

[文章编号] 1004- 0609(2002)02- 0374- 03

伪随机多频相位法及其应用简介^①

何继善, 柳建新

(中南大学 地球物理勘察新技术研究所, 长沙 410083)

[摘 要] “矿与非矿区分”是矿产地球物理勘探领域所面对的难题。由中南大学提出的伪随机多频相位法是一种较为有效的矿与非矿区分方法, 该方法自提出以来先后在国内 10 多个矿山的接替资源勘探中得到应用。本文介绍了近年来针对这一方法开展的研究、取得的进展及成果。

[关键词] 矿与非矿区分; 生产矿山; 伪随机; 多频位相法

[中图分类号] P 319. 3

[文献标识码] A

电法勘探(包括激电法和电磁法)对金属矿有很好的反映, 因此在寻找金属矿体时通常选用既能反映岩矿石电阻率又能反映岩矿石电化学性质的方法, 如激发极化法。长期以来, 该方法在发现铜、铅、锌、钨、锑、金、银、锰等金属矿产方面发挥了巨大的作用^[1~ 3]。然而, 常规激发极化法在区分与这些金属硫化矿床具有相同物理特性并常常一起产出的碳质、黄铁矿等非目标矿床方面却无能为力, 这就使得常规激发极化法的找矿效果受到了很大的影响, 因此区分矿与非矿就成了多年来一直困扰矿产地球物理工作者的难题, 也是国际上多年来未取得突破性进展的热门课题。针对这一课题, 国内外学者进行了大量的工作^[4, 5], 但他们常以变频方式测量激电相位谱, 并试图以此来区分碳质异常。这方面的理论文章虽然很多, 但实际应用却很少。其主要原因是: 1) 低频段测量很慢; 2) 高频段感应严重; 3) 野外的相位曲线很平缓, 变频测量相位的精度很难达到要求。

中南大学地球物理勘察新技术研究所经过多年的理论研究与生产实践, 从理论上找到了解决这一难题的方法, 并将研究成果应用于生产矿山深部、边部和外围找矿工作, 取得了不少成绩。我们主要用频谱差异和非线性响应区分碳质异常, 针对相位谱的上述特征, 提出了伪随机多频相位法^[6~ 10]。作为伪随机多频相位法的简单形式, 伪随机 3 频相位法具有以下特点^[8]: 1) 3 个频率选在中频区, 能反映关键信息; 2) 测量速度快, 且无感应影响; 3) 3 频同时测量, 精度高; 4) 可以在普查时就能全面测量, 不增加成本, 因而数据量大, 区分的可靠性大

为提高。

1 原理

双频激电法可视作伪随机多频相位法的最简单特例^[9], 其优点是可以频差为任意数而振幅相当的一对频率的双频电流激发大地, 同时进行测量, 因而使两频点的相对测量精度大大提高, 勘探效果更为理想。由于双频激电法有此优点, 因而在我国得到了广泛的推广应用。

巧妙地设计伪随机波形可以同时向地下发送多个频率, 且它们的振幅相近、频差合理, 以此作为供电波形的勘探方法, 可称其为伪随机多频相位法。然而, 所用频率越多, 所需场源功率就越大, 因而整个系统就会变得十分笨重, 特别是对于 CSAMT 等本来就需要大电流的方法就显得更加困难。鉴此, 我们提出了兼顾各方面需要的 2^n 系列伪随机场源。

2^n 系列伪随机波形既有某种随机波形的特征, 又能事先设定, 并能重复地产生和复制, 由图 1 可见该波形在图示的时间内是无规则的, 但它可以重复出现, 容易控制和发生。该波形是由振幅相等但时间间隔不同的正向或负向矩形波系列组成。 2^n 系列有无限多种, 可根据具体情况加以选择, 并具有以下特点: 1) 该波形所含各主基频率均按 2^n 步进, 因而, 主频点在对数坐标上是均匀分布的。2) 各主基频所含的主频率的振幅值相差不大, 因而电源使用率高。例如伪随机 5 频波的各主基频的振幅幅值如下: 如果电流振幅值 A 为 1, 则 $A_{f_1} = 0.6173$;

