

针对金属丝铠装结构的海缆传输线模型优化

李岩^{1,2}, 宋浩源^{1,2}, 齐磊杰³, 乔俊杰^{1,2}, 甄冠成^{1,2}, 梁雨薇^{1,2}, 刘晓坤^{1,2}

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北保定 071003; 2. 河北省绿色高效电工新材料与设备重点实验室, 河北保定 071003;
3. 湖北省电力规划设计研究院有限公司, 武汉 430040)

摘要: 基于传输线模型的解析计算是研究海缆环流的经典方法, 但是这种方法认为海缆铠装层是均匀的整层结构, 而实际铠装由金属丝(钢丝)绞合而成, 这将导致误差, 降低海缆环流分析精度。为此提出一种基于改进的鲸鱼优化算法(improved whale optimisation algorithm, IWOA)的金属丝铠装海缆传输线模型优化方法。首先搭建基于海缆简化替代模型的测试平台, 基于实测数据验证了二维有限元仿真模型计算金属丝铠装结构海缆环流的有效性, 进而采用 IWOA 算法进行有限元-MATLAB 联合分析, 获得铠装整层等效后的电阻率和磁导率, 基于该等效结果建立反映金属丝铠装结构的海缆传输线解析模型。以 220 kV 海缆为对象进行算例分析, 参照有限元结果, 相对于直接将金属丝铠装简化为整层结构的传统解析计算方式, 采用所提方法进行计算所得的感应电压和接地环流精度分别提升了 290 % 和 40 %, 绝对误差分别小于 4.9 % 和 1.3 %, 且计算效率显著高于有限元模型。

关键词: 海底电缆; 电缆建模; 传输线理论; 有限元; 鲸鱼算法

Optimization of Submarine Cable Transmission Line Model for Wire Armoring Structures

LI Yan^{1,2}, SONG Haoyuan^{1,2}, QI Leijie³, QIAO Junjie^{1,2}, ZHEN Guancheng^{1,2}, LIANG Yuwei^{1,2},
LIU Xiaokun^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Green and Efficient New Electrical Materials and Equipment, Baoding, Hebei 071003, China; 3. Hubei Electric Power Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: Analytical calculation based on transmission line model is a classical method to study the circulation of submarine cables, but this method considers the submarine cable armour layer is a uniform whole layer structure, while the actual armour is made of metal wires (steel wires) stranded together, and it will lead to errors and reduce the accuracy of submarine cable circulation analysis. For this reason, an optimization method for the transmission line model of metal wire armoured submarine cable is proposed based on the improved whale optimization algorithm (IWOA). Firstly, a test platform based on the simplified substitution model of submarine cable is built, and the validity of the 2D finite element simulation model for calculating the circulation flow of submarine cable with metal wire armoring structure is verified based on the measured data, and then the IWOA algorithm is used to carry out the joint analysis of finite element-MATLAB, to obtain the electrical resistivity and magnetic permeability of the whole layer of the armoring after equivalence, and the analytical model of submarine cable transmission line reflecting the structure of the metal wire armoring is established based on the equivalence results. Taking the 220 kV submarine cable as an object for example analysis, referring to the finite element results, compared with the traditional analytical calculation method which directly reduces the wire armoring to the whole layer structure, the accuracy of induced voltage and ground loop current obtained by the method proposed is improved by 290 % and 40 %, respectively, and the absolute error is less than 4.9 % and 1.3 %, respectively, and the computational efficiency is significantly higher than that of the finite element model.

Key words: submarine cable; cable model; transmission line theory; finite element; whale algorithm

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20226932, 2024MS109)。

Foundation item: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(20226932, 2024MS109).

0 引言

近年来,随着沿海地区能源需求量的不断扩大,海上风力发电在全球范围内发展迅速^[1-3]。交流送出是海上输电的重要形式,通常 50 km 以内的海上风电采用交流输电^[4-7]。为了提高功率传输效率,需要提高交流电压等级,110 kV 以上的海缆一般为单芯结构^[8-9]。由于海底电缆需要两端接地,因此接地回路中会出现感应环流,分析单芯海缆中的环流对于优化海缆设计、分析系统损耗具有重要意义,是保证海上能源安全的重要基础。

在分析电缆电气特性时可以使用有限元法^[10-11]。有限元法作为数值计算方法的一种,可以根据实际的几何形状建模,适用于复杂的电缆结构。文献[12]基于有限元法,建立了三芯铠装电缆的多物理场仿真模型,研究了低频运行下的损耗和载流特性。文献[13]针对铠装损耗计算进行研究,基于实测铠装钢丝损耗建立了有限元模型,并对实验结果进行验证。文献[14]建立电缆温度场有限元模型,研究了不同金属护套环流对电缆温度场的影响规律。

然而,有限元法在分析电缆问题时存在计算时间长、占用计算资源大等问题,相比于有限元法,以传输线理论为基础的解析分析方法具有显著的效率优势。文献[15]基于传输线理论提出了高压电缆单相接地故障定位方法。文献[16]利用传输线模型分析了不同接地方式对海缆电气参数的影响。文献[17]则使用传输线模型对交叉互联电缆的暂态电气过程进行了研究。

