

目前电磁法用于矿产勘查面临的几个问题的思考

孙中任^{1,2} 张国瑞³ 魏文博¹ 金鑫² 赵雪娟²

(1. 中国地质大学,北京 100083;2. 沈阳地质矿产研究所,辽宁 沈阳 110033;

3. 内蒙古自治区地质勘查局第六勘查院,内蒙古 扎兰屯 162650)

摘 要 通过对目前电磁法(主要指瞬变电磁法、甚低频电磁法)用于矿产勘查时所面临的仪器灵敏度、解决地质构造、提高工作效率、提高发射功率等几个问题的思考,认为实际工作中的电磁效应是被噪声干扰了的,与理论上的电磁效应的数据也相去很远,从而造成有用异常与噪声混杂,无法区分。克服这一系列问题的关键就是从仪器上下功夫。应尽快开展电磁法用于中浅部地质构造的研究工作。电磁法不是万能的,却又是可利用的,应引起我们更多关注。以进一步推动电磁法在矿产勘查工作中的应用。

关键词 电磁法;矿产勘查;地质构造

电磁法又称电磁感应法,是以地壳中围岩岩石与目标岩石的导电性和导磁性的差异为其主要地球物理前提,根据电磁感应原理来研究电磁场空间、时间分布规律,从而区分地下围岩岩石和目标岩石,或解决其他地质问题。它是电法勘探的一个分支,包括用于识别深部构造的可控源音频电磁测深(CSAMT)、音频电磁测深(AMT),利用天然雷电场大气电离层电磁场探测地球内部结构和深部构造的大地电磁测深(MT),利用长波电台作浅部良导体识别的甚低频电磁法(VLF)以及人工源瞬变电磁法(TEM)等等。目前电磁法(可控源音频电磁测深、音频电磁测深和大地电磁测深)还多应用于石油地质勘查、深部大地构造解译,其用于矿产勘查(瞬变电磁法、甚低频电磁法)还仅仅试验性的,而且多应用于多金属矿种。我们有理由相信,由于其本身的优势,它会在未来的矿产勘查工作中愈来愈多地显示其作用。

下面就笔者关于电磁法(瞬变电磁法、甚低频电磁法)用于矿产勘查的思考,探讨几个问题,以求引起业内人士的思考,进一步推动电磁法在矿产勘查工作中的应用。

1 仪器灵敏度的问题^[1-3]

电磁法用于地质勘查工作已经有几十年的历史了,似乎说明这是一门很成熟的地球物理方法。但是这种成熟从某种意义上讲还仅限于理论上的成熟。不

得不承认,在广泛的应用科学领域里有很多理论源于经验和实践。就是说,往往是先看到了现象,甚至有了-定的经验,总结了一-定的规律,后来才发展并逐步完善了理论。像地球物理学这样的以理论去指导实践和应用的学科还不是很-多。电磁法的这种理论上的成熟-方面表现在其理论的公式化。这些公式化的理论主要基于法拉第电磁感应定律以及本身就具有统一性和完整性的麦克斯韦方程组^[4-6]。

法拉第电磁感应定律:感应电动势的大小正比于穿过这个导体回路的磁感应通量的改变速度,即

$$E_{\text{感}} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

式中 Φ 为穿过导体回路构成的面 S 沿法线方向的磁感应通量:

$$\Phi = \int_S B \cdot nds$$

麦克斯韦方程组:

(1) 麦克斯韦所发现的磁电感应定律

$$\oint_L H \cdot dL = \frac{1}{c} \int_S (4\pi j + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot nds$$

(2) 法拉第所发现的电磁感应定律

$$\oint_L E \cdot dL = -\frac{1}{c} \int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot nds$$

