

何康、晏锐、郑海刚等, 2013, 伪魏格纳-维勒分布在地磁时频分析中的应用, 中国地震, 29 (1), 157 ~ 167。

• 电磁 •

## 伪魏格纳-维勒分布在地磁时频分析中的应用

何康<sup>1)</sup> 晏锐<sup>2)</sup> 郑海刚<sup>1)</sup> 李军辉<sup>1)</sup> 方震<sup>1)</sup>

1) 安徽省地震局, 合肥市蜀山区长江西路 558 号 230031

2) 中国地震台网中心, 北京 100045

**摘要** 采用伪魏格纳-维勒分布对静日和扰日的地磁场  $Z$  分量数据进行时频分析, 结果表明周期为 6 ~ 24h 的静日变化在静日和扰日的各个台站都存在; 而 2 ~ 6h 部分既受外源场影响, 也反映了区域信息, 表现出感应磁场和地壳磁场的特征。采用平滑伪魏格纳-维勒分布对汶川 8.0 级地震前各台的  $Z$  分量数据进行时频分析, 结果显示震中附近的地磁台站在震前记录到了周期约为 4.4h 的异常信号, 其振幅随震中距增大而减小。

**关键词:** 地磁  $Z$  分量 伪魏格纳-维勒分布 时频分析 汶川 8.0 级地震

[文章编号] 1001-4683 (2013) 01-0157-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

### 0 引言

自 1966 年邢台地震后我国开始有组织地研究地震地磁前兆, 经过 40 多年的探索积累, 已发现多种方法处理后的地磁数据在若干中强地震前均有异常反应 (陈绍明等, 1997; 丁鉴海等, 2004、2006; 肖武军等, 2006)。特别是在汶川  $M_s 8.0$  地震后, 多位研究者对震前的地磁数据进行了深入分析, 也发现了较为明显的震前前兆异常 (王武星等, 2009; 胡久常等, 2009; 张建国等, 2009; 曾小苹等, 2011)。虽然震前地磁异常现象已经被大量的破坏性地地震震例所证实, 然而地磁场是由内源场和外源场叠加构成的, 包含着十分丰富的频谱成分 (詹志佳等, 1992), 各种成分的变化灵敏地反映了地球内部与地球外部空间中发生的与电磁过程有关的各种物理过程 (张玉敏等, 2004)。地震前兆异常信息在地磁场的各种成分中所占的比例偏小, 要提取出前兆异常信息就需要使用数字信号处理的方法。

傅里叶分析是数字信号处理中常用方法之一, 傅里叶变换是在整体上将信号分解为不同的频率分量, 但其缺乏局域性信息, 即不能表明某种频率分量发生在哪些时间内, 而这对于非平稳信号是十分重要的<sup>①</sup>。为了克服传统傅里叶变换的这种全局性变换的局限性, 必须

[收稿日期] 2012-09-14; [修定日期] 2012-10-20

[项目类别] “十二五”国家科技支撑项目 (2012BAK19B04-01-04) 和中国地震局青年震情跟踪课题 (2012020401) 共同资助

[作者简介] 何康, 男, 1982 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地震电磁学和地震预报的研究。

E-mail: hekang@mail.ustc.edu.cn

① 石珂, 2009, 基于 Matlab 的线性调频信号的时频分析, 中国科技论文在线

用局部变换的方法,以时间和频率的联合函数来表示信号,这就是时频分析思想的来源。时频分析方法按照时频联合函数的不同可以分为线性时频表示和双线性时频表示两种。常见的线性时频表示有短时傅里叶变换、Gabor 展开以及小波变换等。近年来国内也应用这些方法,特别是其中的小波变换对地磁信号开展了尝试性的分析,小波变换能够有效地消除噪声,突出异常信息(邢西淳等,2004;周志坚等,2004;陈伯舫,2006;寿海涛等,2009)。但是,小波变换对时频平面的划分是机械式的,不具备自适应的特点;引入的尺度因子与频率没有直接的联系,只是在时间-尺度二维平面分析信号,频率没有表现出来,因此小波变换的结果不是一种真正的时频谱(李振春等,2010)。另外,从本质上说,包括小波变换在内的所有线性时频表示都不能描述信号的瞬时功率谱密度。相比而言,双线性时频表示就是一种更加直观和合理的信号表示方法。双线性时频表示也称作二次型时频表示,它反映的是信号能量的时频分布,魏格纳-维勒分布(Wigner-Ville Distribution,以下简称 WVD)就是常用的一种双线性时频表示,可将其看作信号能量在时域和频域中的分布。

理论上 WVD 在时频分析中的分辨率最高,是进行非平稳信号分析和处理的有力工具。WVD 具有以下特性:①较好的边缘分布特性;②对信号瞬时频率和群延时的估计是无偏的;③可对信号进行滤波;④可对信号进行调制。WVD 的不足是不能保证非负性,尤其是对多分量信号会产生严重的交叉项干扰(张梅军等,2010)。许多学者针对其不足提出了改进,如伪魏格纳-维勒分布(PWVD)、平滑伪魏格纳-维勒分布(SPWVD)等,这些方法与 WVD 相比,能有效抑制交叉项,在信噪比较低的情况下能准确辨识出微弱信号,已在通信、雷达、国防、声纳、地震勘探、CT 分析、故障诊断等领域得到了初步应用(潘建华,2005;吕久明等,2007;张宁等,2009;夏洪瑞等,2009;候树杰,2011)。

