

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.013

基于 PSO-SVM 的多场景绝缘子劣化判定研究

王思华^{1,2}, 徐贺节¹, 刘爽¹, 王俊喆¹, 石天舒¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 兰州 730070)

摘要: 输电线路一般是根据不同的输电等级以及环境差异配置的, 不同电压等级及环境的瓷绝缘子串配置不同, 目前基于同一判定标准对多场景下绝缘子劣化判定容易造成误判。因此需要一种可以对不同场景下瓷绝缘子劣化状态有效判定方法。文中利用有限元软件模拟得到不同场景下分布电压数据集, 基于 PSO-SVM 算法构建了绝缘子劣化判定模型。通过有限元仿真模拟了不同结构变量的多场景 330 kV 交流输电线路瓷绝缘子串电场分布, 确定主要影响瓷绝缘子串电压分布的因素; 根据主要影响因素进行场景分类, 使用 PSO-SVM 模型对不同场景的绝缘子劣化状态分类判定。同时, 为验证模型的实用性及有效性, 将 PSO-SVM (particle swarm optimization-support vector machines) 模型与支持向量机 (SVM) 和遗传算法支持向量机 (genetic algorithm-optimization support vector, GA-SVM) 进行对比, 结果表明 PSO-SVM 预测精度高于其他两种算法, 计算速度也更快, 对不同场景下的瓷绝缘子串劣化判定具有一定的参考意义。

关键词: 劣化绝缘子; 电压分布; 有限元; 多场景; PSO-SVM

Research on Multi-scenario Insulator Degradation Determination Based on PSO-SVM

WANG Sihua^{1,2}, XU Hejie¹, LIU Shuang¹, WANG Junzhe¹, SHI Tianshu¹

(1. College of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Transmission lines are generally configured in accordance with different transmission levels and environments, and the porcelain insulator strings are configured differently for different voltage levels and environments. At present, the determination of insulator degradation in multiple scenarios based on the same determination criteria is prone to misjudgment. Therefore, an effective method is required to determine the degradation status of porcelain insulator under different scenarios. In this paper the distributed voltage data set under different scenarios is obtained by simulation with finite element software. The insulator degradation determination model is constructed based on PSO-SVM algorithm. The electric field distribution of porcelain insulator strings of 330 kV AC transmission lines with different structure variables is simulated by using finite element software so to determine the main factors affecting the voltage distribution of porcelain insulator strings. Then, the scenarios are classified in accordance with the main influencing factors, and the insulator deterioration status of different scenarios is classified and determined using the PSO-SVM model. At the same time, the particle swarm optimization-support vector machines (PSO-SVM) model is compared with the support vector machines (SVM) and genetic algorithm-optimization support vector machines (GA-SVM) to verify both practicality and effectiveness of the model. The results show that the prediction accuracy of PSO-SVM is higher than that of other two algorithms, and the computation speed is also faster, which has a reference significance for the determination of porcelain insulator string degradation in different scenarios.

Key words: degradation insulator; voltage distribution; finite element method; multi-scenario; PSO-SVM

收稿日期: 2025-09-25; 修回日期: 2025-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51767014); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2017010-C)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51767014), China Railway Corporation Science and Technology Research and Development Plan Project(2017010-C).

0 引言

绝缘子作为输电线路设备中最重要的一个环节,其自身的机械应力与电气强度等特性与电网安全关系紧密^[1-2]。由于绝缘子劣化造成的输电线路短路甚至电网解裂等停电事故频繁发生且损失巨大,如何方便、快速、准确地定位绝缘子串中的劣质绝缘子是绝缘子检测工作中的重点和难点。关于绝缘子劣化对输电线路的影响研究多集中在110、220、500 kV,而330 kV电压等级电网作为西北地区的主力电网,对于此电压等级下的瓷绝缘子劣化特性相关研究还较少^[3-4]。

瓷绝缘子作为中国使用最多的绝缘子之一^[5-7],其中的部分绝缘子在运行中易受到外力破坏等原因从而会产生低(零)值等劣化现象,造成绝缘性能严重下降甚至丧失^[8]。相关数据表明虽然瓷绝缘子仅占总安装成本的5%~8%,但在发生事故时,瓷绝缘子占维护成本的50%以上^[9]。据不完全统计,近五年国网公司系统110 kV及以上开关设备发生由于瓷绝缘子劣化引起的故障就有40次,因此研究绝缘子劣化判定对电网的安全运行具有重要意义^[10]。对于绝缘子劣化的检测方法中,非接触式测量相对于接触式测量安全性以及灵敏性均有提升。在带电检测挂网运行的瓷绝缘子劣化状态方法中,国内外学者研究总结提出了很多方法,包括超声波检测法、红外成像法、泄漏电流法、分布电压测定法等^[11-13]。这些方法中的大多数受检测介质自身局限(如超声波传播的耦合和衰减现象)、绝缘子污秽情况以及外界环境影响易造成误判。其中分布电压测定法通过测量绝缘子串分布电压异常情况检测劣化绝缘子位置,相对于其他检测方法来说受外界因素影响较少且测量结果相对稳定,目前被广泛应用于瓷绝缘子的劣化检测。对于瓷绝缘子串的输电线路而言,一般是根据不同的输电等级以及环境差异进行绝缘配置,不同的输电等级及环境的瓷绝缘子串配置不同^[14]。相关研究表明,不同输电线路结构下绝缘子分布电压有很大的差别,传统绝缘子劣化判别方法中使用同一电压标准对所有情况下的瓷绝缘子进行劣化判定容易出现误判^[15]。因此对于不同场景下的瓷绝缘子串进行劣化判定时需要分类判定。对于劣化绝缘子对绝缘子串分布电压的影响方法有试验法、等效电路算法以及有限元仿真算法。其中试验法由于是在实验室模拟真实线路中的变量,其工作量巨大且分析不全面;等效电路法

