



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104459397 A

(43) 申请公布日 2015. 03. 25

(21) 申请号 201410740831. 2

(22) 申请日 2014. 12. 08

(71) 申请人 东北电力大学

地址 132012 吉林省吉林市船营区长春路
169 号

(72) 发明人 黄南天 蔡国伟 张书鑫 张卫辉

(74) 专利代理机构 吉林市达利专利事务所

22102

代理人 陈传林

(51) Int. Cl.

G01R 31/00(2006. 01)

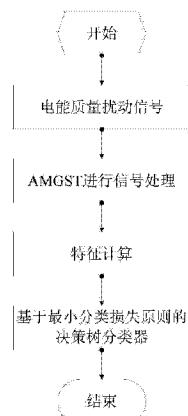
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量
扰动识别方法

(57) 摘要

本发明是一种采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法，其特点是，包括电能质量扰动信号采集、将扰动信号利用自适应多分辨率广义 S 变换进行处理、扰动信号特征提取和设计决策树分类器对样本进行分类等步骤。与以往的电能质量扰动分类方法相比，在保证了单一扰动的识别准确率基础上，考虑到各频域特征的表现需要，分频域设计窗宽调整因子，能够进一步提高复合扰动的识别准确率，具有科学合理，适应性强，较高的推广应用价值等优点。



1. 一种采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法, 其特征是, 它包括以下步骤 :

1) 电能质量扰动信号采集

利用变电站中的电压、电流互感器及二次设备对相关扰动信号进行采集和记录 ;

2) 将扰动信号利用自适应多分辨率广义 S 变换, 亦称 AMGST 进行处理 :

AMGST 是广义 S 变换的扩展, 其关键在于对广义 S 变换高斯窗函数的傅里叶变换结果中窗宽因子的调整, 具体设置如下 :

在低频部分, 计算公式为 :

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{LF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (1)$$

其中 : 低频部分为 1Hz 至 100Hz, 在此范围内令低频窗宽调整因子 $\lambda_{LF} = 2$;

在中频部分, 计算公式为 :

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{MF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (2)$$

其中 : 中频部分为 101Hz 至 700Hz, 在此范围内令中频窗宽调整因子 $\lambda_{MF} = 1/\sqrt{6}$;

在高频部分, 计算公式为 :

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{HF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (3)$$

其中 : 高频部分为 701Hz 至 $(f_s/2)$ Hz, f_s 为系统采样率 ; 通过基频 50Hz 傅里叶谱判断信号是否含有基频扰动, 若无扰动, 取高频窗宽调整因子 $\lambda_{HF} = 1/\sqrt{6}$; 否则, 取 $\lambda_{HF} = \sqrt{2}$;

3) 扰动信号特征提取

确定 6 种特征构建分类决策树, 从原始信号和 AMGST 计算结果矩阵中提取分类所需特征, 用于分类的特征向量为 : $\mathbf{X} = (A_d, A_r, \sigma_{F_0}, A_{norm}, A_{Mmax}, E_{HF})$, 特征向量中各元素含义及计算方法如下 :

A_d 表示原始信号 1/4 周期能量跌落幅度, 计算方法为原始信号各 1/4 周期的均方根值的最小值比上无噪声标准电能质量信号的 1/4 周期均方根值 ;

A_r 表示原始信号 1/4 周期能量上升幅度, 计算方法为原始信号各 1/4 周期的均方根值的最大值比上无噪声标准电能质量信号的 1/4 周期均方根值 ;

σ_{F_0} 表示 AMGST 计算结果矩阵中基频对应幅值标准差 ;

A_{norm} 表示 AMGST 计算结果矩阵中基频归一化幅值因子, 计算方法为基频各采样点对应幅值中的最大值加最小值再减 1pu 后再整体除以 2 ;

A_{Mmax} 表示 AMGST 计算结果矩阵中, 101Hz 到 700Hz 部分, 各个频率对应平均幅值最大值 ;