本文采用改进后的 WVD 方法对地磁  $Z$  分量数据进行时频分析,描述地磁信号能量在时域和频域的分布特征。首先,利用 PWVD 对扰日和静日的地磁  $Z$  分量数据分别进行时频分析,明确地磁场主要频率成分的时域变化,探讨各频率成分的来源机理;其后,利用 SPWVD 对汶川 8.0 级地震前震中附近地区地磁台站的  $Z$  分量数据进行时频分析,寻找可能与孕震信息相关的异常信号。

## 1 方法简介

魏格纳分布是由 Wigner 于 1932 年提出的(Wigner, 1932),最初应用于量子力学的研究。1948 年 Ville 将其引入信号分析领域(Ville, 1948)。1980 年 Claasen 和 Mecklenbraker 联合发表的论文中详细论述了 WVD 的概念、定义、性质以及数值计算等问题(Claasen et al, 1980)。

对信号  $s(t)$ , WVD 定义为

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s^* \left( t - \frac{1}{2}\tau \right) s \left( t + \frac{1}{2}\tau \right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中,  $s^*(t)$  为  $s(t)$  的共轭,  $\tau$  为信号的时延,  $f$  为信号频率。

虽然 WVD 具有较高的时频聚集性,但是对于多分量信号,其 WVD 会出现交叉项,产生“虚假信号”(葛哲学等,2006)。比如信号  $y(t) = x(t) + m(t)$ , 则

$$W_y(t, f) = W_x(t, f) + W_m(t, f) + 2\text{Re} [W_{x,m}(t, f)] \quad (2)$$

交叉项是二次型时频分布的固有结果,它来自于多分量信号中不同信号分量之间的交叉作用。时频分布的交叉项一般比较严重, $2\text{Re}[W_{x,m}(t,f)]$  的值甚至可能大于有用信号分量的值,造成信号的时频特征模糊不清。因此如何有效抑制交叉项,对时频分析非常重要。

事实上,交叉项与时频分布的有限支撑特性密切相关,而交叉项的抑制又主要通过核函数的设计来实现,常用的加核函数后的 WVD 有伪魏格纳-维勒分布(PWVD)和平滑伪魏格纳-维勒分布(SPWVD)。

伪魏格纳-维勒分布(PWVD)

$$W_z^p(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) s^*(t - \frac{1}{2}\tau) s(t + \frac{1}{2}\tau) e^{-j2\pi\tau f} d\tau \quad (3)$$

式中  $h(\tau)$  是窗函数。

平滑伪魏格纳-维勒分布(SPWVD)

$$W_z^s(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s^*(t - u - \frac{1}{2}\tau) s(t - u + \frac{1}{2}\tau) g(u) h(\tau) e^{-j2\pi\tau f} d\tau \quad (4)$$

式中  $g(u)$ 、 $h(\tau)$  是两个实的偶窗函数,且  $h(0) = g(0) = 1$ 。

PWVD 相当于在频域对 WVD 进行了平滑,而 SPWVD 是在 PWVD 的基础上,在时域再次进行了平滑,进一步降低了交叉项的影响。为了减少计算量,本研究在对单天数据进行计算时,采用 PWVD 方法,对连续多天数据计算时则采用 SPWVD 以减少交叉项。PWVD 和 SPWVD 既保留了 WVD 的优点,也可以抑制交叉项。Wu 等(2009)在仿真试验中用它们分析了多分量信号,结果表明 PWVD 和 SPWVD 时频分析能够描绘信号的非平稳性,并能抑制交叉项,比 WVD 的效果更好。本文主要采用 PWVD 和 SPWVD 方法,对地磁  $Z$  分量数据进行时频分析。

## 2 数据选取及预处理

“十五”期间“中国数字地震观测网络项目”实施后,全国拥有了覆盖 124 个台站的 150 套数字化、网络化地磁相对观测仪器。这些仪器绝大部分运行良好,数据汇集及时,数据预处理正确(朱荣等,2010)。因地磁  $H$  分量受外空场影响较大,本文选择  $Z$  分量数据进行分析。从中国地磁台网中心下载并整理了 116 个地磁台站的相对观测  $Z$  分量数据,其中大多数是 2007 年后新建的。选择 2007~2008 年 6 月间数据连续平稳的相对观测  $Z$  分量的小时值进行时频分析,共计 49 个台站(图 1)。绝大多数台站所使用的地磁观测仪器为 FHDZ-M15 地磁组合观测系统(分钟采样)和磁通门磁力仪 GM4(秒采样),其中 FHDZ-M15 主要由主机、磁通门磁力仪、OVERHAUSER 磁力仪组成,实现地磁相对值和绝对值的组合观测,因此 FHDZ-M15 和 GM4 对  $Z$  分量相对值的记录都是由磁通门传感器完成的。磁通门传感器的基本原理是基于磁芯材料的非线性磁化效应,具有分辨率高(最高可达 10~11T)、测量弱磁场范围宽(在 8~10T 以下)且易于实现数字化等优点(吴琼等,2008;王晓美等,2008)。

在时频分析之前,首先要对实测数据进行预处理,目的是去掉趋势性变化和随机误差并进行标准化处理(康国发,1990)。按照场源位置划分,地磁场可以分为内源场和外源场两大部分。内源场可以进一步分为地核场、地壳场和感应场等 3 部分。地核场又称做主磁场,

