

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103968

复杂环境中海底电缆温度场及载流量模型研究^{*}

林 钰¹ 胡意茹² 李 茜¹ 张安安¹

(1. 西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 2. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100000)

摘 要:载流量是海底电缆运行调度的重要参数,受最高允许工作温度所制约,建立考虑复杂海洋环境中洋流影响的海底电缆温度场及载流量模型具有重要意义。针对传统解析法计算复杂、仅适用于特定敷设环境等问题,根据电-热-流多场耦合理论,基于有限元分析技术分别建立了埋设和铺设两种敷设方式下的高压三芯交联聚乙烯(XLPE)海底电缆温度场及载流量分析模型,并研究了洋流流速及温度对海缆载流量的影响。研究结果表明,所建模型与传统解析法相对误差在 5% 以内;相同环境因素下,铺设海缆稳态载流量比埋设高出 200~330 A 不等,且两者变化率在低流速时更灵敏,但不受洋流温度所影响;此外,短时应急载流量允许运行时间与其大小及初始缆芯温度成反比关系。

关键词:海底电缆;温度场;电-热-流耦合;有限元分析;稳态载流量;短时应急载流量

中图分类号: TM757.4; TN818 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Analysis of submarine cable temperature field and ampacity model in complex environment

Lin Yu¹ Hu Yiru² Li Qian¹ Zhang Anan¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. CNOOC Research Institute Co., Ltd, Beijing 100000, China)

Abstract: The ampacity of submarine cables is an important parameter for its operation and scheduling, which is restricted by the maximum allowable operating temperature of submarine cables. It is of great significance to establish the temperature field and ampacity model of submarine cables considering the influence of ocean currents in complex submarine environment. In view of the complicated calculation of the traditional analytical method and just suitable for specific laying environment and other problems, according to the electro-heat-flow multi-field coupling theory, based on the finite element analysis technology, the temperature field and ampacity analysis model of high-voltage three-core XLPE submarine cable under the two laying methods of burying and laying are established respectively, and studied the influence of ocean current velocity and temperature on the ampacity. The research results show that the relative error between the proposed model with the traditional analytical method is within 5%; the steady-state ampacity of the laid cable is 200~330 A higher than the buried under the same environmental factors, and the change rate of the two methods is more sensitive at low current rates, but it is not affected by the temperature of the ocean current. In addition, the allowable operating time of short-term emergency ampacity is inversely proportional to its size and initial cable core temperature.

Keywords: submarine cable; temperature field; electro-thermal-flow coupling; finite element analysis; steady-state ampacity; short-term emergency ampacity

0 引 言

随着我国海洋经济的兴起,海岛与大陆联网工程、海

上风力发电厂、海岛核电站的建设以及海上石油和天然气的开采,海底电缆输电工程作为跨海域联网工程建设的重要组成部分,其核心部件海底电缆对海上电气工程的安稳运行至关重要^[1-2]。温度及载流量是电缆运行中

收稿日期: 2021-02-04 Received Date: 2021-02-04

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2017YFE0112600)、中央引导地方科技发展专项(2021ZYD0042)、四川省科技计划 2020 区域创新项目(2020YFQ0038)资助

的两个重要动态参数,其涉及到海缆线路安全可靠、经济合理的运行以及海缆使用寿命问题。

目前海底电缆多为交联聚乙烯(XLPE)电缆^[3],其稳态载流量对应于电缆线芯温度达到 90 ℃时的稳态工作电流,即长期运行持续额定电流^[4]。稳态载流量的准确计算以及必要时刻的短时应急载流量暂态分析对优化海缆建设成本、提高海缆利用效率有着重要的意义^[5-6]。

海缆所能承受的稳态载流量大小与海缆运行温度息息相关,其最高工作温度决定了电缆的载流量^[7]。海底电缆温度场及载流量模型分析是一个复杂的电-热-流耦合问题,海缆通过载流量时内部产生的导体损耗、绝缘损耗、金属护套及铠装损耗等使得海缆各结构温度上升。而海缆热量的散失不仅与电缆本体的参数相关,还与敷设方式、环境参数有关^[8]。实际工程中海缆敷设方式有埋设和铺设两种,不同敷设方式下洋流对于海缆的冲刷散热效果并不一致,进而也导致不同敷设方式时的海缆稳态载流量存在差异。因此,考虑洋流影响的海底电缆温度场及载流量模型分析研究对保障海缆安全运行、提高海缆利用率具有重要的实际工程意义。

