(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109212391 B
(45)授权公告日 2019.11.08

(21)申请号 201811077524.5
(22)申请日 2018.09.15
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109212391 A
(43)申请公布日 2019.01.15
(73)专利权人 四川大学
地址 610065 四川省成都市武侯区一环路南一段24号
(72)发明人 周凯 李泽瑞 黄永禄 谢敏 赵世林 朱光亚 冉立
(74)专利代理机构 成都科海专利事务有限责任公司 51202
代理人 吕建平
(51)Int.Cl.
G01R 31/12(2006.01)

审查员 钟栩文

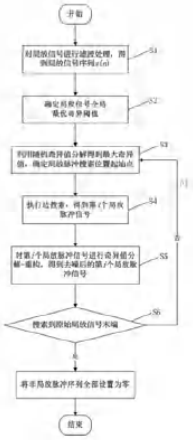
权利要求书4页 说明书12页 附图3页

(54)发明名称

兼顾脉冲提取和去噪的电缆局部放电信号处理及定位方法

(57)摘要

本发明公开了一种兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法及电力电缆局部放电定位方法，该局部放电信号处理方法采用“先提取，后去噪”的数据处理次序，先利用奇异值分解，将最优奇异阈值与最大奇异值进行比较，实现对局放脉冲的快速、精确定位，并对局放脉冲进行提取，再利用奇异值重构对提取的局部脉冲信号进一步去噪。本发明基于奇异值分解-重构法，可实现在较低信噪比条件下仍能有效抑制白再生局放信号白噪声的有效抑制，同时联合1层离散小波去噪，进一步抑制高频干扰。基于上述局部放电信号处理方法对局放脉冲进行提取，可实现对电力电缆局放源(即局部放电点)的精确定位。



CN 109212391 B

1.一种兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于包括以下步骤：

(1)对局放信号进行滤波处理，得到局放信号序列s(n)，n=1,2,3,…,N_0，N_0为整个局放信号序列长度；

(2)由局放信号序列s(n)的白噪声标准差η计算确定局放信号全局最优奇异阈值τ_*；

(3)利用长度为T_W的时间窗从局部信号序列s(n)中截取局放信号段y(n)，n=1,2,3,…,N，N为时间窗内局放信号序列长度；利用该信号段内的局放信号构建矩阵，并对构建的矩阵进行奇异值分解，计算得到该段内局放信号的最大奇异值σ_{max}；将σ_{max}与步骤(2)中计算得到的全局最优奇异阈值τ_*比较，若$\sigma_{max}\geqslant\tau_*$，将该时间窗起始时刻记录为脉冲搜索起始时刻$t_i$，i表示提取脉冲数，进入步骤(4)；若$\sigma_{max}<\tau_*$，时间窗沿序列终止的方向滑动一步第一设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段，重新构建矩阵，计算σ_{max}，与τ_*比较，循环直至$\sigma_{max}\geqslant\tau_*$；

(4)将时间窗内的局放信号数据重新构建矩阵，并对构建的矩阵进行奇异值分解，计算得到该段内局放信号的局部最优奇异估计阈值$\hat{\tau}_*$；将局部最优奇异估计阈值$\hat{\tau}_*$与最大奇异值δ_{max}进行以下比较：

若$\delta_{max}>\hat{\tau}_*$，①时间窗沿序列起始的方向滑动一步第二设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$；②将时间窗返回至脉冲搜索起始时刻$t_i$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻$t_e$；提取$t_s$-$t_e$时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号；

若$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻$t_e$；提取$t_s$-$t_e$时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号；

(5)对步骤(4)提取到的第i个局放脉冲信号进行奇异值分解及重构，得到去噪后的第i个局放脉冲信号；

(6)得到去噪后的第i个局放脉冲信号之后，返回步骤(3)-(5)搜索并提取下一个局放脉冲信号，直至搜索到原始局放信号末端，将非局放脉冲序列全部设置为零，完成局放脉冲提取和信号去噪。

2.根据权利要求1所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于，按以下方法确定噪声标准差与计算全局最优奇异阈值：

(21)确定局放信号序列s(n)的白噪声标准差η：利用小波变换对局放信号序列s(n)进行小波分解，由第一层小波细节系数$w_{1,j}$构建1×j矩阵，j=N_0/2，以$\eta\approx\frac{\mathrm{median}(|w_{1,j}|)}{0.6745}$为近似估计白噪声标准差，其中median是指对矩阵元素$w_{1,j}$的绝对值取中位数；

(22)按以下公式计算局放信号全局最优奇异阈值τ_*，$\tau_*=\lambda_*(\beta)\cdot\sqrt{K_0}\eta$，式中

$\lambda_*(\beta)=\sqrt{2(\beta+1)+\frac{8\beta}{\beta+1+\sqrt{\beta^2+14\beta+1}}}$，$\beta=L_0/K_0$，$K_0=N_0-L_0+1$；$L_0$的取值范围通常为$N_0/20\sim N_0/2$。

3.根据权利要求1所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于，按以下方法确定最大奇异值与局放脉冲搜索位置起始点：

(31)利用长度为T_W的时间窗从局部信号序列s(n)中截取局放信号片段y(n)，n＝1，2，3，…，N，N为时间窗内局放信号序列长度；

(32)构建Hankel矩阵$A_{L\times K}$：

$$A_{L\times K}=\begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(K) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(L) & y(L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

式中，K＝N-L+1，L＝N/3；

(33)计算矩阵Y＝A•X，X为K×2的随机矩阵X＝randn(K,2)，并将Y正交规范化，得到L×2阶正交基W_1；

(34)计算矩阵$B=W_1^T\cdot A$；

(35)根据$B=U\Sigma V^T$将矩阵B奇异值分解，式中，U和V分别为2×2维和K×K维正交矩阵；$\Sigma=\begin{bmatrix}\sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2\end{bmatrix}$是对角矩阵，其对角元素$\sigma_1$、$\sigma_2$为矩阵B的奇异值按降序排列，其中$\sigma_1$为最大奇异值$\sigma_{max}$；

(36)将σ_{max}与步骤(2)中计算得到的全局最优奇异阈值τ_*比较，若$\sigma_{max}\geqslant\tau_*$，将该时间窗起始时刻记录为脉冲搜索起始时刻$t_i$，进入步骤(4)；i表示提取脉冲数；若$\sigma_{max}<\tau_*$，时间窗沿序列终止的方向滑动一步第一设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行(31)-(36)，重新构建矩阵，计算σ_{max}，与τ_*比较，循环直至$\sigma_{max}\geqslant\tau_*$。

4.根据权利要求1所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于，按以下方法确定第i个局放脉冲信号：

(41)将时间窗内的局放信号数据重新构建Hankel矩阵Z：

$$Z_{L\times K}=\begin{bmatrix} z(1) & z(2) & \cdots & z(K) \\ z(2) & z(3) & \cdots & z(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z(L) & z(L+1) & \cdots & z(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

