

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.11.026

基于小波分解与谱减法的变压器噪声测量预处理方法

彭 鹏¹, 吴晓文², 陈 炜², 罗 潇¹, 卢 铃², 曹 浩²,
黄 韬², 胡 胜²

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200025; 2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 长沙 410007)

摘要: 在户外对变压器进行噪声测试时,测试结果往往容易受到外界环境噪声的影响。由于环境噪声类型较为复杂,且其产生与持续时间具有不确定性和非平稳性,大部分的测量仪器无法对其进行有效的处理。因此,为了提高变压器噪声测量的准确性,需要对采集到的原始噪声信号进行预处理。文中提出了一种基于小波分解与谱减法相结合的变压器噪声预处理方法,采用小波包分析算法将变压器声信号时频分解,对分解后的带噪频段小波包信号进行谱减法语音处理。理论分析结果与变电站实测带噪信号分析结果表明,该方法能够有效抑制变电站环境噪声对变压器噪声测量结果的干扰。所提出的方法对于输变电工程噪声检测以及基于噪声检测的变压器运行状态评价具有参考意义。

关键词: 变压器; 背景噪声; 小波包; 谱减法

Preprocessing Method for Transformer Noise Measurement Based on Wavelet Packet Decomposition and Spectral Subtraction Algorithm

PENG Peng¹, WU Xiaowen², CHEN Wei², LUO Xiao¹, LU Ling², CAO Hao²,
HUANG Tao², HU Sheng²

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200025, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: To suppress the effect of ambient noise on outdoor transformer noise measurement and improve the measurement accuracy, a method for preprocessing the collected noise signal based on the wavelet packet decomposition and spectral subtraction algorithm is proposed. The collected noise signal is decomposed into several bands with different frequency range by means of the wavelet packet analysis. Then, the signals of these bands are further processed by spectral subtraction method. Both theoretical analysis and measured noise signal analysis show that the proposed method is effective in restraining the effect of ambient noise on the transformer noise measurement. The proposed method can be referenced for the noise measurement of power transmission and transformation projects, and for the operation state assessment of transformer based on noise measurement.

Key words: transformer; ambient noise; wavelet packet; spectral subtraction

0 引言

变压器噪声的准确检测对于其环境影响评价、验收投运以及运行状态评价均具有重要意义^[1-4]。然而,对于位于户外的变压器,其周边声环境较为

复杂,在对其进行噪声检测时,测量过程往往容易受到外界环境噪声的干扰,如:马达声、鸣笛声、鸟鸣以及虫鸣声等,从而对变压器噪声达标结果及其运行状态的判断产生严重影响。

目前,主要采用声级计或者多通道信号采集系

收稿日期:2019-03-27; 修回日期:2019-05-06

基金项目:上海市科学技术委员会(18511109402);国网上海市电力公司科技项目(520970170005, 52097018000A);国家自然科学基金(51877168)。

Project Supported by Science and Technology Commission of Shanghai(18511109402), State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company(520970170005, 52097018000A), National Natural Science Foundation of China(51877168).

统等常规测量设备对变压器噪声进行检测,无法对外界环境噪声干扰进行有效处理,导致测量时间较长、测量结果的准确性较差。为了解决变压器可听噪声测试易受外界干扰的问题,文[5]对背景噪声与待测声信号进行相关性分析,找出频带中二者重叠部分,利用分时测量方法去除变电站背景噪声;文[6]采用通带与阻带梳状滤波器从变电站混合声信号中分离出变压器声信号。然而,由于变电站背景噪声复杂,发生的时刻与强度具有随机性,仅采用基于频域滤波技术的方法难以满足现场检测要求。

文中提出一种基于小波包分解与谱减法相结合的变压器噪声测量预处理方法。由于外界环境噪声与变压器噪声时频域特性存在一定差异,首先采用小波包分析算法对变压器声信号进行时频分解,然后对分解后的各频段小波信号进行谱减法语音处理,从而有效地消除测量信号中的变电站周围环境噪声的影响。所提出的方法对于变压器或者变电站噪声的准确检测具有参考意义。

1 变压器噪声信号预处理方法

1.1 小波分解与小波包分解算法

小波分析是一种变分辨率的时频分析方法,其特点在于:分析低频信号时,其时间窗较大;而分析高频信号时,其时间窗较小。

设函数 $\psi(t) \in L^2(R)$, 若 $\psi(t)$ 的傅里叶变换函数 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足完全重构条件^[7]

