

考虑环流的双回异构登陆段海底电缆温度与载流量仿真分析

周远翔^{1,2}, 付新亚¹, 吕微微^{1,3}, 陈健宁², 陈 鸿⁴, 蔡长铭⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系新型电力系统运行与控制全国重点实验室, 北京 100084; 3. 新疆工程学院能源工程学院, 乌鲁木齐 830023; 4. 国网福建省电力有限公司厦门供电公司, 厦门 361000;)

摘 要: 海底电缆是电网建设的重要组成部分, 金属护套环流和铠装环流的大小是海底电缆工程设计和运行的重要参考依据。针对现有文献中计算海缆温度场载流量时未考虑整体线路环流大小、影响计算精度的问题, 建立了考虑整体敷设条件的金属护套、铠装环流与电缆温度分布的场路耦合计算模型, 通过 MATLAB 对双回异构海缆三相电路的环流进行计算, 以电流为耦合项, 通过有限元仿真软件建立电磁-热-流多物理场耦合的双回异构海缆温度分布仿真模型, 研究了计及环流作用的双回异构登陆段海底电缆载流量及温度变化情况, 提出了同时考虑环境散热条件和内部环流损耗的登陆段载流量优化方案。研究结果表明: 考虑整体线路环流的仿真模型与传统仿真相比具有更高的计算准确度, 最大误差可以从 9.47%降低到 0.63%; 当空气流速 >0.5 m/s 时, 登陆段电缆沟内的对流热通量趋于饱和, 使得电缆的载流量和绝缘温差变化整体趋势为先急剧增加后趋于稳定; 采用充海水叠加降低环流的载流量优化方案时, 能将充油海缆、XLPE 海缆的载流量分别提升 49.9%、49.6%。该研究可为登陆段海缆的载流量计算和工程敷设提供参考和思路。

关键词: 海底电缆; 载流量; 金属护套环流; 铠装环流; 对流热通量; 多物理场耦合

Simulation Analysis of Temperature and Current Carrying Capacity of Submarine Cables in the Dual Loop Heterogeneous Landing Section Considering Circulation

ZHOU Yuanxiang^{1,2}, FU Xinya¹, LYU Weiwei^{1,3}, CHEN Jianning², CHEN Hong⁴, CAI Changming⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Energy Engineering, Xinjiang University of Engineering, Urumqi 830023, China; 4. Xiamen Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: Submarine cables are an important component of power grid construction, and the size of metal sheath circulation and armor circulation is an important reference for the design and operation of submarine cable engineering. In the existing literature, the overall line circulation size is not considered in the calculation of the temperature-field current-carrying capacity of submarine cables, thus the accuracy is affected. Therefore, we established a field circuit coupling calculation model that considers the overall laying conditions of the metal sheath, armor circulation, and cable temperature distribution. The circulation of the three-phase circuit of the double circuit heterogeneous submarine cable is calculated by the MATLAB, and the electromagnetic thermal current multi-physical-field coupling simulation model of the double-circuit heterogeneous submarine cable temperature distribution is established by finite element simulation software with current as the coupling term. The current-carrying capacity and temperature changes of the double-circuit heterogeneous landing section submarine cable considering the effect of circulation are studied, and an optimization scheme for the landing section current-carrying capacity considering both environmental heat dissipation conditions and internal circulation losses is proposed. The research results indicate that the simulation model considering the overall line circulation has higher computational accuracy compared to traditional simulation, and the maximum error can be reduced

from 9.47% to 0.63%. When the air velocity is greater than 0.5 m/s, the convective heat flux in the cable trench of the landing section tends to saturate, causing the overall trend of the cable's current-carrying capacity and insulation temperature difference to first increase sharply and then stabilize. When adopting the optimization scheme of reducing circulation by adding seawater, the current-carrying capacity of oil filled submarine cables and XLPE submarine cables can be increased by 49.9% and 49.6%, respectively. This study can provide reference and ideas for the calculation of current-carrying capacity and engineering laying of landing section submarine cables.

Key words: submarine cable; current carrying capacity; metal sheath circulation; armor circulation; convective heat flux; multi physics field coupling

0 引言

随着双碳目标的有序推进以及沿海地区对能源需求的快速增长, 高压海底电缆在海上风电、电网互联、海岛与海上平台供电等能源开发方式中起着越来越重要的作用^[1-3]。我国海底电缆的结构主要分为绕包型聚丙烯层压纸(poly-propylene laminated paper, PPLP)充油海缆和挤包型交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)海缆^[4]。在相同截面积下, 充油海缆较 XLPE 海缆的绝缘厚度更小、长期允许载流量更大、质量更轻且价格更低, 但同时充油海缆也存在着维护成本较高且具有漏油的风险^[5]。随着海上风电的快速发展、沿海城市用电量的急剧增加, 双回路乃至多回路海底电缆敷设方式逐渐增多, 不可避免地会出现相同电压等级、不同结构海底电缆敷设在同一电缆沟的情况, 此时海缆的载流量和温度分布会受到临近海缆的影响, 传统计算方法的局限性逐渐显现。

海底电缆的载流量是指其在最高允许温度下, 线芯导体允许通过的最大电流值。其中充油海缆的最高允许温度为 85 °C^[6]、XLPE 海缆的绝缘材料的最高允许温度为 90 °C^[7]。海底电缆由于其特殊的敷设环境, 通常采用两端互联接地方式, 会产生较大环流, 导致海缆温升明显, 引起绝缘老化损耗、降低海底电缆的载流量^[8-9]。因此, 研究考虑护套环流、铠装环流的登陆段海底电缆温度场和载流量仿真对海底电缆登陆段的实际敷设具有重要意义。

目前对于电缆载流量的计算方法主要有 3 种: 试验法、解析法和数值法^[10-11]。其中, 试验法耗费大量人力、物力、财力, 存在较大局限性^[12]; 解析法又称热力模型法, 其计算结果过于保守, 不能充分利用电缆的载流能力^[13]。数值法包括边界元法、差分法和有限元法, 其中有限元法能很好地模拟仿真各种敷设条件下电缆的运行状况, 成为近年来研究海缆温度场和载流量计算的主要手段^[14]。近年来

国内外学者通过有限元分析法计算了登陆段海缆的温度分布和载流量大小^[15-16], 但是并未考虑护套环流和铠装环流的作用。文献^[17]通过有限元计算出护套的环流, 进而分析载流量大小对环流的影响, 但是该方法不能计算出不同运行环境条件下的导体温度与环流的关系; 文献^[18]通过有限元仿真分析了三芯海底电缆的金属护套环流对导体发热的影响, 提出了考虑护套环流的海缆运行载流量的计算方法, 但是并未验证其对存在更为复杂电磁耦合关系的双回路海缆是否适用。