式中，K＝N-L+1，L＝N/3；

(42)根据$Z=C\Sigma'D^T$将步骤(41)构建的Hankel矩阵Z进行奇异值分解，$Z=C\Sigma'D^T$，式中C和D分别为L×L维和K×K维正交矩阵；$\Sigma'=\mathrm{diag}(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_p)$ ($p=\min(L,K)$)是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z的奇异值按降序排列；取向量$\delta=(\delta_1,\delta_2,...,\delta_m)$，m为Σ'中非零元素的个数且$m\leqslant p$，为矩阵Z的秩；$\delta_1$为最大奇异值$\delta_{max}$；

(43)以$\hat{\tau}_*=\omega(\beta)\cdot\mathrm{mcdian}(\delta)$为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中ω(β)≈

$0.56\beta^3-0.95\beta^2+1.82\beta+1.43$，$\beta=L/K$，median是指对矩阵δ的绝对值取中位数；

(44)将最优奇异估计阈值$\hat{\tau}_*$与最大奇异值δ_{max}比较。

若$\delta_{max}>\hat{\tau}_*$，①时间窗沿序列起始的方向滑动一步第二设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行(41)-(44)，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$；②将时间窗返回至脉冲搜索起始时刻$t_1$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行(41)-(44)，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻$t_e$；提取$t_s-t_e$时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号；

若$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第二设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行(41)-(44)，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻$t_e$；提取$t_s-t_e$时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号。

5.根据权利要求1所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于，按以下方法进行奇异值分解及重构：

(51)根据t_s-t_e时刻的第i个局放脉冲信号数据构建Hankel矩阵Z'；

$$Z'_{L'\times K'}=\begin{bmatrix} z'(1) & z'(2) & \cdots & z'(K) \\ z'(2) & z'(3) & \cdots & z'(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z'(L') & z'(L'+1) & \cdots & z'(N') \end{bmatrix}_{L'\times K'}$$

式中，$K'=N'-L'+1$，$L'=N'/3$；N'为t_s-t_e时刻的局放信号序列长度；

(52)根据$Z'=C'\Sigma''D'^T$将步骤(51)构建的Hankel矩阵Z'进行奇异值分解，$Z'=C'\Sigma''D'^T$，式中C'和D'分别为L'×L'维和K'×K'维正交矩阵；$\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$ ($p'=\min(L',K')$)是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z'的奇异值按降序排列；取向量$\delta'=(\delta'_1,\delta'_2,\ldots,\delta'_{m'})$，m'为Σ"中非零元素的个数且$m'\le p'$，为矩阵Z'的秩；

(53)以$\hat{\tau}'_*=\omega(\beta')\cdot\mathrm{median}(\delta')$为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中$\omega(\beta')\approx 0.56\beta'^3-0.95\beta'^2+1.82\beta'+1.43$，$\beta'=L'/K'$，median是指对矩阵δ'的绝对值取中位数；

(54)将奇异值矩阵$\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$中低于$\hat{\tau}'_*$的奇异值设置为零，得到去噪后的奇异值矩阵Σ"'；根据$Z''=C'\Sigma'''D'^T$得到去噪后信号的Hankel矩阵Z"；

(55)对于重构后得到的矩阵Z"，利用取平均值方式对t_s-t_e时刻的局放信号进行重构

$$z''(n)=\begin{cases} \dfrac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & 1\le n<L' \\ \dfrac{1}{L'}\sum_{l=1}^{L'}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & L'\le n\le K' \\ \dfrac{1}{N'-n+1}\sum_{l=n-K'+1}^{L'}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & n>K' \end{cases}$$

进而得到去噪后的第i个局放脉冲信号及其在整个原始信号序列中的位置。

6.根据权利要求1所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于步骤(1)中，利用高通滤波器对局放信号进行滤波处理，滤波处理后的局放信号经同轴电缆传至采集装置得到局放信号序列s(n)，所述高通滤波器的截止频率范围为50kHz～100kHz；所述采集装置的采样率至少为50MS/s。

7.根据权利要求1所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于，利用db4、db6或db8小波对局放信号序列s(n)进行小波分解。

8.根据权利要求1至7任意一项权利要求所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于所述T_W取1～2μs，所述第一设定步长N/4～N/2个数据点，第二设定步长为2～5个数据点，第三设定步长为2～5个数据点。

9.根据权利要求8所述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，其特征在于，步骤(6)结束后，对所提取的局放脉冲信号进一步利用1层离散小波去噪。

10.一种电力电缆局部放电定位方法，其特征在于采用权利要求1至9任一权利要求所述局部放电信号处理方法提取局部脉冲信号，提取不超过设定时间间隔的两个局放脉冲信号峰值及对应时刻t_1，t_2，依据$d=l-\frac{v(t_2-t_1)}{2}$确定局放源在电力电缆上的位置，d为局放源距离电力电缆测试端的距离，l为电力电缆总长度，v为脉冲传播速度。

兼顾脉冲提取和去噪的电缆局部放电信号处理及定位方法

技术领域

[0001] 本发明电力电缆局部放电检测技术领域，涉及局部放电信号波形分析处理技术，具体涉及一种兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法及电力电缆局部放电定位方法。

背景技术

[0002] 局部放电(partial discharge,PD)(简称局放)是电力电缆绝缘出现劣化的表现形式之一，同时也是电力电缆绝缘进一步劣化并导致绝缘失效的主要原因之一。通过对电力电缆进行局部放电检测与分析，可为电力电缆绝缘诊断与监测提供可靠的评判依据。

[0003] 传统的局放信号处理方法主要包含两大类：1)基于相位分布模式统计谱图的特征提取方法，该方法首先统计一段时间内、若干工频周期的局部放电信号(简称局放信号)，绘出局部放电幅值随相位变化的二维图，即局部放电相位分布 (phase resolved partial discharge,PRPD)图，为了更直观地反映局部放电特征，再从PRPD中提取放电工频相位φ、放电量q和放电次数n构成二维或三维谱图 (局部放电指纹谱图)，并通过指纹谱图，提取用于表征局部放电谱图的特征量，比如偏斜度S_k、峭度ku、不对称度cc等；2)基于单脉冲的特征提取方法，该方法通常利用局放单脉冲提取用于表征局部放电信号特征的特征量，比如等效时宽T、等效频宽F等，通过提取不同的特征量可对不同类型局放信号进行有效识别且可实现对电力电缆绝缘状态的有效评估。然而，上述两种局放信号处理方法中，均以局放脉冲提取作为获取特征量的基础，但在通常情况下，局放脉冲提取是建立在局放信号去噪基础上的，即“先去噪、后提取”，因此去噪结果直接影响脉冲提取的有效性。

[0004] 申请号为CN201611094903.6，名称为“一种适用于高频电流局部放电检测的脉冲提取方法”的中国发明专利，提供了一种基于小波分解-重构的局放去噪方法。而后利用自动阈值计算提取出脉冲段。由于现场局放信号复杂性，仅通过各级小波分解系数的峰值与有效值之比确定信号类型的方法难免会发生漏检、误检。通过自动阈值来选取局放脉冲的方法仅适用于信噪比较高的情况，且当存在幅值差异较大的局放脉冲时，幅值较小的局部脉冲更容易被识别为噪声。

