

基于 HHT 的单次电弧辐射电磁噪声时频分析

冯晓丽<sup>1</sup>, 王智勇<sup>1</sup>, 杨紫明<sup>2</sup>, 肖毅<sup>2</sup>, 张宏波<sup>2</sup>, 方志朋<sup>3</sup>

- (1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;
2. 国家电网公司葫芦岛供电公司, 辽宁 葫芦岛 125000;
3. 国家电网公司北辰新汇公司, 辽宁 沈阳 110013)

**摘要:**滑动电接触故障下产生的电弧放电会辐射强烈的电磁噪声,针对电弧辐射电磁噪声时域信号持续时间短、突变快等特点,利用 Hilbert-Huang 变换(HHT)技术对辐射电磁噪声进行分析。用经验模态分解法(EMD)分解辐射电磁噪声并获得其固有模态函数(IMF)分量,选取与噪声信号相关性最高且方差贡献率最大的 IMF 并进行 Hilbert 变换,获得了不同实验条件下电弧辐射电磁噪声的瞬时频率。磁场噪声瞬时频率的均方根在 60MHz 附近,电场噪声瞬时频率的均方根在 96 ~ 165MHz。随着接触电流、测量距离的增加,磁场噪声瞬时频率的均方根稍有增加,电场噪声瞬时频率的均方根明显减小。电场噪声的频率随时间的变化快于磁场噪声。

**关键词:**辐射电磁噪声; HHT; EMD; 时频分析; 瞬时频率

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1705066      **文章编号:** 1003-3076(2018)04-0057-07      **中图分类号:** TM501

1 引言

滑动电接触广泛应用于高速电气化铁路、航空航天等领域。在操作过程中,接触不良会产生电弧而引发强烈的电磁噪声,其中辐射电磁噪声对通信系统产生干扰,严重时会导致设备无法正常运行。电弧辐射电磁噪声具有持续时间短、突变快等特点,其频段分布因外界环境的影响而不同,对测试接受设备要求高,给现场测试造成诸多困难。因此,研究电弧辐射电磁噪声的频率特性具有重要意义。

国内外学者对电弧辐射电磁噪声频率范围进行了大量研究并获得了可观的结论。Keiichi Uchimura<sup>[1]</sup>研究了稳定燃烧电弧和喷弧的辐射电磁噪声的频段及特性。郑宁敏等<sup>[2]</sup>获得了刀闸操作电弧的幅频特性,并指出电弧辐射的能量集中分布在 50 ~ 150kHz 与 300 ~ 350kHz 之间。蓝会立等<sup>[3]</sup>分析了开关柜内故障电弧的频谱特性并指出故障电弧的频率主要分布在 5 ~ 10kHz 之间。Pan Tao 等<sup>[4]</sup>认为矿用直流电机车弓网电弧的辐射噪声的频率低于

1900MHz。郭凤仪等<sup>[5,6]</sup>获得了弓网电弧辐射电磁噪声幅值与滑动速度、接触电流、接触压力等因素之间的关系,并指出弓网电弧主要分布在 30 ~ 500MHz 之间。马云双等<sup>[7]</sup>对不同车速条件下弓网离线电弧放电电磁骚扰发生的幅值及频率进行了仿真研究。王莉等<sup>[8]</sup>研究了航空交流故障电弧特性,并指出其高频分量分布在 10 ~ 50kHz 之间。郭云梅<sup>[9]</sup>分析了航空直流电弧时频特性并获得了航空直流电弧的频率在 2kHz 以内的结论。

现有的电弧辐射电磁噪声的频谱特性大多通过干扰接收机获得,干扰接收机的工作方式为扫频模式,完成一次测试需要一定的时间,因而不能实时地获得电磁噪声的频谱信号,获得电弧辐射电磁噪声的瞬时频率更为困难。

为解决电弧辐射电磁噪声瞬时频谱特性难于测量的问题,并获得电磁噪声的瞬时频率,本文提出了一种基于 Hilbert-Huang 变换(HHT)的电弧辐射电磁噪声瞬时频率分析方法,并对其有效性进行实验验证。

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674136)、辽宁省教育厅科学基金项目(LJYL015)

作者简介: 冯晓丽(1992-),女,甘肃籍,硕士研究生,研究方向为电器基础理论与应用;

