

基于小波包变换的局部放电包络信号模式识别

李振恩¹ 陈昆鹏² 高雄伟²

(1. 新疆大学 电气工程学院, 乌鲁木齐 830002;

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为实现 GIS 故障检测和缺陷的模式识别, 针对 GIS 出现的典型绝缘缺陷及其放电特点, 设计了 4 种常见的 GIS 绝缘缺陷模型并进行放电试验。对获取的大量超高频包络信号, 提出了一种基于小波包变换奇异值分解的时域特征提取方法。该方法首先对包络信号进行小波包变换, 构建各尺度的小波包分解系数矩阵, 然后对其进行奇异值分解, 提取特征向量, 在此基础上, 采用 BP 神经网络进行模式识别, 结果表明采用此方法获得了良好的识别效果。

关键词: 局部放电; 超高频; 包络信号; 小波包变换; 奇异值分解; BP 神经网络

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 0682(2014) 04 - 0108 - 05

Envelope signal of partial discharge pattern recognition based on wavelet packet transform

LI Zhenen¹, CHEN Kunpeng², GAO Xiongwei²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830002, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to achieve the GIS fault detection and defect type recognition, four typical defect models were designed and discharge tests are carried out aiming at insulation defect as well as discharge characteristics in the GIS. With a large number of ultra high frequency envelope signal, a method of domain feature extraction was proposed based on wavelet packet transform with singular value decomposition. The envelope signal was decomposed through wavelet packet transform first in the method, then the coefficient matrix of wavelet packet transform was built in the scale, after that feature vectors of matrix were extracted by means of singular value decomposition. On this basis, BP neural network was took advantage of for pattern recognition. The results show that the good recognition effect is obtained with that method.

Key words: partial discharge; ultra high frequency; envelope signal; wavelet packet transform; singular value decomposition; BP neural network

0 引言

局部放电既是 GIS 绝缘劣化的征兆和表现形式, 又是绝缘进一步劣化的原因^[1]。根据 IEC、IEEE、GB 等标准, 局部放电检测是 GIS (gas insulated substation) 绝缘质量评估的一个重要的方法^[2]。传统测量局部放电的方法有脉冲电流法、超声波法、光电法、化学气体分析法等, 但由于受 GIS 复杂结构和测量仪器灵敏度的限制, 难以实现在线检测。超高频检测是通过 UHF (Ultra High Frequency) 传感器接收电气设备局部放电所产生的 UHF 电磁波

(300 ~ 1 500 MHz), 实现放电的检测和定位^[3]。同传统的检测方法相比, 该方法可以有效地避开现场噪声和电晕的干扰, 具有信噪比高、灵敏度高、包含信息多等优点, 近来受到人们的关注。国外几大 GIS 生产厂商如西门子、ABB 和东芝公司研制的超高频局部放电检测系统已投入实际运行, 为超高频法积累了大量的实践经验。

特征参数的提取是模式识别的核心问题, 决定着分类器的设计和识别效率^[4]。传统的做法是绘制放电脉冲的峰值 - 相位 - 脉冲数的三维统计图和放电脉冲的发展趋势图, 提取图谱的特征作为特征向量进行模式识别。但对于超高频采样法, 所获得采样信息数据量极大, 如何获取全面表征放电类型的特征向量, 并简化局部放电信号的模式识别, 是目

收稿日期: 2013 - 11 - 20

作者简介: 李振恩 (1986), 男, 硕士, 助教, 主要从事模式识别、现场总线等方向的研究及嵌入式系统的开发。

前研究的热点问题。

尽管离散小波变换具有良好的时频局部化特性,已在局部信号处理领域得到了广泛的应用,但正交小波变换只对信号的低频部分做进一步的分解,而对高频部分即信号的细节部分不再继续分解,因此,离散小波变换在超高频检测技术中的应用受到限制^[5]。小波包变换具有可以将信号按任意时频分辨率分解的特点,对高频部分可以进行精细地分解,并能根据被分析信号的特征,自适应的选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提取更多的故障特征信息^[6]。

该文应用超高频包络检波电路提取 GIS 局部放电信号,从多尺度分析的角度出发,应用小波包变换对局部放电的 UHF 包络信号进行分解。在“能量最佳”频率分段上得到一系列小波包系数,应用奇异值分解方法对小波包系数矩阵进行分解提取特征向量,并采用 BP 神经网络对放电类型进行辨识。

