

# 震后变电站瓷柱型设备性能快速评估方法

朱旺<sup>1</sup>, 张秀丽<sup>2</sup>, 谢强<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 当前电力系统的抗震研究技术主要针对震前设计、分析与防灾减震。为了快速辅助震后应急响应工作, 本文提出了利用监测数据预测结构地震响应的瓷柱型设备震后性能评估方法。该方法在震前融合机器学习和用于算法架构优化的群体智能演化技术以构建设备地震响应替代模型, 建立瓷柱型设备精细化仿真模型, 通过输入大量地震动形成结构响应数据库, 进而对替代模型进行训练和性能评价。地震中监测结构响应, 震后可利用替代模型快速提供设备根部应力响应以判断设备抗震性能。采用 1100 kV 变压器套管-支架体系进行案例研究, 并通过振动台试验和分布参数体系理论进行了验证。结果表明利用瓷柱型设备加速度响应数据可在震后准确评估根部应力; 粒子群算法能有效调整替代模型的内部结构, 提升模型准确性; 振动台试验和理论分析结果验证了替代模型评估结果的准确性。

**关键词:** 瓷柱型设备; 振动台试验; 快速评估; 机器学习; 群体智能演化; 分布参数体系

**中图分类号:** TU311.3; TM71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)01-0068-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.01.008

## Fast performance evaluation method of porcelain cylindrical equipment in substations after seismic events

ZHU Wang<sup>1</sup>, ZHANG Xiuli<sup>2</sup>, XIE Qiang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Water Conservancy  
and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Seismic research technologies of power systems focus on the design, analysis and disaster mitigation before earthquakes. To quickly assist the emergency work after earthquakes, this paper proposed a post-earthquake evaluation method facing porcelain cylindrical equipment that uses monitoring data to predict structural stress responses. This method establishes a stress response proxy model by integrating machine learning and swarm intelligence evolution technologies, then builds refined simulation model, and conducts response analyses to form structural response database. Based on this, the proxy model can be trained and evaluated. Once the structural responses can be monitored, the proxy model can supply the stress response rapidly after earthquakes to help the post-disaster detection. A case study was performed using 1100 kV transformer bushing, and the evaluation models were validated by shaking table tests and theoretical model based on distributed parameter system. The results indicate that using acceleration monitoring data can accurately evaluate the base stress of porcelain cylindrical equipment. Particle swarm optimization can efficiently adjust the internal structures of evaluation models, further increasing the model accuracy. The accuracies of evaluation models were validated by both shaking table tests and theoretical model.

**Keywords:** porcelain cylindrical equipment; shaking table tests; fast evaluation; machine learning; swarm intelligence evolution; distributed parameter system

变电站是电力网络的重要节点, 具有电能转换和调节的功能。在 1994 年美国北岭地震<sup>[1]</sup>、日本神户地震<sup>[2]</sup>、2008 年汶川地震<sup>[3-4]</sup>等历次大地震中, 变电站均遭到了严重损坏, 表现出较高的地震易损性。电力设施的损坏不仅会造成直接经济损失, 还会引

起由于电力中断造成的人员、财产间接损失, 严重时会影响社会稳定<sup>[5]</sup>。

由于电力绝缘要求, 变电站内比例最高的设备为瓷柱型设备, 瓷柱型设备呈竖直悬臂状态, 由下部的钢支架和上部的瓷质绝缘子组成, 如图 1 所示。

收稿日期: 2023-02-08; 修订日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878508)

典型的瓷柱型设备包括变压器套管、隔离开关、断路器、避雷器、电流电压互感器等。历次大地震震害表明瓷柱型设备的破坏模式主要为根部瓷套破坏,部分为连接法兰开裂<sup>[4]</sup>。图 2 展示了汶川地震下某回路开关的根部破坏及倒塌。由于瓷柱型设备易损性高,且数量众多,其抗震性能关乎整个变电站乃至电网的稳定运行,因此对其进行抗震研究意义重大。



图 1 变电站典型瓷柱型设备

Fig. 1 Typical porcelain cylindrical equipment in substations



图 2 开关设备的根部破坏

Fig. 2 Root failure of circuit breakers

近年来大量学者对变电站各类电力设备进行了抗震研究,涉及到变压器<sup>[6-7]</sup>、套管<sup>[8-9]</sup>、隔离开关<sup>[10]</sup>、悬吊设备<sup>[11]</sup>以及设备耦联体系<sup>[12]</sup>。当前的抗震研究所涉及的方向主要包括抗震性能分析<sup>[13]</sup>、减隔震技术和风险评估<sup>[14]</sup>,以及韧性评估<sup>[15]</sup>。特别地,对于各类瓷柱型设备,已有众多抗震研究成果。上个世纪末,BELLORINI等<sup>[16]</sup>首先关注了变压器高压套管的抗震性能并进行了鉴定。GILANI等<sup>[17-19]</sup>分别对 196, 230 和 550 kV 的套管-支架体系进行了振动台试验,证明了支架对套管的动力影响与变压器不同,且支架刚度较大时,整体抗震性能更好。谢强等<sup>[20]</sup>、文嘉意等<sup>[21]</sup>对隔离开关进行了振动台试验,研究了支架结构和刀闸对瓷瓶响应的影响。HE等<sup>[22]</sup>对 1100 kV 套管进行数值仿真和理论分析,验证了法兰对套管地震响应的影响。基于抗震性能分析方法,ALESSANDRI等<sup>[23-24]</sup>采用钢丝绳阻尼器对回路开关进行了基地隔震。柏文等<sup>[25-26]</sup>提出了针对瓷柱设备的基于 BI-TMD 的混合控制减震技术以及 MTMD 减震方法。

尽管众多学者对瓷柱型设备进行了抗震性能分析、减隔震研究以及易损性分析评估,但是此类研究主要针对震前设计、加固和改造,着眼于震后应急救

灾工作的研究较少。在一些地震下,设备根部已经发生了开裂破坏,但是结构整体保持着完整,并未倒塌,此类设备在震后需进行检测或更换。因此,地震下瓷柱型设备的瓷套根部应力不仅可反映结构在地震下的性能,也能指导震后检修工作。变电站内瓷柱型设备众多,逐一进行检查观测将耗费较大的人力物力,且应变片等监测传感器由于电磁场干扰无法进行工作,因此需要一种能够快速估计设备根部应力的方法,用于指导检测工作。有限元模型计算是一种具有一定准确性的估计方法,然而站内设备繁多,应急救援工作分秒必争,在震后进行大量耗时计算后提出检测指导显然无法满足快速性要求。为了同时保证快速性和准确性,可以利用人工智能算法模型进行估计。目前,已有学者将人工智能技术引入工程研究,并取得良好的成果<sup>[27-28]</sup>。

