



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 基于温度以及运行数据的电缆接头绝缘劣化状态预测

徐四勤, 黄向前, 杨昆, 张占龙, 甘鹏飞

### 引用本文

徐四勤, 黄向前, 杨昆, 张占龙, 甘鹏飞. [基于温度以及运行数据的电缆接头绝缘劣化状态预测](#)[J]. 计算机科学, 2022, 49(10): 132-137.

XU Si-qin, HUANG Xiang-qian, YANG Kun, ZHANG Zhan-long, GAN Peng-fei. [Prediction of Insulation Deterioration Degree of Cable Joints Based on Temperature and Operation Data](#)[J]. Computer Science, 2022, 49(10): 132-137.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### [基于改进麻雀搜索优化支持向量机的渔船捕捞方式识别](#)

Fishing Type Identification of Marine Fishing Vessels Based on Support Vector Machine Optimized by Improved Sparrow Search Algorithm

计算机科学, 2022, 49(6A): 211-216. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300216>

### [基于多种改进策略的改进麻雀搜索算法](#)

Improved Sparrow Search Algorithm Based on A Variety of Improved Strategies

计算机科学, 2022, 49(6A): 217-222. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210700032>

### [基于分数阶麻雀搜索优化 OTSU 肺组织分割算法](#)

Lung Tissue Segmentation Algorithm: Fractional Order Sparrow Search Optimization for OTSU

计算机科学, 2021, 48(6A): 28-32. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900176>

### [基于混合模型的中长期降水量预测](#)

Forecasting of Medium and Long Term Precipitation Based on Hybrid Model

计算机科学, 2018, 45(9): 271-278. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.045>

### [基于探测粒子群的小波核极限学习机算法](#)

Wavelet Kernel Extreme Learning Machine Algorithm Based on Detecting Particle Swarm Optimization

计算机科学, 2016, 43(Z6): 77-80. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2016.6A.017>

# 基于温度以及运行数据的电缆接头绝缘劣化状态预测

徐四勤<sup>1</sup> 黄向前<sup>1</sup> 杨 昆<sup>1</sup> 张占龙<sup>2</sup> 甘鹏飞<sup>2</sup>

1 国网安徽省电力有限公司安庆供电公司 安徽 安庆 246000

2 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044

(544987093@qq.com)

**摘 要** 电缆接头绝缘劣化会导致热损耗的增加进而引起接头表面温度上升,同时表面温度受到运行负荷、环境温度等多方面因素的影响,总体上劣化程度与温度数据表现出非线性分布的情况。为此,提出了基于改进麻雀搜索算法(Improved Sparrow Search Algorithm,ISSA)优化的核极限学习机(Kernel Based Extreme Learning Machine,KELM)的电缆接头绝缘劣化程度预测方法。首先通过实验来验证电缆接头多物理耦合模型的计算准确性,并通过耦合计算模型来获取不同劣化程度、载荷和环境温度下的电缆接头表面温度分布,用于构建训练集、验证集和测试集。其次基于鸟群算法(Bird Swarm Algorithm,BSA)中飞行行为的思想优化麻雀搜索算法,保证了全局收敛又不失种群多样性,有效跳出局部最优。然后通过ISSA算法对KELM的惩罚系数 $C$ 和核函数 $\sigma$ 进行优化,得到绝缘劣化状态预测模型。研究结果表明,改进麻雀算法优化的核极限学习机(ISSA-KELM)的预测效果明显优于其他模型。

**关键词:** 电缆接头;绝缘劣化;麻雀搜索算法;核极限学习机

中图分类号 TP806+.3

## Prediction of Insulation Deterioration Degree of Cable Joints Based on Temperature and Operation Data

XU Si-qin<sup>1</sup>, HUANG Xiang-qian<sup>1</sup>, YANG Kun<sup>1</sup>, ZHANG Zhan-long<sup>2</sup> and GAN Peng-fei<sup>2</sup>

