

基于 LassoNet-ISSA-BP 神经网络的局部穿管电缆 热点温度反演方法

宋妍霖^{1,2}, 吴田^{1,2}, 何清³, 祝和升⁴

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430077; 4. 国网浙江省电力有限公司缙云县供电公司, 浙江 丽水 321400)

摘要: 局部穿管电缆作为城市电网载流量的瓶颈位置, 其温度监测至关重要。针对目前测温方法精度低、无法确定不同情况下的最佳测温点组合且输入量的选取方法不适用于“黑箱”网络的问题, 提出了一种 LassoNet 嵌入改进 BP 神经网络的实时温度反演模型。首先通过 LassoNet 网络自主量化选定适用于局部穿管电缆的神经网络的最佳测温点组合; 随后引入 iCircle 映射、惯性权重思想、Levy 飞行混合策略对麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)的初始分布、搜索策略以及迭代方法进行改进以提升全局寻优性能, 并利用改进后的 SSA 对 BP 神经网络参数进行寻优, 实现了多工况下热点温度的快速、高精度反演。建立了 YJLW03-64/110 kV 电缆局部穿管有限元仿真模型, 通过与 IEC 标准的对比验证了该模型的准确性, 随后构造了不同负荷类型下的热点温度样本数据集, 基于该数据集对所提方法与典型的 5 种反演算法进行了对比分析, 同时为了验证算法的迁移性能通过 220 kV 局部穿管电缆及 110 kV 电缆接头的温度反演进行了测试。结果表明, 所提出的反演方法误差可控制在 1.5 °C 以内, 收敛速度快, 能够系统化地选取测温点且具有更高的精度和鲁棒性。

关键词: 局部穿管电缆; 温度反演; 多策略改进麻雀搜索算法; BP 神经网络; LassoNet

Hot Spot Temperature Inversion Method of Local Tube-Through Cable Based on LassoNet-ISSA-BP Neural Network

SONG Yanlin^{1,2}, WU Tian^{1,2}, HE Qing³, ZHU Hesheng⁴

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Hubei Transmission Line Engineering Technology Research Center, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 4. Jinyun County Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui, Zhejiang 321400, China)

Abstract: Local tube-through cables are the bottleneck locations of urban power grid current carrying capacity, the temperature monitoring of which is crucial. A real-time temperature inversion model based on LassoNet embedding and improved BP neural network is proposed to address the problems of low accuracy of current temperature measurement methods, inability to determine the optimal combination of temperature measurement points for different situations, and unsuitable input selection methods for "black box" networks. Firstly, the LassoNet network is used to autonomously quantify and select the optimal combination of temperature measurement points suitable for local tube-through cables neural networks; Subsequently, iCircle mapping, inertia weight concept, and Levy flight hybrid strategy are introduced to improve the initial distribution, search strategy, and iterative method of sparrow search algorithm (SSA) to enhance global optimization performance. The improved SSA is used to optimize the parameters of BP neural network, achieving fast and high-precision inversion of hot spot temperature under multiple operating conditions. A finite element simulation model of YJLW03-64/110 kV cable local conduit is established, and the accuracy of the model is verified by comparing it with IEC standards. Then, a hot spot temperature sample dataset is constructed under different load types. Based on this dataset, the proposed method is compared and analyzed with five typical inverse algorithms. At the same time, in order to verify the transferability of the algorithm, temperature inversion of 220 kV local tube-through cables and 110 kV cable joints is tested. The results show that the proposed inversion method can control the error within 1.5 °C, has a fast convergence speed, can systematically select temperature measurement points, and has higher accuracy and robustness.

Key words: local tube-through cable; temperature inversion; multi-strategy improvement of sparrow search algorithm; BP neural network; LassoNet

0 引言

电力电缆正逐步成为现代城市电力传输的主流方式^[1]。为在安全裕度内提升电缆的利用率,准确评估各种条件下在役电缆的载流能力至关重要。当电缆跨越街道、铁路或其他地下设施时,通常采用局部穿管方式对其进行机械保护。然而,埋设于短管中的电缆段易产生过大的热应力,成为电缆线路载流能力的瓶颈。实时监测局部穿管电缆的热点温度,是评估其安全状态和动态载流量的关键指标。精确且实时的温度监测对保障电力系统运行安全性和经济性具有重大意义。

目前,电缆温度的计算主要采用标准法和数值计算法,国内外的研究者在此领域已开展了大量研究。IEC 60287 作为当前应用最为广泛的电缆热评估标准,将复杂的三维传热分析简化为一维传热分析,但由于文献[2]中所述的各种假设限制,局部穿管电缆这一标准中未提及的非常规敷设情况,因其涉及较大的轴向传热,无法在 IEC 指导下进行准确的热计算。此外,现有的植入式温度传感方法以及光纤/红外传感方法均不适用于已敷设封装并投入运行的电缆。具有代表性的传统方法还包括三维有限元法^[3]、数值计算法^[4-5]和热路模型法^[6-7]等,然而,这些现有研究方法普遍存在计算效率不高、反演精度低以及适用性弱等问题^[8]。

随着数据驱动技术的不断发展,基于表面温度数据的反演方法已成为非常规敷设工况下热点温度实时监测的主流技术之一。目前,支持向量机^[9-10]、BP 神经网络^[11]、长短期递归神经网络^[12]等多种算法在特殊敷设工况下的线芯温度反演领域得到了广泛研究。其中,BP 神经网络相较于其他网络,具备更强的非线性映射能力和泛化能力,且学习效率更高。然而,表面温度数据包含大量冗余信息,加之层层传热的影响,表面温度与初始热点温度的相关性较低,导致精确反推难度较大。针对现有算法在收敛速度、回归精度方面的不足以及易出现过拟合等问题,研究者们常引入元启发算法进行改进^[13]。特别是 2020 年,薛建凯等^[14]基于麻雀觅食和躲避掠

食者行为提出的麻雀搜索算法,因其处理多极值问题的优异性能而备受瞩目。尽管在此基础上改进后的算法性能有所提升,但在迭代中后期,搜索性能下降,种群多样性减少,导致在工况快速变化时,出现计算速度过慢、反演精度低、多次陷入局部最优等问题。因此,亟需针对这些现存问题进行自适应提升,以增强算法的鲁棒性和优化效果。