虽然传输线解析计算方法应用广泛,但当前该方法在进行建模时认为海缆铠装层为均匀的整层结构,与实际海缆的金属丝(钢丝)铠装存在差异,这将导致计算误差。为了消除传输线模型中由于海缆铠装结构差异引起的计算误差,本文提出了一种基于海缆铠装层参数优化的等效传输线模型。首先,搭建了基于海缆简化替代模型的实验平台,通过感应电压的测量数据验证了金属丝铠装海缆有限元模型的有效性;进而提出一种将海缆钢丝铠装等效为整层铠装的方法,通过改进的鲸鱼算法求取钢丝铠装结构的整层等效参数,算例表明,将基于有限元模型等效后的铠装参数代入传输线解析计算中,可以显著提高模型精度。

1 单芯海缆结构和传输线理论

高压海底电缆通常采用单芯设计,以 220 kV

交联聚乙烯电缆为例,图 1 是详细的电缆结构,其中护套主要由铅制成,而铠装层为钢丝。传输线模型解析计算方法难以表征绞合的钢丝结构,只能将其作为整层结构处理,如图 2 所示^[18]。

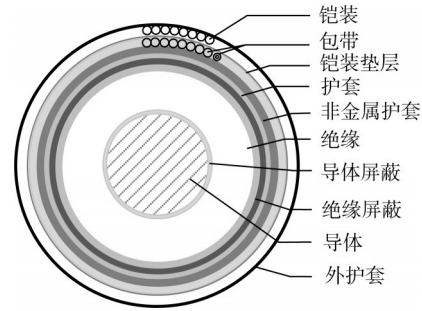


图 1 详细电缆结构

Fig. 1 Detailed cable structure

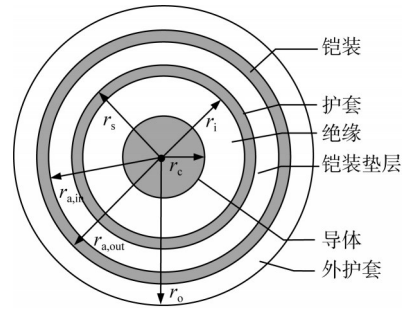


图 2 简化电缆结构

Fig. 2 Simplified cable structure

以图 2 所示的简化结构为对象,传输线模型中沿电缆轴向 z 位置导体的电压和电流波由式(1)计算。

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(z)}{\partial z} &= -Z\mathbf{I}(z) \\ \frac{\partial \mathbf{I}(z)}{\partial z} &= -Y\mathbf{V}(z) \end{aligned} \quad (1)$$

电压 $\mathbf{V}$ 和电流 $\mathbf{I}$ 定义为:

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= (V_c, V_s, V_a)^T \\ \mathbf{I} &= (I_c, I_s, I_a)^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中: V_c 、 V_s 、 V_a 分别为导体、金属护套和铠装相对于地的电压;电流 $\mathbf{I}$ 的下标遵循相同的意义。阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 和导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 定义如下。

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} & Z_{ca} \\ Z_{cs} & Z_{ss} & Z_{sa} \\ Z_{ca} & Z_{sa} & Z_{aa} \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{cc} & Y_{cs} & Y_{ca} \\ Y_{cs} & Y_{ss} & Y_{sa} \\ Y_{ca} & Y_{sa} & Y_{aa} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Z_{cc} 、 Z_{ss} 和 Z_{aa} 分别为导体、金属护套和铠装的自阻抗; Z_{cs} 、 Z_{ca} 和 Z_{sa} 分别为导体与金属护套之间、导体与铠装之间和金属护套与铠装之间的互阻抗,导纳 $\mathbf{Y}$ 的下标遵循相同的意义。

对于海底电缆, 公共接地为多导体传输线分析的参考电压。电缆每个金属层之间的阻抗和导纳如图 3 所示。

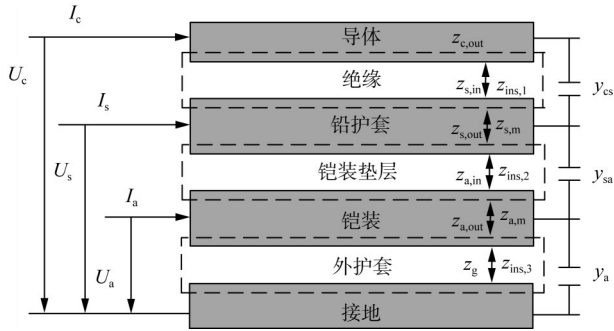


图 3 海缆剖面关系

Fig. 3 Submarine cable profile relationship

阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 中的元素计算如下。

$$\begin{cases} Z_{cc} = z_{c,out} + z_{ins,1} + z_{s,in} - 2z_{s,m} + z_{s,out} + z_{ins,2} + \\ z_{a,in} - 2z_{a,m} + z_{a,out} + z_{ins,3} + z_g \\ Z_{cs} = -z_{sm} + z_{s,out} + z_{ins,2} + z_{a,in} - 2z_{a,m} + z_{a,out} + \\ z_{ins,3} + z_g \\ Z_{ss} = z_{s,out} + z_{ins,2} + z_{a,in} - 2z_{a,m} + z_{a,out} + z_{ins,3} + z_g \\ Z_{ca} = Z_{sa} = -z_{a,m} + z_{a,out} + z_{ins,3} + z_g \\ Z_{aa} = z_{a,out} + z_{ins,3} + z_g \end{cases} \quad (4)$$