发明内容

[0005] 针对目前基于“先去噪、后提取”的局部脉冲提取有效性差、受去噪结果影响 等问题，本发明提供了一种兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，能 够有效提取局部脉冲，即使在低信号比情况下，仍具有较强的白噪声抑制能力。

[0006] 本发明的另一目的旨在提供一种电力电缆局部放电定位方法。

[0007] 本发明采用“先提取、后去噪”的局部放电信号数据处理策略，首先基于短时 随机奇异值分解和短时奇异值分解实现对脉冲的快速、精确定位和提取，再进一步 利用奇异值分解-重构的方法进行去噪，使局部信号白噪声得到有效抑制。

[0008] 本发明提供的兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法包括以下步

骤：

[0009] (1)对局放信号进行滤波处理，得到局放信号序列s(n)，n=1,2,3,…,N_0，N_0为 整个局放信号序列长度；

[0010] (2)由局放信号序列s(n)的白噪声标准差η计算确定局放信号全局最优奇异阈 值τ*；

[0011] (3)利用长度为T_W的时间窗从局部信号序列s(n)中截取局放信号段y(n)，n=1,2,3,…,N，N为时间窗内局放信号序列长度；利用该信号段内的局放信号构建矩 阵，并对构建的矩阵进行奇异值分解，计算得到该段内局放信号的最大奇异值σ_{max}；将σ_{max}与步骤(2)中计算得到的全局最优奇异阈值τ*比较，若$\sigma_{max}\geq\tau_*$，将该时间 窗起始时刻记录为脉冲搜索起始时刻t_1，i表示提取脉冲数，进入步骤(4)；若 $\sigma_{max}<\tau_*$，时间窗沿序列终止的方向滑动一步第一设定步长，利用时间窗重新截取 局部信号段，重新构建矩阵，计算σ_{max}，与τ*比较，循环直至$\sigma_{max}\geq\tau_*$；

[0012] (4)将时间窗内的局放信号数据重新构建矩阵，并对构建的矩阵进行奇异值 分解，计算得到该段内局放信号的局部最优奇异估计阈值$\hat{\tau}_*$；将最优奇异估计阈值 $\hat{\tau}_*$与最大奇异值δ_{max}进行以下比较：

[0013] 若$\delta_{max}>\hat{\tau}_*$，①时间窗沿序列起始的方向滑动一步第二设定步长，利用时间窗 重新截取局部信号段，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$；②将时间窗返回至脉冲搜索起 始时刻$t_1$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新 截取局部信号段，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该 时间窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据 即为第i个局放脉冲信号；

[0014] 若$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$，并将时间窗 沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段，重新 构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为 局放脉冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信 号；

[0015] (5)对步骤(4)提取到的第i个局放脉冲信号进行奇异值分解-重构，得到去 噪后的第i个局放脉冲信号；

[0016] (6)得到去噪后的第i个局放脉冲信号之后，返回步骤(3)-(5)搜索并提取 下一个局放脉冲信号，直至搜索到原始局放信号末端，将非局放脉冲序列全部设置为 零，完成局放脉冲提取和信号去噪。

[0017] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，步骤(1)中，利用高 通滤波器对局放信号进行滤波处理，以滤除低频干扰信号。所述高通滤波器的截止频 率范围为：50kHz～100kHz。通过高通滤波器滤波处理的局放信号进一步经同轴电缆 传至采集装置得到局放信号序列s(n)，所述采集装置的采样率至少为50MS/s，以保 证单个局放脉冲有较多数据点，便于后续分析。

[0018] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，按以下方法确定噪声

标准差与计算全局最优奇异阈值：

[0019] (21)确定局放信号序列s(n)的白噪声标准差η：利用小波变换(例如db4、db6或db8小波等)对局放信号序列s(n)进行小波分解，由第一层小波细节系数$w_{1,j}$构建1×j矩阵，j=$N_0/2$，以$\eta \approx \frac{\text{median}(|w_{1,j}|)}{0.6745}$为近似估计白噪声标准差，其中median 是指对矩阵元素$w_{1,j}$的绝对值取中位数；

[0020] (22)按以下公式计算局放信号全局最优奇异阈值τ_*，$\tau_* = \lambda_*(\beta)\cdot\sqrt{K_0}\eta$，式 中$\lambda_*(\beta) = \sqrt{2(\beta+1)+\frac{8\beta}{\beta+1+\sqrt{\beta^2+14\beta+1}}}$，$\beta=L_0/K_0$，$K_0=N_0-L_0+1$；$L_0$的取值范围通 常为$N_0/20$～$N_0/2$。

[0021] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，利用db4、db6或db8 小波等对局放信号序列s(n)进行小波分解。本发明利用小波对局放信号进行几层小波 分解没有特殊要求，不管进行几层小波分解，本发明只取第一层小波细节系数。

[0022] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，按以下方法确定最大奇异值与局放脉冲搜索位置起始点：

[0023] (31)利用长度为T_w的时间窗从局部信号序列s(n)中截取局放信号片段y(n)，n=1,2,3,…,N，N为时间窗内局放信号序列长度；

[0024] (32)构建Hankel矩阵$A_{L\times K}$：

[0025] $$A_{L\times K} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(K) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(L) & y(L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

[0026] 式中，K=N-L+1，L=N/3；

[0027] (33)计算矩阵Y=A·X，X为K×2的随机矩阵X=randn(K,2)，并将Y正交规 范化，得到L×2阶正交基W_1；

[0028] (34)计算矩阵$B=W_1^T\cdot A$；

[0029] (35)根据$B=U\Sigma V^T$将矩阵B奇异值分解，式中，U和V分别为2×2维和K ×K维正交矩阵；$\Sigma=\begin{bmatrix}\sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2\end{bmatrix}$是对角矩阵，其对角元素为矩阵B的奇异值按降序 排列，σ_1即为最大奇异值σ_{max}；

[0030] (36)将σ_{max}与步骤(2)中计算得到的全局最优奇异阈值τ_*比较，若$\sigma_{max}\geqslant\tau_*$，将该时间窗起始时刻记录为脉冲搜索起始时刻$t_i$，进入步骤(4)；i表示提取脉冲 数；若$\sigma_{max}<\tau_*$，时间窗沿序列终止的方向滑动一步第一设定步长，利用时间窗重 新截取局部信号段返回执行(31)-(36)，重新构建矩阵，计算σ_{max}，与τ_*比较，循环直至$\sigma_{max}\geqslant\tau_*$。

[0031] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，按以下方法确定第i 个局放脉冲信号：

[0032] (41)将时间窗内的局放信号数据重新构建Hankel矩阵Z：

[0033] $$Z_{L\times K}=\begin{bmatrix} z(1) & z(2) & \cdots & z(K) \\ z(2) & z(3) & \cdots & z(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z(L) & z(L+1) & \cdots & z(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