E_{HF} 表示改进的高频能量, 计算公式为 :

$$E_{HF} = \sum_{n=701}^{f_s/2} \sum_{j=1}^{f_s} S_{Th}^{-2}(n, j) \quad (4)$$

S_{Th} 为高频频域内幅值大于 0.02pu 的元素 ;

4) 设计决策树分类器对样本进行分类

针对所涉及的 13 种扰动设计决策树进行分类,其中包括电压暂降 C1、电压暂升 C2、电压中断 C3、闪变 C4、暂态振荡 C5、谐波 C6、电压切痕 C7、电压尖峰 C8 单一扰动 8 种,和谐波含暂降 C9、谐波含暂升 C10、谐波含闪变 C11、谐波含振荡 C12、暂降含振荡 C13 复合扰动 5 种;决策树的每个决策节点的阈值设定原则是,无交叉样本节点阈值由无交叉特征值范围的中间值确定;含交叉样本的节点阈值提出最小分类损失原则进行确定,如果最后仍不能确定确切阈值,则选取可行范围的中值作为阈值;

最小分类损失原则原理如下:定义误识别率 E_r ,令 $E_r = \frac{P}{M} \times 100\%$,其中 p 为选定阈值后,待分类样本被误识别的个数, M 为样本总数,分别设定交叉范围内样本特征值为分类阈值,并寻找 E_r 最小值对应的阈值,即确定具有最小分类损失的阈值。

采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法

技术领域

[0001] 本发明是一种采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法，应用于电能质量暂态扰动自动分类及定位、设备状态在线监测及评估以及电能质量治理。

背景技术

[0002] 电能质量暂态扰动自动分类是电能质量分析与控制的重要基础，对暂态治理、电力电子设备状态监控、扰动源定位等工作具有重要意义。随着智能电网将“安全、经济、电能质量”作为建设核心，电能质量的监控与分析已经逐渐由发电、输电环节向配电环节扩展，对扰动识别的准确性、实时性提出了更高的要求。研究重点逐渐从单一扰动识别向单一扰动与复合扰动共同识别过渡。

[0003] 常用的扰动识别方法一般包括信号处理与模式识别 2 个步骤。传统的电能质量暂态扰动自动分类方法常采用希尔伯特 - 黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT)、小波变换 (Wavelet Transform)、S 变换 (S-transform, ST) 和 Hyperbolic S 变换 (Hyperbolic S-transform, HST) 等作为信号处理手段。但由于时 - 频测不准原理，难以将时间分辨率与频率分辨率兼顾。模式识别方面，常用的方法包括神经网络 (Neural Networks, NNs)、支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 与决策树 (Decision Tree, DT) 等。相比其他方法，决策树分类效率高、实现简单，适用于实时性要求高的现场应用环境。但分类效果依赖于特征的分类能力，且不同噪声水平下，最优分类阈值变化较大。需要对采用的特征及相关阈值设定进行深入分析。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的不足，提供一种科学合理，识别准确率高，适应性强，具有较高推广应用价值的采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法。

[0005] 本发明的目的是通过以下技术方案来实现的：一种采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法，其特征是，它包括以下步骤：

[0006] 1) 电能质量扰动信号采集

[0007] 利用变电站中的电压、电流互感器及二次设备对相关扰动信号进行采集和记录；

[0008] 2) 将扰动信号利用自适应多分辨率广义 S 变换，亦称 AMGST 进行处理：

[0009] AMGST 是广义 S 变换的扩展，其关键在于对广义 S 变换高斯窗函数的傅里叶变换结果中窗宽因子的调整，具体设置如下：

[0010] 在低频部分，计算公式为：

$$[0011] S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{LF}^2 n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (1)$$

[0012] 其中：低频部分为 1Hz 至 100Hz，在此范围内令低频窗宽调整因子 $\lambda_{LF} = 2$ ；

[0013] 在中频部分，计算公式为：

[0014] $S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{MF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi mj / N)$ (2)