王智勇(1982-),男,辽宁籍,讲师,博士,研究方向为电器基础理论与应用。

2 实验装置与实验方案

2.1 实验装置

利用自行研制的电弧辐射电磁噪声实验系统开展实验,该系统由电波暗室、电弧放电回路和信号检测系统组成,如图 1 所示。

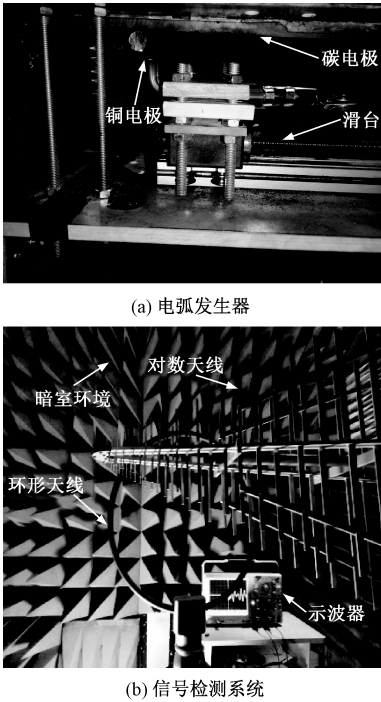


图 1 电弧辐射电磁噪声实验系统  
Fig. 1 Electromagnetic noise experimental system

电弧放电回路用于产生特定电流的单次电弧,由调压回路和电弧发生器组成,如图 2 所示。

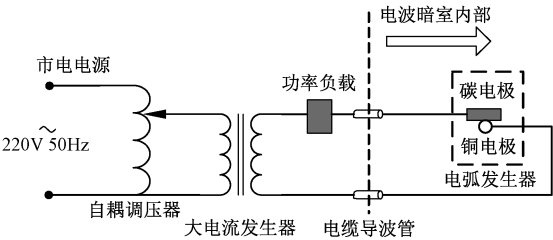


图 2 电弧放电回路  
Fig. 2 Arc discharge circuit

电弧发生器由平板状的浸铜碳电极、运动的铜电极和电极运动控制系统组成,如图 1(a)所示。电极运动控制系统由步进电机、滑台和电机控制器组成。通过控制步进电机使安装在滑台上的铜电极实现往复运动,与静止的碳电极配合获得电弧放电。为了在每个运动周期获得一系列的单次电弧并提高实验效率,在碳电极上刻制了特定参数的 V 型槽,

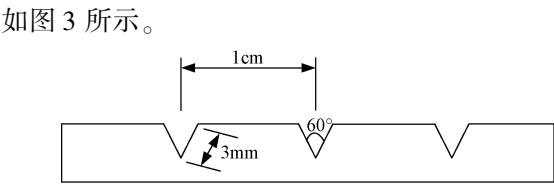


图 3 碳电极 V 槽  
Fig. 3 V-groove structure in carbon electrode

信号检测系统由 HFH2-Z2 型环形天线、HL562-Z1 型对数周期天线和 Tektronix MSO4104B 型示波器组成,如图 1(b)所示。环形天线和对数天线分别检测电弧辐射的高频磁场信号和电场信号,环形天线的测量频段为 9kHz ~ 30MHz,对数周期天线的测量频段为 30MHz ~ 3GHz。天线的信号通过屏蔽电缆连接至示波器。示波器的采样率为 5GS/s。

2.2 实验方案

碳电极的尺寸为 250mm × 25mm × 10mm,铜电极的截面积为 120mm<sup>2</sup>。在 20℃ 时其物理参数如表 1 所示。按照表 2 的实验条件进行了单次电弧辐射电磁噪声实验。

参数	数值	
	浸铜碳电极	铜电极
布氏硬度 HBS	56.7	96.2
密度/ $\times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	3.4	8.9
电阻率/( $\mu\Omega\cdot\text{m}$ )	12.32	0.0175
比热/(J/(kg·K))	660.2	380
热导率/(W/(m·K))	15	380

表 2 实验条件	
Tab. 2 Experimental conditions	
参数	数值
接触电流/A	10, 20, 30, 40
测量距离/m	1, 1.5, 2, 2.5, 3
重复次数	40
交流电压/V	110
实验时间/min	1
滑台速度/(m/s)	0.025