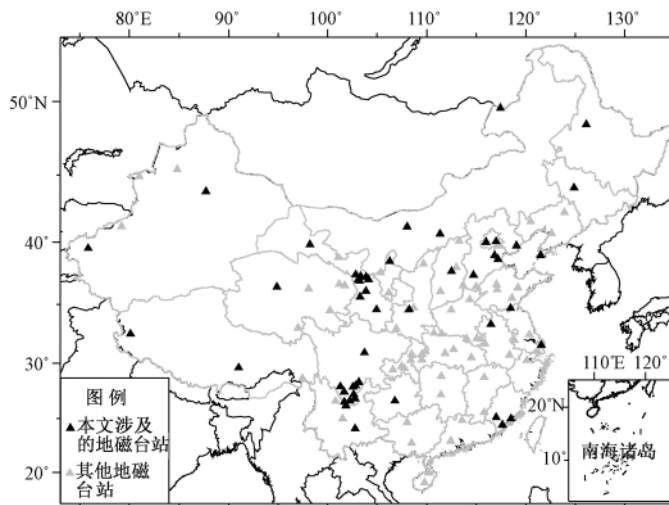


图1 含有  $Z$  分量数据的地磁台站分布图

现在普遍认为它是由地核磁流体发电机过程产生的,其随时间的缓慢变化叫做长期变化(徐文耀,2009)。由于主磁场来源于地核,且变化缓慢,首先采用 K-L 最佳直线拟合法对地磁  $Z$  分量进行处理,去除地磁场的长期变化并实现标准化。

为了抑制或削弱交叉项,国内外学者研究了多种方法,主要有预滤波法、多分量分离法与辅助函数法等,并且都采用解析信号以消除由负频率成分产生的交叉干扰项。假设  $s(t)$  是一实的非平稳信号,则其解析信号  $z(t)$  定义为

$$z(t) = s(t) + jH[s(t)] \quad (5)$$

式中,  $H[s(t)]$  是  $s(t)$  的 Hilbert 变换。

解析信号的优点在于它剔除了实信号中的负频率成分,同时不会造成任何信息损失,也不会带来虚假信息。对去除线性趋势后的  $Z$  分量数据采用 3 点线性平滑滤波法进行处理,将信号分离为主要周期为 6~24h 和 2~6h 的两个部分。利用 Matlab 软件的时频工具箱对分离后的数据进行 Hilbert 变换,构建解析信号,再进行 PWVD 时频分析。图 2(a) 为蒙城台 2007 年 11 月 20 日地磁场相对观测  $Z$  分量原始曲线;图 2(b) 为对  $Z$  分量数据先去除线性趋势,然后进行 3 点线性平滑滤波后得到的残差值曲线;图 2(c) 是直接对残差值进行 PWVD 分析得到的时频分布图;图 2(d) 是利用残差值进行 Hilbert 变换构建的解析信号进行 PWVD 分析得到的时频分布图。图 2(c)、(d) 中色标为时频分析后的幅值,可理解为能量在时域和频域中的分布。由于利用小时值进行时频分析,周期为频率的倒数,单位为 hour。结果显示,构建解析信号能够有效抑制交叉项,提高 PWVD 分析的时频聚集性。

## 3 结果

### 3.1 静日和扰日 $Z$ 分量时频分析

地磁场变化的周期性特征早已为人们所观测与研究。地球主磁场、地壳磁场和变化磁场各有不同的时间变化特点,它们覆盖了很宽的谱带。对滤波分离后的地磁  $Z$  分量数据分别进行 PWVD 时频分析,图 3(a)、图 3(b) 分别是 2007 年 12 月 7 日(当天  $k$  指数之和为 8,

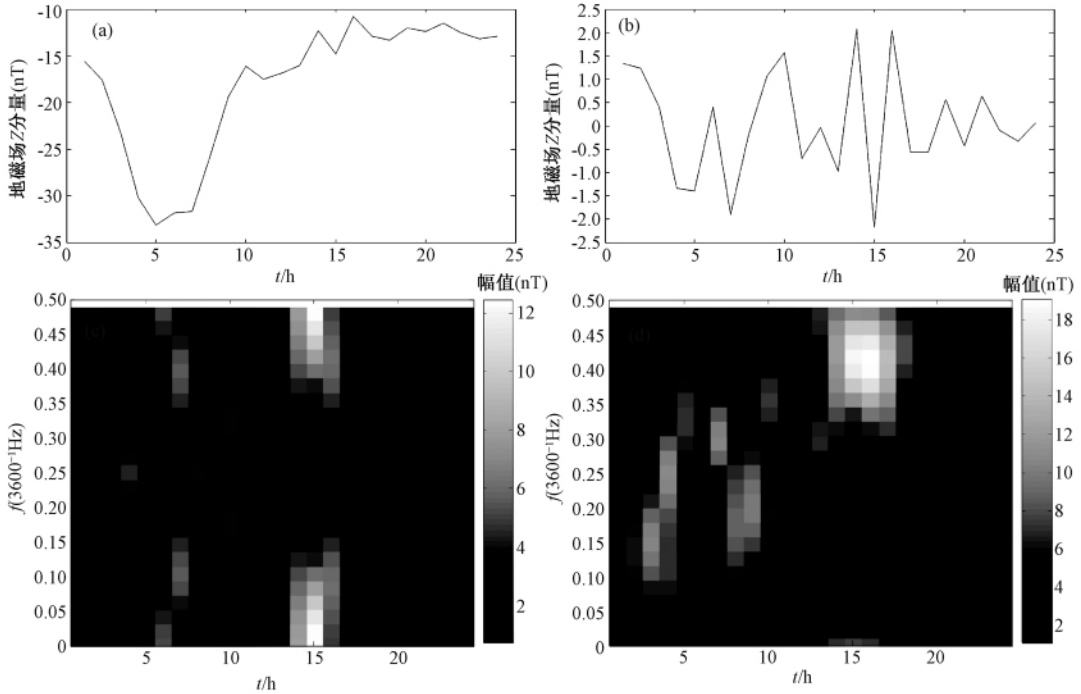


图2 (a) 蒙城台 2007 年 11 月 20 日地磁场相对观测 Z 分量原始曲线; (b) Z 分量去趋势后 3 点滤波残差曲线; (c) 残差值原始信号 PWVD 时频分布; (d) 残差值解析信号 PWVD 时频分布