[0034] 式中，$K=N-L+1$，$L=N/3$；

[0035] (42)根据$Z=C\Sigma'D^T$将步骤(41)构建的Hankel矩阵Z进行奇异值分解，$Z=C\Sigma'D^T$，式中C和D分别为$L\times L$维和$K\times K$维正交矩阵；$\Sigma'=\mathrm{diag}(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_p)$ $(p=\min(L,K))$是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z的奇异值按降序排列；取向量 $\delta=(\delta_1,\delta_2,...,\delta_m)$，m为$\Sigma'$中非零元素的个数且$m\leq p$，为矩阵Z的秩；$\delta_1$为最大奇异 值$\delta_{max}$；

[0036] (43)以$\hat{\tau}_*=\omega(\beta)\cdot\mathrm{median}(\delta)$为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中 $\omega(\beta)\approx0.56\beta^3-0.95\beta^2+1.82\beta+1.43$，$\beta=L/K$，median是指对矩阵$\delta$的绝对值取中位 数；

[0037] (44)将最优奇异估计阈值$\hat{\tau}_*$与最大奇异值δ_{max}比较，

[0038] 若$\delta_{max}>\hat{\tau}_*$，①时间窗沿序列起始的方向滑动一步第二设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行(41)-(44)，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$；②将时间窗 返回至脉冲搜索起始时刻$t_1$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行(41)-(44)，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻 t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号；

[0039] 若$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始$t_s$，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定步长，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行 (41)-(44)，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\leq\hat{\tau}_*$，将该时间 窗终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第 i个局放脉冲信号。

[0040] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，按以下方法进行奇异值分解-重构：

[0041] (51)根据t_s-t_e时刻的第i个局放脉冲信号数据构建Hankel矩阵Z'：

[0042] $$Z'_{L'\times K'}=\begin{bmatrix} z'(1) & z'(2) & \cdots & z'(K) \\ z'(2) & z'(3) & \cdots & z'(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z'(L') & z'(L'+1) & \cdots & z'(N') \end{bmatrix}_{L'\times K'}$$

[0043] 式中，$K'=N'-L'+1$，$L'=N'/3$；N'为t_s-t_e时刻的局放信号序列长度；

[0044] (52)根据$Z'=C'\Sigma''D'^T$将步骤(51)构建的Hankel矩阵Z'进行奇异值分解，$Z'=C'\Sigma''D'^T$，式中C'和D'分别为$L'\times L'$维和$K'\times K'$维正交矩阵；$\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$ $(p'=\min(L',K'))$是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z'的奇异值按降序排列；取向量 $\delta'=$

$(\delta'_1,\delta'_2,\ldots,\delta'_m)$，m'为Σ''中非零元素的个数且m'≤p'，为矩阵Z'的秩；

[0045] (53)以$\hat{\tau}_r'=\omega(\beta')\cdot\mathrm{median}(\delta')$为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中 $\omega(\beta')\approx 0.56\beta'^3-0.95\beta'^2+1.82\beta'+1.43$，$\beta'=L'/K'$，median是指对矩阵δ'的绝对值取中 位数；

[0046] (54)将奇异值矩阵$\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$中低于$\hat{\tau}_r'$的奇异值设置为零，得到去 噪后的奇异值矩阵Σ'''；根据$Z''=C'\Sigma'''D'^T$得到去噪后信号的Hankel矩阵Z''；

[0047] (55)对于重构后得到的矩阵Z''，利用取平均值方式对t_s-t_e时刻的局放信号进行重构

[0048]
$$z''(n)=\begin{cases}\dfrac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}Z''(l,n-l+1), & 1\le n<L'\\ \dfrac{1}{L'}\sum_{l=1}^{L'}Z''(l,n-l+1), & L'\le n\le K'\\ \dfrac{1}{N'-n+1}\sum_{l=n-K'+1}^{L'}Z''(l,n-l+1), & n>K'\end{cases}$$

[0049] 进而得到去噪后的第i个局放脉冲信号及其在整个原始信号序列中的位置。

[0050] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，为了兼顾局放信号提取有效性和提取效率，步骤(31)中T_w取1～2μs，步骤(36)中第一设定步长N/4～N/2 个数据点，步骤(42)第二设定步长为2～5个数据点，第三设定步长为2～5个数据点。

[0051] 上述兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，提取到的局放脉冲信号主要存在以下三种情况：(1)白噪声得到有效抑制的局放脉冲信号，(2)存在明显 高频振荡噪声的局放脉冲信号，(3)去噪结果表现为高频振荡的噪声信号。为了进 一步抑制局放脉冲信号中的高频振荡噪声，步骤(6)结束后，对所提取的局放脉冲 信号进一步利用1层离散小波变换，对细节系数进行阈值去噪，该去噪方法为本领域 已经披露的常规手段，参见申请号为CN201810473326.1公开的基于小波自适应阈值 的局部放电信号去噪方法以及张波等公开的小波去噪对提高GIS超声局部放电信号 识别率的研究(张波，刘成国，徐忠，林涛，小波去噪对提高GIS超声局部放电信号识别率 的研究[J]，电气工程学报，2017，12(11)：41-45)。通过奇异值分解-离散小波联合去噪后，提取到的信号中的高频分量得到有效抑制；此外，对于误判为局放脉冲信号的噪声信 号，由于高频分量得到了明显抑制，去噪后其最大奇异值将明显小于去噪时的局部最 优奇异值阈值，进而剔除仅包含高频噪声的信号序列；对含有高频噪声的局放脉冲， 高频噪声得到进一步抑制；对于局放脉冲信号，大部分能量得到保留，去噪前后最大 奇异值变化不大，由此实现对局放脉冲的进一步提取与去噪。

[0052] 本发明进一步提供了一种电力电缆局部放电定位方法，采用所述局部放电信号处理方法提取局部脉冲信号，提取不超过设定时间间隔的两个局放脉冲信号峰值及对应 时刻t_1，t_2，依据$d=l-\dfrac{v(t_2-t_1)}{2}$确定局放源在电力电缆上的位置，d为局放源距离电力电 缆测试端的距离，l为电力电缆总长度，v为脉冲传播速度。

[0053] 与现有技术相比，本发明提供的兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，具有如下十分突出的优点和有益技术效果：

[0054] 1、本发明对局放信号，采用"先提取，后去噪"的数据处理次序，先利用奇异 值分解，将最优奇异阈值与最大奇异值进行比较，实现对局放脉冲的快速、精确定位， 并对局放脉冲进行提取，再利用奇异值重构对提取的局部脉冲信号进一步去噪，有效 避免低幅值局放脉冲信号直接被滤除。

[0055] 2、本发明在对局放信号的脉冲提取方面，基于短时随机奇异值分解与全局最优奇异阈值实现局放脉冲信号搜索起点的快速定位；同时采用短时奇异值分解与基于时 间窗内数据的局部最优奇异阈值估计的方法进行脉冲边沿搜索，可实现局放脉冲信号 起始和终止位置的精确定位，完成对局放脉冲信号的有效提取。