式中: $z_{c,out}$ 为导体表面外阻抗; $z_{s,in}$ 和 $z_{s,out}$ 分别为金属护套层的内表面阻抗和外表面阻抗; $z_{a,in}$ 和 $z_{a,out}$ 分别为铠装层的内表面阻抗和外表面阻抗; $z_{ins,1}$ 、 $z_{ins,2}$ 和 $z_{ins,3}$ 分别代表绝缘介质中时变磁通所表现出的阻抗; $z_{s,m}$ 为护套互阻抗, 表示单位电流通过内(外)导体返回时沿护套外(内)表面的压降; $z_{a,m}$ 为铠装互阻抗, 表示单位电流通过内(外)导体返回时沿铠装外(内)表面的压降; z_g 为接地回路内阻抗。

$\mathbf{Z}$ 中元素计算公式参考文献[16]和文献[19-20], 传输线解析计算方法对海缆建模时认为海缆铠装层为均匀整层结构, 与实际海缆的金属丝铠装结构存在差异。本文对传输线海缆模型中铠装层的参数进行优化, 其中铠装层的关联阻抗参数为 $z_{a,in}$ 、 $z_{a,m}$ 和 $z_{a,out}$ 。

$z_{a,in}$ 为铠装的内部阻抗(通过导体返回的单位电流在护套内表面上的压降), 其计算公式为:

$$z_{a,in} = \frac{\rho_a m_a}{2\pi r_i} \coth[m_a(r_a - r_i)] - \frac{\rho_a}{2\pi r_i(r_a + r_i)} \quad (5)$$

$$m_a = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\rho_a}}$$

式中: ρ_a 、 μ_a 和 m_a 分别为铠装的电阻率、磁导率和反渗透深度; r_a 和 r_i 分别为导体和绝缘的半径; ω 为角频率。

$z_{a,m}$ 为护套互阻抗, 表示单位电流通过内(外)导体返回时沿护套外(内)表面的压降, 此处外导体为接地, 其计算公式为:

$$z_{a,m} = \frac{\rho_a m_a}{\pi(r_a + r_i)} \cdot \frac{1}{\sinh[m_a(r_a - r_i)]} \quad (6)$$

$z_{a,out}$ 为铠装外表面内部阻抗(电流通过接地返回时沿护套外表面的电压降), 其计算公式为:

$$z_{a,out} = \frac{\rho_a m_a}{2\pi r_a} \coth[m_a(r_a - r_i)] + \frac{\rho_a}{2\pi r_a(r_a + r_i)} \quad (7)$$

$\mathbf{Y}$ 矩阵可由式(8)表示

$$\begin{cases} Y_{cc} = y_{cs} = j\omega 2\pi \varepsilon_{XLPE} / \ln\left(\frac{r_i}{r_c}\right) \\ Y_{ss} = y_{cs} + y_{sa} = j\omega 2\pi \varepsilon_{XLPE} / \ln\left(\frac{r_i}{r_c}\right) + \\ j\omega 2\pi \varepsilon_{bedding} / \ln\left(\frac{r_{a,in}}{r_s}\right) \\ Y_{aa} = y_{sa} + y_a = j\omega 2\pi \varepsilon_{bedding} / \ln\left(\frac{r_{a,in}}{r_s}\right) + \\ j\omega 2\pi \varepsilon_{outersheath} / \ln\left(\frac{r_o}{r_{a,out}}\right) \\ Y_{cs} = -Y_{cc} \\ Y_{ca} = 0 \\ Y_{sa} = -y_{sa} = -j\omega 2\pi \varepsilon_{bedding} / \ln\left(\frac{r_{a,in}}{r_s}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: ε_{XLPE} 为 XLPE 的相对介电常数; $\varepsilon_{bedding}$ 为铠装垫层的相对介电常数; $\varepsilon_{outersheath}$ 为外护套的相对介电常数; r_c 、 r_s 、 $r_{a,in}$ 、 $r_{a,out}$ 和 r_o 分别为导体、金属护套、铠装垫层、铠装和外护套的半径。

由于传输线解析计算方法在进行建模时认为海缆铠装层为均匀的整层结构, 与实际海缆的金属丝(钢丝)铠装存在差异, 该结构差异会使与铠装层关联的电气参数有误, 最终导致计算结果产生误差。

