑫
(河南工学院 电缆工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 为研究三芯海缆在扭转条件下的受力情况和位移变化, 以 HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆为研究对象, 基于有限元软件 COMSOL 构建三芯海缆的精准数值仿真模型。在确保力学结构准确性的前提下对三芯海缆仿真模型进行了优化, 模拟三芯海缆在海洋条件下受到外力时发生的扭转行为, 并分析钢丝铠装、线芯铜导体、光纤单元受到扭转时应力分布特征和位移变化情况。通过应力分布演化图, 精确计算出应力的最大值和最小值。观察应力-位移的特征分布图, 了解应力与位移变化的关系。

关键词: 三芯海缆; 扭转; 有限元

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2025)01-0001-06

0 引言

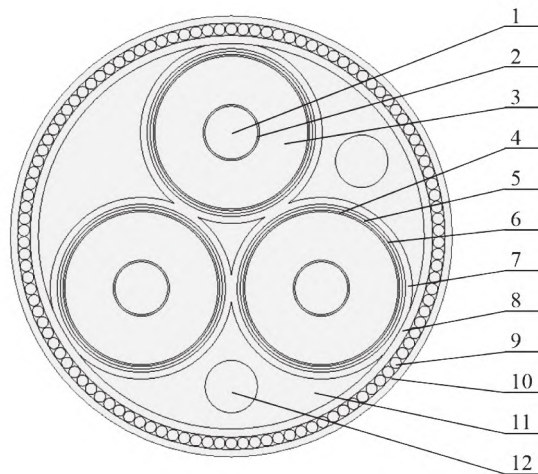
作为海上风电场输入、输出的连接线路, 海底电缆是否安全、稳定、可靠直接影响到风电场能否正常运行^[1-3]。因此, 有必要对海底电缆结构在复杂外部环境下敷设施工和运行时的受力特征进行细致深入的研究, 以进一步提高海底电缆结构的安全性和可靠性。但目前, 基于有限元仿真的三芯海缆扭转研究尚未形成统一的仿真标准和评价体系。本文旨在深入探究三芯海缆在扭转作用下的力学行为、性能变化和失效机理, 为提高三芯海缆的传输效能、保障其安全可靠提供理论支撑和技术支持。

1 海缆三维模型

1.1 海缆结构设计

HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海缆的几何结构如图 1 所示, 主要由缆芯、绝缘系统、阻水护套、填充层、光单元、铠装层和外护套组成^[4,5]。该海缆的截面积为 500 mm², 导体为 GB/T 3956—2008《电缆的导体》第 2 种不镀金属的软铜导线^[6], 并采用 1+6+12+23 正规紧压绞合结构, 单线根数为 $n=60$ 。

取紧压系数 $n=0.88$, 对应的铜延伸系数为 $\mu=1.10$, 绞入系数取 $K=1.02$ 。HYJQF41-F-26/35 3×500 海缆各结构尺寸参数详见表 1。



1—铜导体; 2—导体屏蔽; 3—XLPE 绝缘; 4—绝缘屏蔽; 5—半导电阻水带; 6—铝合金护套/沥青防腐层; 7—半导电 PE 护套; 8—隔离套; 9—镀锌钢丝; 10—PP 外被层; 11—填充; 12—光单元。

图 1 HYJQF41-F-26/35 3×500 海缆结构

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 河南省科技攻关项目(242102210119); 2024 年新乡市软科学研究项目(RXK2024015); 河南工学院教师教学 3+1 教学创新项目(cx20241-0019)

第一作者简介: 张雅君(1995—), 女, 河南安阳人, 助教, 硕士, 主要从事电缆仿真研究。

通信作者简介: 解瑞云(1981—), 女, 山东菏泽人, 副教授, 硕士, 主要从事计算机仿真模拟研究。

表 1 HYJQF41-F-26/35 3×500 海缆结构尺寸参数

结构名称	厚度 /mm	外径 /mm
铜导体	26.6	26.6
导体屏蔽	1.2	29.0
XLPE 绝缘	10.5	50.0
绝缘屏蔽	1.0	52.0
半导体阻水带	0.5	53.0
铅合金护套 / 沥青防腐层	2.3	57.6
半导体 PE 护套	2.2	62.0
填充	/	136.1
隔离套	3.1	142.3
镀锌钢丝	5.0	152.3
PP 外被层	4.0	160.3
光单元	13.5	13.5