海底电缆在登陆以后的散热条件远不如其他区段, 登陆段海缆允许载流量一般只有海底段的 60%~70%^[19]。因此研究登陆段载流量优化方案具有重要意义。文献^[20]提出将钢丝铠装换成铝合金丝铠装以及在铅包铠装回路串联电阻的方法, 以此降低金属护套铠装的环流, 使海缆载流量得到一定的提升; 文献^[21]通过 COMSOL 软件构建了登陆段的电-热耦合模型, 比较了冷水管循环冷却、回填特殊土壤和充满海水 3 种方法对海缆登陆段载流量的提升效果, 最终得出充海水更具有工程可实现性。上述文献都是以单根电缆为研究对象, 且将环境散热条件和内部环流损耗的影响分开考虑, 具有一定的局限性。

本文根据电磁感应理论, 从双回路异构海底电缆的整体敷设环境出发, 建立了考虑整体敷设条件的金属护套、铠装环流与电缆温度分布的场路耦合计算模型, 通过 MATLAB 对双回异构海缆三相电路的环流量进行计算, 以电流为耦合项通过有限元仿真软件建立电磁-热-流多物理场耦合的双回异构海缆温度分布仿真模型, 并分析考虑环流的双回异构海底电缆在登陆段的载流量和温差大小, 以及环流大小对导体温度的影响, 提出同时考虑外部环境损耗和内部环流损耗的登陆段海底电缆载流量的优化方案。本研究可为登陆段海底电缆的多回路环流研究和工程敷设提供一定理论参考。

1 环流计算模型

当双回路单芯海底电缆正常运行时, 各电缆线芯导体通过的交变电流会在缆芯附近产生交变的磁场, 与周围及自身的电缆金属护套和铠装层相交链产生感应电流和电动势^[22]。同时, 电缆之间的金属护套和铠装中的交变感应电流产生的交变磁通之间也会相互影响, 产生相应的感应电动势。其中一个回路的等效电路图如图 1 所示^[23]。

图 1 中 I_{si} 、 I_{ai} 分别表示第 i 相电缆的护套环流和铠装环流, 下标 i 取 1—3, 分别表示此回路 A、B、C 三相海缆; U_{si} 、 U_{ai} 分别表示电缆中的负荷电流对第 i 相电缆的护套、铠装产生的感应电压; U'_{si} 、 U'_{ai} 分别表示电缆各相护套环流在第 i 相电缆的护套、铠装产生的感应电压; U''_{si} 、 U''_{ai} 分别表示各相电缆的铠装环流对第 i 相护套、铠装产生的感应电压; R_s+jX_s 表示金属护套的自阻抗; R_a+jX_a 表示铠装的自阻抗; R_1 表示接地电阻; R_e 表示大地漏电阻。

根据图 1 等效电路图可以列出金属护套和铠装层环流计算方程组, 即:

$$\begin{cases} U_{s1} = (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3})(2R_1 + R_e) + I_{s1}(R_s + jX_s) + U'_{s1} + U''_{s1} \\ U_{s2} = (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3})(2R_1 + R_e) + I_{s2}(R_s + jX_s) + U'_{s2} + U''_{s2} \\ U_{s3} = (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3})(2R_1 + R_e) + I_{s3}(R_s + jX_s) + U'_{s3} + U''_{s3} \\ U_{a1} = (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3})(2R_1 + R_e) + I_{a1}(R_a + jX_a) + U'_{a1} + U''_{a1} \\ U_{a2} = (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3})(2R_1 + R_e) + I_{a2}(R_a + jX_a) + U'_{a2} + U''_{a2} \\ U_{a3} = (I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3})(2R_1 + R_e) + I_{a3}(R_a + jX_a) + U'_{a3} + U''_{a3} \end{cases} \quad (1)$$

此外, 环流大小与相间距和回路距离有关, 本文采用比例法表示各个电缆之间的距离关系, 如图 2 所示。

图 2 中, A、B、C 和 a、b、c 分别表示 2 个回路的三相; d_1 — d_{14} 分别表示各相电缆金属护套(铠装)之间的轴心距离与 A、B 相金属护套(铠装)轴心距离 S 的比率^[24]。

假设流过 2 个回路各相的负荷电流分别为 I_A 、 I_B 、 I_C 和 I_a 、 I_b 、 I_c 。以 A 相为例, 根据电磁感应理论^[25], 可以得到:

$$U_{s1} = -j\omega l \varphi_A \quad (2)$$

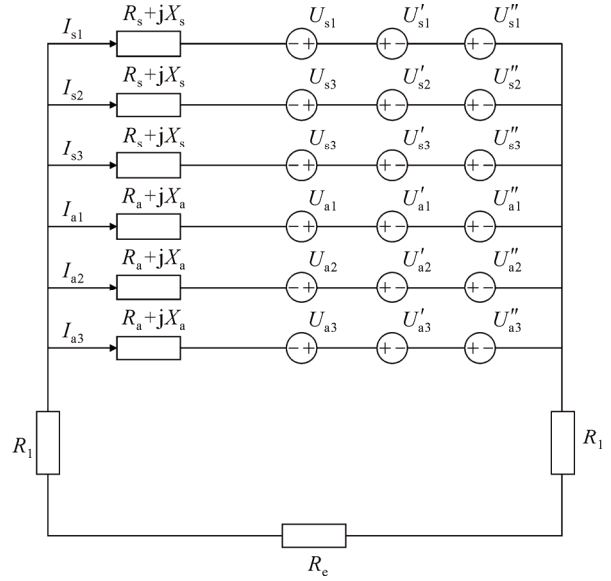


图 1 等效电路图

Fig.1 Diagram of equivalent circuit

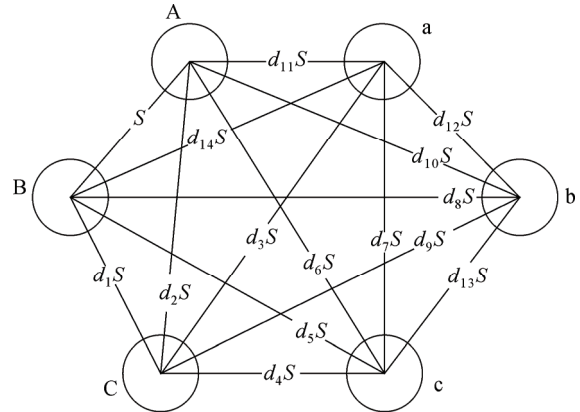


图 2 双回路任意排列电缆金属护套(铠装)中心距比率表示
Fig.2 Ratio of the center distance between the two conductors in a dual-circuit random-lay cable metal sheath (armor) representation

$$\varphi_A = 2 \times 10^{-7} (I_B \ln \frac{S}{r_s} + I_C \ln \frac{d_2 S}{r_s} + I_a \ln \frac{d_{11} S}{r_s} +$$

$$I_b \ln \frac{d_{10} S}{r_s} + I_c \ln \frac{d_6 S}{r_s}) \quad (3)$$

$$U'_{s1} = j(I_{s2} X_{12} + I_{s3} X_{13} + I'_{s1} X_{14} + I'_{s2} X_{15} + I'_{s3} X_{16}) \quad (4)$$

$$U''_{s1} = j(I_{a1} X_{sa} + I_{a2} X_{12} + I_{a3} X_{13} + I'_{a1} X_{14} + I'_{a2} X_{15} + I'_{a3} X_{16}) \quad (5)$$