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\psi(t)$ 为基本小波。

将基本小波进行伸缩、平移可知

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式(2)中: a 为伸缩参数; b 为平移参数。

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 其连续小波变换可表述为

$$\begin{cases} W_f(a,b) \leq f \\ \psi_{a,b} \geq |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \end{cases} \quad (3)$$

与式(3)相对应的逆变换(重构公式)为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

为便于计算,提高运算效率,需要将式(3)与式(4)中的尺度参数 a 与平移参数 b 进行离散化处理。通常将尺度参数 a 按幂级数进行离散,将平移参数 b

进行均匀离散,即:

$$a = a_0^m \quad (5)$$

$$b = nb_0 a_0^m \quad (6)$$

式(5)、(6)中: m 与 n 为整数; a_0 一般取为 2; b_0 为大于 0 的常数,一般取为 1。

相较于小波分析,小波包分析方法能够对信号进行更多层次划分,对于小波分析中没有细分的高频部分进一步分解,提高了时频分辨率。

定义子空间 U_j^n 为函数 $u_n(t)$ 的闭包空间,子空间 U_j^{2n} 为函数 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间,令 $u_n(t)$ 满足如下双尺度方程,即^[8-10]

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h(k) u_n(2t-k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g(k) u_n(2t-k) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: t 为时间变量; k 为位置指标; n 为频率指标; Z 为整数集合; $h(k)$ 为正交尺度函数 $\phi(t)$ 对应的正交低通实系数滤波器; $g(k)$ 为正交小波函数 $\psi(t)$ 对应的高通滤波器, $g(k) = (-1)^k h(1-k)$ 。

由式(7)构造的序列 $\{u_n(t)\}$ 称为由基函数 $u_0(t) = \varphi(t)$ 确定的正交小波包,其中 $\varphi(t)$ 为尺度函数。

设函数 $g_j^n(t) \in U_j^n$, 则 g_j^n 可表示为

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j,n} u_n(2^j t - l) \quad (8)$$

式(8)中: l 为整数; j 为尺度因子; $d_l^{j,n}$ 为小波包分解系数。

小波包分解算法由 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 求解 $\{d_l^{j,2n}\}$ 与 $\{d_l^{j,2n+1}\}$, 即:

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1,n} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, a_{k-2l} 和 b_{k-2l} 为多分辨率分析中的滤波系数。

小波包分析算法的滤波原理在于:基于信号及噪声在尺度上的不同性质,采用相应的规则,对含噪声信号的小波系数进行取舍、抽取或切削等非线性处理,从而实现信号滤波。

1.2 谱减法语音增强技术

谱减法是处理宽带噪声较为有效的方法,其基本原理为在假设噪声 $r(n)$ 与语音信号 $s(n)$ 相互独立的前提下,从带噪语音信号 $y(n)$ 的功率谱 $P_y(\omega)$ 中减去噪声功率谱 $P_n(\omega)$, 从而得到较为纯净的语音频谱^[11-15], 见图 1。图 1 中, $\Psi(\omega)$ 为混合噪声信号的相位谱。

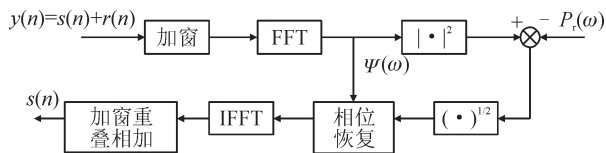


图1 谱减法语音增强技术原理图

Fig. 1 Principal diagram of the speech enhancement technique based on spectral subtraction algorithm

对带噪信号进行分帧处理,第 λ 帧信号的加窗傅里叶变换为

$$Y(k, \lambda) = \sum_{\mu=0}^{N-1} y(\lambda R + \mu) h(\mu) \exp(-j \frac{2\pi \mu k}{N}) \quad (10)$$

式(10)中: $Y(k, \lambda)$ 为带噪信号频谱; $k=0, 1, \dots, N-1$ 为频率点; R 为帧移; N 为帧长; $h(\mu)$ 为窗函数。