(3) 从毕奥·沙伐尔定律导出的高斯定律

$$\oint_S B \cdot nds = 0$$

(4) 从库仑定律导出的高斯定律

$$\oint_S D \cdot nds = 4\pi \int_v \rho dv$$

电磁法绝大部分理论都完全可以从电磁学及场论进行合理的导出。

其成熟的另一方面表现在公式的完整齐全。目前,几乎任意形状的二维模型的正演理论和绝大多数可描述的三维模型正演理论都可以用公式表述出来,甚至完全可以由计算机计算出理论电磁效应。但是不得不承认,其理论与公式还仅限于空间电性和磁性的理想化。由于电磁感应的复杂性,实际工作中的空间电性和磁性的非理想化与空间电性和磁性的理想化的结果有着比较大的差异。可以说,计算出的理想数据,实际工作中很难觅到,导致实际测量结果显得相对理论化的结果要复杂和多样。再有,实际工作中的电磁效应是被噪声干扰了的,与理论上的电磁效应的数据也相去很远,从而造成有用异常与噪声混杂,无法区分。这是由于电磁感应的复杂性和有用信号幅值偏低所决定的,是客观存在的。而能够克服这一系列问题的关键就是从仪器上下功夫。比如提高灵敏度,从而提高信噪比。这两项技术指标提高了,就保证了采集数据的可靠和低幅值异常的有效提取。这是目前电磁法用于矿产勘查工作所面临的首要问题(甚低频电磁法干扰问题尤其突出于瞬变电磁法,更是影响其发展的主要问题之一。当然还有电台功率、电台位置和由于GPS的出现造成电台数量不足的问题)。国外设备对这一问题的解决稍好一些,但还是没有完全适应复杂的地质条件,还是存在着信号弱、信噪比低等问题。因此,电磁法更好地用于地质矿产勘查工作的首要任务是从设备着手。

2 解决地质构造问题^[7-9]

如果说电磁法应用于地质科学的工作已经起步了,或者说已经初步成型了的话,那么,现在其用于矿产勘查工作还远远不够。如果说电磁法是目前人们热衷试验的勘查手段的话,那么地质构造识别试验和论证工作应是其主要任务。矿产勘查广义上说,就是解决地质构造问题。地质构造直接关系到矿体的形成,尤其是赋存(空间形态、产状)和保存。因此,笔者认为矿产勘查工作的首要问题,就是构造识别问题。不可否认,电磁法是目前解决地球结构、深部构造的极少数的有效方法之一。目前地球深部结构的各种假说,主要依据之一就是地球物理探测,其中包括电磁法解释

的壳内10~30 km 高导层(低速带,岩石局部脱水或熔融)、上地幔10~300 km 高导层(软流圈)和400~700 km 电导率陡变层(过渡带)。但是同样不可否认,电磁法在解决地质构造至少是中、浅部地质构造问题方面还有待我们去关注。众所周知,地质构造问题是地质科学最基本的学术问题,它与地层学、古生物学等学科成为地质工作者十分关注的基础地质问题,同时也是矿产勘查、水文地质等应用学科关注的问题。

目前解决中浅部地质构造问题,除常规的地质方法以外,就实际探测手段而言,地球物理一直是比较常用、比较适用的手段之一,比如重力、磁测技术对腊氏面、康氏面、古老基底、隐伏构造的识别,常规电法对于浅部构造的判别,地震勘探对于中浅部波速层的识别等等。但是电磁法也有其他地球物理方法所不能替代的优势,比如勘探深度、对三维地质体电性特征的敏感、抗浅部高阻屏蔽等方面。

由于电磁法方法本身研究水平(仪器水平、数据采集水平、数据后期处理能力、数据反演问题、工作效率问题)原因,由于行业内(包括不少地球物理工作者)对电磁法的认识原因,也由于地质科研经费和地质工作侧重点等诸多原因,尽管目前在研究深部地球构造问题上多采用了电磁法,但是电磁法用于中浅部地质构造的研究工作,应尽早开展起来。

笔者主要是基于这样几点理由:

(1)任何一种方法都不是万能的,地球物理工作也一样,不可能指望使用某一种方法就能解决所有的矿产勘查地质构造问题。甚至可以说,解决地质构造问题是目前的热点问题,更是难题。

(2)在磁性差异、密度差异不大的地区解决地质构造问题需要有一种更为有效的勘查方法。尤其是像东北、西北等一些厚覆盖地区,这一问题显得更为突出。

(3)目前,除地震勘查等少数地球物理勘查方法外,多数方法还是属于面积勘查法,即描述了有效区域空间的一种综合感应,不能很好地、有选择地区分纵向地球物理性质的差异。只有测深类的勘查方法才能更好地识别地质构造的空间特征。

3 提高电磁法的工作效率

众所周知,一种勘查方法是否具有生命力,其适用性是十分重要的。而适用与否,其工作效率又是重要的衡量标准之一。电磁法由于周期供电(或变频供电),需测量电场、磁场及其多个分量。因此,无论信号发射,亦或信号接收都不是简单的过程,加之由于电磁

感应时能量分解,信号往往不是很强,为了获得较大的信号强度,人们往往加大发射功率。功率的加大,一定增大了设备体积和安装难度、发射的程序复杂程度。如果地质情况复杂,为了压制干扰等,还可能多次重复观测,所有这些都导致了电磁法工作效率偏低。