式中: l 为海缆线路的长度; φ_A 为其他相负荷电流与 A 相电缆护套之间产生的磁通; ω 为角频率; r_s 为海底电缆金属护套的几何平均半径; X_{uv} 表示 u 相与 v 相之间的互感抗; 下标 u 、 v 为双回路电缆的

编号, 取值为 1—6。

可根据电磁感应理论求得护套、铠装的自感抗以及各相护套、铠装之间的互感抗:

$$X_s = 2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D_e}{r_s} \quad (6)$$

$$X_a = 2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D_e}{r_a} \quad (7)$$

$$X_{uv} = 2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D_e}{d_{uv}} \quad (8)$$

式中: X_s 、 X_a 分别为长度 l 的金属护套、铠装的自感抗; D_e 为大地等值回路深度; d_{uv} 为第 u 根海缆和第 v 根海缆的中心距离。其他相参数计算方法同理。

结合式(1)一式(8), 将式(1)改写成矩阵表达式:

$$\mathbf{I} = \mathbf{U} \times \mathbf{Z}^{-1} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{I}$ 是各相金属护套和铠装的环流矩阵; $\mathbf{U}$ 是各相金属护套和铠装的感应电压矩阵; $\mathbf{Z}^{-1}$ 为铠装和护套阻抗矩阵的逆矩阵。

编写计算程序即可计算不同结构参数、不同敷设间距等情况下的护套环流和铠装环流。

2 考虑护套环流的电磁-热-流模型

2.1 控制方程

本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件, 结合 MATLAB 计算所得的环流值, 构建充油海缆、XLPE 海缆并行敷设的 220 kV 双回异构海缆登陆段电磁-热-流多物理场耦合模型, 各物理场及其耦合可使用如下控制方程进行描述^[26]。

电磁场控制方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{J}_n = \sigma_n \mathbf{E} + j\omega\mathbf{D} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量; $\mathbf{A}$ 为磁矢势; $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量; $\mathbf{J}_e$ 为金属护套、铠装的环流密度矢量; $\mathbf{J}_s$ 为电缆导体的电流密度矢量^[27]; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{J}_n(n=s,e)$ 为电流密度矢量; σ_n 为对应材料的电导率; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量。

温度场控制方程为:

$$\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (11)$$

式中: ρ 为材料密度; C_p 为恒压热容; $\mathbf{v}$ 为速度; T 为材料温度; k 为材料的导热系数; Q 为热源单位体积的发热功率。

流场控制方程为:

$$\begin{cases} \rho_l (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \mathbf{v}) \mathbf{I}^* \\ \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: ρ_l 为流体密度; p 为流体压强; μ 为流体动力黏度; $\mathbf{I}^*$ 为单位矩阵。

电磁热耦合控制方程为:

$$\begin{cases} Q = Q_s + Q_e \\ Q_s = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J}_s \cdot \mathbf{E}^*) \\ Q_e = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J}_e \cdot \mathbf{E}^*) \end{cases} \quad (13)$$

式中: Q_s 为导体层的焦耳损耗; Q_e 为金属层与铠装层的发热损耗; $\text{Re}(\cdot)$ 表示取复数的实部; $\mathbf{E}^*$ 为电场的共轭形式。

流热耦合控制方程为:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \rho_l C_{p2} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right) + \nabla \cdot \mathbf{q} + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{v} + \\ &\quad \frac{T}{\rho_l} \frac{\partial \rho_l}{\partial T} \bigg|_p \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_l \right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: Q_1 为流体材料的热源; C_{p2} 为流体材料常压下的比热容; $\mathbf{q}$ 为传导热通量; $\boldsymbol{\tau} : \mathbf{v}$ 表示非等温流动过程。

2.2 计及环流的有限元仿真模型

2.2.1 电缆结构及敷设环境

本文以厦门某 220 kV 充油海缆为研究对象, 该地计划修建 220 kV XLPE 海缆作为第 2 回路, 形成双回异构的输电线路结构^[28]。充油海缆和 XLPE 海缆的主要结构参数如表 1 所示, 主要结构见图 3。

为了分析全区段的环流对电缆载流量和温度分布的影响, 将敷设环境分为深海段、浅滩段、登陆段^[29], 3 种区段分别用海底直铺、海底埋设、电缆沟 3 种方法进行敷设, 敷设环境如图 4 所示。其敷设条件如表 2 所示。

2.2.2 计及环流的有限元模型构建

由于不同区段的海底电缆的排列方式、相间距、回路间距有所不同^[30], 按照传统的阻抗计算方法会产生较大误差。为提高计算精度, 本文提出将等效电路中的阻抗、感应电压按段分配的方法, 以 A 相电缆的金属护套的阻抗为例, 其总阻抗应由深海段、浅滩段、登陆段电缆的阻抗共同组成, 如图 5 所示。

图 5 中, $R_{sm} + jX_{sm} (m=I、II、III)$, 分别代表深海段、浅滩段、登陆段)表示第 m 段电缆的金属护套的阻抗。

表 1 电缆主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of cables		
电缆类型	结构	外径/mm
充油海缆	油道	8.0
	镀锌螺旋管	18.8
	铜导体	30.2
	导体屏蔽层	30.9
	PPLP 绝缘	47.6
	铝合金护套	52.6
	不锈钢加强层	55.6
	铜导体回流层	58.1
	间隔层	64.7
	PE 防蛀虫	65.6
	缓冲层	68.2
XLPE 海缆	镀锌铠装	76.1
	PP 外披	80.1
	电缆结构	17.1
	阻水铜导体	17.7
	半导体包带	19.2
	基础导体屏蔽	44.2
	XLPE 绝缘层	45.4
	半导体屏蔽层	46.4
	缓冲阻水层	50.3
	金属护套	53.7

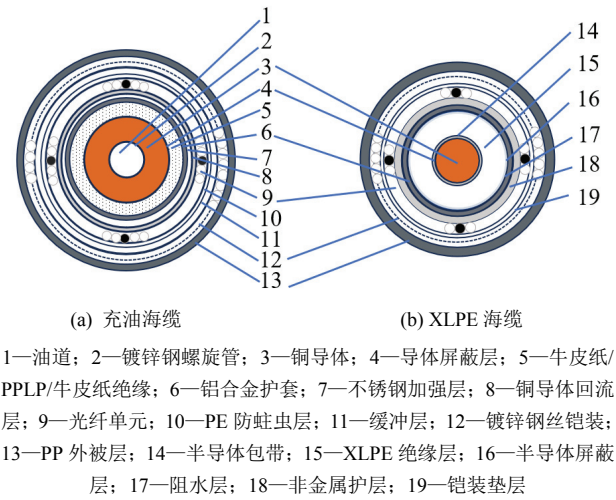


Fig.3 Diagram of cable structure

感应电压的等效方法同上，由此可将式(1)中的阻抗和感应电压按实际环境修正为：

$$\begin{cases} R_s + jX_s = \sum (R_{sm} + jX_{sm}) \\ R_a + jX_a = \sum (R_{am} + jX_{am}) \\ U_{si}^n = \sum U_{sim}^n \\ U_{ai}^n = \sum U_{aim}^n \end{cases} \quad (15)$$

