

·信号与信息处理·

## 小波分析在地铁杂散电流光纤传感系统中的应用

蔡李花, 方海峰

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 基于光纤传感的地铁杂散电流监测系统所采集到的数据中存在的噪声主要包括3个方面: 传感光路系统的噪声、光电转换部分的噪声、信号采集电路的噪声。为了有效地消除整个传感系统中的噪声, 通过对其进行小波变换分析进行信噪分离。利用小波阈值去噪方法, 并通过合理地选取阈值函数, 以及选用Daubechies小波系作为小波基, 对电流信号以及杂散电流信号进行去噪处理。结果显示小波阈值去噪方法能很好地滤除信号中存在的绝大部分噪声, 处理后的曲线比较理想, 保证测量的准确度。

**关键词:** 小波分析; 杂散电流; 光纤传感; 阈值函数

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)04-0069-04

## Application of Wavelet Analysis in Optical Fiber Sensing System of Metro Stray Current

CAI Li-hua, FANG Hai-feng

(College of Mechanical & Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The data collected from the metro stray current monitoring system based on optical fiber sensing existed noise, which mainly included three aspects, such as the noise of sensing optical path system, the noise of photoelectric conversion and the noise of signal acquisition circuit. In order to eliminate efficiently those noises from the whole sensing system, the wavelet analysis is used to process signal-noise separation. The wavelet threshold denoising method is used, the threshold function is reasonably chosen and Daubechies wavelet is selected as a wavelet basis, which is used to eliminate the noise of current signal and stray current signal. The results show that the wavelet threshold denoising method can eliminate most of the noise, the curve is ideal after processing, and the accuracy of the measurement is ensured.

**Key words:** wavelet analysis; stray current; optical fiber sensing; threshold function

在实际测取的杂散电流信号中不可避免地存在一些与分析目的无关的噪声成分, 在信号分析与处理中, 为获取信号中反映其特征的有用的成分, 要对采取的信号进行滤波去噪处理。传统的滤波去噪方法对于处理非平稳信号表现出了很多局限性, 而小波分析由于能同时在时、频域中对信号进行多分辨分析, 所以能有效地区分信号中的突变部分和噪声, 从而实现信号的去噪。文中采用基于小

波分析的阈值法去噪技术对光纤电流传感系统所采集到的电流数据进行滤波去噪处理。

### 1 光纤电流传感系统的噪声来源

基于光纤传感的地铁杂散电流监测系统如图1所示, 系统中所采集到的数据不可避免地存在一定的噪声, 光纤电流传感系统的噪声主要包括3个方

收稿日期: 2011-06-03

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2006037)

作者简介: 蔡李花(1984-), 女, 江苏启东人, 博士研究生, 主要从事机电控制方面的研究。

面:传感光路系统的噪声、光电转换部分的噪声、信号采集电路的噪声。

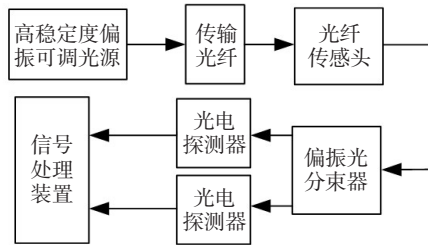


图1 光纤电流传感器实验光路系统

传感光路系统的噪声:在光纤电流传感光路中,由于受到一些环境因素和元器件本身固有的噪声影响,噪声会和被测电流信号同时存在,严重时被测电流信号会被噪声淹没。虽然在器件的选型中采用了一些低噪声的光学元器件,在结构的设计中考虑了一些低噪声的结构设计,但是光纤电流传感光路中的噪声还是存在的。

光电转换部分的噪声:在完成光电转换过程中,不仅给出表征被测对象的有用信号,同时伴随着无用的噪声信号,如热噪声、暗电流噪声、散射噪声等。这些噪声信号大大降低了探测器的探测性能和系统的信噪比。

信号采集电路的噪声:电路内部噪声是由组成电路的元器件导电特性产生的随机噪声,如电阻的热噪声,器件中电子流动不均匀造成的散粒噪声等。电子电路产生噪声的根本原因是元器件在通电时具有的内部噪声。元器件内部噪声主要包括3种<sup>[1-3]</sup>:热噪声、散粒噪声和低频噪声。