1 超高频信号采集

1.1 基于包络检波的局部放电检测系统

UHF 传感器接收的信号频谱带宽高达 1.5 GHz,直接采样 UHF 原始信号,由香农采样定律可知采样频率必须大于 3 GHz,对采样系统要求极高,且大量数据的实时处理也是一个难题。目前大多采用峰值检波电路获取信号的峰值和相位,这种方法检波电路简单,但采样频率低,很多放电脉冲信息在检波过程中丢失,不利于放点类型的识别。采用包络检波电路对 UHF 信号进行检波,滤除载波,得到一个与原信号波形相似的包络曲线,该曲线包含了放电缺陷的指纹特征,具有更高的实用价值^[7]。UHF 信号经包络检波后,频率由 300 ~ 1 500 MHz 变换为 30 MHz 以内的脉冲波形,可以使用相对较低的采样系统对其进行采样,经过数字化滤波和模式识别算法剔除干扰脉冲之后,以此曲线的特征为基础对缺陷进行模式识别。

检测系统由内置式 UHF 传感器、带通滤波器、

信号放大器、超高频检波电路、DSP 高速数据采集单元、后台故障诊断专家系统等构成。包络检波电路由高频检波二极管和高频电容构成,采用采样率为 250 MS/s(样点/秒)的 ADC 对包络信号进行采样,采集的数据通过光纤以太网上传至故障诊断专家系统进行绝缘状态诊断。系统结构如图 1 所示。

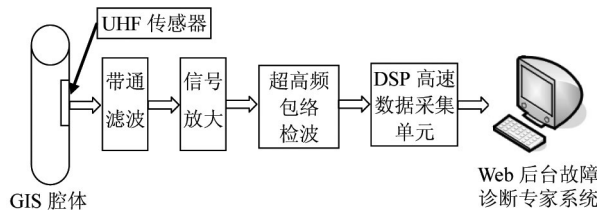


图 1 基于包络检波的 GIS 局部放电检测系统

1.2 缺陷模型的放电实验

在平顶山高压开关厂建立 GIS 绝缘缺陷放电实验平台。设计 4 种典型的 GIS 绝缘缺陷模型进行试验:悬浮的自由金属微粒杂质放电,突出物、毛刺尖角引起的电晕放电,绝缘材料内部气隙放电,导体屏蔽层悬浮电极放电。缺陷模型如图 2 所示。

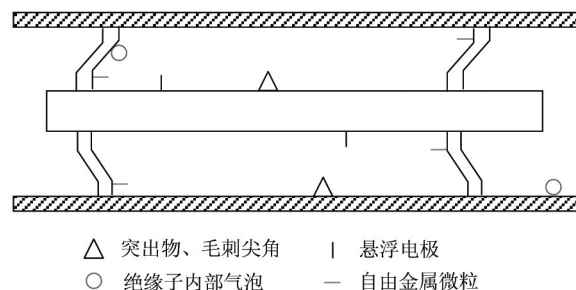
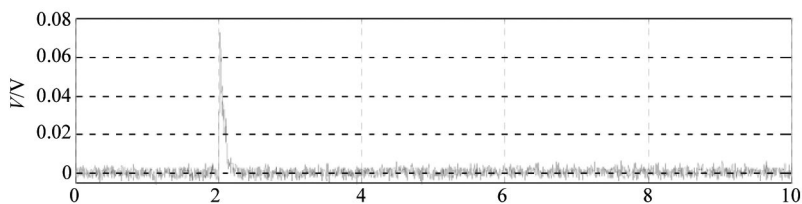


图 2 缺陷模型示意图

实验在 GIS 腔体内充入 0.6 MPa 的 SF₆ 气体,稳定一段时间后对不同的缺陷模型施加不同的电压进行放电试验。利用高速数字示波器多次采集放电的波形。图 3a ~ 3d 为采集截取到的 4 种缺陷模型放电的包络波形。分析图 3 的包络波形图可以看出,不同缺陷模型放电所产生的信号其包络波形不同。因此,提取包络信号的特征参数,可以用于模式识别。