可以计算电路的理论分布电压,但是由于其计算复杂性,仅适用于计算简单绝缘子串分布电压变化;有限元仿真法是通过搭建杆塔—绝缘子串—导线三维电场模型仿真计算绝缘子串分布电压的一种高精度方法,可以实现对复杂环境下绝缘子串分布电压的仿真分析,目前已被广泛使用^[16-19]。

在绝缘子劣化判定领域,为了快速、准确地定位绝缘子串中的劣质绝缘子,许多学者提出了将数据挖掘的方法应用到系统故障诊断:BP神经网络,模糊计算,支持向量机等^[20]。BP神经网络算法对小样本数据处理能力不足,而模糊计算对于绝缘子状态判定需要建立一套模糊推理规则,但规则的建立需要大量的经验。支持向量机方法相较于其他方法在处理小样本多参数情况具有明显的优势,被广泛的应用于故障诊断中。文[21]中介绍了多种支持向量机方法在电力系统故障诊断中的应用,文[22-24]中提出为了提高SVM的寻优能力,在SVM参数选择方面可以使用遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)对SVM进行参数优化,粒子群算法由于具有易实现、效率高等优点被广泛应用于SVM参数优化,结果表明,优化后的SVM可以提高故障诊断率。

为准确判定劣化瓷绝缘子,文中首先建立了330 kV交流输电塔线有限元模型,利用仿真模拟得到了330 kV交流输电塔线在不同塔型、相位、绝缘子片数以及绝缘阻值下的分布电压,分析不同场景下瓷绝缘子串的分布电压差异并确定主要影响因素;然后建立基于PSO-SVM的多场景绝缘子劣化状态判定模型,将不同参数下瓷绝缘子串正常与劣化的数据集作为模型的输入,绝缘子劣化状态作为输出。通过与其他算法进行对比,验证了模型的实用性及有效性,对于瓷绝缘子的劣化判定具有一定的价值。

1 有限元仿真

1.1 330 kV交流输电塔线有限元仿真

仿真模型的参数设置参照特高压交流试验示范工程的参数设置。在有限元分析软件中建立330 kV交流输电塔线瓷绝缘子串的有限元模型。该模型包含绝缘子串、分裂导线、杆塔和均压环等。为简化仿真降低模型的计算误差,杆塔部分采用塔窗(不镂空)替代,仿真模型见图1。模型中只建立单一相位上的完整瓷绝缘子串,另外两相只建立导线。仿真选取U210B型绝缘子,参数见表1,绝缘子片数共25片。

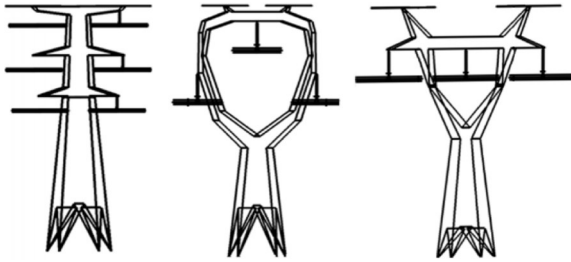


图1 耐张塔、猫头塔、酒杯塔三维模型

Fig. 1 Strain tower, cathead tower, cup type tower 3D model

表1 U210B型绝缘子参数

Table 1 Insulator model and its parameters

型号	高度/mm	盘径/mm	爬电距离/mm	湿闪电压/kV
U210B	170	280	400	50

在忽略空间电荷的影响下,可以采用静电场方法求解计算绝缘子串分布电压。建立输电塔线整体的三维 AC/DC 模型,为解决实际问题,需要对有限元模型中设置符合实际问题的边界条件,对边界条件进行约束处理后形成激励矢量,进而求出静电场的解。模型实体由两层空气包围,对绝缘子串、分裂导线及杆塔构建第1层空气长方体长宽高分别为13、45、25 m,在最外层构建第2层空气圆柱体半径高度分别为100 m和40 m。分别对最外层场域的除地面以外的面设置边界条件为零电位。建模计算时330 kV系统计算相、绝缘子串高压端、分裂导线、金具及均压环施加激励源为330 kV电路相电压的最大峰值为 $U_m = 330\sqrt{2}/\sqrt{3}$,非计算相设置电压为 $-U_m/2$ 。绝缘子串剩余的钢脚钢帽等设置成绝缘子串电场场域中的悬浮电位。绝缘子串接地端、低压端联结金具、杆塔等施加激励源0 V。瓷绝缘子伞裙介电常数设置为6,低零值绝缘子通过改变其介电常数以及电导率进行控制。猫头塔25片绝缘子串有限元仿真图见图2。

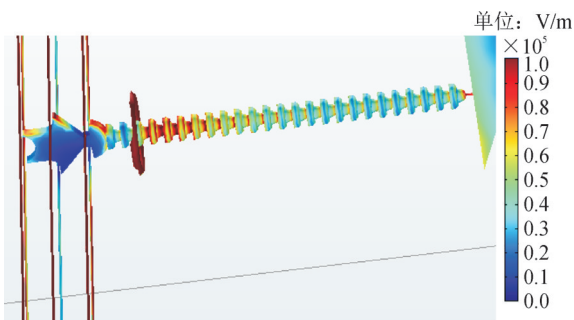


图2 有限元仿真图

Fig. 2 Finite element simulation

1.2 330 kV 交流输电塔线有限元仿真

为验证仿真数据的可靠性,将仿真得到的分布电压数据与中国电力行业标准 DL/T 487—2000 中

给出的330 kV交流架空线路绝缘子串上每一片绝缘子在正常运行情况下的分布电压标准参考值进行对比,见图3^[25]。通过图3可以看出,仿真值与标准测量值绝缘子电位分布趋势基本一致,标准测量值曲线更加平滑。绝缘子片数为19片时,标准值与测量值之间的误差在0.12%~10.53%之内,平均为0.96%;绝缘子片数为20片数,标准值与测量值之间的误差在0.25%~10.03%之内,平均为1.71%;绝缘子片数为21片时,标准值与测量值之间的误差在0.02%~9.5%之内,平均为1.34%;绝缘子片数为22片时,标准值与测量值之间的误差在0.25%~10.38%之内,平均为0.89%。