1.2 海缆建模

1.2.1 海缆 CAD 模型构建

在 COMSOL 软件中，通过参数设置、几何绘

图设置、材料属性设置、物理场设置，本文构建了 HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆的 CAD 模型。由于三芯海缆结构极其复杂，为降低仿真模型计算难度，在保证仿真计算结果正确无误和力学结构真实性的前提下，本文对三芯海缆有限元计算模型的几何结构做出以下简化：（1）导体屏蔽和绝缘屏蔽的几何厚度较薄，单独建模会导致单元尺寸非常小，从而增加计算耗时，因此将与之性能相近的 XLPE 绝缘层简化为整体，统称为绝缘层；（2）半导体阻水带机械强度弱，在海缆扭转过程中发挥的保护作用基本可以忽略，故在计算时将其去除；（3）填充材料较薄，每部分形状不同，无法对其进行合适的网格划分，为获得均匀的网格，需增大填充层边缘尺寸，在建模时将机械性能相近的内垫层与其进行合并处理，既能提高求解速度，还能降低有限元网格划分难度。简化后的 HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆结构仿真模拟计算参数如表 2 所示。

表 2 海缆结构仿真模拟计算参数

组成结构	泊松比 μ	弹性模量 E/MPa	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	屈服强度 σ_s/MPa	几何厚度 λ/mm	外径 Φ/mm
铜导体	0.36	11700	8900	31.00	26.6	26.6
绝缘层	0.46	88.2	930	3.43	12.7	52.0
铅合金铅套	0.42	978	11340	1.47	5.6	57.6
半导体 PE 护套	0.46	30.4	950	1.57	2.2	62.0
填充层	0.46	32.3	950	2.77	/	142.3
镀锌钢丝	0.29	19700	7800	68.20	5.0	152.3
PP 外被层	0.46	155	1000	3.00	4.0	160.3
光单元	0.46	36.6	980	2.10	13.5	13.5

1.2.2 海缆模型几何校正因子

在 HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆的几何结构中，存在许多螺旋绞合的导线。由于绞距相等，海缆中螺旋绞合线会以相同的间距重复出现。另外，由于海缆中绞合结构的存在，使导线在横截面上的正投影不能显示为正圆，而是沿角方向拉伸的椭圆，故截面角度接近 90° 时，可用椭圆进行仿真计算^[7]。在海缆几何模型构建中，首先构建正圆，后对正圆进行不同方向拉伸得到椭圆。椭圆的长宽比通过校正因子设置。校正因子可以从导线的绞距与实际螺旋长度的纵横比推导得出：

$$F_{\text{arm}} = \frac{\sqrt{(2\pi R_{\text{arm}})^2 + L_{\text{arm}}^2}}{L_{\text{arm}}} \quad (1)$$

式中： F_{arm} 是倾斜校正因子； R_{arm} 是螺旋的大半径，单位 mm； L_{arm} 是绞距，单位 mm。

1.3 海缆有限元网格划分

在 COMSOL 软件校准条件下，将海缆整个模型

划分成有限个网格单元，并对这些网格单元进行计算^[8,9]。HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆截面的网格划分效果如图 2 所示。同为绞合结构的线芯铜导体、光纤单元、钢丝铠装层按照上述思路完成几何建模和网格划分后的效果分别如图 3、图 4、图 5 所示。

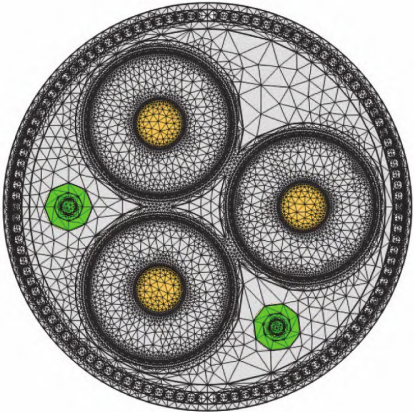


图 2 HYJQF41-F-26/35 3×500 海缆网格划分

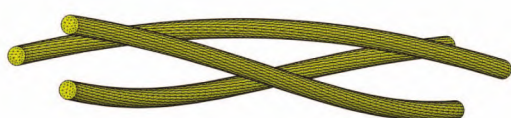


图3 海缆线芯铜导体有限元网格划分



图4 海缆光纤单元网格划分

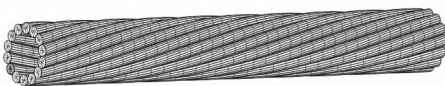


图5 海缆钢丝铠装层网格划分

2 海缆扭转仿真计算

2.1 扭转载荷施加

HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆计算模型采用边界坐标系,坐标原点设置在三芯海缆截面圆心处,构型选为变形构型,以X轴为第一切向创建笛卡尔空间坐标系^[10-12]。为模拟三芯海缆在海洋中的扭转过程,需要对模型施加扭转载荷,具体操作步骤如下:(1)海缆模型中线芯铜导体、钢丝铠装层、光纤单元的材料属性选择各向同性;(2)海缆模型两端添加固定约束;(3)在稳态条件下对海缆模型进行载荷施加。