静日) 静海台和南昌台 3 点线性平滑滤波值的 PWVD 结果, 图 3 (c)、图 3 (d) 分别是 2007 年 11 月 20 日(当天  $k$  指数之和为 33, 扰日) 蒙城台(静海台当天缺数) 和南昌台 3 点线性平滑滤波值的 PWVD 结果, 其显著周期都为 6 ~ 24h。结果显示, 地磁 Z 分量滤波后的 6 ~ 24h 周期部分在静日和扰日的时频分布基本一致, 最显著的优势周期为 12h, 且能量最大时刻相近, 体现出外源场的全球性特征, 表明这部分地磁场中主要含有地磁场静日变化, 它是由电离层等离子体在地球磁场中的运动产生的。

图 4 (a)、图 4 (b) 分别是 2007 年 12 月 7 日(当天  $k$  指数之和为 8, 静日) 蒙城台和成都台滤波后残差的 PWVD 结果, 图 4 (c)、图 4 (d) 分别是 2007 年 11 月 20 日(当天  $k$  指数之和为 33, 扰日) 蒙城台和泾县台滤波后残差的 PWVD 结果, 其显著周期都为 2 ~ 6h。结果显示, 地磁 Z 分量滤波后的 2 ~ 6h 周期部分在静日的时频分布一致性较差, 在扰日相距较近台站的时频分布的一致性增强, 表明这部分地磁场主要体现出区域性特征, 但也受到外空场的影响。磁扰的影响具有广域性, 图 4 (c)、图 4 (d) 中最显著周期都为 2.5h, 且出现时间一致。从地磁场的构成来看, 这部分地磁场主要包含了地壳场和感应场。地壳场是由地壳和上地幔磁性岩石产生的, 几乎不随时间变化, 但是地震、火山等剧烈的构造运动可能引起局部磁场的快速变化。感应场是外源场在地球内部生成的感应电流的磁场, 其根本起源是磁层-电离层系统的电流, 但是直接产生感应场的源是分布在地壳和地幔中的感应电流。所以感应场既与外源场有关, 也与地壳和地幔中的电性有关。综合来看, 这部分磁场中包含了较多的地壳和地幔中的信息, 是我们研究地震前兆异常信息的重点。

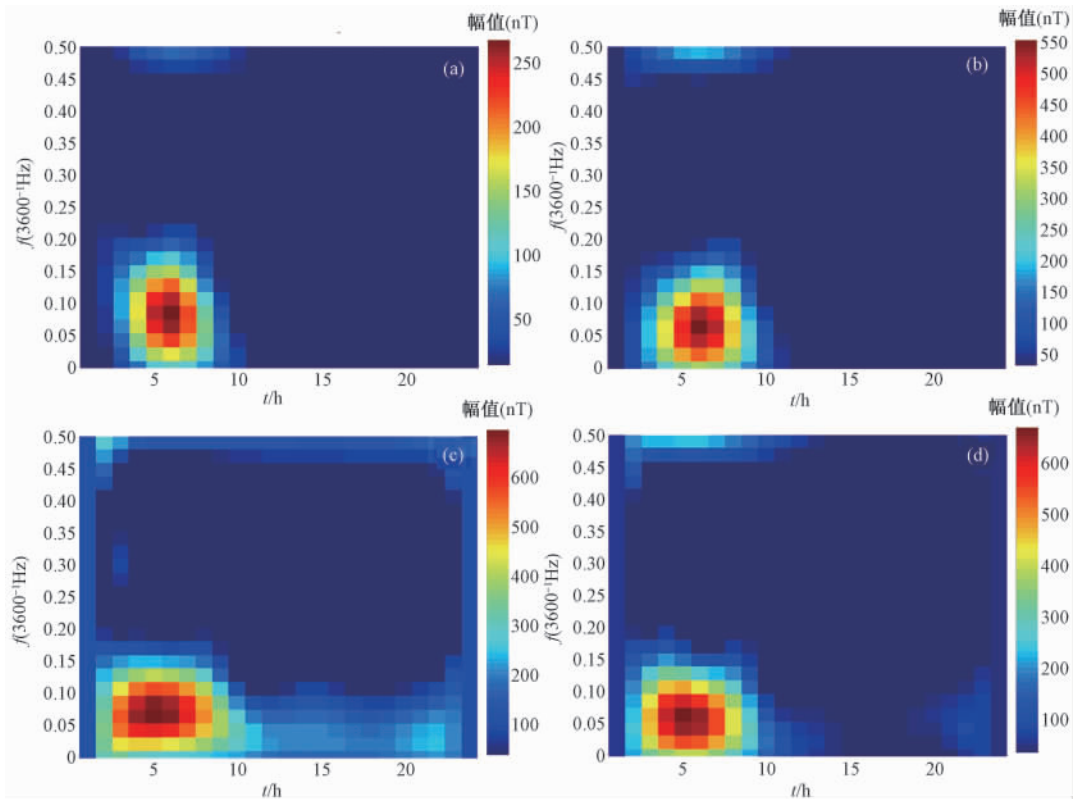


图3 Z分量滤波后主要周期为6~24h部分PWVD时频分布图  
(a) 静日静海台; (b) 静日南昌台; (c) 扰日蒙城台; (d) 扰日南昌台

### 3.2 汶川8.0地震前Z分量时频分析

2008年5月12日四川汶川发生了 $M_s$  8.0地震,对汶川地震前半年内四川省及周边地区的地磁Z分量进行SPWVD时频分析,结果在5月8日成都台地磁Z分量滤波后主要周期为2~6h部分的SPWVD结果中发现了异常高值信号(图5)。