目前针对海缆温度场及载流量模型分析主要有解析计算和数值计算两种方法^[9-16]。解析计算法主要基于 IEC 60287 标准中各单元热阻和相关损耗的计算,建立海缆热路模型,结合传热公式进行海缆温度场和载流量的计算。但 IEC 60287 标准中公式过于复杂,计算时间较长,不适用于其他敷设类型及敷设环境较为复杂的情况,且难以获知温度瞬态变化过程。而数值计算法主要包括有限元法、有限差分法、边界元法等,其中有限元法相较于其它两种方法,更适用于处理复杂边界环境,能够方便地针对结构及敷设环境复杂的海缆温度场及载流量分析计算,成为近几年该领域的热门研究方法。文献[9]基于 IEC 60287 热路分析法和有限元法针对高压单芯海缆建立了导体及其余各层结构之间的温度关系。文献[10-11]在建立三芯海缆热路模型的基础上,计算并确定了三芯海缆各层结构间的温度关系,并通过有限元分析软件进行了仿真验证。文献[12]通过热路模型、有限元分析等多种方法对 110 kV 单芯海缆进行了不同敷设条件、不同环境温度下的稳态载流量大小计算,并分析比较了各类方法利弊。文献[13]利用 COMSOL 有限元仿真软件搭建了交直流海缆在不同敷设情况下的耦合模型,并研究分析了各种敷设情况对海缆温度场及载流量的影响。文献[14]针对高压海底电缆进行了电磁-热耦合模型搭建,分析确定不同敷设对海缆温度场及载流量的影响情况。文献[15]针对登陆处海底电缆进行了电磁-热-流耦合物理场的有限元模型建立,计算对比了不同敷设方式对海底电缆稳态载流量的影响情况。文献[16]利用有限元分析软件 COMSOL 建立了 500 kV 高压

直流海缆热-流耦合模型,对比分析了不同冷却模式对海缆载流量的提升能力。综上,上述及现有其他研究主要通过解析计算法建立海缆内部结构间的温度关系及计算特定环境下的海缆稳态载流量大小,其不仅计算量大,而且只适用于特定的敷设环境,难以满足实时动态变化的复杂海洋环境。此外,已有基于有限元分析计算海缆内部温度场及载流量的研究未能充分考虑复杂海洋环境中的环境影响因素,且大多关注于稳态计算结果,未在稳态基础上,对海缆温度场及载流量暂态分析进行深度剖析。

本文针对高压三芯交联聚乙烯海底电缆,根据电-热-流多场耦合理论,基于有限元分析技术建立了海缆及其敷设环境的温度场及载流量分析模型,在充分考虑海缆实际敷设情况及所在复杂海洋环境当中影响温度场及载流量分析计算的环境因素的前提下,分别研究了埋设和铺设两种不同敷设方式、洋流流速(0~2 m/s)、洋流温度(10 ℃~30 ℃)时的海缆稳态载流量差异。并以海缆铺设模型为例,对不同载流量情况下的海缆稳态温度进行了进一步的暂态分析,确定了不同大小海缆短时应急载流量所能允许运行时间及变化差异。复杂环境中海缆温度场及载流量的分析计算,有利于提高海缆利用率,为海缆动态增容及负荷调度提供了重要的数据支撑和参考价值。

1 海缆电-热-流数学模型

复杂海洋环境中海底电缆温度场及载流量模型分析可以等效为海底电缆本体及其敷设环境之间的电-热-流多场耦合问题研究。对在导体中施加载流量产生热量、热量在海缆本体中进行热传导、在流动洋流中进行对流换热的过程建立如下数学模型。

1) 电场模块数学模型为:

$$\nabla \cdot J = Q_j \quad (1)$$

$$J = \sigma E + J_e \quad (2)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (3)$$

式中: ∇ 为矢量微分算符; J 为电流密度矢量; Q_j 为电流源; σ 为电导率; E 为电场强度矢量; φ 为电势; J_e 为外部注入电流密度。在此方程组中,求解的基本参数为 φ ,其他参数以 φ 为基础求出。

2) 在海缆本体中,导体、绝缘层、金属护套及铠装产生损耗发出热量,热量在海缆本体中进行热传导,其数学模型为^[17]:

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \nabla^2 T + Q \quad (4)$$

式中: ρ 为材料的密度; C 为材料常压下的比热容; T 为材料的温度; λ 为固体材料导热系数; Q 为材料中的热源。

3) 热量从海缆本体中传递至海缆表面,在海缆表面

处与洋流发生对流换热,热量在流动的洋流中进行传递,洋流传热模块数学模型为^[18]:

$$\rho_1 C_1 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \frac{T}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial T} \bigg|_p \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \rho \right) + Q_1 \quad (5)$$

