

基于频率响应信号 PCA 的陶瓷绝缘子缺陷检测

佟芳, 林鑫, 王婷, 徐铁军, 王忠花

(国网青海省电力公司信息通信公司, 西宁 810000)

摘要: 为了对陶瓷绝缘子缺陷进行检测, 利用频率响应分析法 (FRA) 识别陶瓷绝缘子主要固有模式的峰值范围, 运用时间频域特征提取的主成分分析 (PCA) 对陶瓷绝缘子进行缺陷检测; 通过选取安装在 500 kV 输电塔上材质为方石英和氧化铝的 67 个陶瓷绝缘子样本, 研究了瓷体、瓷帽和内部三种典型的陶瓷绝缘子缺陷类型; 通过 PCA 对时间数据和频率响应数据提取特征进行分析, 实现了对完好、瓷体缺陷、瓷帽缺陷、内部缺陷和材质的区分问题; 实验结果表明: 内部缺陷表现为固有模式的消失或新模式的产生, 基于时间数据的 PCA 对数据方差贡献最大的向量达到 99.74%, 可以区分瓷体缺陷和材质; 基于频率响应数据的 PCA 对数据方差贡献最大的向量达到 96.70%, 可实现陶瓷绝缘子内部缺陷检测。

关键词: 陶瓷绝缘子; 频率响应分析; 特征提取; 主成分分析; 缺陷检测

Defect Detection of Ceramic Insulator Based on PCA of Frequency Response Signal

TONG Fang, LIN Xin, WANG Ting, XU Tiejun, WANG Zhonghua

(State Grid Qinghai Information & Telecommunication Company, Xining 810000, China)

Abstract: In order to detect the defects of ceramic insulator, frequency response analysis (FRA) is used to identify the peak range of main natural modes of ceramic insulator, and principal component analysis (PCA) based on time-frequency feature extraction is used to detect the defects of ceramic insulator. By selecting 67 samples of ceramic insulators made of cristobalite and alumina installed on 500 kV transmission towers, three typical types of ceramic insulator defects, namely porcelain body, porcelain cap and interior, were studied. PCA was used to analyze the extracted features of the time data and frequency response data, and realized the distinguish problems of integrity, porcelain body defects, porcelain cap defects, internal defects and materials. The experimental results show that the internal defects are manifested by the disappearance of natural modes or the generation of new modes. The vector with the largest contribution of PCA based on the time data to the data variance reaches 99.74%, which can distinguish the defects and materials of porcelain body; PCA based on frequency response data has the largest contribution to the data variance vector of 96.70%, which can realize the internal defect detection of ceramic insulator.

Keywords: ceramic insulator; frequency response analysis; feature extraction; principal component analysis; defect detection

0 引言

随着现代工业发展对电力需求的不断增加, 高压输电线路需要输送大量的电力, 这就对输电线路的绝缘水平提出了更高的要求^[1]。尽管复合材料绝缘子的技术不断发展, 但在实际工况中, 陶瓷绝缘子仍在我国大量用于高压输电线路中^[2]。陶瓷绝缘子是特高压输电中用于机械固定和电气隔离输电线路的装置^[3], 在确保输电线路的可靠性以及输电塔和输电线路之间提供绝缘间隔方面发挥着重要作用。

通常, 绝缘子受损主要是从电气角度进行研究。文献^[4]通过连续施加高压来测试绝缘子串中的每个绝缘子阻值, 从而实现绝缘电阻测量。文献^[5]采用基于电场测量原理, 当绝缘子发生电气故障或绝缘容量较低时, 周围电场沿绝缘子的轴向和径向分布产生畸变, 然后检测电场状

况并与无故障标准电场进行比较。如果没有差异, 则判断绝缘子正常; 否则, 视为绝缘子具有缺陷。然而, 简单的电气分析难以测量机械条件下的绝缘子受损情况。为了检测绝缘子的机械缺陷, 可通过接触式超声波探头的超声波法^[6]、非接触式麦克风的噪声测量法^[7]和红外相机的温度测量法^[8]等技术对故障状态进行分类。文献^[9]通过 X 光扫描系统对复合绝缘子缺陷实现了带电检测, 但未能实现对陶瓷绝缘子的内部缺陷检测。文献^[10]使用计算机断层扫描 (CT) 对陶瓷绝缘子内部的细微缺陷实现高精度地检测, 然而扫描整个陶瓷绝缘子表面耗时且成本较高。文献^[11]利用磁共振成像 (MRI) 可高精度检测绝缘子内部的小损伤, 但磁共振容易导致绝缘子内部因细微损伤而爆炸且具有较高的实验风险。因此, 上述方法仅在特定条件下

收稿日期: 2022-08-17; 修回日期: 2022-09-19。

作者简介: 佟芳 (1986-), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事人工智能技术和信息系统运维检修方向的研究。

引用格式: 佟芳, 林鑫, 王婷, 等. 基于频率响应信号 PCA 的陶瓷绝缘子缺陷检测[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 78-84.