由图5(a)可见,Z分量滤波后主要周期为2~6h部分的原始曲线在5月8日出现了短时的大幅突降,降幅超过正常变幅2倍多;使用SPWVD方法后不仅明确了异常信号的周期约为4.4h,且该信号的振幅还超过正常背景值5倍多,表明SPWVD方法在复杂背景下能够显著突出微弱信号,并明确异常信号周期。将成都及邻近地磁台Z分量滤波后主要周期为2~6h部分中4.4h的成分提取出来,并研究其振幅随时间的变化。为与外空场地磁活动进行对比,增加同时段的 $\Sigma Kp$ 指数进行分析。 $Kp$ 指数全称为“行星性三小时磁情指数”,是一种描述全球地磁活动性的指数。通过对比分析,发现邻近台站周期为4.4h的地磁成分随时间变化较为一致,但与全球地磁活动性的一致性较差。从2008年4月开始,成都台出现了几次明显的高值异常,其间 $Kp$ 指数未出现同步高值(图6)。

出现高值的2008年5月8日当天 $k$ 指数之和为13,是一个典型的磁静日。为了对比,我们对其他扰日和静日震中附近台站进行了类似的分析,得到了这些台站地磁Z分量滤波后主要周期为2~6h部分中4.4h成分的当天最大振幅并归一化(图7)。图7(a)是2008年

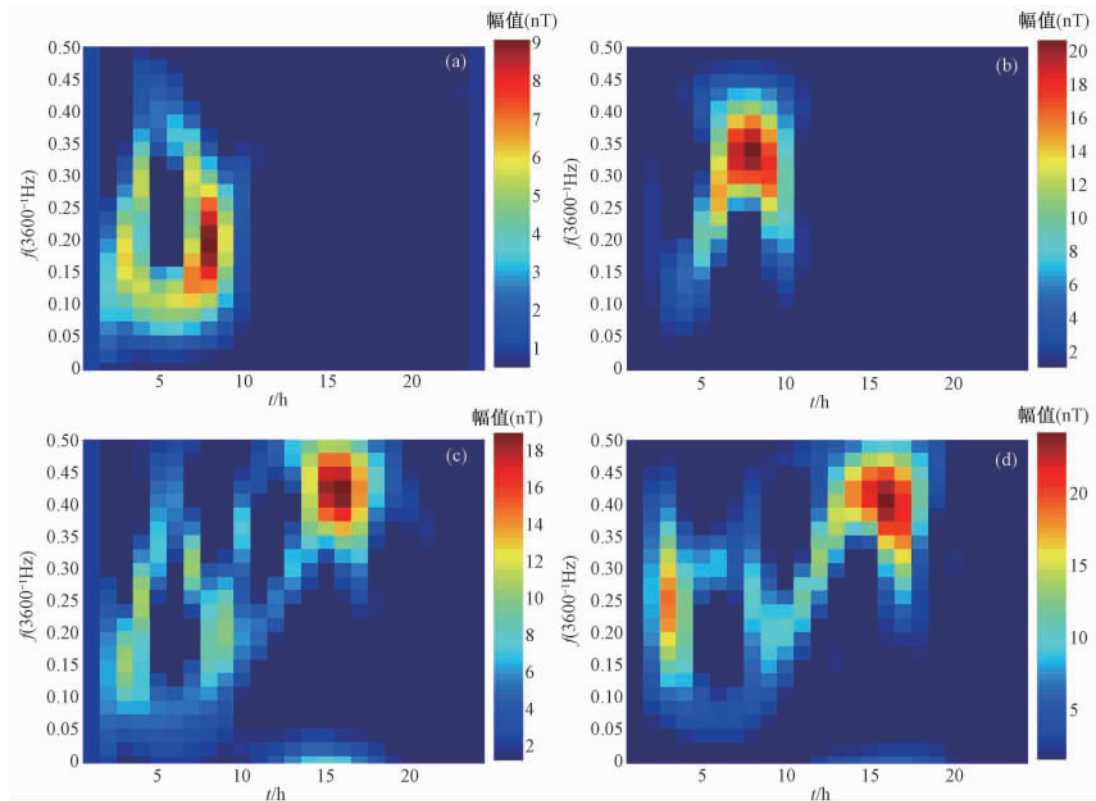


图4 Z分量滤波后主要周期为2~6h部分PWVD时频分布图

(a) 静日蒙城台; (b) 静日成都台; (c) 扰日蒙城台; (d) 扰日泾县台

1月5日,当天 $k$ 指数之和为30,是一个扰日;图7(b)是2008年3月7日,当天 $k$ 指数之和为7,是一个静日(当天四川最南部的南山台、平地台、会理台、宁南台由于存在缺数未参与计算);图7(c)是出现异常的2008年5月8日,当天 $k$ 指数之和为13,也是一个静日。从图7(a)、图7(b)中可以看出,静日各台的振幅都非常小,扰日的振幅远远大于静日,大多数台站的振幅接近。通过计算其它静日的数据,确定在静日4.4h的周期成分变化很小。5月8日也是静日,当天4.4h的周期成分的振幅也应该很小,但从图7(c)中可以看到当天成都等台的振幅明显比静日的振幅大,并且总体上存在着随震中距增大振幅减小的现象。