式中： $R_{am}+jX_{am}$ 为第 m 段电缆的金属护套的阻抗；

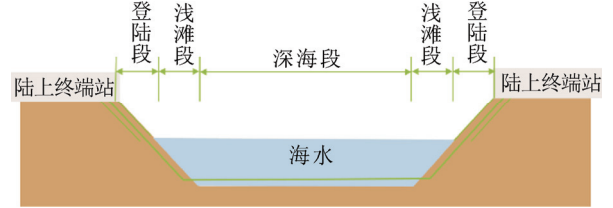


图 4 海底电缆敷设示意图

Fig.4 Schematic diagram of submarine cable laying

表 2 不同敷设环境下的环境参数

Table 2 Environmental parameters under different laying environments			
参数	数值		
	深海段	浅滩段	登陆段
长度/m	3 300	200	250
埋深/m		2	
相间距/m	25	5	0.5
回路间距/m	25	5	0.5
土壤导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	1	0.8	0.8
海水/空气流速/(m·s ⁻¹)	0.5		0

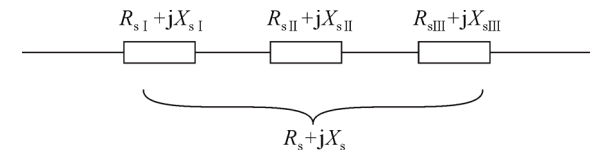


图 5 等效阻抗图

Fig.5 Diagram of equivalent impedance

U_{sim}^n 、 U_{aim}^n 分别为第 m 段电缆的金属护套和铠装上的感应电压； n 为上标符号，分别对应 U 、 U' 、 U'' 。

将修正后的方程在 MATLAB 软件中编写成以电缆电流为自变量、各段电缆环流为因变量的函数程序，通过 COMSOL 中的 Live Link 模块将 MATLAB 中的环流计算函数作为电磁物理场中的金属护套、铠装的线圈电流，从而实现计及全区段环流的有限元仿真模型的构建，进而通过逐级升流法测试导体温度是否达到阈值来确定电缆载流量，计算流程图如图 6 所示。此方法可推广到各种复杂环境下计及全区段电缆环流的计算。

采用电缆沟敷设是海缆在登陆段敷设的主要方式，其仿真的几何模型参数见表 3，仿真模型如图 7 所示。

2.2.3 边界条件和网格剖分

仿真主要涉及到电磁场、热场、流场 3 个模块，边界条件如下所述。

表 3 几何模型参数

Table 3 Geometric model parameters	
参数	数值/m
电缆沟左右沟壁高度	1.6
电缆沟左右沟壁厚度	0.1
电缆沟下沟壁长度	2.9
电缆沟下沟壁厚度	0.1
电缆沟上盖板长度	4.0
电缆沟上盖板厚度	0.2
土壤域长度	6.0
土壤域高度	6.0
土壤域宽度	0.5

1) 电磁场边界条件: 将海底电缆的线芯、金属护套、铠装作为线圈电流; 使用 COMSOL 软件中的 MATLAB-Live Link-COMSOL 模块, 将随载流量变化的环流函数代入金属护套和铠装层的线圈电流中。

2) 传热边界条件: 将空气部分设置为流体传热, 土壤、电缆沟壁为固体传热。以电磁模块中电磁损耗作为热源, 施加到海缆线芯、金属护套、铠装中, 即可得到电磁热。下边界为恒温边界, 温度为 20 ℃; 左右边界为土壤边界, 热通量为 0; 设置电缆沟上表面的温度为 30 ℃。

3) 流场边界条件: 设置电缆沟内空气为流体域, 空气能自由流动。

网格剖分: 对海底电缆的主体部分用自由三角形剖分再进行扫略, 再对其他部分进行自由四面体剖分。

3 结果分析

3.1 模型验证

为验证计及环流的海底电缆仿真模型的准确性, 采用某地海底电缆实测数据与未计及全区段环流影响的传统仿真模型、本文提出的仿真模型做比较。由于 XLPE 海缆回路尚未运行^[28], 仅以单回路充油海缆模型做比较, 当实际运行中 A、B、C 三相电流分别为 232.15、252.66、249.13 A 时, 电缆光纤测温所得的实测值与仿真所得的温度如表 4 所示。其中, 误差 1、误差 2 分别为传统仿真、本文仿真与实测温度之间的误差。

由表 4 可知, 在相同条件下, 传统仿真模型计算得到的 A、B、C 三相电缆光纤测温点处温度与现场实测温度的相对误差分别为 6.92%、9.47%、8.33%; 而采用本文提出的计及环流仿真模型计算

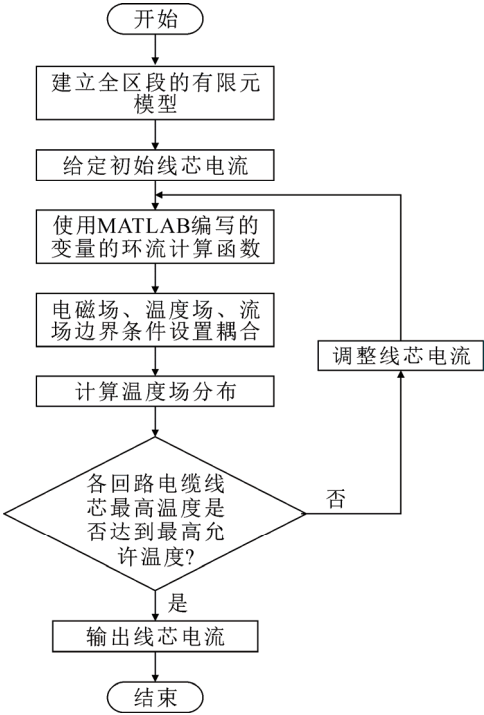


图 6 海底电缆载流量计算流程图

Fig.6 Flowchart for calculating the current-carrying capacity of submarine cables

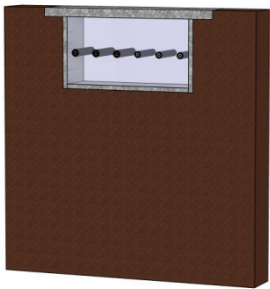


图 7 登陆段仿真模型

Fig.7 Login segment simulation model

表 4 仿真与实测海缆光纤处温度的数值比较

Table 4 Numerical comparison of simulated and measured temperature at the fiber optic point of submarine cables					
电缆	实测温度/℃	传统仿真数据		本文仿真数据	
		温度/℃	相对误差/%	温度/℃	相对误差/%
A 相	24.42	22.73	6.92	25.73	5.36
B 相	27.04	24.48	9.47	27.21	0.63
C 相	26.29	24.10	8.33	26.89	2.25

得到的三相光纤测温点处温度与实测温度之间的相对误差分别为 5.36%、0.63%、2.25%, 均小于传统仿真模型所得结果误差, 且最高能将相对误差从 9.47%降低到 0.63%, 由此可说明本文构建的仿真模型相较传统仿真模型具有更高的精度, 这也验证了

