

DOI:10.11918/202008006

盘型悬式绝缘子瓷件的应力分析和结构优化

张迺龙¹, 刘 洋¹, 高 嵩¹, 陈 杰¹, 荆宇航²

(1. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 南京 211103; 2. 哈尔滨工业大学 航天科学与力学系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为减少盘型悬式绝缘子断裂事故的发生, 研究了绝缘子瓷件的应力水平以及结构的优化. 建立盘型悬式绝缘子的有限元模型以计算绝缘子受拉伸作用下的应力分布特性, 以及在不同拉力方向的作用下, 绝缘子瓷件上的应力情况. 采用有限元和机器学习相结合的方法对绝缘子的结构进行优化. 结果表明: 在拉力作用下, 瓷件与水泥胶合剂的接触面部分分离, 导致绝缘子瓷件中部壁面的应力水平较高, 拉力方向与绝缘子轴线的夹角越大, 瓷件上的应力水平越高. 在有限元计算的基础上, 利用机器学习方法, 对绝缘子的结构参数进行优化设计, 得到了最优结构参数, 最优结构较原始结构应力水平降低了 30%, 并对最优结构进行有限元计算验证, 发现两者误差率仅为 0.644%, 结果可靠且优化效果显著. 在绝缘子的胶装过程中, 应增强胶装强度, 在绝缘子的安装中, 应尽量减少绝缘子的受拉方向与轴线的夹角, 以有效增加绝缘子的工作寿命. 结构优化得到的最优参数可以为结构设计提供理论指导和技术支持.

关键词: 盘型悬式绝缘子; 有限元; 应力集中; 机器学习; 结构优化

中图分类号: TB321 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)02-0098-06

Stress analysis and structural optimization of porcelain for disc suspension insulator

ZHANG Nailong¹, LIU Yang¹, GAO Song¹, CHEN Jie¹, JING Yuhang²

(1. Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 211103, China;

2. Department of Astronautical Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to reduce the fracture accident of disc suspension insulators, the stress level of porcelain and the optimization of its structure were studied. The finite element model of the disc suspension insulator was established to investigate the stress distribution characteristics of the insulator under tension, and the stress on the porcelain under different tension directions was analyzed. The insulator structure was optimized based on finite element method and machine learning method. Results show that under the action of tension, the contact surface between porcelain and cement was partially separated, resulting in higher stress level on the middle wall of porcelain. The greater the angle between the tension direction and the axis of insulator was, the higher the stress level on the porcelain became. On the basis of finite element calculation, the machine learning method was adopted to optimize the structural parameters of the insulator, and the optimal structural parameters were obtained. The stress level of the optimal structure was reduced by 30% compared with that of the original structure. The finite element calculation of the optimal structure shows that the error rate was only 0.644%, indicating that the result is reliable and the optimization effect is significant. Therefore, in the process of cementing of insulator, the cementing strength should be enhanced. In the installation of insulator, the angle between the tension direction of the insulator and the axis should be minimized so as to effectively increase the working life of the insulator. The optimal parameters obtained by structural optimization can provide theoretical guidance and technical support for structural design.

Keywords: disc suspension insulator; finite element method; stress concentration; machine learning; structural optimization

中国将特高压工程列入国家“十二五”规划, 计划建设“三横三纵一环网”特高压骨干网架. 这一过程中, 中国的特高压输电在电压等级、输送电量、距

离等方面不断刷新世界纪录. 绝缘子作为特高压输电线路的重要组成部分, 是保证线路稳定运行的重要部件, 随着国家的特高压工程、西电东送工程等的建设, 绝缘子的需求随着国家电网的建设日益增大^[1-3].

绝缘子的运行过程受到风载、雨雪、冰冻、温差等复杂户外环境的影响, 同时也承受电场强度以及机械载荷等多种因素的共同作用. 绝缘子在运行过

收稿日期: 2020-08-03

基金项目: 国网公司科技项目(5200-201918084A-0-0-00)

作者简介: 张迺龙(1981—), 男, 高级工程师;

荆宇航(1981—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 荆宇航, jingyh@hit.edu.cn

程中,时常出现瓷件断裂、绝缘子掉串等事故,冬季低温环境使金属附件应力收缩、水泥胶合剂长期冻结都会引起事故的发生. 另外,在绝缘子的生产和安装过程中,常常造成绝缘子表面划痕甚至微小裂纹等损伤,使得绝缘子在运行时,在机械载荷的作用下,裂纹处发生应力集中,使裂纹进一步扩展,从而导致绝缘子的断裂^[4-8],这给输电线路的安全稳定运行带来了极大的隐患.