另外,无论瞬变电磁法的重叠回线装置、中心回线装置、偶极装置、大定源回线装置哪种工作方式,由于可能需要铺设供电线圈、接收线圈、供电导线、接收导线,这些工作也大大地降低了电磁法的工作效率。这里还没有讨论为了实施电磁测量而需要作的相对比较繁琐的工程测量工作。但是提高工作效率又是当务之急,这也是其发展和应用的障碍之一。目前,除了加强其自身在矿产勘查地质构造等工作的应用作用和提高非专业人士对其认识以外,还要在方法选择上和仪器自动化程度上多作努力,还要多采用瞬变电磁法重叠回线装置。另外,还要在线圈的选择上下功夫。我们知道,一般地线圈匝数与谐振频率成反比,以重叠回线为例,均匀半无穷空间的电动感势响应为公式^[10]:

$$\varepsilon_c = \frac{2\pi I}{\sigma a} f_c(\tau_0)$$

式中

$$f_c(\tau_0) = \int_0^{\infty} x J_1^2(x) \frac{1}{\sqrt{\pi\tau_0}} \{e^{-x^2\tau_0} - x\sqrt{\pi\tau_0} \cdot [1 - \varphi(x\sqrt{\tau_0})]\} dx$$

$\tau_0 = t/(\sigma\mu_0 a^2)$ — 综合参数

$J_1(x)$ — 一阶贝塞尔函数

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$

a — 回线半径

I — 回线中电流

σ — 电导率

ε_c — 感应电动势

过多理论推导过程本文从略,由上式可以得出近区和远区感应电动势与线圈大小有如下关系:

$$\text{近区 } \varepsilon_c = \frac{I \mu_0 a}{2 t}$$

$$\varepsilon_c = \frac{I \mu_0 b}{2 \sqrt{\pi t}}$$

$$\text{远区 } \varepsilon_c = \frac{I \sqrt{\pi} \mu_0^{5/2} a^4}{20 \rho^{3/2} t^{5/2}}$$

$$\varepsilon_c = \frac{I \mu_0^{5/2} b^4}{20 \pi \sqrt{\pi} \rho^{3/2} t^{5/2}}$$

上式中除 ε_c 、 a 、 μ_0 、 I 原义不变外,

b — 方回线边长

ρ — 视电阻率

t — 时间延时

可见,接收线圈的大小直接影响到了电动势的大小。因此说,加大信号强度,又不至于将线圈选择作得过大,从而提高工作效率,这种辩证关系要掌握好。

4 减轻装备

前面提到,由于电磁法工作原理和工作方法的关系,电磁法的仪器设备比较繁重。当今,由于集成电路和计算机的发展,地球物理勘查设备越来越集成化、自动化、轻便化。往往是仪器校验、信号发射、数据采集、多元数据、数据存储、数据校正等等高度集成,从而形成了多装置、甚至是多方法、跨学科的集合,比如电法设备由原来的直流电法设备与交流电法设备分离,将其集合成了电测工作系统,而且系统中还包括过去各自分离了的模拟器、发射机、电源系统(包括整流器)、自动补偿系统、GPS自动校时系统、信号发射数据采集自动分配系统、数据存储系统、后期数据处理,直至成图系统。重磁设备比电法设备的集合程度有过之而无不及,除自动补偿系统、GPS自动校时系统、信号发射数据采集自动分配系统、数据存储系统、后期数据处理,直至成图系统外,还有自动恒温、除湿系统。甚至重磁电震集合的自选测量系统。尽管电磁法的仪器也由原来的十几个人才能工作,到今天的几个人就能搬运,但还是显得笨重,不能很好地适应当今地质科研和勘查工作。目前,由于社会的发展,地质工作也由过去大集团军作战模式,转变成了小分队、特种兵式工作模式。这种繁重的设备一般不会成为人们的首选。如果想要使其影响面扩大,或者说,想要发挥其应有的作用,设备一定要精致。应加强自身的电子集成能力、改进工作模式,包括前面提到的多元集合。

5 提高工作功率

这个问题无需过多的讨论。提高工作功率是压制干扰的需要,是电磁感应能量分解的需要,是勘查深度的需要,总之是充分发挥其作用的需要。之所以提出来,就是因为目前不少工作效果不佳的原因就是发射功率偏低所致,而工作者却认为是方法本身出现了问题,这需要我们给予充分的注意。不是地球物理前提存在问题,仪器的性能又暂时无法改变,因此,加大工作功率,目前来说不失为改善其作用和扩大其应用范围的一种途径。