① [收稿日期] 2001- 10- 12; [修订日期] 2001- 12- 15

[作者简介] 何继善(1934-), 男, 教授, 博导, 中国工程院院士。

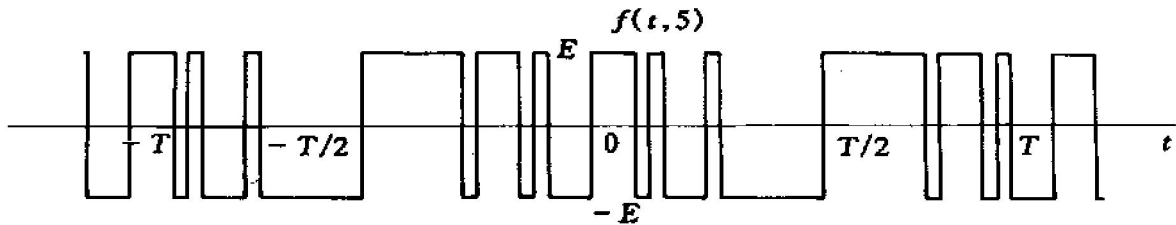


图 1 伪随机 5 频波波形

Fig. 1 Pseudo-random 5-frequency waveform

$A_{f2} = 0.5882$, $A_{f3} = 0.5443$, $A_{f4} = 0.4775$; $A_{f5} = 0.4775$ (如图 2 所示)。3) 每组 2^n 进制伪随机波所含主基频的个数可以预先设置, 方便、灵活, 如 3 频、5 频等。4) 各主基频的起始相位相同。由此可见, 利用 2^n 进制的伪随机电流波形作为电磁法的场源的激励波形是一种非常理想的波形。

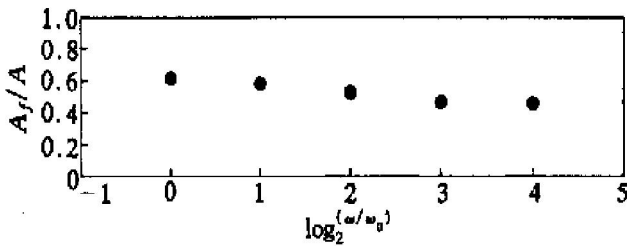


图 2 伪随机 5 频波主振幅

Fig. 2 Pseudo-random 5-dominant frequency amplitude

对于主频数为 m 的伪随机多频波函数 $f(t, m)$, 在一个周期内的解析式为

$$f(t, m) = \begin{cases} E & -\frac{T}{2} \leq t < -t_{k-1} \\ -E & -t_{k-1} \leq t < -t_{k-2} \\ \dots & \\ E & t_{k-2} \leq t < t_{k-1} \\ -E & t_{k-1} \leq t < \frac{T}{2} \end{cases} \quad (1)$$

令 $\tau = T/2^m$, 可将伪随机多频波函数进一步表示为

$$f(t, m) = \begin{cases} E & -2^{m-1}\tau \leq t < -l_{k-1}\tau \\ -E & -l_{k-1}\tau \leq t < -l_{k-2}\tau \\ \dots & \\ E & l_{k-2}\tau \leq t < l_{k-1}\tau \\ -E & l_{k-1}\tau \leq t < 2^{m-1}\tau \end{cases} \quad (2)$$

式(2)的傅立叶系数为

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t, m) \cos n \omega_0 t dt = 0 \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t, m) \sin n \omega_0 t dt \\ &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t, m) \sin n \omega_0 t dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{4}{T} \left\{ \int_0^{t_1} E \sin n \omega_0 t dt + \int_{t_0}^{t_2} -E \sin n \omega_0 t dt + \dots + \int_{t_{k-2}}^{t_{k-1}} E \sin n \omega_0 t dt + \int_{t_{k-1}}^{T/2} -E \sin n \omega_0 t dt \right\} \\ &= \frac{2E}{n\pi} (1 - 2\cos n \omega_0 t_1 + 2\cos n \omega_0 t_2 + \dots + 2\cos n \omega_0 t_{k-2} - 2\cos n \omega_0 t_{k-1} + \cos n \pi) \quad (3) \end{aligned}$$

式(2)的傅立叶变换为

$$\begin{aligned} F(n \omega_0, m) &= -\frac{j}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t, m) \sin n \omega_0 t dt \\ &= \frac{-jb_n}{2} \end{aligned}$$

2 应用效果

对于不同类型、不同矿种、不同成矿规律的矿山, 要想取得好的找矿效果, 必须因矿而异采取有效的方法组合。针对不同的矿种, 我们通常采用物探与地质相结合、理论研究与应用研究相结合、不同物探方法相互组合等找矿思路 and 手段。多年来我们已在全国 20 多个地区(大多为生产矿山)开展了接替资源的勘探研究项目, 在大多数工作区应用了伪随机多频相位法并取得了很好的找矿效果。如在湘西金矿找到了 40 多 t 金(已有近 30 t 被沿脉坑道所控制)、15 万 t 锑、6 000 t 三氧化钨; 在湘东钨矿找到了 5 000 t 三氧化钨; 在广西泗顶铅锌矿成功地区分出了铅锌矿、黄铁矿、炭质, 并找到了平均品位达 13.4% 的优质铅锌矿; 在甘肃石膏矿找到了铜铅锌金银多金属矿; 在山西中条山铜矿应用伪随机多频相位法成功地区分出了碳质和铜矿; 在安徽铜陵凤凰山铜矿应用伪随机多频相位法直接找到了深部矿床(上部为斑岩型铜矿, 下部为矽卡岩型铜矿)。为取得最好的找矿效果, 我们在白银石膏矿采用激电扫面发现异常, 用激电法和伪随机 3 频相位法测深分出上下 2 层多金属矿体; 在江永银铅锌矿采用近矿激电法圈定矿体范围和深度, 用伪随机 3 频相位法区分矿与非矿异常; 在湘西金矿采用正交电磁法扫面, 用近矿激电法对异常进行定性研究等。上述应用实例证明伪随机多频相位法是目前区分矿与非矿异常的最有效方法。