本文构建的仿真模型的结构以及材料参数的合理性。

3.2 登陆段海缆载流量和温度分布的影响因素

3.2.1 空气流速对登陆段海缆的影响

海底电缆在电缆沟中敷设时, 由于内部空气流速较低且空气的导热系数较小, 导致沟内的散热能力较差。电缆沟内不同空气流速沿电缆轴向流动时, 海缆的载流量及对流热通量变化情况如图 8、图 9 所示。

从图 8 中可以看出, 充油海缆和 XLPE 海缆的载流量随空气流速变化的趋势相同, 当空气流速 <0.5 m/s 时, 载流量随空气流速变化幅值较大; 当空气流速 >0.5 m/s 后, 载流量随空气流速变化幅值逐渐减小, 且由于液体介质的对流散热作用, 充油海缆的载流量始终高于 XLPE 海缆的载流量; 当空气流速由 0.001 m/s 增加到 0.1 m/s 时, 充油和 XLPE 海缆的载流量分别从 993、873 A 上升到 2 207、1 982 A, 分别提升了 122.2%、127%, 增加幅度较大; 而当空气流速由 0.5 m/s 增加到 2 m/s 时, 充油和 XLPE 海缆的载流量分别从 2 736、2 482 A 上升到 3 018、2 847 A, 分别增加约 10.3%、14.7%, 载流量增加幅度趋于平缓。

为对上述现象的原因进行分析, 仿真得到电缆沟敷设时在不同空气流速下的对流热通量大小, 如图 9 所示。当空气流速为 0.001 m/s 时对流热通量仅为 131 W/m^2 , 仿真计算得到此时总热通量为 327 W/m^2 , 对流热通量约占总热通量的 60%; 而当空气流速为 0.1 m/s 时, 对流热通量上升到 $1.37 \times 10^4 \text{ W/m}^2$, 比空气流速为 0.001 m/s 时增大了约 100 倍, 且此时对流热通量在总热通中占比高达 99%。由此可知, 在空气流速较低的情况下, 热量传递由对流热通量和传导热通量共同作用, 且由于对流热通量较低, 使得电缆产生的热量在电缆本体中堆积, 因此载流量较小; 而当流速 >0.1 m/s 时, 对流热通量占主导地位, 为热量传递的主要方式, 电缆产生的热量与空气进行热交换, 故电缆的载流量增大。空气流速由 0.5 m/s 增大到 1 m/s 时, 对流热通量由 $6.79 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 增加到 $1.37 \times 10^5 \text{ W/m}^2$, 增加了约 1 倍, 由此可见对流热通量的变化逐渐减小, 趋于饱和, 使得空气流速对海缆载流量的影响变小。

登陆段海缆绝缘温差随空气流速的变化如图 10 所示。充油海缆和 XLPE 海缆的绝缘温差变化趋势同载流量相似, 其原因是: 当空气流速 <0.5 m/s 时, 随着空气流速的增加, 对流热通量大幅增加,

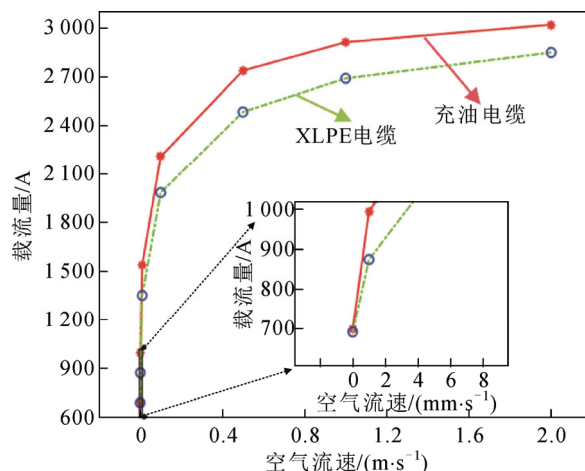


图 8 不同空气流速下的海缆载流量曲线

Fig.8 Curve of submarine cable current under various air flow velocities

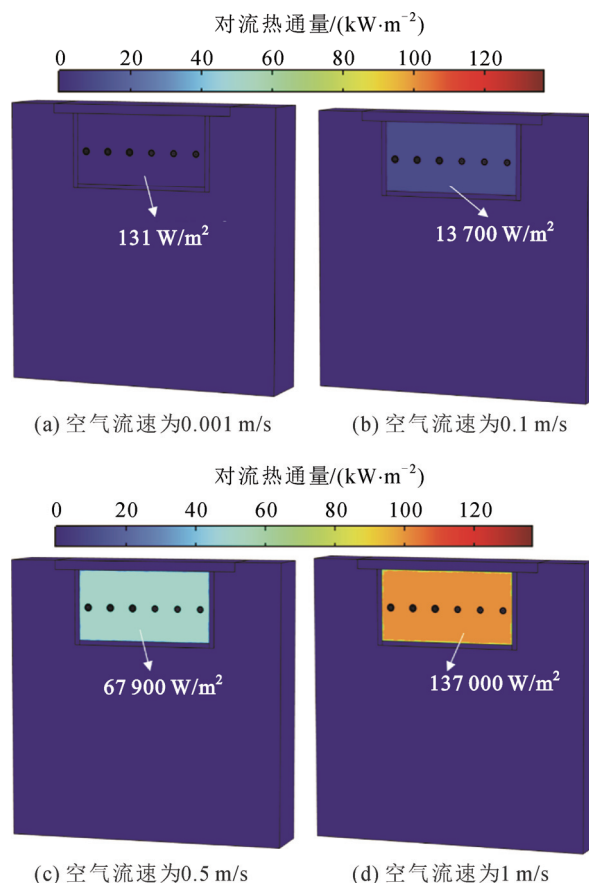


图 9 电缆沟敷设时在不同空气流速下的对流热通量大小

Fig.9 Convective heat flux at different air velocities during cable trench laying

空气的散热效果逐渐显著, 使得电缆内部的温度梯度增大, 绝缘层温差逐渐变大; 而当空气流速 >0.5 m/s 时, 对流热通量趋于饱和, 电缆与外界热交换趋于稳定, 因此绝缘温差值也趋向稳定。同

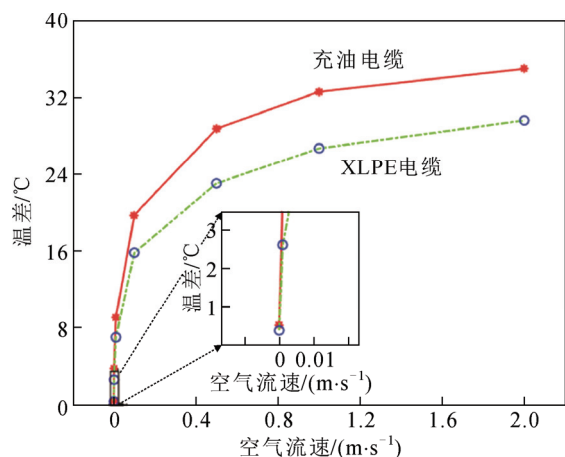


图 10 海缆绝缘温差随空气流速的变化

Fig.10 Insulation temperature difference of submarine cables varying with air flow velocity

