

# 数字滤波在 Rogowski 线圈测量冲击电流中的应用

徐霖, 傅正财

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

## Application of Digital Filtering Technology to the Measurement of Impulse Current with Rogowski Coil

XU Lin, FU Zheng-cai

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**摘要:** 采用自积分式 Rogowski 线圈测量较小的冲击电流时信号很弱, 易受干扰。以金属构架上雷电感应电流的测量为例, 讨论了采用直接 FFT 阈值法、FIR 等纹波低通滤波器法和小波变换法三种不同数字滤波方法消噪的效果, 并进行了比较。研究表明, 小波消噪方法比较适合于这种情况下测量信号的处理。

**关键词:** 冲击电流测量; Rogowski 线圈; FFT 阈值法; FIR 滤波器; 小波变换

**中图分类号:** TM835

**文献标识码:** A

**Abstract:** Rogowski coil can be used for the measurement of impulse current. But it is liable to be disturbed if the current to be measured is low. This paper discusses how to improve the performance of the self-integrated Rogowski coil with signal digital filtering technology for such measurement. Three digital filtering methods — direct FFT threshold method, FIR equiripple filter and wavelet transform method are applied in de-noising of the output of the Rogowski coil. Comparisons of their de-noise performances show that the wavelet transform method is the most effective.

**Key words:** impulse current measurement; Rogowski coil; FFT threshold method; FIR filter; wavelet transform

## 1 前言

冲击电流通常采用在回路中串入分流器的方法来测量。但在串入分流器有困难时, 只能采用非接触式测量方法。如在实验室模拟研究附近雷击引起的建筑物金属构架上的感应电流分布时, 不可能在金属构架的各支路上都串入分流器。在这种情况下通常采用 Rogowski 线圈测量。Rogowski 线圈有其固有的线性特性和非接触式优点, 但由于金属构架上的感应电流分布很不均匀, 在被测电流较小的支路上, 其输出电压很低, 容易受到干扰。

笔者以金属构架上雷电感应电流的测量为例, 讨论 Rogowski 线圈测量较小的冲击电流时信号被干扰的情况, 探讨采用数字滤波方法提高 Rogowski

线圈的测量性能, 以获取真实的被测信号。

## 2 Rogowski 线圈测量中的干扰问题

参见图 1, 模拟雷电流在金属构架附近流过 (5 kA, 7.4/16  $\mu$ s), 用 Rogowski 线圈测量金属构架各支路上感应的冲击电流。为提高频响, Rogowski 线圈采用双层绕法<sup>[1]</sup>。

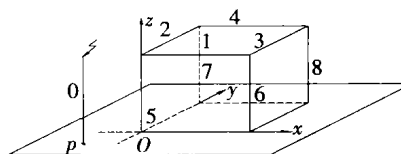


图 1 金属构架上雷电感应电流的测量示意图

测量干扰主要来自冲击电流发生器与探头之间的电场耦合, 以及球隙放电形成的干扰电磁场对测量回路的影响。支路 1 上感应电流 (3.24 kA) 的测量结果见图 2(a) (通过单层屏蔽信号电缆接入示波器)。测量中最关心的电流峰值被淹没于干扰中, 读数困难。采取有效的屏蔽措施能抑制干扰, 提高测量准确度。图 2(b) 是采取 Rogowski 线圈外包锡箔, 采用双层屏蔽信号电缆 (外皮与锡箔相连), 冲击电流发生器的放电球隙用环形铜带包围等屏蔽措施后, 支路 1 上的测量结果。与图 2(a) 相比, 干扰得到了有效抑制。

虽然在采取屏蔽措施后, 感应电流较大的支路上测量效果较好, 但在金属构架的远端支路上, 由于感应电流很小 (51 A), 干扰仍很明显。图 1 中的支路 3 上采取屏蔽措施后的测量波形见图 3。从图中可看出, 测量波形上的干扰不仅包括球隙放电造成的脉冲干扰 (波形起始位置上的短时剧烈振荡), 还包含了大量的高频干扰, 也有白噪声。仅靠屏蔽措施已经不能解决。