对式(10)进行 Fourier 变换,则有

$$Y(k, \lambda) = S(k, \lambda) + R(k, \lambda) \quad (11)$$

式(11)中: $S(\omega)$ 与 $R(\omega)$ 分别表示信号 $s(n)$ 以及 $r(n)$ 的 Fourier 变换。由于信号 $s(n)$ 与 $r(n)$ 相互独立,则信号功率谱满足式(12)

$$|Y(k, \lambda)|^2 = |S(k, \lambda)|^2 + |R(k, \lambda)|^2 \quad (12)$$

令 $P_y(k, \lambda)$ 、 $P_s(k, \lambda)$ 以及 $P_r(k, \lambda)$ 分别表示信号 $y(n)$ 、 $s(n)$ 以及 $r(n)$ 第 λ 帧的功率谱,则有

$$P_y(k, \lambda) = P_s(k, \lambda) + P_r(k, \lambda) \quad (13)$$

由于变压器本体噪声在外界环境噪声发生前后与发生期间基本不变,因此,可以通过环境噪声未发生时的“寂静段”来估计变压器本体噪声的功率谱。

$$P_s(k, \lambda) = \begin{cases} P_y(k, \lambda) - P_r(k, \lambda) & P_y(k, \lambda) > P_r(k, \lambda) \\ 0 & P_y(k, \lambda) \leq P_r(k, \lambda) \end{cases} \quad (14)$$

为了防止出现负功率谱,当混合噪声功率谱小于本体噪声功率谱时,环境噪声功率谱取为0。由式(14)计算出的功率谱可认为是较为纯净的外界环境噪声功率谱。

2 噪声信号预处理效果理论分析

为检验预处理方法的有效性,文中将针对“鸟鸣”、“蛙鸣”以及“虫鸣”等几种典型的环境背景噪声,对其与主变噪声的混合信号进行滤波处理,分析该预处理方法的滤波效果。

2.1 主变“鸟鸣”背景噪声滤波

变压器与“鸟鸣”背景噪声见图2,某实际110 kV主变噪声信号 s_1 声压级为59.8 dB(A),“鸟鸣”信号 s_2 声压级为60.4 dB(A)。空气中不同声源的混合声信号是各声源声压信号线性叠加的结果,假设叠加因子为1.2,忽略信号相位变化,则混合信号 s_m 为 $s_m = s_1 + 1.2s_2$,声压级为63.1 dB(A),信噪比为27.7 dB。