[0015] 其中 : 中频部分为 101Hz 至 700Hz, 在此范围内令中频窗宽调整因子 $\lambda_{MF} = 1/\sqrt{6}$;

[0016] 在高频部分, 计算公式为 :

[0017] $S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{HF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi mj / N)$ (3)

[0018] 其中 : 高频部分为 701Hz 至 $(f_s/2)$ Hz, f_s 为系统采样率; 通过基频 50Hz 傅里叶谱判断信号是否含有基频扰动, 若无扰动, 取高频窗宽调整因子 $\lambda_{HF} = 1/\sqrt{6}$; 否则, 取 $\lambda_{HF} = \sqrt{2}$;

[0019] 3) 扰动信号特征提取

[0020] 确定 6 种特征构建分类决策树, 从原始信号和 AMGST 计算结果矩阵中提取分类所需特征, 用于分类的特征向量为 : $X = (A_d, A_r, \sigma_{f_0}, A_{norm}, A_{Mmax}, E_{HF})$, 特征向量中各元素含义及计算方法如下 :

[0021] A_d 表示原始信号 1/4 周期能量跌落幅度, 计算方法为原始信号各 1/4 周期的均方根值的最小值比上无噪声标准电能质量信号的 1/4 周期均方根值;

[0022] A_r 表示原始信号 1/4 周期能量上升幅度, 计算方法为原始信号各 1/4 周期的均方根值的最大值比上无噪声标准电能质量信号的 1/4 周期均方根值;

[0023] σ_{f_0} 表示 AMGST 计算结果矩阵中基频对应幅值标准差;

[0024] A_{norm} 表示 AMGST 计算结果矩阵中基频归一化幅值因子, 计算方法为基频各采样点对应幅值中的最大值加最小值再减 1pu 后再整体除以 2;

[0025] A_{Mmax} 表示 AMGST 计算结果矩阵中, 101Hz 到 700Hz 部分, 各个频率对应平均幅值最大值;

[0026] E_{HF} 表示改进的高频能量, 计算公式为 :

[0027] $E_{HF} = \sum_{n=701}^{f_s/2} \sum_{j=1}^{f_s} S_{Th}^{-2}(n, j)$ (4)

[0028] S_{Th} 为高频频域内幅值大于 0.02pu 的元素;

[0029] 4) 设计决策树分类器对样本进行分类

[0030] 针对所涉及的 13 种扰动设计决策树进行分类, 其中包括电压暂降 C1、电压暂升 C2、电压中断 C3、闪变 C4、暂态振荡 C5、谐波 C6、电压切痕 C7、电压尖峰 C8 单一扰动 8 种, 和谐波含暂降 C9、谐波含暂升 C10、谐波含闪变 C11、谐波含振荡 C12、暂降含振荡 C13 复合扰动 5 种; 决策树的每个决策节点的阈值设定方面, 无交叉样本节点阈值由无交叉特征值范围的中间值确定; 含交叉样本的节点阈值提出最小分类损失原则进行确定, 如果最后仍不能确定确切阈值, 则选取可行范围的中值作为阈值;

[0031] 最小分类损失原则原理如下 : 定义误识别率 E_r , 令 $E_r = \frac{p}{M} \times 100\%$ 。其中 p 为选定阈值后, 待分类样本被误识别的个数, M 为样本总数, 分别设定交叉范围内样本特征值为分类阈值, 并寻找 E_r 最小值对应的阈值, 即确定具有最小分类损失的阈值。

[0032] 利用本发明的一种采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法, 由于能够根据不同类型扰动信号能量在模时 - 频矩阵中的频域分布特点, 将信号经快速傅里叶