1 Anqing Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Anqing, Anhui 246000, China

2 State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** The deterioration of cable joints will lead to the increase of heat loss, and then lead to the rise of surface temperature of the joints. At the same time, the surface temperature is affected by many factors such as operating load, environmental temperature. In general, the relationship between deterioration degree and temperature data shows a non-linear distribution. For this reason, a prediction method based on improved sparrow search algorithm(ISSA) optimization for kernel extreme learning machine (KELM) is proposed to predict the insulation deterioration degree of cable joints. Firstly, based on the experimental validation of the multi-physical coupling model of cable joints, the surface temperature distribution data of cable joints at different deterioration levels, loads and ambient temperatures are obtained for building the training set, validation set and test set. Secondly, the sparrow search algorithm is optimized based on the idea of flight behavior in the bird swarm algorithm(BSA), which ensures global convergence without losing population diversity and effectively jumps out of local optimum. Then, ISSA algorithm is used to optimize the penalty coefficient  $C$  and the kernel function  $\sigma$  of KELM and the prediction model of insulation deterioration state is obtained. Research results show that the predictive effect of ISSA-KELM is much better than that of other models.

**Keywords** Cable joints, Insulation deterioration, Sparrow search algorithm, Kernel extreme learning machine

## 1 引言

电力电缆承担着电能的输送与分配任务,对保障电网安全稳定运行起着重要作用。电缆接头作为连接电力电缆的重要设备,其故障概率在电缆系统中占比较大,严重影响了供电可靠性<sup>[1-3]</sup>。电缆接头绝缘劣化会影响其使用寿命,准确评估

电缆接头绝缘性能的老化程度对故障的预警以及采取相应措施有着重要意义。

目前,电缆接头的绝缘性能监测方法大多是电气测量方法。对于电气检测,局部放电监测法、直流成分法、直流叠加法、介质损耗角正切法以及温度检测法<sup>[4-5]</sup>为目前的主流方法,而传统的电缆接头绝缘劣化预警是通过判断监测数据

到稿日期:2021-09-16 返修日期:2022-01-19

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目(5212D019015A)

This work was supported by the Science and Technology Project of Anhui Electric Power Corporation(5212D019015A).

通信作者:张占龙(zhangztl@cqu.edu.cn)

特征量越限来做出判断。文献[6]研究了介质损耗因数频谱与绝缘劣化程度的关系,通过测量其相应的介质损耗来判断电缆绝缘材料的老化程度。文献[7]针对目前对局部放电趋势研究的不足和预警不及时的问题,提出了一种基于 Mann-Kendall 检验法和长短期神经网络(Long Short Term Memory, LSTM)的局部放电的趋势分析和预警方法。除电气测量方法外,文献[8]设计并研制了电缆接头界面压力测量装置,通过界面压力监测的方式来反映电缆接头绝缘强度和密闭性能。而温度监测由于其测量的便捷以及稳定性,通过温度表征的方式来体现绝缘状态也得到广泛研究与应用。文献[9]设计了一种应用于高压单芯交联电缆密封接头内部在线测温的内置式无源无线 SAW 传感器及其读取器,实现了对电缆内部温度的准确监测。文献[10]提出了基于改进 BP 神经网络的线缆接头温度预警方法,但并未考虑外部环境的影响。文献[11]提出了基于 PSO-LSSVM 的高压电力电缆接头温度预测方法,但是未能通过温度反映出绝缘状态。在电缆接头温度测量中,环境温度、绝缘老化程度、运行负荷等因素都会影响到测量值,而且电缆接头自身结构的不规则会导致温度分布不均匀,从而造成温度法对接头绝缘状态监测的精度极不稳定。

针对以上情况,本文提出了基于改进麻雀搜索算法(IS-SA)优化的核极限学习机(KELM)的电缆接头绝缘劣化程度预测方法,目的是在样本数据较少且影响因素较多的情况下实现通过温度测量对电缆接头绝缘劣化程度的预测。本文首先基于实验验证的电缆接头多物理耦合模型获取不同劣化程度、负荷和环境温度下的电缆接头表面温度分布数据,用于构建训练集、验证集和测试集。其次基于鸟群算法(BSA)中飞行行为的思想优化麻雀搜索算法,保证了全局收敛又不失种群多样性,有效跳出局部最优。然后采用 ISSA 算法对 KELM 的惩罚系数  $C$  和核函数  $\sigma$  进行优化,得到了绝缘劣化状态预测模型。研究结果表明,ISSA-KELM 的预测效果明显优于其他模型。

## 2 数据获取

由于通过实验方式获得不同劣化程度、环境温度和运行负荷下的电缆接头表面温度分布较为复杂,本文通过有限元仿真软件 Comsol Multiphysics 进行建模,并通过与经典工况下的实验数据与仿真模型进行对比,确保模型计算的准确性。最后在实验验证的模型中进行参数化扫描计算来构建训练集、验证集以及测试集。