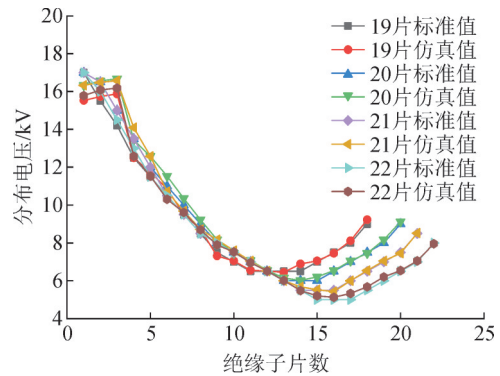


图3 仿真值与标准值对比图

Fig. 3 Simulated value versus standard value

2 影响因素分析以及多场景分类

2.1 输电塔线结构对绝缘子串分布电压影响分析

对瓷绝缘子串分布电压影响因素进行仿真验证,控制某一影响因素为单一变量,研究其他结构一致时这一因素对分布电压的影响。建立3种常见的塔型下330 kV交流输电塔线有限元仿真模型。仿真分别计算得出3种塔型下绝缘子的电压分布,见图4。分析相同塔型下相位不同的绝缘子串分布电压,以酒杯塔为例,三相分布电压曲线见图5。对电压分布曲线进行分析可知,酒杯塔和猫头塔的边相绝缘子分布电压相比最大差异为25.12%;和干字塔相比最大差异为29.27%;以猫头塔为例,相同塔形下两相电压最大差异为14.64%。与文[26]中绝缘子串位于边相时总体分布电压高于中相结论一致。

在交流输电线路中,不同工况下采用的均压环有所不同,实际线路中常用的均压环有半圆形均压环和管状均压环。为验证不同参数下均压环对绝缘子串电压分布的影响,参照参数设置要求,对两种类型的均压环均选择管径为40 mm、直径为300 mm进行仿真。2种典型均压环结构下绝缘子串分布电压曲线见图6。对电压分布曲线进行分析可得,在

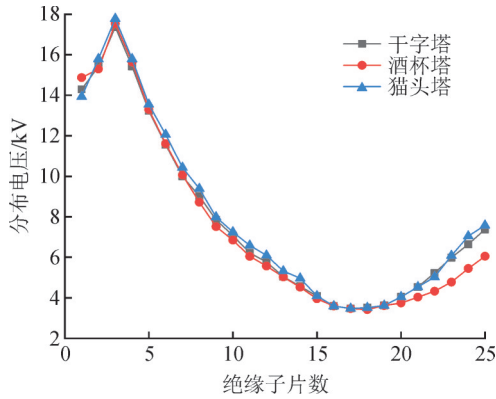


图4 3种塔形对应的分布电压曲线

Fig. 4 Distribution voltage curves corresponding to the three tower shapes

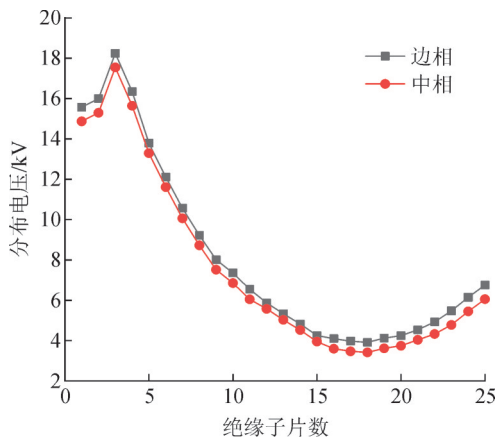


图5 两种相位对应的分布电压曲线

Fig. 5 Distributed voltage curves corresponding to the two phases

2种典型的均压环情况下绝缘子分布电压有所差异,不同均压环对绝缘子高压侧的电压分布比中低压侧影响明显,最大差异为16.73%。仿真结果与文[27]中提出的参数相同时,管状均压环要比半圆形均压环均压效果好结论一致。

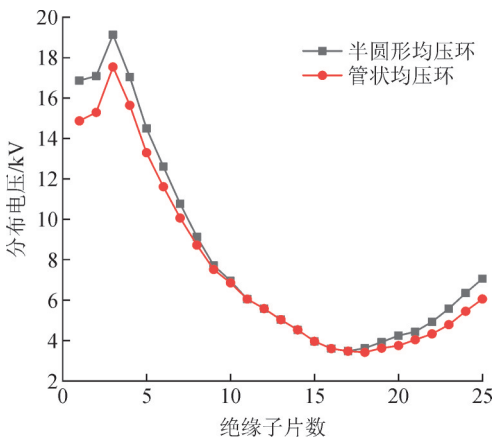


图6 两种典型均压环对应的分布电压曲线

Fig. 6 Distributed voltage curves corresponding to two structures of grading rings

均压环不同对绝缘子的分布电压也有影响,但

相较于塔形对绝缘子串电压分布的影响较小。在设计330 kV交流瓷绝缘子串时,会根据绝缘子的实际工作状况确定绝缘子片数,为验证绝缘子片数对绝缘子串电压分布的影响,对不同绝缘子片数的绝缘子串进行仿真,得到电压分布曲线见图7。由图7可知,绝缘子片的数量对绝缘子的分布电压有较大影响,最大差异为42.73%。与文[28]中提出的绝缘子片数越多,绝缘子整体电压分布越低结论一致。