3 EMD 和 Hilbert 谱理论分析

HHT 是一种较新的时频分析技术,由经验模态分解(EMD)和 Hilbert 变换两部分组成,其中 EMD 为核心部分,其功能是对信号进行分解;Hilbert 变换求解信号的 Hilbert 谱。

### 3.1 经验模态分解

经验模态分解方法针对数据固有的时间尺度进行信号分解,是一种自适应的信号分析方法,其目的是为了提取固有模态函数。利用 EMD 求取信号的固有模态函数主要包括三个步骤<sup>[10]</sup>:

(1)取出信号  $x(t)$  的各个局部极值,包括极大值和极小值,然后利用三阶样条函数对局部极值进行插值,分别获得信号  $x(t)$  的上包络序列  $x_{\max}(t)$  和下包络序列  $x_{\min}(t)$ 。

(2)对每个时刻的  $x_{\max}(t)$  和  $x_{\min}(t)$  求平均值,得到上下包络的平均值  $m(t)$ :

$$m(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

(3)用信号  $x(t)$  减去  $m(t)$ ,得到新数据列  $h(t)$ :

$$h(t) = x(t) - m(t) \quad (2)$$

判断  $h(t)$  是否为固有模态函数,若不满足定义,重复步骤(1)~步骤(3),直至求出固有模态函数为止。

求出第一个固有模态函数  $I_1(t)$ ,即从信号中分解出了第一个分量,然后用信号  $x(t)$  减去  $I_1(t)$ ,得到余项  $r_1(t)$ :

$$r_1(t) = x(t) - I_1(t) \quad (3)$$

至此,第一个固有模态函数提取完成。然后对  $r_1(t)$  重复步骤(1)~步骤(3)提取  $n$  个固有模态函数,直至  $r_n(t)$  单调。

信号  $x(t)$  被分解为多个固有模态函数和一个余项:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

### 3.2 Hilbert 谱分析

基于 Hilbert 变换的瞬时频率定义为:

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{H'[x(t)]x(t) - H[x(t)]x'(t)}{x^2(t) + H^2[x(t)]} \quad (5)$$

式中

$$\theta(t) = \arctan \frac{H[x(t)]}{x(t)}$$

$H[x(t)]$  为信号  $x(t)$  的 Hilbert 变换。

对于单个固有模态函数  $I_i(t)$ ,通过 Hilbert 变换获得其瞬时频率  $f_i(t)$ :

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{H'[I_i(t)]I_i(t) - H[I_i(t)]I_i'(t)}{I_i^2(t) + H^2[I_i(t)]} \quad (6)$$

信号的瞬时频率表征了信号的频率随时间的变化,通过 HHT 获得的解析信号与原信号的频谱完全相同<sup>[11]</sup>,且不会出现没有物理意义的负频率。

## 4 辐射电磁噪声时域分析

### 4.1 电磁噪声的时域波形

测量距离为 1m、接触电流为 10A 条件下的电弧辐射电磁噪声波形如图 4 所示。单次电弧辐射电磁噪声时域波形是一个短暂的阻尼振荡波。在不同测量距离、不同接触电流下,电弧辐射电磁噪声幅值有所不同,但波形大体轮廓基本保持一致。

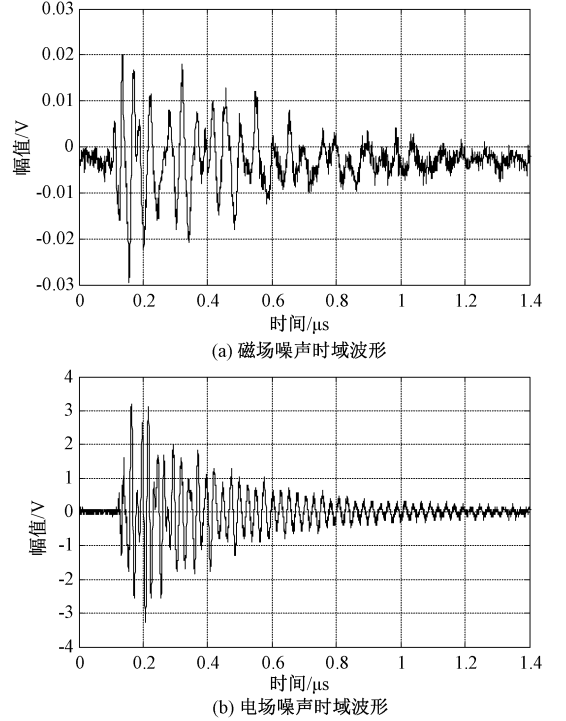


图4 电弧辐射电磁噪声时域波形

Fig.4 Time domain waveform of electromagnetic radiation noise produced by single arc