提高测量线圈的灵敏度能改善测量效果, 但有两方面的困难: ①线圈的灵敏度与其时间常数相互制约。为提高灵敏度应增大自积分电路的信号电阻  $R$ , 并减少匝数  $n$ , 但为满足自积分的时间常数条件,  $R$  的增大和  $n$  的减少都有限<sup>[2]</sup>。②由于感应电流

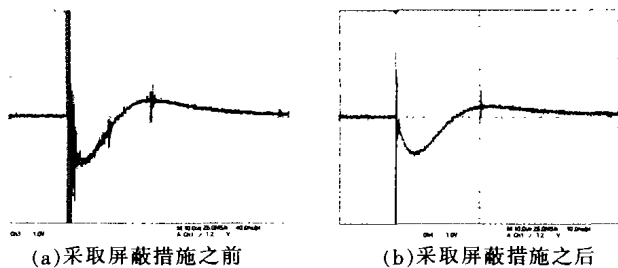


图2 采取屏蔽措施前后在支路1上测到的电流波形

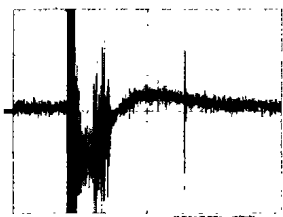


图3 采取屏蔽措施后支路3上的电流波形

在金属构架上的分布很不均匀(特别是当实际构架比较复杂时),被测电流的变化范围很大。为测量各支路上的电流需准备大量各种灵敏度的测量线圈,有实际困难。因此,有必要对采集的信号进行数字滤波,以滤去干扰和噪声,获得真实电流波形。

### 3 数字滤波方法的应用

采用3种数字滤波方法对图3所示的电流波形进行去干扰和消噪处理。这些数字滤波方法都可以用Matlab的信号处理工具箱方便地实现<sup>[3-5]</sup>。

#### 3.1 FFT 阈值滤波法

FFT 阈值滤波法先对被处理信号进行FFT变换,得到频谱分布,然后根据设定的频谱门限频率,把所有大于门限频率的值置零,再反变换到时域,便去除了高频干扰。雷电流信号有效频率一般不超过1 MHz<sup>[6]</sup>,在此取门限频率为1 MHz。图4(a)给出了对图3波形进行FFT 阈值滤波法去干扰和消噪的结果。测量所用示波器为TDS7104,选用采样频率为25 MS/s,记录点数为2500点。

FFT 阈值滤波法明显抑制了干扰,较好地反映出实际信号,其缺点是阈值(门限)的选取相对困难,在事先未知被测波形的情况下,很难确定。

#### 3.2 FIR(有限冲击响应)滤波法

FIR 滤波法实际上是设计一个低通滤波器,滤波器的频带范围根据被测冲击电流的有效频谱来确定。在此采用等纹波滤波器。Remez 函数采用 Parks-McClellan 算法,该算法应用 Remez 交换算法和 Chebyshev 逼近理论,设计在期望和实际频率响应之间最优拟合的滤波器,也称为等纹波滤波器<sup>[3]</sup>。对图3所示的测量结果进行FIR 滤波后的去干扰和消噪结果见图4(b)。