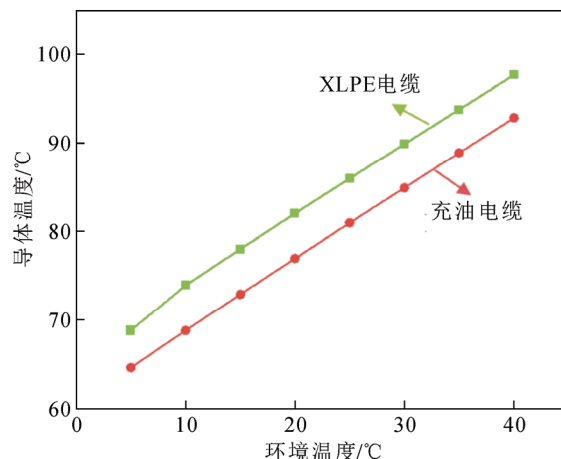


图 11 环境温度对海缆导体温度的影响

Fig.11 Influence of environmental temperature on the temperature of submarine cable conductors

时可以得到, 当空气流速为 0.1 m/s 时, 充油海缆和 XLPE 海缆的绝缘温差分别为 19.71、15.8 °C, 由于海底电缆绝缘的温差 > 20 °C 时会对电缆寿命造成较大影响^[31], 因此电缆沟内空气流速应 < 0.1 m/s。

3.2.2 环境温度对海缆导体温度的影响

控制电缆沟的空气为自然对流, 环境温度为 5~40 °C, 仿真温度设置间隔为 5 °C, 研究电缆沟表面环境温度对电缆沟内电缆的影响, 变化规律如图 11 所示。

由图 11 可知, 环境温度对充油海缆和 XLPE 海缆的影响相同, 导体温度与其为线性正相关。当环境温度为 5 °C 时, 充油海缆、XLPE 海缆导体温度分别为 69.84、64.66 °C; 当环境温度升高到 40 °C 时, 导体温度分别升高到 97.79、92.95 °C, 可得出环境温度每升高 5 °C, 电缆沟内电缆导体温度升高约 4 °C。因此在确定电缆安全载流量时也需要考虑环境温度下的影响。

3.2.3 环流对海缆温度的影响

以 XLPE 海缆为例, 当其达到最大安全载流量时, 在不同空气流速下, 将金属护套和铠装环流共同降低为原来的 10%~90%, 并每隔 10% 计算海缆的导体温度。导体温度在不同空气流速下随环流变化的情况如图 12 所示。自然对流下, XLPE 海缆的电磁损耗密度随环流的变化情况如图 13 所示。

由图 12 可得, 电缆导体温度随环流的增大呈指数形式增大, 这是因为分析图 13 可知, 随着环流的逐渐增大, 导体上产生的电磁损耗密度几乎没有变化, 而金属护套和铠装上的电磁损耗密度逐渐增

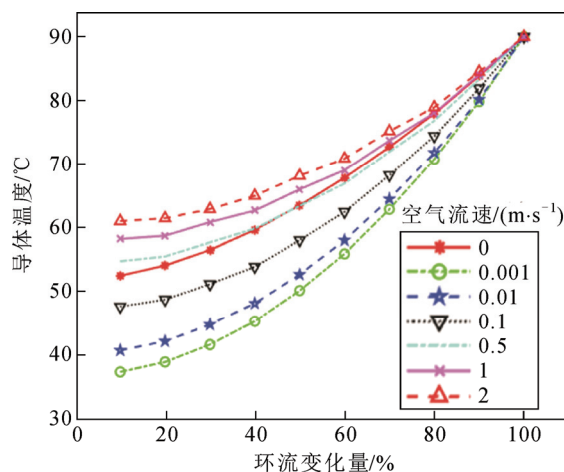


图 12 XLPE 海缆导体温度与环流大小的关系

Fig.12 Relationship between conductor temperature and circulating current size of XLPE cable

大。当环流从原来的 10% 增加到 40% 时, 金属护套和铠装上的电磁损耗密度和从 203.4 W/m³ 增加到 2.37×10³ W/m³, 增大约 2.16×10³ W/m³; 当环流从原来的 60% 增加到 90% 时, 金属护套和铠装上的电磁损耗密度和从 5.38×10³ W/m³ 增加到 1.22×10⁴ W/m³, 增大约 6.8×10³ W/m³。由此可得, 随着环流的增大, 电磁损耗的增加速率逐渐增大, 因此产生的热量呈指数形式增大。

同时由图 12 可以得到, 在环流由计算值降低到原来的 10% 的前提下, 当空气流速为 2、0.5、0.001 m/s 时, 导体温度由 90 °C 分别降低到 61、55.2、38 °C, 分别降低约 32%、38.7%、58%。由此可得, 当空气流速 > 0.5 m/s 时, 导体温度受环流的影响较

小。这是由于随着空气流速的增加,环流产生的热量大部分通过热对流与空气进行热交换,因此环流大小对导体温度的影响变小。当边界空气流速为 0 时,由于温度梯度的存在,电缆附近存在自然对流,空气流速较高^[32],电缆附近的对流热通量较大,因此环流大小对自然对流时的电缆影响较小。

3.3 登陆段海缆载流量优化分析

由于登陆段电缆沟较长,采用通风实现全登陆段上的强迫对流较困难,难以有效提升载流量;回填高导热系数土壤会产生较大的工程成本;相比之下,电缆沟充海水的方案具有更低的成本和工程可实现性^[21]。本文综合考虑内外热阻的影响,提出登陆段电缆沟就地取材充海水和降低环流 2 者共同作用的方法,以此优化登陆段的海缆载流量。

在电缆沟内充海水的情况下,环流变化为原来的 10%~90%,导体温度变化情况如图 14 所示,导体温度的变化规律与在空气中相同,随环流的增加呈指数增长。当环流从计算值降低为其 10%时,充油海缆、XLPE 海缆的导体温度分别从 90、85 ℃降低为 43.44、40.56 ℃,分别降低约 51.7%和 52.3%。

在实际工程中可使用在金属护套和铠装回路

之间串联电阻的方法来降低铠装和护套的环流^[20]。为了对比电缆沟充海水、电缆沟充海水叠加降低电缆环流 2 种方式对载流量的优化效果,在仿真中控制导体温度达到最高允许温度,并将环流降低为原来的 70%,分析其载流量的变化情况。电缆沟优化前、充海水优化、充海水且叠加降低环流优化 3 种情况下的载流量,如表 5 所示。

由表 5 可知,电缆沟内充海水时,由于海水的导热系数较空气更高,因此海水的散热性更好,电缆沟充海水后的充油海缆与 XLPE 海缆的载流量比优化前提高 18.8%、17.1%。