叶变换后获得的频谱分为低频、中频、高频 3 个频域, 分别设定 S 变换窗函数窗宽调整因子, 使其在各个频域具有不同的时 - 频分辨率, 满足不同扰动信号识别要求; 并针对高频振荡识别问题, 设计基于基频傅里叶谱特征的自适应窗宽调整方法; 在此基础上, 从自适应多分辨率广义 S 变换时 - 频模矩阵和原始信号中提取 6 种特征用于构建决策树; 最后, 提出最小分类损失原则, 确定决策树节点分类阈值, 设计基于决策树的扰动分类器对电能质量扰动进行自动识别, 充分反应本发明对电能质量暂态扰动的识别的准确性和实用性, 与以往的电能质量扰动分类方法相比, 在保证了单一扰动的识别准确率基础上, 考虑到各频域特征的表现需要, 分频域设计窗宽调整因子, 能够进一步提高复合扰动的识别准确率, 科学合理, 适应性强, 具有较高的推广应用价值。

附图说明

- [0033] 图 1 为本发明的总体算法流程图;
- [0034] 图 2 为 AMGST 的计算流程图;
- [0035] 图 3 为根据最小分类损失原则确定阈值的示意图;
- [0036] 图 4 为训练样本为 1000 组时, 决策节点随阈值变化的误识别率变化曲线;
- [0037] 图 5 为决策树结构图。

具体实施方式

[0038] 本发明的一种采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法, 包括以下步骤:

- [0039] 1) 电能质量扰动信号采集
- [0040] 利用变电站中的电压、电流互感器及二次设备对相关扰动信号进行采集和记录;
- [0041] 2) 将扰动信号利用自适应多分辨率广义 S 变换 (Adaptive Multiresolution Generalized S-transform, AMGST) 进行处理;
- [0042] AMGST 是广义 S 变换的扩展, 其关键在于对广义 S 变换高斯窗函数的傅里叶变换结果中窗宽因子的调整, 具体设置如下:

[0043] 在低频部分, 计算公式为:

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{LF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (1)$$

[0044] 其中: 低频部分为 1Hz 至 100Hz, 在此范围内令低频窗宽调整因子 $\lambda_{LF} = 2$;

[0045] 在中频部分, 计算公式为:

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{MF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (2)$$

[0046] 其中: 中频部分为 101Hz 至 700Hz, 在此范围内令中频窗宽调整因子 $\lambda_{MF} = 1/\sqrt{6}$;

[0047] 在高频部分, 计算公式为:

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-2\pi^2 m^2 / \lambda_{HF}^{-2} n^2\right) \exp(i2\pi m j / N) \quad (3)$$

[0048] 其中: 高频部分为 701Hz 至 $(f_s/2)$ Hz, f_s 为系统采样率; 通过基频 50Hz 傅里叶谱

判断信号是否含有基频扰动,若无扰动,取高频窗宽调整因子 $\lambda_{HF} = 1/\sqrt{6}$;否则,取 $\lambda_{HF} = \sqrt{2}$;

[0052] 3) 扰动信号特征提取

[0053] 确定 6 种特征构建分类决策树,从原始信号和 AMGST 计算结果矩阵中提取分类所需特征,用于分类的特征向量为: $\mathbf{X} = (A_d, A_r, \sigma_{F_0}, A_{norm}, A_{Mmax}, E_{HF})$, 特征向量中各元素含义及计算方法如下:

[0054] A_d 表示原始信号 1/4 周期能量跌落幅度,计算方法为原始信号各 1/4 周期的均方根值的最小值比上无噪声标准电能质量信号的 1/4 周期均方根值;

[0055] A_r 表示原始信号 1/4 周期能量上升幅度,计算方法为原始信号各 1/4 周期的均方根值的最大值比上无噪声标准电能质量信号的 1/4 周期均方根值;

[0056] σ_{F_0} 表示 AMGST 计算结果矩阵中基频对应幅值标准差;

[0057] A_{norm} 表示 AMGST 计算结果矩阵中基频归一化幅值因子,计算方法为基频各采样点对应幅值中的最大值加最小值再减 1pu 后再整体除以 2;

[0058] A_{Mmax} 表示 AMGST 计算结果矩阵中,101Hz 到 700Hz 部分,各个频率对应平均幅值最大值;

