

安张辉, 杜学彬, 元丽华, 谭大诚, 陈军营. 2011. HHT 方法在受城市轨道交通干扰地电场观测数据中的应用. 地震学报, 33(2): 243-251.

An Zhanghui, Du Xuebin, Yuan Lihua, Tan Dacheng, Chen Junying. 2011. Application of Hilbert-Huang transform to geo-electric data disturbed by urban track traffic. *Acta Seismologica Sinica*, 33(2): 243-251.

HHT 方法在受城市轨道交通干扰 地电场观测数据中的应用*

安张辉^{1,2),†} 杜学彬^{1,2)} 元丽华³⁾ 谭大诚^{1,2)} 陈军营^{1,2)}

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国兰州 730000 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地

3) 中国兰州 730050 兰州理工大学

摘要 较为详细地介绍了希尔伯特-黄变换方法, 并将该方法中的经验模态分解功能和边际谱功能应用于受城市轨道交通干扰较大的北京市通州区西集镇地电场台站的观测资料中, 对城市轨道交通在地电场观测中的影响进行了分析研究. 结果表明, 在地电场观测台站受到轨道交通干扰时, 布极方位与轨道方向一致的测道所记录的数据受到的影响最大; 利用经验模态分解功能能够将地铁的干扰基本剔除, 使其影响降低到最小程度. 此外, 边际谱分析表明, 该台站受地铁干扰的能量较正常观测地电场能量要小.

关键词 希尔伯特-黄变换 经验模态分解 边际谱 地电场观测台站 城市轨道交通
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.02.011 中图分类号: P315.72⁺2 文献标识码: A

Application of Hilbert-Huang transform to geo-electric data disturbed by urban track traffic

An Zhanghui^{1,2),†} Du Xuebin^{1,2)} Yuan Lihua³⁾
Tan Dacheng^{1,2)} Chen Junying^{1,2)}

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration,
Lanzhou 730000, China

3) Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: The function of the empirical mode decomposition and margin spectrum of the Hilbert-Huang Transform (HHT) is applied to the analysis of geo-electric data observed by the Xiji station, Tongzhou district of Beijing. The recorded data is remarkably disturbed by the Beijing subway, making the data utilization rate very low. The effects of the subway on the data has been analyzed. The result shows that, when the recording track goes parallel to the subway line, the recorded data would be most severely affected. Making use of the

* 基金项目 科技支撑计划(2008BAC35B01-08)和国家财政部行业专项分项目(20070817)联合资助.

收稿日期 2010-03-08 收到初稿, 2010-06-13 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: anzhanghui5@hotmail.com

function of empirical mode decomposition of HHT can eliminate most subway disturbance and reduce its influence to the least. In addition, the analyzed result of margin spectrum indicates that the energy of the subway disturbance is lower than that of normally observed geo-electric field.

Key words: Hilbert-Huang Transform; empirical mode decomposition; margin spectrum; station of geo-electric observation; urban track traffic

引言

随着城市轨道交通规模的不断扩大,它在给人们带来便捷的同时却也给我们的地电场观测带来了不小的麻烦.受轨道交通干扰影响的地电场观测台站,在其原始波形上会出现周期性高频干扰,使得台站观测资料的利用率大大降低.而涉及这样问题的台站在北京、上海和天津等大城市都有.那么,如何消除或减小轨道交通对地电场观测的影响就显得非常重要了.为此,本文尝试将数字信号处理中的一些方法引入到地电场数据处理当中,对轨道交通产生的干扰进行剔除和分析研究.

目前,对于地电场观测资料中哪个频段与地震孕育发生联系较为紧密尚不十分清楚,轨道交通的干扰频段是多少也不得而知,因此,这两个未知参量限制了我们对各种数字滤波器的尝试利用.由于上述原因,我们必须寻求一种方法:它能够有效地将轨道交通的这种干扰从地电场观测数据中剥离出来,并且还不能影响地电场的真实情况.从这些需求出发,我们最终找到了希尔伯特-黄变换方法(以下简称 HHT 方法)(Huang *et al*, 1998, 1999, 2003). 该方法是美国国家宇航局的 N E Huang 等人提出的一种新的信号处理方法.其核心思想是:首先将信号进行经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称为 EMD)(Rilling *et al*, 2003, 2007),它能够有效地把各种频率成分以本征模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)的形式从原始信号中分离出来;然后对上述分离出来的 IMF 利用 Hilbert 变换进行计算,并对计算结果整个时间区间进行积分,便得到了希尔伯特边际谱(公茂盛,谢礼立, 2003). 类似于通常频谱分析功能,它可以得出所研究信号的优势频率.受轨道交通影响的地电场观测台站较多,我们以北京市通州西集地电场台站为研究对象,分析研究城市轨道交通对地电场观测的影响.

1 方法介绍

HHT 方法主要由两部分组成:经验模态分解(EMD)和希尔伯特变换(杨培杰等, 2007; 罗奇峰,石春香, 2003; 石春香,罗奇峰, 2003; 张立等, 2007; 段生全等, 2005; 周挚等, 2008; 蒯晓宇,刘洪, 2007).

1.1 经验模态分解

经验模态分解主要的思路是,利用时间序列的两个极值(极大值和极小值)包络线的平均值来确定“瞬时平衡位置”,并结合一定的判定条件,进而提取出信号的本征模态函数.设地电场观测信号的时间序列为 $X(t)$,其具体分解过程如下:

1) 找出 $X(t)$ 中所有的局部极大值和局部极小值,利用 3 次样条函数分别拟合局部极大值和局部极小值,从而得到上、下两条包络线.求出上、下包络线的平均值 $M_{10}(t)$,将原始序列 $X(t)$ 减去 $M_{10}(t)$,便可得到一个去掉低频的新时间序列 $H_{10}(t)$,对于不同的时间

序列 $H_{10}(t)$ 可能是本征模态函数, 也可能不是. 本征模态函数必须满足以下两个条件: ① 极值点数目和过零点数目相等或最多相差 1 个; ② 在任意点, 由局部极大值和局部极小值点所构成的两条包络线平均值为 0.

如果 $H_{10}(t)$ 不满足上述两个条件, 则需要重复上述取局部极值过程, 直到满足上述的两个条件为止. 假设经过 $k+1$ 次循环后满足了该条件, 则 $H_{1k}(t)$ 为第一阶的本征模态函数, 定义为 $C_1(t)$. 它是原始时间序列 $X(t)$ 中频率最高的成分, 也可以称 $C_1(t)$ 为原始时间序列的一个振动模态.

2) 用原始时间序列 $X(t)$ 减去 $C_1(t)$, 得到一个新的时间序列 $R_1(t)$. 再对 $R_1(t)$ 进行过程 1), 便可以得到第二阶本征模态函数 $C_2(t)$. 如此重复上述的过程, 直至 $R_n(t)$ 不能再分解出本征模态函数为止. 这时的 $R_n(t)$ 为原始时间序列 $X(t)$ 的残余项, 残余项通常为单调函数或者常数.

可以看出, 原始时间序列 $X(t)$ 可以表示成如下形式:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + R_n(t) \quad (1)$$

对于经验模态分解方法的完整性和正交性, 段生全等(2005)已有详细的说明. 由上述过程分解得到的各分量是具有完备性和几乎正交性的, 并且该过程也是自适应的. 其原因可简单理解为, 由于各本征模态函数是从原始时间序列中直接分解出来的.

1.2 希尔伯特变换

对于任意一个时间序列 $X(t)$, 其 Hilbert 变换定义为

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

其中, P 代表柯西主值(Cauchy principal value). 通过这个变换, $X(t)$ 和 $Y(t)$ 可以组合成一个复数信号 $Z(t)$.

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

式中, $a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}$, $\theta(t) = \arctan[Y(t)/X(t)]$. 希尔伯特变换可以简单地看成是信号序列与 $1/t$ 的卷积, 因此, 对信号的局部特性进行了突出体现. 此时, 可以定义瞬时频率为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

为了使瞬时频率具有意义, 进行 Hilbert 变换的信号序列必须是单组分的, 即时间和频率必须是一一对应的关系. 经过经验模态分解所得到的本征模态函数刚好满足该要求. 对 $X(t)$ 的 n 阶本征模态函数分别进行 Hilbert 变换后, 原始时间序列可以表示为

$$X(t) = \text{real} \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp \left[i \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_j(t) dt \right] \quad (5)$$

我们把式(5)称为 $X(t)$ 的 Hilbert 谱, 记为 $H(\omega, t)$. 上式中省略了残余项 $R_n(t)$. $a_j(t)$ 和 $\omega_j(t)$ 均为时间的函数, 把振幅显示在频率-时间平面上便可得到 Hilbert 谱 $H(\omega, t)$. 如果对 $H(\omega, t)$ 进行时间积分, 则可以得到 Hilbert 边际谱

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (6)$$

边际谱通常代表某固定频率在整个时间区域上所有振幅的总和，从边际谱中我们可以看出所研究时间序列的优势频率为多少。

2 台站概况

本文选择的研究对象为北京市通州区西集镇地电场观测台站^①。该台站观测场地位于夏垫断层的西南即大厂凹陷的西南边缘，距断层东边约 2 km，海拔高程 16 m。该断层为活动断层，小震时有发生。基岩埋深为 377 m，覆盖层厚度沿东北向增大，覆盖层为细砂岩和砂岩与粘土互层，基岩为第三系杂色砂岩层。台站东北 1.5 km 有潮白河通过，因此台站附近覆盖层多为第四纪洪积物。通州西集地电台距离北京市地铁八通线东端土桥站直线距离约为 18 km。研究所使用的数据为 ZD8BI 所记录的数据资料。仪器的采样频率为 1/60 Hz，数据资料的时间段为 2009 年 6 月 20—25 日，总共 8 640 个数据点。

3 分析研究

通州西集地电场台站总共有 6 个测道(北南向长、短极距；东西向长、短极距；北西向长、短极距)。在上述 6 天数据的原始曲线图上(图 1)可以看出，在曲线上出现了周期性的高频干扰，这种干扰的起止时间与北京市地铁八通线的运营时间段非常一致(首末车时间)。另外，通过八通线 2009 年 5 月 21 日土桥站末班车时间的调整和 2009 年 8 月 28 日国庆演练土桥站末班车的时间调整阶段相应地电场数据的分析可进一步确信，这种周期性干扰为地铁运营造成。该干扰使得台站观测资料波形发生畸变，不能简单判断出其日变波形

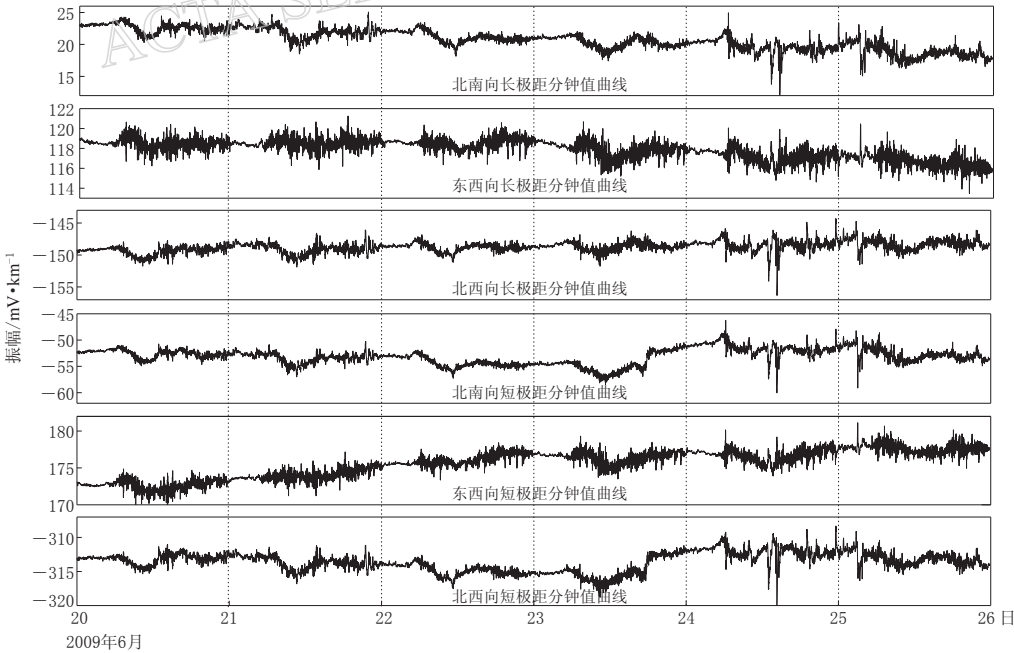


图 1 通州西集地电场原始波形图

Fig. 1 Original wave form observed by the Xiji, Tongzhou, geo-electric station

① 北京市地震局通州地震台，2008 年地电观测报告。

特征，进而直接影响台站观测资料的使用。通过观察原始曲线图很容易发现，东西向长、短极距波形的畸变最为严重。经过简单地分析后发现，该方向与地铁八通线的轨道方向近似一致，而在北南向两个极距的观测波形受到的影响要比东西向小得多。因此，当台站受到轨道交通干扰时，布极方位与轨道方向一致的测道，所记录的数据受到的影响最大。

本文分析研究中主要利用东西向这两个干扰最大的极距上的观测数据。首先，利用 HHT 方法中的经验模态分解功能对观测资料进行处理。该功能是基于特征时间尺度将信号分解成有限个本征模态函数之和，第一阶本征模态函数的频率最高，第二阶的频率次之，后面的频率依次降低。本征模态函数的分解过程可以理解作为一种新型的滤波方法，利用这种方法我们对通州西集地电台站的東西向长、短极距的观测数据进行了处理。

图 2 是长极距观测数据经经验模态分解后的图示。第一个小图是所选数据的原始曲线图，可以看出周期性的干扰很大；第二个小图是第一阶本征模态函数曲线图；第三个小图是第二阶本征模态函数曲线图，后面的依次类推；最后一个小图就是残余分量图，为单调函数曲线图。从图中可以看出，该台站所记录到的地铁干扰存在于第一阶至第四阶本征模

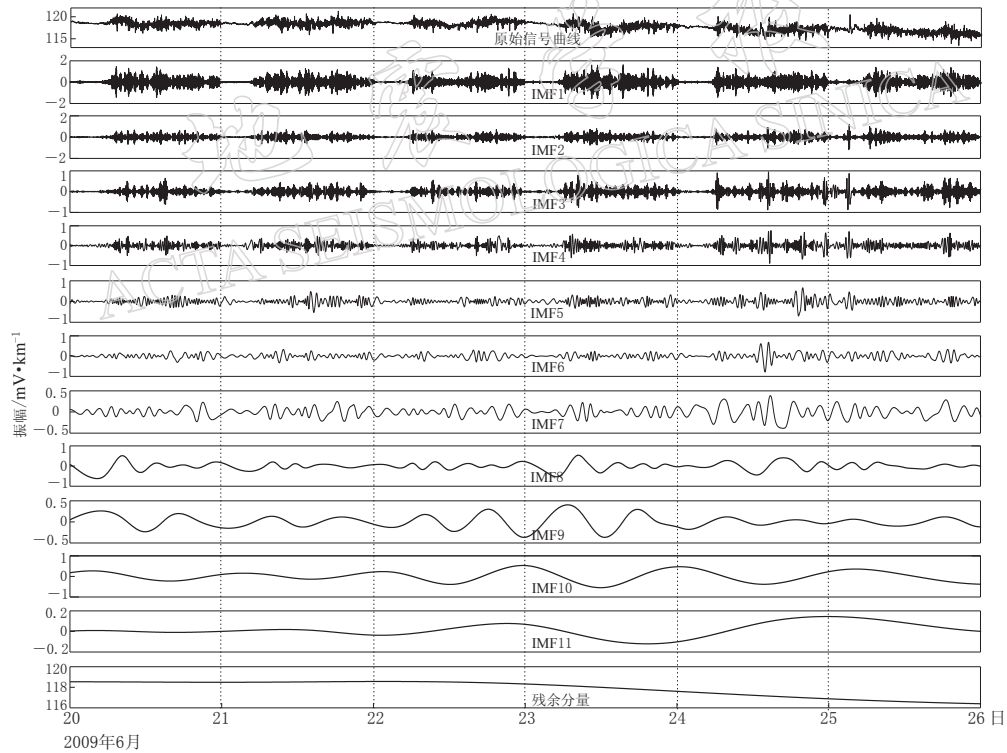


图 2 东西测道经验模态分解示意图

Fig. 2 Sketch map of empirical mode decomposition in east and west direction

态函数中，如果把这四阶进行累加，并从原始信号中减掉它们的累加便可以去掉地铁的干扰，处理结果如图 3 所示。图 3 中，第一个小图是原始曲线图；第二个小图为第一至第四阶本征模态函数的累加图；第三个小图为第五至第十一阶，以及残差的累加图。从图中可以看出，地铁的周期性干扰已经基本消除。对东西短极距数据的处理也达到了类似的效果，如图 4 所示。

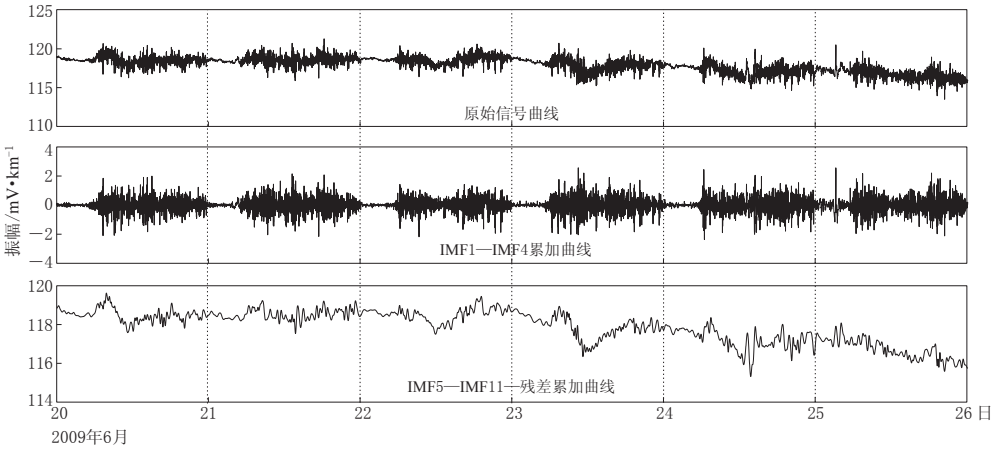


图 3 东西向长极距剔除干扰示意图
Fig. 3 Sketch map of disturbance elimination of the long polar distance observation in east and west direction

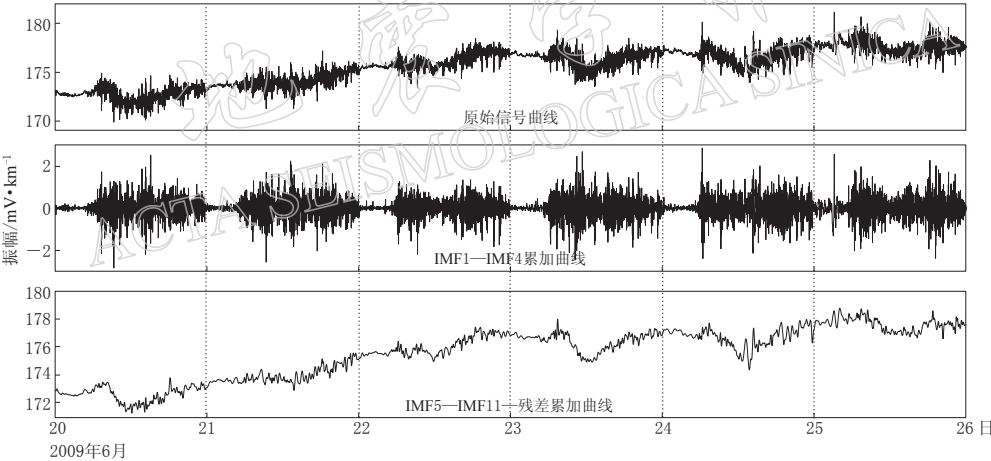


图 4 东西短极距剔除干扰示意图
Fig. 4 Sketch map of disturbance elimination of the short polar distance observation in east and west direction

从上述分析可知，HHT 方法中的经验模态分解功能，可以把原始信号分解为不同频率的窄带信号(频率范围很小)，如图 2 所示. 其频率从上到下依次减小，我们可以从这些本征模态函数中任意选取我们所关注的频率信息，当我们不需要某个频率的成分时，可以将与该频率相对应的本征模态函数直接从原始信号中减去即可. 也就是说，HHT 方法在消除电场干扰时，没有固定的频谱范围限制. 由于该方法所具有的自适应性，使得该方法在使用时不受限制.

其次，我们对分离出来的地铁干扰信号进行频谱分析，研究地铁干扰的频带宽度、优势频率、以及这种干扰对我们的地电场观测到底有多大的影响. 从 HHT 方法得到的 Hilbert 边际谱中，可以看出所研究时间序列的优势频率为多少，我们利用这种方法对本文所研究资料进行了分析研究. 分析结果如图 5 所示. 图 5 中，第一个小图是原始信号的边际

谱；第二个小图是地铁干扰的边际谱；第三个小图是去掉干扰信号后的边际谱. 该图给出了这三者边际谱的整体分析结果. 图 6 与图 5 所使用的数据完全相同，只是对曲线进行了相应的放大. 从图 6 可以看出，通州西集地电场台站所记录的原始波形经分析后发现，其优势频率为 24 小时的周期成分(1.157×10^{-5} Hz)最强，在波形上表现为日变形态为“一峰一谷”. 曲线上显示的地铁干扰在 1.929×10^{-6} — 5.59×10^{-5} Hz之间表现得较强，经过进

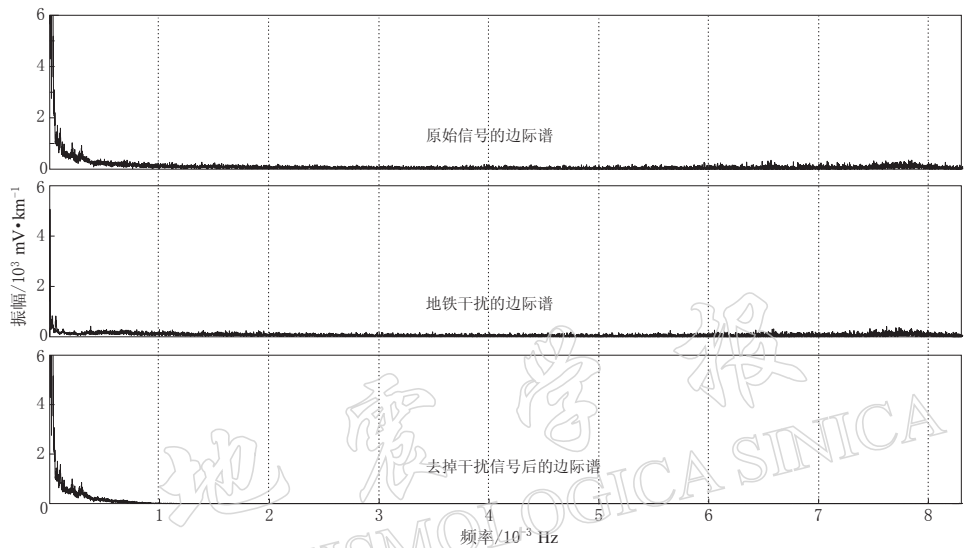


图 5 东西向长极距边际谱示意图
Fig. 5 Sketch map of margin spectrum of the long polar distance observation in east and west direction