## 1 震后应力快速评估方法

本文提出的评估方法全流程如图 3 所示,贯穿地震发生全过程,即整体工作遍及震前、震时和震后。为了保证震后评估的快速性,此方法在震前的工作相比震后更多,可等效为将震后的计算工作量转移至震前。

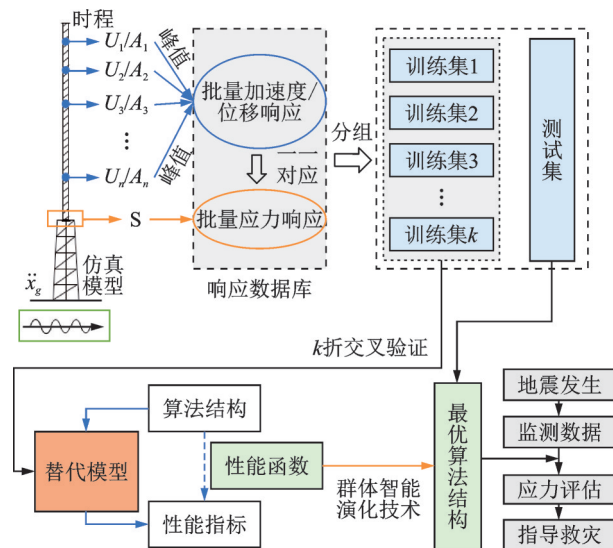


图 3 瓷柱型设备震后评估方法全过程

Fig. 3 Whole process of post-earthquake evaluation for porcelain cylindrical equipment

如图 3 所示,对于某一类瓷柱型设备,建立精细化有限元模型,选取符合场地要求的大量地震动,输入有限元模型获取批量地震动响应,其中包括根部应力响应以及外部的加速度或位移响应,提取峰值后形成地震响应数据库。每条地震动作用下的加速度位移响应峰值和根部应力响应峰值一一对应,形成一个样本。随机打乱全部样本并根据一定比例形

成  $k$  组训练集和 1 个测试集。选取人工智能算法(机器学习算法和深度学习算法)建立地震响应替代模型(亦称评估模型),在进行  $k$  折交叉验证下,评估模型的准确率(即评估性能)并用性能指标表示。由于在确定的训练样本下,同类算法的不同超参数将产生不同的评估性能,因此算法结构超参数与性能之间存在一种映射关系,记为模型性能函数。固定训练样本,以提升性能指标为目标,利用群体智能演化技术对结构超参数进行调整,从而优化性能函数,并获得最优的算法结构。

地震发生后,获取地震过程中评估模型需要的加速度或位移响应监测数据(结构响应监测可采用高速摄像等非接触式监测技术),提取加速度或位移响应峰值后输入评估模型,可以在较短时间内提供根部应力峰值,以辅助震后现场救灾工作。相比于有限元仿真计算,本方法可在震后几秒内提供根部应力峰值,用于判断设备在地震下的性能情况,以及是否需要进行检测或更换,改善了传统的震后全站逐一检测方法,降低震后整体的工作量。

## 2 1100 kV 变压器套管评估案例

### 2.1 1100 kV 变压器套管结构

1100 kV 变压器套管结构如图 4 所示,该套管为油纸绝缘电容式套管,安装在 1000 kV 变压器上。套管结构包括油侧瓷套、空气侧瓷套、连接法兰、均压环以及内部导电杆等。套管总长 13 m,空气侧长 10.182 m,总质量为 5073 kg,其他细节尺寸如图 4 所示。本文所确定的套管根部位于空气侧瓷套最下部。

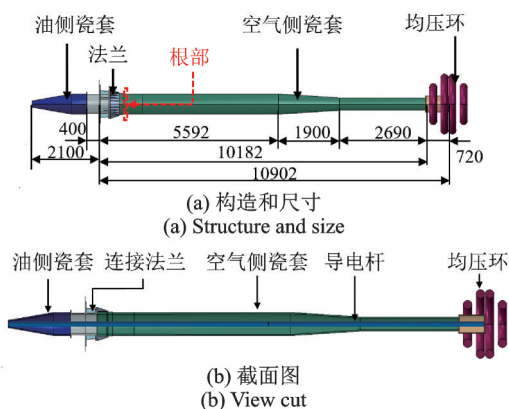


图 4 1100 kV 变压器套管结构和尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Structure and size of 1100 kV transformer bushing (Unit: mm)

采用 ABAQUS 软件建立套管有限元模型,如图 5 所示,瓷套、法兰、导电杆以及均压环等均采用 C3D8R 实体单元建立,法兰加劲肋采用 S4R 壳单元

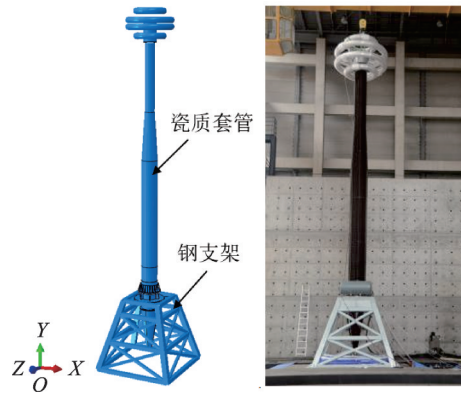


图 5 1100 kV 套管-支架体系仿真模型和试验模型

Fig. 5 Simulation and experiment models of the 1100 kV bushing-support system

建立,其中,导电杆带有一定预拉力。电容纸简化为等效质量附着于导电杆,伞裙的质量考虑在瓷套质量中,不考虑伞裙的刚度影响。模型中主要包括两种材料:陶瓷和铝合金。陶瓷应用在空气侧瓷套和油侧瓷套,为套管主要材料,弹性模量取 106 GPa,密度经等效后取 6700 kg/m<sup>3</sup>;铝合金材料主要用于法兰部分,弹性模量取 60 GPa,密度 4300 kg/m<sup>3</sup>。由于试验中设置钢支架模拟变压器的固定作用,仿真模型中仍建立钢支架,其高度为 2.7 m,与套管的法兰板固定连接,在仿真模型中采用 Tie 连接模拟。钢支架底部设定为地面边界,未地震时底部固定 6 个自由度,地震时主震方向输入地震动,其他方向固定约束。网格划分时,加劲肋采用自由网格,其他均采用扫掠网格。模型中,水平两向设为 X, Z 向,空间竖向设为 Y 向。