盘型悬式绝缘子在工作状态下,要承受来自导线张力所决定的拉力载荷,因此本文重点研究绝缘子在拉力载荷作用下,瓷件上的应力分布情况. 通过对绝缘子在不同拉力方向下的应力分布进行计算,对绝缘子的安装提供可行的建议,并在拉力的作用下,对绝缘子进行结构优化,来改善绝缘子瓷件上的应力集中情况.

1 盘型悬式绝缘子的有限元建模

1.1 盘型悬式绝缘子的基本结构分析

盘型悬式绝缘子的基本结构包括瓷件、钢脚、铁帽和水泥胶合剂. 瓷件表面一般上白釉;铁帽和钢脚与水泥胶合剂接触表面薄涂一层缓冲层;铁帽与钢脚通常使用铸铁作为材料,二者表面全部镀锌,达到固定和连接的作用;水泥胶合剂使瓷件与铁帽、钢脚构成一个机械和电气的结构整体,起到胶装结构的作用^[9-11]. 本文主要针对用于架空线路的线路绝缘子,盘型悬式绝缘子在工作时成串挂网. 在工作状态下,绝缘子主要承受拉力和重力. 420 kN 盘型悬式绝缘子的主要几何尺寸见图 1.

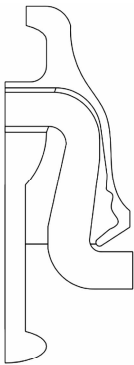


图1 绝缘子几何结构示意图
Fig. 1 Geometry of insulator

1.2 盘型悬式绝缘子的有限元仿真模型

通过有限元软件 ABAQUS,建立盘型悬式绝缘子的三有限元模型. 由于在实际中,盘型悬式绝缘子的结构对称,体积相对较大,故将模型简化为 5 个部分,从上到下依次为铁帽、水泥胶合剂(胶结铁帽和瓷件)、瓷件、水泥胶合剂(胶结钢脚和瓷件)以及

钢脚^[12-13]. 由于盘型悬式绝缘子球窝部分的连接结构尺寸是标准规定的,且不是本文所要研究的重点,因此可以将其在有限元模型中简化为铁帽结构. 由于盘型悬式绝缘子的伞裙部分应力水平较低(后面的计算结果可以证明),为提高计算效率,建模时将此部分删除. 建模中采用的长度单位为 mm,力的单位为 N,应力的单位为 MPa,相关材料的主要性能参数见表 1.

表1 材料参数
Tab. 1 Material parameters

材料	弹性模量/(10 ⁵ MPa)	泊松比	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)
铁帽	1.70	0.28	7.30
水泥	0.28	0.23	2.25
瓷件	0.76	0.16	2.54
钢脚	2.00	0.30	7.85

将材料参数分别赋予绝缘子的各部件. 使用 C3D8R 单元和 C3D10 单元来划分网格,绝缘子模型共有 51 881 个节点和 32 300 个单元.

将盘型悬式绝缘子各部件装配到一起,设置其相邻部件之间的相互关系. 将瓷件的表面和与之接触的内外层水泥胶合剂之间的相互关系设置为面面接触,且取摩擦系数为 0.35,将内外层水泥胶合剂分别与钢脚、铁帽设置为绑定约束. 盘型悬式绝缘子的三维有限元模型见图 2.

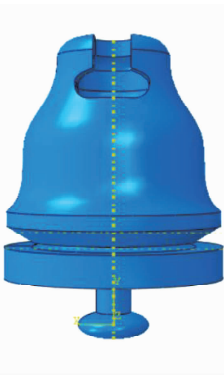


图2 绝缘子有限元模型
Fig. 2 Finite element model of insulator

2 不同载荷工况下绝缘子的应力分布

2.1 绝缘子在拉力载荷作用下的应力分布

由于盘型悬式绝缘子的瓷件为陶瓷材料,是典型的脆性材料,其抗拉性能要比抗压性能差很多. 绝缘子在工作状态下,主要承受拉力外载荷作用,绝缘子的有限元模型的结构较大,不利于查看某一点的应力值,所以选择瓷件上 Mises 应力的最大值为研究对象,以此来分析数据结果以及对盘型悬式绝缘子进行结构优化.