具有较高的可靠性, 并且由于环境条件和试验设备的差异, 缺陷检测结果可能存在较大的偏差。随着无人机 (UAV) 技术和图像识别技术的不断发展, 为了降低巡检人员高空作业的人身安全风险, 弥补传统工作方式的不足。文献 [12] 利用 UAV 巡检航拍采集绝缘子图像, 结合图像处理技术检测绝缘子外观缺陷, 然而, 该方法不可避免地受到天气、光照和湿度等环境条件的显著影响, 且仅适用于绝缘子外观缺陷检测。

频率响应函数 (FRF) 方法可对机械固件进行测量, 并减少测量过程中周围环境因素的影响^[13]。频率响应分析 (FRA) 是计算在稳态激励下的结构动力响应方法, 通过在频域中明确定义激励载荷且已知每个指定频率条件下的所有的外力。在机械领域, FRA 主要用于分析机械共振频率^[14]; 在电力领域, FRA 主要用于诊断电力变压器绕组内部异常和铁芯接地故障^[15]; 文献 [16] 设计了基于模型—数据融合驱动的频率响应分析方法, 结合粒子群算法优化参数后的极限学习机模型作为数据驱动的频率修正模型, 在保证计算速度的前提下大幅提高计算精度。然而, 传统的 FRA 在陶瓷绝缘子缺陷检测时涉及大量数据, 因此, 在保留主要特征的同时还应减少数据量。主成分分析 (PCA) 作为数据降维的常用方法, 在保留主要数据特征的情况下可有效降低数据量。文献 [17] 采用 FRA 对电线杆的单频应力波提取信号特征, 并结合 PCA 保留了信号的主要特征, 因此, 将 PCA 运用在信号处理中可减少信号模型对样本数据的依赖程度, 并提高模型的泛化能力。

本文采用 FRF 方法对陶瓷绝缘子缺陷进行检测, 并将测量中周围环境的影响降至最低。运用 PCA 研究瓷体、瓷帽和内部三种典型的陶瓷绝缘子缺陷类型, 提出了基于频率响应信号的 FRA 和 PCA 方法, 并从基于时间数据和基于频率响应数据两个角度的 PCA 来区分完好、瓷体缺陷、瓷帽缺陷、内部缺陷和材质, 从而对绝缘子缺陷分类进行检测。

1 研究框架及测试样本

1.1 检测方法

为了通过实验计算 FRF, 必须测量冲击和响应能量的实验值。陶瓷绝缘子的 FRF 测量实验装置, 如图 1 所示。

利用冲击锤的灵敏度为 1 mV/N, 以 0.5 磅冲击力连续撞击绝缘子, 从而产生振动信号。将振动传感器 (TM0782A) 的振动探头分别放置于瓷体和瓷帽, 用于接收冲击锤对陶瓷绝缘子振动后的绝对振动位移波形。使用 NI LabVIEW SignalExpress 测量程序^[22]以 500 ks/s 的采样速率存储数据。由于存储的数据是时域中的值, 因此使用 Matlab 信号处理工具箱将其转换为频域。

1.2 研究框架

为了利用 FRF 方法对陶瓷绝缘子缺陷进行检测, 根据绝缘子的缺陷类型分析其固有频率和 FRF 波形。本文提出的基于实验装置测试陶瓷绝缘子缺陷的研究框架, 如图 2

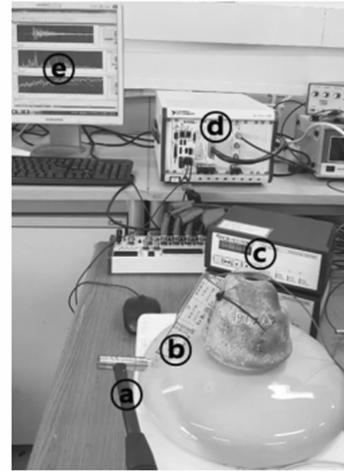


图 1 陶瓷绝缘子的 FRF 测量实验装置

(a) 冲击锤 (PCB 086C03) 测量样本的冲击能量; (b) 加速度计 (PCB 208C05) 测量样本的响应能量; (c) 信号调节器 (PCB 482C16) 用于动能数据转化为信号数据; (d) 数据采集器 (DAQ) (NIPxle-6366) 用于从测试样本中收集数据; (e) 显示器用于数据可视化。

所示。

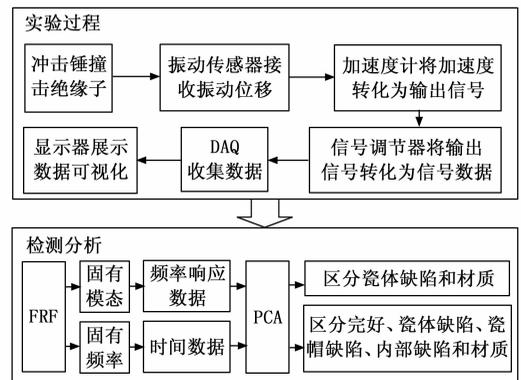


图 2 研究框架

1.3 测试样本

本文所用陶瓷绝缘子的主要材料是方石英和氧化铝, 目的是确定方石英材料陶瓷绝缘子的缺陷类型, 选用氧化铝绝缘子作为对比样本, 确保方石英与材质之间的可分性。选取安装在 500 kV 输电塔上的 67 个样本: 47 个方石英, 20 个氧化铝。此外, 为了研究缺陷, 完好样本 57 个, 瓷体缺陷 4 个, 瓷帽缺陷 3 个, 内部缺陷 3 个, 如表 1 所示。