## 4 结论与讨论

尽管以WVD为代表的二次型时频表示已经在通信、国防、地震勘探等领域得到了初步应用,但在地震预测领域还未发现相关文献。本研究尝试将这种方法应用到地震前兆数据处理中,结果表明该方法在对汶川地震前的数据处理中取得了较好的效果。伪魏格纳-维勒分布(PWVD)具有较好的时频聚集性,能够对地磁数据进行时频分析。分析结果表明,地磁Z分量去除长趋势后,6~24h部分主要包含静日变化,2~6h部分既受外空场影响,也包含了区域地下电性信息。改良后的WVD方法能在信噪比较低的情况下准确辨识出微弱信号,本研究使用平滑伪魏格纳-维勒分布(SPWVD)对地磁Z分量去除长趋势后的2~6h部

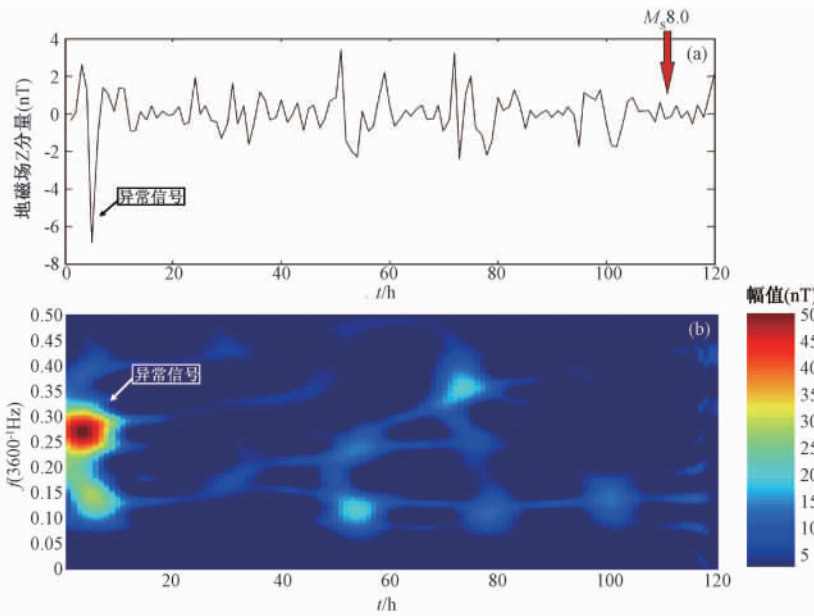


图5 (a)2012年5月8~12日成都台地磁Z分量滤波后主要周期为2~6h部分的原始曲线;(b)SPWVD时频分布图

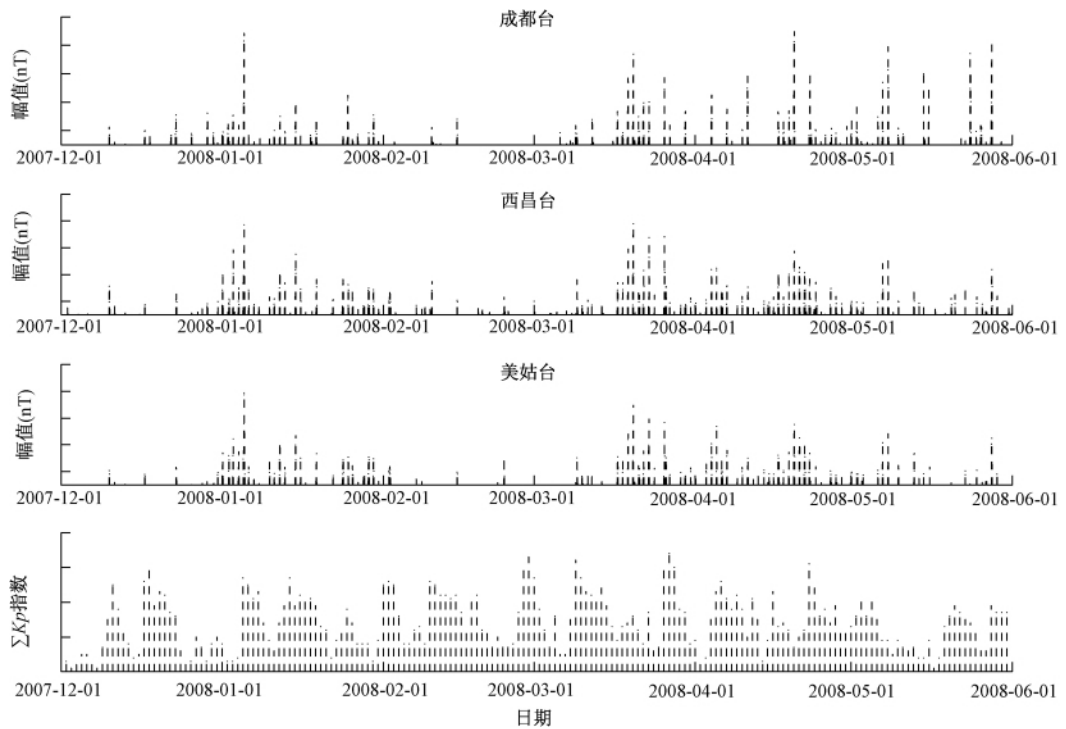


图6 2007年12月~2008年5月成都台、西昌台、美姑台地磁Z分量滤波后主要周期为2~6h部分中4.4h成分的振幅变化与ΣKp指数



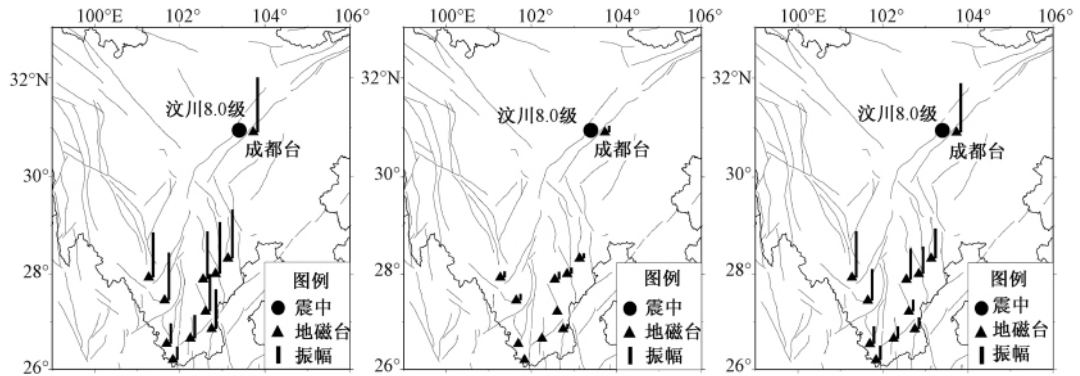


图7 2008年1月5日(a)、3月7日(b)、5月8日(c)汶川地震震中附近地磁台Z分量滤波后主要周期为2~6h部分中4.4h成分的当天最大振幅

分进行分析,凸显了汶川地震前震中附近地磁台站记录到的异常信号。该信号出现在磁静日,表明不是外空场变化导致的,周期为4.4h,且随震中距增大而振幅减小,显示该信号来源于震中附近的地壳磁场或感应磁场变化。