式中: ρ_1 为流体材料的密度; C_1 为流体材料常压下的比热容; T 为材料的温度; v 为速度矢量; q 为传导热通量; τ 为粘滞应力张量; $S=0.5(\nabla v+(\nabla v)^T)$ 为应变率张量; p 为压强; Q_1 为流体材料中的热源(不含粘滞发热)。

2 仿真模型

2.1 有限元模型建立

本文以 35 kV 高压三芯交联聚乙烯海底电缆为主要研究对象,其实际结构如图 1 所示,海底电缆主要由导电线芯、光纤单元及外层材料组成,其自身内部复合的光纤单元正好可以作为分布式光纤传感技术的监测媒介,实现海缆沿线温度的监测^[19]。导电线芯从内到外依次为阻水铜导体、导体屏蔽、XLPE 绝缘层、绝缘屏蔽、半导电电阻水带、合金护套、半导电 PE 护套。外层材料从内到外依次为填充层、包带、PP 内垫层、镀锌钢丝铠装层、沥青及 PP 外被层。在填充层内,对称分布两根光纤单元,光纤单元由聚乙烯护套和钢管构成,钢管内置 12 根通信用普通单模光纤。

海底电缆结构复杂,为减少有限元分析计算量及缩短计算时间,在不影响计算精度的情况下,本文将海底电缆中传热系数相近且互相接触的结构层进行合并简化。

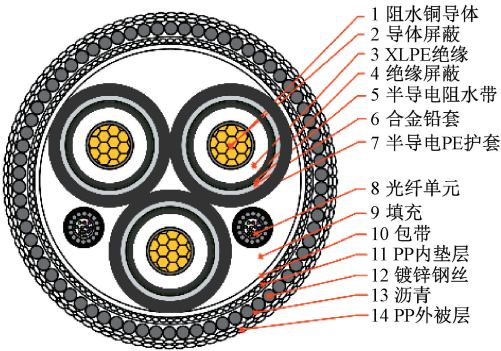


图 1 海底电缆结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of submarine cable structure

将导体屏蔽层、XLPE 绝缘层、绝缘屏蔽层合并,统称为绝缘层;将包带、PP 内垫层合并,统称为内垫层;将沥青、PP 外被层合并,统称为外被层。图 2 所示为合并简化后海底电缆几何模型,表 1 为合并简化后海底电缆各结构性性能参数。

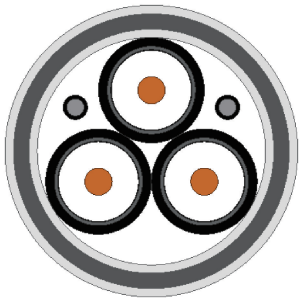


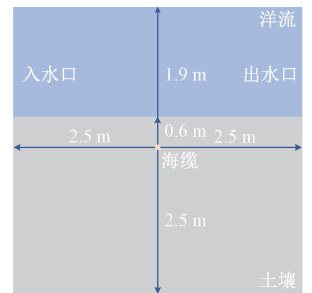
图 2 海底电缆简化模型
Fig. 2 Simplified model of submarine cable

表 1 海底电缆各层结构性能参数

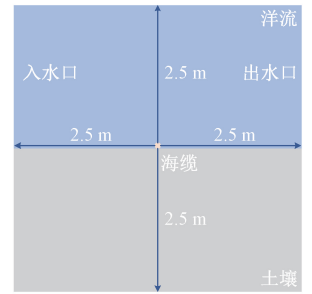
Table 1 The performance parameters of each layer structure of submarine cable					
结构名称	厚度/mm	外径/mm	密度/(kg·m ⁻³)	传热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
阻水铜导体	—	20.5	8 933	400	385
绝缘层	12.1	44.7	940	380	390
半导电电阻水带	0.8	46.3	930	0.15	1 580
合金铅套	3	52.3	11 336	35	129
PE 护套	2.3	56.9	930	0.4	2 300
填充层	—	122.8	1 100	0.35	1 900
光单元护套	3	11.4	930	0.4	2 300
光单元钢管	—	8.4	7 850	60.5	434
内垫层	1.95	126.7	930	0.4	2 300
镀锌钢丝铠装	5.0	136.7	7872	45	448
外被层	4.0	144.7	1 100	0.35	1 900