### 2.1 电磁-热耦合数值计算模型

本文采用电压等级 110 kV、导体截面积 630 mm<sup>2</sup> 的交联聚乙烯电缆及其整体预制橡胶绝缘件直通接头作为研究对象,并利用 Comsol Multiphysics 软件进行物理场耦合计算。

#### 2.1.1 电磁场控制方程

引入磁矢势  $\mathbf{A}$  与电位  $\varphi$ ,得到电磁场控制方程<sup>[12]</sup>:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times) = \mathbf{J} - \sigma(T) \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \mathbf{A}) = -\frac{\rho_c}{\epsilon} \quad (2)$$

其中, $\mu$  为磁导率, H/m;  $\mathbf{A}$  为磁矢势, Wb/m;  $\mathbf{J}$  为电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $\sigma$  为电导率, S/m;  $\varphi$  为电位, V;  $\rho_c$  为体电荷密度, C/m<sup>3</sup>;  $\epsilon$  为介电常数, F/m。

#### 2.1.2 热场控制方程

根据傅里叶传热定律和能量守恒定理,中间接头本体与空气环境的温度计算的控制方程可表示为<sup>[13-14]</sup>:

$$\rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} = Q_m(\theta) + k \nabla^2 \theta \quad (3)$$

其中, $\rho$  代表物质密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C$  代表恒压热容, J/kg · K;  $k$  代表有效导热系数, W/(m · K);  $Q_m$  为热源产生的单位体积热量, W/m<sup>3</sup>;  $\theta$  为温度, K。

由于导体电导率是与温度相关的函数,温度场的变化将导致导体电导率发生变化,进而影响电磁场和电缆损耗的变化。电缆芯的电导率与温度之间的计算关系可表示为:

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_{20}}{1 + \alpha(\theta - 293.15)} \quad (4)$$

其中, $\sigma_{20}$  为在 293.15 K 时的导体电导率, S/m;  $\alpha$  为导体的温度系数, 1/K。

中间接头的热源主要来自导体的焦耳损耗。导体损耗可由焦耳定律描述为:

$$Q_m(\theta) = \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma(\theta)} \quad (5)$$

#### 2.1.3 边界条件

中间接头电磁场求解域由中间接头和外部环境组成。在导体横截面加载电流荷载,磁矢位在电缆金属导体处幅值最高,在外部空间内迅速衰减,在边界无穷远处施加矢量磁位  $\mathbf{A}=0$ 。同时,求解域内磁矢位方向与导体电流方向垂直,将电缆接头两端边界设置为磁绝缘。

中间接头的外表面热交换由辐射换热与对流换热组成。表面边界( $S_i$ )的热辐射换热边界可利用斯蒂芬-玻尔兹曼定律描述,如式(6)所示。表面边界( $S_i$ )的对流换热边界可利用第三类温度边界条件描述,如式(7)所示。

$$q_{\text{rad}}|_{S_i} = \epsilon \sigma (\theta_{\text{surf}}^4 - \theta_{\text{out}}^4) = h_{\text{rad}} (\theta_{\text{surf}} - \theta_{\text{out}}) \quad (6)$$

$$q_{\text{conv}}|_{S_i} = h_{\text{conv}} (\theta_{\text{surf}} - \theta_{\text{amb}}) \quad (7)$$

其中, $q_{\text{rad}}$  表示热辐射引起的表面热流密度, W/m<sup>2</sup>;  $q_{\text{conv}}$  表示自然对流引起的表面热流密度, W/m<sup>2</sup>;  $h_{\text{conv}}$  表示自然对流换热系数, W/(m<sup>2</sup> · K);  $h_{\text{rad}}$  表示辐射换热系数, W/(m<sup>2</sup> · K);  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>);  $\epsilon$  为表面发射率,取 0.6<sup>[15]</sup>;  $\theta_{\text{sur}}$  表示中间接头表面温度, K;  $\theta_{\text{out}}$  为环境温度, K。