同时,在测温点的选择上,大量数据输入在特定工况下能够精确反演出热点温度。然而,面对高维数据,模型易陷入维数灾难,导致过拟合;而输入特征过少则会使蕴含信息不足,降低反演精度。因此,必须对影响热点温度的多维输入量进行合理选择。目前,代表性的方法包括经验确定、灰色关联度法^[15]、主成分分析法^[16]、随机森林算法^[17-18]和 Lasso^[19]等。这些方法的核心思想是消除变量间的线性相关性,或根据输入量对输出量的线性贡献程度进行选择。然而,它们存在可解释性差、不适用于非线性模型等问题。此外,现有测温点选取方法还面临无法根据不同工况自主确定最优测温点组合的挑战。

本文针对现有局部穿管电缆热点温度反演方法存在的问题,以 YJLW03-64/110 kV-500 mm²型局部穿管电缆为研究对象,构建了考虑轴向传热的三维几何模型及多物理场耦合模型。利用 LassoNet 预学习技术选取适用于前馈神经网络模型的反演输入向量,并通过改进的麻雀搜索算法优化输入层与隐藏层之间随机生成的权重和阈值,提出了一种基于表面温度和负荷的局部穿管电缆热点温度反演新方法。设计了动态热环境下不同负荷类型的工况仿真,并与 LN (LassoNet)-SSA-BP、LN-WOA-BP、LN-GWO-BP、Lasso-SSA-BP 及 PCA-SSA-BP 等反演方法进行了对比分析。研究结果表明,本文所提方法在特征提取和反演效果方面均有显著提升,为局部穿管电缆的实时温度检测和载流量评估提供了重要参考。

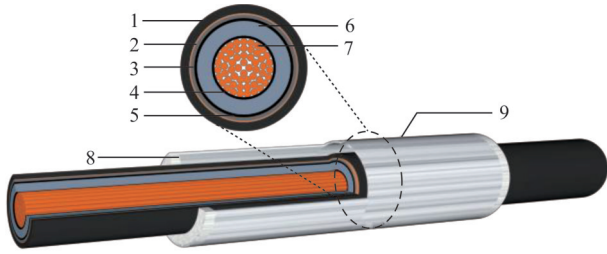
1 多物理耦合的局部穿管电缆温升模型

1.1 模型简化及几何模型

仿真模型以 YJLW03-64/110 kV-500 mm²型号电缆为构建对象,其具体结构如图 1 所示。由于在三相对称电流通过时,所形成的磁场会相互叠加并抵消,从而不产生涡流,因此仅需考虑单根电缆的情况。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807110)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51807110).



图注:1-电缆外护套;2-金属护套;3-绕包层;4-绝缘内屏蔽;5-绝缘外屏蔽;6-绝缘层;7-导体线芯;8-混凝土密封层;9-HDPE保护管

图 1 局部穿管电缆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of local tube-through cable structure

为提高仿真效率,对局部穿管电缆结构进行适当的等效简化,具体步骤如下:首先,将电缆抽象为多层同心圆筒结构。其次,将绝缘内屏蔽和绝缘外屏蔽合并至绝缘层。第三,依据 IEC60287 标准,采用等效外径替代波纹铝结构的实际外径,并在模型中忽略其螺旋结构,以简化计算过程。最后,假设电缆位于管道的中心位置。

1.2 温度场数学模型和边界条件

1.2.1 温度场数学模型

仿真模型中包含固体域和流体域,需综合考虑流-热-固之间的相互作用,涵盖以下3种传热机制:固体域内的热传导过程、穿管区段中封闭空气层的热对流现象,以及电缆外护套表面与保护管内壁之间的热辐射(电缆外护套表面与保护管内壁的辐射率分别设置为0.91和0.9^[20])。

1.2.2 边界条件

热传导微分方程的求解需要边界约束的边界条件作为定解条件,根据三维温度场各个边界的特点,将边界条件选取如下。

第一类边界条件:将模型中深处土壤边界(下边界)选取为第一类边界条件,限制边界温度为已知常数。

$$T(x, y, z)|_{\Gamma_1} = 288.15 \text{ K} \quad (1)$$

式中: $T(x, y, z)$ 为坐标 (x, y, z) 处的温度; Γ_1 为边界1。

第二类边界条件:将与电缆距离为2 m处的边界平面(左右边界)设置为绝热边界,选取为第二类边界条件,限制边界上的热通量为已知常数。

$$-\lambda_k \frac{\partial T}{\partial N}|_{\Gamma_2} = 0 \quad (2)$$

式中: λ_k 为导热系数; T 为实时温度; N 为边界法向单位矢量; Γ_2 为边界2。

第三类边界条件:将地表边界(上边界)选取为第三类边界条件,限制边界与周围流体间的对流换热系数 h 及周围流体的温度为已知常数或函数。

$$-\lambda_k \frac{\partial T}{\partial N}|_{\Gamma_3} = h \cdot (T - t_f) \quad (3)$$

式中: Γ_3 为边界3; h 为外部环境对流散热系数,取 $7.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; t_f 为环境温度,取 293.15 K 。

1.3 参数设置

以电压等级为110 kV、导体截面为 500 mm^2 的 YJLW03-64 电缆为例,当穿管长度大于等于7 m时,由于热点位置向两端的轴向传热效应减弱,将形成温升平台,峰值温度与采用管道敷设 IEC 标准计算所得结果十分相近^[21]。因此,若设置穿管段长度为5 m,该长度下热点温度与 IEC 标准计算误差较大,且存在较高的超温风险。采用 HDPE 管作为保护管,两端采用混凝土密封。此外,在远离穿管段2 m处的直埋段导体温度将不受轴向热流影响,轴向热流密度近似为0(对应第二类边界条件),故直埋段长度取2 m。其他主要物理特性参数如表1所示。

表 1 局部穿管电缆物理特性参数表

Tab. 1 Physical characteristic parameters for local conduit cable

结构	材料	外圈半径/ mm	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
导体	铜	13.3	413
铝护套	铝	42.3	228
外护套	聚乙烯	46.3	0.295
两端密封	混凝土	69.45	1.28
绝缘内屏蔽	半导体屏蔽料	15.05	0.976
绝缘外屏蔽	半导体屏蔽料	33.05	0.976
绝缘层	交联聚乙烯	37.05	0.374

1.4 模型求解

使用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件进行计算,图2展示了在载荷为950 A时,局部穿管电缆的稳态温度分布剖面图;图3则呈现了轴向和径向的温度分布情况。从图3可以看出,穿管段中心位置的温度显著高于其他区域。当局部穿管段电缆的热点温度达到 XLPE 绝缘材料所允许的长期工作温度 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,电缆其他段的线芯载流能力尚未得到充分利用。