振动台试验结果显示两种模型基频接近(仿真结果 2.48 Hz,试验结果 2.38 Hz),且前两阶振型相同,对比详见文献[22]。通过对比和仿真模型修正,认为此仿真模型在计算地震响应问题上具有一定的合理性,可以体现真实套管的抗震性能,并在后续研究中以此仿真模型的响应结果作为真实的地震响应。

### 2.2 地震响应数据库建立

本案例选择的 1100 kV 变压器套管位于二类场地,8 度抗震设防,由于电气设备重要性,采用 9 度抗震设防<sup>[29]</sup>,设计基本加速度为 0.4g。在 PEER 地震动数据库选取二类场地地震波 340 条,340 条地震波响应谱和平均谱如图 6 所示。

考虑套管截面变化,沿套管轴向选择 5 个关键点,包括套管顶部、瓷套中间变截面位置、瓷套根部以及法兰底板底部,如图 7 所示。本文以加速度数据作为实际监测物理量,在实际应用中也可选择位移数据或者二者综合数据。5 个关键点对应响应峰

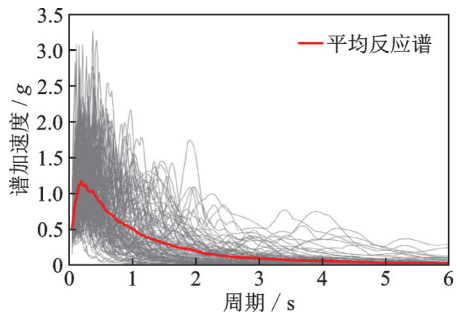


图 6 所选地震波反应谱

Fig. 6 Response spectra of selected ground motions

值简记为  $A_1 \sim A_5$ 。输入选择的 340 条地震波后,获得 5 个关键点的加速度峰值以及根部应力峰值数据,形成数据库。每条地震波产生 5 个加速度和 1 个应力值,形成 1 个样本,因此共有 340 个样本。340 个样本数据的统计数据如表 1 所示。

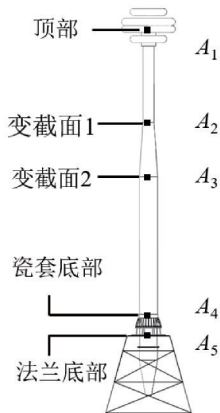


图 7 套管外侧所选加速度关键点

Fig. 7 Selected acceleration key points outside the bushing

表 1 地震响应样本的统计数据

Tab. 1 Statistics of samples of seismic responses

变量	单位	最大值	最小值	均值	标准差
$A_1$	$m/s^2$	47.92	5.26	16.13	6.81
$A_2$	$m/s^2$	30.13	1.38	9.19	4.84
$A_3$	$m/s^2$	21.76	1.71	7.25	3.37
$A_4$	$m/s^2$	5.36	3.12	3.83	0.36
$A_5$	$m/s^2$	4.19	3.81	3.94	0.04
$S$	MPa	42.73	1.31	12.45	7.12

### 2.3 机器学习算法选择

人工智能算法包括深度学习和机器学习算法,复杂网络学习可以用于预测地震响应历史时程,然而其训练和调整非常耗时,本研究仅关注应力响应的峰值,无需进行大量耗时网络训练及优化以获得整个响应时程,因此选择简单网络以及机器学习算法。为验证本文所提方法的通用性,选取 3 种不同的机器学习算法,包括多层感知机 (multi-layer perceptron, MLP),  $k$ -近邻回归 ( $k$ -nearest neighbor

regression, KNNR) 和决策树回归 (decision tree regression, DTR) 算法。

如图 8 所示,多层感知机是一种典型的神经网络模型,在本研究中为多输入单输出结构,为简化计算过程,只采用双隐藏层,各层神经元数量由群体智能演化技术搜索确定,权重参数由训练样本确定。KNNR 原理如图 9 所示,在特征空间中确定与待测样本最为相近的  $k$  个样本,计算此  $k$  个样本的实际结果的平均值,并以此平均值作为待测样本的输出,即估计值。图 10 展示了决策树回归算法的基本原理,对特征空间进行逐级最优划分,待测样本根据其特征判定属于某个子空间,并输出子空间的全部样本的结果均值,作为待测样本的估计值。

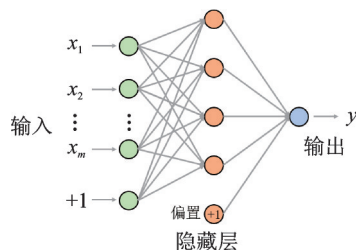


图 8 具有一个隐藏层的感知机

Fig. 8 MLP with one hidden layer

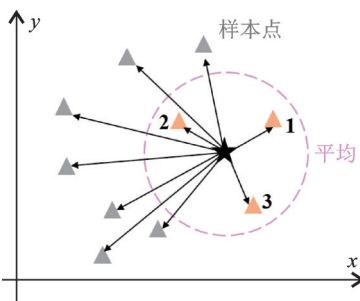


图 9  $k$  近邻回归 ( $k=3$ )

Fig. 9  $k$ -nearest neighbor regression ( $k=3$ )