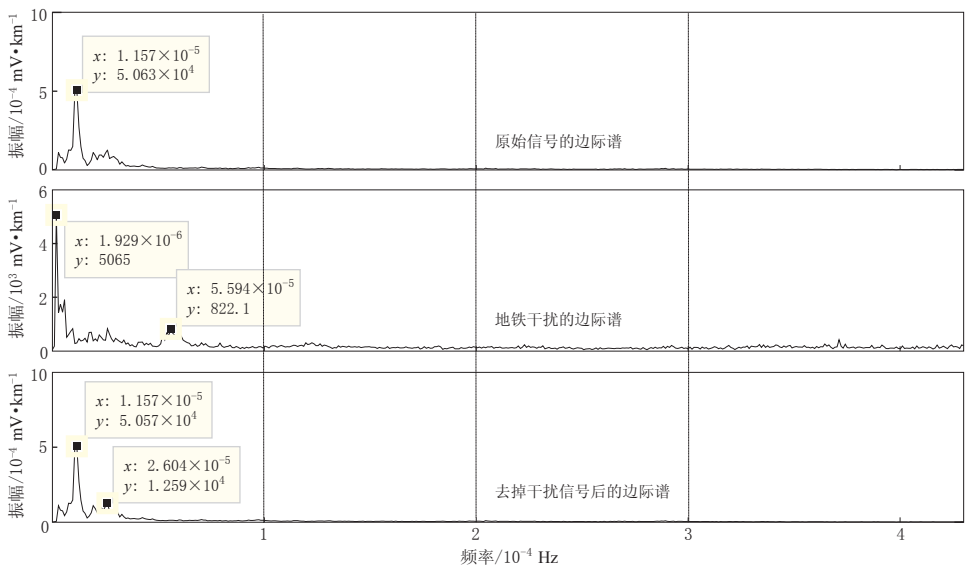


图 6 东西向长极距边际谱示意图(对图 5 的曲线进行了相应的放大)
Fig. 6 Sketch map of margin spectrum of the long polar distance observation in east and west direction (the corresponding enlargement to the curves in Figure 5)

一步分析得知, 频率(1.929×10^{-6} Hz)的产生与我们所选取数据资料的时间长度相对应(6 日). 如果所研究的数据时间越长, 这种频率就越低. 也就是说, 地铁干扰没有优势频率存在, 振幅较大频率主要集中在上述范围内. 另外在能量方面来讲, 这个频率范围内的振幅要比上下两个图中的振幅小很多, 故在能量方面的影响则会小得更多. 剔除干扰后数据的优势频率为 24 小时的周期成分(1.157×10^{-5} Hz)最强, 这与原始数据一致. 因此, 从本文的研究来看, 地铁干扰对波形的影响较大, 但能量方面的贡献要比剔除干扰后的地电场能量小很多. 但是, 如果地震前兆对地电场的扰动能量(振幅)也同样较小时, 地铁干扰的剔除就显得非常的重要了.

4 讨论与结论

本文通过使用 HHT 方法中的经验模态分解和边际谱功能, 对北京市通州区西集镇地电场观测台站 2009 年 6 月 20—25 日数据资料进行了分析研究, 得到了如下结果:

1) 在地电场的日常观测中, 受城市轨道交通影响最大的测向为与轨道走向一致或与其夹角较小时, 在与轨道走向垂直或近似垂直的测向所受的干扰最小. 这非常可能是由于轨道交通的供电方向与轨道走向一致所引起的.

2) 我们使用经验模态分解功能实现了将轨道交通干扰在地电场观测数据中的成功剔除工作, 使得台站产出数据的利用率大为提高.