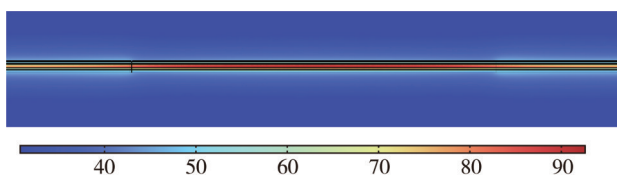


图2 稳态温度分布剖面图

Fig. 2 Profile plot of steady-state temperatures

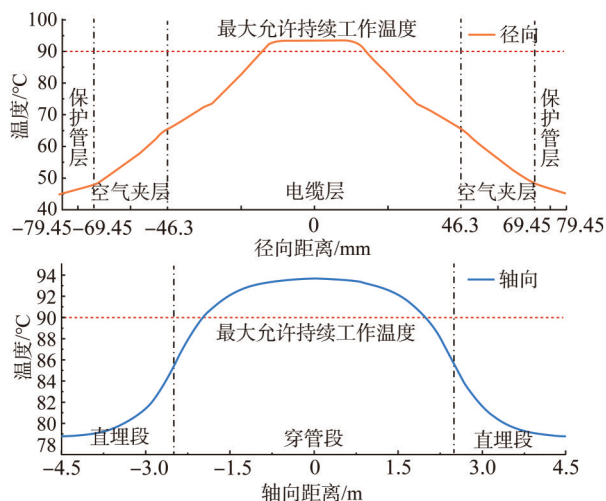


图3 轴向/径向温度分布图

Fig. 3 Axial/radial temperatures distribution plot

1.5 模型验证

基于前述的局部穿管电缆三维热流耦合仿真模型,当局部穿管长度为7 m(总长度为11 m)时导体在两端及中心位置的温度已达到稳定状态,形成稳定的平台段,这表明此时的导体温度已不再受穿管段与直埋段间轴向传热的影响。当施加950 A电流时穿管段和直埋段导体在平台段的温度分别为98.37 °C和78.74 °C。在相同条件下采用IEC 60287标准方法计算得到的管道敷设电缆和直埋电缆导体温度分别为98.2 °C和79.5 °C,即误差分别为0.17 %和0.96 %。表2详细列出了在不同负载电流下三维热流耦合模型与IEC 60287标准方法计算结果的对比。结果显示在低、中、高不同负载电流下模型的计算误差均保持在1.4 %以下,这表明该仿真模型具有较高的计算精度,初步验证了模型的准确性。

2 热点温度反演模型

2.1 模型架构

局部穿管电缆在受到轴向传热及环境因素的共同影响下,精确表征其表面与内部热点的线性热路关系显得尤为困难。然而,BP神经网络凭借其强大

表2 不同负荷下仿真模型计算误差

Tab. 2 Calculation errors of simulation model under different

loads		
负荷/A	直埋段计算误差/%	穿管段计算误差/%
400	1.19	0.89
800	0.74	1.33
1 200	1.02	1.24

的非线性映射能力和灵活的网络结构成为解决这一问题的有效工具。尽管如此,网络性能在很大程度上受制于初始权值和阈值的选择,若在连续的循环迭代过程中返回误差较大将显著延长学习过程。为此,采用ISSA算法来优化神经网络的权值和阈值,能够有效减少正式学习阶段的网络训练时间。此外,在测温点的选择方面借助LassoNet-BP模型,通过预学习的方式筛选出适用于非线性网络且具备稀疏性的输入特征组,进一步提升模型的性能和效率。

具体步骤如下。

步骤1:读取仿真计算结果,划分训练集和测试集,并对数据进行标准化预处理。

步骤2:初始化LassoNet网络参数。输入层次乘子 M 、路径乘子 ε 、学习率 α ,初始化惩罚系数 $\lambda = \lambda_0$ 以及活动特征的数量 $k = d$ 。

步骤3:在每次迭代中采用梯度下降法更新 (θ, W) 、 $L(\theta, W)$ 参数,依据 $\lambda = (1 + \varepsilon)\lambda$ 更新后的惩罚系数,将 k 非零 θ 参数的数量进行记录。

步骤4:当 θ 某特征对应的参数消失时将该时刻 λ 参数值记作该特征的重要度分数,选取最优 λ 分数对应的特征子集作为正式学习的输入特征。

步骤5:初始化麻雀种群参数。输入最大迭代次数、种群规模、发现者比例、预警者比例、安全阈值和预警值。通过iCircle映射初始化种群位置。

步骤6:将训练集代入BP模型计算每个个体的适应度值,并据此进行排序,确定当前最优和最差适应度值及其对应位置。

步骤7:更新生产者、跟随者和警戒者的位置。

步骤8:计算位置更新后的适应度值并更新当前最优适应度值及其对应位置。

步骤9:判定是否达到最大迭代次数。若达到则输出全局最优解;否则返回步骤6继续迭代。

步骤10:以选定的特征集作为输入,将输出的全局最优解赋值给初始权值和阈值,运用BP神经网络进行反演。

模型流程图如图 4 所示。

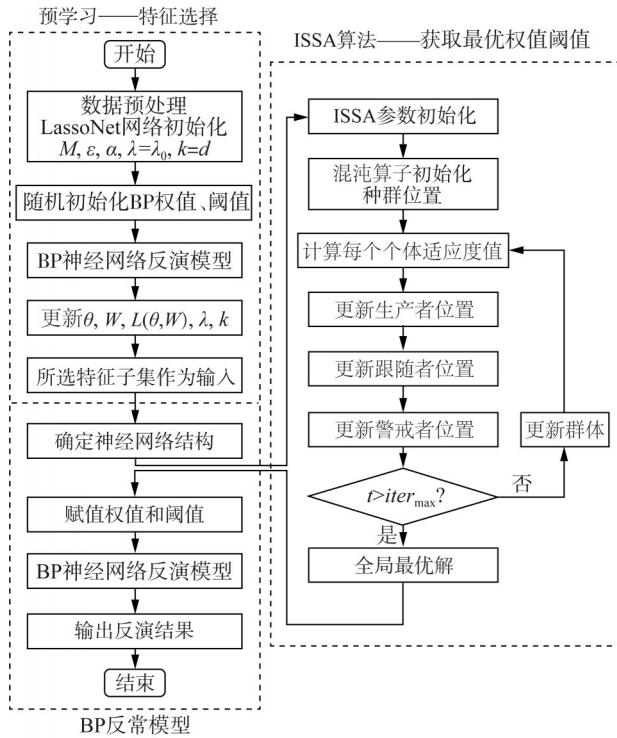


图 4 整体模型架构图

Fig. 4 Overall model architecture diagram

2.2 基于LassoNet的预学习网络

LassoNet^[22]是一种具备全局特征选择功能的神经网络框架，其核心思想源自线性Lasso回归模型，可视作Lasso线性模型的延伸。该框架将Lasso回归及其特征稀疏性特性拓展至前馈神经网络^[23]。LassoNet的输入特征选择通过输入到输出的跳过层连接实现，损失函数则借助L1正则化项对跳过层施加惩罚旨在消除冗余并评估变量重要性，其目标函数定义如下。