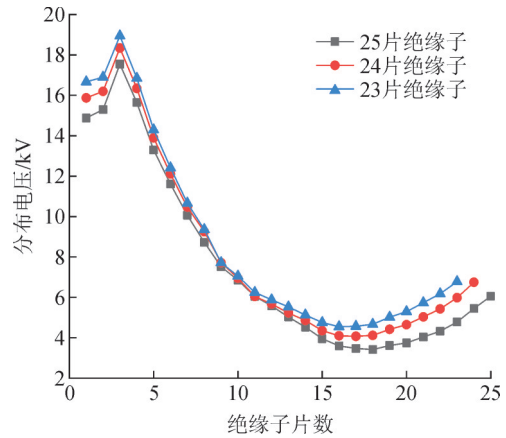


图7 不同绝缘子片数对应的分布电压曲线

Fig. 7 Distributed voltage curves corresponding to different insulator piece number

2.2 多场景分类

由于输电线路差异性配置,对于高海拔地区、高污染区域以及空气湿度较高的安装地点,在进行绝缘配置时会根据环境情况以及电压等级适当增强外绝缘。综上,外界环境复杂多变,仿真难以包含所有的环境状态,且在设计输电线路时会根据不同区域环境特点调整输电线路结构,文中在多场景分类时重点对输电线路结构进行分类。仿真表明,影响瓷绝缘子串分布电压的因素主要有输电杆塔塔型、绝缘子串所在相位、均压环种类以及绝缘子片数。对瓷绝缘子串运行场景进行多场景分类,分类变量具体见图8。

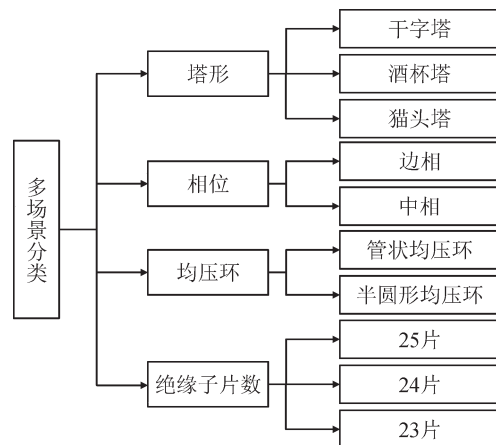


图8 多场景分类变量

Fig. 8 Multi-scene classification variables

2.3 劣化绝缘子对分布电压影响分析

根据DL/T 626—2015规定,330 kV电压等级及以下运行的绝缘子当其绝缘电阻低于300 MΩ时被判定为劣化绝缘子。为研究绝缘子中有低值绝缘子的劣化状态对绝缘子分布电压的影响,文中分别在绝缘子绝缘阻值为10~300 MΩ进行仿真。由于绝缘子串电路的不对称性,不同位置的劣化绝缘子对电压分布的影响是不同的。为了研究劣化绝缘子位于不同位置时分布电压的变化,分别选取高压端、绝缘子串中部、低压端3种位置即第3、13、23片绝缘子在不同绝缘电阻时分布电压仿真计算结果为例,其电压分布曲线见图9。当劣化绝缘子位于高压端时劣化绝缘子的电压降低最多,且由于劣化绝缘子承担电压变小,相邻的绝缘子上电压增大,符合文[28]中的结论。

3 多场景绝缘子劣化判定模型

3.1 SVM原理

SVM的核心思想是在一个确定的包含正负类样本的样本集合里找到一个超平面对样本根据正负类进行区分,使得分开的两类间隔距离最大化。通过引入核函数进行非线性扩展,将训练样本从低维空间映射在高维空间,从而在高维空间找出具有最优决策的超平面,实现对样本的有效分类。将超平面的权重系数定义为 ω , b 为偏置项,得到SVM分类器优化问题。假设给定的训练样本集为

$$T = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

式(1)中: $x_i \in R^N$ 为 N 维样本向量坐标; $y_i \in \{-1, 1\}$ 。

构建所有正确超平面目标函数为

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i & \xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ \text{s.t. } y_i(\omega \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i \end{cases} \quad (2)$$

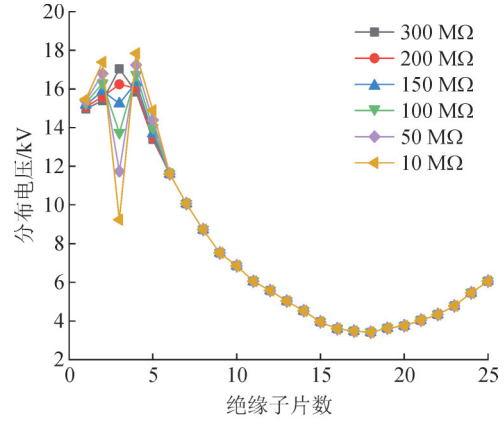
式(2)中: ξ_i 为松弛因子; C 为惩罚因子。使用拉格朗日乘子 α_i 求解式中的 ω 、 b 、 ξ_i 。

以高斯核函数作为内核可得到其分类决策函数表达式为

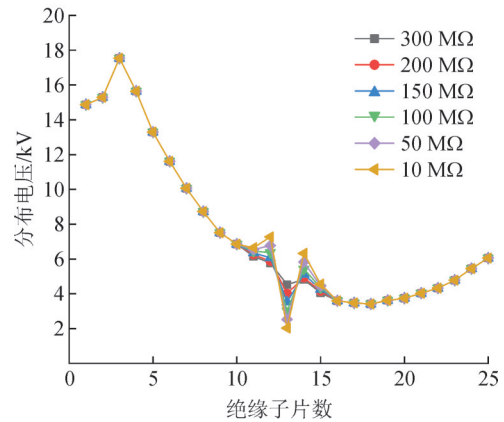
$$f(x_j) = \text{sgn} \left[\sum_{i,j=1}^n \alpha_i y_i K(x_i \cdot x_j) + b \right] \quad (3)$$