对绝缘子铁帽上方的连接面施加面力,大小为 60 MPa,以此来等效拉力载荷作用. 对绝缘子钢脚的底部施加固定约束,即

$$U_1=0, U_2=0, U_3=0, U_{R1}=0, U_{R2}=0, U_{R3}=0.$$

瓷件上的 Mises 应力分布情况见图 3.

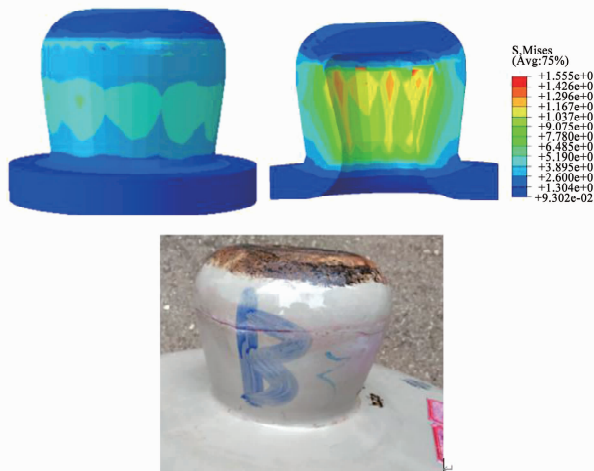


图 3 瓷件的 Mises 应力分布和拉伸破坏

Fig. 3 Mises stress distribution and tensile failure of porcelain

由图 3 可知,瓷件中间部位的应力水平较高,在顶部拉力的作用下,导致瓷件与水泥胶合剂的接触面部分分离,只在瓷件中间部位的接触面未发生分离,两者之间的作用力仅靠此处的接触面传递,从而导致瓷件在此处的应力水平较高. 在绝缘子的拉伸实验中,瓷件的破坏从中间位置开始,最终发展为整个瓷件的断裂,为仿真结果进行了验证. 因此在绝缘子的胶装过程中,应加强瓷件与水泥胶合剂的胶装强度,使瓷件上的应力分布更加均匀,有效增加绝缘子的工作寿命.

2.2 绝缘子在不同拉力方向下的应力分布

对绝缘子施加不同方向的力载荷,以模拟分析由于施工安装的不合理所造成的绝缘子在受力方向不确定的情况下的应力分布. 建立绝缘子的三维结构,集中力载荷作用在绝缘子的顶部,作用力大小不变,为 10 kN,方向与绝缘子轴线的夹角从 0°到 80°变化,选取夹角的角度变化幅度为 10°. 在不同的受力方向下,绝缘子瓷件上最大应力的变化如图 4 所示.

从图 4 中可以得到,当集中力的方向从 0°到 80°变化时,绝缘子瓷件结构的应力值随之增大. 因此在绝缘子的安装中,应该使绝缘子的受拉方向与轴线的夹角尽可能的小,从而减小绝缘子瓷件的应力水平,有效防止断裂事故的发生.

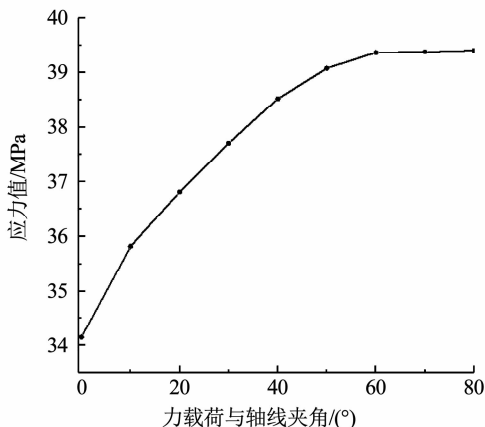


图 4 不同角度下的应力

Fig. 4 Stress at different angles

3 基于机器学习的绝缘子结构优化

3.1 参数化建模

对绝缘子有限元模型进行参数化建模,并对绝缘子的几何结构参数进行调整,生成大量不同结构的模型,通过 ABAQUS 的计算,得到各个结构的最大应力. 考虑到绝缘子的失效主要是由瓷件的破坏所引起的,因此对瓷件以及与瓷件接触的水泥胶合剂进行参数化,通过对这些相关参数的调整,改变绝缘子的结构^[14-15],由 ABAQUS 计算得到对应结构的应力分布.