$$\min_{\theta, W} L(\theta, W) + \lambda \|\theta\|_1 \quad (4)$$

式中： $L(\theta, W) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_p - T_i)^2$ 为损失函数； n 为训练集总数量； T_p 为仿真计算结果值； T_i 为反演值； θ 为跳过层的特征权重； λ 为惩罚系数，用于控制反演模型的复杂度； W 为权值。

约束条件定义为：

$$\|W_j^{(1)}\|_{\infty} \leq M|\theta_j|, j = 1, 2, 3, \dots, d \quad (5)$$

式中： $W_j^{(1)}$ 为特征 j 在第一隐藏层的权重； d 为特征数量； M 为控制线性与非线性分量相对强度的超参数，表明每个特征在前馈神经网络中的权值 $W_j^{(1)}$ 需

小于或等于该特征在线性模型上参数的 M 倍。通过式(5)的约束，当 $\theta_j = 0$ 时， $W_j = 0$ ，即若跳过层权值 $\theta_j = 0$ 时，特征 j 将不参与整个网络。因此，通过控制跳跃层权值的稀疏性可以完全控制特征的稀疏性。

本文所提出的LassoNet-BP模型示意图如图5所示，采用ReLU作为激活函数，在训练时移除对结果没有贡献的特征(图中灰色节点)。利用该模型进行预学习，选取权重不为0的测温点组合作为输入特征从而得到适用于BP网络且符合稀疏性的最佳测温点集合。

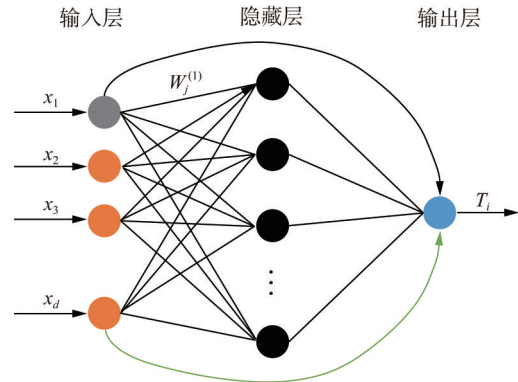


图 5 LassoNet-BP 模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of LassoNet-BP model

2.3 改进麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是由薛建凯等研究者基于麻雀捕食和被捕食的生物行为所发展的一种群体智能优化算法^[24]。在优化过程中，种群被划分为发现者、跟随者和警戒者3个部分，通过持续更新它们的位置以寻找目标函数的最优解。针对传统SSA算法存在的计算速度缓慢、反演精度低以及多次陷入局部最优等问题，所提出的改进算法的具体步骤如下。

步骤1：生成初始化种群。群智能算法的收敛速度和精度在很大程度上受初始种群分布影响^[25]。SSA算法的初始化种群是在可行域区间内基于随机函数生成的，但其空间位置分布的均匀性难以控制。通过利用混沌映射的随机性对种群进行初始化可以有效增加种群的多样性，从而提升算法在全局搜索方面的性能。常用的混沌算子包括Logistic映射、Circle映射等，然而Logistic映射在 $[0, 1]$ 区间内的概率分布存在不均匀性。相比之下Circle混沌映射具有更优越的遍历性和均匀性，能够生成 $[0, 1]$ 区间内的混沌数，但在 $[0.2, 0.6]$ 区间内的混沌

值取值频次过高^[26]。为确保混沌值分布的均匀性对原有的映射公式进行了修正, 修正后的 Circle 混沌映射记为 iCircle 映射, 其表达式为:

$$z_{i+1} = \text{mod}\left(4z_i + 0.4 - \frac{2.8}{2\pi} \cos(2\pi z_i + 0.1\pi), 1\right) \quad (6)$$

式中 z_{i+1} 、 z_i 分别为第 $i+1$ 、 i 个混沌值。

由式(6)得出的混沌序列被映射到第一代麻雀种群中, 映射依据式(7)进行。

$$x_i = l_b + z_i(u_b - l_b) \quad (7)$$

式中: x_i 为混沌序列载波至第一代麻雀种群的值, 即第 i 个麻雀的位置; u_b 为麻雀位置上界; l_b 为麻雀位置下界。

步骤 2: 更新发现者位置。本文在发现者位置更新公式中引入了上一代全局最优解以加快本次收敛速度。同时, 在搜索的早期阶段生产者需要采用大跨步在广泛的空间内进行搜索以确定最优解的大致位置; 而在搜索的后期阶段为了适应局部细致开发, 迭代步长需要逐渐减小, 局部搜索比例应当相应增加旨在更好地平衡全局搜索和局部开发, 提高算法在不同搜索阶段的适应性。因此, 本文引入了动态约束因子来平衡迭代各个时期算法的全局和局部搜索能力, 改进后的生产者位置更新公式如式(8)–(9)所示。

$$\alpha_y = \frac{\exp(4 - 4t/T_{\max}) - 1}{\exp(4 - 4t/T_{\max}) + 1} \quad (8)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t + \alpha_y \cdot (f_{j,t}^t - X_{i,j}^t), R_2 < S_T \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, R_2 \geq S_T \end{cases} \quad (9)$$

式中: α_y 为动态约束因子; $T_{\max}$ 为最大迭代次数, $X_{i,j}^t$ 、 $X_{i,j}^{t+1}$ 分别为第 t 轮、第 $t+1$ 轮迭代中第 i 个麻雀第 j 维的位置; Q 为服从标准正态分布的随机数; L 为 $1 \times d$ 的矩阵, 其所有元素均为 1; $f_{j,t}^t$ 为上一代全局最优解第 j 维的位置; R_2 为预警值, $R_2 \in [0, 1]$; S_T 为安全阈值, $S_T \in [0.5, 1]$ 。