3.2 基于粒子群算法优化SVM

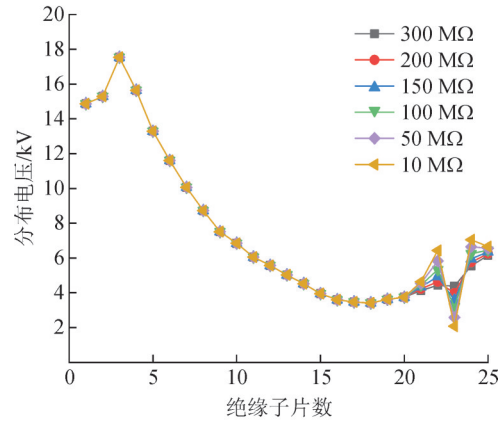
文中使用高斯核函数作为SVM的核函数,利用粒子群算法对其惩罚参数 C 和核函数参数 g 进行优化,优化过程如下:群体中的第 i 个粒子可以表示为一个 N 维的向量,即 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$,粒子所经历



(a) 高压侧



(b) 中压侧



(c) 低压侧

图9 高、中、低压侧劣化时绝缘子串分布电压曲线

Fig. 9 Insulator string distribution voltage curve when high, medium and low voltage side is deteriorated

的最好“位置”为 $p_{\text{best}i} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$,整个群体所经历的最好“位置” $g_{\text{best}i} = (g_1, g_2, \dots, g_N)$ 。在迭代计算过程中,个体 i 的第 n 个维度粒子的速度更新公式为

$$v_{in}^k = \omega v_{in}^{k-1} + c_1 r_1 (p_{\text{best}i} - x_{in}^{k-1}) + c_2 r_2 (g_{\text{best}i} - x_{in}^{k-1}) \quad (4)$$

位置更新公式为

$$x_{in}^k = x_{in}^{k-1} + v_{in}^k \quad (5)$$

式(4)、(5)中: ω 为惯性权重; $n = 1, 2, \dots, N$;设种群规模为 M ,则 $i = 1, 2, \dots, M$; k 为当前迭代进化代数; v_{in} 为粒子速度; c_1 和 c_2 为学习步长; r_1 和 r_2 为

两个取值在(0, 1)之间的随机函数。通常在迭代过程中需要限制粒子的速度和位置变化范围,即在迭代过程中, v_{in} 、 x_{in} 的值不能超出边界值,若超出边界,则用边界值代替这个粒子速度和位置。由此也可看出,PSO具有记忆功能,且在迭代过程中信息是单向流动的,具有较好的收敛速度。

利用粒子群算法优化SVM流程图见图10。

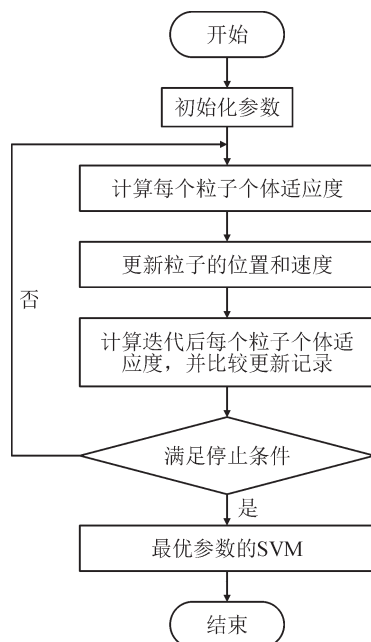


图10 粒子群算法优化流程图

Fig. 10 Particle swarm algorithm optimization flow chart

基于遗传算法支持向量机(genetic algorithm-optimization support vector, GA-SVM)中采用GA对支持向量机惩罚参数 C 和核函数参数 g 进行优化,可以有效避免传统的SVM算法因构造参数经验不足导致模型分类准确率。GA优化过程为:从一个群体出发,通过自然选择、交叉、变异等遗传产生一个新的群体,新群体中包含的每一个个体都代表一个优化问题的解。在进行选择时对每一个个体进行适应度评价,通过适应度函数的值决定产生下一代的父代个体,并淘汰适应度函数较低的个体,最后将选择出的个体经过交叉变异等操作产生新一代个体。新一代个体遗传了父代个体中的优良特性,通过不断的遗传迭代,使优化朝着更优解方向发展变异。

3.3 基于PSO-SVM劣化判定流程

文中利用PSO-SVM模型对瓷绝缘子劣化状态进行识别分类,交流瓷绝缘子串的分布电压作为该判定模型的输入变量,模型输出瓷绝缘子的劣化状态,建立绝缘子劣化判定模型。基于PSO-SVM的绝缘子劣化判定流程见图11。首先对仿真得到的数

据进行多场景分类构建数据集,并将构建好的数据集分为训练集和测试集;设置PSO参数:如种群规模、迭代次数、核函数参数 g 以及惩罚因子 C 的取值范围,建立适应度函数;利用PSO算法确定优化后的最优 C 和 g ;利用优化后的 C 、 g 和训练集生成绝缘子劣化判定模型;最后使用该判定模型对输入的测试数据识别分类,输出对测试集分类的准确率,完成对绝缘子的劣化判定。