而采用充海水叠加降低环流的优化方案能够在提高外界环境散热条件的同时降低海缆本体的发热损耗,将充油海缆、XLPE 海缆的载流量从 697、690 A 提升到 1 045、1 032 A,分别增大约 49.9%、49.6%,比只充海水的优化方案分别提高 31.1%、32.5%。因此,采用电缆沟充海水叠加降低环流的优化方案,即同时考虑外部环境散热内部环流损耗,能更加有效地提升登陆段海缆的载流量。

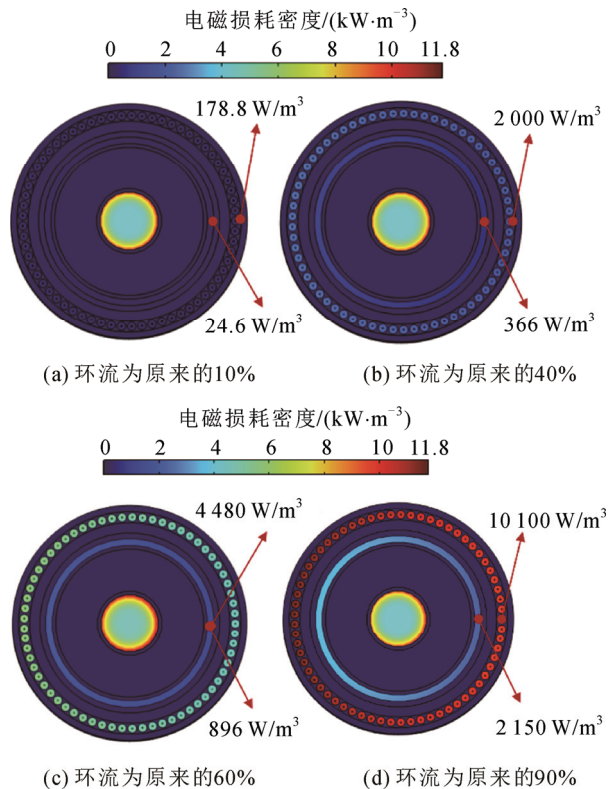


图 13 XLPE 海缆电磁损耗密度与环流大小的关系

Fig.13 Relationship between electromagnetic loss density and circulating current size of XLPE submarine cables

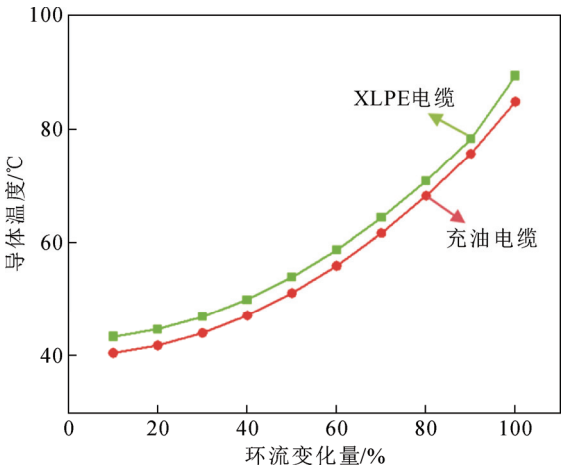


图 14 电缆沟充海水时环流缩小倍率与导体温度的关系
Fig.14 Relationship between the reduction ratio of circulating current and conductor temperature when filling cable trenches with seawater

表 5 3 种情况下海缆的载流量大小

电缆	载流量/A		
	优化前	充海水	充海水叠加降低环流
充油海缆	697	828	1 045
XLPE 海缆	690	808	1 032

4 结论

1) 本文建立了考虑整体敷设条件的金属护套、铠装环流与电缆温度分布的场路耦合计算模型, 针对充油海缆和 XLPE 海缆混合敷设的 220 kV 输电系统研究了计及环流作用的双回异构登陆段海底电缆载流量及温度变化情况。相较现有未考虑环流的载流量仿真模型, 该模型计算最大误差可以从 9.47% 下降至 0.63%, 进一步提升了海底电缆温度分布和载流量仿真的计算精度。

2) 通过对电缆沟内环境因素的仿真分析可以得到: 由于电缆结构的差异, 相同条件下, 电缆沟内充油海缆的载流量和绝缘温差均大于 XLPE 海缆。当空气流速 $< 0.5 \text{ m/s}$ 时, 电缆的载流量和温差受空气流速的影响较大。当空气流速 $> 0.5 \text{ m/s}$ 时, 由于对流热通量趋于饱和, 使得流速对海载流量、绝缘温差的影响逐渐变小。

3) 根据环流大小对导体温度的仿真研究结果可得, 随着环流的增大, 电磁损耗的增加速率逐渐增大, 因此电缆导体温度随环流的增大呈指数形式增大; 环流受空气流速的影响较大, 在环流缩小到原来的 10% 的前提下, 当空气流速为 0.001、2 m/s 时, 温度分别降低 32%、58%。

4) 采用电缆沟充海水叠加降低环流的载流量优化方案时, 能够在提高外界环境散热条件的同时降低海缆本体的发热损耗, 对电缆沟充海水叠加 70% 环流进行仿真验证, 在该条件下充油海缆、XLPE 海缆的载流量从 697、690 A 分别提升到 1 045、1 032 A, 分别增大约 49.9%、49.6%, 比只充海水的优化方案分别提高 31.1%、32.5%, 具有更好的优化效果。

参考文献 References

- [1] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [2] 周远翔, 陈健宁, 张灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [3] PURVINS A, SERENO L, ARDELEAN M, et al. Submarine power cable between Europe and North America: a techno-economic analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 131-145.
- [4] 陈卓正, 李华强, 钟力生. 聚丙烯层压纸绝缘电缆发展现状[J]. 绝缘材料, 2022, 55(11): 1-9.
CHEN Zhuozheng, LI Huaqiang, ZHONG Lisheng. Development status of polypropylene laminated paper insulated cable[J]. Insulating Materials, 2022, 55(11): 1-9.
- [5] 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(1): 1-6.
HUANG Xiaowei, LI Xiaojun, ZUO Ganqing. Application status and prospect of submarine cable projects at home and abroad[J]. Wire & Cable, 2023(1): 1-6.
- [6] 马凌, 赵远涛, 吴庆华. 海南联网工程牛皮纸绝缘和 PPL 纸绝缘充油海底电缆技术经济比较[J]. 四川电力技术, 2018, 41(2): 56-59.
MA Ling, ZHAO Yuantao, WU Qinghua. Technical and economical comparison of submarine oil-filled cables with Kraft paper and PPL paper insulation in Hainan interconnection project[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(2): 56-59.
- [7] 张洪亮, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 提高 XLPE 高压直流海缆经济性的研究展望[J]. 绝缘材料, 2021, 54(3): 1-9.
ZHANG Hongliang, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Research prospect on improving economy of XLPE HVDC submarine cable[J]. Insulating Materials, 2021, 54(3): 1-9.
- [8] XIONG L, CHEN Y H, JIAO Y, et al. Study on the effect of cable group laying mode on temperature field distribution and cable ampacity[J]. Energies, 2019, 12(17): 3397-3411.
- [9] PAN W X, MIAO J W. Research on circulating current and its suppression method of submarine long-distance cable[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 1-6.
- [10] 夏源, 赵学童, 冯勇, 等. $\pm 500 \text{ kV}$ 直流海缆在 J 型管敷设环境下的稳态载流量仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4851-4860.
XIA Yuan, ZHAO Xuetong, FENG Yong, et al. Simulation study on steady-state ampacity of $\pm 500 \text{ kV}$ DC submarine cable under J-tube laying environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4851-4860.
- [11] DE LIETO VOLLARO R, FONTANA L, VALLATI A. Experimental study of thermal field deriving from an underground electrical power cable buried in non-homogeneous soils[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 390-397.
- [12] 曲名新, 邓少平, 翟学, 等. 基于电-热-流多场耦合仿真的海底电缆载流量分析[J]. 电力勘测设计, 2022(7): 17-24.
QU Mingxin, DENG Shaoping, ZHAI Xue, et al. Ampacity analysis of submarine cable based on electric-thermal-flow multiphysics coupling simulation[J]. Electric Power Survey & Design, 2022(7): 17-24.
- [13] 边晓燕, 谌云峰, 周歧斌, 等. 基于热路解析模型的海底电缆动态温度场计算与短时允许载流量评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 793-802.
BIAN Xiaoyan, CHEN Yunfeng, ZHOU Qibin, et al. Dynamic temperature field calculation and short-time allowable ampacity evaluation of submarine cable based on thermal analytical model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 793-802.
- [14] 杨帆, 郝翰学, 王鹏博, 等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.
- [15] FAROOQ U, YANG F, SHAIKH J A, et al. Temperature field simulation and ampacity optimization of 500 kV HVDC submarine