当 $R_2 < S_T$ 时, 种群不受威胁, 其觅食范围将有所增加; 当 $R_2 \geq S_T$ 时天敌出现, 麻雀个体向安全区迁移。

步骤 3: 更新跟随者位置。在跟随者位置更新时适应度较优的麻雀会直接向当前最优位置移动, 容易导致大量跟随者聚集, 在短时间内快速收敛, 造成局部最优, 降低了搜索精度^[27]。针对该问题, 在适应度较优的跟随者进行位置更新时引入 levy 飞行策略^[28], 利用其特殊的随机游走模式扩大搜索范

围, 避免陷入局部最优。具体步骤为:

1) 根据式(10)完成所有跟随者的位置更新。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_w^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), i \leq N_U/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^t| \cdot A^+ \cdot L, i > N_U/2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: X_w^t 和 X_p^t 分别为 t 时刻生产者占据的最优位置和全局最差位置; $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$, A 为 $1 \times d$ 的矩阵, 其所有元素均为 1 或 -1, d 为搜索空间的维度; N_U 为种群规模。

2) 适应度较优的跟随者根据式(11)–式(13)再执行一次 Levy 飞行进行位置更新。

$$X_{i,j}^{t+1} = X_p^{t+1} + X_p^{t+1} \otimes \text{Levy}(d) \quad (11)$$

$$\text{Levy}(d) = \lambda_b \cdot \frac{v_1}{|v_2|^{1/\gamma}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} v_1 \sim N(0, \sigma^2), v_2 \sim N(0, 1) \\ \sigma = \left\{ \frac{\Gamma(1+\gamma) \cdot \sin(\pi\gamma/2)}{\Gamma(\frac{1+\gamma}{2}) \cdot \gamma \cdot 2^{\frac{\gamma-1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ_b 为步长缩放因子, 取 0.1; γ 为常数, 取 1.5; Γ 为伽马函数; $\text{Levy}(d)$ 表示服从 Levy 分布的路径, 其中 d 为维度; v_1 、 v_2 分别为服从特定正态分布的随机变量, 用于生成 Levy 飞行的随机特性; $N(0, \sigma^2)$ 表示均值为 0、方差为 σ^2 的正态分布; $N(0, 1)$ 表示标准正态分布; $\otimes$ 表示逐元素相乘。

步骤 4: 更新警戒者位置。在完成发现者和跟随者的位置更新后, 在种群中随机选取 10%~20% 的麻雀作为警戒者并依据式(14)更新位置。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_b^t + Q \cdot |X_{i,j}^t - X_b^t|, f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \cdot \frac{|X_{i,j}^t - X_w^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon}, f_i = f_g \end{cases} \quad (14)$$

式中: ε 为避免分母为零引入的最小常数; X_b^t 为全局最优位置; K 为取值范围在 $[-1, 1]$ 之内的随机数; f_i 为当前麻雀的适应度值; f_w 和 f_g 分别代表当前全局最优和最差适应度值; $f_i = f_g$ 时, 中间位置个体探测到危险并进行位置更新; $f_i > f_g$ 时, 边缘个体发出预警并进行位置更新。

2.4 样本数据收集

为验证反演模型的性能, 在电缆线芯施加各种大小和类型的负荷以模拟多种实际工况进行仿真, 获取以下 5 个工况的温度数据进行反演。

1) 工况 1: 电流以多个单阶跃形式施加, 以模拟实际线路的负载稳定期, 在负荷较小时局部穿管段温升较小, 不存在超温危险, 因此以 100 A 为间隔, 将电流范围设置为 700 A 到 1 300 A, 每次单阶跃工况运行 5 h, 共进行 7 次暂态计算。

2) 工况 2: 电流以周期性阶跃形式施加, 模拟日用电量波动较为缓和、规律的时期, 在晚高峰时段负荷达到最大, 共运行 2 个 24 h 周期。

3) 工况 3: 电流以多阶跃形式施加, 不固定时间间隔, 同时变化幅度大、变化速率慢。旨在模拟冬季和夏季等时期日用电量波动较大的情况。

4) 工况 4: 电流以变化速率快的非周期性形式施加, 变化速度较快, 变化幅度较为平缓, 为更贴近实际运行工况, 以 1 h 为间隔的分段函数模拟某居民区 110 kV 线路日实际负荷曲线, 热点温度、实际载荷以及等效载荷施加如图 6 所示。

5) 工况 5: 以型号为 YJLW03-Z 64/110 kV 630 mm² 的冷缩预制型接头为对象进行反演验证, 以验证算法的迁移能力。搭建有限元仿真模型进行计算, 其物理结构、边界条件及参数设定参照文献 [27], 以 COMSOL 作为计算工具。取 $7 \times 10^{-6} \Omega$ 作为基准接触电阻值“1”, 为探究接触电阻的值对反演的影响, 在其他条件不变的情况下分别仿真计算接触电阻设定为“0.5”、“1”、“2”时的温度分布情况。施加非周期性阶跃电流、单阶跃电流与等效负荷模拟负荷稳定期及负荷快速波动期, 工况 1—5 负荷施加情况如图 7 所示。

6) 工况 6: 以穿管长度为 5 m, 型号为 YJLW03-Z 127/220 kV-2 500 m² 的局部穿管电缆进行热循环实验, 其负荷情况、各层实测温度及环境温度如图 8 所示。

对于工况 1、2、3、4、6, 沿着保护管及电缆表面, 每隔 0.1 m 取一个温度监测点, 监测点处的温度分别记为 $[t_1, t_2, t_3, \dots, t_n]$, 按照 1 min 的频次记录温度数据组。其中, 直埋段、穿管段交界处分别在保护管层/电缆外表面上各取一个测温点, 同时记录环境温度, 共 9 300 组数据, 包括 48 个测温点、动态负荷数据及热点温度(穿管段中点导体温度), 随机选取 80 % 作为训练集 I , 20% 作为测试集; 对于工况 5, 沿着电缆本体表面以同样的方式进行取点及记录, 同时记录环境温度、负荷数据、接触电阻以及热点温度, 共 2 880 组数