2 海缆的简化替代模型搭建及感应电压测量

为了便于操作, 参照 220 kV 海缆结构, 制作带有钢丝铠装结构的单芯海缆简化替代模型, 在该替代模型中, 由空气绝缘代替海缆中的交联聚乙烯固体绝缘, 由 3D 打印的树脂绝缘代替海缆中铠装和护套之间的绝缘层, 以方便制备。

该模型的结构参数见表 1。电缆从内到外的结

构依次为导体线芯、空气绝缘层、金属护套层、树脂绝缘层、铠装层，其中树脂绝缘层参考实际海缆铠装开槽，在槽内布置钢丝，以保证其均匀分布。

表 1 自制结构电缆参数

Tab. 1 Self-made structure cable parameters mm

海缆结构名称	半径
导体	5.85
空气绝缘层	19.5
金属护套层	22.5
树脂绝缘层	25
铠装层	26.8
铠装钢丝	0.8

接地环流主要由磁场感应而来^[21-22]，因此，采用空气绝缘层代替海缆绝缘层，这种处理在不影响海缆感应电流的基础上，简化了制作过程，制成的电缆替代模型如图 4 所示。

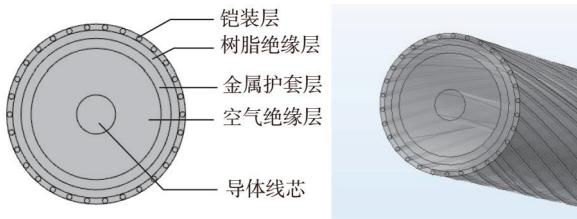


图 4 海缆简化替代模型结构图

Fig. 4 Simplified alternative model structure diagram of submarine cable

基于海缆替代模型搭建如图 5—6 所示的实验平台，被试电缆为单芯海缆简化替代模型，长度为 0.8 m。通过电流发生器对线芯施加工频电流，海缆简化替代模型一端的护套和铠装直接接地，由于环流受到接地电阻的影响，测量难度大，因此本文测量替代模型另一端护套及铠装的开路电压，间接体现环流特性。

3 二维海缆有限元模型的验证

以第 2 节中海缆替代模型为对象，建立其三维有限元模型，计算护套和铠装的感应电压，替代模型中铠装钢丝的绞距 l_a 为 1.6 m，为了研究该参数对仿真结果的影响，本文还利用有限元模型计算了 l_a 为 0.8 m 和 1.2 m 的情况。

对海缆有限元模型的线芯通入 100 A 电流，护套以及铠装一端接地，另一端开路。感应电压求解的控制方程如下。

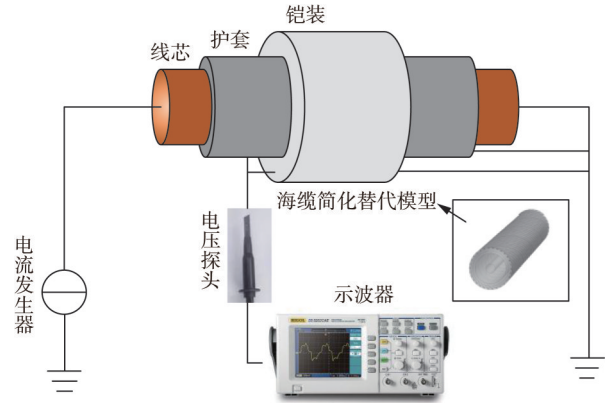


图 5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform



图 6 现场实验平台

Fig. 6 Field experimental platform

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \end{cases} \quad (9)$$

式中： ∇ 为矢量微分算子； $\mathbf{H}$ 为磁场强度，A/m； $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量，A/m²； $\mathbf{B}$ 为磁感应强度，T； $\mathbf{A}$ 为磁矢量，wb/m； σ 为电导率，S/m； $\mathbf{E}$ 为电场矢量，V/m； $\mathbf{D}$ 为电位移矢量，C/m²； $\mathbf{J}_e$ 为外部注入电流密度，A/m²。对式中的场强 $\mathbf{E}$ 进行积分可以得到电压值。

在三维有限元模型的基础上，本文参照电缆剖面结构建立其二维有限元模型，忽略铠装钢丝的绞距直接求解感应电压。

将三维和二维海缆有限元模型计算结果与实测数据进行对比，结果见表 2。

由表 2 可知，不同绞距 l_a 下三维仿真模型与实验结果误差均小于 5%，3 个绞距参数的仿真结果相差不超过 2%，说明绞距对开路电压的影响可以忽略。二维海缆模型计算结果与实验数据的误差同

表 2 海缆感应电压仿真值与实验值对比

Tab. 2 Comparison between simulated and experimental values of submarine cable induced voltages mV

对比项	护套感应电压	铠装感应电压
实验数据	16.88	14.71
三维模型 $l_a=1.6\text{ m}$	16.12	15.00
三维模型 $l_a=1.2\text{ m}$	16.17	15.05
三维模型 $l_a=0.8\text{ m}$	16.31	15.18
二维模型	16.08	14.95