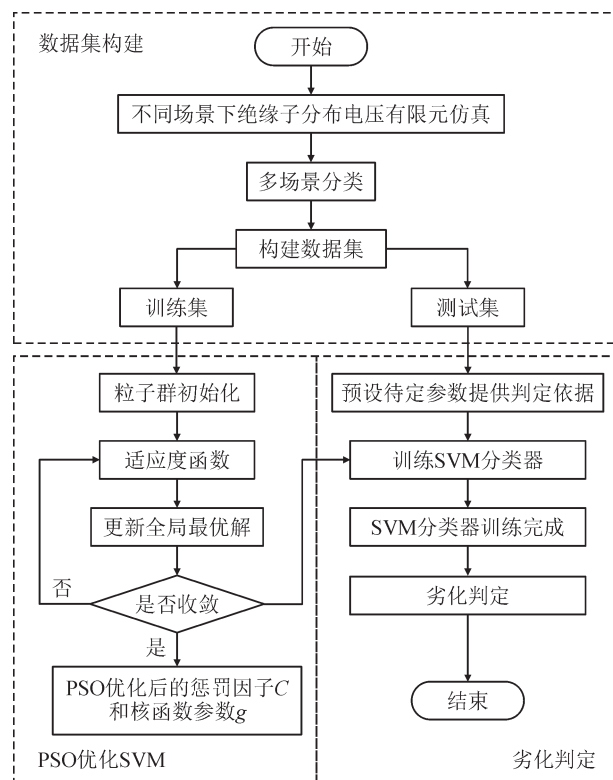


图11 基于PSO-SVM的绝缘子劣化判定流程图

Fig. 11 Flow chart of insulator degradation determination based on PSO-SVM

4 实验验证

4.1 模型训练

文中使用基于有限元仿真计算建立的数据训练和测试绝缘子劣化判定模型。基于前述分析研究,为简化场景分类,重点考虑选取对分布电压影响最大的塔形以及绝缘子片数进行多场景分类,基于以上分类变量建立不同场景下330 kV绝缘子串的分布电压数据库。通过预先设制调出对应场景下的数据库对PSO-SVM模型进行训练。利用330 kV交流瓷绝缘子串在对应场景下的有限元仿真计算得出的分布电压数据对模型进行训练。训练样本数据包括不同场景下正常状态下绝缘子串的电压分

布数据以及劣化状态下绝缘子串的电压分布数据。

以杆塔为酒杯塔, 25片绝缘子位于中间相位, 使用管状均压环这一情况为例。仿真得到的1500组数据如下: 从300~500 MΩ中使用随机函数随机选择500组值, 每组包含25个值正常的绝缘子电阻值, 仿真得到瓷绝缘子串正常状态下的分布电压数据; 由于绝缘子串中连续劣化绝缘子超过3片以上概率极低^[28], 因此文中仅研究仿真绝缘子劣化1片以及连续2片这两种情况。在0~300 MΩ之间使用随机函数随机挑选500个值作为低零值绝缘子的绝缘阻值, 在1~25之间随机选择整数50次, 将这两次的随机数逐一匹配成50组, 作为劣化绝缘子对应的电阻值和位置, 仿真得到绝缘子劣化1片时的劣化数据; 在0~300 MΩ之间使用随机函数随机挑选500组值, 每组包含两个值, 作为低零值绝缘子的绝缘阻值, 在1~24之间随机选择整数50次, 代表第 n 片和 $n+1$ 片绝缘子, 将这两次的随机数组逐一匹配成50组, 作为劣化绝缘子对应的电阻值和位置, 仿真得到绝缘子劣化2片时的劣化数据。随机选取其中的90%的劣化和非劣化数据作为训练数据, 保证足够的数量增大模型预测精度。

4.2 试验结果分析

以酒杯塔25片绝缘子串为例, 用最优参数组合训练的PSO-SVM模型对150组测试样本进行故障识别分类, 结果见图12。前96个测试样本为绝缘子劣化状态, 后54个样本为绝缘子正常状态, 模型分类为1表示判定绝缘子是劣化绝缘子。在150组测试数据中, 对6组故障数据以及3组非故障数据识别错误, 绝缘子劣化判定准确率为94%。误判的故障数据中5组为单片绝缘子产生劣化时的分布电压, 一组为连续两片绝缘子劣化时分布电压。

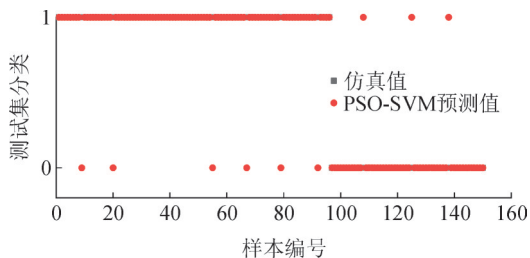


图12 PSO-SVM模型故障诊断结果

Fig. 12 Troubleshooting results of the PSO-SVM model

为了证明粒子群算法能有效找到最优参数并提高SVM的分类精度, 设置3组对比实验进行验证: 第1组选取SVM; 第2组选取使用遗传算法(GA-SVM)求最优参数; 第3组应用粒子群算法(PSO-SVM)求最优参数(PSO-SVM)。劣化判定结果见表2。

表2 不同支持向量机故障诊断结果

Table 2 Troubleshooting results of different support vector machines

分类器类型	准确率/%	计算速度/s
SVM	86	108.32
GA-SVM($C=567.167, g=1.021$)	92	22.49
PSO-SVM($C=736.678, g=0.003$)	94	19.59