显然,此时直接测量得出的变压器噪声与实际噪声水平相差较大,误差为3.3 dB(A)。

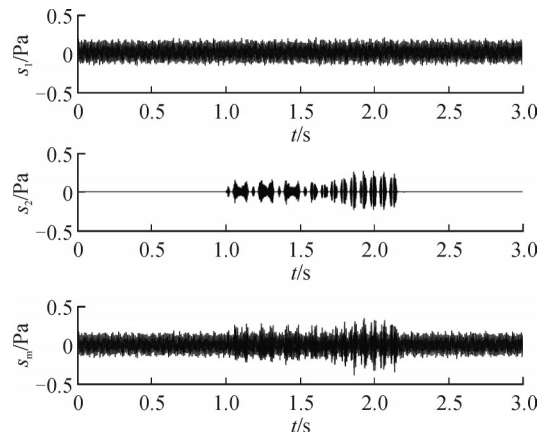


图2 变压器与“鸟鸣”背景噪声

Fig. 2 Transformer and background bird noise

选用db4小波基函数、Shannon熵标准对混合信号 s_m 进行3层小波包分解,分解结果见图3。由图3可知,鸟鸣声主要集中在1 kHz以上频段。

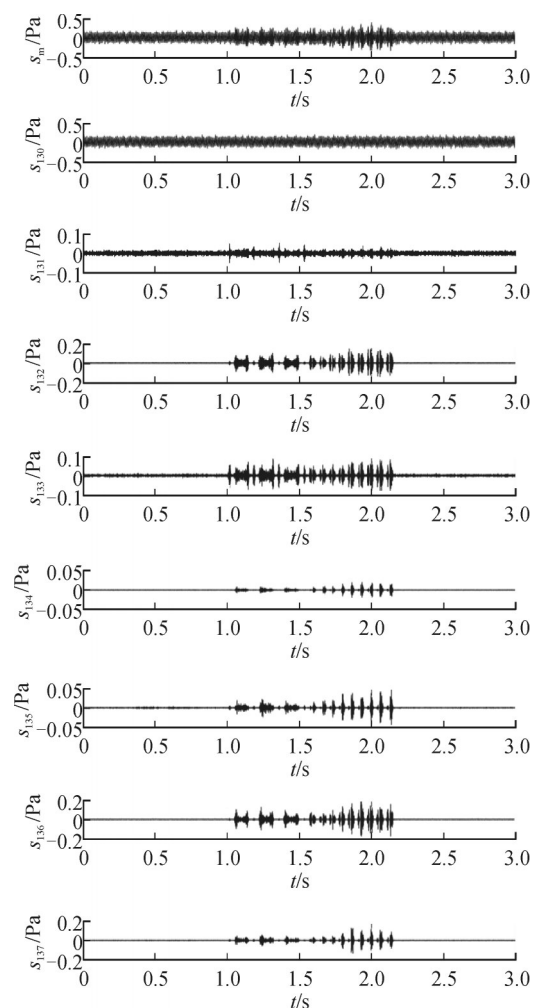


图3 原始变压器噪声小波包分解

Fig. 3 Wavelet packet decomposition of the original transformer noise

由于原始声信号中前1 s时间内无鸟鸣声,因此可选择该段时间内的4帧数据作为“寂静段”用以求解功率谱,帧长为882,帧移为441。分别利用谱减法对信号 $s_{131} \sim s_{137}$ 进行滤波处理。FFT反变换后,分离出的纯净变压器噪声信号 p_t 与鸟鸣声信号 p_b 见图4。从图4可以看出,变压器噪声源信号 s_1 与分离出的纯净变压器噪声信号 p_t 、鸟鸣声源信号 s_2 与分离出的纯净鸟鸣声信号 p_b 波形十分吻合。

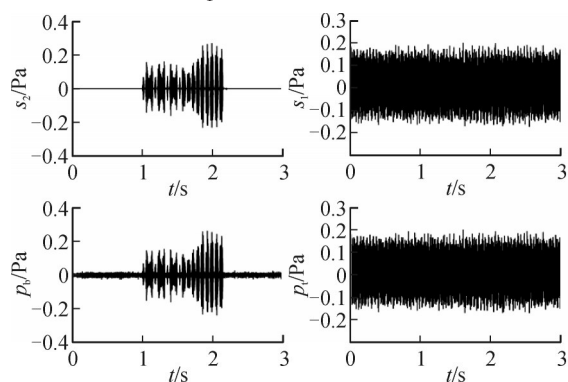


图4 分离后的变压器与鸟鸣声信号

Fig. 4 Processed pure transformer and bird noise

变压器噪声源信号 s_1 与分离出的纯净变压器噪声信号 p_t 频谱对比见图5。二者频谱分布与幅值具有很高的-致性,频谱相关系数约为1.0。经过声压级计算,分离后的纯净变压器噪声信号 p_t 与鸟鸣声信号 p_b 声压级分别为59.5 dB(A)与60.6 dB(A),分别与源信号相差0.3 dB(A)与0.2 dB(A)。由此可见,采取基于小波包分解与谱减法相结合的方法滤波预处理后,变压器噪声信号测试精度大大提高,有效降低了“鸟鸣”背景噪声对变压器噪声测试结果的影响。

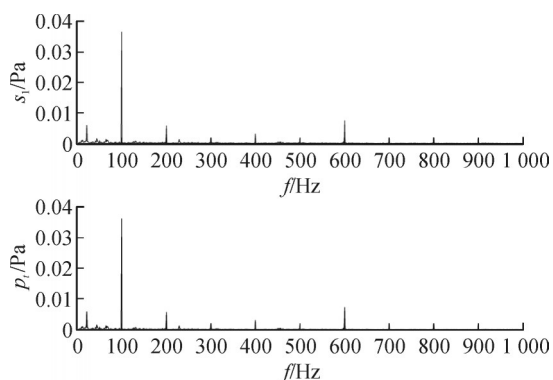


图5 分离后的变压器声信号与源信号频谱对比

Fig. 5 Spectral comparison of the processed and source transformer noises

2.2 主变“蛙鸣”背景噪声滤波

同理,某实际110 kV主变噪声信号 s_1 声压级为59.8 dB(A),假设“蛙鸣”信号 s_2 声压级为58.9 dB(A),

原始变压器与“蛙鸣”背景噪声信号见图6。假设线性叠加因子为0.2,忽略信号相位变化,混合信号 s_m 为 $s_m = s_1 + 0.2s_2$,声压级为61.7 dB(A),信噪比为16.5 dB。此时,直接测量得出的变压器噪声与实际噪声水平误差为1.9 dB(A)。对混合信号 s_m 进行3层小波包分解,结果见图7。由图7可知,蛙鸣声主要分布在 $s_{131} \sim s_{137}$ 等4个频带范围内。