样很小, 说明了二维海缆模型的正确性。

4 海缆模型的等效简化

在二维钢丝铠装海缆有限元模型的基础上, 建立二维整层铠装海缆模型, 通过优化整层铠装的电阻率和磁导率, 得到与钢丝海缆模型等效的整层铠装结构。

基于改进的鲸鱼优化算法进行有限元-MATLAB联合仿真, 对二维海缆模型中的整层铠装等效电阻率和磁导率进行优化。优化过程如图7所示, 基本思路是利用有限元法计算钢丝铠装海缆模型的铠装开路电压和接地环流, 将结果作为参考, 并将整层铠装海缆的计算结果与参考值之间的误差作为目标函数, 如式(10)–(11)所示, 通过改进鲸鱼优化算法搜寻整层铠装电阻率和磁导率的最优值, 使得目标函数最小。最后, 提取等效参数并带入传输线模型中, 以提高模型的计算精度。

$$f_1 = \left(\frac{V_{\text{整层}} - V_{\text{钢丝}}}{V_{\text{钢丝}}} \right)^2 + \left(\frac{\varphi_{\text{整层}} - \varphi_{\text{钢丝}}}{\varphi_{\text{钢丝}}} \right)^2 \quad (10)$$

$$f_2 = \left(\frac{I_{\text{整层}} - I_{\text{钢丝}}}{I_{\text{钢丝}}} \right)^2 + \left(\frac{\varphi'_{\text{整层}} - \varphi'_{\text{钢丝}}}{\varphi'_{\text{钢丝}}} \right)^2 \quad (11)$$

式中: f_1 为感应电压的误差函数; $V_{\text{整层}}$ 和 $\varphi_{\text{整层}}$ 分别为整层铠装海缆模型中感应电压有效值和相位; $V_{\text{钢丝}}$ 和 $\varphi_{\text{钢丝}}$ 分别为钢丝铠装海缆模型中感应电压有效值和相位; f_2 为接地环流的误差函数; $I_{\text{整层}}$ 和 $\varphi'_{\text{整层}}$ 分别为整层铠装海缆模型中接地环流有效值和相位; $I_{\text{钢丝}}$ 和 $\varphi'_{\text{钢丝}}$ 分别为钢丝铠装海缆模型中接地环流有效值和相位。

4.1 基于鲸鱼算法的等效参数优化

鲸鱼优化算法^[23]是由座头鲸捕食猎物的方式引出的一种新型优化算法, 具有操作简单、搜索能力强等优点。本文利用该算法对整层铠装海缆模型

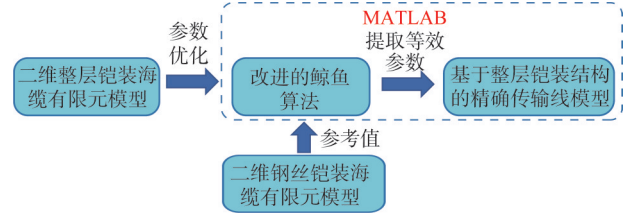


图 7 二维整层铠装海缆参数优化流程图

Fig. 7 Parameter optimization flow chart of two-dimensional fully armored submarine cable

的电阻率和磁导率进行优化, 以提高模型的计算精度。算法主要分为收缩包围猎物、螺旋气泡网捕猎、搜索猎物3个过程。

4.1.1 收缩包围猎物过程

本文中目标猎物为整层海缆铠装的电阻率和磁导率。利用式(12)–(13)进行位置更新, 即电阻率和磁导率数值的变化。

$$D = |C \cdot X'(t) - X(t)| \quad (12)$$

式中: D 为当前搜索值与随机搜索值之间的距离; C 为系数向量; $X(t)$ 为第 t 次迭代中铠装电阻率和磁导率全局最优值; $X'(t)$ 为当前铠装电阻率和磁导率值。

$$X(t+1) = X'(t) - A \cdot D \quad (13)$$

式中: $A \cdot D$ 表示包围步长; A 、 C 参数定义如下。

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (14)$$

$$C = 2r_2 \quad (15)$$

式中: r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数; a 为迭代搜索中的收敛因子, 定义式如下:

$$a = \left(2 - \frac{2t}{T_{\max}} \right) \quad (16)$$

式中: t 为迭代次数; $T_{\max}$ 为鲸鱼优化算法的最大迭代次数。

4.1.2 螺旋气泡网捕猎过程

鲸鱼算法的螺旋气泡网捕猎对应着电阻率和磁导率数值在逼近最优解过程中的收缩螺旋式变化, 收缩变化按照式(13)通过减少收敛因子 a 进行更新实现; 数值的螺旋更新表达式为:

$$D' = |X'(t) - X(t)| \quad (17)$$

$$X(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X'(t) \quad (18)$$

式中: D' 为当前电阻率和磁导率 $X'(t)$ 与全局最优解 $X(t)$ 间的距离; b 为常数; l 为 $[0, 1]$ 中的随机数。

以概率 $p=0.5$ 为界分别进行数据收缩包围和螺旋更新, 数学表达式如下。

$$X(t+1) = \begin{cases} X'(t) - A \cdot |C \cdot X'(t) - X(t)|, p < 0.5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X'(t), p \geq 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