### 4.2 电磁噪声 HHT 分解

电弧辐射电磁噪声经过 EMD 分解后,获得了一系列固有模态函数(IMF)分量和一个余项。以图 4(b)的电场噪声为例,其 EMD 分解结果如图 5 所示。

EMD 将辐射电磁噪声分解成若干 IMF 分量,各个 IMF 反映了电磁噪声不同的频段范围,因此需要对 IMF 进行筛选,根据 IMF 与电磁噪声的相关系数及其方差贡献率进行选择。

相关系数及方差贡献率的定义为:

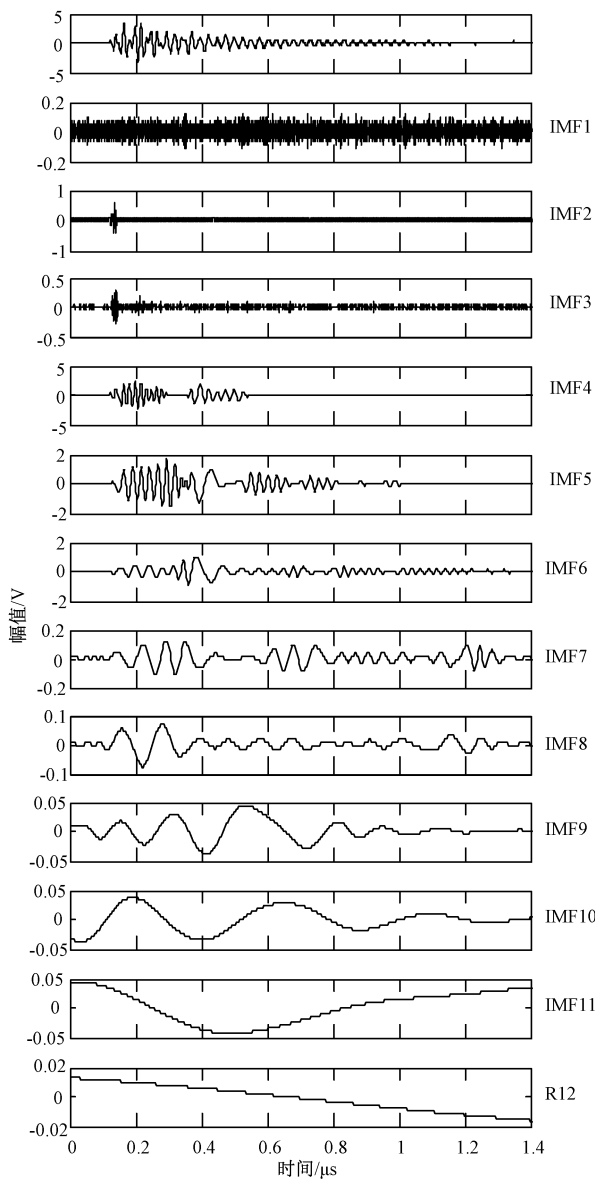


图5 电场噪声的EMD分解

Fig. 5 EMD results of electromagnetic noise

$$\rho = \frac{Cov(y_i, I_i)}{\sqrt{D(y_i)} \sqrt{D(I_i)}} \tag{7}$$

$$K_i = \frac{(y_i - E)^2}{m\sigma^2} \tag{8}$$

式中,  $y_i$  为电磁信号;  $I_i$  为不同的 IMF 分量;  $\rho$  为电磁噪声样本的相关系数;  $K_i$  为电磁噪声样本的方差贡献率;  $m$  为样本的个数;  $E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i$ , 为样本的均值;  $\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - E)^2$ , 为样本的方差。