## 2 小波阈值去噪方法原理

近几年来有关小波阈值去噪方法的研究很多。阈值去噪方法从噪声中恢复信号效果最明显,而且在概念上有别于其他方法,具有理论上的完整性,又有普适性和相当大的灵活性。由于这种方法简单有效,而成为目前研究最广泛的方法<sup>[4]</sup>。小波阈值去噪原理如下<sup>[5]</sup>:假设有一信号的表达式为

$$f(k) = s(k) + n(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中, $s(k)$ 为原始信号; $n(k)$ 为方差为 $\sigma^2$ 的噪声信号。对信号 $f(k)$ 作离散小波变换,即

$$Wf(j, k) = 2^{-j/2} \sum_{n=N}^{N-1} f(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (2)$$

式中, $Wf(j, k)$ 为小波系数; $\psi(t)$ 为小波函数。在实际应用中,常采用Mallet算法来实现小波变换,即

$$Sf(j+1, k) = Sf(j, k) * h(j, k) \quad (3)$$

$$Wf(j+1, k) = Sf(j, k) * g(j, k)$$

相应的小波重构公式为

$$Sf(j-1, k) = Sf(j, k) * \tilde{h}(j, k) + Wf(j, k) * \tilde{g}(j, k) \quad (4)$$

式中, $j$ 为最佳尺度; $h$ 、 $g$ 为尺度函数和小波函数对应的低通和高通滤波器; $Sf(0, k)$ 为原始信号 $f(k)$ ; $Sf(j, k)$ 为尺度系数; $Wf(j, k)$ 为小波系数。

对 $f(k) = s(k) + n(k)$ 作离散小波变换之后,得到的小波系数 $Wf(j, k)$ 由两部分组成,一部分是信号 $s(k)$ 对应的小波系数 $W_s(j, k)$ ,另一部分是噪声 $n(k)$ 对应的小波系数 $W_n(j, k)$ 。小波阈值去噪的主要理论依据为:属于Besov空间的信号在小波域内其能量主要集中在有限的几个系数中,而噪声的能量却分布于整个小波域内,因此经小波分解后,信号的小波变换系数要大于噪声的小波变换系数,于是可以找到一个合适的数 $\lambda$ 作为阈值,将小于该阈值的小波系数置为零,把大于该阈值的小波系数直接保留下来或者按某一固定量向零收缩,从而得到估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ ,这样就实现了信噪的分离。小波阈值去噪方法的具体步骤为<sup>[6]</sup>:(1)对含噪声的信号进行几个尺度的小波变换,得到含噪声信号的小波系数 $w_{j,k}$ ;(2)用阈值作为门限对小波系数进行处理,得到纯净信号小波系数的估计 $\hat{w}_{j,k}$ ;(3)对小波系数的估计 $\hat{w}_{j,k}$ 进行小波反变换得到重构信号。

### 2.1 阈值函数及阈值选取

采用介于硬阈值函数和软阈值函数之间的阈值函数<sup>[7]</sup>,其定义为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k}) \sqrt{|w_{j,k}|^2 - \lambda^2}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

经分析可知,当 $|w_{j,k}| \geq \lambda$ 时,有 $|w_{j,k}| - \lambda \leq \sqrt{|w_{j,k}|^2 - \lambda^2} \leq |w_{j,k}|$ ,由此可得该阈值函数估计出来的数据是介于硬阈值函数和软阈值函数之间的。当 $|w_{j,k}| < \lambda$ 时, $\hat{w}_{j,k}$ 为非线性函数,且当 $|w_{j,k}|$ 不断增大

时,  $w_{j,k}^{\wedge}$  越来越接近于  $w_{j,k}$ 。

因为阈值的选取直接影响降噪的质量,所以阈值的选择在阈值去噪中是最关键的步骤。在小波变换中,对各层系数降噪所需的阈值一般是根据原信号的信号噪声比来取的。从实际检测信号中提取有用信号的方法有很多种,文中采用 Birge-Massart 策略来对阈值进行选取。