#### 2.1.4 耦合计算

本文采用电磁-热耦合求解。耦合计算流程如图 1 所示,模型剖分如图 2 所示。

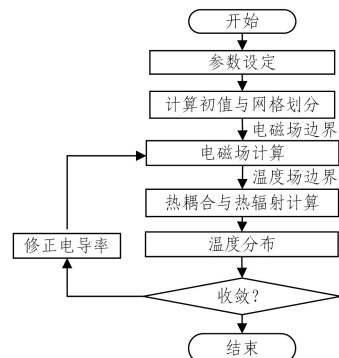


图 1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart



图2 几何模型剖分图

Fig. 2 Subdivision graph of geometric model

## 2.2 模型实验验证

本文通过模拟实际敷设环境设计了 110 kV、630 mm<sup>2</sup> 电缆接头的稳态温升实验,实验现场如图 3 所示,沿水平方向在电缆接头附件表面铺设表面测温元件,如图 4 所示。内部导体测温通过内置预埋测温电偶来实现,根据实验条件等比例构建了耦合计算模型,将计算数据与实验数据进行对比,以验证模型计算的准确性。

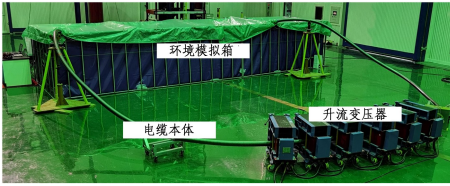


图3 实验现场

Fig. 3 Experimental site

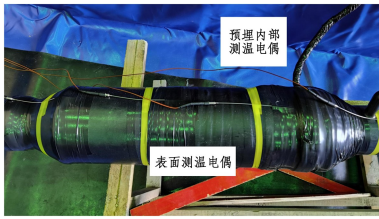


图4 热电偶安装示意图

Fig. 4 Diagram of thermocouple installation

耦合计算中,电缆导体施加频率为 50 Hz、有效值为 900 的交流电流。实际测得环境温度约在 25℃,系统温度大约在电流稳定 8 h 后达到稳态,将仿真计算的温度数据与实验数据进行对比,结果如图 5 所示。可以看出,模拟导体与外部温度曲线和实验测量情况一致,最大误差约 3℃,误差绝对值在 6.0% 以内。可见,电缆接头的电磁-热耦合计算模型的准确性与精度满足工程计算要求。

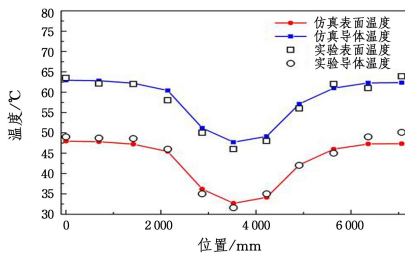


图5 电缆接头导体与表面温度

Fig. 5 Temperature of conductor and surface of cable joint

## 3 算法原理及改进方法

### 3.1 核极限学习机

核极限学习机 (KELM) 是基于极限学习机 (ELM) 并

结合核函数所提出的改进算法, KELM 通过在 ELM 的基础上进行改进,既不丢失 ELM 的优点,又能进一步提高模型的预测性能。

极限学习机 (ELM) 的隐含层神经元为  $L$  个,对  $N$  个数据样本  $(x_i, y_i)$ , 其中  $1 \leq i \leq N$ , 样本输入  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ , 样本输出  $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}]$ , SLFNs 模型<sup>[16]</sup> 可表示为:

$$Y_i = \sum_{j=1}^L \theta_j g(\beta_j x_i + b_j), i=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

其中,  $Y_i$  为模型输出值,  $\theta_j$  为连接输出层与隐含层的权值矩阵,  $b_j$  为隐含层偏置,  $\beta_j$  为输出权重。

式(4)可简写为:

$$Y = H\theta \quad (9)$$

其中,

$$H = \begin{bmatrix} g(\beta_1 x_1 + b_1) & \dots & g(\beta_L x_1 + b_L) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g(\beta_1 x_N + b_1) & \dots & g(\beta_L x_N + b_L) \end{bmatrix} \quad (10)$$

连接输出层与隐含层的权值由式(11)进行计算:

$$\theta = H^T \left( HH^T + \frac{E}{C} \right)^{-1} Y \quad (11)$$

其中,  $Y$  表示期望输出,  $E$  为单位矩阵,  $C$  表示正规化系数。

相对于极限学习机而言,核极限学习机将核函数引入式(9)中实现,核函数采用径向基函数 (RBF)。

$$\chi_{\text{elm}} = HH^T \quad (12)$$

$$\chi_{\text{elm}, ij} = h(x_i) \cdot h(x_j) = K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (13)$$