FIR 滤波器也达到了抑制干扰、分离出有效信号的效果。该方法的优点是可以方便地设置通带和阻带,其相移具有线性特性;缺点是频带范围同样需

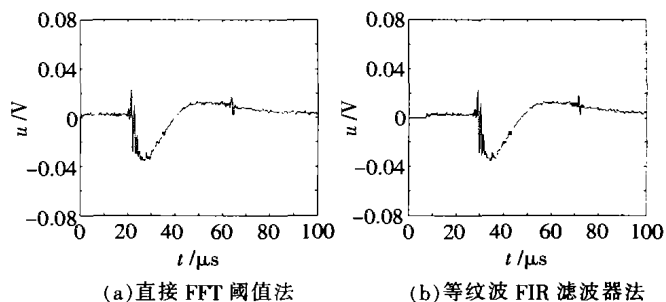


图4 去干扰的效果

要预先设定,在事先未知信号特点时,难以准确地设定滤波器参数。

#### 3.3 小波变换法

雷电流是一种非平稳信号。传统的基于傅里叶变换的信号处理方法无法表述这种非平稳信号的时频局域性质。小波变换在时频两域都具有表征信号局部特征的能力。在不同尺度下对信号做小波变换,实际上就是用不同中心频率的带通滤波器对波形做滤波处理。把反映干扰频带尺度下的小波变换结果去掉,再将剩余尺度下的小波变换结果结合起来做反演变换就能得到抑制了干扰信号的波形<sup>[5]</sup>。叠加在冲击电流上的干扰信号相对于冲击电流信号而言属于高频段范围,只要选择合适的尺度,重新组合滤波器组,使输出信号的频带范围不包含干扰信号频带,就可以达到去除干扰的目的。

对图3所示的实测信号采用db8小波进行多尺度分解的结果示于图5。

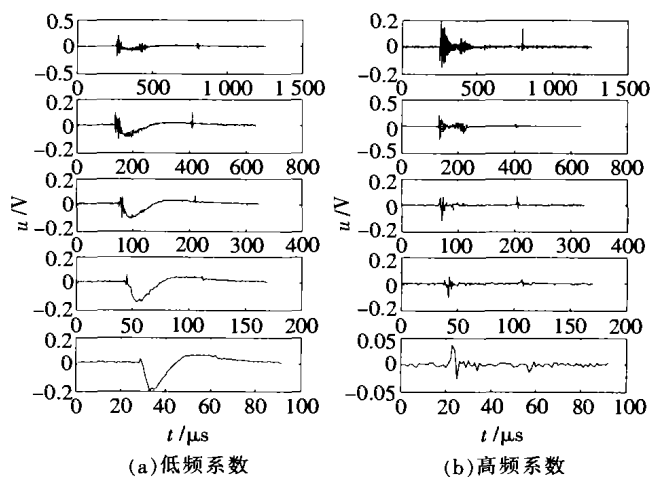


图5 db8小波多尺度分解图

从图5可见,利用db8小波分解到尺度4时高频干扰已经基本去除,应用wrccoef函数对一维小波系数进行尺度4或者尺度5的单支重构,就可以达到滤除干扰的效果,如图6(a),(b)。

对比图4(a),(b),利用小波变换在尺度4时已经达到了FFT 阈值法和FIR 等纹波滤波器法所能达到的效果,尺度5上干扰信号已基本被完全抑制。小波变换分析具有对未知信号多尺度分析,逐渐剥离高频干扰信号的特点。在事先未知实际信号有效频率范围时,更能体现出小波变(下转第266页)

延地网所屏蔽。还有在输电线路杆塔接地上,一些部门也采用深井式接地极,虽能把工频接地电阻降下一些,但杆塔接地主要目的是防雷,应以有效降低冲击接地电阻为主。雷电流是高频电流,有很强的趋肤性,一般沿地表散流,深层土壤散流作用很差,所以深井式接地极对以防雷为主的杆塔效果不大。另外,在降阻剂的使用上也存在一些问题。一些施工单位为了追求暂时降阻效果,使用一些有问题的化学降阻剂,过一段时间后随着降阻剂的流失,接地电阻迅速反弹,还对接地体造成了很大的腐蚀。所以对降低接地装置接地电阻的措施,一定要根据具体的情况,具体分析,经认真的技术经济分析后,采用科学合理的方法进行降阻。