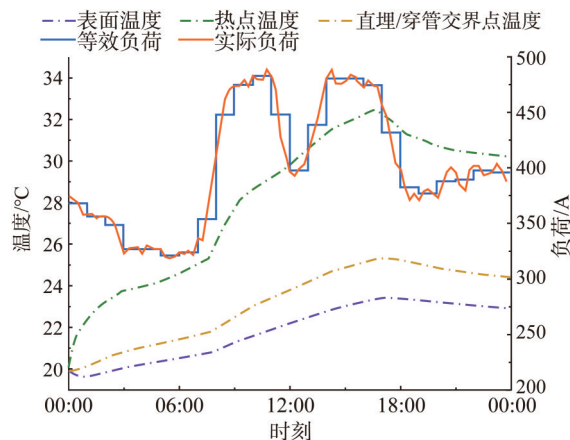


图 6 负荷加载及温度分布情况(工况 4)

Fig. 6 Load loadings and temperature distributions (condition 4)

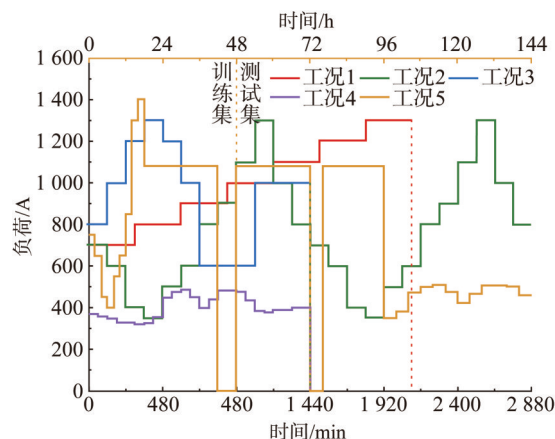


图 7 负荷加载情况(工况 1—5)

Fig. 7 Load loading situations (operating conditions 1—5)

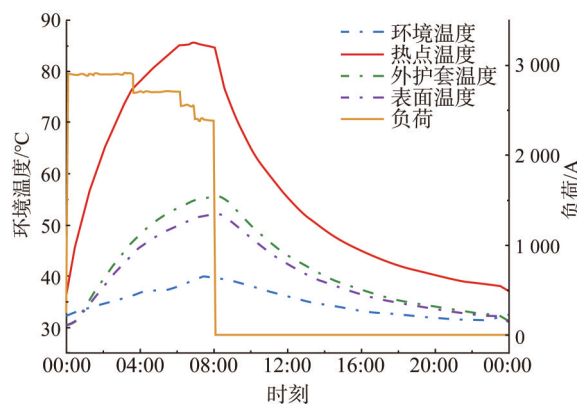


图 8 负荷及各层温度(工况 6)

Fig. 8 Loads and temperatures of each layer (condition 6)

据, 选取 $[0, 960]$ 作为训练集, $[961, 2\ 880]$ 作为测试集。

3 反演结果分析与讨论

3.1 性能评价指标

为量化评估本文算法模型的反演效果,以 MAE(平均绝对偏差)、MSE(均方根误差)为模型评价指标对反演模型进行对比,具体公式如下。

$$\delta_{\text{MAE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_p - T_i| \quad (15)$$

$$\delta_{\text{MSE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_p - \bar{T}_i)^2 \quad (16)$$

式中: δ_{MAE} 为平均绝对偏差; δ_{MSE} 为均方根误差; n 为训练集数量; T_p 为仿真计算结果值; T_i 为反演值; $\bar{T}_i$ 为反演值的平均值。

3.2 参数设置

通用参数设定:种群数 $N=50$ 、最大迭代次数 $T_{\text{max}}=100$ 。SSA 与 ISSA 设定:初始发现者、警戒者分别占比为 20 %、10 %,安全阈值为 0.8。WOA 设定:动量因子为 0.01。GWO 设定:收敛因子 α 从 2 到 0 线性递减。LassoNet 初始化参数设定:输入层次乘子 $M=10$,路径乘子 $\varepsilon=1.05$,学习率 $\alpha=0.0002$ 。

3.3 结果对比与分析

本文基于 LassoNet-BP 网络进行变量选择,以获取最佳输入组合,并为特征生成重要性排名,特征重要性为该特征被剔除时对应的最大 λ 值。以最小 MSE 值原则作为选择最优 λ 值的依据,工况 4 下,在 λ 约为 10 时, MSE 值达到最小,此时模型表现最好,此时仍具有非零权重的特征集为 $[I, t_3, t_{22}, t_{14}, t_{46}]$,所对应的重要程度为: $[67.31, 35.91, 106.57, 20.07, 11.85]$,以该特征集作为反演输入。

为直观检验本文所提出算法的优化性能,将本文所提出的 ISSA 算法与 SSA、WOA、GWO 算法作对比,进行迭代试验比较。以实际等效负荷为例,其迭代过程如图 9 所示,SSA 值在迭代 19 次后适应度值收敛于 2.959 72,WOA 值在迭代 16 次后稳定于 2.829 68, GWO 值在迭代 13 次后稳定于 3.126 19,而 ISSA 前期保持着快速收敛速度,在 7 次后适应度值收敛稳定于 2.569 11,同时收敛时适应度最小且仅在第 3 次就出现了拐点,由此可 ISSA 具有收敛快、寻优快、收敛精度高的优势。

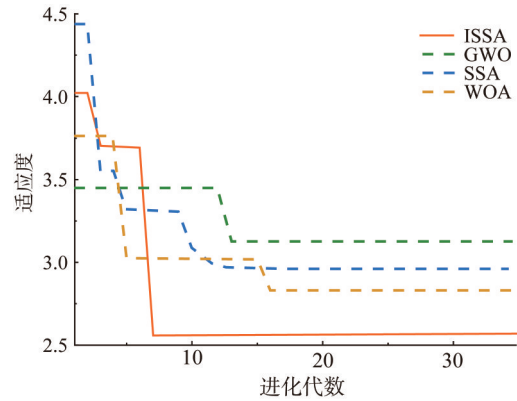


图 9 收敛曲线

Fig. 9 Convergence curves

为了进一步检验本文所提模型的反演精度效果,与经典神经网络模型进行对比,分别建立了 LN-SSA-BP、LN-WOA-BP、LN-GWO-BP、PCA-SSA-BP、Lasso-SSA-BP 反演模型,结果如表 3 所示,在负荷较为稳定(工况 1、2)时,6 种算法的反演精度都较高,最大误差均控制在 1.15°C 以内。在负荷快速波动时由于热容和热阻的存在导体热点温度的变化在传播至表面时存在滞后现象, Lasso-SSA-BP 模型出现了明显的过拟合现象,其训练集平均绝对误差为 0.017,测试集高达 12.3。而本文模型反演效果稳定不受负荷变化速率快慢的影响,能够保证实时性。