2.2 仿真计算公式

由于应力场的波动,为避免海缆出现局部应力集中现象,故对HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆模型中的应力集中系数进行计算。一般将几何应力集中系数定义为与应力场受干扰区域的实际最大应力 σ_{max} 与标称应力 σ_{mon} 之比,如公式(2)所示:

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mon}} \quad (2)$$

式中:标称应力 σ_{mon} 是根据基本理论计算的应力,单位MPa。

扭转载荷条件下的应力集中系数定义如公式(3)所示:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{M_t R / J} \quad (3)$$

式中: M_t 为Z方向上的扭矩,单位N/m; J 为扭转常数。

在求解海缆扭转问题时需对位移梯度公式进行变化,使其包含周向位移 v 、 Φ 方向的位移场分量、位移梯度 ∇u ,从而可以描述海缆周向位移的空间变

化。其中,位移梯度是一个基本量,用于定义重要的变量,如应变和应力。此时,位移梯度公式改写为公式(4):

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \Phi} & \frac{v}{R} & \frac{\partial u}{\partial Z} \\ \frac{\partial v}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \Phi} & \frac{u}{R} & \frac{\partial v}{\partial Z} \\ \frac{\partial w}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \Phi} & \frac{\partial w}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设周向的位移是常数,相对于 Φ 的导数变为零, ∇u 简化后如公式(5)所示:

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} & \frac{v}{R} & \frac{\partial u}{\partial Z} \\ \frac{\partial v}{\partial R} & \frac{u}{R} & \frac{\partial v}{\partial Z} \\ \frac{\partial w}{\partial R} & 0 & \frac{\partial w}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

海缆模型在扭转条件下,线芯铜导体、钢丝铠装层、光纤单元在 Φ 方向的位移呈周期性变化,故此时位移可由公式(6)计算:

$$\hat{u} = u(R, Z) e^{-im\Phi} \quad (6)$$

式中: m 是模数。

弯曲载荷作用下海缆模型发生扭转,其中线芯铜导体、钢丝铠装层、光纤单元发生空间位移。此时,弯曲载荷作用在笛卡尔坐标系的正X轴方向。故 F_x 可由公式(7)计算:

$$F_x = F_R \cos \Phi + F_\Phi \sin \Phi \quad (7)$$

海缆模型所受载荷作用于线芯铜导体、钢丝铠装层、光纤单元并出现位移。此时,载荷矢量的定义如公式(8)所示:

$$\begin{pmatrix} F_R \\ F_\Phi \\ F_Z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} F_x \\ iF_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

由上述方法可计算出钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元的应力。

3 结果分析

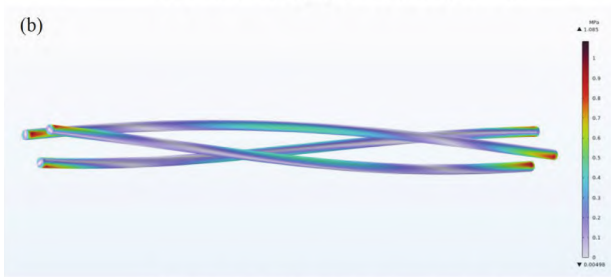
3.1 应力分布特征

HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆的钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元扭转后的三维彩色仿真应力云图如图6所示,应力演化如图7所示。由图6可知,钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元在两端处颜色呈红色,表明两端所受应力较大;中部呈现紫色,表明中部所受应力较小。结合图7可知钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元在不同位置处所受的应力大小。在扭转条件下,三芯海缆各结构所

受应力在两端处达到最大值, 在中间点处达到最小值。由表 3 可知: 钢丝铠装所受的应力最大值为 2.672 MPa, 线芯铜导体所受的应力最大值为 1.085 MPa, 光纤单元所受的应力最大值为 1.025×10^{-2} MPa; 钢丝铠装所受的应力最小值为 3.65×10^{-3} MPa, 线芯铜导体所受的应力最小值为 4.98×10^{-3} MPa, 光纤单元所受的应力最小值为 3.23×10^{-4} MPa。