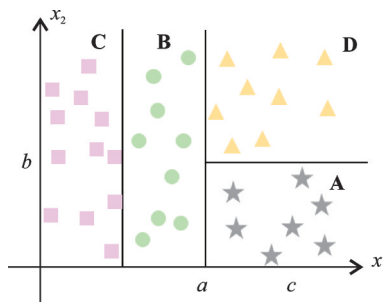


图 10 决策树回归

Fig. 10 Decision tree regression

### 2.4 群体智能演化方法选择

机器学习算法内部结构调整可采用人工调整或网格搜索法,然而此类方法非常耗时,计算工作量大。为此,采用群体演化技术更新结构内部构造,以提高性能函数值。本文采用粒子群算法 (particle

swarm optimization, PSO)进行案例分析,在某些复杂算法中可采用更新颖的演化算法。

粒子群算法由KENNEDY等<sup>[30]</sup>提出,可以模拟鸟群觅食过程。首先随机产生粒子群代表随机解(机器学习算法结构超参数),适应度为性能函数值。每个粒子包括两个特征:速度 $V$ 和位置 $X$ 。每次迭代中,粒子从当前位置根据速度和两个最优值(群体最优值 $gbest$ 和个体最优值 $pbest$ )进行移动。

$$V_{j+1} = \omega V_j + q_1 R_1 (pbest_j - X_j) + q_2 R_2 (gbest_j - X_j) \quad (1)$$

$$X_{j+1} = X_j + V_{j+1} \quad (2)$$

式中, $V_j$ 和 $X_j$ 为第 $j$ 次迭代后粒子的速度和位置; $V_{j+1}$ 和 $X_{j+1}$ 为第 $j+1$ 次迭代后粒子的速度和位置; $\omega$ 为惯性权重; $q_1$ 和 $q_2$ 为学习参数,一般均取2; $R_1$ 和 $R_2$ 为0~1的随机数。在具有足够迭代次数后,可以得到最优的性能函数值以及对应的结构超参数值。

## 2.5 模型性能指标

通过训练集训练后的模型具有评估能力,为评估模型准确性,选取以下指标作为衡量评估性能的指标:

(1)平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE):估计值和实际值相差越小,其值越小。

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \quad (3)$$

(2)Pearson相关系数 $R$ :一致性系数,即估计值

和实际值相差越小,其值越大,最大值为1。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \right)} \quad (4)$$

式中, $y_i, \hat{y}_i$ 为测试样本的真实值和估计值; $\bar{y}, \bar{\hat{y}}$ 为测试样本的真实值均值和估计值均值; $n$ 为测试样本个数。

## 2.6 评估模型的建立

为使评估模型具有更高的评估性能,需要构建性能评估函数。评估函数的建立根据5折交叉验证计算,即将训练样本分为5份,共进行5次训练和验证,每次选择其中4份作为训练集,剩余1份作为验证集,输出性能指标 $MAPE$ ,取5次 $MAPE$ 均值作为模型评估性能的值。本文考虑训练集的占比为70%,同时保证训练样本数为5的倍数以利于交叉验证,选取了240个样本作为训练集,剩余100样本用于测试。

结合PSO,整个评估模型建立过程如图11所示。在确定好机器学习算法类型后,根据算法结构超参数和 $MAPE$ 的关系建立性能评估函数。随机初始化粒子群,计算全部最优 $gbest$ ,进行逐次迭代,每次迭代中进行5折交叉验证,计算平均 $MAPE$ ,并以此更新粒子个体最优 $pbest$ 和全部最优 $gbest$ ,直到达到最大迭代次数。获得最优算法结构后,使用全部训练样本训练模型,并用测试集评价性能,最终构建最优的评估模型。

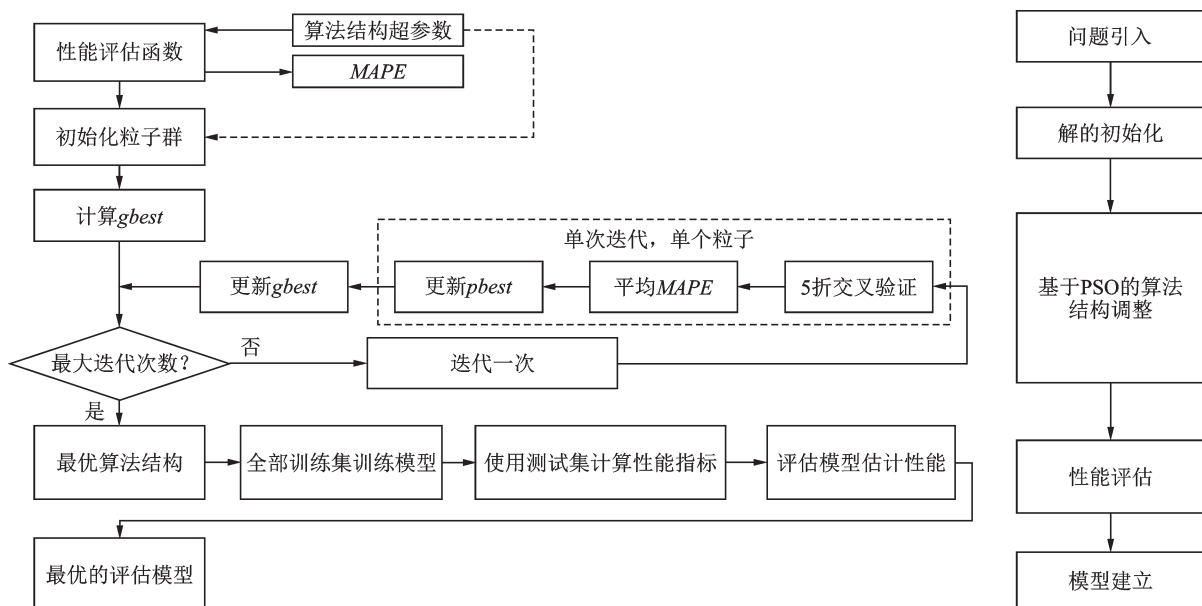


图 11 基于 PSO 的评估模型建立

Fig. 11 Evaluation model establishment based on PSO

对于本文选择的三种机器学习算法,为便于展示,选择各个算法的关键超参数如表2所示。MLP

使用双层隐藏层,超参数包括两层神经元的个数;KNNR主要超参数为近邻样本个数,在大型数据集

上逐个计算距离的方法效率低下,后续发明了各种基于树的数据结构,因此叶子大小在本文作为一种可调超参数;DTR 选取树的最大深度、节点划分最小样本数以及叶子最小样本数作为超参数。各个超参数的更为深入的含义详见文献[31]。