海底电缆采用埋设方式时,埋设深度>0.5 m;采用铺设时将海底电缆平放于海床上,模型考虑重力作用,海底电缆稍陷于土壤当中;已有研究表明,距离电缆 2 m 以外的区域不受电缆发热的影响^[20]。综上,两种不同敷设

方式下海缆分析模型如图 3 所示。
2.2 网格划分和边界条件设置
有限元分析法的计算是在网格单元中进行,网格划分密度越高计算精度也准确,但计算时间和计算量同样

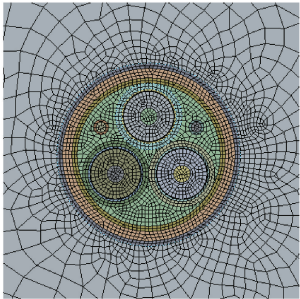


(a) 海缆埋设模型
(a) The model of buried submarine cable

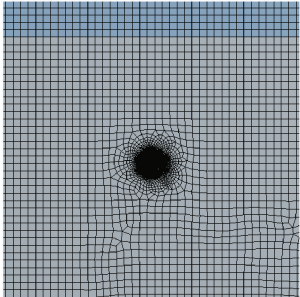


(b) 海缆铺设模型
(b) The model of submarine cable during laying

图 3 不同敷设方式下海缆分析模型
Fig. 3 Submarine cable analysis model under different laying methods



(a) 海缆局部网格划分
(a) Local grid division of submarine cable



(b) 全局网格划分
(b) Global grid division

图 4 模型网格划分示意图
Fig. 4 Schematic diagram of model grid division

会增加^[21]。本文针对海底电缆及周围重点分析部位进行密集的网络划分,距离较远的洋流及土壤区域进行相对粗糙的网格划分,保证海底电缆温度场及载流量计算精确度。网格划分效果示意图如图 4 所示。

海底电缆温度场及载流量有限元分析模型中,包括 3 个模块,具体边界条件设定如下。

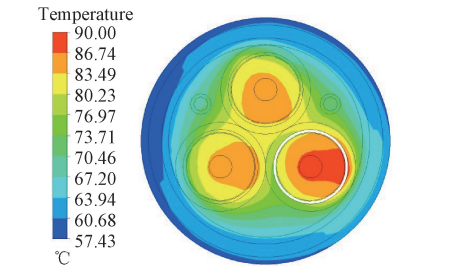
- 1) 电场模块,在海底电缆导体上施加 35 kV 电压,以法向电流密度的形式加载电流。
- 2) 流体模块,设洋流从洋流区域左侧界面流入,从洋流区域右侧界面流出;在其他界面无洋流流进或流出。
- 3) 传热模块,海底电缆及其敷设环境整体模型下边界为恒定温度 15 ℃,为热学第 1 类边界条件。整体模型左右边界水平温度梯度为 0,为热学第 2 类边界条件。模型中洋流上边界直接与空气对流传热,传热系数为 5 W/(m² · K),为热学第 3 类边界条件。

3 实验验证

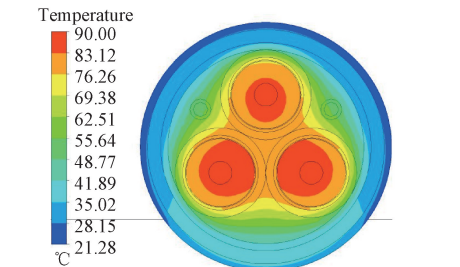
3.1 算例分析

以秦皇岛某油气平台海域常年平均气温 $T_a = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、海水流速 $v_0 = 0.8\text{ m/s}$ 、底层海水温度 $T_b = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,分别基于上述海缆及其敷设环境有限元模型以及解析计算法,计算埋设及铺设两种不同敷设环境下的稳态载流量

I_s 。图 5 所示为基于有限元分析模型两种不同敷设环境下海缆流经载流量为稳态载流量时的局部温度云图,对应稳态载流量分别为 604.89 和 935.65 A。



(a) 埋设时海缆局部温度分布
(a) Local temperature distribution of buried submarine cable



(b) 铺设时海缆局部温度分布
(b) Local temperature distribution of submarine cable during laying

图 5 稳态载流量下海缆局部温度云图
Fig. 5 Local temperature cloud map of submarine cable under steady ampacity

由图 5 可知,埋设状态下由于海底土壤导热系数较小、比热容大,海缆产生的热量难以传递,导致海缆表面温度较高,约为 57.43 ℃;铺设状态下海缆稳态温度场分布更为均匀,海缆表面温度约为 21.28 ℃,与海水温度近乎一致。