[REFERENCES]

- [1] 温佩琳, 赵秋梅. 大深度激发极化法初步探讨 [J]. 物探与化探, 1996, 20(5): 329– 330.
WEN Pei-lin, ZHAO Qiu-mei. A preliminary discussion on the great depth induced polarization method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(5): 329– 330.
- [2] 杨 进, 谭捍东, 傅良魁. 被动源激发极化法的野外试验结果 [J]. 现代地质, 1998, 12(3): 437– 441.
YANG Jin, TAN Han-dong, FU Liang-kui. Experimental results on IP method by using natural source [J]. Journal of Geosciences, 1998, 12(3): 437– 441.
- [3] 阮百尧, 村上裕, 徐世浙. 电阻率激发极化率数据的二维反演程序 [J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(2): 116– 125.
RUAN Bai-yao, CUN Shang-yu, XU Shi-zhe. Inversion programs of induced polarization data [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 21(2): 116– 125.
- [4] 黄兴万. 非接触极化曲线视反应电位差区分矿体矿物成分及确定其边界的实验研究 [J]. 矿物岩石, 1994, 58(2): 92– 97.
HUANG Xing-wan. Research on mineral composition and boundary of ore bodies discrimination by apparent reaction potential difference of non-contact polarization curve [J]. Mineral Petrol, 1994, 58(2): 92– 97.
- [5] 邹桂高. 超长时间激发下不同类型极化体激发极化场的非线性研究 [J]. 桂林工学院学报, 1996, 16(2): 156– 160.
ZOU Gui-gao. The non-linear study on the polarization field of several type polarizable body in the condition of overtime inducing [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1996, 16(2): 156– 160.
- [6] 何继善. 伪随机三频电法研究 [J]. 中国有色金属学报, 1994, 4(1): 1– 7.
HE Ji-shan. Research of pseudo-random triple-frequency [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1994, 4(1): 1– 7.
- [7] 张友山, 何继善. 三频激电相对相位观测法 [J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(4): 417– 421.
ZHANG You-shan, HE Ji-shan. The method of relative phase of triple-frequency [J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 25(4): 417– 421.
- [8] 张宪润, 夏训银. 一种新的物探异常形态——三频激电相对相位 [J]. 物探与化探, 1999, 23(2): 104– 106.
ZHANG Xian-run, XIA Xun-yin. A newform of geophysical anomaly-triple-frequency IP relative phase anomaly [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(2): 104– 106.
- [9] 柳建新, 何继善, 张宗岭, 等. 双频激电法及其在示范区的应用 [J]. 中国地质, 2001, 28(3): 32– 39.
LIU Jian-xin, HE Ji-shan, ZHANG Zong-ling, et al. Dual-frequency IP method and its application in exemplary area [J]. Chinese Geology, 2001, 28(3): 32– 39.
- [10] 张友山, 袁正午, 穆建宏. 多频组合波电法的信号相干检测同步方案 [J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(3): 191– 194.
ZHANG You-shan, YUAN Zheng-wu, MU Jian-hong. On synchronous detection of multiple-frequency electric method [J]. Journal of Central South University of Technology, 2000, 31(3): 191– 194.

Pseudo-random multi-frequency phase method and its application

He Ji-shan, Liu Jian-xin

(Institute of New Technology in Applied Geophysical Survey, Central South University,
Changsha 410083, China)

[Abstract] To distinguish ore and non-ore is a problem that the geophysical exploration of mineral resources is facing. The pseudo-random multi-frequency phase method put forward by Central South University can distinguish the ore and non-ore effectively. This method has been applied to the relay resources exploration in more than ten mines at home since it was first put forward. This article introduces the research on this method and the advancement of this method in recent years, at the same time introduces the gained fruits of this method with applied examples.

[Key words] distinguishment of ore and non-ore; production mine; pseudo-random; multi-frequency phase method

(编辑 杨 兵)