通过对绝缘子参数化模型的计算,得到大约 600 组不同结构绝缘子的节点坐标和相应的应力值,以此来进行后续机器学习的工作.

3.2 机器学习

3.2.1 神经网络模型

神经网络学习方法对于逼近实数值、离散值或向量值的目标函数具有很强的鲁棒性,是一种普遍而且实用的机器学习算法. 神经网络的主要思想是前向传播和反向传播算法. 在前向传播过程中,数据由输入层输入,然后经过若干层隐藏层的处理,最终由输出层输出. 此时将输出层输出的预测值与真实值进行误差计算,如果误差较大,则会进入反向传播过程. 在反向传播过程中,神经网络会对各层之间的权重与偏置项进行调整,接着再进入前向传播过程,使预测值与真实值误差减小. 反复循环,不断地调整权重和偏置项,使预测值在误差允许的范围内达到要求,随即停止训练.

本文选择全连接层神经网络作为神经网络结构^[16-19],全连接层神经网络是一种按误差传播算法训练的多层前馈网络,能学习训练大量输入输出映射关系,具体结构见图 5.

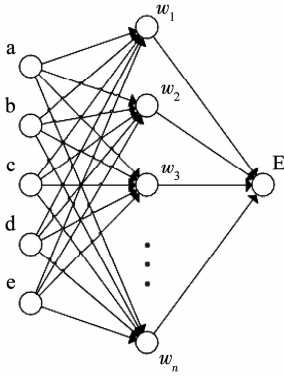


图 5 神经网络结构

Fig. 5 Neural network architecture

该模型中绝缘子瓷件上的 5 个坐标值为输入向量, 绝缘子瓷件最大 Mises 应力为输出向量, w_1 、 w_2 、 w_n 为权重系数, 从而构建一个 3 层全连接神经网络。

3.2.2 激活函数的选择

在神经网络中, 常通过加入激活函数实现去线性化, 常用的激活函数主要有 ReLU 函数、sigmoid 函数、tanh 函数, 因为 sigmoid 函数与 tanh 函数一般会带来梯度消失的问题, 增加梯度的不稳定性, 所以本文选择 ReLU 函数。ReLU 激活函数相对前两者收敛更快, 误差可以很好地传播, 权重可以正常地更新。输入层的输入与输出都是样本集的属性值, 隐含层和输出层的输入为

$$S_j = \sum_{i=0}^{m-1} \omega_{ij} x_i + \theta_j. \quad (1)$$

式中: ω_{ij} 是单元 i 和单元 j 之间的权值, x_i 是单元 i 的输出, θ_j 是单元 j 的阈值。

经过激活函数的处理, 得到隐含层的输出为

$$x_j = \max(0, S_j). \quad (2)$$

3.2.3 损失函数的选择

评价机器学习好坏的指标之一是损失函数的大小。机器学习常使用的损失函数有交叉熵与均方误差, 由于本次研究的问题属于回归问题, 所以使用均方误差^[20-21]。全连接层神经网络的主要目的是反复修正权值和阈值, 使得误差函数值达到最小, 误差函数为

$$E(\omega, \theta) = \sum_{j=0}^{n-1} (d_j - y_j)^2 / 2. \quad (3)$$

式中, d_j 为输出层的期望结果, y_j 为输出层的实际结果。

3.2.4 学习率的选择

在神经网络中, 学习率决定了损失函数下降的速度, 学习率的选择不宜过小, 也不宜过大, 为了使结果更好地收敛, 选取合适的学习率至关重要。本次模型选取 0.01、0.001、0.006 这 3 种学习率进行调

试, 从中选取最优的学习率^[22-23]。经过调试, 学习率为 0.01 与 0.006 时的损失函数要小于学习率为 0.001 时的损失函数, 保守起见选择 0.006 作为学习率, 以防止随着训练次数的增加造成损失函数出现大的波动现象。

3.2.5 正则化率的选择

在神经网络中, 需要正则化项来消除过拟合问题。正则化项的大小通常是由正则化率来调节, 本文模型选取 0.000 000 01、0.000 001、0.000 1 这 3 种正则化率进行调试。经过调试, 正则化率为 0.000 000 01 与 0.000 001 时的损失函数要小于正则化率为 0.000 1 时, 故两种正则化率都可以选取, 本文选取 0.000 000 01 为正则化率。