使用通过仿真计算获得的150组绝缘子分布电压数据作为测试样本测试该模型。对应场景下的模型测试结果见表3。根据表3可知, 分别对9种不同场景下的仿真数据进行检测, 在酒杯塔25片和猫头塔25片时出现误判最多且对于绝缘子连续劣化两片的绝缘子串由于其分布电压变化明显更容易识别判定。对各场景下误判的测试数据进行分析发现误判主要是出现在劣化绝缘子位置在绝缘子串的低压端以及当绝缘子的绝缘电阻在250~350 MΩ之间时。导致模型判定错误的原因可能是瓷绝缘子串中低压侧绝缘子的电压分布变化较小, 当劣化绝缘子的绝缘电阻大于250 MΩ时, 其分布电压变化较小。但当绝缘子绝缘电阻小于250 MΩ时, 该模型基本可以判定准确。

表3 测试样本正确率

Table 3 Test sample accuracy rate

序号	塔型	绝缘子片数	测试次数	误判次数	正确率/%
1		25	150	9	94.0
2	酒杯塔	24	150	6	96.0
3		23	150	5	96.4
4		25	150	8	94.7
5	猫头塔	24	150	7	95.3
6		23	150	5	96.4
7		25	150	6	96.0
8	干字塔	24	150	6	96.0
9		23	150	5	96.4

由以上检测结果可知, 使用该模型对330 kV交流瓷绝缘子串进行分类后再判定其劣化状态, 其判定准确率在94%以上, 可以运用于对330 kV绝缘子的劣化判定, 但对于绝缘电阻在250 MΩ以上的低值绝缘子, 因为其分布电压差异不大, 容易误判, 对于低值绝缘子的检测方法需要进行更深入的研究。

5 结论

1) 根据有限元仿真可知, 在正常情况下不同场景下的330 kV交流瓷绝缘子串其分布电压差异较大, 使用当前的电压标准对所有场景下的绝缘子进行判断容易误判。

2) 同一场景下绝缘子绝缘阻值不同时, 绝缘子

分布电压存在差异。劣化绝缘子的绝缘电阻大于250 MΩ时,其分布电压变化不明显;当绝缘子绝缘电阻小于250 MΩ时,其分布电压改变明显。同一场景下,连续两片绝缘子劣化比单片绝缘子劣化时分布电压变化明显,更容易识别。

3)通过建立在不同场景下330 kV交流瓷绝缘子串绝缘子分布电压数据库,可以在检测时输入特定场景后对应到相应的数据库,并通过PSO-SVM模型对绝缘子状态进行判定。该模型通过测试可以实现对劣化绝缘子的准确判定,判定准确率在94%以上。与其他算法相比,该算法能够有效的提升绝缘子劣化状态识别准确率,更好的识别绝缘子劣化状态。

参考文献:

- [1] 谢金鹏,张素慧,李 军,等.某变电站高压跌落式熔断器瓷绝缘子断裂原因分析[J].电瓷避雷器,2024(6):153-159.
XIE Jinpeng, ZHANG Suhui, LI Jun, et al. Cause of porcelain insulator fracture of high-voltage drop fuse in a certain substation [J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 153-159.
- [2] 阎法强,袁志勇,周 军,等.高温保温时间对绝缘子瓷件弯曲强度和电气强度的影响[J].电瓷避雷器,2025(4):129-136.
YAN Faqiang, YUAN Zhiyong, ZHOU Jun, et al. Influence of high temperature insulation time on the bending strength and electrical strength of insulator ceramic parts[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(4): 129-136.
- [3] 马 峰,赵法伟,郑哲钰,等.基于改进递归分析与自适应粒子滤波的支柱绝缘子裂纹演化预测[J].电子设计工程,2025,33(22):80-86.
MA Feng, ZHAO Fawei, ZHENG Zheyu, et al. Prediction of crack evolution in pillar insulators based on improved recursive analysis and adaptive particle filtering[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(22): 80-86.
- [4] 杜伯学,姚 航,梁虎成,等.时变温差工况下直流GIL/GIS盆式绝缘子动态电场畸变抑制[J].电工技术学报,2024,39(9):2851-2859.
DU Boxue, YAO Hang, LIANG Hucheng, et al. Electric field relaxation of basin spacer under variable temperature gradient in DC-GIL/GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2851-2859.
- [5] 赖秋频,杨 军,谭本东,等.基于YOLOv2网络的绝缘子自动识别与缺陷诊断模型[J].中国电力,2019,52(7):31-39.
LAI Qiupin, YANG Jun, TAN Bendong, et al. An automatic recognition and defect diagnosis model of transmission line insulator based on YOLOv2 network[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 31-39.
- [6] 苏凯第,赵巧娥.基于YOLOv5的绝缘子图像识别算法轻量化改进研究[J].电瓷避雷器,2024(4):173-180.
SU Kaidi, ZHAO Qiaoe. Lightweight improvement of insulator image recognition algorithm based on YOLOv5[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 173-180.
- [7] 卞建鹏,朱泽明,陈 璇,等.基于Res-CapsNet与改进YOLOv4的绝缘子破损识别与定位[J].电瓷避雷器,2025(6):106-116.
BIAN Jianpeng, ZHU Zeming, CHEN Xuan, et al. Insulator damage identification and location based on Res-CapsNet and improved YOLOv4[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(6): 106-116.
- [8] 张东东,常泽中,万武艺,等.基于局部电场的零值绝缘子检测技术研究[J].电力工程技术,2024,43(4):193-201.
ZHANG Dongdong, CHANG Zezhong, WAN Wuyi, et al. Zero-value insulator detection technology based on local electric field[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 193-201.
- [9] KIM T, SANYAL S, RABELO M, et al. Analysis of the deterioration of high-voltage insulators in service areas due to contamination factors[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2022, 11(7): ac7f56.
- [10] 杜晓亮.基于深度学习的接触网绝缘子表面状态检测方法研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
DU Xiaoliang. Research on contact network insulator surface condition detection method based on deep learning[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [11] 任 欢,苏 涛,李 朋,等.基于改进CenterNet的输电线路绝缘子缺陷检测方法[J/OL].南方电网技术:1-11[2025-09-25].
<https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240413002>.
REN Huan, SU Tao, LI Peng, et al. Detecting method for insulator defects of transmission lines based on improved CenterNet [J/OL]. Southern Power System Technology: 1-11[2025-09-25].
<https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20240413002>.
- [12] 严俊杰.基于深度学习的接触网绝缘子破损检测算法研究[D].南昌:华东交通大学,2022.
YAN Junjie. Research on deep learning based contact network insulator breakage detection algorithm[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [13] 梁 纲,马 斌,饶宇飞,等.基于ADFE-Net的航拍图像绝缘子缺陷检测[J].智慧电力,2025,53(3):107-116.
LIANG Gang, MA Bin, RAO Yufei, et al. Insulator defect detection in aerial images based on ADFE-Net[J]. Smart Power, 2025, 53(3): 107-116.
- [14] 普子恒,彭 朕,方春华,等.基于大数据分类与SVDD模型的多场景500 kV劣化绝缘子判定研究[J].电瓷避雷器,2022(2):189-196.
PU Ziheng, PENG Zhen, FANG Chunhua, et al. Multi-scenario judgment of 500 kV deteriorated insulator based on big data classification and SVDD model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 189-196.
- [15] 常 波,张启哲,王胜辉,等.动车组车顶隔离开关用支柱绝缘子污秽状态下的电场分布特性研究[J].电测与仪表,2024,61(4):81-85.
CHANG Bo, ZHANG Qizhe, WANG Shenghui, et al. Research on the electric field distribution characteristics under polluted conditions of EMU roof isolation switch post insulators[J]. Electrical

- Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 81-85.
- [16] 孙 喆, 张 静, 李建兴, 等. 基于轻量化YOLOv7-DenseBlock的绝缘子检测算法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(5): 68-74.
SUN Zhe, ZHANG Jing, LI Jianxing, et al. An insulator detection algorithm based on lightweight YOLOv7 - DenseBlock[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(5): 68-74.
- [17] 刘 悦, 黄新波, 刘天娇. 基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 167-177.
LIU Yue, HUANG Xinbo, LIU Tianjiao. Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 167-177.
- [18] TAN Chao, YANG Long, CHEN Haoran, et al. Fault diagnosis method for rolling bearing based on VMD and improved SVM optimized by METLBO[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(10): 4979-4991.
- [19] 尹向雷, 解永芳, 屈少鹏, 等. 基于动态蛇形卷积和非跨步卷积的绝缘子缺陷检测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 177-187.
YIN Xianglei, XIE Yongfang, QU Shaopeng, et al. Insulator defect detection based on dynamic snake convolution and space-to-depth convolution[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 177-187.
- [20] 李 亮, 范 瑾, 闫 林, 等. 基于混合采样和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 150-155.
LI Liang, FAN Jin, YAN Lin, et al. Transformer fault diagnosis based on hybrid sampling and support vector machines[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 150-155.
- [21] 邹红波, 宋家乐, 刘 媛, 等. 基于PSO-SVM算法的输电线路覆冰舞动预测模型[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 280-286.
ZOU Hongbo, SONG Jiale, LIU Yuan, et al. Prediction model of galloping of iced transmission lines based on PSO-SVM algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 280-286.
- [22] 李云溟, 咸日常, 张海强, 等. 基于改进灰狼算法与最小二乘支持向量机耦合的电力变压器故障诊断方法[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1470-1477.
LI Yunhao, XIAN Richang, ZHANG Haiqiang, et al. Fault diagnosis for power transformers based on improved grey wolf algorithm coupled with least squares support vector machine[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1470-1477.
- [23] 黄新波, 高玉菡, 张 烨, 等. 基于联合分量灰度化算法和深度学习的玻璃绝缘子目标识别算法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 203-209.
HUANG Xinbo, GAO Yuhuan, ZHANG Ye, et al. Glass insulator target recognition algorithm based on joint component grayscale algorithm and deep learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 203-209.
- [24] 包金山, 杨定坤, 张 靖, 等. 基于特征提取与INGO-SVM的变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 24-32.
BAO Jinshan, YANG Dingkun, ZHANG Jing, et al. Transformer fault diagnosis method based on feature extraction and INGO-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 24-32.
- [25] 国家能源局. 劣化悬式绝缘子检测规程: DL/T 626—2015 [S]. 2015.
National Energy Administration. Deterioration suspension insulator testing procedure: DL/T 626—2015[S]. 2015.
- [26] 李 进, 王禹淮, 张黎明, 等. 抛光方式对交流电压下盆式绝缘子表面电荷分布和沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4093-4101.
LI Jin, WANG Yuhuai, ZHANG Liming, et al. Influence of polishing treatments on surface charge distribution and flashover characteristics of basin spacer under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4093-4101.
- [27] 房子祎, 郝金鹏, 伍 弘, 等. 220 kV复合绝缘子均压环类型及结构对其电场分布的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(1): 51-61.
FANG Ziyi, HAO Jinpeng, WU Hong, et al. Influence of grading ring type and structure on electric field distribution of 220 kV composite insulator[J]. Insulating Materials, 2023, 56(1): 51-61.
- [28] 刘行谋, 田 浩, 杨永明, 等. 复杂环境背景下绝缘子缺陷图像检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 57-67.
LIU Hengmou, TIAN Hao, YANG Yongming, et al. Research on insulator defect image detection method in complex environment background[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(2): 57-67.
- 王思华(1968—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: lzjdwh@163.com)。
徐贺节(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 2654820513@qq.com)。
刘 爽(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电(E-mail: 1825298894@qq.com)。
王俊喆(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压绝缘子(E-mail: 907457368@qq.com)。
石天舒(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气化铁路过电压(E-mail: 1304899636@qq.com)。