[0056] 3、本发明在对局放信号的去噪方面，通过局部最优奇异阈值估计的奇异值分解-重构，即使在较低信噪比条件下仍能实现局放信号白噪声的有效抑制。

[0057] 4、本发明还具有良好的拓展性，联合1层离散小波变换，对细节系数进行阈值 去噪，可进一步抑制去除白噪声后的局部信号中的高频干扰。

[0058] 5、本发明通过对电力电缆上局放脉冲信号的精准定位和有效提取，可以实现电力电缆局放源(即局部放电点)的精确定位，为确保电力电缆运行提供可靠依据。

附图说明

[0059] 图1为本发明兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法流程示意图。

[0060] 图2为本发明实施例1中绘制的局放信号；其中(a)为工频下原始局放信号，(b)为去噪后的局放信号，(c)为提取的局放脉冲信号。

[0061] 图3为本发明实施例2中绘制的局放信号；其中(a)为振荡波下原始局放信号，(b)为去噪后的局放信号。

[0062] 图4为实施例2中绘制的局放源定位示意图。

具体实施方式

[0063] 以下将结合附图给出本发明实施例，并通过实施例对本发明的技术方案进行进一步的清楚、完整说明。显然，所述实施例仅仅是本发明的一部分实施例，而不是 全部的实施例。基于本发明内容，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前 提下所得到的所有其它实施例，都属于本发明所保护的范围。

[0064] 实施例1

[0065] 本实施例针对的研究对象为预置纵向刀痕缺陷(长100mm、宽0.2mm、深1mm) 的冷缩电缆终端，电缆型号为YJV22-8.7/15，将设计有缺陷的电缆于15kV工频电 压下测试局放信号，并进行脉冲提取和去噪。

[0066] 本实施例提供的兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，如图1所示，包括以下步骤：

[0067] S1对局放信号进行滤波处理，得到局放信号序列s(n)，n=1,2,3,…,N_0，N_0为整 个局放信号序列长度。

[0068] 本实施例首先采用高频电流传感器获取电缆上的局放信号，获取的局放信号经高通滤波器输出至采集装置。本实施例采用的高通滤波器的截止频率范围为：50kHz～100kHz。本实施例采用的采集装置型号为Tektronix TDS7104，采样率设置 为50MS/s。从采

集装置得到的原始局放信号序列中选取2ms时长的原始局放信号 序列s(n)(如图2(a)所示)进行局放脉冲提取和去噪处理,n=1,2,3,…,N_0,$N_0=10^5$为整个局放信号序列长度。

[0069] S2由局放信号序列s(n)的白噪声标准差η计算确定局放信号全局最优奇异阈值τ_*:

[0070] S21确定局放信号序列s(n)的白噪声标准差:利用小波(母小波选择'db8') 对局放信号序列s(n)进行小波分解,取第一层小波细节系数$w_{1,j}$,并利用第一层小 波细节系数构建1×j矩阵,j=N_0/2,以$\eta \approx \frac{\mathrm{median}(|w_{1,j}|)}{0.6745}$为近似估计白噪声标准差, 其中median是指对矩阵元素$w_{1,j}$的绝对值取中位数;

[0071] S22按以下公式计算局放信号全局最优奇异阈值τ_*,$\tau_* = \lambda_*(\beta)\cdot\sqrt{K_0}\eta$,式中 $\lambda_*(\beta)=\sqrt{2(\beta+1)+\frac{8\beta}{\beta+1+\sqrt{\beta^2+14\beta+1}}}$,$\beta=L_0/K_0$,$K_0=N_0-L_0+1$;$L_0=N_0/10$,$N_0=10^5$。

[0072] S3利用随机奇异值分解得到最大奇异值,确定局放脉冲搜索位置起始点:

[0073] S31利用长度为T_W(1.5μs)的时间窗从局部信号序列s(n)中截取局放信号片 段y(n),n=1,2,3,…,N,N=76为时间窗内局放信号序列长度;

[0074] S32构建Hankel矩阵$A_{L\times K}$:

[0075] $$A_{L\times K}=\begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(K) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(L) & y(L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

[0076] 式中,L=25,K=N-L+1=52;

[0077] S33计算矩阵Y=A•X,X为利用matlab中randn函数构建的K×2阶随机矩阵 X=randn(52,2),并利用matlab中orth函数将矩阵Y正交规范化,得到L×2阶正交 基W_1;

[0078] S34计算矩阵B=W_1^T•A;

[0079] S35根据B=UΣV^T将矩阵B奇异值分解,式中,U和V分别为2×2维和52 ×52维正交矩阵;$\Sigma=\begin{bmatrix}\sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2\end{bmatrix}$是对角矩阵,其对角元素为矩阵B的奇异值按降序 排列,σ_1即为最大奇异值σ_{max};

[0080] S36将σ_{max}与步骤S2中计算得到的全局最优奇异阈值τ_*比较,若$\sigma_{max}\geq\tau_*$,将 该时间窗起始时刻记录为脉冲搜索起始时刻t_i,进入步骤S4;i表示提取脉冲数, 每提取完一个脉冲信号,提取脉冲数就增加1,进行下一个脉冲信号的提取;若 $\sigma_{max}<\tau_*$,时间窗沿序列终止的方向滑动一步第一设定步长(38个数据点),利用 时间窗重新截取局部信号段返回执行S31-S36,重新构建矩阵,计算σ_{max},与τ_*比 较,循环直至$\sigma_{max}\geq\tau_*$。

[0081] S4执行边搜索,得到第i个局放脉冲信号:

[0082] S41将时间窗内的局放信号数据构建Hankel矩阵Z:

[0083] $$Z_{L\times K}=\begin{bmatrix} z(1) & z(2) & \cdots & z(K) \\ z(2) & z(3) & \cdots & z(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z(L) & z(L+1) & \cdots & z(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

[0084] 式中，L＝25，K＝N-L+1＝52；

[0085] S42根据Z＝CΣ′D^T将步骤S41构建的Hankel矩阵Z进行奇异值分解，Z＝CΣ′D^T，式中C和D分别为25×25维和52×52维正交矩阵；Σ′＝diag($\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_p$)（p＝25）是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z的奇异值按降序排列；取向量 δ＝($\delta_1,\delta_2,\ldots,\delta_m$)，m为Σ′中非零元素的个数且m≤p，为矩阵Z的秩；δ_1为最大奇异 值δ_{max}；

[0086] S43以 $\hat{\tau}_* = \omega(\beta)\cdot \mathrm{median}(\delta)$ 为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中 ω(β)≈$0.56\beta^3-0.95\beta^2+1.82\beta+1.43$，β＝L/K，median是指对矩阵δ的绝对值取中位 数；

[0087] S44将最优奇异估计阈值 $\hat{\tau}_*$ 与最大奇异值δ_{max}比较：

[0088] 若 $\delta_{max} > \hat{\tau}_*$，需要完成以下两步：①时间窗沿序列起始的方向滑动一步第二设定步长（3个数据点），利用时间窗重新截取局部信号段返回执行S41-S44，重新构建 矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max} \le \hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉 冲提取的起始$t_s$；②将时间窗返回至脉冲搜索起始时刻$t_i$，并将时间窗沿序列终止的 方向滑动一步第三设定步长（3个数据点），利用时间窗重新截取局部信号段返回执 行S41-S44，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max} \le \hat{\tau}_*$，将该时间窗 终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第i 个局放脉冲信号；