(a) 钢丝铠装层应力分布云图

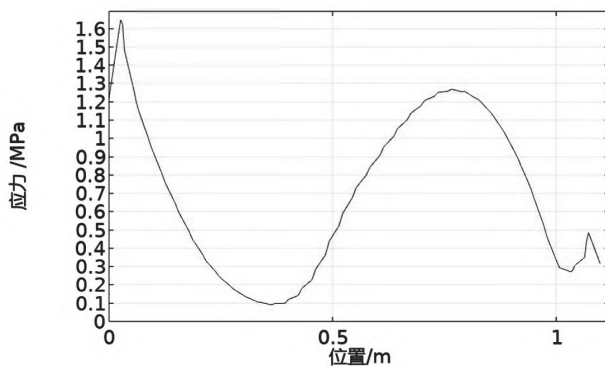


(b) 线芯铜导体应力分布云图

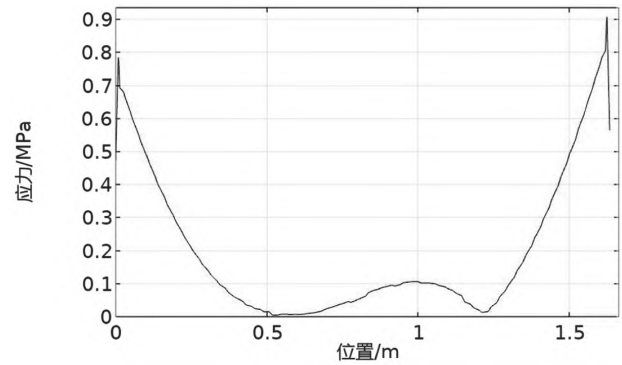


(c) 光纤单元应力分布云图

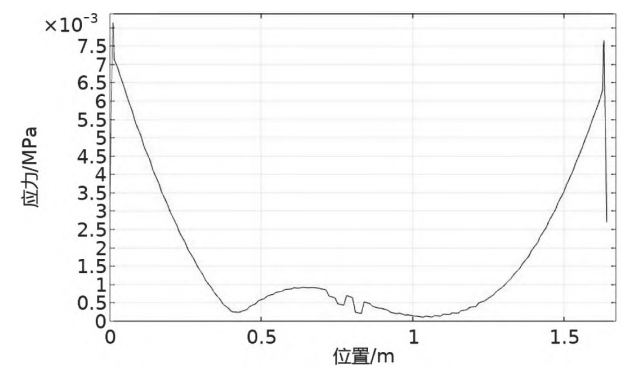
图 6 三芯海缆结构仿真应力云图



(a) 钢丝铠装层应力演化图



(b) 线芯铜导体应力演化图



(c) 光纤单元应力演化图

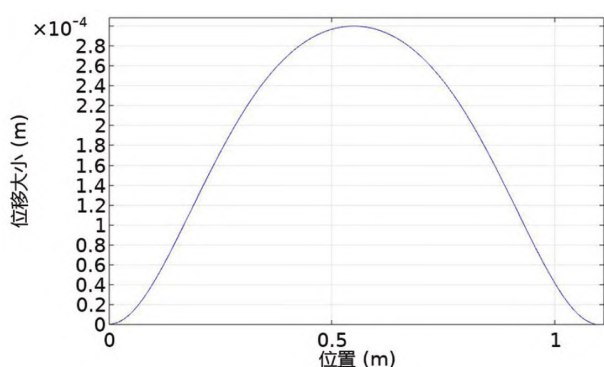
图 7 三芯海缆结构仿真应力演化图

表 3 三芯海缆各结构应力最大值和最小值

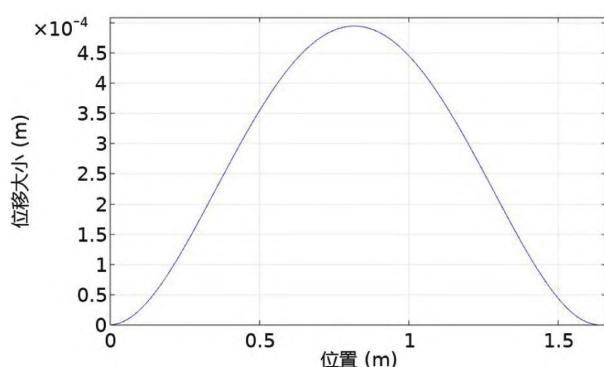
结构名称	应力最大值 /MPa	应力最小值 /MPa
钢丝铠装层	2.672	3.65×10^{-3}
线芯铜导体	1.085	4.98×10^{-3}
光纤单元	1.025×10^{-2}	3.23×10^{-4}