表 2 超参数搜索范围和结果

模型	超参数	搜索范围	搜索结果
MLP	第一层神经元数量	1~20	19
	第二层神经元数量	1~20	13
KNNR	近邻样本个数	1~50	2
	叶子大小	1~100	40
	树最大深度	1~20	11
DTR	划分最小样本数	1~10	7
	叶子最小样本数	1~10	2

超参数搜索中,惯性权重即粒子保持前一时间运动状态的能力,本文根据常用的 0.4~0.9 范围将其设置为 0.4<sup>[32]</sup>。粒子群粒子数量为 20,最大迭代次数确定为 300,后续结果证明迭代次数足够。其中,粒子的解为各个模型的超参数,粒子适应度值为性能函数值 MAPE,个体最优  $p_{best}$  为某个粒子在迭代过程中的最小 MAPE,全局最优  $g_{best}$  为全体所有粒子在迭代过程中的最小 MAPE。在优化前超参数选取为实数,应用至机器学习模型中时进行取整。三种算法的超参数搜索过程如图 12 所示。

由图 12 可以看出,在三种算法超参数搜索过程中,初始化时粒子在空间随机分布,随着迭代次数增加,粒子逐渐移动并集中到某一区域或某一点,当达

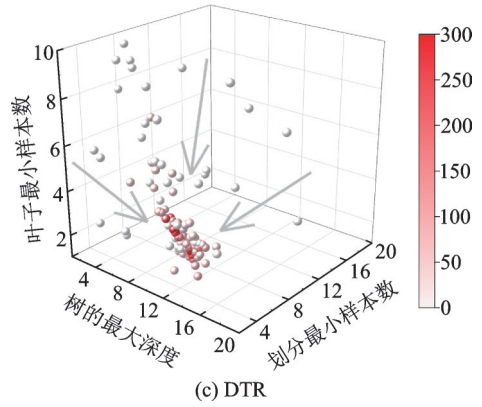


图 12 超参数搜索过程

Fig. 12 Search process for hyperparameters

到最大迭代次数后,粒子位置稳定。图 13 展示了搜索过程三种算法的 MAPE 变化过程,可见在迭代次数到达 125 时 MAPE 已达到稳定,因此 300 次的迭代次数满足要求。取 300 次迭代后的最优结果作为三个模型的最优超参数并进行训练,获得最终的评估模型。

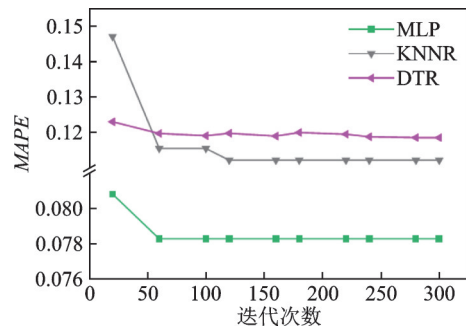


图 13 搜索过程平均 MAPE 变化

Fig. 13 Average MAPE change in search process

### 2.7 评估模型的性能分析

使用全部 240 个训练样本对模型进行训练后,采用剩余 100 个测试样本对模型进行评价,并计算其性能指标,结果如图 14 所示。从数据分布看,三种模型输出结果与真实值(前述仿真模型计算所得数据)整体相近,均在图对角线附近,反映了三种评估模型的评估准确性,能够替代仿真模型进行地震下的应力响应估计。从性能指标来看,相关系数  $R$  均已经达到 0.98 以上,接近 1,说明评估模型整体

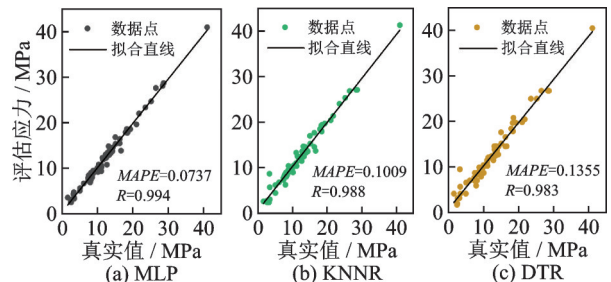
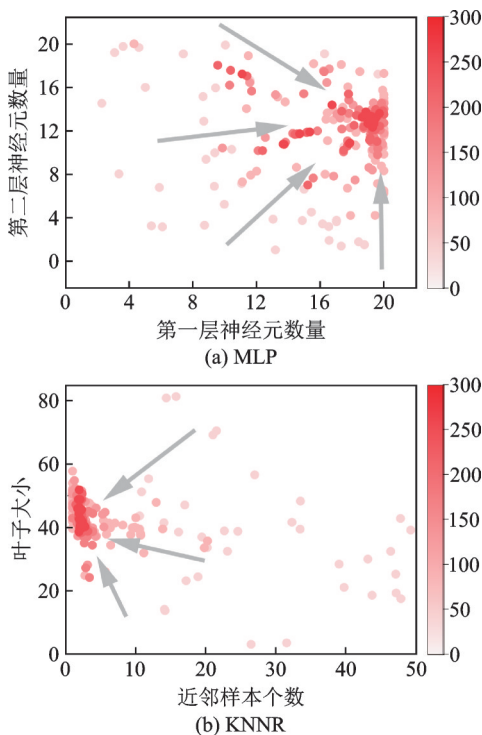


图 14 模型评估值和真实值比较

Fig. 14 Comparison of evaluated stresses and actual values

上能够较好地反映仿真模型的动力性能,其评估数据与仿真结果一致性较高。从数据点分布和性能指标方面均能看出三种评估模型具有良好的评估性能。

### 3 评估模型的实验和理论验证

针对第2节融合粒子群搜索算法和机器学习算法而形成的三种评估模型,通过测试集验证了其准确性,证明所形成的评估模型能够代替仿真模型在震后快速提供应力响应。然而,测试样本仍然来源于仿真模型,评估模型与实际套管样品的抗震性能之间的符合程度需进一步验证。为此,进行了振动台实验和理论分析,分别验证所形成的评估模型的准确性。

#### 3.1 振动台实验验证

本次振动台实验在同济大学多功能振动实验中心进行,模型如图5所示。实验前将底部支架固定在振动台台面,沿着套管轴向各个关键点布置加速度传感器,并在瓷套根部四周布置应变片,如图15所示。