[0089] 若 $\delta_{max} \le \hat{\tau}_*$，时间窗默认从局放信号序列的起始位置开始搜索，将该时间窗起始时刻记录为局放脉冲提取的起始t_s，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设定 步长（3个数据点），利用时间窗重新截取局部信号段返回执行S41-S44，重新构建 矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max} \le \hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放脉 冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号。

[0090] S5对步骤S4提取到的第i个局放脉冲信号进行奇异值分解-重构，得到去噪后的第i个局放脉冲信号：

[0091] S51根据t_s-t_e时刻的第i个局放脉冲信号数据构建Hankel矩阵Z′：

[0092] $$Z'_{L'\times K'}=\begin{bmatrix} z'(1) & z'(2) & \cdots & z'(K) \\ z'(2) & z'(3) & \cdots & z'(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z'(L') & z'(L'+1) & \cdots & z'(N') \end{bmatrix}_{L'\times K'}$$

[0093] 式中，K′＝N′-L′+1，L′＝N′/3；N′为t_s-t_e时刻的局放信号序列长度；

[0094] S52根据Z′＝C′Σ″D'^T将步骤S51构建的Hankel矩阵Z′进行奇异值分解，Z′＝C′Σ″D'^T，式中C′和D′分别为L′×L′维和K′×K′维正交矩阵；Σ″＝diag($\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'}$)（p′＝min(L′,K′)）是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z′的奇异值按降序排列；取向 量δ′＝

$(\delta'_1,\delta'_2,\ldots,\delta'_{m'})$，m'为Σ"中非零元素的个数且m'≤p'，为矩阵Z'的秩；

[0095] S53以 $\hat{\tau}_*'=\omega(\beta')\cdot\mathrm{median}(\delta')$ 为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中 $\omega(\beta')\approx 0.56\beta'^3-0.95\beta'^2+1.82\beta'+1.43$，$\beta'=L'/K'$，median是指对矩阵δ'的绝对值取中 位数；

[0096] S54将奇异值矩阵 $\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$ 中低于 $\hat{\tau}_*'$ 的奇异值设置为零，得到去 噪后的奇异值矩阵Σ"'；根据Z"＝C'Σ"'D'T得到去噪后信号的Hankel矩阵Z"；

[0097] S55对于重构后得到的矩阵Z"，利用取平均值方式对 t_s-t_e 时刻的局放信号进行重构

[0098]
$$z''(n)=\begin{cases}\dfrac{1}{n}\sum\limits_{l=1}^{n}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & 1\le n<L'\\ \dfrac{1}{L'}\sum\limits_{l=1}^{L'}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & L'\le n\le K'\\ \dfrac{1}{N'-n+1}\sum\limits_{l=n-K'+1}^{L'}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & n>K'\end{cases}$$

[0099] 进而得到去噪后的第i个局放脉冲信号及其在整个原始信号序列中的位置，如图2(c)所示。

[0100] S6得到去噪后的第i个局放脉冲信号之后返回步骤S3-S5搜索并提取下一个局放脉冲(即第i+1个局放脉冲信号)，直至搜索到原始局放信号末端，将非局放脉冲序 列全部设置为零，完成局放脉冲提取和信号去噪。

[0101] S7对上述提取的局放脉冲信号进行一层离散小波去噪，滤除高频干扰，最终得 到的局放信号如图2(b)所示，从图中可以看出，原始局放信号中的白噪声得到了 有效抑制，同时低幅值局放脉冲信号也被准确的提取了出来。

[0102] 实施例2

[0103] 本实施例针对的研究对象为长度498m 10kV XLPE电缆(距测试端249m中间 接头处预设半导电层搭接不良缺陷)。将设计有缺陷的电缆于振荡波下测试局放信 号，并进行脉冲提取和去噪，实现缺陷定位。

[0104] 本实施例提供的兼顾脉冲提取和信号去噪的局部放电信号处理方法，如图1所示，包括以下步骤：

[0105] S1对局放信号进行滤波处理，得到局放信号序列s(n)，n＝1,2,3,…,N_0，N_0为整 个局放信号序列长度。

[0106] 本实施例首先在振荡波条件(最高电压不超过20kV，频率为67Hz)下，采用 高频电流传感器获取电缆上的局放信号，获取的局放信号经高通滤波器输出至采集 装置。本实施例采用的高通滤波器的截止频率范围为：50kHz～100kHz。本实施例 采用的采集装置型号为Tektronix TDS7104，采样率为50MS/s。从采集装置得到的 原始局放信号序列中选取6ms时长的原始局放信号序列s(n)(如图3(a)所示)进 行局放脉冲提取和去噪处理，n＝1,2,3,…,N_0，$N_0=3\times10^5$为整个局放信号序列长度。

[0107] S2由局放信号序列s(n)的白噪声标准差η计算确定局放信号全局最优奇异阈值 τ_*；

[0108] S21确定局放信号序列s(n)的白噪声标准差：利用小波(母小波选择'db8')对局放信号序列s(n)进行小波分解，取第一层小波细节系数$w_{1,j}$，并利用第一层小波细节系数构建1×j矩阵，$j=N_0/2$，以$\eta \approx \frac{\mathrm{median}(|w_{1,j}|)}{0.6745}$为近似估计白噪声标准差，其中median是指对矩阵元素$w_{1,j}$的绝对值取中位数；

[0109] S22按以下公式计算局放信号全局最优奇异阈值τ_*，$\tau_* = \lambda_*(\beta)\cdot\sqrt{K_0}\eta$，式中$\lambda_*(\beta)=\sqrt{2(\beta+1)+\frac{8\beta}{\beta+1+\sqrt{\beta^2+14\beta+1}}}$，$\beta=L_0/K_0$，$K_0=N_0-L_0+1$；$L_0=N_0/10$，$N_0=3\times10^5$。

[0110] S3利用随机奇异值分解得到最大奇异值，确定局放脉冲搜索位置起始点：

[0111] S31利用长度为T_W(1.5μs)的时间窗从局部信号序列s(n)中截取局放信号片段y(n)，n=1,2,3,…,N，N=76为时间窗内局放信号序列长度；

[0112] S32构建Hankel矩阵$A_{L\times K}$：

[0113] $$A_{L\times K}=\begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(K) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(L) & y(L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

[0114] 式中，L=25，K=N-L+1=52；

[0115] S33计算矩阵Y=A•X，X为利用matlab中randn函数构建的K×2阶随机矩阵X=randn(52,2)，并利用matlab中orth函数将矩阵Y正交规范化，得到L×2阶正交基W_1；

[0116] S34计算矩阵$B=W_1^T\bullet A$；

[0117] S35根据$B=U\Sigma V^T$将矩阵B奇异值分解，式中，U和V分别为2×2维和52×52维正交矩阵；$\Sigma=\begin{bmatrix}\sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2\end{bmatrix}$是对角矩阵，其对角元素为矩阵B的奇异值按降序排列，σ_1即为最大奇异值σ_{max}；