a 自由金属微粒杂质放电信号的包络波形

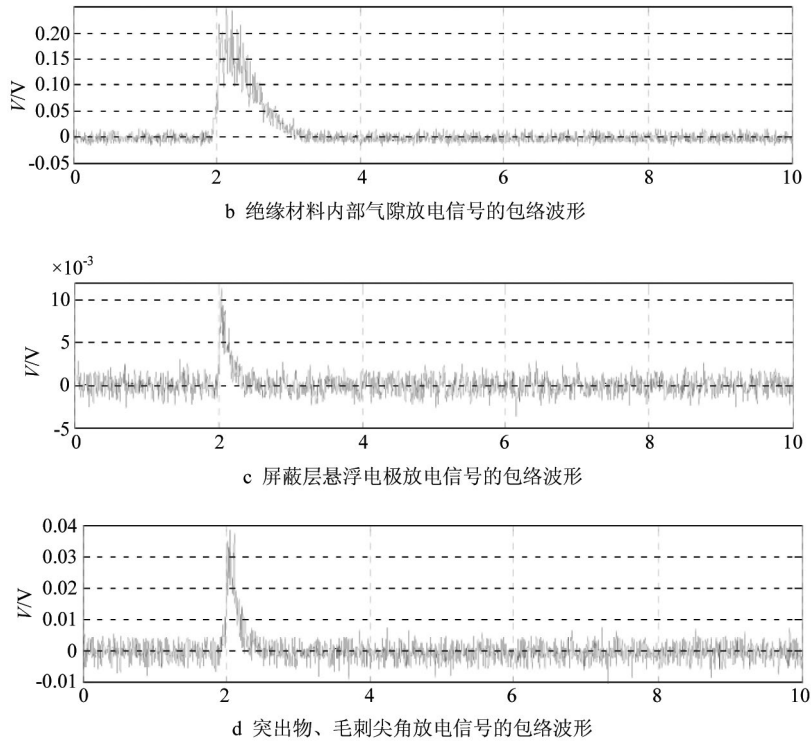


图 3 4 种缺陷模型放电信号的包络波形

2 用小波包变换奇异值分解方法提取包络信号的特征

2.1 小波包分解的基本原理

小波包分解是一种更加精细的离散小波变换，可以将信号按任意时频分辨率进行分解，对频带进行更细的划分，分解结果更能反映信号的本质特征。

定义双尺度方程如下：

$$W_{j+1, 2n}(t) = \sum_{k \in Z} h(k) W_{j,n}(t - 2^j k) \quad (1)$$

$$W_{j+1, 2n+1}(t) = \sum_{k \in Z} g(k) W_{j,n}(t - 2^j k)$$

式中： $h(k)$ 、 $g(k)$ 为滤波器系数， $W_{j,n}(t)$ 为尺度函数； $W_{j,n}(t)$ 为小波函数。每一节点 (j, n) 的小波包系数由时间序列 $x(t)$ 计算得到

$$C_{j,n}(k) = \langle x(t), W_{j,n}(t - 2^j k) \rangle \quad (2)$$

众多点的小波包系数构成小波包系数矩阵，它包含了信号的特征信息和所有重构信息。

2.2 最优小波包基的选择

小波包基库是由许多小波包基组成，不同的小波包基具有不同的性质，能够反映信号的不同特征。根据不同分析信号的特征选择一个最优小波包基来表达信号的特点。

采用 db4 小波包函数对放电信号的包络波形进行 4 个尺度的分解，根据熵最小原则选择最优小波

包基，代价函数选用香农 (shannon) 熵^[8]，则离散序列 $x = \{x_j\}$ 的熵为：

$$M(x) = - \sum_j (x_j)^2 \lg(x_j)^2 \quad (3)$$

最优小波包基的搜索过程如下：

1) 计算经归一化处理过的包络信号各节点的 Shannon 熵值，并将数字写在树的节点里。

2) 从最下层开始，为每个代表节点的框中的代价函数值都标上 * 号。

3) 将最低层的信息代价作为一个初始值，称上层节点为父节点，下层节点为子节点。若父节点的信息代价比子节点低，那么就标记父节点，否则不标记，将该值加上括号，且把 2 个子节点的和值写在括号外，如此上推，直到顶层。

4) 检查所有节点，取最上层所标记的点，一经选定，其下方的各层值就不再考虑。选出的带 * 号框的全体组成一组正交基。被作上标记的所有节点所对应的小波包函数即是搜索到的最优小波包基。其过程示意图如图 4 所示。