解析算法基于 IEC 60287 标准中交流电缆稳态载流量计算公式,如式(6)所示。相同条件下基于解析算法的埋设与铺设海缆稳态载流量计算结果及与有限元分析结果的相对误差如表 2 所示。

$$I_s = \sqrt{\frac{\Delta\theta_c - W_d[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (6)$$

式中: $\Delta\theta_c$ 为缆芯最高允许运行温度与环境温度相差值; W_d 为海缆介质损耗; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为海缆绝缘热阻、内垫层热阻、外被层热阻以及所处环境热阻; R 为海缆导体直流电阻; n 为导电芯数; λ_1 、 λ_2 分别为海缆铝护套损耗因数、铠装损耗因数。

表 2 稳态载流量计算结果对比

Table 2 Comparison of the calculation results of steady-state ampacity			
	有限元法流量/A	解析法流量/A	相对误差/%
埋设	604.89	622.78	2.87
铺设	935.65	976.62	4.20

由表 2 结果可知,有限元法与解析法的稳态载流量计算结果相近,其相对误差处于工程要求(5%)范围内。

3.2 复杂环境中海缆载流量稳态分析

海底电缆所处敷设环境中,影响其温度场分布及载流量大小的环境因素主要有洋流流速及洋流温度。

1) 洋流流速影响分析

首先为定量分析洋流流速对海底电缆载流量的影响,基于海缆及其敷设环境的温度场及载流量有限元分析模型,设定模型底层海水温度 $T_b = 20\text{ }^\circ\text{C}$,控制洋流区域入口流速 v_0 处于 0~2 m/s 之间,确定不同流速下海底电缆埋设与铺设时稳态载流量大小,结果如图 6 所示。

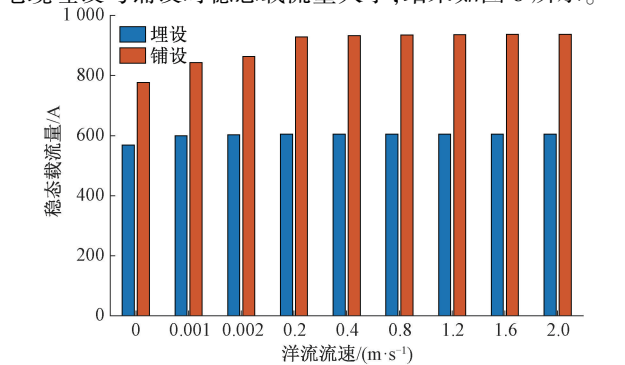


图 6 不同流速下海缆稳态载流量

Fig. 6 Steady ampacity of submarine cable at different flow rates

当 $v_0 = 0\text{ m/s}$ 时,埋设状态下海缆稳态载流量 $I_s = 569.05\text{ A}$,铺设状态下海缆稳态载流量 $I_s = 776.69\text{ A}$ 。海缆稳态载流量变化量 ΔI_s 与洋流流速变化量 Δv_0 关系如表 3 所示。

表 3 海缆稳态载流量与海洋流速变化关系

Table 3 The relationship between steady ampacity of submarine cable and ocean velocity			
埋设 ($v_0 = 0\text{ m/s}$, $I_s = 569.05\text{ A}$)		铺设 ($v_0 = 0\text{ m/s}$, $I_s = 776.69\text{ A}$)	
$\Delta v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta I_s / \text{A}$	$\Delta v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta I_s / \text{A}$
0.001	30.53	0.001	66.70
0.002	34.21	0.002	86.47
0.2	35.53	0.2	152.11
0.4	35.65	0.4	156.31
0.8	35.69	0.8	158.75
1.2	35.69	1.2	159.73
1.6	35.69	1.6	160.19
2.0	35.69	2.0	160.61

由表 3 可得,无论海缆处于埋设状态或敷设状态时,相比于 $v_0 = 0\text{ m/s}$,轻微的流速变化也会导致海缆稳态载流量 I_s 大幅度提高。埋设状态下,当 $\Delta v_0 = 0.001\text{ m/s}$ 时,海缆稳态载流量 I_s 提升了 30.53A,但当 $\Delta v_0 > 0.2\text{ m/s}$,海缆稳态载流量提升趋近稳定, $\Delta v_0 = 2\text{ m/s}$ 时, I_s 达到 604.74 A;铺设状态下,当 $\Delta v_0 = 0.001\text{ m/s}$ 时,海缆稳态载流量提升量达到 66.70 A,当 $\Delta v_0 > 0.2\text{ m/s}$,海缆稳态载流量 I_s 仍有小幅度提升, $\Delta v_0 = 2\text{ m/s}$ 时, I_s 达到 937.3 A。