地震孕育过程是震源区地下应力缓慢积累的过程。按照压磁理论,应力变化会引起地下岩石磁性的改变,从而导致地磁异常变化(林云芳,1990)。感应磁效应理论认为,在地震孕育过程中,由于地下力学、热力学和其他物理化学因素的作用,震源区及其相关的断裂带电导率发生局部异常变化,使得外源场在地球内部的感应电流分布发生畸变,从而引起地磁场的局部异常(徐文耀,1994)。根据压电效应和位错理论,孕震过程中的应力变化能够产生感应电荷,激发电磁信号(Huang,2002;马占虎等,2004)。岩石实验也证明,在岩石破裂过程中能够观测到电性变化,脆性破裂出现电磁辐射信号的可能性较大,含石英、黄铁矿、黄铜矿和长石等矿物的岩石也更容易产生电磁信号(陆阳泉等,1990;刘煜洲等,1997)。动电效应认为,岩石孔隙溶液中带电离子的运动会产生电磁信号(Ren et al,2012)。赵超等(2012)提出,孕震、发震过程中产生的地热异常可能激发地壳内含有磁铁矿的岩石产生热电效应,从而导致背景地电场产生异常现象。本研究表明孕震过程可能导致地壳磁场或感应磁场出现异常变化,从而引起地磁场4.4h附近周期出现异常信号,这对于探索强震前地磁场的短临异常具有重要的参考意义。

虽然PWVD方法在对汶川震前的数据处理中取得了较好的效果,但由于我国从2007年后才开始大规模数字化观测,且地磁台网密度较低,本项研究仍存在选取资料时间不长、震中周围台站不多等不足。研究中同时也对2010年玉树 $M_s$ 7.1地震前震中附近地磁数据进行了PWVD分析,震中附近的玉树台(40km)、大武台(370km)地磁数据存在大量缺数、大幅漂移等问题,未能参与计算,而都兰台(380km)及其余地磁台数据均未发现明显前兆异常。本项研究只有一个汶川地震震例,由此得出结论尚显单薄,因此对PWVD方法在地磁前兆数据中的应用仍需作深入研究。