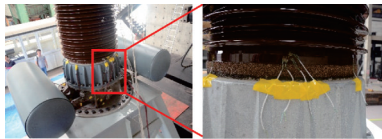


图 15 套管传感器布置

Fig. 15 Sensor installation on the root of the bushing

实验地震波为满足场地要求的人工波,为单向加载,地震波时程如图16所示。实验工况列于表3,人工波工况为TS2,在进行人工波加载前后(TS1和TS3工况),对套管模型进行白噪声扫频,以探测人工波工况后是否存在明显损伤。

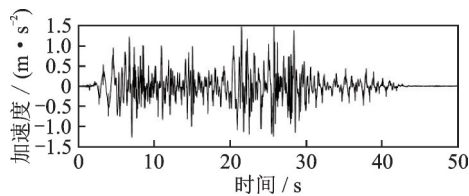


图 16 实验用人工地震波

Fig. 16 Used artificial ground motion in tests

表 3 振动台实验工况

Tab. 3 Test scenarios of the shaking table tests

工况	地震波	目标PGA/g	实测PGA/g
TS1	白噪声	0.075	0.104
TS2	人工波	0.150	0.133
TS3	白噪声	0.075	0.104

实验前后的白噪声扫频结果证明套管结构在TS2人工波加载后并未出现基频和阻尼比明显下降情况,结构未出现明显损坏。在本实验中,加速度传感器的布置与第1节评估模型中使用的加速度测点一致。

在工况TS2中,5个加速度测点( $A_1 \sim A_5$ )测得的响应峰值分别为7.076、3.807、3.269、2.022和1.614  $m/s^2$ ,将其输入第2节所建立的三个评估模型可以得到根部应力评估值如表4所示。TS2实验中,根部应变片所测最大应变为51.89  $\mu\epsilon$ ,考虑厂家所给该陶瓷材料弹性模量为106 GPa,计算得到根部应力峰值为5.50 MPa。通过对比发现,三个评估模型的结果与实验结果接近,KNNR模型误差最小,为3.04%,DTR模型误差最大,为6.90%。三个模型结果整体与实验模型之间的最大误差为6.90%,说明融合PSO的机器学习算法评估模型能够有效估计真实套管根部应力峰值。

表 4 评估模型结果与实验结果对比

Tab. 4 Comparison of evaluation models and experimental result

评估模型	评估值/MPa	实验结果/MPa	误差/%
MLP	5.22	5.50	5.09
KNNR	5.33		3.04
DTR	5.12		6.90
平均	5.22		5.09

#### 3.2 理论分析验证

对于一般瓷柱型电气设备,可采用分布参数体系构建其简化理论模型。如图17所示,一般瓷柱型设备可简化为两段分布式悬臂梁,支架和瓷质绝缘子各一段,分别具有不同的尺寸、刚度和分布质量。两段连接位置一般采用法兰连接,法兰板和支架使用螺栓进行紧固,可近似为刚性连接。

对于本研究的1100 kV变压器套管-支架体系,其中套管为变截面,因此将体系简化为3段分布式悬臂梁,支架一段,上部瓷质套管分为两段。每段分布梁包括三个主要参数:长度 $L$ ,分布质量 $\bar{m}$ ,以及抗弯刚度 $EI$ 。根据实际套管的尺寸和等效质量,各段分布参数标示于图17中,单位为国际单位。

对于一段具有均匀分布质量和刚度的梁,其无阻尼自由振动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

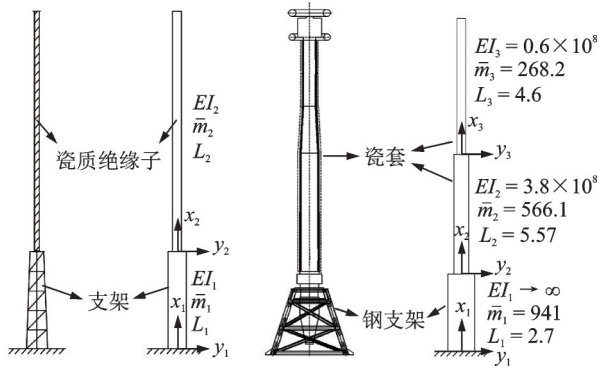


图17 典型瓷柱型设备和套管-支架体系简化模型

Fig. 17 Simplified models of typical porcelain cylindrical equipment and bushing-support system

式中,  $v(x, t)$  为侧向位移, 通过变量分离, 可表示为:

$$v(x, t) = \phi(x)Y(t) \quad (6)$$

式中,  $\phi(x)$  为形函数;  $Y(t)$  为广义坐标。将式(6)代入式(5), 并将一段梁分割为多段, 则可得到第  $i$  段形函数为:

$$\phi_i(x) = A_{i1} \cos(a_i x) + A_{i2} \sin(a_i x) + A_{i3} \cosh(a_i x) + A_{i4} \sinh(a_i x) \quad (7)$$

式中,

$$a_i = \sqrt{\frac{\omega^2 \bar{m}_i}{E_i I_i}} \quad (8)$$

不失一般性, 定义:

$$\phi_0(x) = 0 \quad (9)$$

对式(7)求导, 可得:

$$\phi_i'(x) = a_i [-A_{i1} \sin(a_i x) + A_{i2} \cos(a_i x) + A_{i3} \sinh(a_i x) + A_{i4} \cosh(a_i x)] \quad (10)$$

自由端的弯矩和剪力为0, 由此可计算其系数矩阵如下:

$$W_4 = \begin{bmatrix} -\cos(a_3 L_3) & -\sin(a_3 L_3) & \cosh(a_3 L_3) & \sinh(a_3 L_3) \\ \sin(a_3 L_3) & -\cos(a_3 L_3) & \sinh(a_3 L_3) & \cosh(a_3 L_3) \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(19)和(20)中,

$$\begin{cases} c_i = a_{i+1}/a_i \\ d_i = E_i I_i a_i^2 / (E_{i+1} I_{i+1} a_{i+1}^2) \\ e_i = E_i I_i a_i^3 / (E_{i+1} I_{i+1} a_{i+1}^3) \end{cases} \quad (21)$$