表 3 评价指标表

Tab. 3 Evaluation indexes table

模型	评价指标	工况 2	工况 4
本文模型	MAE 值	0.113	0.311
	MSE 值	0.028	0.157
LN-SSA-BP	MAE 值	0.441	0.739
	MSE 值	0.643	1.101
LN-GWO-BP	MAE 值	0.653	1.030
	MSE 值	0.470	1.989
LN-WOA-BP	MAE 值	0.967	1.826
	MSE 值	0.843	5.875
PCA-SSA-BP	MAE 值	0.759	1.662
	MSE 值	0.310	4.895
Lasso-SSA-BP	MAE 值	0.573	12.302
	MSE 值	0.962	151.390

为直观展现各方法的优劣对比,选择反演难度最大的负荷快速波动工况(工况 4)做可视化分析,图 10 展示了其对比结果。

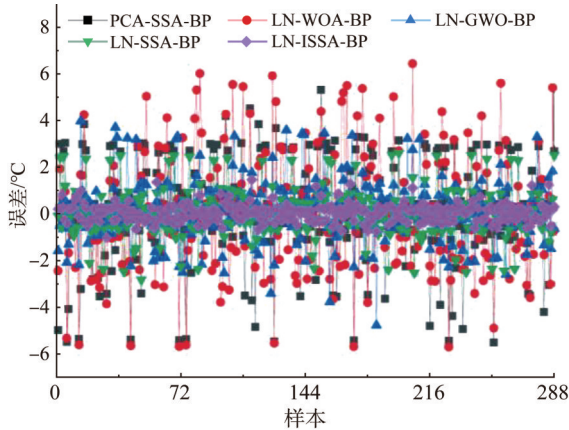


图 10 反演误差对比

Fig. 10 Comparison of inversion errors

LN-SSA-BP 模型的最大误差控制在 1.5°C 内, 而 LN-WOA-BP、PCA-SSA-BP、LN-GWO-BP、LN-SSA-BP 模型的最大误差分别为 6.5°C 、 5.4°C 、 4.0°C 、 2.6°C 。

对 $220\text{ kV}/2\ 500\text{ m}^2$ 局部穿管电缆进行热循环试验和反演计算, 在最小 MSE 值下重要程度前五的特征为: $[I, t_1, t_{17}, t_{22}, t_{36}]$, 以此作为输入特征进行反演计算, 其平均绝对偏差仅为 0.434 , 在 $t = 08:02$ 时刻误差最大, 此时误差为 1.93°C ; 以冷缩预制型电缆接头为对象进行反演验证, 基准接触电阻下的结果如图 11 所示, 其平均绝对误差仅为 0.581 , 最大误差保持在 4°C 以内, 在负荷较为稳定以及负荷快速波动时反演效果都较好。“0.5”、“2”接触电阻下平均绝对误差分别为 0.528 、 0.617 。证明本文方法具备学习多种拟合关系的能力, 可适用于不同运行热环境、不同规格型号的局部穿管电缆, 亦可迁移至电缆接头温度监测的场景中。

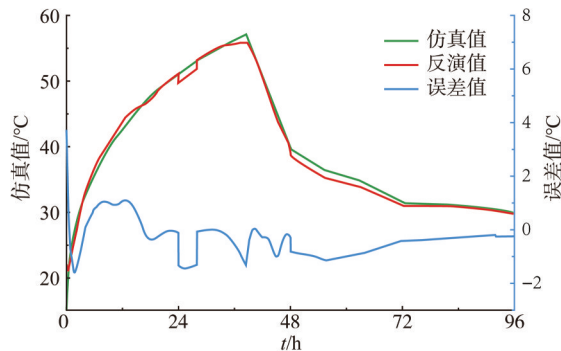


图 11 电缆接头反演结果

Fig. 11 Inversion results of cable joints

4 结论

为在不损伤电缆结构的情况下对局部穿管电缆热点温度进行实时监测, 本文采用了 LassoNet-ISSA-BPNN 模型基于 48 个测温点和线路动态负荷进行局部穿管电缆热点温度反演, 得出以下结论。

1) 通过 LassoNet 嵌套前馈神经网络, 以结构化的方法进行测温点选择能够量化输入特征组合在非线形模型上的优劣性, 且有效避免了过拟合, 在可解释性和特征的稀疏性上优于其他方法。

2) 通过 iCircle 映射、惯性权重思想、Levy 飞行混合策略优化 SSA, 提升了初始种群质量, 平衡了算法全局和局部搜索能力, 从而提升了模型收敛速度和精度, 且避免陷入局部最优。

3) 本文所提出的反演方法适用于不同负荷类型、不同运行场景、不同规格型号的局部穿管电缆, 能够自主确定各情况下最佳测温点组合, 同时可推广至电缆接头的温度监测场景, 可迁移性强。

参考文献

- [1] 何晨可, 朱继忠. 充换储一体化电站布局及电缆供电的路径优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(5): 85–101.
HE Chenke, ZHU Jizhong. Layout of charging-swapping-storage integrated station and path optimization of cable power supply[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 85–101.
- [2] DUBITSKY S, GRESHNYAKOV G, KOROVKIN N. Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENER-GYCON), April 4–8 2016, Leuven, Belgium. New York: IEEE, 2016: 1–6.
- [3] 梁永春, 王巧玲, 闫彩红, 等. 三维有限元法在局部穿管直埋电缆温度场和载流量计算中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2911–2917.
LIANG Yongchun, WANG Qiaoling, YAN Caihong, et al. Temperature field and ampacity calculation of cable buried in local conduit using 3D finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2911–2917.
- [4] OLSEN R, ANDERS G J, HOLBOELL J, et al. Modelling of dynamic transmission cable temperature considering soil-specific heat, thermal resistivity, and precipitation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1909–1917.
- [5] 黎云博, 王航, 廖雁群, 等. 考虑扭绞的三芯海底电缆温度稳态分布数值求解方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 5058–5066.
LI Yunbo, WANG Hang, LIAO Yanqun, et al. Numerical solution method for temperature steady-state distribution in three-core submarine cables with twisted structure[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5058–5066.
- [6] 徐涛, 叶晓君, 徐研, 等. 基于实时测量数据的电缆稳态载流量计算[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 65–69.