不同敷设方式下海缆稳态载流量随流速变化提高程度不同,其原因在于埋设状态下,海缆流经载流量产生的热量在海底土壤中进行传导,仅有一小部分热量传递至海底土壤表面,经海洋流动带走热量;而在铺设状态下,海缆产生的热量直接被海洋流动带走,导致海缆铺设时稳态载流量均远高于海缆埋设,且相同流速变化下,铺设状态下稳态载流量提高程度也更加显著。

2) 洋流温度影响分析

洋流温度是海底电缆温度场及载流量模型分析中的另一大影响因素。设定洋流区域入口流速为 0.8 m/s,考虑海缆实际敷设深度所处洋流温度范围,控制洋流温度在 10 ℃~30 ℃以步长为 1 ℃递增,研究不同洋流温度下海缆稳态载流量变化情况。

图 7 所示为不同洋流温度下埋设和铺设海缆稳态载流量的变化情况。由图 7 可知,埋设时海缆稳态载流量降低速度较铺设时稍小;相同海水温度下,埋设时海缆稳态载流量均低于海缆铺设时;相同敷设方式下,海缆稳态载流量随洋流温度上升而近乎线性减少,埋设海缆稳态载流量与洋流温度的大致关系式为 $y_1(x_1)$,铺设时为 $y_2(x_2)$ 。

$$y_1 = -3.519x_1 + 675.9 \tag{7}$$

$$y_2 = -6.733x_2 + 1072 \tag{8}$$

由式(7)和(8)可清晰得知,埋设时海缆稳态载流量与洋流温度之间的一次项系数为-3.519;铺设时海缆稳态载流量与洋流温度之间的一次项系数为-6.733。

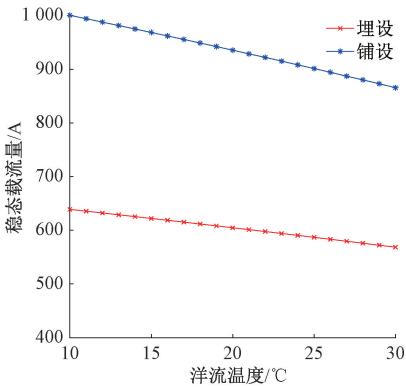


图 7 不同洋流温度下海缆稳态载流量
Fig. 7 Steady ampacity of submarine cable under different ocean temperature

3.3 短时应急载流量暂态分析

海缆正常运行时并非始终工作于稳态载流量,利用海缆温度未达到运行上限前的时间段,可以短期施加超过稳态载流量的电流,只要保证海缆运行过程中导体温度低于允许的最高值。

为更好分析不同载流量下海缆缆芯温度暂态变化过程,确定不同大小海缆短时应急载流量允许运行时间,本文选取铺设状态下海缆分析模型,设定洋流流速 0.8 m/s、海水温度、空气温度与深层土壤温度分别为 20 °C、22 °C、15 °C,海缆整体初始温度为 16.67 °C。结合实际工程海缆运行状况,首先确定初始载流量分别为该特定环境下 80% I_s 、85% I_s 、90% I_s 、95% I_s 时的稳态缆芯温度大小,其结果如表 4 所示。

表 4 不同初始载流量下稳态缆芯温度

Table 4 Steady-state cable core temperature under different initial ampacity

初始载流量/A	稳态缆芯温度/°C
80% I_s	65.05
85% I_s	70.77
90% I_s	76.83
95% I_s	83.24

由结果可知,稳态缆芯温度随初始载流量递增而均匀上升。在此稳态基础上,分别施加大小为该特定环境下 1.05 I_s 、1.10 I_s 、1.15 I_s 、1.20 I_s 的应急载流量,令缆芯温度达到 90 °C 后保持恒定,其缆芯温度上升过程如图 8 所示。

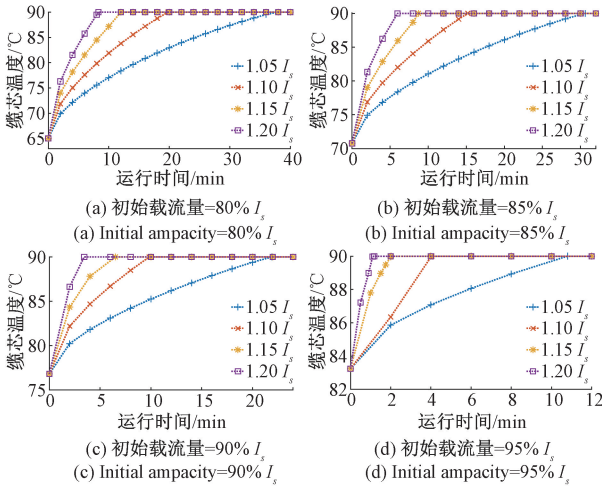


图 8 不同载流量下缆芯温度上升过程
Fig. 8 The rise process of cable core temperature under different ampacity