由此可得 KELM 的输出为:

$$Y(x) = \begin{bmatrix} K(x, x_1) \\ \vdots \\ K(x, x_N) \end{bmatrix} \left( \chi_{\text{elm}} + \frac{E}{C} \right)^{-1} Y \quad (14)$$

### 3.2 麻雀搜索算法及改进

麻雀搜索算法 (Sparrow Search Algorithm, SSA) 于 2020 年被首次提出<sup>[17-18]</sup>, 其衍生方法受到麻雀种群的生活特性的启示。通过模仿麻雀觅食特性将种群分为觅食者 (Producer)、追随者 (Scrounger) 和警戒者 (Alerter), 假设麻雀种群容量为  $s$ , 则种群中个体位置可定义为:

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{s1} & \dots & \alpha_{sr} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $r$  表示求解变量的维度。则个体适应度向量可表示为:

$$F(\alpha) = \begin{bmatrix} f_v(\alpha_{11}, \dots, \alpha_{1r}) \\ \vdots \\ f_v(\alpha_{s1}, \dots, \alpha_{sr}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

在搜索食物的过程中, 觅食者相比追随者具有更大的搜索范围, 而具有较优适应度的觅食者会优先发现食物, 每次迭代都会更新觅食者的位置:

$$\alpha_{r,\varphi}^{n+1} = \begin{cases} \alpha_{r,\varphi}^n \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\xi \cdot C_{\text{iteration\_max}}}\right), & \tilde{\omega} < \gamma \\ \alpha_{r,\varphi}^n + Q \cdot E, & \tilde{\omega} \geq \gamma \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $\tau$  表示迭代次数,  $C_{\text{iteration\_max}}$  表示最大迭代次数,  $\alpha_{\tau,\varphi}^v$  表示种群中第  $\tau$  只麻雀在第  $\varphi$  维的位置,  $\zeta$  为分布在  $(0,1]$  的随机数,  $\omega \in [0,1]$  表示报警值,  $\gamma \in [0.5,1]$  表示安全值,  $Q$  表示服从正态分布的随机数。

追随者的位置更新为:

$$\alpha_{\tau,\varphi}^{v+1} = \begin{cases} \alpha_{\text{best}}^v + \mu \cdot |\alpha_{\tau,\varphi}^v - \alpha_{\text{best}}^v|, & f_v(\alpha_{\tau,\varphi}^v) > f_{v\_best} \\ \alpha_{\tau,\varphi}^v + \Gamma \cdot \frac{|\alpha_{\tau,\varphi}^v - \alpha_{\text{worst}}^v|}{(f_{v\_best} - f_{v\_worst}) + \zeta}, & f_v(\alpha_{\tau,\varphi}^v) = f_{v\_best} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\alpha_p$  表示觅食者所处最优位置;  $\alpha_{\text{worst}}$  表示当前全局最差位置;  $\Gamma$  为一个  $1 * r$  维的向量, 向量中各元素随机赋值 1 或 -1, 且  $\Gamma^+ = \Gamma^T (\Gamma^T)^{-1}$ 。当  $\tau > s/2$  时, 适应度较低的第  $\tau$  个追随者没有获得食物, 且能量储备较低, 此时追随者将前往其他地方觅食。

当出现天敌时, 发出报警信号的麻雀通常占整个种群的 10%~20%, 我们把该部分麻雀称为警戒者, 其位置表示为:

$$\alpha_{\tau,\varphi}^{v+1} = \begin{cases} \alpha_{\text{best}}^v + \mu \cdot |\alpha_{\tau,\varphi}^v - \alpha_{\text{best}}^v|, & f_v(\alpha_{\tau,\varphi}^v) > f_{v\_best} \\ \alpha_{\tau,\varphi}^v + \Lambda \cdot \frac{|\alpha_{\tau,\varphi}^v - \alpha_{\text{worst}}^v|}{(f_{v\_best} - f_{v\_worst}) + \zeta}, & f_v(\alpha_{\tau,\varphi}^v) = f_{v\_best} \end{cases} \quad (19)$$