表 1 根据材质和缺陷对测试样本进行分类

类别	方石英	氧化铝	总和
测试样本	47	20	67
完好样本	37	20	57
缺陷样本	瓷体	—	4
	瓷帽	—	3
	内部	—	3

瓷体缺陷是由闪电而产生放射状裂纹，瓷帽缺陷则是由载荷突然增加导致支架损坏^[18]。内部缺陷通过传统肉眼观察无法确认，在绝缘子制造过程可能由高应力而产生裂纹，或使用过程中因过电压而产生缺陷^[19]。

2 频率响应信号主成分分析

2.1 频率响应函数 (FRF)

由于陶瓷绝缘子样本包含陶瓷和结合剂两种材质，各种变量很难验证陶瓷和接合剂的性能，直接运用陶瓷材质的验证理论 FRF 分析陶瓷绝缘子存在局限性^[20]。因此，本文利用实验数据计算 FRF 为：

$$FRF = \frac{P_{xy}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (1)$$

其中： $P_{xx}(f)$ 为冲击锤测量的信号功率谱密度， $P_{xy}(f)$ 为加速度计测量的信号交叉功率谱密度。

2.2 主成分分析 (PCA)

PCA 在分析两组变量之间的相关性时，决定原始 n 个变量变化较低的自变量（分量）^[21]。PCA 作为线性变换将数据转换为新的坐标系。新变量集合是原始变量的线性函数且不存在相关性，通过获得整个数据集的协方差矩阵并计算其特征向量和特征值来实现，再根据特征值的递减进行排序。

通过提取特征进行协方差矩阵计算 PCA 时，假设特征数据矩阵 ($\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$) 共有 N 个样本，并且 x_i 表示第 i 个样本，计算所有样本的平均值为：

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

通过从所有样本中减去平均值计算偏差：

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\} = \sum_{i=1}^N x_i - \mu \quad (3)$$

协方差矩阵为：

$$\Sigma = \frac{1}{N-1} D \cdot D^T \quad (4)$$

计算协方差矩阵 (Σ) 的特征向量 (\mathbf{V}) 和特征值 (λ)，根据特征值对特征向量进行排序。选择特征值最大的特征向量 $\mathbf{W} = \{v_1, \dots, v_k\}$ ，利用选定的特征向量 (\mathbf{W}) 可以表示 PCA 的投影空间。通过如下公式将所有样本投影到 PCA (\mathbf{V}) 的低维空间：

$$Y = \mathbf{W}^T \cdot D \quad (5)$$

3 实验分析

3.1 基准实验

为了选择能够掌握陶瓷绝缘子动态特性的冲击锤和传感器位置，本文设置了 4 个实验类型，如表 2 所示。根据冲击锤和传感器位置计算 FRF 结果，如图 3 所示。结果可见，从类型 2 获得的固有模式最明显，5 次实验得到的平均值也最为一致。

为了确保数据的可靠性，在陶瓷部件中安装了加速度计，如类型 2 所示，在同一位置，用冲击锤敲击陶瓷部件

表 2 根据冲击锤和传感器位置确定类型

类型	冲击锤位置	传感器位置
类型 1	瓷体	瓷帽
类型 2	瓷体	瓷体
类型 3	瓷帽	瓷帽
类型 4	瓷帽	瓷体

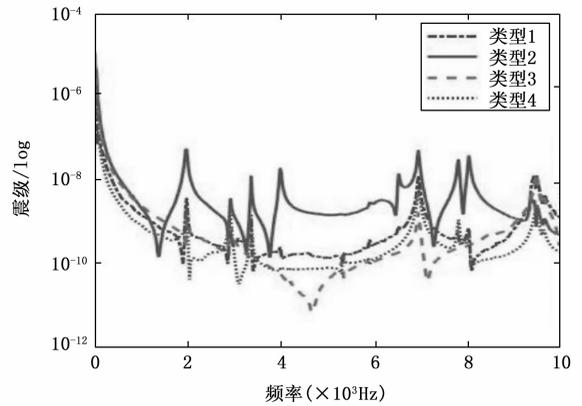


图 3 根据冲击锤和传感器位置计算 FRF 结果

的侧面五次，实验值和平均值的 FRF 结果，如图 4 所示。

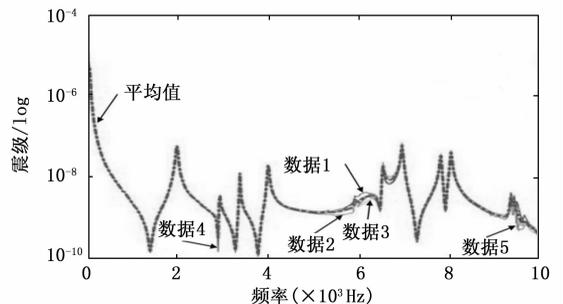


图 4 五次实验值和平均值的 FRF 结果

在频率小于 5 kHz 时，五次实验值和平均值一致。当频率大于 5 kHz 时，固有频率相同，但各固有模式之间的波形不同。这是由于固有模式是结构系统的固有振动特性，而固有频率仅与材质、质量和形状等固有特性有关，即便采用相同的固有频率，但不同的实验产生的固有模式略有不同。