[0118] S36将σ_{max}与步骤S2中计算得到的全局最优奇异阈值τ_*比较，若$\sigma_{max}\geq\tau_*$，将该时间窗起始时刻记录为脉冲搜索起始时刻t_i，进入步骤S4；i表示提取脉冲数，每提取完一个脉冲信号，提取脉冲数就增加1，进行下一个脉冲信号的提取；若$\sigma_{max}<\tau_*$，时间窗沿序列终止的方向滑动一步第一设定步长(38个数据点)，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行S31-S36，重新构建矩阵，计算σ_{max}，与τ_*比较，循环直至$\sigma_{max}\geq\tau_*$。

[0119] S4执行边搜索，得到第i个局放脉冲信号：

[0120] S41将时间窗内的局放信号数据构建Hankel矩阵Z：

[0121] $$Z_{L\times K}=\begin{bmatrix} z(1) & z(2) & \cdots & z(K) \\ z(2) & z(3) & \cdots & z(K+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z(L) & z(L+1) & \cdots & z(N) \end{bmatrix}_{L\times K}$$

[0122] 式中，L=25，K=N-L+1=52；

[0123] S42根据$Z=C\Sigma'D^T$将步骤S41构建的Hankel矩阵Z进行奇异值分解，$Z=C\Sigma'D^T$，式中C和D分别为25×25维和52×52维正交矩阵；$\Sigma'=\mathrm{diag}(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_p)$ (p=25)是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z的奇异值按降序排列；取向量 $\delta=(\delta_1,\delta_2,\ldots,\delta_m)$，m为$\Sigma'$中非零元素的个数且m≤p，为矩阵Z的秩；$\delta_1$为最大奇异 值$\delta_{max}$；

[0124] S43以$\hat{\tau}_*=\omega(\beta)\cdot\mathrm{median}(\delta)$为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中 $\omega(\beta)\approx0.56\beta^3-0.95\beta^2+1.82\beta+1.43$，$\beta=L/K$，median是指对矩阵δ的绝对值取中位 数；

[0125] S44将最优奇异估计阈值$\hat{\tau}_*$与最大奇异值δ_{max}比较；

[0126] 若$\delta_{max}>\hat{\tau}_*$，需要完成以下两步：①时间窗沿序列起始的方向滑动一步第二设定步长(3个数据点)，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行S41-S44，重新构建 矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗起始时刻记录为局放脉 冲提取的起始$t_s$；②将时间窗返回至脉冲搜索起始时 刻$t_1$，并将时间窗沿序列终止的 方向滑动一步第三设定步长(3个数据点)，利用时间窗重新截取局部信号段返回执 行S41-S44，重新构建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗 终止时刻记录为局放脉冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第i 个局放脉冲信号；

[0127] 若$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，时间窗默认是从局放信号序列的起始位置开始搜索，将该时间窗起始时 刻记录为局放脉冲提取的起始t_s，并将时间窗沿序列终止的方向滑动一步第三设 定步长(3个数据点)，利用时间窗重新截取局部信号段返回执行S41-S44，重新构 建矩阵，计算δ_{max}，与$\hat{\tau}_*$比较，循环直至$\delta_{max}\le\hat{\tau}_*$，将该时间窗终止时刻记录为局放 脉冲提取的结束时刻t_e；提取t_s-t_e时刻的局放信号数据即为第i个局放脉冲信号。

[0128] S5对步骤S4提取到的第i个局放脉冲信号进行奇异值分解-重构，得到去噪后的第i个局放脉冲信号；

[0129] S51根据t_s-t_e时刻的第i个局放脉冲信号数据构建Hankel矩阵Z'；

[0130] $$Z'_{L'\times K'}=\begin{bmatrix} z'(1) & z'(2) & \cdots & z'(K') \\ z'(2) & z'(3) & \cdots & z'(K'+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z'(L') & z'(L'+1) & \cdots & z'(N') \end{bmatrix}_{L'\times K'}$$

[0131] 式中，K'=N'-L'+1，L'=N'/3；N'为t_s-t_e时刻的局放信号序列长度；

[0132] S52根据$Z'=C'\Sigma''D'^T$将步骤S51构建的Hankel矩阵Z'进行奇异值分解，$Z'=C'\Sigma''D'^T$，式中C'和D'分别为L'×L'维和K'×K'维正交矩阵；$\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$ ($p'=\min(L',K')$)是对角矩阵，其对角元素为矩阵Z'的奇异值按降序排列；取向量 $\delta'=(\delta'_1,\delta'_2,\ldots,\delta'_{m'})$，m'为$\Sigma''$中非零元素的个数且m'≤p'，为矩阵Z'的秩；

[0133] S53以$\hat{\tau}_*'=\omega(\beta')\cdot\mathrm{median}(\delta')$为数据框内数据的局部最优奇异估计阈值，式中 $\omega(\beta')\approx0.56\beta'^3-0.95\beta'^2+1.82\beta'+1.43$，$\beta'=L'/K'$，median是指对矩阵δ'的绝对值取中 位数；

[0134] S54将奇异值矩阵$\Sigma''=\mathrm{diag}(\delta'_1,\delta'_2,\cdots,\delta'_{p'})$中低于$\hat{\tau}_*'$的奇异值设置为零，得到

去噪后的 奇异值矩阵 Σ''^{s}；根据 $Z''=C'\Sigma''D'^{T}$ 得到去噪后信号的Hankel矩阵Z"；

[0135] S55对于重构后得到的矩阵Z"，利用取平均值方式对 t_s-t_e 时刻的局放信号进行重构

[0136]
$$z''(n)=\begin{cases}\frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & 1\le n<L'\\ \frac{1}{L'}\sum_{l=1}^{L'}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & L'\le n\le K'\\ \frac{1}{N'-n+1}\sum_{l=n-K'+1}^{L'}\boldsymbol{Z}''(l,n-l+1), & n>K'\end{cases}$$

[0137] 进而得到去噪后的第i个局放脉冲信号及其在整个原始信号序列中的位置。

[0138] S6得到去噪后的第i个局放脉冲信号之后返回步骤S3-S5搜索并提取下一个局放脉冲(即第i+1个局放脉冲信号)，直至搜索到原始局放信号末端，将非局放脉冲序 列全部设置为零，完成局放脉冲提取和信号去噪。

[0139] S7对上述提取的放脉冲信号进行一层离散小波去噪，滤除高频干扰，最终得到 的局放信号如图3(b)所示，其下方为局放信号图中虚框对应所提取的局放脉冲信 号放大图。从图中可以看出，原始局放信号中的白噪声得到了有效抑制，同时低幅值 局放脉冲信号也被准确的提取了出来。