[0059] E_{HF} 表示改进的高频能量,计算公式为:

$$[0060] E_{HF} = \sum_{n=701}^{f_s/2} \sum_{j=1}^{f_s} S_{Th}^{-2}(n, j) \quad (4)$$

[0061] S_{Th} 为高频频域内幅值大于 0.02pu 的元素;

[0062] 4) 设计决策树分类器对样本进行分类

[0063] 针对所涉及的 13 种扰动设计决策树进行分类,其中包括电压暂降 C1、电压暂升 C2、电压中断 C3、闪变 C4、暂态振荡 C5、谐波 C6、电压切痕 C7、电压尖峰 C8 单一扰动 8 种,和谐波含暂降 C9、谐波含暂升 C10、谐波含闪变 C11、谐波含振荡 C12、暂降含振荡 C13 复合扰动 5 种;决策树的每个决策节点的阈值设定方面,无交叉样本节点阈值由无交叉特征值范围的中间值确定;含交叉样本的节点阈值提出最小分类损失原则进行确定,如果最后仍不能确定确切阈值,则选取可行范围的中值作为阈值;

[0064] 最小分类损失原则原理如下:定义误识别率 E_r ,令 $E_r = \frac{p}{M} \times 100\%$ 。其中 p 为选定阈值后,待分类样本被误识别的个数, M 为样本总数,分别设定交叉范围内样本特征值为分类阈值,并寻找 E_r 最小值对应的阈值,即确定具有最小分类损失的阈值;

[0065] 参照图 1- 图 5,具体实施方式的采用自适应多分辨率广义 S 变换的电能质量扰动识别方法,包括:

[0066] A、电能质量扰动原始数据的产生

[0067] 由于实际电能质量信号并不能完全反应扰动信号的多样性,本发明采用 MATLAB 按照数学模型仿真生成不同类型电能质量信号,分别随机生成 13 种扰动信号各 500 组,信号采样频率为 3.2kHz,并在所有信号中加入范围为 30dB 至 50dB 随机信噪比的高斯白噪声;

[0068] B、对原始数据进行 AMGST 运算方法(Adaptive Multiresolution Generalized S-transform, AMGST)

- [0069] 对电能质量扰动信号进行 AMGST 分析,其过程如图 2 ;
- [0070] C、提取分类所需特征
- [0071] 从原始信号数据和 AMGST 的运算结果中分别提取特征,共提取 6 种特征用于建立决策树 ;
- [0072] D、设计决策树,决策树的结构如图 5 所示 ;
- [0073] 决策树的每个决策节点的阈值设定方面,无交叉样本节点阈值由无交叉特征值范围的中间值确定 ;含交叉样本的节点阈值提出最小分类损失原则进行确定,如果最后仍不能确定确切阈值,则选取可行范围的中值作为阈值 ;
- [0074] 最小分类损失原则原理如下 :定义误识别率 E_r ,令 $E_r = \frac{p}{M} \times 100\%$ 。其中 p 为选定阈值后,待分类样本被误识别的个数,M 为样本总数。分别设定交叉范围内样本特征值为分类阈值,并寻找 E_r 最小值对应的阈值,即确定具有最小分类损失的阈值 ;
- [0075] 图 3 描述了根据最小分类损失原则确定阈值的操作方法,实际操作过程中将按照从阈值下限到阈值上限的顺序逐渐增大阈值,并计算对应的误识别率。最后将选择使误识别率达到最小的阈值,即最优阈值。图 4 为训练样本为 1000 组时,决策节点随阈值变化的误识别率变化曲线 ;
- [0076] E、使用仿真信号验证本发明的有效性
- [0077] 利用 MATLAB 软件仿真生成信噪比为 30dB、40dB、50dB 和 30dB 到 50dB 随机值的仿真信号,每类各 500 组,验证本发明的有效性。并构建基于 ST、GST、HST 的决策树,开展比较试验。结果如表 1 和表 2 所示。
- [0078] 表 1 信噪比为 30dB 到 50dB 随机值情况的分类准确率比较
- [0079]