在验证实验结果的一致性后，还需对完好绝缘子的频率响应进行分析。由于 500 kV 输电线路中使用的陶瓷绝缘子是由方石英和氧化铝材质组合而成，因此，还需进行基本分析以区分这两种材质。对于完好陶瓷绝缘子，不同材质绝缘子的固有频率，如图 5 所示。

在第一种模式中，氧化铝的频率比方石英高出约 100 Hz；在随后的模式中，频率差值逐渐增大。因此，这两种材质可以根据固有模式之间的频率位置差异来区分。

陶瓷绝缘子在制造过程中要经过几道手工工序，这也会带来不确定性。因此，样本固有频率可能会发生变化。

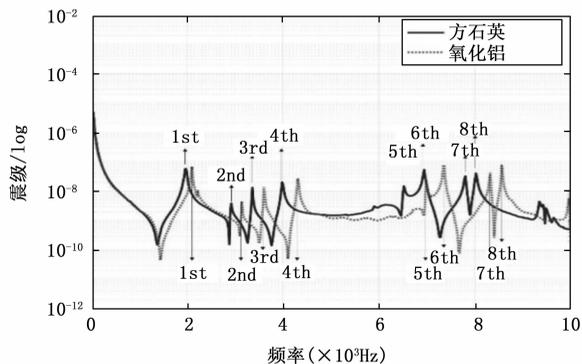


图 5 不同材质绝缘子的固有频率

在测量完好陶瓷绝缘子的固有模态频率范围, 并将其与具有缺陷的绝缘子固有模态频率范围进行比较之前, 还需进行实验来设定其固有频率范围。

选取 15 个完好的方石英和氧化铝绝缘子固有模态 (模态 1—4) 的峰值表现出频率的最小值、最大值、平均值和标准差, 如表 3 所示。可以观察到, 完好绝缘子之间存在固有频率差值。对于方石英, 最小和最大差值分别为 100 Hz 和 190 Hz; 对于氧化铝, 最小和最大差值分别为 80 Hz 和 140 Hz。同理, 在固有模态 5—8 中也可观察到类似差异。

表 3 根据材质不同的固有频率范围

模态	方石英			
	频率最小值	频率最大值	频率平均值	标准差
1	1 920	2 040	1 986	28.0
2	2 280	3 000	2 937	31.7
3	3 360	3 460	3 408	32.5
4	3 940	4 100	4 022	43.1

模态	氧化铝			
	频率最小值	频率最大值	频率平均值	标准差
1	2 100	2 180	2 141	22.5
2	2 040	3 140	3 098	24.7
3	3 580	3 660	3 616	20.9
4	5 280	4 420	4 350	38.6

3.2 频率响应分析结果

对受损方石英样本进行频率响应分析, 以此区分正常样本和缺陷样本。在绝缘子受损的情况下, 固有模态的频率可能会因内部空洞的变化、表面的不粘附或陶瓷裂纹而发生变化, 响应能量的大小可能会因为衰减的变化而改变, 根据缺陷类型对样本进行分析。

完好和缺陷陶瓷绝缘子的频率响应图, 如图 6 所示。具有缺陷及裂纹的陶瓷样本频率响应与完好陶瓷样本的频率响应有显著差异。瓷体缺陷样本 (A-1, A-2, A-3) 在完好样本中观察到失稳模态特征, 在具有裂纹的瓷体 (A-4) 中耗散了 5 kHz 频率内的能量, 所有固有模态消失并且在低频出现了新的模态。在瓷体缺陷的情况下, 陶瓷裂纹比瓷体受损对共振的影响更大。