3.3 模拟结果及误差分析

3.3.1 模拟结果

取神经网络的隐藏层节点个数为 50, 训练次数为 210 000。取 16 组原始数据作为测试集, 并将训练结果、测试结果与真实结果分别拟合, 见图 6。

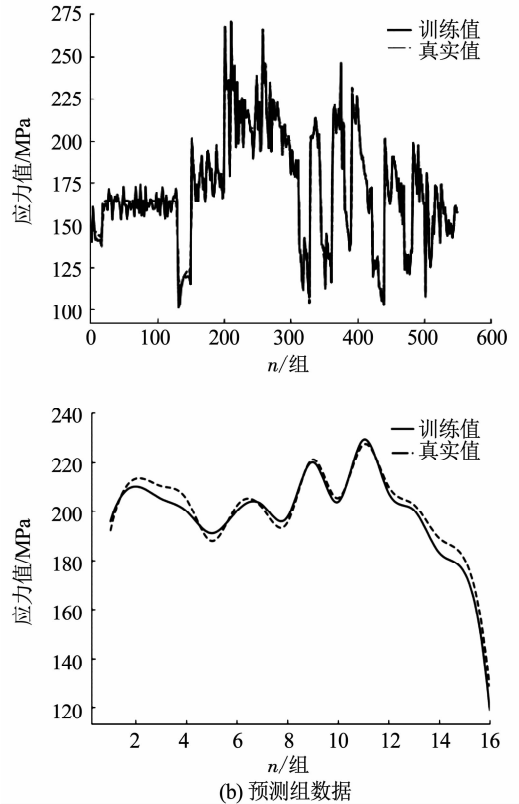


图 6 训练值及预测值与真实值的曲线图

Fig. 6 Fitting of training values, predicted values, and real values

从图 6(a) 中可以得到, 前 100 组数据的真实值在训练值上下来回震荡, 震荡范围大约为 10 MPa, 但是后 100 组数据上训练值与真实值基本完全拟合。训练数据的平均误差在 3.3 MPa 左右, 已经完成较好的拟合情况。

另外取出原始数据的 16 组数据作为测试集在最终的机器学习模型上进行测试,将测试得到的最大 Mises 应力的预测值与真实值用曲线拟合,见图 6(b). 从图中可以得出,测试值与真实值之间的轨迹基本拟合,该模型可以对结果做出合理预测.

将 112 000 种绝缘子瓷件结构的坐标信息放在上述的机器学习模型中进行预测,并将预测结果按照升序排列,得到不同结构的绝缘子瓷件的最大 Mises 应力见图 7. 从模拟结果可以得到,绝缘子瓷件的最大 Mises 应力的最小值为 107.233 MPa.

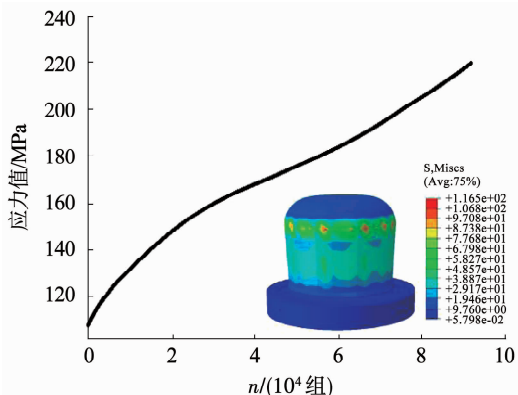


图 7 预测值与最优应力情况

Fig. 7 Predicted value and optimal stress

3.3.2 误差分析

将机器学习预测得到的最大 Mises 应力的最小值所对应的结构坐标在 ABAQUS 中进行建模运算,得出的最小值的真实值为 107.924 MPa,与机器学习预测的值相比,误差率仅为 0.644%,说明机器学习模型的可靠度较高. 优化之前,原始结构的瓷件上的最大应力为 155.508 MPa,优化效果显著,可以按照该优化结果作为新的结构进行设计生产.

优化前后的结构对比如图 8 所示,其中实线图形为原结构示意,虚线图形表示优化后部分结构改变后的位置.