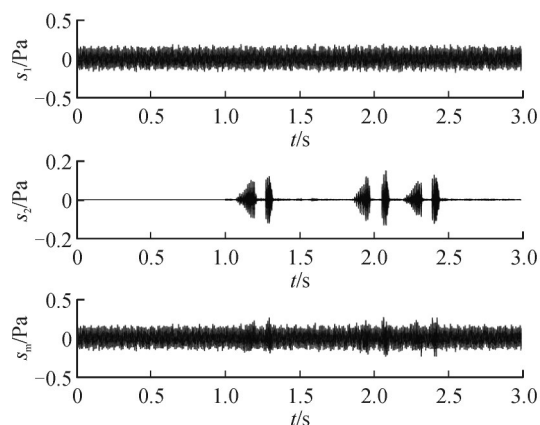


图6 变压器与“蛙鸣”背景噪声

Fig. 6 Transformer and background frog noise

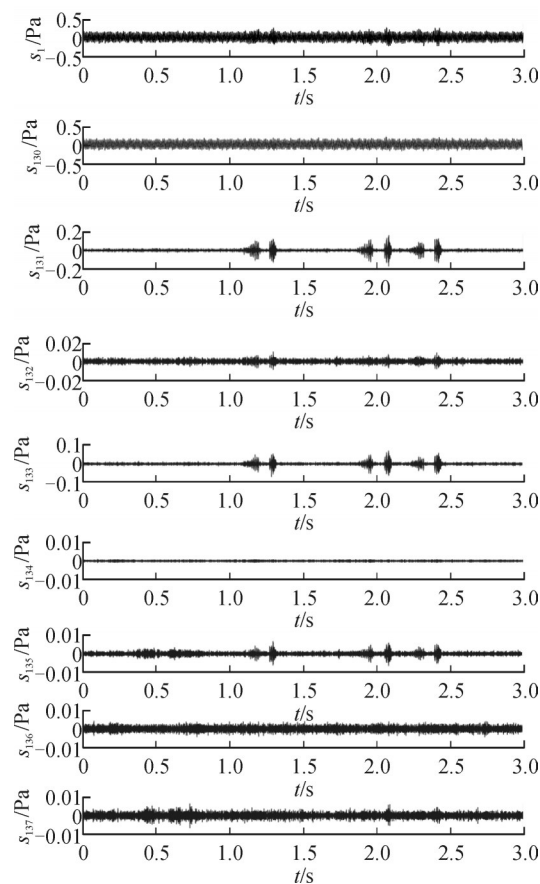


图7 原始变压器噪声小波包分解

Fig. 7 Wavelet packet decomposition of the original transformer noise

利用谱减法对上述信号进行滤波处理。FFT反

变换后, 分离出的纯净变压器噪声信号 p_t 与蛙鸣声信号 p_f 见图 8。变压器噪声源信号 s_1 与分离出的纯净变压器噪声信号 p_t 、蛙鸣声源信号 s_2 与分离出的纯净蛙鸣声信号 p_f 波形较为接近。

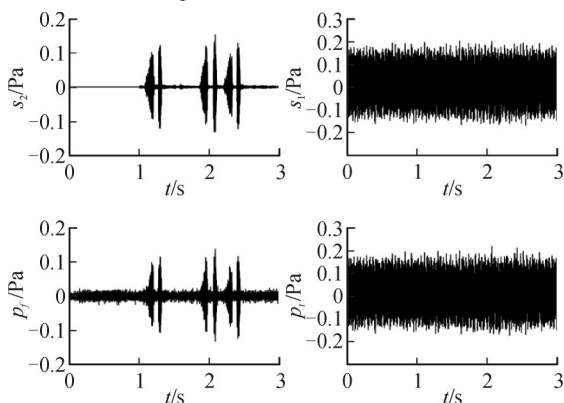


图 8 分离后的变压器与蛙鸣声信号

Fig. 8 Processed pure transformer and frog noise

FFT 分析结果表明, 在对主变噪声进行“蛙鸣”背景噪声滤波后, 变压器噪声源信号 s_1 与分离出的纯净变压器噪声信号 p_t 频谱具有很高的 consistency, 频谱相关系数约为 1.0。经过声压级计算, 分离后的纯净变压器噪声信号 p_t 与蛙鸣声信号 p_f 声压级分别为 59.8 dB(A) 与 58.7 dB(A), 分别与源信号相差 0.0 dB(A) 与 0.2 dB(A)。

2.3 主变“虫鸣”背景噪声滤波

某实际 110 kV 主变噪声信号 s_1 声压级为 59.8 dB(A), 假设“虫鸣”信号 s_2 声压级为 59.0 dB(A), 原始噪声信号见图 9。假设线性叠加因子为 1, 忽略信号相位变化, 混合信号 s_m 为 $s_m = s_1 + s_2$, 声压级为 61.7 dB(A), 信噪比为 15.7 dB。