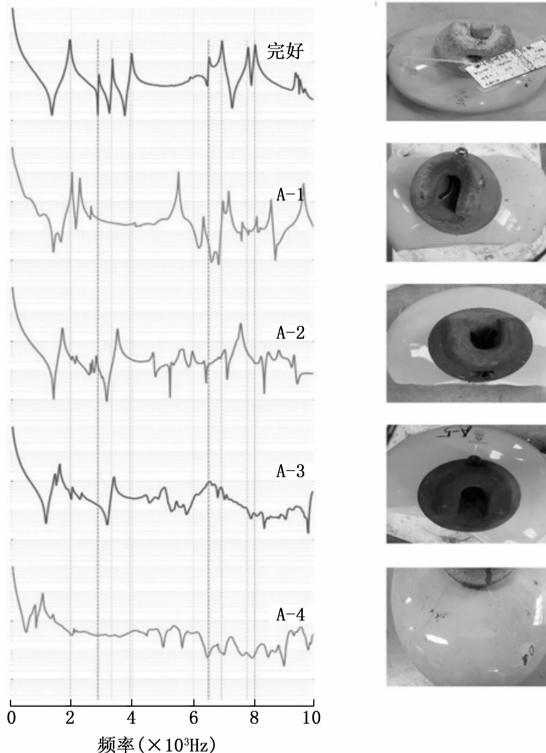


图 6 陶体缺陷样本和 FRF 结果

在完好绝缘子的频率响应中观察到 8 种固有模态中, 瓷帽缺陷的频率响应得以保持, 如图 7 所示。在 1 kHz 频率附近出现新模态, 该模态出现在所有三个瓷帽缺陷样本中。此外, 第二模态和第三模态移至较低的频率, 并且该频率明显超出先前设置的原始模态范围。

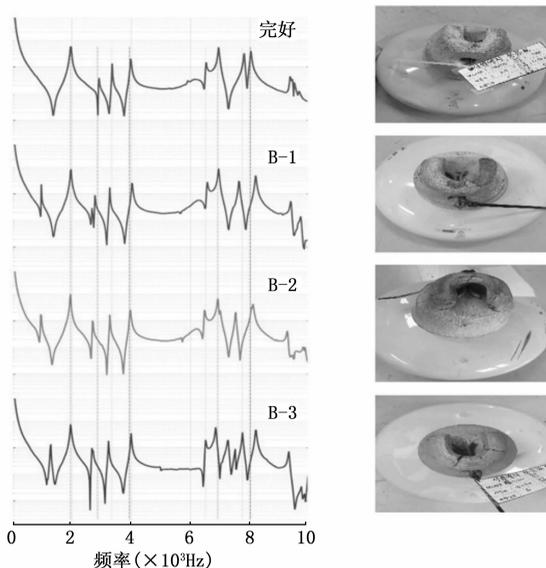


图 7 瓷帽缺陷样本和 FRF 结果

内部受损的样本通过将普通陶瓷绝缘子放置在绝缘油中, 通过施加绝缘故障电压进行检测。对经过绝缘故障电压测试三个样本的频率响应图, 如图 8 所示。

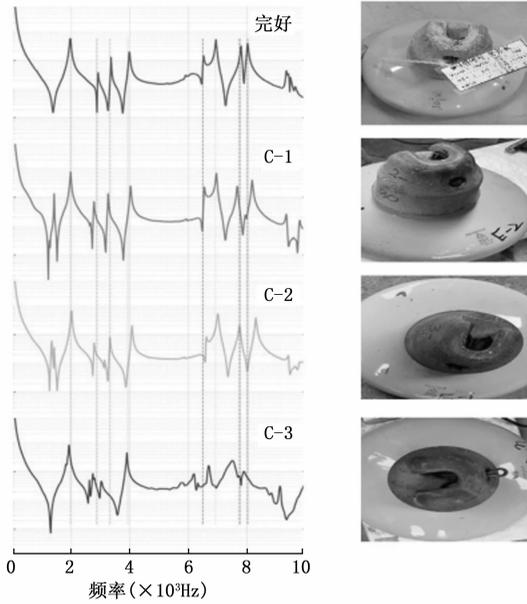


图 8 内部缺陷样本和 FRF 结果

C-1 和 C-2 的 FRF 表现出 8 种独特的模式，新模式出现在 1 kHz 附近，另一种模式向低频移动。该结果与瓷帽缺陷样本的 FRF 结果相同，由此推断两个样本在瓷帽内部受损。与这两种情况不同的是，C-3 样本没有出现新模式，而第二模式和第三模式向低频移动最多，在 5 kHz 附近模式消失。由于固有模式的消失与瓷体受损的 FRF 结果相似，因此，预测陶瓷内部发生较大的损坏。在频率响应图中，对固有模式进行了多个峰值、波形和频率范围分析，发现固有模式的消光、生成和移动等特性因缺陷类型而出现差异，通过对比其特性可以估计内部缺陷。

3.3 PCA 分析结果

从时间数据和频率响应数据两个角度提取 PCA 的特征，作为频率响应数据分析的优势，时间数据分析在使用冲击锤时不需要能量。使用时间数据计算各种特征来建立基本矩阵。每个陶瓷绝缘子样品都具有 11 个特征。

计算时间数据的熵并将其用作特征，熵属于离散分布的香农熵，可对系统内不确定性或无序性进行度量。整个信号 $X_i[x_1, \dots, x_n]$ 的熵(H)为：

$$H = - \sum_{i=1}^N X_i \log(x_i) \tag{6}$$

偏度相对于样本均值的不对称程度，在正态分布中，偏度为 0。离散信号 x_i 的偏度 (S) 为：

$$S = \frac{E(x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \tag{7}$$

离散分布函数 X_i 的峰度 (K) 衡量分布相对于正态分布的峰值：

$$K = \frac{E(x_i - \mu)^4}{\sigma^4} \tag{8}$$

将 67 个样本的 11 个特征值组成基本矩阵。通过 PCA 对数据方差贡献最大的向量为峰度 (99.74%)，其次为均值 (0.15%)，第三为偏度 (0.10%)。将 x 轴坐标乘以最大方差 PC1 (峰度)， y 轴坐标乘以第二大方差 PC2 (均值)，从时间数据中提取两个特征向量进行二维绘图，如图 9 所示。