处理方法	30dB≤SNR≤50dB			
	AMGST	GST	ST	HST
C1	99.2	99	98.8	98.8
C2	99.6	99	97.8	97.6
C3	100	100	100	100
C4	100	100	100	100
C5	100	100	100	100
C6	99.8	99.2	97.4	98.2
C7	99.4	99.4	99.6	99.6
C8	99.4	99.4	99.6	99.6
C9	100	99.8	100	100
C10	100	98.4	99.2	99.2
C11	100	91.4	100	100
C12	99.4	99	98	97.2
C13	87.4	86	83.6	83.6
总准确率	98.78	97.74	98.00	97.98

[0080] 从表 1 可以看出,本发明的方法分类准确率较其他方法都有提高,尤其识别复合扰动时,优势尤其明显。

[0081] 表 2 信噪比分别为 30dB、40dB、50dB 情况的分类准确率比较

[0082]

SNR	准确率 (%)			
	AMGST	GST	ST	HST
50dB	98.6	97.46	98.12	97.98
40dB	98.63	97.54	98.12	98.02
30dB	97.66	93.38	90.43	91.17

[0083] 从表 2 可以看出, 本发明的方法在不同噪声水平下的分类总准确率均高于其他方法, 且保持在 97.66% 以上, 因此, 本发明的方法具有良好的抗噪性和鲁棒性。