### 3.2 小型化变电所避雷针接地与主地网的关系

随着技术的发展,紧凑型、小型化设备的大量采用,变电所的占地越来越少,这对节约土地资源是件好事,但是随之带来的就是避雷针接地与变电所主地网的关系问题。文[3]规定,独立避雷针的接地装置与发电厂或变电所接地网间的地中距离应符合  $d \geq 0.3 R_c$ 。式中: $d$ 为地中距离; $R_c$ 为避雷针的冲击接地电阻。对小型化变电所,由于占地少,要把避雷针的接地与变电所地网保持上式的距离,一般都做不到。笔者建议,此时应把独立避雷针作构架避雷针看待,把独立避雷针的接地与变电所主地网可靠地连接在一起,并在避雷针处用垂直式水平接地体加强其集中接地,并要有地网电位均衡的措施,防止避雷针引雷时,造成危险的局部电位升高或反击。

### 3.3 接地网的布局 and 水平垂直接地体的使用

在实际接地工程中发现,以前设计施工的接地

网,甚至很大的变电所地网还有采用长孔地网的,且地网均压网格很疏,均压带相距达 30 多米。这样的地网均压就存在问题,在大接地短路电流流过地网时,很容易造成地网局部地电位升高,对微机保护和综合自动化系统造成地电位干扰,或者使地面产生危险的跨步电压和设备接触电压,对人身安全构成威胁。因此对发电厂、变电所地网,以方孔地网为宜,且网格间距不宜过大<sup>[3]</sup>。因大型地网的屏蔽作用,在地网内垂直接地体的降阻效果很小,所以对大型地网,垂直接地体应主要用于地网四周和内部构架避雷针、避雷器等需加强集中接地的地方。

## 4 结语

对接地工程中相关参数的控制应以有利于电气设备的安全运行为目的,对相关参数的控制上宽严适度,对接地装置的型式、降低接地电阻的方法要根据现场实际做认真的技术经济分析,采用合理的型式和降阻措施,不能片面地追求某一方面的指标,要综合考虑问题,既要保证安全运行,又要节省工程投资,把接地工程做好。

## 参考文献:

- [1] DL/T621-1997. 交流电气装置的接地[S].
- [2] 李景禄. 实用电力接地技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] DL/T620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].

作者简介:李景禄(1955-),男,河南确山人,副教授。

(上接第 263 页)

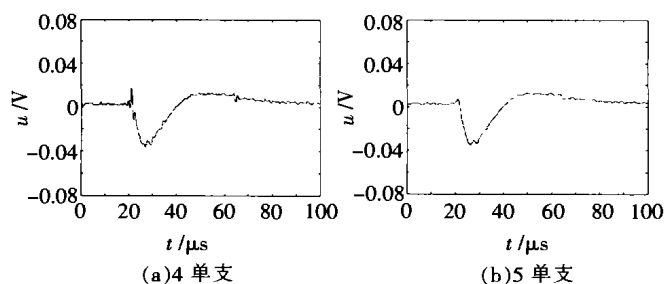


图 6 db8 小波单支重构信号

换法去干扰和消噪的优点,比较适合于笔者研究的附近雷击时建筑物金属构架上感应电流的测量分析。

## 4 结语

在附近雷击时建筑物金属构架上的感应电流测量中,由于干扰强烈,必须对 Rogowski 线圈采取有效的屏蔽措施,如外包锡箔,双屏蔽信号电缆等。针对构架远端支路上感应电流过小、信号湮没在干扰中的情况,采用了 3 种数字滤波方法进行分析比较,其中 FFT 阈值法和 FIR 等纹波滤波法具有简单、通

用的特点,但都有其局限性,即必须事先知道被测信号的有效频段,才能设定阈值和通带。而小波变换法对未知信号具有多尺度分解,自动剥离干扰信号,体现实际信号的特点,无需预知被测信号的频带,因而比较适合于这种情况下的测量。

## 参考文献:

- [1] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [2] 李海燕, 余存仪, 蒋国雄. 纳秒级罗可夫斯基线圈的研制[J]. 西安交通大学学报, 1991(8): 41-46.
- [3] 楼顺天, 李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [4] 邹鲲, 袁俊泉, 龚享颖. MATLAB 6.x 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [6] 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布 [J]. 高电压技术, 1995(1): 85-86.

作者简介:徐霖(1974-),男,博士研究生,主要从事高电压试验测量技术和电磁兼容方面的研究。