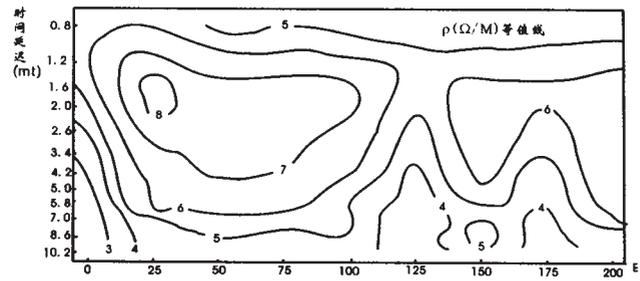
6 提高认识^[11,12]

实际上,上面谈到的 these 问题是相互联系、相互制约、相互补充和相互促进的。而且几乎每个问题都可以作深入的探讨,但是,最终还要我们提高认识。提高认识是解决一切问题的关键。特别是对电磁法用于矿产勘查工作,不仅是认识不足,而且个别地还存在着这样或那样的误解。有一种误解是由于电磁法的多解性和假异常干扰造成的无用论,他们认为电磁法的曲线不可信,曲线是摸不着看不见的东西,过于抽象,不可用,或不能用,甚至拿了某一个解释失误的例子来说明自己的观点。还有一种误解是因为电磁法描绘了深部地质特征而产生的万能论,持这种观念的人觉得深部的东西谁也看不见,但是电磁法却拿出了其深部的电性(磁性)特征曲线,所以无论电磁法的工作精度如何,解释者的经验怎样,与地质已有的资料矛盾多大,惟电磁资料可依。

笔者以为,应当用辩证的思维模式来看待这一个问题。电磁法可以对深部地质体的电性特征进行描绘。甚低频电磁法的勘查深度一般在 0~50 m,多用于 10 m 左右的目标勘查;瞬变电磁法的勘查深度一般在 0~n×1000 m,多用于几十米、几百米乃至上千米的目标勘查;可控音频电磁测深、音频电磁测深一般探测深度可达 n×1000 m,而大地电磁测深理论上勘查深度可达 n×1000 km,这是其他方法难以用数据形式描述的范畴。但是,这一切是需要地球物理前提的,在其勘查的范围内目标体与周围地质体要有较为明显的电性、磁性差异。这里的“明显”是根据仪器性能、工作方法、解释方法、解释手段、工作者经验等不同而不同,所以说,万能的勘查手段是不存在的。另一方面,电磁法深部地质体电性特征的描绘又是有理论依据的,如果地球物理前提存在,加之软硬件适宜,其成果是可信的。成功的例子很多,如,昆士兰伯温盆地的瞬变电磁勘探剖面对煤层的断层描绘的十分细致(图 1);南非克里尔煤田 TEM 电阻率-时间图对煤层,包括燃烧带也有很精细的表述(图 2)。

所以说,电磁法又是可用的、值得探索总结的勘查方法。

总之,电磁法不是万能的,却又是可利用的,应引起我们更多关注。它需要我们决策部门、科研单位下大力气关注和投入电磁法的硬软件的开发,积极开展电磁法用于矿产勘查的研究工作,特别是探索不同地质环境、不同矿种的电磁法勘查方法的研究工作,填补我国在这一领域的空白,指导深部资源评价工作和类似我国东北厚覆盖地区的矿产勘查工作。



地质断面示意

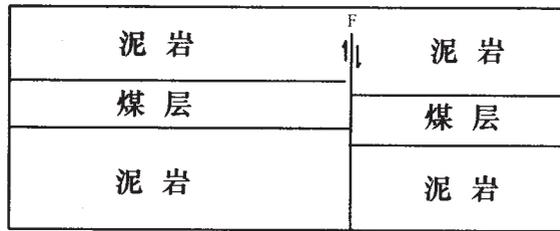
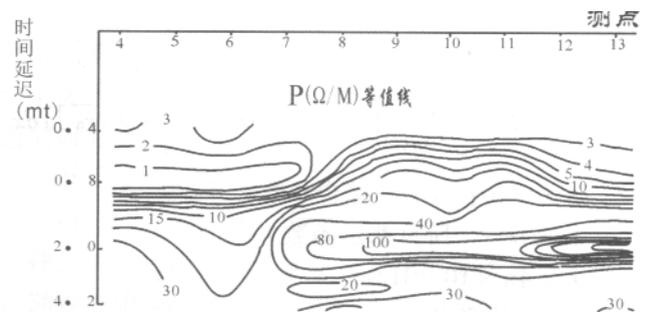