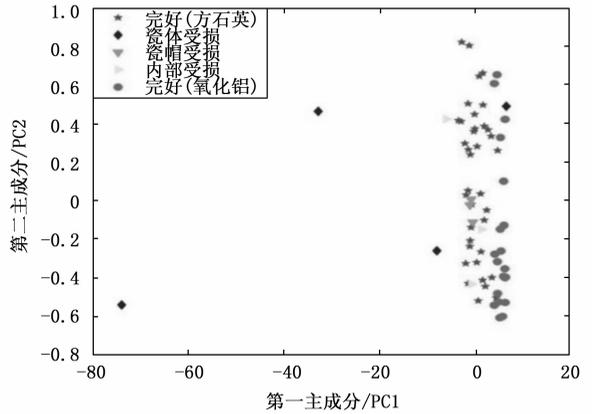


图 9 从时间数据中提取两个特征向量绘制二维图

使用 PC1 和 PC2 对所有数据进行二维图形分析，四分之三的受损陶瓷数据在 PC1 的负方向上与其他数据具有较大差异。二维分类取决于瓷帽的受损、内部受损和材料等性质。因此，还需使用第三个向量进一步分析。从时间数据中提取的两个和三个特征向量分别绘制二维和三维图，如图 10 所示。

陶瓷缺陷数据在二维图形上接近正常聚类范围，但在

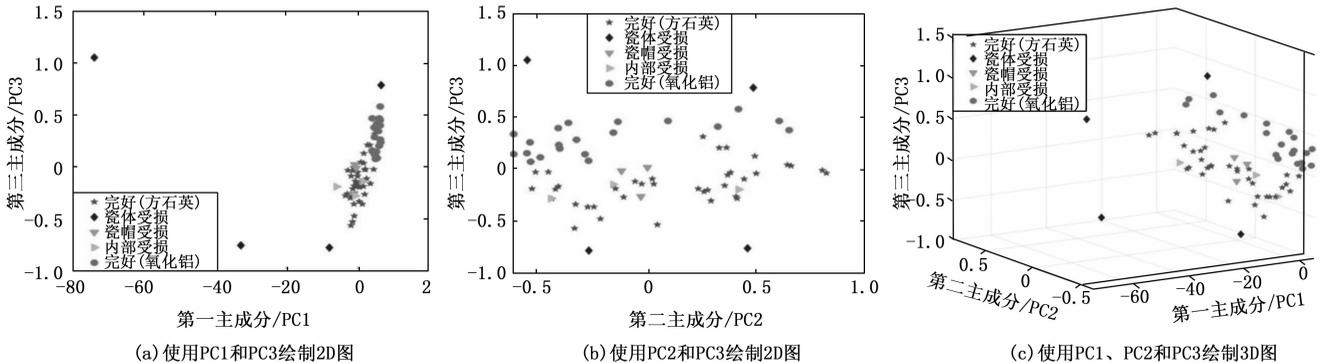


图 10 从时间数据中提取两个和三个特征向量绘制二维图和三维图

正常聚类范围和 z 轴方向上存在差异, 使得在三维图形中进行区分。除了完好方石英数据外, 完好氧化铝数据沿 z 轴方向呈向上分布。然而, 瓷帽缺陷和内部缺陷数据仍在正态分布范围内。

利用时间数据进行 PCA 表明, 在三维图形上可区分陶瓷受损和材质, 频率响应的特征提取是基于图 6 至图 8 所示的频率响应数据。将实值和虚值设置为基本值, 每个值都提取 5 个特征, 共 10 个特征。

面积 (A) 表示频率响应曲线的下侧区域:

$$A = \int f(x)dx = \sum X_i \quad (9)$$

其中: X_i 表示频率响应数据各点的幅值。

均方根 (RMS) 可定义为连续变化函数周期内瞬时值平方积分:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (10)$$

将面积 A 的形状分成 n 个小面积, 每个小的随机面积为 a_i , 保持该形状的任何正交 x , 并调整小面积 $a_i(x_i, y_i)$ 。整个形状之和 $a_i \times y_i$ 为相对于 x 轴的截面主力矩:

$$Q_x = \sum_{i=1}^n a_i y_i \quad (11)$$

质心是在任意给定截面上正交坐标轴的截面面积几何矩为零的坐标。用截面面积的几何矩除以形状面积, 即可得到从正交坐标轴到质心的距离:

$$\bar{x} = \frac{Q_x}{A} \quad (12)$$

由于利用时间数据进行的分析无法识别瓷帽缺陷和内部缺陷, 因此仅对方石英材质的频率响应数据进行分析。为了确定聚类对不同模式识别的有效性, 本文将平均质心距离缺陷阈值设置为 5%。