3.2 位移分布特征

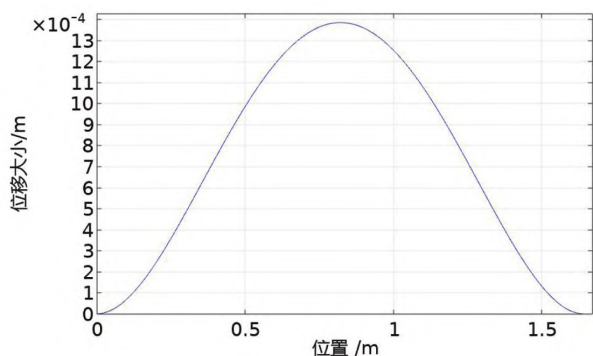
HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆的钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元扭转后的位移如图 8 所示。由图 8 可知, 三芯海缆各结构位移呈轴向上对称分布, 两端的位移几乎为零。由于海缆两端为固定约束, 余下部分无约束, 故在施加载荷条件下, 海缆各结构两端不会产生位移, 在自由度最高的中间点处位移达到最大值, 结合表 4 可知钢丝铠装层的位移最大值为 2.88×10^{-4} m, 线芯铜导体的位移最大值为 4.95×10^{-4} m, 光纤单元的位移最大值为 1.41×10^{-3} m。上述规律与实际情况相符合。实际的三芯海缆在海洋中处于两端固定中部悬浮的敷设状态, 故海缆两端位移较小。远离海缆固定端的部分, 海缆自由度随之增大, 此时海缆更易产生位移。



(a) 钢丝铠装层位移图



(b) 线芯铜导体位移图



(c) 光纤单元位移图

图 8 三芯海缆结构仿真位移图

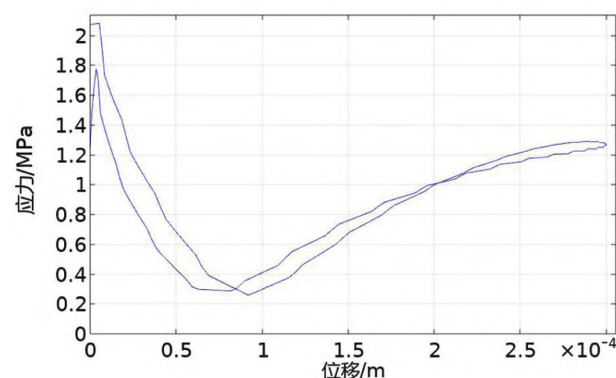
表 4 三芯海缆各结构位移最大值

结构名称	位移最大值 /m
钢丝铠装层	2.88×10^{-4}
线芯铜导体	4.95×10^{-4}
光纤单元	1.41×10^{-3}

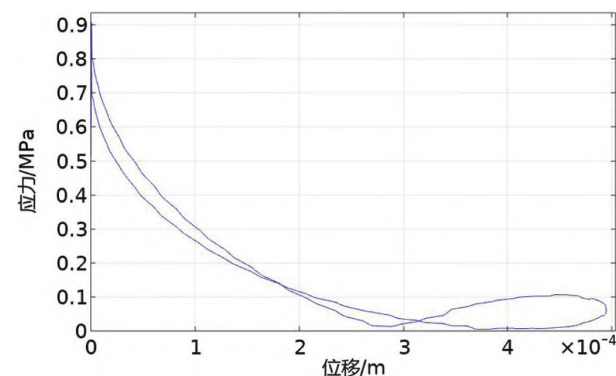
3.3 应力-位移特征

HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆的钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元扭转后的仿真应力-位移如图9所示。由图9可知,随着位移增大,海缆各结构受到的应力逐渐减小,在海缆各结构的