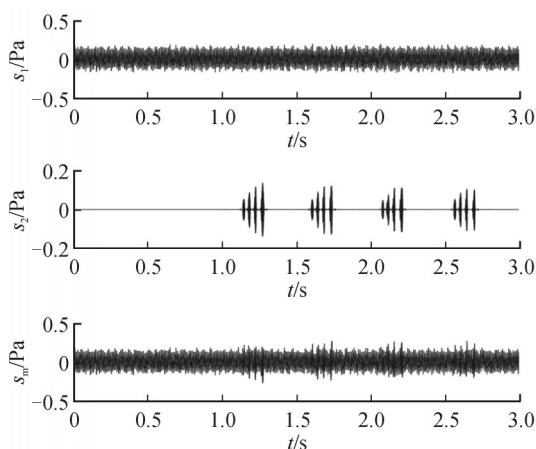


图 9 变压器与“虫鸣”背景噪声

Fig. 9 Transformer and background insect noise

对混合信号 s_m 进行 3 层小波包分解, 分解结果见图 10, 虫鸣声主要分布在 $s_{131} \sim s_{137}$ 等频带范围内。利用谱减法对上述信号进行滤波处理, 分离出的纯

净变压器噪声信号 p_t 与虫鸣声信号 p_f 见图 11。分离后的纯净变压器噪声信号 p_t 与虫鸣声信号 p_f 声压级分别为 59.5 dB(A) 与 59.3 dB(A), 均与源信号相差 0.3 dB(A)。

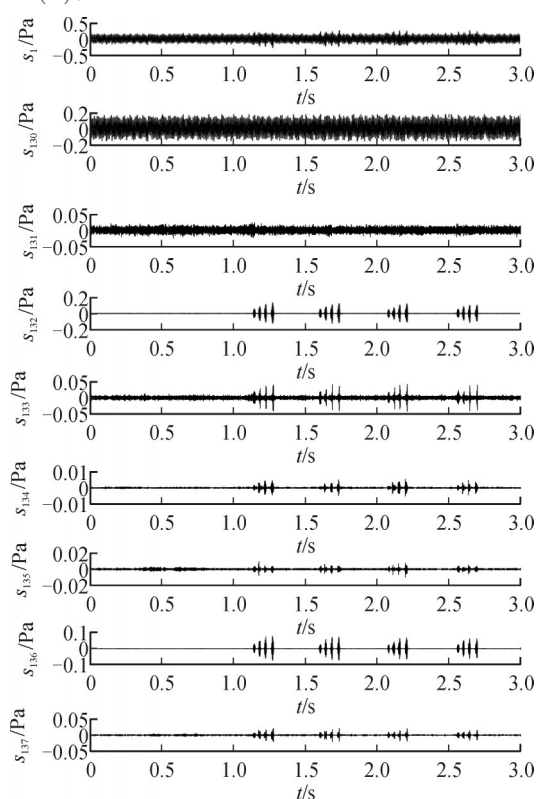


图 10 原始变压器噪声小波包分解

Fig. 10 Wavelet packet decomposition of the original transformer noise

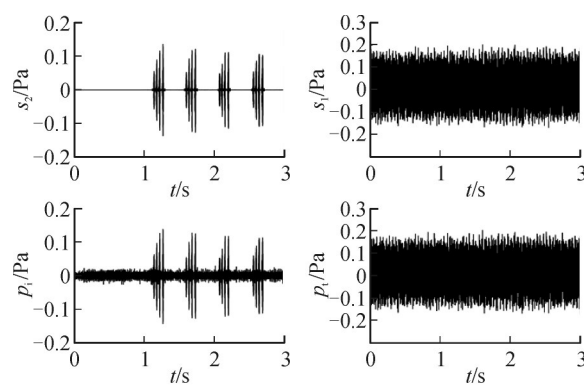


图 11 分离后的变压器与虫鸣声信号

Fig. 11 Processed pure transformer and insect noise

3 变电站实测噪声信号预处理效果分析

以荆门特高压交流变电站变压器噪声信号为例, 信号持续时间为 5 s, 采样频率 f_s 为 22 kHz, 1~2 s 时间段内带有环境噪声(鸟鸣声)。采用 3 层小波包分解算法对采集到的变电站原始噪声信号进行预处理, 分解结果见图 12。图 12 中, s_1 表示原始信号;