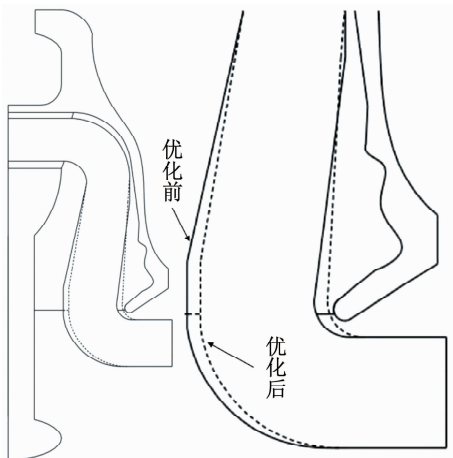


图 8 优化前后结构对比

Fig. 8 Structural comparison before and after optimization

4 结 论

1) 绝缘子在拉力作用下,瓷件和水泥胶合剂发生部分接触面分离,导致瓷件未分离的中间部位的应力水平较高,因此应加强绝缘子的胶装强度,以使瓷件上的应力分布更加均匀.

2) 绝缘子在不同的受拉载荷作用下,当拉力方向与轴线的夹角越大时,瓷件上的应力水平越高. 为使绝缘子安全运行,在绝缘子的安装中,应该使绝缘子的受拉方向与轴线的夹角尽可能的小.

3) 采用机器学习和有限元计算相结合的方法,通过大量 ABAQUS 计算得到不同结构以及相应的最大应力值,调试得到机器学习模型,利用这一机器学习模型可以快速且准确地预测不同绝缘子结构的最大应力值. 预测得到最优结构之后,再利用 ABAQUS 对最优结构进行有限元计算验证,发现两者误差率仅为 0.644%,且最优结构较原始结构应力水平降低了 30%,优化效果显著.

参考文献

- [1] 李凌. 400 kN 盘形悬式瓷绝缘子的研制[J]. 电瓷避雷器, 1999(5): 3
LI Ling. Development of 400 kN suspension disc insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 1999(5): 3
- [2] 陈茂盛. 低温环境下支柱瓷绝缘子力学特性分析及临界裂纹尺寸研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(4): 217
CHEN Maosheng. Research on mechanical property and critical crack size of porcelain post insulator under low temperature environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(4): 217. DOI: 10.16188/j. isa. 1003-8337. 2018. 04. 038
- [3] 杨海涛, 陈庆涛, 丁国成, 等. 高压支柱瓷绝缘子力学特性分析及断裂机理研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 178
YANG Haitao, CHEN Qingtao, DING Guocheng, et al. Mechanical properties analysis and fracture mechanism study of high voltage post porcelain insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4): 178. DOI: 10.16188/j. isa. 1003-8337. 2017. 04. 033
- [4] 邹学东, 张丽萍, 李琦, 等. 基于有限元法的支柱绝缘子应力分析[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 68
ZOU Xuedong, ZHANG Liping, LI Qi, et al. Post insulator stress analysis based on finite element analysis[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 68. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-7598. 2017. 09. 012
- [5] 刘洋, 袁田, 徐偲达, 等. 静态载荷下盘形悬式绝缘子形变特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 32
LIU Yang, YUAN Tian, XU Sida, et al. Study on stress-strain characteristics of cap and pin insulator under static load[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 32. DOI: 10.16188/j. isa. 1003-8337. 2019. 06. 032
- [6] 朱健云. 基于 ANSYS 盘形悬式绝缘子的模态分析[J]. 机械设计与制造, 2012(12): 236
ZHU Jianyun. Modal analysis of the cap and pin insulator based on the ANSYS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(12): 236. DOI: 10.19356/j. cnki. 1001-3997. 2012. 12. 084

[7]李特,王少华,梅冰笑,等. 浙江地区复合绝缘子与标准型盘形悬式绝缘子自然积污特性差异及其环境影响因素[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 36
LI Te, WANG Shaohua, MEI Bingxiao, et al. Natural contamination comparison between composite insulators and standard disc suspension insulator in Zhejiang Province and environmental factor effects on the contamination differences[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 36. DOI: 10.16188/j. isa. 1003 - 8337. 2019.06.036

[8]徐天勇,董晓虎,李荣超,等. 复合绝缘子内部缺陷的超声相控阵检测研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 75
XU Tianyong, DONG Xiaohu, LI Rongchao, et al. Ultrasonic phased array detection of composite insulators internal defects[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 75. DOI: 10.19464/j. cnki. cn32 - 1541/tm. 2018.06.012

[9]赵建坤,王森,安凯月,等. 盘形悬式瓷绝缘子炸裂事故原因分析及防范措施[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(1): 94
ZHAO Jiankun, WANG Sen, AN Kaiyue, et al. Analysis of burst accident of ceramic cap and pin insulator and its preventive measures[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(1): 94. DOI: 10.3969/j. issn. 1008 - 6218. 2019.01.016