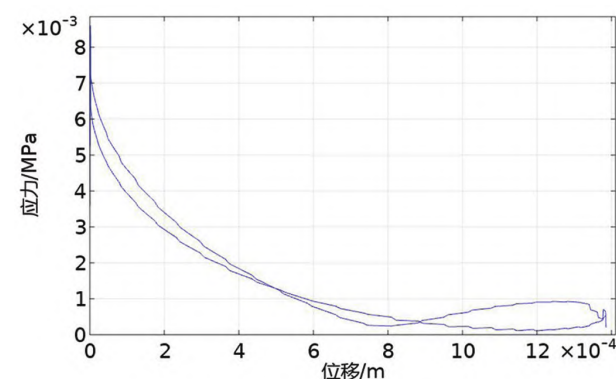
位移最大值附近,所受应力达到最小值。这是因为三芯海缆在海洋中处于两端固定中部悬浮的敷设状态,在洋流和涌浪的冲击作用下,海缆两端固定不会产生位移,无法抵消所受应力^[13],而海缆中部悬浮,可随洋流和涌浪产生位移,从而减小了海缆中部所受应力。上述实验结果与实际情况符合,在一定程度上验证了本文仿真建模的可靠性。



(a) 钢丝铠装层应力-位移图



(b) 线芯铜导体应力-位移图



(c) 光纤单元应力-位移图

图 9 三芯海缆结构仿真应力-位移图

4 结论

本文以 HYJQF41-F-26/35 3×500 三芯光纤复合海底电缆作为研究对象,基于有限元软件 COMSOL

建立海缆局部段整体模型, 并进行了精细化数值仿真实验。

(1) 分析了钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元扭转时的应力分布特征, 以及不同位置发生的位移和受力情况, 获得了各结构的应力分布和演化图, 并计算出三芯海缆各结构应力的最大值和最小值。

(2) 根据三芯海缆结构扭转条件下仿真计算结果图, 分析了应力与位移变化的关系。海缆在两端处所受应力最大, 在中间点处所受应力最小。

(3) 结合钢丝铠装层、线芯铜导体、光纤单元的位移图可知, 在扭转条件下海缆各结构位移呈轴对称分布, 两端较小, 中部较大。这一仿真实验结果与实际情况相符, 初步验证了应用 COMSOL 有限元仿真技术实现三芯海缆扭转研究的可行性, 为三芯海缆的扭转研究提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 严新荣, 张宁宇, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 1-12.
- [2] 张伟. 海底电缆系统工程设计与实施[J]. 电力安全技术, 2023, 25(9): 20-23.
- [3] 李栋. C 海上风电场海缆敷设项目风险管理研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [4] 吴建宁, 郑运焱, 吴弘. 三芯光电复合海底电力电缆的设计与制造之一: 结构设计[J]. 电线电缆, 2012(3): 20-22, 26.
- [5] 陆国梁. 海底光缆的结构设计[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1986(5): 53-62.
- [6] GB/T 3956—2008, 电缆的导体[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [7] 吕东建, 潘矗直, 周吉瑞, 等. 海底电缆倒缆时铠装打扭现象影响因素及控制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2022, (5): 42-44.
- [8] 林晓波, 卢志飞, 甘纯, 等. 光纤复合海底电缆扭转的有限元建模[J]. 光通信研究, 2016(3): 33-36.
- [9] 胡玉娇. 光纤复合海底电缆机械行为的有限元模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [10] TAN H T, HAO Y P, ZHANG P, et al. Torsional optical fiber stress analysis and vortex-induced vibration study of three-core submarine cable[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023(8): 1589-1595.
- [11] 胡宇航. 基于 BOTDR 的三芯海缆振动的建模及测量方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [12] 李鹏, 王博士, 郭健, 等. 基于有限元仿真的三芯光纤复合海缆扭转研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(4): 67-73.
- [13] 卢志飞, 何旭涛, 林晓波, 等. 洋流冲刷下的海底电缆动力学有限元分析[J]. 电线电缆, 2017(5): 6-8, 12.

Torsion Research of Three-core Submarine Cable Based on Finite Element Simulation

ZHANG Yajun, JIA Rubin, XIE Ruiyun, ZHANG Jiabin

(School of Cable Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453000, China)

Abstract: To study the stress and displacement changes of a three core submarine cable under torsional conditions, this paper takes the HYJQF41-F-26/35 3 × 500 three core optical fiber composite submarine cable as the research object, and constructs an accurate numerical simulation model of the three core submarine cable based on the finite element software COMSOL. On the premise of ensuring the accuracy of the mechanical structure, optimize the simulation model of the three core submarine cable, simulate the torsional behavior of the three core submarine cable under external forces in marine conditions, and analyze the stress distribution characteristics and displacement changes of the steel wire armor、copper conductor core、, and optical fiber unit when subjected to torsion. Accurately calculate the maximum and minimum values of stress through the stress distribution evolution diagram. By observing the characteristic distribution map of stress displacement, we can understand the relationship between stress and displacement changes.

Key words: three-core submarine cable; torsion; finite element

(责任编辑 王 磊)