以图 4(b) 的电场噪声为例, 计算后的相关系数及方差贡献率如表 3 所示。

表 3 IMF 分量的  $\rho$  和  $K_i$

Tab. 3 $\rho$ and $K_i$ of IMF components		
IMF 分量	$\rho$	$K_i$
IMF1	0.0609	0.4374
IMF2	0.0739	0.4072
IMF3	0.0693	0.2473
IMF4	0.7237	50.0713
IMF5	0.5501	36.6399
IMF6	0.1973	11.3605
IMF7	0.0204	0.403
IMF8	0.0046	0.0962
IMF9	0.0001	0.0612
IMF10	-0.0012	0.0806
IMF11	0.0169	0.1952

选择  $\rho$  和  $K_i$  值最大的 IMF4, 根据式 (6) 计算 IMF4 的瞬时频率, 如图 6 所示。图 6 中, IMF 的瞬时频率高达 2.5GHz, 而示波器的采样频率为 5GHz, 说明 2.5GHz 的瞬时频率不一定具有参考价值。出现如此高的频率是因为计算误差被放大<sup>[12]</sup>, 因此对瞬时频率进行平滑处理, 选择 Matlab 中一维数字滤波器 filter, 处理后效果如图 7 所示。

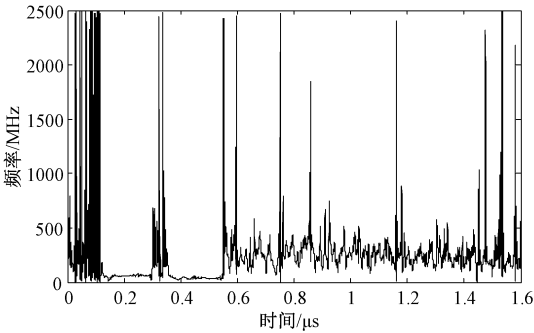


图 6 IMF 的瞬时频率

Fig. 6 Instantaneous frequency of IMF

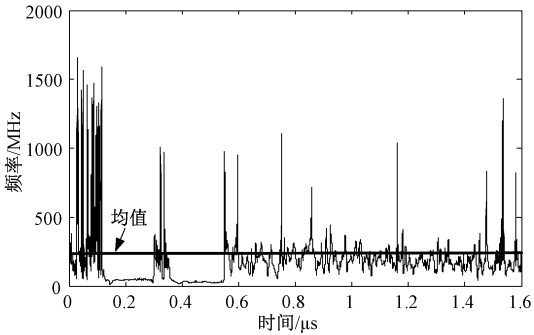


图 7 平滑处理后 IMF 的瞬时频率

Fig. 7 Instantaneous frequency of smoothing-processed IMF

一维数字滤波器 filter 按式(9)计算:



$$Y(z) = \frac{a}{1 - bz^{-1}}X(z) \tag{9}$$

式中, $Y(z)$ 为输出信号; $a$ 、 $b$ 为滤波器参数,其值分别为0.15和0.8; $X(z)$ 为输入信号。

平滑处理后,IMF的瞬时频率的畸变成分被滤除,更能表征电磁噪声信号的频率随时间的变化趋势。图7中,IMF4的瞬时频率的均值为236.51MHz,不同测量距离、不同接触电流条件对瞬时频率有一定影响。

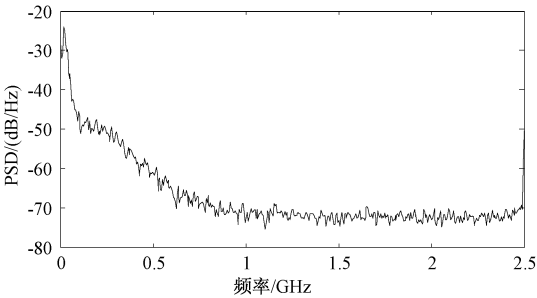
4.3 IMF分量与原始信号的功率谱密度对比

为验证本文方法的有效性,对EMD分解后的各个IMF分别求取功率谱密度(PSD)。功率谱密度表征了信号的能量与其频率之间的关系,对于离散随机信号 $x(n)$ 其功率谱密度为<sup>[13]</sup>:

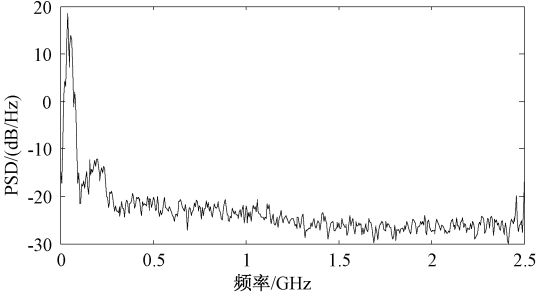
$$S_{xx}(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} r_{xx}(k) \exp(-j2\pi kf) \tag{10}$$

式中, $r_{xx}(k) = E[x(n)x^*(n-k)]$ 。

功率谱密度的计算方法有直接法、间接法和Welch法等。Welch法计算后的PSD谱曲线更为光滑,避免当数据较长时,直接法计算的谱曲线起伏剧烈的缺点,同时提高了PSD谱的分辨率。采用Welch法计算电弧辐射电磁噪声的功率谱密度。以图4为例,计算结果如图8所示。



(a) 磁场噪声的功率谱密度



(b) 电场噪声的功率谱密度

图8 电弧辐射电磁噪声功率谱密度  
Fig.8 PSD of electromagnetic radiation noise produced by single arc

频和低频部分。磁场噪声和电场噪声在低频部分幅度较高,因而在低频部分能量较高。分别对各IMF分量求PSD并对比发现,以电场噪声为例,IMF1分量的PSD是电磁噪声最高频部分,IMF4的PSD是电磁噪声的低频部分,筛选后IMF分量与电磁噪声的PSD对比如图9所示。

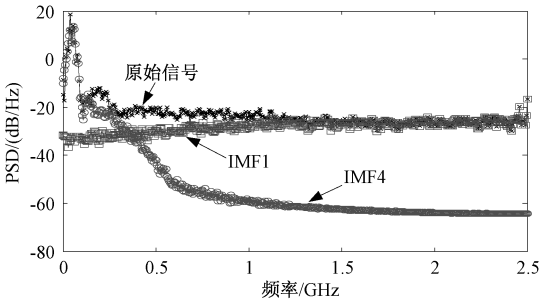


图9 IMF分量与电场噪声的PSD对比  
Fig.9 Comparison results between IMF component and PSD of electric field noise

图9中,IMF1在高频部分与电磁噪声的PSD峰值点基本一致;IMF4在低频部分与电磁噪声的PSD峰值点基本一致,说明本文提出的HHT方法分解的IMF可以表征电磁噪声不同频段的特性<sup>[14]</sup>。由于电磁噪声低频部分PSD幅度远高于高频部分,说明电磁噪声低频部分能量分布较为密集,故选择能表征电磁噪声能量分布密集的IMF分量进行研究更具参考价值。

4.4 不同实验条件下电磁噪声的瞬时频率均方根分析

均方根表征了随机数据的一般强度,方差表征了信号的变化程度。不同测量距离、不同接触电流条件下,按照图10所示流程对电磁噪声进行处理。

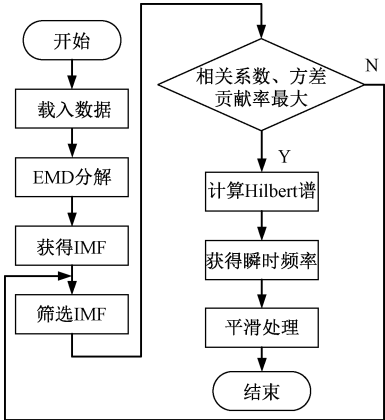


图10 电磁噪声分析流程图  
Fig.10 Flowchart of analyzing electromagnetic noise

EMD分解的IMF分量分别表征了电磁噪声低

对每组实验条件下电弧辐射电磁噪声的瞬时频率统计了均方根 (RMS) 和方差 (VAR) 并对统计值取均值,获得了不同工况下,电弧辐射电磁噪声瞬时频率的统计图,如图 11 所示。