Birge-Massart 策略所确定的阈值,阈值通过如下的规则求得:(1)给定一个指定的分解层数  $j$ ,对  $j+1$  以及更高层,所有系数保留;(2)对第  $i$  层 ( $1 \leq i \leq j$ ),保留绝对值最大的  $n_i$  个系数,  $n_i$  由下式确定

$$n_i = M(j+2-i)^a \quad (6)$$

式中,  $M$  和  $a$  为经验系数,缺省情况下取  $M=L(1)$ ,也就是第一层分解后系数的长度。一般情况下,  $M$  满足  $L(1) \leq M \leq 2L(1)$ ,  $a$  的取值在降噪的情况下一般为  $a=3$ 。

## 2.2 小波函数的选取

在工程应用中,小波分析的一个重要的问题是最优小波基的选择问题。这是因为不同的小波基分析同一个问题会产生不同的结果。目前主要是通过用小波分析方法处理信号的结果与理论结果的误差来判定小波基的好坏,并由此选择小波基。选择小波函数常用的标准有<sup>[8]</sup>:

(1)  $\psi(t)$ 、 $\psi(\omega)$ 、 $\phi(t)$ 和 $\phi(\omega)$ 的支撑长度,即当时间或频率趋向无穷大时,  $\psi(t)$ 、 $\psi(\omega)$ 、 $\phi(t)$ 和 $\phi(\omega)$ 从一个有限值收敛到零的速度;

(2) 对称性,它在图像处理中对于避免移相是非常有用的;

(3)  $\psi(t)$ 和 $\phi(t)$ 的消失矩阶数,它对于压缩是非常有用的;

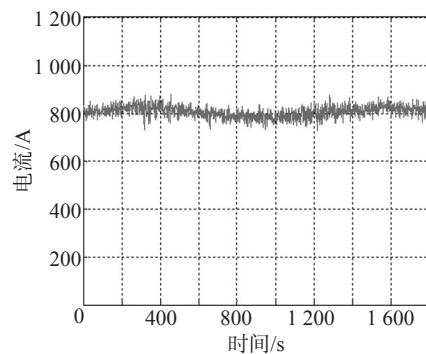
(4) 正则性,它对信号或图像的重构获得较好的平滑效果非常有用。

在小波分析中,用到的小波函数有很多种。由于实验信号是计算机上的离散数据点信号,因此需要对它们进行离散小波变换。MATLAB 中提供的常用的4种离散小波系为 Daubechies(dbN)小波系、SymletsA(symN)小波系、Biorthogonal(biorNr.Nd)小波系、Coiflet(coifN)小波系。信号去噪的基本目标是既希望能尽可能多地去除噪声,同时又希望原始信息丢得尽可能少。综合考虑各种要求,选用

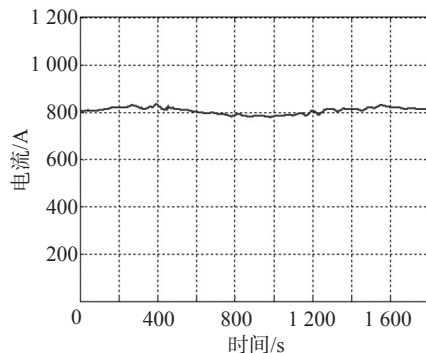
Daubechies(dbN)小波系作为小波基。Daubechies 函数是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,除了 db1(即 harr 小波)外,dbN 不具有对称性,也没有明确的表达式,但转换函数  $h$  的平方模是很明确的。db 小波族的支集长度和滤波器长度都是  $2N$  左右,消失矩为  $N$ ,可见这个序列的小波扩展性比较好,可以比较灵活地权衡增加支集长度带来的边界问题。

## 3 杂散电流监测数据的小波去噪

设置电流发生器的输出,当输出电流为 800 A 时,采集 30 min 内的电流数据如图 2a 所示;当电流发生器输出为杂散电流时,采集 30 min 内的电流数据如图 3a 所示。



(a) 原始数据



(b) 滤波后数据

图2 800 A 电流数据曲线对比

从图 2a 和图 3a 可以看出采集到的数据包含了很多噪声,为了提高电流检测的准确度,需对此数据进行降噪处理。使用 db4 小波把图 2a 和图 3a 的数据进行 5 层分解,然后使用 Birge-Massart 策略确定阈值,按照所述的阈值函数进行阈值处理,降噪处理前后的效果如图 2b 和图 3b 所示。从图 2b 和图 3b 可以看出小波阈值去噪方法能很好地滤除信号中存在的绝大部分噪声,处理后的曲线比较理想。