式(13)中  $A$  为非零矩阵, 因此  $W$  行列式需要为0, 进一步可以计算结构振动频率和模态。据此, 可以计算分布体系的广义质量、刚度和阻尼, 利用正交性解耦, 可得到最终的振动方程:

$$\phi_i''(x_i) = a_i^2 [-A_{i1} \cos(a_i x) - A_{i2} \sin(a_i x) + A_{i3} \cosh(a_i x) + A_{i4} \sinh(a_i x)] \quad (11)$$

$$\phi_i'''(x_i) = a_i^3 [-A_{i1} \sin(a_i x) - A_{i2} \cos(a_i x) + A_{i3} \sinh(a_i x) + A_{i4} \cosh(a_i x)] \quad (12)$$

式(7)及(10)~(12)中  $a_i$  与结构振动圆频率  $\omega$  相关;  $A_{i1} \sim A_{i4}$  决定结构模态形状和幅值, 由边界条件确定。本研究中套管-支架体系的简化三段分布梁的特征方程可表示为:

$$W \cdot A = 0 \quad (13)$$

式中,

$$A = (A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{21} A_{22} A_{23} A_{24} A_{31} A_{32} A_{33} A_{34})^T \quad (14)$$

$$W = (W_1 W_2 W_3 W_4)^T \quad (15)$$

本套管-支架体系的简化模型中, 自下而上具有一个固定端、两个刚性节点和一个顶部自由端。对固定端, 由于其位移和转角均为0, 则边界条件:

$$\phi_i(0) = 0, \quad \phi_i'(0) = 0 \quad (16)$$

根据式(7), (10)和(16), 可以得到固定端系数矩阵:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

刚性节点的连接条件为:

$$\begin{cases} \phi_i(L_i) = \phi_{i+1}(0) \\ \phi_i'(L_i) = \phi_{i+1}'(0) \\ E_i I_i \phi_i''(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} \phi_{i+1}''(0) \\ E_i I_i \phi_i'''(L_i) = E_{i+1} I_{i+1} \phi_{i+1}'''(0) \end{cases} \quad (18)$$

与前述计算方法相同, 可以得到刚性节点的系数矩阵:

$$W_2 = W_3 = \begin{bmatrix} \cos(a_2 L_2) & \sin(a_2 L_2) & \cosh(a_2 L_2) & \sinh(a_2 L_2) & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -\sin(a_2 L_2) & \cos(a_2 L_2) & \sinh(a_2 L_2) & \cosh(a_2 L_2) & 0 & -c_2 & 0 & -c_2 \\ -\cos(a_2 L_2) & -\sin(a_2 L_2) & \cosh(a_2 L_2) & \sinh(a_2 L_2) & d_1 & 0 & -d_1 & 0 \\ \sin(a_2 L_2) & -\cos(a_2 L_2) & \sinh(a_2 L_2) & \cosh(a_2 L_2) & 0 & e_2 & 0 & -e_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\ddot{Y}_j(t) + 2\zeta_j \omega_j \dot{Y}_j(t) + \omega_j^2 Y_j(t) = -\gamma_j \ddot{x}_g \quad (22)$$

式中,  $Y_j(t)$  和  $\gamma_j$  分别为第  $j$  阶模态幅值函数和振型参与系数;  $\ddot{x}_g$  为地震动输入;  $\zeta_j$  为第  $j$  阶阻尼比, 可通过下式计算:

$$\zeta_j = \frac{\alpha + \beta \omega_i^2}{2\omega_i} \quad (23)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  为 Rayleigh 阻尼系数。

向理论模型底部输入实验所用人工地震波, 可以得到理论模型各段加速度响应时程, 因此, 根部截面边缘弯矩响应可由惯性力计算:

$$M(t) = \int \bar{m}_i (x_i - x_{\text{root}}) acc_i(t) dx \quad (24)$$

式中,  $x_i$  和  $x_{\text{root}}$  分别表示第  $i$  个单元和根部的几何位置;  $acc_i(t)$  表示第  $i$  个单元在  $t$  时刻的加速度。通过

上式,可计算得到根部最大弯矩为 61.837 kN·m。

套管根部截面为外径 640 mm,内径 550 mm 的圆环,据此可计算得到最大应力为 5.268 MPa。对理论模型分析结果与第 2 节建立的三个评估模型结果进行比较,如表 5 所示。其中,最低误差为 0.91%,最高误差仅为 2.81%,验证了所建立的评估模型评估应力响应的有效性和可靠性。

表 5 评估模型结果与理论结果对比

Tab. 5 Comparison of evaluation models and theoretical result

评估模型	评估值/MPa	理论结果/MPa	误差/%
MLP	5.22		0.91
KNNR	5.33	5.27	1.18
DTR	5.12		2.81
平均	5.22		0.91

综上所述,采用三种机器学习算法建立评估模型并采用粒子群算法搜索优化后,评估模型在测试样本测试下展示出良好的评估效果, $R$ 值均在 0.98 以上。振动台实验和分布参数体系理论模型均验证了三种评估模型的准确性,其中评估结果与振动台实验结果最小误差为 3.04%,与理论模型结果最小误差为 0.91%。因此,震后性能评估模型同时保持了评估准确性和快速性,更适合于针对瓷柱型设备的震后评估和检修工作。

## 4 结 论

(1)震前融合机器学习算法和群体演化技术构建评估模型,通过仿真模型的大量地震响应数据可以赋予评估模型良好的震后评估能力。

(2)粒子群算法可以自动优化和调整机器学习评估模型的内部结构,提升评估性能。

(3)振动台实验和分布参数体系理论模型验证了针对套管-支架体系的震后评估模型,证明了所提震后评估方法的准确性。

(4)震后性能评估模型同时保证了评估准确性和快速性,相比于仿真计算和理论模型,更适合于针对瓷柱型设备的震后评估和检修工作。

### 参考文献:

[1] LAU D L, TANG A K, PIERRE J R. Performance of lifelines during the 1994 Northridge earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 438-451.

[2] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会. 阪神淡路大震災調査報告共通編 3: 都市安全システムの機能と体制[M]. 名古屋: 日本丸善株式会社, 1998.

[3] 于永清, 李光范, 李鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 5-10.  
YU Yongqing, LI Guangfan, LI Peng, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by Wenchuan earthquake[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 5-10.