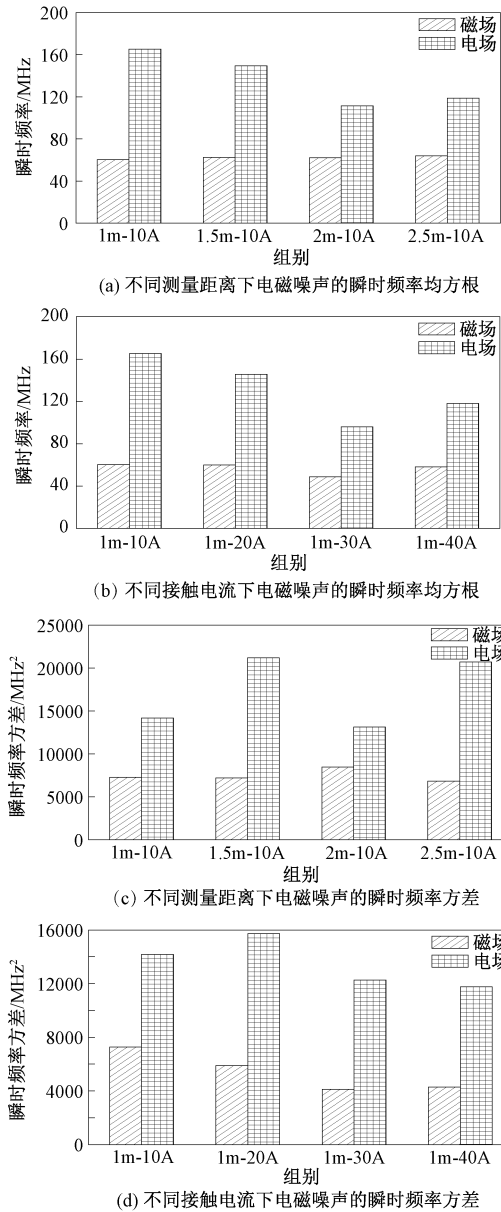


图 11 不同工况下电磁噪声瞬时频率的均方根和方差  
Fig. 11 RSM and VAR of instantaneous frequency of electromagnetic noise under different experimental conditions

图 11(a)和图 11(b)中,磁场噪声瞬时频率的均方根在 60MHz 附近,随着接触电流、测量距离的增加,磁场噪声瞬时频率的均方根稍有增加。电场噪声瞬时频率的均方根在 96 ~ 165MHz,随着接触电流、测量距离的增加,电场噪声瞬时频率的均方根明显减小。

图 11(c)和图 11(d)中,随着实验条件的改变,磁场噪声的瞬时频率的方差轻微波动,说明磁场噪声的频率随时间的变化较小。随着实验条件的改变,电场噪声瞬时频率的方差波动较大,说明电场噪声的频率随时间的变化较大。相同实验条件下,电场噪声瞬时频率的方差远大于磁场噪声,说明电场噪声的变化快于磁场噪声。

5 结论

本文分析了不同测量距离、接触电流下单次电弧辐射电磁噪声的瞬时频率特性,通过使用 HHT 法获得的 IMF 分量与实测电磁噪声的功率谱密度对比,发现二者的谱曲线峰值基本重合,表明 HHT 法可以用于电弧辐射电磁噪声的时频分析。与磁场噪声相比,电场噪声瞬时频率的均方根更大,电场噪声的瞬时频率变化更快。电场噪声与磁场噪声的瞬时频率均方根具有相反的变化趋势。

参考文献 (References):

[ 1 ] Uchimura K. Electromagnetic interference from discharge phenomena of electric contacts [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1990, 32 ( 2 ): 81-86.

[ 2 ] 郑宁敏, 林匹 (Zheng Ningmin, Lin Pi). 刀闸操作电弧对载波通道的干扰 (Disturbance caused by the arcing during operation of isolating switch for power carrier channel) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2009, 37 ( 17 ): 128-131.

[ 3 ] 蓝会立, 张认成 (Lan Huili, Zhang Rencheng). 开关柜内部弧光短路伴生弧声的频谱特性研究 (Study on arc sound signature of fault arc in switchgear) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2008, 44 ( 2 ): 107-109.

[ 4 ] Pan Tao, Liang Hong. Analysis of electromagnetic interference from pantograph arcing with different trolley locomotive speed in coal mine tunnel [A]. Proceedings of 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory [C]. 2008. 1096-1098.

[ 5 ] 郭凤仪, 王喜利, 王智勇, 等 (Guo Fengyi, Wang Xili, Wang Zhiyong, et al.). 弓网电弧辐射电场噪声实验研究 (Research on radiated electric field noise of pantograph arc) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 ( 14 ): 220-225.