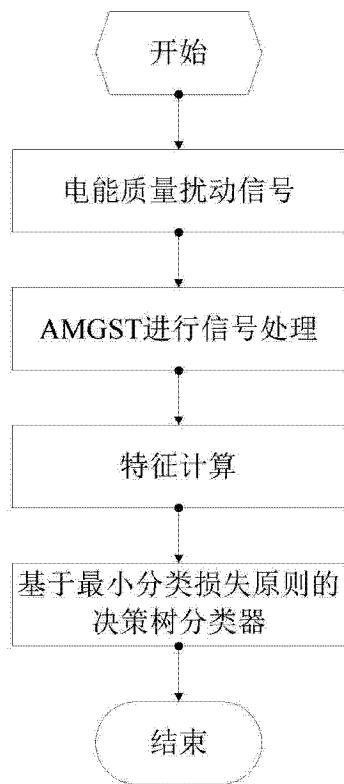


图 1

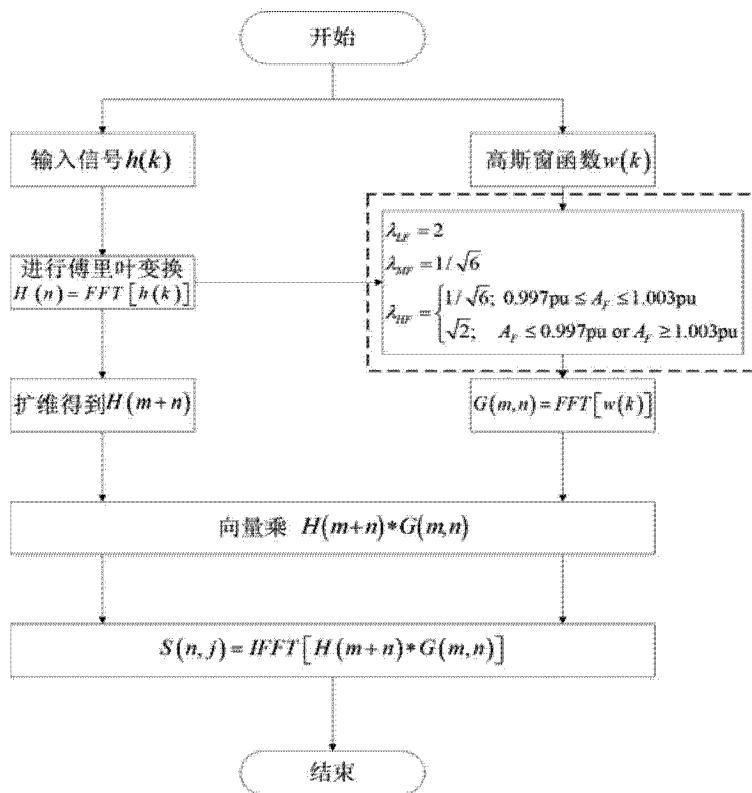


图 2

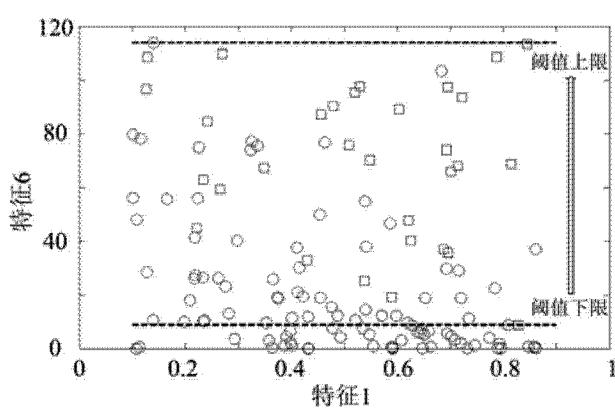


图 3

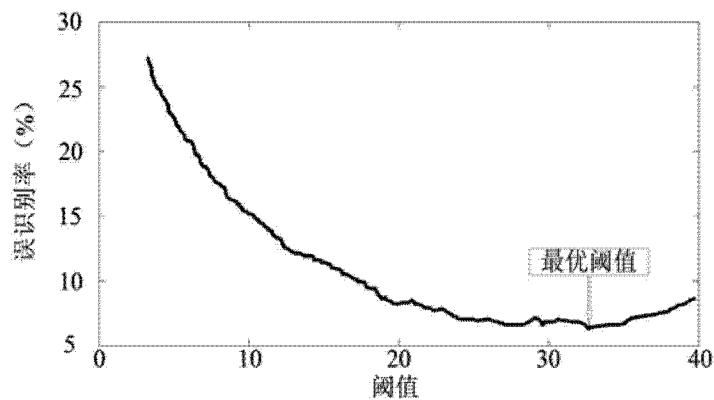


图 4

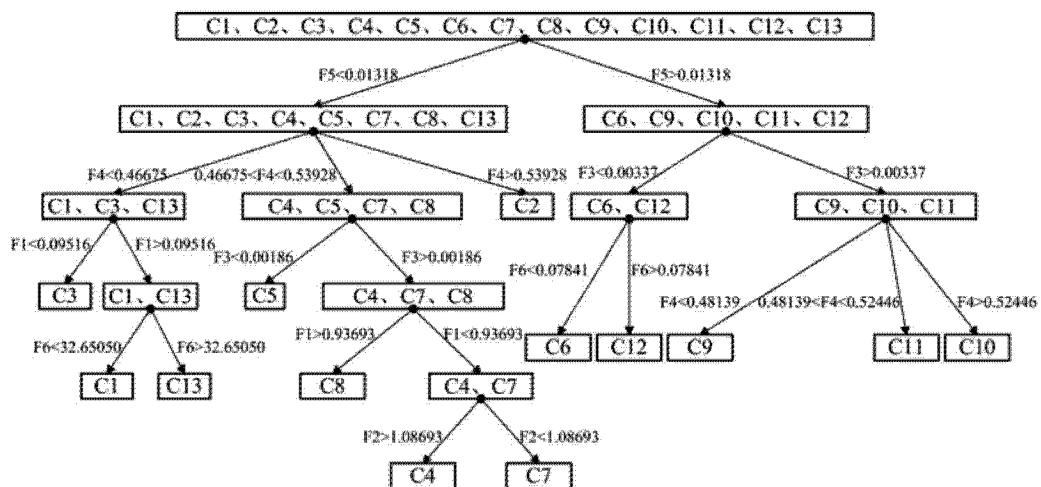


图 5