通过 PCA 分析, 确定数据方差贡献最大的向量为实值矩 (98.4%), 其次为虚值矩 (0.10%)。 x 轴坐标由最大方差的 PC1 (实值矩) 计算, y 轴坐标由第二大方差的 PC2 (虚值矩) 计算。从频率响应数据中提取两个特征向量绘制二维图, 如图 11 所示。

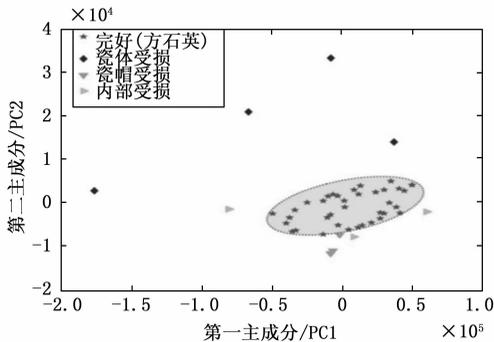


图 11 从频率响应数据中提取两个特征向量绘制二维图

基于两个主成分向量的分析表明, 完好数据在椭圆范

围内聚类, 缺陷数据表现出差异。由于陶瓷缺陷数据位于 PC1 的负方向和 PC2 的正方向, 因此, 可以将这些数据与完好数据区分开。此外, 与完好数据相比, 瓷帽缺陷数据分布在 PC2 的负方向, 因此, 可以将其与完好数据区分开来。

在内部缺陷的情况下, 当数据点位于 PC1 的负方向时, 则陶瓷内部受损; 当两个数据点位于 PC2 的负方向时, 则瓷帽内部受损。然而, 由于其中一个瓷帽缺陷数据点接近瓷帽完好数据的分布范围, 因此使用第三个 PC 向量 (实值区域) 进行三维分析, 如图 12 所示。

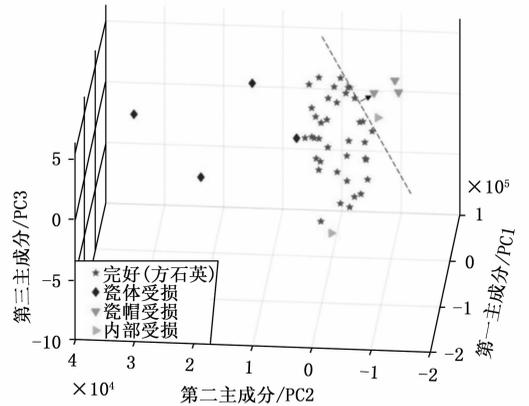


图 12 从频率响应数据中提取三个特征向量绘制三维图

瓷帽缺陷数据与瓷帽完好数据之间分布差异的三维图形分析表明, 前者分布在 PC2 的负方向, 而后者分布在 PC3 的正方向。利用频率响应数据, 对新提取的主成分进行二维和三维分析, 可以区分最初设置的三种缺陷类型。根据数据的分布位置, 内部缺陷数据可以识别为瓷体受损和瓷帽受损。使用 67 组数据进行 PCA 分析来区分受损和材质, 如图 13 所示。

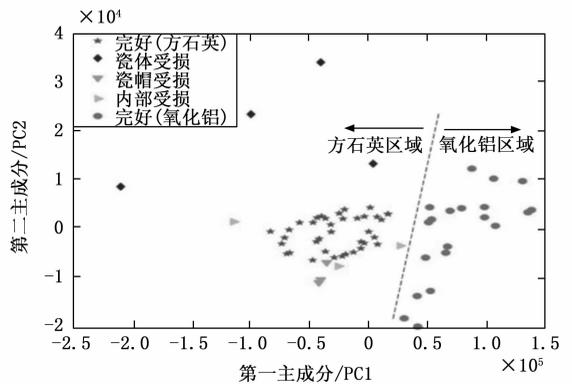


图 13 从所有数据频率响应提取两个特征向量绘制二维图

在对全部 67 组数据进行 PCA 分析的基础上, 计算出方差最大的向量为实值矩 (96.70%), 其次为虚值矩 (3.29%)。

方石英的分布是相同的。此外, 完好氧化铝材质的绝缘子数据分布在 PC1 的正方向, 而方石英材质中 PC2 的方

差更大。使用两个主分量向量或三个主分量向量的频率响应数据的 PCA 结果表明, 可以区分完好和受损的方石英材质以及方石英和氧化铝材质。

4 结束语

本文提出了利用时间频率响应数据的 PCA 来区分陶瓷绝缘子的材质和缺陷类型。从不同地点的 500 kV 输电塔中收集了 67 个陶瓷绝缘子样本模拟工况条件下瓷体、瓷帽和内部三种典型的陶瓷绝缘子缺陷类型。根据实验结果, 可以得出以下结论:

1) 频率响应分析表明, 频率响应函数随材质类型和绝缘子是否完好或损坏而变化。方石英材质中完好陶瓷绝缘子的频率响应为低于 10 kHz 的八种固有模式; 氧化铝材质中, 固有模式移到高频。瓷体缺陷导致失去固有模式, 瓷帽缺陷与完好状态的响应相似; 然而, 在 1 kHz 频段中产生了新的固有模式, 并且第二和第三模式移到较低的频率。内部缺陷表现为固有模式的消失(如瓷体缺陷)或新模式产生(如瓷帽缺陷)。

2) 基于时间数据的 PCA 表明, 通过 PCA 对时间数据提取的 11 个特征进行分析, 利用峰度和平均值来区分瓷体缺陷, 峰度和平均值是影响瓷体缺陷检测的主要因素, 可以区分瓷体缺陷和材质, 但是无法区分瓷帽缺陷和内部缺陷。

3) 基于频率响应数据的 PCA 表明, 通过 PCA 对频率响应数据提取的 10 个特征进行分析, 利用方差较大的实值矩和虚值矩, 可以区分完好、瓷体缺陷、瓷帽缺陷、内部缺陷和材质。如果将方差较大的实值面积的第三个向量包括在内, 则识别更加准确。

为了方便、快速地进行陶瓷绝缘子缺陷分类, 还需更高效的分类方法对特征提取进行分类, 使其适用于各种情况。因此, 在未来的研究中, 可利用更高效的机器学习方法在陶瓷绝缘子缺陷检测方面发挥重要作用。

参考文献:

[1] 纪超, 黄新波, 曹雯, 等. 基于深度卷积网络的复杂环境中绝缘子串特征检测 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 13-17.

[2] 张晓华, 杜维柱, 吕志瑞, 等. 基于随机森林算法的陶瓷绝缘子新型泄漏电流预测模型研究 [J]. 电瓷避雷器, 2022 (1): 126-133.

[3] 王伟贤, 李钟慎. 10 kV 配电线路防雷改造探索 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (12): 107-110.

[4] 张勤. 绝缘子体积电阻测量不确定度评定及方法研究 [J]. 电瓷避雷器, 2019 (5): 262-268.

[5] 王平, 李抗, 耿江海, 等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (14): 93-98.

[6] 宋靖瑶. 瓷质绝缘子超声波探伤检测技术的应用 [J]. 石油石

化节能, 2020, 10 (3): 15-17, 8.

[7] 范松海, 马小敏, 唐博, 等. 绝缘子泄漏电流在线监测自适应最优小波实时处理传输研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2020, 34 (10): 178-185.

[8] 孙达峰, 华正轩, 梅简, 等. 高压支柱瓷绝缘子异常发热原因分析及预防措施 [J]. 电瓷避雷器, 2020 (3): 232-236.

[9] 程绳, 侯新文, 范杨, 等. 基于 X 光扫描技术的复合绝缘子带电检测研究 [J]. 自动化应用, 2020, 32 (9): 167-169.

[10] EHSAN M, MOHAMMAD M, SEYYED M, et al. Experimental investigation on composite insulators AC flashover performance with fan-shaped non-uniform pollution under electrothermal stress [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121 (10): 106-142.

[11] LIN Y, JIN L, ZHANG H, et al. Bi-YIG ferrimagnetic insulator nanometer films with large perpendicular magnetic anisotropy and narrow ferromagnetic resonance linewidth [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 496 (15): 165-186.

[12] 黄化入, 谢维成, 张彼德, 等. 基于改进 PCM 聚类方法的绝缘子图像分割 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34 (12): 181-189.

[13] 那睿, 胡纯, 郑德智, 等. 综合频率响应特征和权重系数的自适应脑机接口技术 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (5): 154-163.

[14] 杨嘉莉, 毛宏宇, 何龙标, 等. 高声压谐振耦合管共振频率的优化设计 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65 (3): 66-70.

[15] 王春杰, 苏春强, 彭杨涵, 等. 工频试验变压器高压绕组高电位电流测量系统研制与应用 [J]. 智慧电力, 2020, 48 (2): 58-64.

[16] 李正文, 王祥旭, 丁奇力, 等. 基于模型-数据融合驱动的频率响应分析方法 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38 (5): 16-24.

[17] 谢兴阳, 余阳, 任峰. 基于窄带频率激励和先进信号处理技术的新型电线杆无损检测系统研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017 (1): 105-106, 109.

[18] 王毅, 王兴勋, 秦源汛. 配网超声波带电检测缺陷分类方法分析 [J]. 中国设备工程, 2019 (17): 95-97.

[19] 毛兴, 王路军, 唐志宇. 基于带电测试技术的变压器内部绝缘子缺陷检测方法研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51 (12): 150-160.

[20] 郑伟, 高博, 刘玥伽, 等. Sigma Delta ADC 中高抽取率滤波器设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (6): 160-164.

[21] 徐瑞, 张洁, 燕正亮, 等. 架空输电线路玻璃绝缘子自爆缺陷多维度预警分析 [J]. 电气时代, 2020 (10): 42-44.

[22] 刘燕. 支持向量机声发射检测信号处理技术研究 [J]. 无损探伤, 2021, 45 (2): 1-5.