由图 8 可知,相同初始载流量时,应急载流量越大,缆芯温度到达温度上限 90 °C 所需时间越短;而同一大小应急载流量所能允许运行的时间,受初始载流量运行稳态时的缆芯温度大小影响。图 9 所示为不同情况下应急载流量允许运行时间变化趋势。

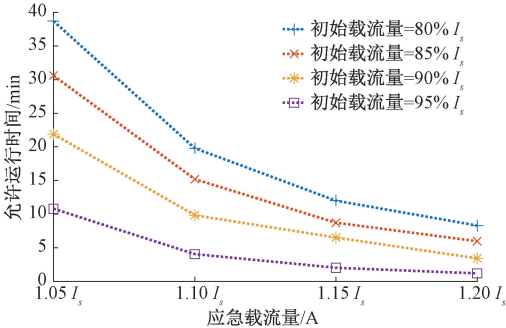


图 9 不同情况下应急载流量允许运行时间
Fig. 9 Allowable operating time of emergency ampacity under different conditions

由结果可知,相同大小应急载流量所能允许运行的时间因初始载流量递增而逐渐减小。当应急载流量为 1.05 I_s 时,初始载流量每提高 5% I_s ,允许运行时间平均减少 8.73 min;随应急载流量增大,其允许运行时间大幅度降低,当应急载流量为 1.20 I_s 时,允许运行时间均小于 10 min,特别当初始载流量为 95% I_s 时,其允许运行时间仅为 1.18 min。

4 结 论

本文针对高压三芯交联聚乙烯海底电缆,根据海底

电缆电-热-流多场耦合理论,基于有限元分析技术建立了海缆及其敷设环境的温度场及载流量分析模型,有效避免了传统解析算法所需的庞大计算量,能够针对不同敷设情况下的海缆进行温度场及载流量稳态及暂态结果分析计算,其计算结果相对误差较小,满足工程实际需求。所得不同洋流流速及温度下的稳态载流量大小及短时应急载流量允许运行时间变化规律,有助于海缆实时运行的合理性调度规划,并得出如下结论。

1) 稳态载流量即对应于海缆线芯温度达 90 ℃ 时的稳态工作电流。海缆铺设时,由于海缆直接接触洋流,热量更易散失。相同海洋环境条件下,海缆铺设时稳态载流量高出海缆埋设时 200~330 A 不等。但海缆敷设方式的选择需考虑实际工程需要。

2) 洋流流速对提高海缆稳态载流量有显著作用,海缆稳态载流量变化率在低洋流流速时更灵敏,埋设时洋流流速大于 0.2 m/s、铺设时洋流流速大于 0.8 m/s,对海缆稳态载流量的提升作用趋于稳定。

3) 考虑海缆实际敷设深度所处洋流温度范围研究发现,海缆稳态载流量与洋流温度两者之间存在着近乎线性变化的关系,即海缆稳态载流量随洋流温度的升高而降低。相同洋流温度变化情况下,铺设海缆稳态载流量变化程度较大,但其稳态载流量远大于埋设海缆。

4) 不同大小海缆短时应急载流量所能允许运行的时间与其大小及初始缆芯温度成反比。相同大小应急载流量的允许运行时间随初始载流量增加而均匀减少;应急载流量越大,其允许运行时间越短。

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 SH. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 26-30.
- [2] 赵健康, 陈铮铮. 国内外海底电缆工程研究综述 [J]. 华东电力, 2011, 39(9): 1477-1481.
ZHAO J K, CHEN ZH ZH. Research on submarine cable projects at home and abroad [J]. East China Electric Power, 2011, 39(9): 1477-1481.
- [3] 李小峰, 唐兴佳. 高压交联聚乙烯绝缘海底电缆载流量分析 [J]. 广东输电与变电技术, 2010, 12(6): 39-42.
LI X F, TANG X J. Analysis of high voltage XLPE submarine cable current carrying capacity [J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2010, 12(6): 39-42.
- [4] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 等. 电力电缆载流量计算的研究与发展 [J]. 电线电缆, 2010 (2): 4-9.
ZHENG Y L, WANG N, LI H J, et al. Study and progress

of the ampacity computation of power cables [J]. Electric wire and cable, 2010 (2): 4-9.

- [5] 王庆祝. 电缆动态载流量分析与研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
WANG Q ZH. Analysis and research on dynamic ampacity of cable [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [6] 李萌, 牛胜锁, 刘玉芹, 等. 基于多场耦合模型的海底电缆载流量和温度场计算研究 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 12-16, 23.
LI M, NIU SH G, LIU Y Q, et al. Calculation of temperature distribution and ampacity for submarine cables based on multi-physics field coupling model [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(8): 12-16, 23.
- [7] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 等. 电力电缆载流量计算的方法与发展 [J]. 电气应用, 2010, 29(3): 26-31.
ZHENG Y L, WANG N, LI H J, et al. Methods and progress of the ampacity computation of power cables [J]. Electrotechnical Application, 2010, 29(3): 26-31.
- [8] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态 [J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1142-1150.
LIANG Y CH. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1142-1150.
- [9] 段佳冰, 尹成群, 吕安强, 等. 基于 IEC 60287 和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法 [J]. 高压电器, 2014, 50(1): 1-6.
DUAN J B, YIN C Q, LV AN Q, et al. Analysis method for temperature of high voltage submarine cable based on IEC 60287 and finite element [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 1-6.
- [10] 吕安强, 寇欣, 尹成群, 等. 三芯海底电缆中复合光纤与导体温度关系建模 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 59-65.
LV A Q, KOU X, YIN CH Q, et al. Modeling of temperature relation between optical fiber and conductor in 3-core submarine power cable [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 59-65.
- [11] 张巍伟. 基于解析法和有限元法的海底电缆温度场分析 [J]. 船电技术, 2020, 40(10): 40-44.
ZHANG W W. Temperature field analysis of submarine cable based on analytic method and finite element method [J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2020, 40(10): 40-44.
- [12] 张磊, 宣耀伟, 乐彦杰, 等. 110kV 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 L, XUAN Y W, YUE Y J, 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.
- [13] 李萌. 海底电缆载流量计算方法的研究与应用 [D]. 保定: 华北电力大学, 2018.
- LI M. Research and application of ampacity calculation method of submarine cable [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.
- [14] DURAISAMY N, GOOI H B, UKIL A. Ampacity estimation for HV submarine power cables installed in saturated seabed [C]. 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [15] 陆莹, 范明明, 郑明, 等. 基于电磁-热-流耦合场的非开挖敷设方案的海底电缆载流量计算 [J]. 广东电力, 2020, 33(5): 117-124.
- LU Y, FAN M M, ZHENG M, et al. Calculation of ampacity for simulate cables under trenchless laying method based on electromagnetic-thermal-flow coupled field [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(05): 117-124.
- [16] ZHOU B D, LE Y J, FANG Y L, et al. Temperature field simulation and ampacity optimisation of 500 kV HVDC cable [J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 2448-2453.
- [17] ZHANG L Q, HE Y F, LIU Y C, et al. Temperature analysis based on multi-coupling field and ampacity optimization calculation of shore power cable considering tide effect [J]. IEEE Access, 2020, 8: 119785-119794.
- [18] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真 [J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3534-3542.
- HAO Y B, CHEN Y, YANG L, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
- [19] 陈述, 李素贞, 黄冬冬. 埋地热力管道泄漏土体温度场光纤监测 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 138-145.
- CHEN SH, LI SH ZH, HUANG D D. Monitoring of soil temperature field due to leakage of buried thermal pipeline using distributed fiber optic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 138-145.
- [20] 张旭. 海底高压光电复合缆故障仿真方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- ZHANG X. Research on fault simulation of photoelectric composite submarine cable [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [21] 刘苹, 张小平, 匡斯建, 等. 电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 173-178.
- LIU P, ZHANG X P, KUANG S J, et al. 3D finite element model mesh division method in motor temperature field analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 173-178.

作者简介



林钰, 2019 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测。

E-mail: linyu327079@163.com

Lin Yu received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interest includes electrical equipment condition monitoring.



李茜(通信作者), 2011 年于华南理工大学获得学士学位, 2016 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、分布式发电与综合能源系统、电气设备状态监测。

E-mail: swpuliquian@163.com

Li Qian (Corresponding author) received her B. Sc. degree from South China University of Technology in 2011, Ph. D. degree from Sichuan University in 2016. She is currently a lecturer at Southwest Petroleum University. Her main research interests include power system stability and control, distributed generation and integrated energy systems and electrical equipment condition monitoring.