

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306675

基于有限元法的海底电缆埋设深度实时预测研究*

张安安¹ 何明光¹ 于璐² 李茜¹ 赵怡政¹ 魏俊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 100028)

摘要:在洋流冲刷、人类活动和地质运动等外部激励的长期影响下,海缆的埋设深度容易发生持续性变化,从而导致海缆故障率急剧增加、负载能力大幅下降等一系列严重问题。本文以35 kV光电复合型三芯海底电缆为主要研究对象,采用有限元法仿真了不同环境温度、不同埋设深度以及不同载流量下的海缆温度场,建立了不同载流量下缆芯温度与埋设深度的关系曲线,不同环境温度下缆芯温度与埋设深度的关系曲线,并拟合了相应的关系式,以此整合出海缆埋设深度实时预测的关系方程式通式。最后运用工程实际监测的多源数据,通过该通式实时预测了海缆的埋设深度以及变化趋势,同时结合海缆扰动能量以及海缆埋设深度实测值,验证了该预测方法不仅具有可行性和正确性,也具有较高的预测精度。

关键词:三芯海底电缆;有限元法;缆芯温度;埋设深度;实时预测

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

Real-time prediction of submarine cable embedment depth based on finite element method

Zhang An'an¹ He Mingguang¹ Yu Lu² Li Qian¹ Zhao Yizheng¹ Wei Jun¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. CNOOC Research Institute Ltd, Beijing 100028, China)

Abstract: Under the long-term influence of external incentives such as ocean current scour, human activities and geological movements, the buried depth of submarine cables is prone to continuous changes, which leads to a series of serious problems such as a sharp increase in the failure rate of submarine cables and a sharp decline in load capacity. This paper takes 35 kV photoelectric composite three-core submarine cable as the main research object, uses the finite element method to simulate the temperature field of submarine cable under different ambient temperatures, different burial depths and different carrying rates, establishes the relationship curve between cable core temperature and buried depth under different ambient temperatures, and the relationship curve between cable core temperature and buried depth under different ambient temperatures, and fit the corresponding relationship formula. The general formula of the relationship equation for real-time prediction of submarine cable buried depth was integrated. Finally, by using the multi-source data of the actual project monitoring, the buried depth and change trend of submarine cable are predicted in real time through the general formula. At the same time, combined with the measured value of submarine cable disturbance energy and submarine cable buried depth, it is verified that the prediction method is not only feasible and correct, but also has high prediction accuracy.

Keywords: three core submarine cable; finite element method; core temperature; embedment depth; real-time prediction

0 引言

海底电缆作为海上风电场电能外送、海上油气平台电能供应以及跨海通信的唯一载体,一旦发生故障,轻则

将限制海上风电外送功率和影响海上平台油气开采等生产活动,重则将直接中断到各类海洋工程的电能供给和信息传输,造成重大的经济损失^[1-3]。近年来众多学者对海底电缆的保护做了广泛的研究,提出了电缆外壳保护和电缆埋设保护两种切实可行的方案。其中,海底电缆

收稿日期: 2023-06-29 Received Date: 2023-06-29

* 基金项目: 西南石油大学自然科学“揭榜挂帅”项目(2021JBG06)、西南石油大学科研“启航计划”项目(2021QH006)资助

埋设应用广泛、效果显著,已成为海洋工程的必备保护措施,是保护海底电缆最经济、有效的办法,海底电缆埋设正朝着加大埋设深度以及扩大埋设范围的方向发展^[4]。然而,在洋流冲刷、人类活动和地质运动等外部激励的长期影响下,海底电缆的埋设深度容易发生持续性变化。研究发现,海底电缆埋设深度变浅,其直接暴露于海洋环境的几率会急剧增加,易发生海水冲刷侵蚀、海洋动物撕咬等情况,甚至会受到渔业捕捞、锚砸、钩挂等极其严重的破坏,进而造成不可逆转的海底电缆机械故障和电气故障;海底电缆埋设深度变深,在环境热阻特性影响下会导致输电效率和输电容量降低,并且在海底电缆异常或故障时,难以定位故障位置,阻塞检修工作,进一步扩大事故风险及损失。因此,掌握海底电缆埋设深度的变化情况,对海底电缆的安全稳定运行至关重要。

近年来,众多学者对海底电缆埋设深度的探测进行了大量研究,基于声学 and 磁学 的海底电缆埋设深度探测技术得到了飞速发展^[5]。声学探测应用广泛、切实有效,在对海底电缆进行探测时设备安装简单、使用方便,并且带有图像识别功能,能够直观的反映海缆埋设区域的海底环境,包括地形、地质以及地貌等,可为后续海底电缆检修维护提供大量的海底环境资料^[6],它主要采用侧扫声呐、多波束声呐、浅地层剖面仪、合成孔径声呐 4 种设备,以海洋“拖鱼”和 水下机器人 搭载为主要探测手段^[7]。然而,海洋环境复杂,且存在较强的温跃层,会对声学检测的精度产生不同程度的影响,在海洋状况恶劣的情况下,难以对海底电缆进行精准探测^[8]。此外,声学成像受到海底淤泥沉积的影响,其分辨率难以保证。

磁学探测技术成熟,设备先进且发展迅速,是目前对海底电缆埋设深度探测最有效、可行的方式^[9],共振磁力仪、磁通门磁力仪以及磁梯度仪是海洋磁检测常用的 3 种设备^[10]。结合海底电缆铠装层的磁异常现象,利用相应磁感应技术测量海底电缆的路由以及埋设深度,然后通过记录一系列海底电缆位置信息点并连接起来,可得到海底电缆的埋设路径,并且探测精度极高,从而能够掌握海底电缆的实际埋设深度以及走向。但磁检测存在以下问题^[11]:磁学设备会受到强磁信号的巨大干扰,在强磁区域对海底电缆的埋设深度进行探测时基本失效;磁学设备会受到载体运行的噪声干扰,从而难以保证其检测精度,需要在海洋环境平静的情况下进行磁学检测;磁学设备探测的是海底电缆的一系列位置信息点,在分辨率较低的情况下,无法反映海底电缆出现弯折、盘绕的现象,影响检测的全面性与准确性。综上所述,目前海底电缆埋设深度的探测主要依赖于外部硬件设备,存在人工成本高、探测周期长、探测效果差等问题,且不能及时发现因海底电缆埋深变化而引起的缺陷和故障,进而存在较大的安全风险和经济损失风险。因此,目前还没有能

够较好地 对海底电缆埋设深度进行反演的 方法,有必要对海底电缆埋设深度的实时探测进行深入研究。

本文针对某油气平台实际投运的 35 kV 光电复合型三芯海底电缆,首先利用 IEC 60287 标准计算出海缆金属层和绝缘层的损耗,并换算成热生成率,然后代入有限元模型,利用其边界条件处理能力模拟运行条件和周围环境,探究了不同载流量下埋设深度对海底电缆缆芯温度的影响、不同环境温度下埋设深度对海底电缆缆芯温度的影响,并拟合出相应的关系曲线和关系式,以此整合出海底电缆埋设深度实时预测的关系方程式通式。最后运用工程实际监测的多源数据,通过关系方程式通式实时预测了海底电缆的埋设深度,同时验证了该预测方法不仅具有可行性和正确性,还具有较高的预测精度,为海底电缆埋设深度的实时预测提供了新的理论依据。

1 三芯海底电缆有限元建模

1.1 几何模型简化

三芯海底电缆相比于单芯海底电缆,每根导体的横截面积更小,且 3 根铜导体以特有的绞合方式紧紧缠绕在一起。另外,工程上实际敷设三芯海底电缆过程中,会将其护套两端接地,从而使三芯海底电缆在正常运行情况下护套中几乎没有感应电压和感应电流,更加安全稳定。本文以 35 kV 光电复合型三芯海底电缆为主要研究对象,进行有限元建模以及仿真分析。

光电复合型三芯海底电缆自身内部的传感光纤不仅可以远距离传输加密信息,同时也可以作为状态监测的媒介^[12-13]。该类型三芯海底电缆的结构示意图如图 1 所示,3 根铜导体线芯和 2 束光纤单元以对称并且绞合的方式位于海底电缆填充层内部。每一束光纤单元中包含 12 根相同的通信用单模光纤^[14],其结构示意图如图 2 所示。

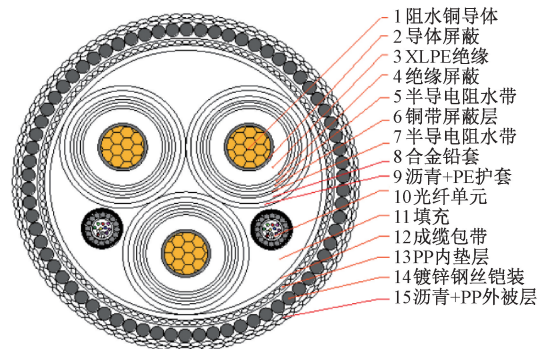


图 1 三芯海底电缆结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of three-core submarine cable

海底电缆不仅处于恶劣多变的海洋环境之中,还存

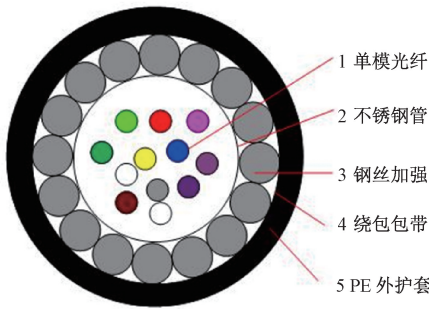


图 2 光纤单元结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical fiber unit structure

称为外被层;将绕包包带、PE 外护套合并,统称为光单元护套;将不锈钢管、钢丝加强合并,统称为光单元钢管。海底电缆各层结构性能参数如表 1 所示。

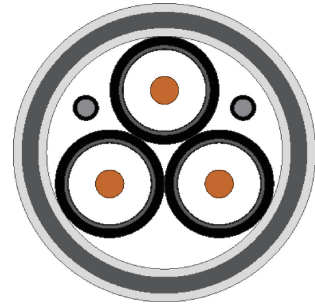


图 3 海底电缆简化模型

Fig. 3 Simplified model of submarine cable

在被人破坏的风险,在这种双重影响下,海底电缆的结构设计较为复杂。为了提高仿真效率,节约计算机运行资源,本文将海底电缆的结构层进行合并简化^[15],如图 3 所示。将导体屏蔽、XLPE 绝缘、绝缘屏蔽合并,统称为绝缘层;将半导体阻水带、铜带屏蔽层合并,统称为阻水带;将成缆包带、PP 内垫层合并,统称为内垫层;将沥青、PE 护套合并,统称为外护套;将沥青、PP 外被层合并,统

海底电缆作为热源,对周边环境的影响是有限的,已有研究表明,距离海底电缆 2 m 以外的区域不受海底电缆发热的影响^[16]。因此埋设状态下的海底电缆模型的边界距离应不小于 2 m,现建立了如图 4 所示的埋设状态下的海底电缆模型示意图。

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/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	传热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)
阻水铜导体	—	20.5	8 933	400	385
绝缘层	12.1	44.7	940	380	390
阻水带	0.8	46.3	930	0.15	1 580
合金铅套	3	52.3	11 336	35	129
外护套	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	7 872	45	448
外被层	4.0	144.7	1 100	0.35	1 900

1.2 损耗计算

阻水铜导体、绝缘层、合金铅套和镀锌钢丝铠装产生的热量最终都会趋于稳定^[17],同理海底电缆向土壤扩散的热量也满足该条件。由于海底电缆呈对称分布,且海底电缆的结构材料均匀,所以其热量的扩散具有各向同性。因此,埋设状态下海底电缆的传热情况可简化为二维稳态温度场分布问题^[18]。依据 IEC60287 标准,获得了海底电缆各层损耗的计算关系式和热生成率关系式^[19]。

1) 阻水铜导体损耗

$$W_1 = I^2 R \quad (1)$$

式中: I 为阻水铜导体负荷电流, R 为单位长度阻水铜导体的有效电阻。

2) 绝缘层损耗

$$W_2 = wCU^2 \tan \delta \quad (2)$$

式中: w 为电源角频率, C 为单位长度海底电缆的电容; U 为对地电压(相电压), $\tan \delta$ 为当前电源系统和工作温度下的绝缘层损耗因数。

3) 合金铅套损耗

$$W_3 = \lambda_1 W_1 \quad (3)$$

式中: λ_1 为合金铅套损耗因素, W_1 为单位长度的阻水铜导体损耗。

4) 镀锌钢丝铠装损耗

$$W_4 = \lambda_2 W_1 \quad (4)$$

式中: λ_2 为镀锌钢丝铠装损耗因素, W_1 为单位长度的阻水铜导体损耗。

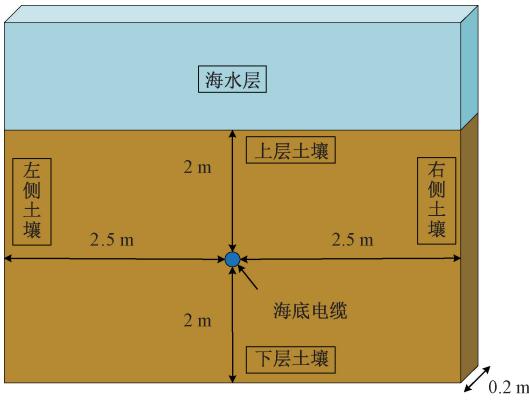


图 4 埋设状态下的海底电缆模型示意图
Fig. 4 Schematic diagram of submarine cable model in buried state

5) 热生成率

$$Q = \frac{W}{S} \quad (5)$$

式中: W 为单位长度的损耗, S 为产生损耗部分的面积。

1.3 网格划分与边界条件设置

网格划分是将整个模型划分成有限个网格单元,即达到连续系统离散化的目的,再对这些有限个网格单元进行计算。一般情况下,网格划分时必须要注意如下几点:拓扑正确性、几何保持、特性一致、单元性状优良和密度可控。本文对三芯海底电缆的土壤层采用智能网格划分,而其他部分采用扫掠网格划分,并且在整个网格划分过程中能够始终满足网格划分的 5 点要求^[20]。三芯海底电缆网格效果图和整体网格效果图分别如图 5 和 6 所示。

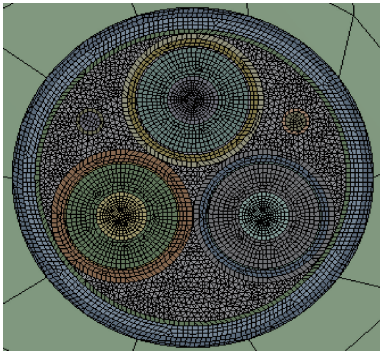


图 5 海底电缆本体的网格效果
Fig. 5 Grid rendering of submarine cable body

本文研究重点针对稳态导热问题进行分析,对此要应用有热源的稳态导热微分方程^[21]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v \quad (6)$$

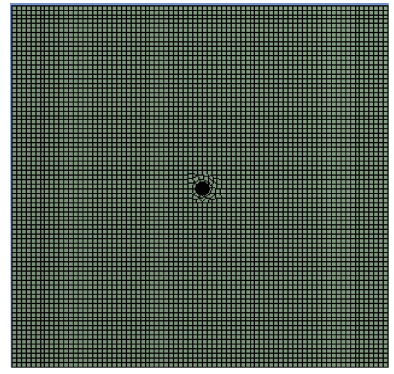


图 6 整个温度场区域的网格效果
Fig. 6 Grid rendering of the entire temperature field area

式中: $\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$ 为微元体吸热造成的内能增加; T 为瞬态温度; τ 为进行时间; k 为导热系数; q_v 为内热源。

导热微分方程的求解需要用到 3 类边界条件^[22]。

第 1 类边界条件是已知边界温度值。

$$\begin{cases} T|_r = T_w \\ T|_r = f(x, y, t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: Γ 为物体边界; T_w 为壁面温度。

第 2 类边界条件是已知边界上法向热流密度。

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial n} |_{r} + q_0 = 0 \\ k \frac{\partial T}{\partial n} |_{r} + g(x, y, t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: q_0 为热流密度; $g(x, y, t)$ 为已知热流密度函数。

第 3 类边界条件是对流边界条件,即已知边界上对流换热系数和流体温度。

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} |_{r} = a(T - T_f) |_{r} \quad (9)$$

式中: a 为物体表面换热系数; T_f 为周围流体温度。

边界设定就是根据实际的外界环境来选取具体的边界数值,让整个模型能够处于一个比较符合实际情况的仿真环境之中。因此,下边界深层土壤温度为固定值,设为第 1 类边界条件;左右边界土壤法向热流密度为 0,设为第 2 类边界条件;上边界土壤与海水存在对流换热,设为第 3 类边界条件。

2 有限元仿真结果及分析

2.1 海底电缆稳态分析

对海底电缆施加额定载流量 585 A,取 8 月份海水温度 26 °C,认为深层土壤温度与海水温度近似相等,共同作为环境温度,土壤与海水的对流换热系数为 600 W/m² · °C,土壤导热系数为 1.5 W/m · °C,海底电缆埋设

深度为 2 m,进行有限元仿真,得到海底电缆本体温度分布结果如图 7 所示,整个区域温度分布结果如图 8 所示。

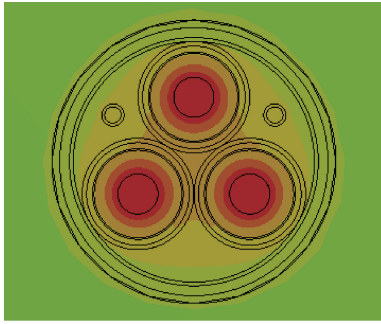


图 7 海底电缆本体温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of submarine cable body

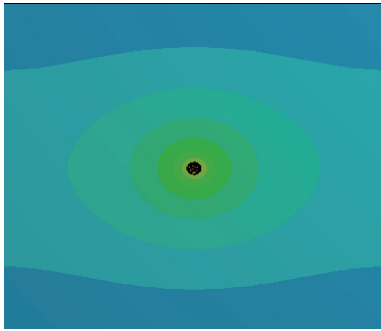


图 8 整个区域温度分布

Fig. 8 Temperature distribution throughout the region

由图 7 可知,对三芯海底电缆模型施加额定载流量,待其热量传递稳定后,缆芯温度为 89.79 ℃,与铜导体最高工作温度仅相差 0.21 ℃,误差非常小。为了提高仿真效率,节约计算机运行资源,本文将海底电缆的结构层进行了合并简化,并且对海底电缆的埋设环境的进行了合理的假设,因此存在不可避免的误差,但稳态求解结果也证明了本文所建模型的正确性。由图 8 可知,整个区域的温度分布呈对称性,深层土壤温度和上层土壤温度一致,说明海底电缆作为热源,其影响范围是有限的,符合实际。

2.2 不同工况下海底电缆温度场分析

设定海底环境温度为 26 ℃,土壤与海水的对流换热系数为 600 W/m²·℃,土壤导热系数为 1.5 W/m·℃,分别对三芯海底电缆施加 10%~100%的额定载流量,同时埋设深度从 2 m 以 0.2 m/次逐渐递减到 0.2 m,进行有限元仿真,得到海底电缆缆芯的最终温度数据,如图 9 所示。

由图 9 可得,在埋设深度保持不变的情况下,海底电缆的缆芯温度随着载流量的增加而升高;在载流量保持不变的情况下,海底电缆的缆芯温度随着埋设深度的增

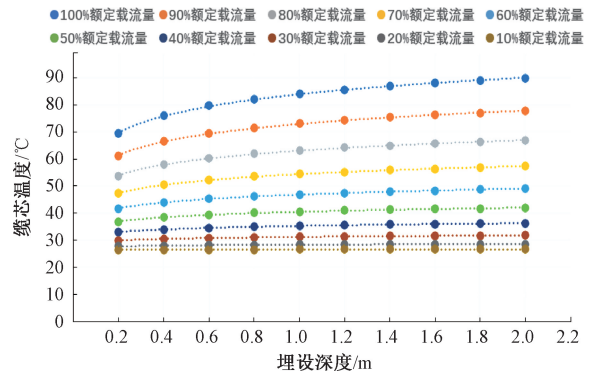


图 9 不同载流量下缆芯温度与埋设深度关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between cable core temperature and buried depth under different carrying capacity

加而升高。利用最小二乘法对不同载流量下的缆芯温度和埋设深度进行非线性拟合,得到同一环境温度、不同载流量下缆芯温度和埋设深度之间的关系式。

$$T_{100\%} = 8.817 \ln D + 83.939 \quad (10)$$

$$T_{90\%} = 7.145 \ln D + 72.943 \quad (11)$$

$$T_{80\%} = 5.645 \ln D + 63.104 \quad (12)$$

$$T_{70\%} = 4.325 \ln D + 54.424 \quad (13)$$

$$T_{60\%} = 3.181 \ln D + 46.9 \quad (14)$$

$$T_{50\%} = 2.211 \ln D + 40.534 \quad (15)$$

$$T_{40\%} = 1.420 \ln D + 35.325 \quad (16)$$

$$T_{30\%} = 0.801 \ln D + 31.274 \quad (17)$$

$$T_{20\%} = 0.363 \ln D + 28.381 \quad (18)$$

$$T_{10\%} = 0.099 \ln D + 26.644 \quad (19)$$

式中: $T_{100\%}$ 、 $T_{90\%}$ 、 $T_{80\%}$ 、 $T_{70\%}$ 、 $T_{60\%}$ 、 $T_{50\%}$ 、 $T_{40\%}$ 、 $T_{30\%}$ 、 $T_{20\%}$ 、 $T_{10\%}$ 依次为 100%、90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10% 额定载流量下的海底电缆缆芯温度; D 为海底电缆的埋设深度。

由于拟合的关系式是对数型函数,该对数型函数有两个系数,它们分别对应关系曲线的弯曲程度和均值大小,将其定义为弯曲系数和均值系数。结合图 8 可知,关系曲线的弯曲程度和均值大小都会随着载流量的增加而增加。现提取关系式(10)~(19)的弯曲系数和均值系数,建立其与载流量百分比之间的关系,拟合的关系曲线如图 10 和 11 所示。

利用最小二乘法分别对弯曲系数与载流量百分比、均值系数与载流量百分比进行非线性拟合,得到如下关系式:

$$y_1 = 8.811 7I^2 - 0.006 5I + 0.012 1 \quad (20)$$

$$y_2 = 57.873I^2 + 0.000 3I + 26.065 \quad (21)$$

式中: y_1 和 y_2 分别为弯曲系数和均值系数; I 为当前通入海底电缆的载流量百分比。

结合关系式(10)~(21),可以整合出如下所示的综

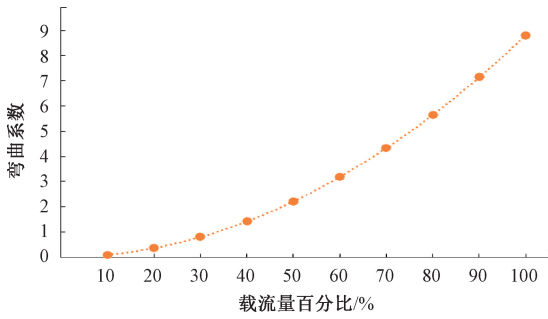


图10 弯曲系数与载流量之间的关系曲线

Fig. 10 Curve of the relationship between the bending coefficient and the carrying capacity

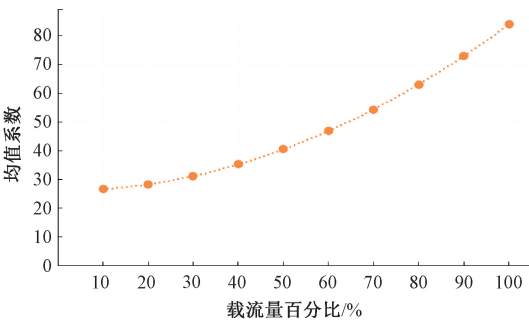


图11 均值系数与载流量之间的关系曲线

Fig. 11 The relationship between the mean coefficient and the carrying capacity

合载流量 I 、埋设深度 D 和缆芯温度 T 这 3 个变量的关系方程式通式。

$$T = y_1 \ln D + y_2 \quad (22)$$

海底电缆实际埋设海域的环境温度随季节变化,变化范围为 $8^\circ\text{C} \sim 26^\circ\text{C}$, 选取 8°C 、 10°C 、 12°C 、 14°C 、 16°C 、 18°C 、 20°C 、 22°C 、 24°C 和 26°C 共 10 个环境温度点进行仿真计算。同样的,设定土壤与海水的对流换热系数为 $600 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 土壤导热系数为 $1.5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 对三芯海底电缆施加 100% 的额定载流量,同时埋设深度从 2 m 以 0.2 m/次逐渐递减到 0.2 m, 得到海底电缆缆芯的最终温度数据,如图 12 所示。

由图 12 可见,在埋设深度保持不变的情况下,海底电缆的缆芯温度随着环境温度的增加而升高;在环境温度保持不变的情况下,海底电缆的缆芯温度随着埋设深度的增加而升高。利用最小二乘法对不同环境温度下的缆芯温度和埋设深度进行非线性拟合,得到同一载流量、不同环境温度下缆芯温度和埋设深度之间的关系式。

$$T_{26} = 8.817 \ln D + 83.939 \quad (23)$$

$$T_{24} = 8.817 \ln D + 81.939 \quad (24)$$

$$T_{22} = 8.817 \ln D + 79.939 \quad (25)$$

$$T_{20} = 8.817 \ln D + 77.939 \quad (26)$$

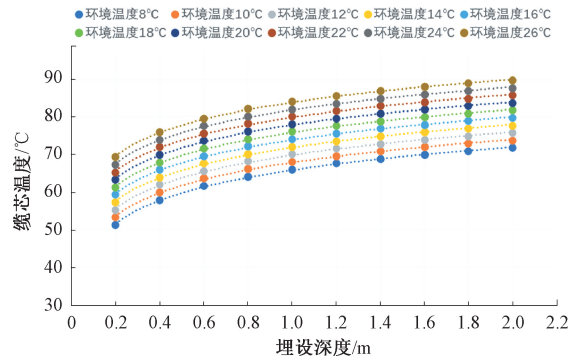


图12 不同环境温度下缆芯温度与埋设深度的关系曲线

Fig. 12 Relationship curves of cable core temperature and buried depth under different ambient temperatures

$$T_{18} = 8.817 \ln D + 75.939 \quad (27)$$

$$T_{16} = 8.817 \ln D + 73.939 \quad (28)$$

$$T_{14} = 8.817 \ln D + 71.939 \quad (29)$$

$$T_{12} = 8.817 \ln D + 69.939 \quad (30)$$

$$T_{10} = 8.817 \ln D + 67.939 \quad (31)$$

$$T_8 = 8.817 \ln D + 65.939 \quad (32)$$

式中: T_{26} 、 T_{24} 、 T_{22} 、 T_{20} 、 T_{18} 、 T_{16} 、 T_{14} 、 T_{12} 、 T_{10} 、 T_8 依次为 26°C 、 24°C 、 22°C 、 20°C 、 18°C 、 16°C 、 14°C 、 12°C 、 10°C 、 8°C 环境温度下的海底电缆缆芯温度; D 为海底电缆的埋设深度。

结合图 12 可知,关系曲线的弯曲程度不受环境温度的影响,但关系曲线的均值大小会随着环境温度的增加而增加,且存在线性关系,环境温度每升高 1°C , 均值大小升高 1°C 。结合关系式 (23) ~ (32), 可以整合出如下所示的综合环境温度 t 、埋设深度 D 和缆芯温度 T 这 3 个变量的关系方程式通式。

$$T = 8.817 \ln D + 83.939 + t - 26 \quad (33)$$

2.3 海底电缆埋设深度实时预测分析

在正常运行条件下,海底电缆的缆芯温度受到两个方面的影响:1) 载流量;2) 环境条件。其中,环境条件又分为环境温度和埋设深度。海底电缆产生的热量对周边环境的影响是有限的,在正常埋设深度下,基本上只由土壤来承担散热,而随着埋设深度的变浅,便由土壤和海水共同承担散热,并且土壤的散热比重逐渐减小,海水的散热比重逐渐增加。这说明了在不同的埋设深度下,海底电缆的散热情况是不同的,所以其缆芯温度会随着埋设深度的减少而降低。

结合上文中所探讨的不同载流量下埋设深度对海底电缆缆芯温度的影响、不同环境温度下埋设深度对海底电缆缆芯温度的影响,可以整合出如下所示的综合载流量、环境温度、埋设深度和缆芯温度的关系方程式通式。

$$T = y_1 \ln D + y_2 + t - 26 \quad (34)$$

现将这个通式变形,得到如下所示的以海底电缆埋设深度为因变量,缆芯温度、环境温度和载流量为自变量的关系方程式通式。

$$D = e^{\frac{T-y_2-t+26}{y_1}} \quad (35)$$

表 2 海底电缆埋设深度计算值与仿真值的比较

Table 2 Comparison of calculated and simulated buried depth of submarine cable

载流量百分比	10%		30%		50%		70%		90%	
环境温度/℃	12	22	12	22	12	22	12	22	12	22
缆芯温度/℃	12.66	22.62	17.73	26.89	28	36.58	42.41	46.52	61.35	57.14
仿真值/m	1.2	0.8	1.8	0.6	2.0	1.0	1.6	0.4	1.4	0.2
计算值/m	1.177	0.788	1.765	0.620	1.951	1.021	1.583	0.406	1.401	0.192
误差值/m	0.023	0.012	0.035	0.020	0.049	0.021	0.017	0.006	0.001	0.008

由表 2 可知,海底电缆在各种运行条件下,埋设深度的计算值与仿真值之间的误差均小于 0.05 m,说明本文拟合的关系方程式通式与海底电缆仿真情况之间的契合度非常高,具有很高的可靠性和精确度。

由于海底电缆埋在极其复杂的海洋环境中,除了上述探讨过的诸多因素之外,土壤与海水的对流换热系数和土壤导热系数也会影响到海底电缆的缆芯温度,分析如下:

1) 土壤与海水的对流换热系数会影响土壤向海水的散热速度和散热量,从而影响到海底电缆的缆芯温度以及海底电缆周边的温度分布。但在一般情况下,土壤与海水的对流换热系数受风速和温差的影响在 $200 \sim 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{℃}$ 范围内变化,这种变化对海底电缆缆芯温度的影响非常小,故仿真时可取一个均值 $600 \text{ W/m}^2 \cdot \text{℃}$ 。

2) 土壤导热系数会影响海底电缆向土壤的散热速度和散热量,海底地形复杂,海床土质多样,同一条海底电缆在不同区段的土壤导热系数有所不同,甚至在同一区段不同埋设深度的土壤导热系数也会有所不同,但是在同一片海域下这种差异非常小,故仿真时可以统一为固定值 $1.5 \text{ W/m} \cdot \text{℃}$ 。

在实际的海底电缆监测工程中,只需要获取当前的运行载流量、海底电缆缆芯温度以及海底环境温度,就能通过关系方程式通式对海底电缆的埋设深度进行实时预测。一方面可以掌握海底电缆当前的埋设深度情况,对埋设深度较浅的区域加强保护或者提前预警,保证海底电缆的安全稳定运行;另一方面可以对海底电缆的埋设深度进行跟踪监测,掌握其变化趋势,为海底电缆后续的风险评估提供有效支撑。因此,本文提出的海底电缆埋设深度实时预测方法具有一定的合理性和实用性。

3 实验验证

为验证本文所建立的海底电缆埋设深度实时预测方

现对海底电缆施加不同的运行条件,比较海底电缆埋设深度的计算值与仿真值之间的数值大小,如表 2 所示,分析关系方程式通式与海底电缆仿真情况之间的契合度。

法的可行性与正确性,选取某油气平台 2022 年 1 月 1 日~2022 年 3 月 31 日实际监测的多源数据,共 90 d,采集间隔为 5 min。

海底电缆温度监测系统能定时上传各监测点的实际缆芯温度,海底电缆当前运行的载流量以及不同季节的海底环境温度也能被工程现场实时监测。这里以某一个监测点为例,将以上 3 种实时数据代入到关系方程式通式中,计算得到该位置处 1 d 时间内海底电缆埋设深度的变化情况,如图 13 所示。

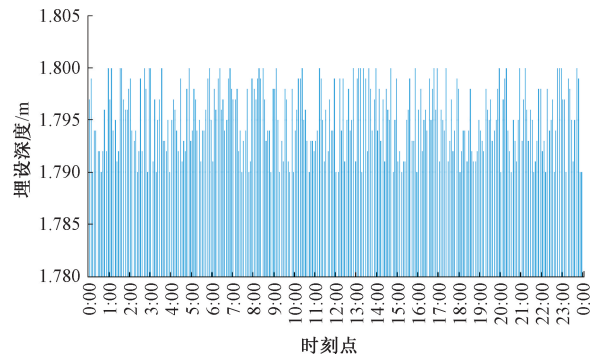


图 13 海底电缆埋设深度变化情况

Fig. 13 Change of buried depth of submarine cable

由图 13 可得,该位置处 1 d 时间内海底电缆埋设深度的极差不超过 0.01 m,说明海底电缆的埋设深度在短时间内基本保持稳定。

当海底电缆正常运行时,由于洋流冲刷或者淤泥沉积的影响,海底电缆埋设深度处于长时间缓慢变化的状态,即便出现突发的异常情况,如拖网、拖锚、鱼类活动等,其在较为明显变化之后依然会保持这种状态。当海底电缆发生电气故障时,故障点处及周围海底电缆的温度会发生突变。短路故障时,故障点及周围几十米内的缆芯温度会大幅度上升;漏电故障时,故障点及周围几米内的缆芯温度会小幅度上升,如图 14 所示。由于海底电缆埋设深度变化所造成的缆芯温度变化程度远小于海底

电缆电气故障所带来的影响,因此,将海底电缆缆芯温度的突变数据进行剔除,可有效剔除海底电缆电气故障带来的影响,再将剩余的数据取平均值,以此来代表海底电缆在这 1 d 时间内的埋设深度水平。以同样的方式,将该监测点的埋设深度计算值按日记录下来,在长时间的数据累积之后,便可以得到该位置处的海底电缆埋设深度变化趋势,如图 15 所示。

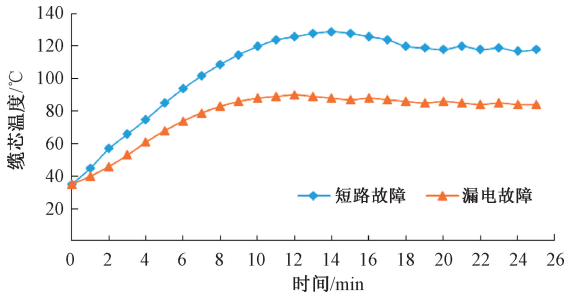


图 14 电气故障对缆芯温度的影响

Fig. 14 Effect of electrical fault on cable core temperature

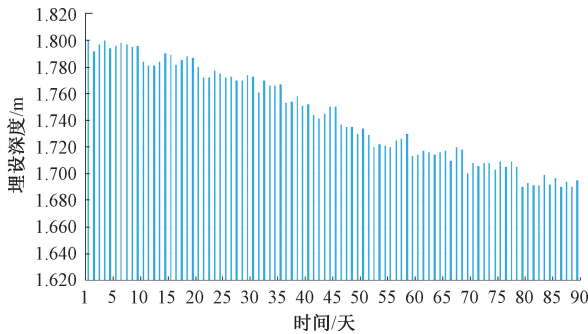


图 15 海底电缆埋设深度变化趋势

Fig. 15 Variation trend of submarine cable buried depth

由图 15 可得,该位置处 90 d 时间内海底电缆的埋设深度从 1.795 m 减少到了 1.695 m,整个过程变化缓慢且呈下降趋势,符合实际。

海底电缆扰动监测系统能定时上传各监测点的实际扰动能量,这里以某一个监测点为例,记录该位置处 1 d 时间内的扰动能量变化情况,如图 16 所示。

海底环境在多数情况下存在洋流冲刷、鱼类活动等,这些给海底电缆造成的扰动能量比较小,少数情况下会有船抛锚、捕鱼活动、抛掷物体、疏浚、以及带挖掘和冲击的施工作业等,这些给海底电缆造成的扰动能量比较大。采用四分位法将 1 d 时间内的扰动能量数据分为 4 个部分,可有效剔除少有的人类活动和环境噪声的情况,再将剩余的数据取平均值,以此来代表海底电缆在这 1 d 时间内的扰动能量水平,如图 17 所示。以同样的方式,将该监测点的扰动能量按日记录下来,在长时间的数据累积之后,便可以得到该位置处的海底电缆扰动能量变化

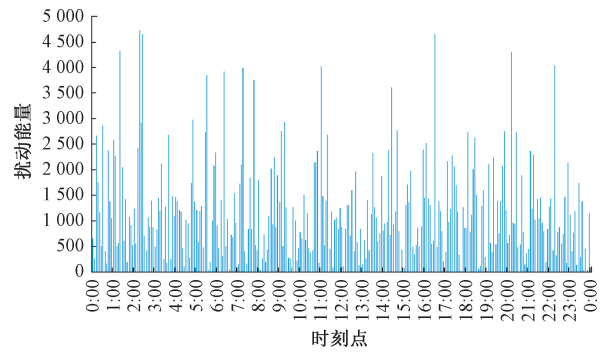


图 16 海底电缆扰动能量变化情况

Fig. 16 Change of submarine cable disturbance energy

趋势,如图 18 所示。

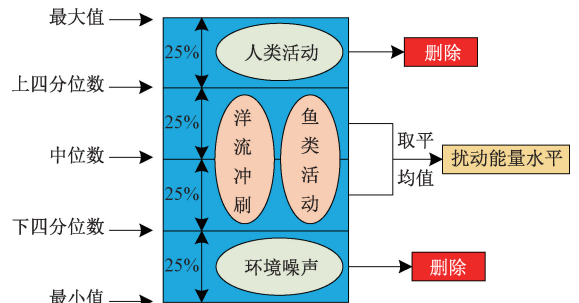


图 17 海底电缆扰动能量数据分类

Fig. 17 Classification of submarine cable disturbance energy data

由图 18 可得,该位置处 90 d 时间内的海底电缆扰动能量从 900 增加到了 1 800,整个过程变化缓慢且呈上升趋势。结合该位置处的海底电缆埋设深度变化趋势,可以看出随着海底电缆埋设深度的减少,该位置处的扰动能量也会随之增加,符合实际,从而验证了本文提出的海底电缆埋设深度实时预测方法具有一定可行性和正确性,为海底电缆埋设深度的实时预测提供了新的理论依据。

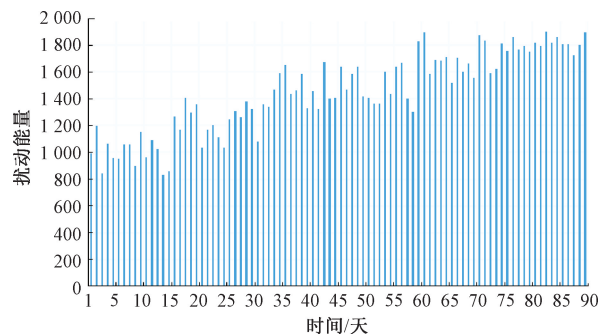


图 18 海底电缆扰动能量变化趋势

Fig. 18 Variation trend of submarine cable disturbance energy

在实际的海底电缆工程中,海底电缆埋设深度的探测主要依赖于外部硬件设备,存在人工成本高、探测周期长等问题。对于本文选取的油气平台而言,通常每隔几个月或者半年才会对海底电缆的埋设深度进行一次实际探测,从而定期掌握海底电缆全段的埋设深度变化情况。虽然海底电缆埋设深度实测值有很高的准确性,但是数据量极少且非常离散,甚至存在数据缺失等情况,无法准确反映出海底电缆埋设深度的变化进程,导致不能及时发现因海底电缆埋深变化而引起的缺陷和故障,进而存在较大的安全风险和经济损失风险。该油气平台在 2022 年 1 月 1 日~2022 年 3 月 31 日期间对海底电缆的埋设深度进行了一次实际探测。由于海底电缆的监测点过于密集,监测数据量极大,因此对海底电缆部分埋设段在探测期间的实测值和预测值进行对比分析,如图 19 所示。

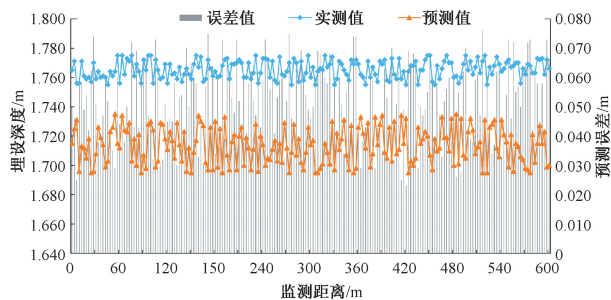


图 19 海底电缆埋设深度对比

Fig. 19 Comparison of submarine cable buried depth

由图 19 可得,海底电缆埋设深度实测值与预测值之间的误差为 3 cm~8 cm,相比于海底电缆的初始埋设深度 2.00 m 而言,该误差值在可接受的范围之内,说明本文提出的海底电缆埋设深度实时预测方法具有较高的精度。

因此,在实际工程运用中,利用该预测方法,不仅可以节省大量的人力物力,也能对海底电缆的埋设深度进行实时监测,及时发现海底电缆的缺陷和故障,从而弥补现有海底电缆埋设深度探测方式的不足。

4 结 论

本文以 35 kV 光电复合型三芯海底电缆为主要研究对象,基于有限元法整合出海底电缆埋设深度实时预测的关系方程式通式,同时运用工程实际监测的多源数据验证了该预测方法的可行性与正确性,为海底电缆埋设深度的实时预测提供了新的理论依据。得出的主要结论如下:

1) 不同载流量下缆芯温度与埋设深度的关系曲线符合对数型函数,该对数型函数有两个系数,它们分别对应

关系曲线的弯曲程度和均值大小,且均会随着载流量的增加而增加。

2) 不同环境温度下缆芯温度与埋设深度的关系曲线也符合对数型函数,但关系曲线的弯曲程度不受环境温度的影响,关系曲线的均值大小会随着环境温度的增加而增加,且存在线性关系,环境温度每升高 1℃,均值大小升高 1℃。

3) 本文充分考虑了影响海底电缆缆芯温度的诸多因素,整合出以海底电缆埋设深度为因变量,缆芯温度、环境温度和载流量为自变量的关系方程式通式。在实际的海底电缆监测工程中,只需要获取当前的运行载流量、海底电缆缆芯温度以及海底环境温度,就能通过关系方程式通式对海底电缆的埋设深度进行实时预测。

4) 海底电缆在各种运行条件下,埋设深度的计算值与仿真值之间的误差均小于 0.05 m,说明本文拟合的关系方程式通式与海底电缆仿真情况之间的契合度非常高,具有很高的可靠性和精确度。

5) 在实验验证中,监测位置处 90 d 时间内,随着海底电缆埋设深度的减少,该位置处的扰动能量也会随之增加,符合实际,从而验证了本文提出的海底电缆埋设深度实时预测方法具有一定可行性和正确性。

6) 通过对海底电缆部分埋设段在实际探测期间的实测值和预测值进行对比分析,其预测误差为 3~8 cm,说明本文提出的海底电缆埋设深度实时预测方法具有较高的预测精度。

参考文献

- [1] 刘耀,赵小令,吴佳玮,等. 高压直流海缆工程应用现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 1-8.
LIU Y, ZHAO X L, WU J W, et al. Application status and prospect of HVDC submarine cable engineering [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(2): 1-8.
- [2] 赵勇,丁锐,张静,等. 海底电缆工程施工装备发展现状[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S2): 173-179.
ZHAO Y, DING R, ZHANG J, et al. Submarine cable engineering construction equipment development status [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2022, 53(S2): 173-179.
- [3] 侯帅,王毅松,朱闻博,等. 高压海底电缆监测技术与应用综述[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 49-58.
HOU SH, WANG Y S, ZHU W B, et al. Review on monitoring technology and application of high voltage submarine cable [J]. China Southern Power Grid technology, 2023, 17(5): 49-58.
- [4] 汪逸凡. 海底线缆埋深指数(BPI)研究[D]. 杭州: 杭

- 州电子科技大学, 2020.
- WANG Y F. Submarine cable depth index (BPI) study [J]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020.
- [5] 冀大雄, 周佳龙, 钱建华, 等. 海底电缆检测方法发展现状综述 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 36-49.
- JI D X, ZHOU J L, QIAN H J, et al. Overview of the development of submarine cable detection methods [J]. China Southern Power Grid Technology, 2021, 15(5): 36-49.
- [6] 王强, 陈嘉伟, 姚弘毅, 等. 联合多波束和侧扫声纳的非掩埋海缆调查技术 [J]. 海洋测绘, 2022, 42(3): 17-21.
- WANG Q, CHEN J W, YAO H Y, et al. Unburied submarine cable survey technique based on combined multi-beam and side-scan sonar [J]. Marine Mapping, 2022, 42(3): 17-21.
- [7] 毕继鑫, 吴文超, 占晓明. 多波束测深系统检测海底电缆及数据处理方法研究 [J]. 海洋测绘, 2022, 42(2): 17-21.
- BI J X, WU W CH, ZHAN X M. Research on submarine cable detection and data processing in multi-beam sounding system [J]. Marine Mapping, 2022, 42(2): 17-21.
- [8] 张旭莘, 陈晓红, 梁蕾, 等. 长距离海缆在线监测改进型 C-OTDR 系统 [J]. 光学学报, 2021, 41(13): 9-20.
- ZHANG X P, CHEN X H, LIANG L, et al. Improved C-OTDR system for on-line monitoring of long distance submarine cable [J]. Acta Optica, 2021, 41(13): 9-20.
- [9] 葛军凯, 张磊, 徐蓓蓓, 等. 基于三维磁场测量的海缆路由检测技术研究 [J]. 浙江电力, 2021, 40(2): 20-25.
- GE J K, ZHANG L, XUN B B, et al. Research on submarine cable routing detection technology based on three-dimensional magnetic field measurement [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2): 20-25.
- [10] 黄小卫, 吴聪, 郭强, 等. 海南联网工程 500kV 海底电缆检测水下遥控机器人的关键功能设计 [J]. 南方电网技术, 2018, 12(7): 52-55.
- HUANG X W, WU C, GUO Q, et al. Key function design of 500kV submarine cable detection underwater remote control robot in Hainan network project [J]. China Southern Power Grid Technology, 2018, 12(7): 52-55.
- [11] 彭聪, 汤民强, 欧阳永忠, 等. 基于 ExactBlackman 窗函数的海底线缆磁法探测应用与分析 [J]. 海洋测绘, 2023, 43(1): 19-23.
- PENG Q, TANG M Q, OUYANG Y ZH, et al. Application and analysis of submarine cable magnetic detection based on ExactBlackman window function [J]. Marine Mapping, 2023, 43(1): 19-23.
- [12] 吕安强. 基于分布式光纤应变和温度传感的光纤复合海底电缆状态监测方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- LYU AN Q. Research on condition monitoring method of fiber composite submarine cable based on distributed fiber strain and temperature sensing [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [13] 马国明, 王思涵, 秦炜淇, 等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望 [J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3032-3047.
- MA G M, WANG S H, QIN W Q, et al. Research and prospect of optical fiber perception of transmission line operating state [J]. High Voltage Technology, 2022, 48(8): 3032-3047.
- [14] 林钰, 胡意茹, 李茜, 等. 复杂环境中海底电缆温度场及载流量模型研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 39-46.
- LIN Y, HU Y R, LI Q, et al. Research on temperature field and carrying capacity model of submarine cable in complex environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 39-46.
- [15] 林晓波, 何旭涛, 陈国志, 等. 三芯光纤复合海底电缆超负荷运行有限元建模 [J]. 光通信研究, 2018(1): 23-26.
- LIN X B, HE X T, CHEN G ZH, et al. Finite element modeling of overload operation of three-core fiber-optic composite submarine cable [J]. Optical Communication Research, 2018(1): 23-26.
- [16] 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.
- LYU AN Q. KOU X, YIN CH Q, et al. Modeling the relationship between composite fiber and conductor temperature in three-core submarine cable [J]. Transactions of Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 59-65.
- [17] 吕安强, 李永倩, 李静, 等. 光电复合海缆中光纤与导体温度关系的有限元分析方法 [J]. 电工技术学

报, 2014, 29(4): 91-96.

LYU AN Q, LI Y Q, LI J, et al. Finite element method for analyzing the relationship between fiber and conductor temperature in photoelectric composite submarine cable [J]. Transactions of Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 91-96.

- [18] 刘娟. 光纤复合海底电缆电气故障有限元研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

LIU J. Finite element study on electrical fault of fiber-optic composite submarine cable [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

- [19] 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 CH Q, LYU 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.

- [20] 刘莘, 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. Three dimensional finite element model meshing method for electric machine temperature field analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 173-178.

- [21] 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, 2018, DOI: 10.1049/joe.2018.8586.

- [22] 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, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3005305.

作者简介



张安安, 2000 年于四川大学获得学士学位, 2003 年于四川大学获得硕士学位, 2010 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学电气信息学院教授, 主要研究方向为综合能源系统、电-气协调控制、电气设备状态监测。

E-mail: ananzhang@swpu.edu.cn

Zhang An'an received his B. Sc. degree from Sichuan University in 2000, M. Sc. degree from Sichuan University in 2003, Ph. D. degree from Sichuan University in 2010. He is currently a professor in Southwest Petroleum University School of Electrical Engineering and Information. His main research interests include integrated energy systems, electric-gas coordination control and electrical equipment condition monitoring.



何明光, 2021 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测。

E-mail: 2770747489@qq.com

He Mingguang received his B. Sc. degree in 2021 from Southwest Petroleum University. Now he is a M. Sc. candidate in 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, 现为西南石油大学电气信息学院副教授, 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。

E-mail: swpuliqian@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. Now she is an associate professor in Southwest Petroleum University School of Electrical Engineering and Information. Her main research interests include power system stability and control, distributed generation and integrated energy systems.