[10]周兆禹. 盘形悬式绝缘子的结构分析与优化[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012
ZHOU Zhaoyu. Structure analysis and optimization of the cap and pin insulator[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012

[11]吴昱怡,王承玉,陈允,等. 盆式绝缘子力学性能测试及分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 132
WU Yuyi, WANG Chengyu, CHEN Yun, et al. Test and analysis on mechanical properties of 252 kV basin-type insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(1): 132. DOI: 10.16188/j. isa. 1003 - 8337. 2017.01.025

[12]PALHADE R D, TUNGIKAR V B, DHOLE G M, et al. Simulation of structural, thermal and electrical load for high voltage ceramic cap and pin disc insulator assembly[J]. International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME), 2013, 3(1): 66. DOI: 10.4018/ijmmme. 2013010105

[13]PALHADE R D, TUNGIKAR V B, DHOLE G M, et al. Transient thermal conduction analysis of high voltage cap and pin type ceramic disc insulator assembly[J]. International Journal of Advanced Science and Technology, 2013, 56: 73

[14]张洪军. 悬式绝缘子的计算机辅助设计系统[J]. 电瓷避雷器, 1994(2): 3
ZHANG Hongjun. Computer aided design system of suspension insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 1994(2): 3. DOI: 10.16188/j. isa. 1003 - 8337. 1994.02.001

[15]赵达壮,张允真. 悬式绝缘子的形状优化[J]. 计算结构力学及其应用, 1991, 8(3): 313
ZHAO Dazhuang, ZHANG Yunzhen. The shape optimization of suspended insulator[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1991, 8(3): 313. DOI: 10.7511/jslx19913045

[16]淡淑恒,吴娜,李昊东,等. 基于有限元和神经网络方法对 220 kV 盆式绝缘子均压环结构优化设计[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 79
DAN Shuheng, WU Na, LI Haodong, et al. Optimization design of grading ring for 220 kV basin-type insulator based on finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 79. DOI:10.13296/j. 1001 - 1609. hva. 2018.03. 011

[17]司马文霞,杨庆,孙才新. 基于有限元和神经网络方法对超高压合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 115
SIMA Wenxia, YANG Qing, SUN Caixin. Optimization of corona ring design for EHV composite insulator using finite element and neural network method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 115. DOI: 10.3321/j. issn:0258 - 8013. 2005.17.023

[18]淡淑恒,吴娜,姜腾,等. 基于有限元和神经网络方法对 220 kV 盆式绝缘子屏蔽罩结构优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 153
DAN Shuheng, WU Na, JIANG Teng, et al. Optimization of shielding electrode design for 220 kV basin-type insulator by finite element method and neural network method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3): 153. DOI:10.16188/j. isa. 1003 - 8337. 2017.03.030

[19]罗建军,刘振声,龚翔,等. 基于无人机图像与迁移学习的线路绝缘子状态评价方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 30
LUO Jianjun, LIU Zhensheng, GONG Xiang, et al. Insulator state evaluation method based on UAV image and migration learning[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 30

[20]许凯. 神经网络在有限元分析中的应用[J]. 数字技术与应用, 2010(12): 62
XU Kai. Application of artificial neural network in finite element analysis[J]. Digital Technology and Application, 2010(12): 62. DOI: 10.19695/j. cnki. cn12 - 1369. 2010.12.039

[21]包龙生,漆亮,于玲. 基于 BP 神经网络的桥梁有限元模型修正[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(3): 61
BAO Longsheng, QI Xian, YU Ling. Modification of bridge finite element model based on Back Propagation neural network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2018(3): 61

[22]赵亚飞,韦广梅. 基于 BP 神经网络的有限元应力修匀的研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(13): 10
ZHAO Yafei, WEI Guangmei. Study on finite element stress smoothing based on BP neural network[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(13): 10. DOI: 10.3778/j. issn. 1002 - 8331. 1705 - 0428

[23]曾小燕,王林. 基于优化神经网络的桁架有限元模型修正[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 237
ZENG Xiaoyan, WANG Lin. Finite element model updating of a truss based on Optimized Neural Network[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(2): 237. DOI: 10.3969/j. issn. 1673 - 4807. 2017. 02.021

(编辑 苗秀芝)