### 3.3 ISSA-KELM 电缆接头绝缘劣化状态预测模型

由于正规化系数  $C$  和核函数参数  $\eta$  的设定会影响 KELM 的预测性能, 文中以训练集的 MSE 误差作为适应度函数, 利用改进麻雀搜索算法对正规化系数  $C$  和核函数参数  $S$  进行优化, 优化过的模型如图 6 所示。

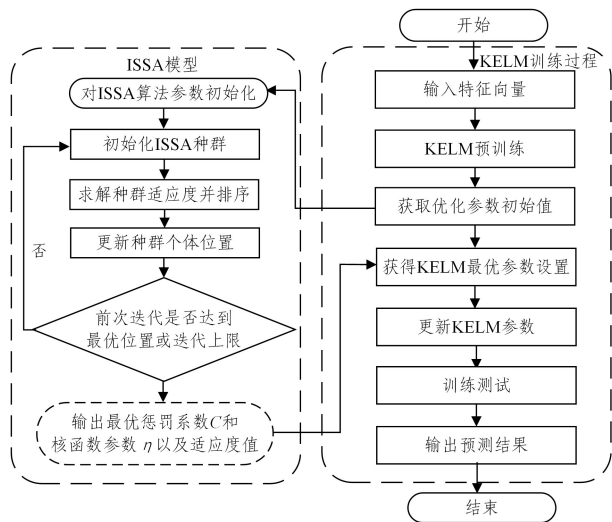


图 6 ISSA-KELM 电缆接头绝缘劣化状态预测模型

Fig. 6 Prediction model of cable joint insulation deterioration

优化过程如下:

步骤 1 初始化 KELM 网络原始参数, 在其预训练后获得优化前的初始参数, 初始化 ISSA 参数、种群位置参数, 以及种群占比、最大迭代次数等参数;

步骤 2 计算种群个体位置, 并将预测的 MSE 误差作为适应度函数进行求解;

步骤 3 对种群适应度进行优劣排序, 选出最优解与最劣解;

步骤 4 更新觅食者、追随者和警戒者的位置, 找出当前全局最优位置;

步骤 5 若步骤 4 的寻优结果优于上次迭代的结果, 则执行更新, 否则继续进行迭代操作;

步骤 6 如果训练样本的损失满足判别条件或者迭代次数达到上限, 则优化结束, 得到全局最优值和最佳适应度值, 输出网络最优参数, 否则返回步骤 3, 重新执行步骤 4 和步骤 5, 直到满足判别条件;

步骤 7 将测试集代入训练好的 KELM 预测模型, 输出预测结果。

## 4 实验及结果分析

### 4.1 数据选取

110kV 电缆接头运行负荷电流通常处于 500~1100A 之间, 环境温度 5~35℃, 而介质损耗角正切值与老化程度存在对应联系<sup>[6]</sup>, 基于介质损耗角正切值的电缆绝缘劣化程度判定条件<sup>[19]</sup>如表 1 所列。对电流、环境温度、介质损耗角进行三维参数化扫描, 获得表面温度分布, 以建立数据库样本。

表 1 绝缘劣化判定阈值

Table 1 Threshold to determine the degree of insulation deterioration

介质损耗角正切值	状态	建议
小于议值耗角 $r$	正常	继续运行
0.002~0.01	预警	提高检查频率
0.01~0.05	预警	准备更换电缆
大于 0.05	故障	更换电缆

### 4.2 性能评价指标

为了评价算法模型的准确性, 本文引入均方误差 (MSE)、平均绝对误差 (MAE) 及拟合系数  $R^2$  这 3 项性能指标对预测效果进行评价, MSE 和 MAE 从各自角度反映预测的精确度, 其值越小, 精确度越高;  $R^2$  表示算法模型对实际值的拟合度, 其值越高, 表示拟合度越高。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 \quad (20)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*| \quad (21)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (22)$$

其中,  $y_i$  与  $y_i^*$  为第  $i$  个样本的绝缘介质损耗角实际大小与模型预测大小,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  为  $i$  个样本的绝缘介质损耗角正切值预测的平均值。

### 4.3 预测结果及分析

通过 4.1 节获得涉及电缆接头与运行电流、环境温度、表面温度以及绝缘劣化程度的数据共 3211 组, 随机选取 3111 组作为训练集, 其余 100 组作为测试集, 将环境温度、运行电流以及表面温度分布作为模型的输入变量, 电缆接头绝缘的劣化程度 (介质损耗角正切值) 作为模型的输出变量。