$s_{130} \sim s_{137}$ 分别表示不同频段的小波包重构信号。

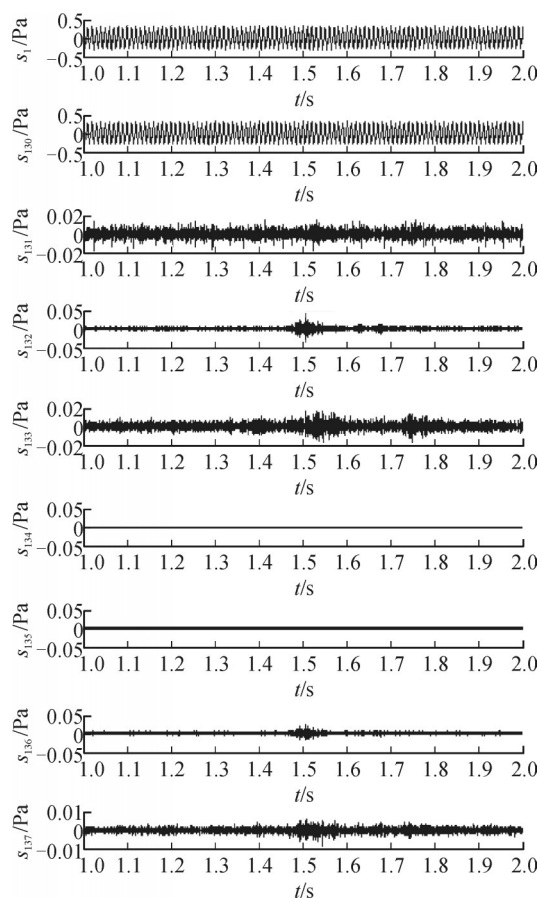


图12 带噪变压器声信号小波包分解

Fig. 12 Wavelet packet decomposition of the on-site transformer noise

从图12可以看出,外界环境噪声主要集中在 s_{132} 、 s_{133} 、 s_{136} 以及 s_{137} 频段。在以上频段范围内,采用谱减法语音增强技术滤除环境噪声,预处理后带噪变压器声信号见图13。对比图12、13可以看出,所提出的算法能够有效抑制带噪频段中的环境噪声,通过预处理能够提取出较为纯净的变压器噪声信号。

4 结语

针对变压器噪声测量时往往会受外界环境噪声干扰的实际问题。文中提出了一种基于小波分解与谱减法的变压器噪声测量预处理方法。由于外界环境噪声与变压器噪声时频域特性存在差异,可以采用小波包分解算法与谱减法语音增强技术相结合的滤波方法,利用小波包分析将变压器声信号时频分解,对分解后的各频段小波信号进行谱减法语音处理,从而有效地消除测量信号中的变电站

周围环境噪声。

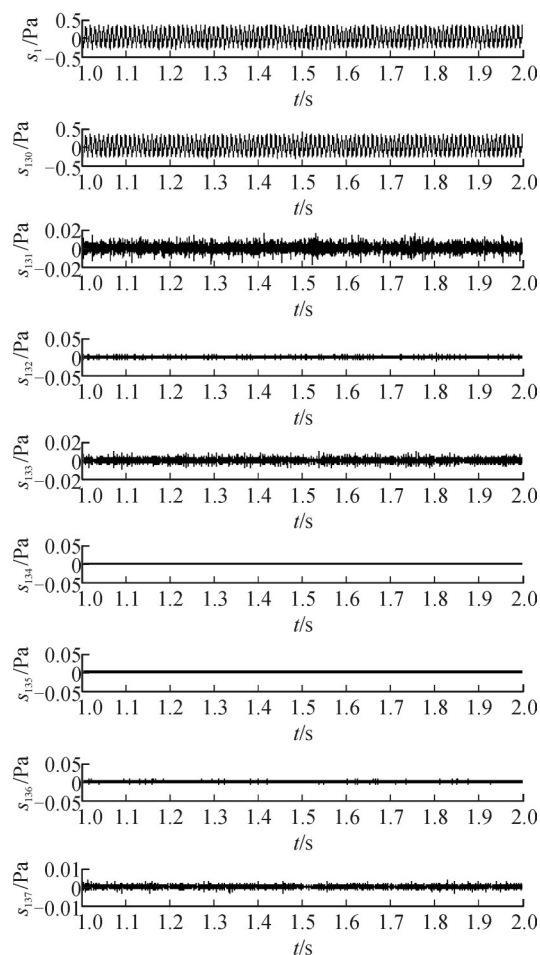


图13 滤波处理后变压器声信号小波包分解

Fig. 13 Wavelet packet decomposition of filtered transformer noise

参考文献:

- [1] 吴晓文,周年光,裴春明,等. 特高压交流GIS变电站噪声特性测量与分析[J]. 高压电器,2017,53(6):13-18.
WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PEI Chunming, et al. Measurement and analysis of audible-noise in UHVAC GIS substations[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6):13-18.
- [2] 周 兵,裴春明,倪 园,等. 特高压交流变电站噪声测量与分析[J]. 高电压技术,2013,39(6):1447-1453.
ZHOU Bing, PEI Chunming, NI Yuan, et al. Measurement and analysis of noise in UHV AC substation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1447-1453.
- [3] 裴春明,吴晓文,胡 胜,等. 750 kV 变电站可听噪声特性及分布规律[J]. 高压电器,2016,52(1):101-105.
PEI Chunming, WU Xiaowen, HU Sheng, et al. Audible - noise distribution and characteristics of a 750 kV substation [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 101-105.
- [4] 吴晓文,周年光,胡 胜,等. 500 kV 变电站主要设备噪

- 声检测与分析[J]. 环境工程, 2016, s1(1): 1137-1140.
- WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, HU Sheng, et al. Noise measurement and analysis of the main power apparatus in a 500 kV substation[J]. Environmental Engineering, 2016, s1(1): 1137-1140.
- [5] 杨 鹏, 应黎明, 陈 敏, 等. ANC系统次级通道背景噪声的处理方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(8): 99-103.
- YANG Peng, YING Liming, CHEN Min, et al. The processing of background noise in secondary path identification of ANC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8): 99-103.
- [6] 彭任华, 郑成诗, 丁 茫, 等. 高压变电站噪声分离算法及其应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1680-1686.
- PENG Renhua, ZHENG Chengshi, DING Mang, et al. Separation algorithm of the noise in high voltage substation and its application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1680-1686.
- [7] 吴晓文, 周年光, 裴春明, 等. 特高压交流变电站电晕噪声提取方法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 78-84.
- WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PEI Chunming, et al. Extraction methodology of the corona noise in UHV AC substations[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 78-84.
- [8] 吴晓文, 周年光, 裴春明, 等. 特高压交流变电站可听噪声分离方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2625-2632.
- WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PEI Chunming, et al. Separation methodology of audible noise of UHV AC substations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2625-2632.
- [9] 张冬雪. 基于小波理论的电力变压器振动信号特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010: 15-19.
- ZHANG Dongxue. Study on vibration signal characteristics of power transformer based on wavelet theory[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010: 15-19.
- [10] 颜秋容, 刘 欣, 尹建国. 基于小波理论的电力变压器振动信号特征研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 165-168.
- YAN Qiurong, LIU Xin, YIN Jianguo. Features of vibration signal of power transformer using the wavelet theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 165-168.
- [11] 赵 健, 王 宾, 马 苗. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 133-141.
- ZHAO Jian, WANG Bin, MA Miao. Digital signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 133-141.
- [12] 赵 力. 语音信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 294-295.
- ZHAO Li. Speech signal processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 294-295.
- [13] COHEN I, BERDUGO B. Noise estimation by minima controlled recursive averaging for robust speech enhancement[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(1): 12-15.
- [14] MANOHAR K, RAO P. Speech enhancement in nonstationary noise environments using noise properties[J]. Speech Communication, 2006, 48(1): 96-109.
- [15] MARTIN R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2001, 9(5): 504-512.
- 彭 鹏(1987—), 女, 工程师, 主要从事高电压技术和输电线路运维工作。

(上接第 170 页)

- HAN Jingjing, MA Xie, JIN Feijie, et al. Development and applications of laser range and vibration measurement technology[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, 2017, 16(2): 15-17.
- [20] 刘杰坤, 马修水, 马 颢. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 1-5.
- LIU Jiekun, MA Xiushui, MA Xie. Review of laser Doppler vibrometer[J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 1-5.
- [21] 武鹏飞, 牛兰杰, 赵 旭, 等. 基于激光多普勒的引信微小型结构件振动测试[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(2): 7-11.
- WU Pengfei, NIU Lanjie, ZHAO Xu, et al. Fuze micro structure vibration test based on laser Doppler[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(2): 7-11.
- [22] LILIEN J L. Acoustic noise generated by air power reactor in open-air substation[J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(3): 297-310.
- 肖 遥(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空心电抗器的振动测试及仿真分析。
- 熊 鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空心电抗器的振动测试及仿真分析。
- 汲胜昌(1976—), 男, 教授, 主要从事电力设备服役特性及其状态评估、交直流设备振动噪声控制与应用等高电压技术的研究。
- 祝令瑜(1988—), 男, 副教授, 主要研究方向为电气设备噪声特性及噪声治理措施。
- 曹建安(1971—), 男, 副教授, 主要研究方向为电力设备的自动化测试。