[0140] 对步骤S7中得到的去噪后的局放信号，提取时间间隔不超过6μs的两个局放脉 冲信号峰值及对应时刻 t_1，t_2。通过校准，脉冲传播速度为v＝163.23m/μs，通过下式计 算局放源距测试端距离 $d=l-\frac{v(t_2-t_1)}{2}$，l为电缆总长度。经多次计算取平均值后可得，局放源位于距离测试端247.17m处(如图4所示)，与初始预设缺陷位置(距测试端 249m)基本吻合。因此，通过本发明提供的局部放电信号处理方法，可以精确定位 和有效提取局放脉冲信号，进而精确获取局放源的位置。

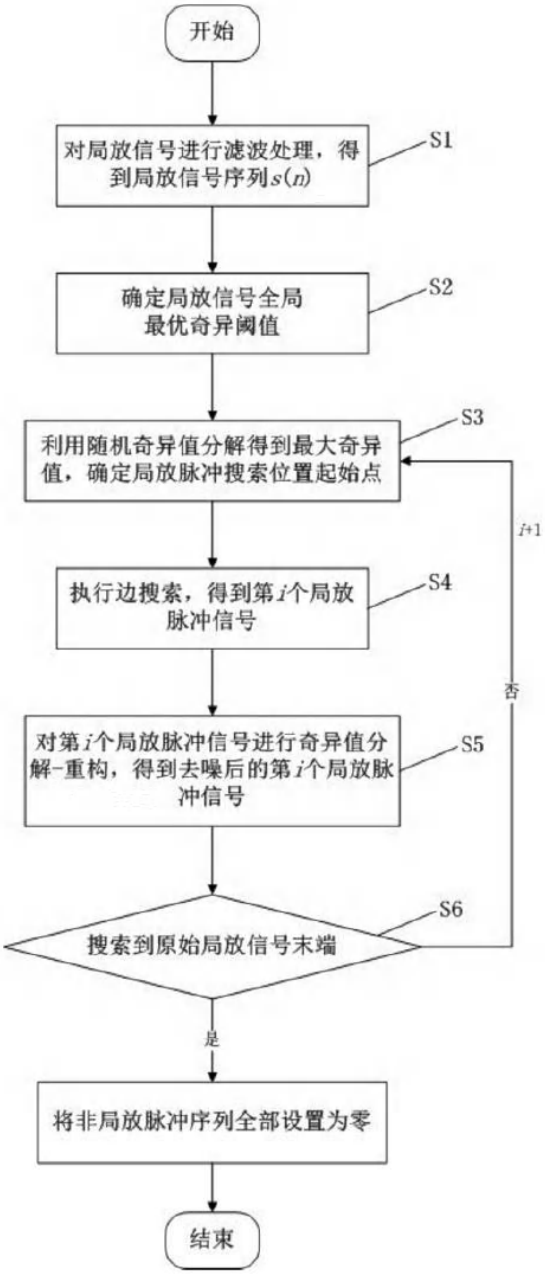
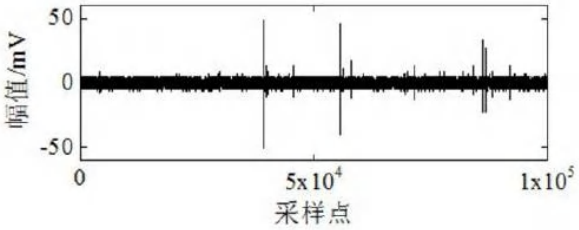
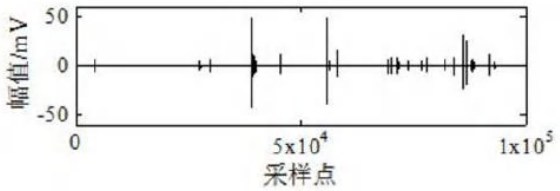

开始
对局放信号进行滤波处理，得到局放信号序列s(n)
S1
确定局放信号全局最优奇异阈值
S2
利用随机奇异值分解得到最大奇异值，确定局放脉冲搜索位置起始点
S3
执行边搜索，得到第i个局放脉冲信号
S4
对第i个局放脉冲信号进行奇异值分解-重构，得到去噪后的第i个局放脉冲信号
S5
搜索到原始局放信号末端
S6
i+1
否
是
将非局放脉冲序列全部设置为零
结束

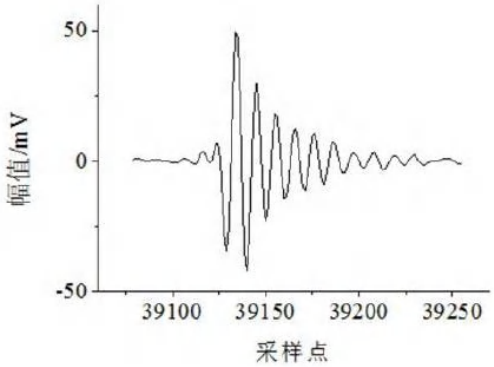
图1


50
0
-50
幅值/mV
0
5x10^4
1x10^5
采样点

（a）

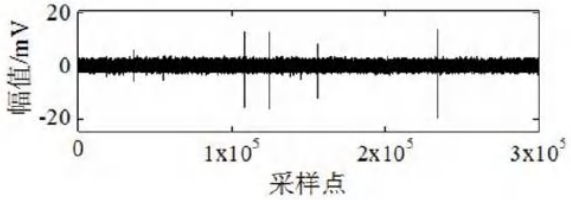

50
0
-50
幅值/mV
0
5x10^4
1x10^5
采样点

（b）

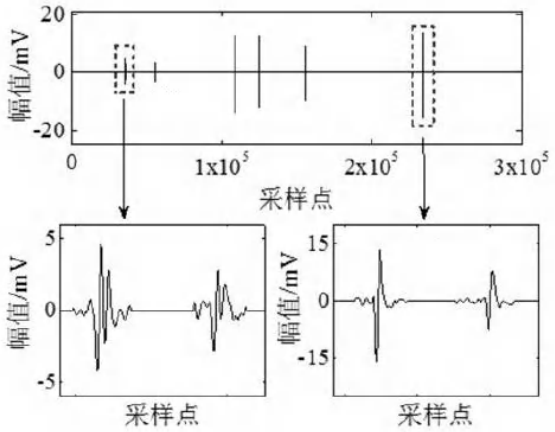

50
0
-50
幅值/mV
39100
39150
39200
39250
采样点

（c）

图2


20
0
-20
幅值/mV
0
1x10^5
2x10^5
3x10^5
采样点

(a)


20
0
-20
幅值/mV
0
1x10^5
2x10^5
3x10^5
采样点
5
0
-5
幅值/mV
采样点
15
0
-15
幅值/mV
采样点

(b)

图3

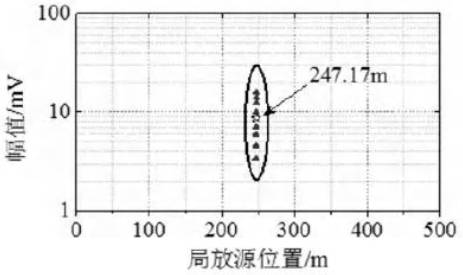

100
10
1
幅值/mV
247.17m
0
100
200
300
400
500
局放源位置/m

图4