为验证 ISSA-KELM 对模型预测的有效性, 引入 SSA-KELM, KELM, ISSA-ELM 进行对比, 图 7~图 11 给出了以上几种模型的预测效果。

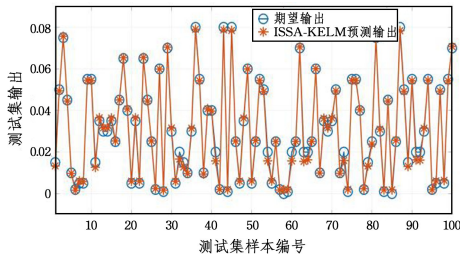


图7 ISSA-KELM 预测结果

Fig. 7 Prediction results of ISSA-KELM

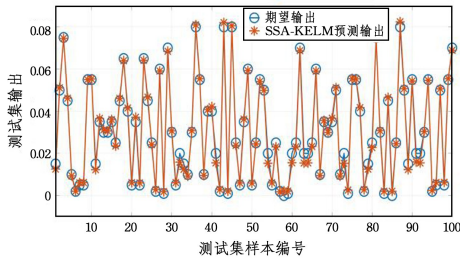


图8 SSA-KELM 预测结果

Fig. 8 Prediction results of SSA-KELM

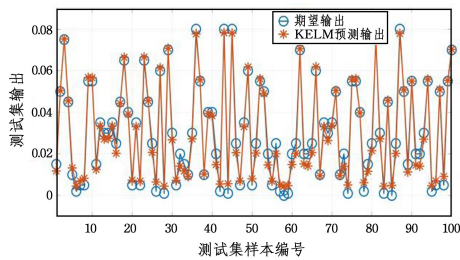


图9 KELM 预测结果

Fig. 9 Prediction results of KELM

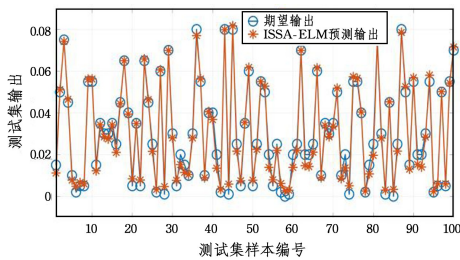


图10 ISSA-ELM 预测结果

Fig. 10 Prediction results of ISSA-ELM

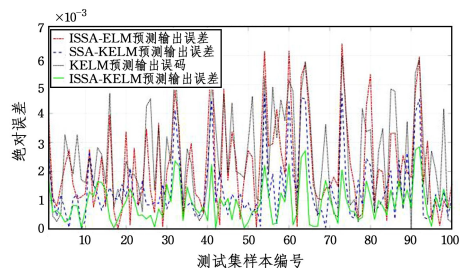


图11 预测结果误差对比

Fig. 11 Error comparison of prediction results

由图 11 可知,相比其他几种算法,ISSA-KELM 对电缆接头绝缘劣化程度预测结果的绝对误差较小,且波动较小;而

SSA-KELM 与 KELM 的预测误差接近,都明显劣于 ISSA-KELM 模型,说明在本文训练数据库下,未经改进的 SSA 算法对于 KELM 的优化效果不明显;同时对比 ISSA-ELM 的预测误差,更加证明了 KELM 本身相对于 ELM 的优越性。

4.2 节中式(18)一式(20),对 4 种模型的预测结果进行评价指标的计算,以更加直观地对比分析 4 种预测模型得到实验结果的精确性。4 种模型预测的各项性能指标如表 2 所列。

表2 预测精度对比

Table 2 Comparison of prediction accuracy

模型	MSE	MAE	R <sup>2</sup>
ISSA-ELM	$7.58 \times 10^{-6}$	0.0022	0.9860
KELM	$9.04 \times 10^{-6}$	0.0025	0.9833
SSA-KELM	$3.23 \times 10^{-6}$	0.0014	0.9940
ISSA-KELM	$2.35 \times 10^{-6}$	$9.20 \times 10^{-4}$	0.9976

由表 2 可以看出,ISSA-KELM 对电缆接头劣化程度的预测与实际结果的拟合度达到了 99.76%,均方误差为  $2.35 \times 10^{-6}$ ,平均绝对误差为  $9.20 \times 10^{-4}$ ,各项指标均优于其他模型,验证了改进麻雀搜索算法 (ISSA) 对核极限学习机 (KELM) 优化的可行性。