[4] 程永锋, 朱全军, 卢智成. 变电站电力设施抗震措施研究现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 84-89.  
CHENG Yongfeng, ZHU Quanjun, LU Zhicheng. Progress and development trend on seismic measures of electric power equipment in transformer substation[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 84-89.

[5] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131.  
XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and counter measures[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131.

[6] BAI W, MOUSTAFAMA A, DAI J. Seismic response of potential transformers and mitigation using innovative multiple tuned mass dampers[J]. Engineering Structures, 2018, 174: 67-80.

[7] 曹枚根, 周福霖, 谭平, 等. 大型电力变压器及套管振动台抗震试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 122-129.  
CAO Meigen, ZHOU Fulin, TAN Ping, et al. Shaking table test on seismic performance of large power transformer with bushings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 122-129.

[8] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 1100 kV 复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3224-3230.  
SUN Yuhang, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Study on earthquake simulation shaking table test of 1100 kV composite external insulation bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3224-3230.

[9] 何畅, 何紫薇, 江力强, 等. 多重不确定性对特高压变压器瓷套管地震失效风险的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5763-5775.  
HE Chang, HE Ziwei, JIANG Liqiang, et al. Effects of different sorts of uncertainties on seismic failure risk of Ultra-High-Voltage porcelain transformer bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5763-5775.

[10] 柏文, 唐柏赞, 戴君武, 等. 考虑地震和材料强度不确定性的瓷柱型电气设备易损性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2594-2605.  
BAI Wen, TANG Baizan, DAI Junwu, et al. Fragility analysis of porcelain cylindrical electrical equipment considering material strength and seismic uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2594-2605.

[11] ZHU W, XIE Q, LIU X. Seismic failure risk analysis of  $\pm 800$  kV coupling filter circuit considering material

- strength deviation[J]. Structures, 2023, 47: 1566-1578.
- [12] 柏文,戴君武,宁晓晴,等.考虑地震作用的互联高压电气设备软母线松弛度研究[J].中国电机工程学报, 2018, 38(3): 927-936.  
BAI Wen, DAI Junwu, NING Xiaoqing, et al. Study on required flexible conductor slack of connecting High-Voltage electrical equipment under earthquakes [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 927-936.
- [13] SINGH S, GUPTA A. Understanding the seismic response of electrical equipment subjected to high-frequency ground motions[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 140: 103915.
- [14] CHENG Y, LI S, LU Z, et al. Seismic risk mitigation of cylindrical electrical equipment with a novel isolation device[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 111: 41-52.
- [15] LIANG H, BLAGOJEVIĆ N, XIE Q, et al. Seismic resilience assessment and improvement framework for electrical substations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2023, 52(4): 1040-1058.
- [16] BELLORINI S, SALVETTI M, BETTINALI F, et al. Seismic qualification of transformer high voltage bushings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1208-1213.
- [17] GILANI A S, WHITTAKER A S, FENVES G L. Seismic evaluation and retrofit of 230 kV porcelain transformer bushings[J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(4): 597-616.
- [18] GILANI A S, WHITTAKER A S, FENVES G L, et al. Seismic evaluation of 196 kV porcelain transformer bushing[R]. Richmond: PEER, 1999.
- [19] GILANI A S, WHITTAKER A S, FENVES G L, et al. Seismic evaluation of 550 kV porcelain transformer bushings[R]. Richmond: PEER, 1999.
- [20] 谢强,朱瑞元,周勇,等.220kV 隔离开关地震模拟振动台试验[J].电网技术, 2012, 36(9): 262-267.  
XIE Qiang, ZHU Ruiyuan, ZHOU Yong, et al. Shake table test on 220 kV disconnecting switch[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 262-267.
- [21] 文嘉意,谢强,胡蓉,等.±800 kV 隔离开关地震模拟振动台试验研究[J].南方电网技术, 2018, 12(1): 14-20.  
WEN Jiayi, XIE Qiang, HU Rong, et al. Research of seismic simulation test on shaking table of ±800 kV disconnect switch[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 14-20.
- [22] HE C, XIE Q, ZHOU Y. Influence of flange on seismic performance of 1100 kV UHV transformer bushing [J]. Earthquake Spectra, 2019, 35(1): 447-469.
- [23] ALESSANDRI S, GIANNINI R, PAOLACCI F, et al. Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 1: preliminary tests and analyses[J]. Engineering Structures, 2015, 98: 251-262.
- [24] ALESSANDRI S, GIANNINI R, PAOLACCI F, et al. Seismic retrofitting of an HV circuit breaker using base isolation with wire ropes. Part 2: shaking-table test validation[J]. Engineering Structures, 2015, 98: 263-274.
- [25] 柏文,戴君武,周惠蒙,等.瓷柱型电气设备 MTMD 减震方法试验研究[J].高电压技术, 2018, 44(3): 841-848.  
BAI Wen, DAI Junwu, ZHOU Huimeng, et al. Application of multiple tuned mass dampers on seismic protection of porcelain cylindrical electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 841-848.
- [26] 柏文,戴君武,杨永强.瓷柱型电气设备基于 BI-TMD 的混合控制减震研究[J].中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3939-3947.  
BAI Wen, DAI Junwu, YANG Yongqiang. Effectiveness study of combined control strategy based on base isolation and tuned mass damper on porcelain cylindrical equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3939-3947.
- [27] HOSEINIAN F S, FARADONBEH R S, ABDOLLAHZADEH A, et al. Semi-autogenous mill power model development using gene expression programming [J]. Powder Technology, 2017, 308: 61-69.
- [28] OREJARENA L, FALL M. The use of artificial neural networks to predict the effect of sulphate attack on the strength of cemented paste backfill [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69(4): 659-670.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部.电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].北京:中国建筑工业出版社, 2013.  
MOHURD. Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [30] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95- International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia, 1995: 1942-1948.
- [31] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社, 2016.  
ZHOU Zhihua. Machine Learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [32] BANSAL J C, SINGH P K, SARASWAT M, et al. Inertia weight strategies in particle swarm optimization [C]//2011 Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing. Salamanca, Spain, 2011: 633-640.

第一作者:朱 旺(1996—),男,博士研究生。

E-mail: zhuwang@tongji.edu.cn

通信作者:谢 强(1971—),男,博士,教授。

E-mail: qxie@tongji.edu.cn