图 1 昆士兰伯温盆地 TEM 电阻率-时间图

(转自 蒋邦远,1998)

Fig. 1 Diagram of TEM resistivity-time in Bowen Basin, Queensland (after JIANG Bang-yuan, 1998)



地质断面示意

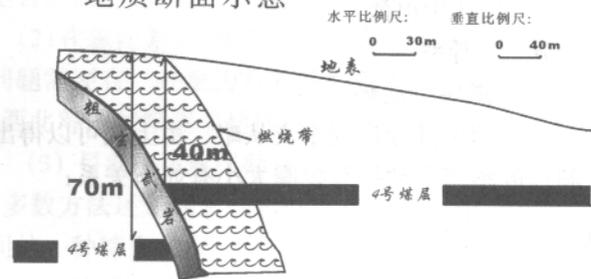


图 2 南非克里尔煤田 TEM 电阻率-时间图

(转自 蒋邦远,1998)

Fig. 2 Diagram of TEM resistivity-time in Creil Coalfield, South Africa (after JIANG Bang-yuan, 1998)

由于作者水平有限,文中观点不免有失偏颇,恳请读者提出宝贵意见。

参考文献 :

- [1] 中华人民共和国地质矿产部 . 地面瞬变电磁法技术规程 [S]. DZ/T0187 - 1997. 1997 - 07 - 01.
- [2] 中华人民共和国地质矿产部 . 地面甚低频电磁法技术规程 [S]. DZ/T0084 - 1993. 1993 - 12 - 09.
- [3] 孙中任 . 甚低频法记录点问题的讨论 [J]. 地学仪器 , 1994 , (2) : 24—26.
- [4] 傅良魁 . 电法勘探教程 [M]. 北京 : 地质出版社 , 1983.
- [5] 武汉地质学院物探系 , 地质科学院物探所 , 北京地质研究所 . 磁激发极化法磁电阻率法探矿理论研究 [M]. 武汉地质学院 , 1977.
- [6] 傅良魁 . 论电法勘探若干方法理论 [D]. 北京 : 武汉地质学院北京研究生部 , 1984.
- [7] 史宝连 . 甚低频电磁法 [M]. 北京 : 地质出版社 , 1986.
- [8] 刘国栋 , 陈乐寿 . 大地电磁测深研究 [M]. 北京 : 地震出版社 , 1984.
- [9] 波斯坦道弗 G. 大地电磁勘探原理 [M]. 徐世浙 , 冯洛玕 , 译 . 北京 : 地质出版社 , 1980.
- [10] 蒋邦远 . 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京 : 地质出版社 , 1998.
- [11] 王宏琳 . 地球物理勘探软件平台技术 [M]. 北京 : 石油工业出版社 , 1999.
- [12] 王家映 . 我国大地电磁测深研究新进展 [A]. 见 : 中国地球物理学会编 . 地球物理学报——纪念中国地球物理学会 50 周年专刊 [C]. 地球物理学报 , 1997. 206—213.

DISCUSSION ON SOME PROBLEMS IN THE APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC METHOD IN MINERAL EXPLORATION

SUN Zhong-ren^{1,2}, ZHANG Guo-rui³, WEI Wen-bo¹, JIN Xin², ZHAO Xue-juan²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110033, China;

3. Inner Mongolia Bureau of Geological Exploration and Mineral Development, Zhilantun 162650, China)

Abstract: Some problems remain in the application of electromagnetic methods (TEM and VLF methods) in mineral exploration, involving the sensitivity of equipment, interpretation of geologic structure, improvement of efficiency and emission power. The authors consider the galvanomagnetic effect in practice is interfered by noise. The data of galvanomagnetic effect in practice are much different from that in theory, resulting in the mixture of anomalies and noises. The key to solve this problem is upon the improvement of equipment. The application of electromagnetic method in the research of shallow structure should be launched. The electromagnetic method is not universal, but useful. It should be paid more attention in the mineral exploration.

Key words: electromagnetic method; mineral exploration; structure

作者简介 : 孙中任 (1963—) 男 , 教授级高工 , 1986 年毕业于武汉地质学院 , 中国地质大学在读博士 , 现主要从事地质勘查工作中物化遥的应用研究工作 , 通讯地址 : 沈阳市北陵大街 25 号 , 邮政编码 110033 , E-mail // syszhongren@ cgs. gov. cn