式中 p 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

4.1.3 搜寻猎物过程

搜寻猎物过程以参数 A 的值为标准分别搜索局部最优解和全局最优解，当参数 A 的绝对值小于 1 时，鲸鱼算法按照式(17)—(19)进行螺旋气泡网捕猎过程，搜索局部最优解；当参数 A 的绝对值大于等于 1 时，算法搜索全局最优解，避免陷入局部最优，数学表达式如下。

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \quad (20)$$

$$X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - A \cdot D \quad (21)$$

式中 $X_{\text{rand}}(t)$ 为第 t 次迭代时优化算法随机选择的个体位置。

4.2 改进的鲸鱼算法

本文引入非线性收敛因子和自适应权重策略对算法进行优化。对收敛因子 a 进行非线性化处理，可以有效提升算法的全局搜索能力，表达式为：

$$a = 2 - 2\sin\left(\frac{0.5 \cdot t}{T_{\max}}\pi\right) \quad (22)$$

引入自适应权重以优化螺旋气泡网捕猎过程，该权重数学表达式如下。

$$\omega = 1 - \frac{e^{\frac{t}{T_{\max}}} - 1}{e - 1} \quad (23)$$

将其代入式(19)得到

$$X(t+1) = \begin{cases} \omega X'(t) - A \cdot |C \cdot X'(t) - X(t)|, p < 0.5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \omega X'(t), p \geq 0.5 \end{cases} \quad (24)$$

利用改进的鲸鱼算法求取整层铠装海缆模型等效参数的流程如图 8 所示。

4.3 求解过程

鉴于二维模型的有效性，考虑到计算效率，本文采用二维模型对 220 kV 交联聚乙烯海缆进行建模，参照图 1—2 分别建立二维钢丝铠装海缆和二维整层铠装海缆有限元模型，二维模型参数见表 3^[24-25]。在线芯中通入 100 A 的电流，钢丝铠装模型中铠装钢丝的磁导率设为 1 500^[26]，计算铠装的开路感应电压与短路接地环流。

本文用改进的鲸鱼算法对二维整层铠装海缆模型参数进行优化，最终得到整层铠装海缆模型铠装层的

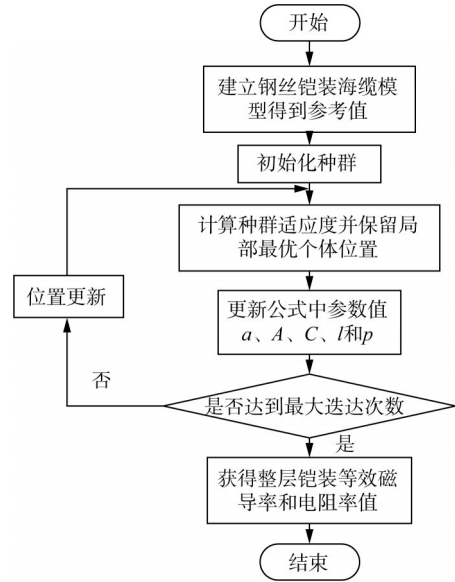


图 8 改进的鲸鱼算法海缆参数优化流程图

Fig. 8 Flow chart of optimized submarine cable parameters of IWOA

表 3 220 kV 电力电缆材料参数

Tab. 3 Material parameters of 220 kV power cable

结构名称	半径/mm	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	相对介电常数
导体	17.1	1.724×10^{-8}	
导体屏蔽	19.2	$1/1 \times 10^{-18}$	2.25
绝缘	44.2	$1/1 \times 10^{-18}$	2.3
绝缘屏蔽	46.4	$1/1 \times 10^{-18}$	2.25
护套	50.3	2.14×10^{-7}	
非金属护套	53.7	$1/1 \times 10^{-21}$	2.25
包带	60.7	$1/1 \times 10^{-18}$	2.25
铠装垫层	62.2	$1/1 \times 10^{-21}$	2.25
铠装	68.2	1.38×10^{-7}	
外护套	72.2	$1/1 \times 10^{-18}$	2.25

等效磁导率为 7.49，等效电阻率为 $4.5 \times 10^{-7} + 4.2 \times 10^{-7} \text{i} \Omega \cdot \text{m}$ ，电阻率虚部表示磁场耦合时的电感效应。

4.4 结果分析

为了验证将钢丝铠装等效为整层铠装的有效性，进行等效前后的对比分析，结果示于表 4。依照式(1)—(8)在 MATLAB 中建立海缆的传输线计算模型，将铠装电阻率和磁导率设置为钢丝铠装参数 ($\rho = 1.38 \times 10^{-7}$, $\mu = 1500$)，计算护套和铠装层的感应电压和接地环流，结果记为“未等效”；将经过改进鲸鱼算法得到的等效电阻率和磁导率代入传输线解析模型的铠装参数中，修正与铠装层电阻率和磁导率关联的阻抗矩阵参数 $z_{a,\text{in}}$ 、 $z_{a,\text{m}}$ 和 $z_{a,\text{out}}$ ，再次