- transmission cable[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation. Beijing, China: IEEE, 2021: 1-6.
- [16] 吴倩, 张涛, 冉华军, 等. 送电区段内典型敷设方式下海缆载流量模型分析[J]. 绝缘材料, 2023, 56(12): 111-121.
WU Qian, ZHANG Tao, RAN Huajun, et al. Analysis on ampacity model of submarine cable under typical laying mode in transmission section[J]. Insulating Materials, 2023, 56(12): 111-121.
- [17] 覃喜, 周文俊, 吕鸣, 等. 单芯海底电缆金属护层及铠装层环流的数值分析与计算[J]. 电工技术, 2022(11): 133-136.
QIN Xi, ZHOU Wenjun, LYU Ming, et al. Numerical analysis and calculation of circulation currents in metal sheath and armor of single core submarine cable[J]. Electric Engineering, 2022(11): 133-136.
- [18] JIANG H B, LEI Z C, YUAN C, et al. Operating ampacity and calculation method for AC submarine cables considering sheath circulation[C]//Proceedings of 2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation. Nanjing, China: IEEE, 2023: 612-616.
- [19] 游磊, 王健, 刘刚, 等. 采用充水电缆沟敷设方案的海缆登陆段载流量计算[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 11-16.
YOU Lei, WANG Jian, LIU Gang, et al. Calculation on carrying capacity of landing section of submarine cable laying in full-water cable trench way[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 11-16.
- [20] 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.
- [21] 胡列翔, 欧阳本红, 刘宗喜, 等. 交流500 kV海底电缆登陆段载流能力提升[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3421-3428.
HU Liexiang, OUYANG Benhong, LIU Zongxi, et al. Improvement in current carrying capacity of landing section of AC 500 kV submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3421-3428.
- [22] LIANG W, ZHOU Z C, PAN W X, et al. Study on the calculation and suppression method of metal sheath circulating current of three-phase single-core cable[C]//Proceedings of 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Macao, China: IEEE, 2019: 1-5.
- [23] 刘英, 肖阳, 苏宇, 等. 单芯交流海缆不同接地方式下的损耗计算及对载流量的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 56-62.
LIU Ying, XIAO Yang, SU Yu, et al. Loss calculation and influence on ampacity of single-core AC submarine cable under different grounding modes[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 56-62.
- [24] 陈科技, 齐炜. 混合排列方式对双回路XLPE电缆护层环流的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3736-3742.
CHEN Keji, QI Wei. Effect of mixed arrangement on current in sheaths of two-circuit arranged XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3736-3742.
- [25] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 15-18.
LIANG Yongchun. Numerical calculation of current carrying capacity of high-voltage power cables[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2012: 15-18.
- [26] 吴冰洁, 丁苒苒, 陈晨, 等. 220 kV交联海缆的低频载流能力及温度场分布仿真研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(12): 34-42.
WU Bingjie, DING Ranran, CHEN Chen, et al. Simulation on current capacity and temperature field distribution in 220 kV XLPE submarine cable under low frequency[J]. Insulating Materials, 2023, 56(12): 34-42.
- [27] 张延伟. 不同敷设方式下XLPE电力电缆温度场与载流量仿真研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2023.
ZHANG Yanwei. Simulation study on temperature field and current carrying capacity of XLPE power cables under different laying methods[D]. Hanzhong, China: Shaanxi University of Technology, 2023.
- [28] 严有祥, 杨毓庆, 陈日坤, 等. 厦门220 kV春围II路海底电缆工程概述[J]. 供用电, 2012, 29(4): 65-67.
YAN Youxiang, YANG Yuqing, CHEN Rikun, et al. Summary of submarine cable project of 220 kV Chunwei II in Xiamen[J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(4): 65-67.
- [29] 乔镜琪, 赵学童, 夏源, 等. 不同敷设方式下 ± 500 kV高压直流海缆稳态载流量仿真分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 597-607.
QIAO Jingqi, ZHAO Xuotong, XIA Yuan, et al. Simulation analysis of steady-state ampacity of ± 500 kV high-voltage DC submarine cables under different laying methods[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 597-607.
- [30] 邹宏亮, 孙云莲, 张弛, 等. 多回路电力电缆不同敷设方式对环流的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2426-2433.
ZOU Hongliang, SUN Yunlian, ZHANG Chi, et al. Effects of different multi-loop laying ways on circulating current of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2426-2433.
- [31] 韦敏, 周鲁川, 王柏森. 温度梯度下海底电缆交联聚乙烯绝缘树枝特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(1): 70-76.
WEI Min, ZHOU Luchuan, WANG Baisen. Research on electrical tree characteristics of submarine cable XLPE insulation under temperature gradient[J]. Insulating Materials, 2023, 56(1): 70-76.
- [32] 李娜, 杨昊, 李凯, 等. 不同敷设环境下高压交流海底电缆导体温度和载流量的计算分析[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(1): 17-27.
LI Na, YANG Hao, LI Kai, et al. Calculation and analysis of conductor temperature and current carrying capacity of high voltage AC submarine cable under different laying environments[J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(1): 17-27.



ZHOU Yuanxiang
Ph.D., Professor
Corresponding author

周远翔(通信作者)
1966—, 男, 博士, 教授
从事高电压与绝缘技术的教学和科研工作
E-mail: zhou-yx@tsinghua.edu.cn



FU Xinya

付新亚
1999—, 男, 硕士生
从事海底电缆接地环流的建模仿真等研究工作
E-mail: 1757834274@qq.com;