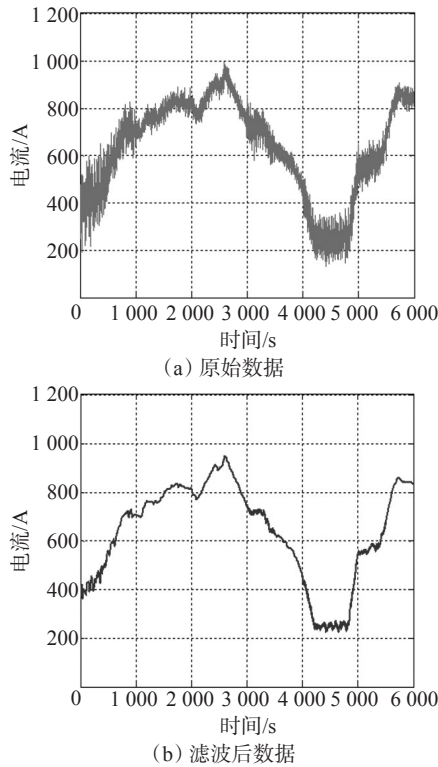


图3 杂散电流数据曲线对比

## 4 结论

通过分析基于光纤传感的地铁杂散电流监测

(上接第21页)

## 3 结论

光导型探测器在受到较高功率但低于永久损伤阈值的激光辐照之后,对相同信号的输出响应特性有了较大程度的改变。分析认为:探测器材料中的缺陷在较高功率密度激光辐照下退杂化,形成的空位引起了探测器工作材料的比热容增加,降低了探测器工作材料在波段外激光辐照下温度升高的速率。

探测器在较高功率密度激光辐照处理前后的探测率、响应率、信噪比等参数没有进行相应的测量,因此无法预估探测器整体性能是否得到改善。但是,采用适当的方法对探测器工作材料进行退杂化处理能够降低探测器工作材料在高功率密度激光辐照下的升温速率,有助于提高探测器系统抗强激光辐照的能力。

系统所采集到的数据,得出光纤电流传感系统的噪声主要包括3个方面:传感光路系统的噪声、光电转换部分的噪声、信号采集电路的噪声。利用小波阈值去噪方法对杂散电流数据进行处理,结果表明,小波阈值去噪方法能很好地滤除信号中存在的绝大部分噪声。

## 参考文献

- [1] 张若岚. 电路系统中的噪声问题研究[J]. 电讯技术, 2001(2):62-65.
- [2] 靳孝峰,张琦. 电子电路中的噪声及其抑制措施[J]. 焦作大学学报,2001(4):57-59.
- [3] 吕菁华,袁杰. 电路元件引起的电路噪声[J]. 高师理科学刊,2001,21(3):31-33.
- [4] 尹喜超. 基于小波变换的信号消噪[D]. 北京:华北电力大学,2004.
- [5] 崔华. 小波分析及其在信号处理中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
- [6] 李士心,刘鲁源. 基于小波阈值去噪方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2006,23(3):478-479.
- [7] 董永生. 小波变换与阈值函数在数字信号去噪中的应用[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [8] 王丽秀. 基于小波变换的光纤传感器信号消噪技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2003.

## 参考文献

- [1] 孙承伟,陆启生,范正修,等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002:2-3.
- [2] 朱克学,张贇,李向阳,等. 激光辐照对HgCdTe长波光导型探测器性能的影响[J]. 激光与红外,2001,31(4):234-235.
- [3] 李修乾,程湘爱,王睿,等. 波段外CW CO<sub>2</sub>激光辐照HgCdTe探测器热效应研究[J]. 中国激光,2003,30(12):1070-1074.
- [4] 李莉,陆启生. 光导型HgCdTe光电探测器对双波段组合激光辐照动态响应的数值模拟[J]. 光学学报,2008,28(10):1953-1957.
- [5] 马丽芹,陆启生. 波段外激光辐照PC型探测器的反常响应机制[J]. 强激光与粒子束,2006,18(2):201-204.
- [6] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京:电子工业出版社,2009:76.
- [7] 刘培生. 晶体点缺陷基础[M]. 北京:科学出版社,2010:172-174.
- [8] 陆启生,蒋志平,刘泽金,等. PC型HgCdTe探测器的记忆效应[J]. 红外与毫米波学报,1998,17(4):317-320.