致谢:感谢中国地震局地震预测研究所邵志刚博士、张浪平博士、刘琦在本研究中给予的建议和帮助。

## 参考文献

- 陈伯舫,2006,用小波法研究台湾省两次7.6级大震前后仑坪台的地磁变化,地震地磁观测与研究,27(1),45~48。
- 陈绍明、将邦本,1997,利用地磁日变低点位移确立地震短临预报指标的方法,地震,17(1),14~24。
- 丁鉴海、申旭辉、潘威炎等,2006,地震电磁前兆研究进展,电波科学学报,21(5),791~801。
- 丁鉴海、余素荣、肖武军,2004,地磁异常现象及其在地震预报中的应用,石油地球物理勘探,39(增刊),27~30。
- 葛哲学、陈仲生,2006, MATLAB 时频分析技术及其应用,北京:人民邮电出版社。
- 候树杰,2011,时频分析方法对比及S变换在地震数据处理中的应用,油气地质与采收率,18(3),44~46。
- 胡久常、刘伟、郭敏瑞等,2009,汶川8.0级特大地震前的地磁垂直分量日变“双低点”异常,地震学报,31(5),589~593。
- 康国发,1990,地磁场H和Z分量月均值的频谱分析,云南大学学报(自然科学版),12(1),88~92。
- 李振春、刁瑞、韩文功等,2010,线性时频分析方法综述,勘探地球物理进展,33(4),239~246。
- 林云芳,1990,我国震磁关系研究的新进展,地震,6,26~34。
- 刘煜洲、刘因、王寅生等,1997,岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理,地震学报,19(4),418~425。
- 陆阳泉、钱家栋、刘建毅,1990,大型花岗岩标本缓慢膨胀破裂过程中电阻率和声发射前兆特征的实验研究,西北地震学报,12(2),35~41。
- 吕久明、罗景青,2007, PWVD 在调频信号时频分析中的应用,弹道学报,19(2),93~96。
- 马占虎、杜学彬、谭大诚,2004,地震电性变化及其物理机理初步讨论,西北地震学报,26(3),234~239。
- 潘建华,2005, SPWD 在脉内混合信号时频分析中的应用,舰船电子对抗,28(5),41~44。
- 寿海涛、尹继尧、于海英等,2009,余山地磁信号的小波消噪处理,地震地磁观测与研究,30(3),85~89。
- 王武星、丁鉴海、余素荣等,2009,汶川  $M_s 8.0$  地震前地磁短临异常与强震预测探索,地震学报,31(2),172~179。
- 王晓美、滕云田、王喜珍等,2008, GM4 型磁通门磁力仪性能检验方法,地震地磁观测与研究,29(6),88~94。
- 吴琼、王喜珍、杨冬梅等,2008, FHDZ-M15 地磁组合观测系统 OVERHAUSER 探头对 FGE 探头的影响初探,地震地磁观测与研究,29(6),161~169。
- 夏洪瑞、张怿平、张乃勋,2009, FIR 与 PWVD 串联滤波消除随机噪声,石油地球物理勘探,44(1),33~37。
- 肖武军、余素荣、丁鉴海,2006,强震前的地磁异常现象,地震,26(4),52~58。
- 邢西淳、毛娟、刘春,2004,泾阳台地磁资料的初步分析,地震地磁观测与研究,25(1),63~68。
- 徐文耀,1994,中国地磁学研究的进展,地球物理学报,37(增刊),284~294。
- 徐文耀,2009,地球电磁现象物理学,合肥:中国科学技术大学出版社。
- 曾小苹、郑吉盎、王翌焱等,2011,震前特大地磁异常及其短临预警意义,中国工程科学,13(4),48~53。
- 詹志佳、高金田,1992,频谱分析在地磁与震磁研究中的应用,地震地磁观测与研究,13(4),30~37。
- 张建国、刘晓灿、唐庭梅等,2009,汶川地震前后中国大陆地磁场动态演化特征初步研究,地震研究,32(3),231~234。
- 张梅军、李曙光、孙启亮,2010,四种典型时频分析方法研究与仿真,仪器仪表与分析监测,3,25~27。
- 张宁、林春生、庞学亮等,2009,复杂海况下舰船微弱信号的时频辨识研究,兵工学报,30(6),834~838。
- 张玉敏、高金田、詹志佳,2004,北京及邻区地磁总场频谱的分析研究,西北地震学报,26(4),374~376。
- 赵超、申俊峰、张自力等,2012,含磁铁矿岩石热实验研究及其地震地质意义,矿物岩石,32(1),16~20。
- 周志坚、杜爱民,2004,用小波方法分析2000年7月13日地磁扰动,地球物理学进展,19(4),980~983。
- 朱荣、杨冬梅、张素琴等,2010,数字地磁台网数据应用进展,地震地磁观测与研究,31(4),102~107。
- Huang Q H,2002, One possible generation mechanism of co-seismic electric signals, Proceedings of the Japan Academy, 78(7B), 173~178.
- Ren H X, Chen X F, Huang Q H, 2012, Numerical simulation of coseismic electromagnetic fields associated with seismic waves due to finite faulting in porous media, Geophys J Int, 188, 925~944.
- Claassen TACM, Mecklenbräuker WFG, 1980, The Wigner distribution—A tool for time-frequency signal analysis—Part II: Discretetime signals, Philips J Res, 35, 276~300.
- Ville J, 1948, Théorie et application de la notion de signal analytique, Cables et Transmission, 2A, 61~74.
- Wigner E, 1932, On the quantum correction for thermodynamic equilibrium, Phys Rev, 40, 749~759.

Wu X Y, Liu T Y, 2009, Time-frequency analysis on wigner-ville distribution of seismic signal based on time-frequency rearrangement, *Oil Geophysical Prospecting*, **44**, 86 ~ 91.

## Application of PWVD in time-frequency analysis of geomagnetic field

*He Kang*<sup>1)</sup> *Yan Rui*<sup>2)</sup> *Zheng Haigang*<sup>1)</sup> *Li Junhui*<sup>1)</sup> *Fang Zhen*<sup>1)</sup>

1) Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** Using Pseudo Wigner-Ville Distribution (PWVD) in time-frequency analysis of geomagnetic Z-component on magnetically quiet and disturbed days, we discover geomagnetic daily variations with period 6 ~ 24 hour in all stations. The part with period 2 ~ 6 hour is not only influenced by external field, but also contains regional information, which shows the characteristics of crustal and induction field. Using Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution (SPWVD) in time-frequency analysis of geomagnetic Z-component before the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake, we found that the geomagnetic stations near the epicenter recorded an abnormal signal with period 4.4 hour before the major earthquake, and the amplitudes of the signal in different stations decreased with epicentral distance increased.

**Key words:** Geomagnetic Z-component Pseudo Wigner-Ville distribution Time-frequency analysis Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake