

\*\*\*\*\*  
研究简报  
\*\*\*\*\*

## Sompi 谱分析和深地磁测深

陈伯舫

(香港大学物理系)

Banks(1969)用地磁变化的连续谱和线谱作了周期大于4天的深地磁测深(GDS)研究.由于 Banks 仅用4个台站资料,自然不能用球谐分析法,而需要假设有关的场源性质是已知的,即位于数个地球半径处的环电流.由此产生的变化磁场在地面上的分布可用  $P_n^0$  项描述.因此, Banks 的研究是建立在单台资料的分析上的. Roberts(1986)曾详细地评述了多年来地磁学者在这方面的研究成果.本文现尝试用新的谱分析方法——Sompi 法分析我国内陆地区兰州、成都、武汉三台的地磁资料计算深部电导率状况.将本文结果与 Rokityanski(1982)由全球 GDS 分析出的视电阻率曲线作一比较或许是有意义的.

## 一、单台磁测深原理

如场源为位于地磁赤道数个地球半径处的电流环,则在地球表面的磁场可用奇数阶的带谐函数  $P_n^0(\cos\theta)$  表示(Banks, 1969)

$$\begin{cases} H(\theta, f) = \sum H_n(\theta, f) = \sum A_{H,n}(f) \frac{\partial P_n^0(\cos\theta)}{\partial \theta} \\ Z(\theta, f) = \sum Z_n(\theta, f) = \sum A_{Z,n}(f) P_n^0(\cos\theta) \quad (n=1, 3, 5, \dots) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $H$  与  $Z$  分别为磁场的水平分量与垂直分量,  $\theta$  为地磁坐标的余纬,  $f$  为频率.现定义

$$A_{Z,n}(f)/A_{H,n}(f) = W_n \quad (2)$$

$W_n$  称为响应函数,  $P_1^0$  项为主要项,次强项  $P_3^0$  往往比  $P_1^0$  小得多.例如,对27天周期变化及其谐波成分而言,  $P_3^0$  项约小于  $P_1^0$  项的10%,其余项更可忽略不计(Banks, 1969).因此,我们可用  $P_1^0$  描述磁场的分布.在此情况下,由式(2)及(1)可得

$$W = -[Z(\theta, f)/H(\theta, f)] \tan \theta \quad (3)$$

视电阻率  $\rho_a$  可用下式表示(Rokityanski, 1982):

$$\rho_a = 0.2\pi^2 R^2 f W^2 \quad (4)$$

式中,  $R$  为地球半径(以 km 为单位),  $R=6370$  km;  $\rho_a$  以  $\Omega \cdot m$  为单位.

## 二、Sompi 谱分析

Sompi 谱分析是一种新的方法,它具有较高的分辨率,并可研究非稳态过程.其原理可参看 Asakawa *et al.* (1988)和 Hori *et al.* (1989). Sompi 法实质上也是用自回归模型(AR 模型)分析离散时序  $x_l$  ( $l=1, 2, \dots, N$ ).运用 Sompi 技术时,最重要的一步是如何求解自回归方程的系数  $a_i$  ( $i=-m, -m+1, \dots, m-1, m$ ).  $2m$  称为 AR 的阶数. Sompi 法的创始人 Kumazawa 等假设时序  $\{x_n\}$  完全分为互不相关的讯号序列  $\{u_n\}$  和噪声序列  $\{e_n\}$ .由此导出:要求解  $\{a_i\}$  即要让泛函

$$S' = \frac{1}{2(N-m)+1} \sum_{n=-N+m}^{N-m} \left( \sum_{i=-m}^m a_i x_{n-i} \right)^2 \quad (5)$$

最小.也就是让其变分为零. Sompi 法中用 Lagrange 方法加进一个不定乘子  $\lambda$ ,使变分方程变为

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \left[ S' - \lambda \left( \sum_{i=-m}^m a_i^2 - c' \right) \right] = 0 \quad (k = -m, \dots, m) \quad (6)$$

其中,  $c'$  为任一不等于零的常数.将方程(6)展开,可得

$$\sum_{i=-m}^m (P_{ik} - \lambda \delta_{ik}) a_i = 0 \quad (k = -m, \dots, m) \quad (7)$$

其中

$$P_{ik} = P_{ki} = \frac{1}{2(N-m)+1} \sum_{l=-N+m}^{N-m} x_{l-i} x_{l-k} \quad (i, k = -m, \dots, m) \quad (8)$$

由  $P_{ik}$  组成的矩阵是 non-Toeplitz 型矩阵.这样一来,变分问题(6)就成了一个本征值问题.根据最小二乘原理,对应于最小本征值的本征矢量就是求解的 AR 系数  $\{a_i\}$ . AR 系数确定后就可计算波元的复数频率,继而再计算每个波元的初振幅和初位相.

## 三、资料分析

本文用内陆地区三台地磁资料计算周期范围由 8h 至 1a(年)的视电阻率.三台为兰州(24.9°N, 175.2°E),成都(19.8°N, 175.0°E)和武汉(19.4°N, 184.9°E).括号中坐标均为地磁坐标.

### 1. 周期在 2d 至 5d 范围内的视电阻率

选取三组磁暴资料(时均值),对三台资料分别用单台  $P_1^0$  法分析.选取磁暴的原则是磁暴的  $H$  分量变幅大,其主相与恢复相持续约 4 至 5 天.按此原则选出的三个时段为:1983 年 1 月 30 日 16.5 时至 2 月 10 日 07.5 时,1984 年 4 月 23 日 16.5 时至 5 月 4 日 07.5 时,1984 年 8 月 29 日 21.5 时至 9 月 9 日 12.5 时(以上均为世界时).每个时段有 256 个数.首先对  $H$  和  $Z$  分别作线性去倾和带通滤波预处理.滤波方法是在频率域中取矩形窗.频带为  $(0.0078-0.039)\text{h}^{-1}$ .预处理后用 Sompi 法作谱分析.分析时同时用  $H$  和  $Z$  资料,即假设  $H$  与  $Z$  具有共同的波元频率.因此,计算 AR 系数时 non-Toeplitz 矩阵项由两部分合成

$$P_{ik} = P_{ik}(H) + 2P_{ik}(Z) \quad (9)$$

其中,  $Z$  分量给予较大的权重,原因是考虑到  $Z$  的变化量比较小.至于  $P_k(Z)$  取两倍是笔者的主观假定.经计算和比较,用式(9)得到的 Sompi 谱分析结果比等权重的结果好些;表现为对不同的 AR 阶数结果较稳定.此外,为了提高讯噪比,还采用分样技术,将时序分样为三.

将三台 3 个磁暴的谱分析结果分别代入式(4)计算  $\rho_o$  值.最后取平均值代表此地区的平均  $\rho_o$  值.结

果为:  $\rho_a(4.8 \pm 0.2 \text{ d}) = 29 \pm 17 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_a(2.2 \pm 0.2 \text{ d}) = 44 \pm 17 \Omega \cdot \text{m}$ . 括号中的数是周期.

## 2. 年变化、27 d 周期及其谐波周期的视电阻率

选用资料为 1982 年 1 月 1 日至 1984 年 10 月 20 日的日均值, 采样数为 1024. 计算周期大于 64 d 的线谱时,  $H$  和  $Z$  分别作线性去倾和低通滤波预处理. 滤波方法也是在频率域中进行, 截止频率为  $0.0156 \text{ d}^{-1}$ . 计算 27 d 周期及其谐波成分的线谱时,  $H$  和  $Z$  分别作二次曲线去倾和经带通滤波处理, 滤波器频带为  $(0.0244 - 0.195) \text{ d}^{-1}$ . 最后, 再将三台的  $\rho_a$  取平均值. 结果为:  $\rho_a(351 \pm 6 \text{ d}) = 0.9 \pm 0.1 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_a(71 \pm 1 \text{ d}) = 3.1 \pm 1.0 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_a(26.2 \pm 0.1 \text{ d}) = 2.6 \pm 0.8 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_a(14.1 \pm 0.0 \text{ d}) = 7.0 \pm 1.9 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_a(9.2 \pm 0.0 \text{ d}) = 20.9 \pm 6.9 \Omega \cdot \text{m}$ .

## 3. 周期为 8 h、12 h 和 24 h 的视电阻率

这部分分析不用单台  $P_1^0$  法, 而用磁场梯度法处理  $S_y$  资料. 由于兰州和成都几乎是同经度台站, 成都和武汉又几乎是同纬度台站, 因此, 可用最简单的差值法(陈伯舫, 1986, 1987, 1989). 本文选用的三组  $S_y$  均值资料为: 1984 年 3 月 19 至 21 日, 1984 年 4 月 22 至 24 日和 1984 年 10 月 15 至 17 日(按北京时间划分).