[ 6 ] 郭凤仪, 张艳立, 王智勇, 等 (Guo Fengyi, Zhang Yanli, Wang Zhiyong, et al.). 弓网电弧实验系统与辐

- 射噪声实验研究 (Design of pantograph arc experiment system and study on radiated noise) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 49-53.
- [7] 马云双, 刘志刚, 马岚, 等 (Ma Yunshuang, Liu Zhigang, Ma Lan, et al.). 动车组弓网离线放电电磁骚扰源模型研究 (Electromagnetic disturbance source model of discharge upon pantograph-catenary disconnection of EMU) [J]. 中国铁道科学 (China Railway Science), 2013, 34 (5): 76-81.
- [8] 王莉, 曹璐, 严仰光 (Wang Li, Cao Lu, Yan Yangguang). 航空交流故障电弧特性的研究 (Research on arc fault characteristic for AC power system in aircraft) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical & Energy Management Technology), 2011, (2): 19-23.
- [9] 郭云梅 (Guo Yunmei). 航空直流电弧故障检测及保护技术研究 (Research on aerospace DC arc fault detection and protection) [D]. 南京: 南京航空航天大学 (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics), 2010.
- [10] 熊学军, 郭炳火, 胡筱敏, 等 (Xiong Xuejun, Guo Binghuo, Hu Xiaomin, et al.). EMD 方法和 Hilbert 谱分析法的应用与探讨 (Application and discussion of empirical mode decomposition method and Hilbert spectral analysis method) [J]. 黄渤海海洋 (Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas), 2002, 20 (2): 12-21.
- [11] 陈平, 李庆民, 赵彤 (Chen Ping, Li Qingmin, Zhao Tong). 瞬时频率估计算法研究进展综述 (Advances and trends in instantaneous frequency estimation methodology) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2006, 43 (7): 1-7.
- [12] 任达千, 杨世锡, 吴昭同, 等 (Ren Daqian, Yang Shixi, Wu Zhaotong, et al.). 信号瞬时频率直接计算法与 Hilbert 变换及 Teager 能量法比较 (Comparison of instantaneous frequency directed computing method and Hilbert transform and Teager energy method) [J]. 机械工程学报 (Journal of Mechanical Engineering), 2013, 49 (9): 42-48.
- [13] 张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林, 等 (Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin, et al.). 功率谱密度的数值计算方法 (Numerical method of the power spectral density) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2000, 12 (6): 661-664.
- [14] 颜诗源, 李新俊, 吴勋, 等 (Yan Shiyuan, Li Xinjun, Wu Xun, et al.). 基于 HHT 方法的公路运输振动信号时频分析 (Frequency analysis for vibration signal from road transportation using HHT) [J]. 装备环境工程 (Equipment Environmental Engineering), 2014, (5): 23-26.

## Time-frequency analysis of electromagnetic noise produced by single arc based on HHT

FENG Xiao-li<sup>1</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1</sup>, YANG Zi-ming<sup>2</sup>, XIAO Yi<sup>2</sup>, ZHANG Hong-bo<sup>2</sup>, FANG Zhi-peng<sup>3</sup>

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. State Grid Electric Power Company of Huludao Branch, Huludao 125000, China;

3. State Grid Electric Power Company of Beichen Xinhui Branch, Shenyang 110013, China)

**Abstract:** Arc discharge phenomenon will occur due to sliding electrical contact fault. It will radiate high-intensity electromagnetic radiation noise. Because the time domain signal of electromagnetic radiation caused by single arc has some special features such as short duration, sudden change and so on, the Hilbert-Huang transform (HHT) was used to analyze the electromagnetic radiation noise. The intrinsic mode function (IMF) components were obtained by using empirical mode decomposition (EMD) to the noise. The IMF with the highest correlation and maximum variance was selected and calculated by using Hilbert transform. Then the instantaneous frequency of the noise under different conditions was obtained. The root-mean-square (RMS) of instantaneous frequency of the magnetic field noise is about 60MHz and that of electric field is within 96 ~ 165MHz. With the increase of measuring distance and contact current, the RMS of instantaneous frequency of magnetic field noise increases slightly and that of electric field decreases obviously. The frequency's change with time of the electric field is faster than that of magnetic field noise.

**Key words:** radiated electromagnetic noise; HHT; EMD; time frequency analysis; instantaneous frequency