**结束语** 本文提出了基于改进麻雀搜索算法 (ISSA) 优化的核极限学习机 (KELM) 的电缆接头绝缘劣化程度预测方法。使用实验验证的电缆接头耦合模型获取不同条件下的电缆接头表面温度数据作为电缆接头绝缘劣化预测模型的支撑数据库。通过与其他模型进行对比,验证了本文提出的模型的有效性,具体结论如下:

(1) 提出的 ISSA-KELM 预测模型,针对电缆接头绝缘劣化程度预测运行电流、环境温度及表面温度等多输入与实际劣化程度输出之间的非线性关系有良好的映射能力。

(2) ISSA-KELM 对电缆接头绝缘劣化程度预测结果的绝对误差相比其他算法较小,且波动较小;而 SSA-KELM 与 KELM 预测误差接近,都明显劣于 ISSA-KELM 模型,说明在本文的训练数据库中,未经改进的 SSA 算法对 KELM 的优化效果不明显;同时对比了 ISSA-ELM 的预测误差,更加证明了 KELM 本身相对于 ELM 的优越性。

## 参考文献

- [1] ZHOU L Y, CAO J P, WANG S H, et al. Comprehensive State Evaluation of High Voltage Cable Based on Multi-state Variables Characteristics and Variation Law[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3954-3963.
- [2] CAVALLINI A, MONTANARI G C, PULETTI F, et al. A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 203-215.
- [3] GAO Y P, TAN T Y, LIU K P, et al. Research on Temperature Retrieval and Fault Diagnosis of Cable Join[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 535-542.
- [4] ZHANG C, LI H F, YANG Y B, et al. Research Progress in

- Ageing, Evaluation, and Rejuvenation of XLPE Cable Insulation [J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(7): 1-11.
- [5] LI P. Study on Tangent Test Methods of Dielectric Loss in XLPE Cable Insulation [J]. *Electric Engineering*, 2019, (17): 127-128, 132.
- [6] ZHU X J, MENG Z Z, WANG H M, et al. Dielectric Properties of Operated High Voltage XLPE Power Cable [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(4): 1090-1095.
- [7] ZHAO H S, MENG H, WANG K, et al. Research on partial discharge trend analysis and early warning method of 10 kV cable connector [J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210224.1457.009.html>
- [8] CHEN J, HU L B, LIU Y, et al. Study on Interface Pressure Measurement of Cable Connector Based on Piezoelectric Sensor [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2021, (1): 125-129.
- [9] PANG D, WANG C B, WANG X Y, et al. Online Temperature Monitoring of High-voltage Cable Joints with Built-in SAW Sensor [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2021, 43(4): 505-510.
- [10] ZHANG Y S, YANG A H, LUO Y M, et al. An early warning method for the temperature of the cable joints based on improved BP nerve network [J]. *Science & Technology Information*, 2019, 17(3): 31-33, 35.
- [11] HE B L, HUANG Y, YE T, et al. Temperature prediction of power cable joint based on PSO-LSSVM predict model [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(1): 31-35.
- [12] NI G Z. *Engineering electromagnetic field* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [13] LIANG Z B, XU M Z, CHEN F, et al. Thermal Characteristics of EHV Submarine Cable in Typical Layout Environments [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(11): 3452-3458.
- [14] HU L X, OUYANG B H, LIU Z X, 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.
- [15] FAN Y A, PENG C A, HL B, et al. 3-D thermal analysis and contact resistance evaluation of power cable joint [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 1183-1192.
- [16] HUANG G B, ZHOU H, DING X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B*, 2011, 42(2): 513-529.
- [17] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. *Systems Science & Control Engineering an Open Access Journal*, 2020, 8(1): 22-34.
- [18] XUE J K. Research and application of a novel swarm intelligence optimization technique: Sparrow search algorithm [D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [19] XU Z, HU Z, ZHAO L, et al. Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with insulation degradation [J]. *Measurement*, 2018, 133: 479-494.



**XU Si-qin**, born in 1989, master, engineer. His main research interests include power cable status evaluation, maintenance and new technology research.



**ZHANG Zhan-long**, born in 1971, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include electromagnetic measurement and numerical analysis.

(责任编辑:何杨)