3) 从边际谱的分析研究结果来看, 轨道交通所产生的干扰对观测波形影响很大; 从所研究的资料来看, 原始波形连正常的日变化都不能很好地体现. 从能量方面来看, 干扰所产生的能量比剔除干扰后的地电场能量要小. 表面看来似乎这种干扰产生的影响不是很大, 但依据已有的关于地电场观测前兆方面的研究结果: 如, 1995 年 7 月 22 日甘肃永登发生的 5.8 级地震, 2003 年 10 月 25 日甘肃民乐—山丹发生的 6.1 级地震, 在这两次地震前均出现了地电场日变波形畸变和电磁场高频扰动($t < 3$ h)的结论来看(李宁, 2007), 地铁干扰的剔除就显得非常的重要了.

目前, 我国的许多大城市为解决交通拥挤问题都计划或已经实施了轨道交通计划, 那么受此影响的地电场观测台站将会很多. 从本文的分析研究结果可以看出, 所选用的方法能够成功剔除轨道交通的干扰, 提高地电场台站观测数据的使用率. 同时, 研究结果对受地电阻率同场地观测时供电干扰的地电场观测数据也有很好的应用效果. 此外, 文中的分析研究对那些新建或改扩建的台站, 如果有潜在轨道交通干扰时应该选取的布极方向也给出了一定的建议, 即选取与轨道走向有较大夹角方向进行布极.

本文完成过程中所利用的程序来源于 G Rilling 团队编写的 HHT 程序, 所使用的数据为北京市通州区西集镇地电场台站观测数据, 本文审稿专家和编辑付出了辛勤劳动. 在此一并表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 段生全, 贺振华, 黄德济. 2005. HHT 方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 32(4): 396–400.
- 公茂盛, 谢礼立. 2003. HHT 方法在地震工程中的应用之初步探讨[J]. 世界地震工程, 19(3): 39–43.

- 李宁. 2007. 天祝地震空区地震电磁前兆现象研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所: 37-47.
- 罗奇峰, 石春香. 2003. Hilbert-Huang 变换理论及其计算中的问题[J]. 同济大学学报, **31**(6): 637-640.
- 意晓宇, 刘洪. 2007. HHT 方法在研究地震旋回体中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, **37**(3): 624-628.
- 石春香, 罗奇峰. 2003. 时程信号的 Hilbert-Huang 变换与小波分析[J]. 地震学报, **25**(4): 398-405.
- 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 2007. 希尔伯特-黄变换地震信号时频分析与属性提取[J]. 地球物理学进展, **22**(5): 1585-1590.
- 张立, 傅容珊, 周挚, 山秀明, 梁虹, 全海燕. 2007. 基于 HHT 提取重力固体潮的地震前兆信息[J]. 地震学报, **29**(3): 222-226.
- 周挚, 山秀明, 张立, 傅容珊, 梁虹, 全海燕. 2008. 基于 HHT 提取昆明、下关重力固体潮的地震前兆信息[J]. 地球物理学报, **51**(3): 836-844.
- Huang N E, Zheng S, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zhang Q, Yen N C, Tung C C, Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analyses [J]. *Proc Roy Soc Lond*, **545**: 903-995.
- Huang N E, Zheng S, Steven R L. 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, **31**: 417-457.
- Huang N E, Wu M C, Long S R, Shen S S P, Qu W, Per G, Fan K. 2003. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analyses [J]. *Proc Roy Soc Lond*, **459**: 2317-2345.
- Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. 2003. On empirical mode decomposition and its algorithms[C/OL]// *IEEE-EUR-ASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP-03*, Grado (I), June 2003. http://www.net-soc.tcd.ie/~fastnet/cd_paper/others/IEEE_NSIP_2003/nsip/papers/cr1015.pdf
- Rilling G, Flandrin P, Goncalves P, Lilly J M. 2007. Bivariate empirical mode decomposition[J]. *Signal Processing Letters, IEEE*, **14**(12): 936-939.