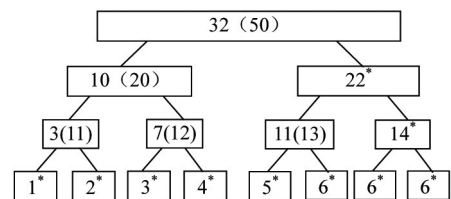


图 4 最优基的搜索过程示意图

从信号处理的观点来看,最优基的搜索过程实质上是用尽量少的系数,反映尽可能多的信息,以达到特征提取的目的。

经归一化处理的局部放电超高频包络信号用 db4 小波包分解后所搜到的最优基如图 5 所示。

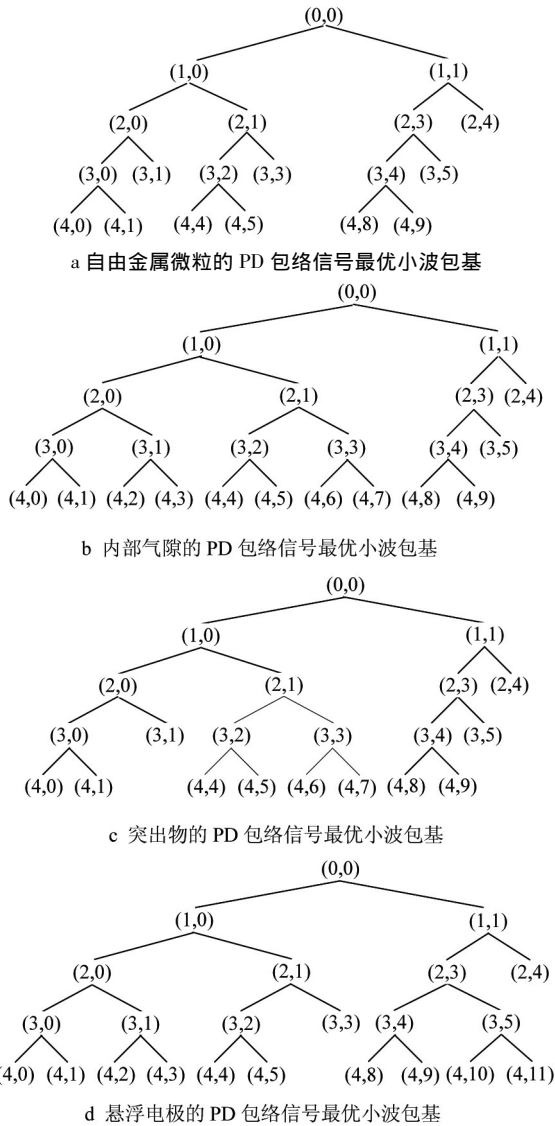


图 5 4 种缺陷模型的 PD 包络信号在 db4 小波包分解下的最优基

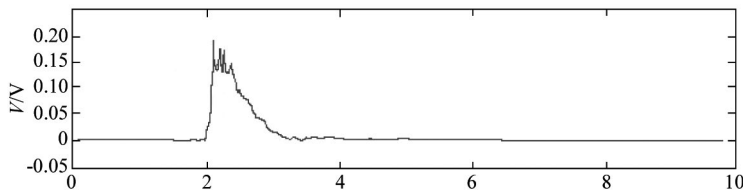


图 6 由目标特征向量 U 重构的内部气隙放电信号波形

对比重构信号和采集信号可以看出,重构信号较好地还原了放电包络波形,且白噪声得到了抑制^[7],因此可以把目标向量 U 作为模式识别的特征向量。

分析图 5 可以得出:不同的包络信号,即使采用同一小波包进行分解,所得到的最优小波包基也是不同的。经过小波包变换后的超高频包络信号,能量-频率特征更明显,在能量最佳的频率段上分解得到一系列的小波包系数,构造系数矩阵来重构信号和描述信号的特征。

2.3 奇异值分解小波包系数矩阵

经小波包变换得到的特征维数一般比较大,好多系数线性相关,如果直接用作模式识别的输入特征量,势必造成分类器的设计复杂,识别率下降。因此需要对其进行降维处理,剔除一些对分类贡献不大的参数。

由矩阵的奇异值分解理论可知^[9],对于一个 $m \times n$ 阶复矩阵 A , $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_r > 0$ 是 A 的所有非零奇异值,则存在酉矩阵 P 和 Q ,使得

$$A = P \begin{pmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} Q^H \quad (4)$$

其中: $D = \text{diag}(d_1, d_2, d_3, \dots, d_r)$ 为对角矩阵。

由小波包系数构成的矩阵 M 表示为:

$$M = \begin{bmatrix} D_{1,n} \\ \vdots \\ D_{i,n} \\ A_{i,n} \end{bmatrix}$$

其中: $A_{i,n}$ 为第 i 层分解尺度函数的系数, $D_{i,n}$ 为第 i 层分解小波函数系数。

对小波包系数矩阵 M 进行奇异值分解,得到由奇异值构成的目标向量

$$U = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r), \quad 1 < r < \min\{i+1, n\}$$

奇异值向量唯一表征了小波包系数矩阵的特征,而小波包系数矩阵表征了包络信号的时频信息,因此奇异值向量表征了信号的特征。由目标向量 U 重构的内部气隙放电信号如图 6 所示。

3 应用 BP 神经网络对超高频包络信号模式识别

BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的

多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一。BP 网络能学习和存贮大量的输入 - 输出模式映射关系,而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程。使用梯度下降法学习规则,通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小。其模型拓扑结构如图 7 所示,包括输入层、隐含层和输出层^[10]。

把用奇异值分解得到的目标向量 U 作为 BP 网络的输入,隐层使用 Sigmoid 函数,输出层设计 4 个节点代表 4 种缺陷类型,进行放电模式识别。从 4

种缺陷模型放电试验测得的数据中,选取 50 个作为 BP 网络的训练样本,探究小波包不同分解层数对识别的影响。识别结果如表 1 所示。

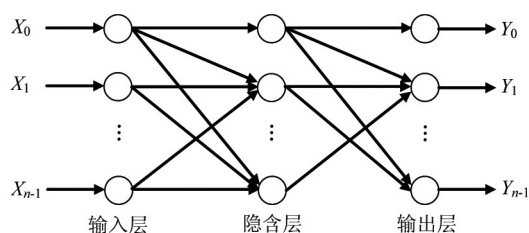


图 7 BP 神经网络模型拓扑结构

表 1 小波包不同分解层数 BP 网络识别的正确率 (%)

分解层数	自由金属杂质微粒	突出物、毛刺尖角	绝缘材料内部气隙	屏蔽层悬浮电极
2	75.4	84.0	78.3	80.2
3	81.2	87.7	80.4	82.6
4	87.9	93.6	89.8	88.7
5	84.8	90.1	85.2	85.4
6	82.6	88.7	83.3	83.6

分析表格数据可以得出:采用 db4 小波包对包络信号进行分解,当分解层数为 4 层时,识别率达到最高。突出物、毛刺尖角类和屏蔽层悬浮电极类缺陷识别率高于自由金属微粒类和绝缘材料内部气隙类缺陷的识别率。这是因为自由金属微粒在 GIS 腔腔中存在状态多样,加上不同的电压,自由金属微粒有可能处于静止、运动状态,测量结果具有一定的分散性;对于绝缘材料内部气隙放电来说,在多次放电后绝缘子有轻微的碳化现象,导致采集的波形有所变化,从而造成识别率降低。

4 结束语

针对超高频信号频谱带宽高达 GHz 的情形,设计包络检波系统对超高频信号进行包络检波,得到不同缺陷模型的 PD 包络曲线不同。用小波包变换对包络曲线进行精细分解,提取的包络特征参数具有明显的表征不同信号的能力,BP 神经网络的识别结果表明识别该方法效果良好,为模式识别技术在局部放电检测的应用提供了一种有效的特征参数方法。

参考文献:

[1] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006:2-13.
 [2] Hasegawa Y, Lzumi K, Kobayashi A, et al. Investigation

on phenomena caused by insulation abnormalities in actual GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 796-804.

[3] K Raja. On the UHF partial discharge measurement in transformers[C]. in IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2003:349-352.
 [4] Hans Gerd Kranz. PD pulse sequence analysis and its relevance for on-site PD defect identification and evaluation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2005, 12(2): 276-284.
 [5] Stephane Mallat. 信号处理的小波导引[M]. 杨力华,戴道清,黄文良,等译. 北京:机械工业出版社,2002:5-20.
 [6] 张毅刚,郁惟镛,黄成军,等. 基于小波包及隐式马尔科夫模型的局放信号去噪[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1269-1272.
 [7] 蒋庆云,张重远,刘云鹏,等. 检波技术在超高频 PD 信号提取中的应用研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 10-13.
 [8] 成礼智,王红霞,罗永. 小波的理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2004:27-35.
 [9] 田振际,严克明. 矩阵理论及其应用[M]. 兰州:兰州大学出版社,2006:118-123.
 [10] 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009:92-123.