## 四、讨 论

1. 选取 1982—1984 年期间的资料本是为了分析 27 d 周期的变化, Banks(1969)指出, 在太阳黑子周的下降段中 27 d 周期及其谐波成分最明显. 因此, 笔者选用下降段的 1982 至 1984 年资料. 但它未必有利于分析年变化及半年变化的成分. 此外, 有关年变化与半年变化的场源机制还不十分清楚. 有人怀疑它们是环电流引起的, 用  $P_1^0$  描述它的空间分布可是能不适当的(Roberts, 1986). 值得注意的是, 本文的谱分析结果中没有半年周期的变化, 或者说半年周期的变化很小, 给噪声掩盖了. 这一结果有利于半年周期变化并非由环电流产生的场源机制说.

2. Rokityanski(1982)给出了从全球 GDS 资料得出的上限模型与下限模型曲线(见图 1). 由图可见, 中国内陆三个台的结果较接近上限模型. 这个上限模型意味着高导层埋藏较深, 而且高导层的电导率较小.

3. 本文的实践初步表明, 用 Sompi 法作谱分析, 并用单台  $P_1^0$  模式进行 GDS 研究是可行的. 今后可以用更大量、时间更长的台站资料作深入的研究. 当然, 台站资料基线值的可靠性是很重要的.

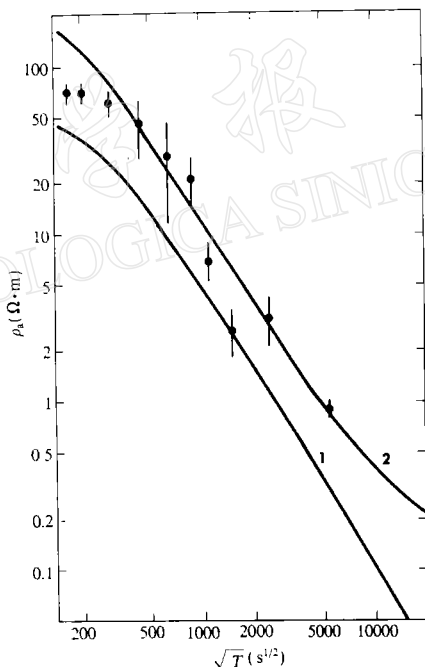


图 1 Rokityanski(1982)书中上限模型的  $\rho_a \cdot \sqrt{T}$  曲线(曲线 2)与下限模型的  $\rho_a \cdot \sqrt{T}$  曲线(曲线 1). 黑点为本文的结果

## 参 考 文 献

- 陈伯舫, 1986. 中国东南部地幔高导层的埋藏深度. 地震学报, 8, 172—178.  
 陈伯舫, 1987. 华北地区地幔高导层埋藏深度的研究. 地震学报, 9, 193—200.  
 陈伯舫, 1989. 中国东南地区深部电导率分布的进一步研究. 地震研究, 12, 348—352.  
 Asakawa, E., Utada, H. and Yukutake, T., 1988. Application of sompi spectral analysis to the estimation of the geomagnetic transfer function. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 40, 447—463.  
 Banks, R. J., 1969. Geomagnetic variations and the electrical conductivity of the upper mantle. *Geophys. J. R.*

*astr. Soc.*, **17**, 457–487.

Hori, S., Fukao, Y., Kumazawa, M., Furomoto, M. and Yamamoto, A., 1989. A new method of spectral analysis and its application to the Earth's free oscillations: the "Sompi" method. *J. Geophys. Res.*, **94**, 7535–7553.

Roberts, R. G., 1986. Global electromagnetic induction. *Surv. in Geophys.*, **8**, 339–374.

Rokityanski, I. I., 1982. *Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle*, 381pp. Springer-Verlag, Berlin.

## 《地球物理学进展》简介

《地球物理学进展》是由中国科学院地球物理研究所主办的情报性学术性期刊,由中国科学院学部委员、中国科学院地球物理研究所所长刘光鼎教授任主编。本刊 1986 年创刊,1991 年公开发行,刊号为:ISSN1004–1903/CN11–2982/P。办刊宗旨为探讨地球物理学学科的发展战略;反映地球物理学各分支学科前沿研究课题的进展;评价地球物理学的发展现状和趋势。设有策划与思考、综述、译文、国外文摘、学术动态、会议报道、专题讲座及书评等栏目。读者对象主要是从事地球物理研究、应用的广大科技人员和大专院校地球科学系的广大师生,对从事地学科技管理工作的同志也有一定的参考价值。

《地球物理学进展》为季刊,16 开本,每期 112 页,定价 3.50 元(含邮资),全年 14.00 元。

欢迎订阅!凡订阅者,请与北京 9701 信箱资料室尹慈惠同志联系,邮政编码 100101。

欢迎投稿!来稿请寄上述通讯地址,《地球物理学进展》编辑部。