- XU Tao, YE Xiaojun, XU Yan, et al. Calculation on steady-state ampacity of cable based on real-time measured data[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 65 – 69.
- [7] XU T, XU Z, XU Y, et al. Calculation of the equivalent thermal parameters of external environment for cable based on the real-time measurement data [C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, May 20 – 24, 2018, Xi'an, China. New York: IEEE, 2018: 622 – 628.
- [8] 吴田, 祝和升, 詹清华. 基于改进麻雀搜索算法-BP神经网络的电缆接头线芯温度间接测量方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9048 – 9055.
- WU Tian, ZHU Hesheng, ZHAN Qinghua. Indirect measurement method of cable joint core temperature based on BP neural network optimized by improved SSA [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(21): 9048 – 9055.
- [9] 樊浩, 宁博扬, 何森. 基于SVM改进PSO算法的电缆接头温度预测分析[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 53 – 56.
- FAN Hao, NING Boyang, HE Sen. Prediction and analysis of cable joint temperature based on SVM improved PSO algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(21): 53 – 56.
- [10] 何邦乐, 黄勇, 叶頔, 等. 基于PSO-LSSVM的高压电力电缆接头温度预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 31 – 35.
- HE Bangle, HUANG Yong, YE Ting, et al. Temperature prediction of power cable joint based on PSO-LSSVM predict model [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 31 – 35.
- [11] 孙俊峰, 李志斌. 基于LSTM的滚动预测算法的电缆芯温度的研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 84 – 88.
- SUN Junfeng, LI Zhibin. Research on cable core temperature based on rolling prediction algorithm of LSTM [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(21): 84 – 88.
- [12] 毛清华, 张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6): 1155 – 1164.
- MAO Qinghua, ZHANG Qiang. Improved Sparrow algorithm combining cauchy mutation and opposition-based learning [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(6): 1155 – 1164.
- [13] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22 – 34.
- [14] 吴京龙. 基于灰色关联度的GM(1,1)-BP神经网络组合模型研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(11): 207 – 210.
- WU Jinglong. Study on GM(1,1)-BP combination model based on grey correlation [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2019, 33(11): 207 – 210.
- [15] HE F, ZHANG L. Prediction model of end-point phosphorus content in BOF steelmaking process based on PCA and BP neural network [J]. Journal of Process Control, 2018(66): 51 – 58.
- [16] QIAO D, YAO J, ZHANG J, et al. Short-term air quality forecasting model based on hybrid RF-IACA-BPNN algorithm [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(26): 39164 – 39181.
- [17] LIU S, XU Z, TANG G, et al. A SIPSS-Lasso-BPNN scheme for online voltage stability assessment [C]//2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, July 27 – 31, 2014, National Harbor, MD, USA. New York: IEEE, 2014: 1 – 5.
- [18] 牛荣泽, 张凯, 谢芮芮, 等. 基于随机森林的电缆管网综合监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 74 – 81.
- NIU Rongze, ZHANG Kai, XIE Ruirui, et al. Research on monitoring system of cable network pipeline based on random forest [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 74 – 81.
- [19] DEGEFA M Z, LEHTONEN M, MILLAR R J. Comparison of air-gap thermal models for MV power cables inside unfilled conduit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1662 – 1669.
- [20] 许志锋. 局部穿管电缆载流量评估与提升方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [21] LEMHADRI I, RUAN F, ABRAHAM L, et al. LassoNet: a neural network with feature sparsity [J]. Journal of Machine Learning Research, 2021, 22(1): 5633 – 5661.
- [22] HAN J, LI H, LIN H, et al. Depression prediction based on LassoNet-RNN model: a longitudinal study [J]. Heliyon, 2023, 9(10): 206 – 214.
- [23] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22 – 34.
- [24] ZALZALA A M S, FLEMING P M S. Genetic algorithms in engineering systems[M]. United Kingdom: IET, 1997.
- [25] 宋立钦, 陈文杰, 陈伟海, 等. 基于混合策略的麻雀搜索算法改进及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2187 – 2199.
- SONG Liqin, CHEN Wenjie, CHEN Weihai, et al. Improvement and application of hybrid strategy-based sparrow search algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2187 – 2199.
- [26] 赖钧杰, 文小玲, 张淇, 等. 基于改进麻雀搜索算法的直流微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 157 – 163.
- LAI Junjie, WEN Xiaoling, ZHANG Qi, et al. Capacity optimization configuration of DC microgrid based on improved Sparrow search algorithm [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(8): 157 – 163.
- [27] KAMARUZAMAN A F, ZAIN A M, YUSUF S M, et al. Levy flight algorithm for optimization problems-a literature review [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(421): 496 – 501.
- [28] ZHAN Q, RUAN J, ZHU H, et al. A robustness temperature inversion method for cable straight joints based on improved sparrow search algorithm optimized BPNN [J]. IEEE Access, 2022(10): 100137 – 100150.

收稿日期: 2024-03-10; 网络首发日期: 2024-07-31

作者简介:

宋妍霖(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压电缆试验与在线检测, songyanlin_123@163.com;

吴田(1983), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为带电作业、气体放电与外绝缘, wutian_08@163.com;

何清(1978), 女, 高级工程师(教授级), 硕士, 从事绝缘介电性能检测及高压电气设备故障诊断与分析的研究。

征 稿 启 事

《南方电网技术》是由中国南方电网公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1) 文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2) 学术论文请按 GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 9 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下 a、b、c、d、e 五项:

a) 作者署名(不宜超过 7 位)、作者单位、地址、电话、email 信箱和邮政编码;

b) 论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c) 作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d) 350 字左右的中文摘要,3~8 个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e) 若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,请提供项目名称及编号。

2 书写格式

1) 要求文稿正文字号为 5 号,汉字字体为宋体,英数字体为 Times New Roman,希腊字体为 Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2) 计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3) 文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4) 文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1) 表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入 1 个汉字以“注:”起头排版。

2) 插图的下放应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用 AutoCAD、

Adobe Illustrator 或 Corel DRAW 软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备 200 万总像素以上。

3) 图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4) 参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1) 请登录《南方电网技术》编辑部网站 <https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电 020-36625646 咨询。

2) 投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3) 编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电 020-36625642、36625643 或发送电子邮件到 nfdwjs@csg.cn 向编辑部了解审稿情况。

4) 文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的 LBB 分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部