计算护套和铠装层的感应电压和接地环流, 结果记为“等效”; 作为评判标准, 钢丝铠装有限元模型仿真结果也列于表 4 中。

表 4 电阻率和磁导率等效前后仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results before and after equivalent resistivities and permeabilities

结构名	护套电压/mV	铠装电压/mV	护套电流/A	铠装电流/A
参考值	45 $\angle$ 83 $^{\circ}$	41 $\angle$ 83 $^{\circ}$	60.75 $\angle$ -150 $^{\circ}$	37.25 $\angle$ 164 $^{\circ}$
未等效	176 $\angle$ 54 $^{\circ}$	102 $\angle$ 63 $^{\circ}$	84.7 $\angle$ -171 $^{\circ}$	20.77 $\angle$ 144 $^{\circ}$
等效	47 $\angle$ 81 $^{\circ}$	43 $\angle$ 81 $^{\circ}$	61.27 $\angle$ -153 $^{\circ}$	37.77 $\angle$ 162 $^{\circ}$

表 5 为电阻率和磁导率等效前后护套和铠装的感应电压和接地环流的误差值, 表中 e_{neq} 为未等效时基于式(10)–(11)得到的误差值, e_{eq} 为等效后的误差值。

表 5 电阻率和磁导率等效前后仿真结果误差值

Tab. 5 Error values of simulation results before and after equivalent resistivities and permeabilities

误差值	护套电压	铠装电压	护套电流	铠装电流
e_{neq}	8.6	2.27	0.18	0.21
e_{eq}	0.002	0.003	0.000 4	0.000 3

从表中结果可以看出, 海缆传输线解析模型电阻率和磁导率等效前后, 感应电压与接地环流均有明显差异, 其中护套和铠装电压幅值相差近 3 倍, 未等效模型护套电流幅值的结果是参考值的 1.5 倍, 铠装电流幅值是参考值的二分之一, 等效后护套感应电压误差值从 8.6 降至 0.002, 铠装感应电压误差值从 2.27 降至 0.003; 护套接地环流误差值从 0.18 降至 0.000 4, 铠装接地环流误差值从 0.21 降至 0.000 3; 等效后感应电压计算精度提升了 290%, 有效值与参考值误差小于 4.9%, 接地环流计算精度提升了 44%, 有效值误差小于 1.3%。通过等效前后的仿真结果对比可以看出, 未等效参数的传输线解析模型在计算感应电压和接地环流时的误差较大, 而采用本文优化方法可以得到更精确的结果; 在 Intel Xeon 2.90 GHz CPU, 内存 256 G 的硬件平台下, MATLAB 传输线解析模型仿真时间为 3 s, 三维钢丝铠装有限元模型的仿真时间为 2 h 38 min 58 s, 可见利用传输线解析模型可以显著提升仿真效率。

5 结论

本文提出了一种基于 IWOA 算法的金属丝铠装

海缆传输线模型, 该模型应用有限元方法对铠装结构进行等效, 基于等效数据对传输线参数进行解析计算, 精度优于传统的解析模型, 效率高于传统的有限元方法。具体结论如下。

1) 参照 220 kV 海缆制作带有钢丝铠装结构的单芯电缆替代模型, 搭建实验平台测量其感应电压, 并基于有限元法建立此结构二维和三维模型, 进而验证了模型的正确性。

2) 基于 220 kV 海缆二维有限元模型, 通过改进的鲸鱼算法和 MATLAB 联合仿真对二维海缆模型整层铠装的电阻率和磁导率进行优化, 得到了与钢丝铠装海缆模型感应电压和接地环流一致的整层铠装海缆模型, 完成了金属丝铠装结构的整层化等效。

3) 在传输线解析模型中代入等效前后电阻率和磁导率, 分别计算开路感应电压和短路接地环流, 以有限元计算结果为参考, 发现相对于直接将金属丝铠装简化为整层结构的计算方式, 采用本文的等效方法所得的感应电压和接地环流计算精度相对于未优化的解析模型分别提升了 290% 和 40%。而相对于三维有限元模型, 计算时间由 2 h 38 min 58 s 缩短到 3 s, 效率显著提升。

参考文献

- [1] 邵森安, 马颢, 丰如男, 等. 海底电缆国内外研究综述[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11): 81–88.
SHAO Senan, MA Xie, FENG Runan, et al. Review of researches on submarine cables at home and abroad [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(11): 81–88.
- [2] 应启良. 我国发展直流海底电力电缆的前景[J]. 电线电缆, 2012(3): 1–7, 10.
YING Qiliang. The prospect of development of DC submarine cables in China [J]. Electric Wire & Cable, 2012(3): 1–7, 10.
- [3] 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 Yushuang. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 26–30.
- [4] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758–3771.
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758–3771.
- [5] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459–5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459–5466.

- [6] MAU C N, RUDION K, ORTHS A, et al. Grid connection of offshore wind farm based DFIG with low frequency AC transmission system[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22 – 26, 2012, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2012: 1 – 7.
- [7] RODNEY I, DI SANTO S G, ITIKI C, et al. A comprehensive review and proposed architecture for offshore power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019(111): 79 – 92.
- [8] 张磊, 宣耀伟, 乐彦杰, 等. 110 kV 单芯海缆的载流量计算、温度场仿真及其热循环试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 135 – 140, 146.
ZHANG Lei, XUAN Yaowei, YUE Yanjie, et al. Ampacity calculation, temperature simulation and thermal cycling experiment for 110 kV submarine cable[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 135 – 140, 146.
- [9] LI P, GUO P. Characteristic analysis of the outer sheath circulating current in a single-core AC submarine cable system[J]. Symmetry, 2022, 14(6): 1088.
- [10] 刘云鹏, 许自强, 陈铮铮, 等. ± 160 kV 直流 XLPE 海底电缆载流特性仿真及试验[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 130 – 136.
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, CHEN Zhengzheng, et al. Simulation and test of current carrying characteristics of ± 160 kV DC XLPE submarine cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 130 – 136.
- [11] 高俊国, 于平澜, 李紫云, 等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 714 – 720.
GAO Junguo, YU Pinglan, LI Ziyun, et al. Simulation analysis of induced voltage on metal sheath of power cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 714 – 720.
- [12] 刘士利, 罗英楠, 刘宗烨, 等. 基于电磁-热耦合原理的三芯铠装电缆在低频输电方式下的损耗特性研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4829 – 4836.
LIU Shili, LUO Yingnan, LIU Zongye, et al. Study on loss characteristics of three core armored cable under low-frequency transmission mode based on electromagnetic, thermal coupling principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4829 – 4836.
- [13] BOMPOU E, MIJATOVIC N, TRÆHOLT C, et al. Loss in steel armour wires for submarine power cables[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 05 – 10, 2018, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2018: 1 – 5.
- [14] 陈悦, 杨仕友, 覃喜. 计及金属护套环流影响的高压电缆温度场及载流量的数值分析[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(10): 18 – 26.
CHEN Yue, YANG Shiyu, QIN Xi. Numerical analysis of temperature field and ampacity of high-voltage cables considering the influence of metal sheath circulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(10): 18 – 26.
- [15] 袁超, 储海军, 陈燕擎, 等. 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 115 – 120.
YUAN Chao, CHU Haijun, CHEN Yanqing, et al. Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 115 – 120.
- [16] XU Xing, CHEN Xiangrong, MENG Fanbo, et al. Performance of different grounding systems of 500 kV XLPE long submarine cables based on improved multiconductor analysis method[J]. Electric Power Systems Research, 2022(202): 107608.
- [17] XUE H, MAHSEREDJIAN J, MORALES J, et al. Analysis of cross-bonded cables using accurate model parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 46 – 55.
- [18] AMETANI A, MIYAMOTO Y, NAGAOKA N. Semiconducting Layer impedance and its effect on cable wave-propagation and transient characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1523 – 1531.
- [19] WEDEPOHL L M, WILCOX D J. Transient analysis of underground power transmission systems. system-model and wave-propagation characteristics[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973, 120(2): 253 – 260.
- [20] AMETANI A. A general formulation of impedance and admittance of cables[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(3): 902 – 910.
- [21] 牛海清, 王晓兵, 蚁泽沛, 等. 110 kV 单芯电缆金属护套环流计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 15 – 17.
NIU Haiqing, WANG Xiaobing, YI Zepei, et al. Study on circulating current of 110 kV single-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 15 – 17.
- [22] 田金虎, 刘渝根, 赵俊光, 等. 多回同相多根并联高压电力电缆电流分布及金属护套环流计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 153 – 159.
TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang, et al. Circulating current in sheaths and current distribution on same-phase parallel multi-cable of multi-circuit power cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 153 – 159.
- [23] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016(95): 51 – 67.
- [24] 李岩, 王毛桃, 乔俊杰, 等. 单芯海缆两端环流不匹配问题及评价方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1770 – 1779.
LI Yan, WANG Maotao, QIAO Junjie, et al. Research on single-core submarine cable mismatched circulation conditions and evaluation method[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1770 – 1779.
- [25] 陈悦. 高压单芯电缆接地环流及其温度场与载流量的分析与计算[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [26] 张磊, 俞恩科, 陈国志, 等. 提升海底电缆载流量的2种方法及其试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2716 – 2722.
ZHANG Lei, YU Enke, CHEN Guozhi, et al. Two methods for upgrading ampacity of submarine cables and their experimental study[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2716 – 2722.

收稿日期: 2024-02-22; 网络首发日期: 2024-07-24

作者简介:

李岩(1985), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为高压电力电缆局部放电检测与定位、电缆绝缘检测及老化特性, yan.li@ncepu.edu.cn;

宋浩源(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电缆状态检测、电缆护套阻燃材料, 220222213211@ncepu.edu.cn;

齐磊杰(1995), 男, 硕士, 研究方向为新型电缆护套阻燃材料, 1768215768@qq.com。