

连续电磁剖面法在石油勘探中的应用^①

张全胜, 杨生, 刘沈衡

(华东有色地质勘查局八一四队, 江苏镇江 212005)

摘要 本文系统介绍了连续电磁剖面法的基本原理、野外数据采集、资料处理方法以及 V5-2000 系统的特点和性能。V5-2000 系统采用卫星同步技术, 确保电场和磁场同步采集, 从而大大提高野外工作效率。此外, 一方面, 野外布极以电偶极子首尾相连的阵列形式覆盖整条剖面, 密集采集多道电场, 因此扩大信息量, 可以较详细地反映地下介质的电性特征; 另一方面, 在资料处理时, 采用低通滤波的方法, 有效地压制了由于浅层电性不均匀给大地电磁资料带来的干扰, 使解释更加可靠。准噶尔盆地、柴达木盆地、塔里木盆地的三个勘探实例说明了 CEMP 法已取得明显的地质效果。

关键词 CEMP 方法; V5-2000 系统; 野外采集; 资料处理; 勘探实例; 地质效果

中图分类号 P631.325

文献标识码 A

1 前言

EMAP 方法全称为电磁阵列剖面法(Electromagnetic Array Profiling, 简称 EMAP), 是由美国地球物理专家 F. X. Bostick(1986) 针对消除 MT 法中静态干扰而提出的一种全新数据采集和处理方法。它通过全新的观测方式进行密集数据采集, 尽可能多地提取区内地电信息, 采用低通滤波手段消除浅部电性横向不均匀性和局部地形起伏造成的静态影响, 从而提高数据解释质量。

我国物探工作者根据勘探实践, 在 EMAP 方法的基础上提出了连续电磁剖面法(Continuous Electromagnetic Profiling Method, 简称 CEMP), 其显著特点是野外布极首尾相联。特别自 1998 年以来, 加拿大凤凰公司成功地研制出 V5-2000 系统。V5-2000 系统具有国际先进水平, 仪器设备更轻便、拒干扰能力更强、施工更灵活高效、采集精度更高, 为 CEMP 法的广泛开展提供了仪器保证。

2 原理

设大地电导率 $\sigma(X, Y, Z)$ 由均匀介质电导率 σ_0 和电导率异常 $\Delta\sigma(X, Y, Z)$ 构成, 即:

^① 收稿日期: 2002-01-11

万方数据

第一作者简介: 张全胜(1964~), 男, 工程师, 从事物探技术工作, 现任 814 队副总工程师。

$$\sigma(X,Y,Z) = \sigma_0 + \triangle\sigma(X,Y,Z) \cdots\cdots\cdots (1)$$

采用一阶 Born 近似,则在地表观测的二次场 E^* 与电阻率相对异常 Σ 在波数域有下列关系:

$$E^*(\omega,\xi,\eta,Z=0) = K \cdot G(\omega,\xi,\eta,Z) \cdot \Sigma(\xi,\eta,Z) \cdots\cdots\cdots (2)$$

其中 ω 为角频率, ξ 和 η 为 X 和 Y 方向上的波数, K 为场源系数, G 为格林函数。

在(2)中,如果将 Σ 看作输入, E^* 看作输出,则 G 为系统的传输函数。对于测量方向上的电场分量 E_x 的一、二维传输函数为:

一维:

$$G(\omega,0,0,Z) = (\omega\mu_0\sigma_0/\xi)(1) \exp[-j(\xi + K)Z] \cdots\cdots\cdots (3)$$

二维 TE 方式:

$$G(\omega,0,\eta,Z) = (\omega\mu_0\sigma_0/\xi)(\gamma_1) \exp[-j(\xi + K)Z] \cdots\cdots\cdots (4)$$

二维 TM 方式:

$$G(\omega,\eta,0,Z) = (\omega\mu_0\sigma_0/\xi)(1) \exp[-j(\xi + K)Z] + (\xi^2/j\xi) \exp[-j(\xi + K)] \cdots\cdots\cdots (5)$$

其中:

$$\xi_2 = \sqrt{(K^2 - \xi^2 - \eta^2)}, \quad K_2 = \sqrt{-j\omega\mu_0\sigma_0}, \quad 1/2 \leq \gamma_1 \leq 1$$

由式(3)、(4)、(5)可知,一维和二维 TE 方式的传输函数具有相同的形式,都与频率 ω 有关,且随 ω 降低而减小,在 $\omega \rightarrow 0$ 时,传输函数趋于 0,说明浅部的电性异常在频率降低到一定程度时产生的二次场趋于 0。而二维 TM 式的传输函数由两项组成,第一项和一维及二维 TE 方式的传输函数形式相同,我们称之为感应项。第二项与电磁波频率的关系不大,当 $\omega \rightarrow 0$ 时,该项并不趋于 0,我们称之为静态项。正是由于静态项的存在,产生了静态影响。

在波数域中,不同埋深的电性不均匀体对电场影响(造成静态影响)不同,埋深较大时($Z_0 = 5\delta$)静态幅度较小,影响的波数范围减小。当近地表电性不均匀时,静态影响幅度大,且随波数增加而增大,在波数域出现高通滤波的特性。为此可人为地加一低通滤波器,来压制、消弱传输函数中的静态项成份,从而达到静态改正的目的。CEMP 方法正是根据这种思路提出来的。

CEMP 的观测方法如图 1 所示。测量电位的各个 MN 电极头尾同点,以分段平均的方式获取了整条测线的地电信息。

CEMP 处理实质上是一种低通滤波,这种处理可以在波数域中进行,也可以在空间域中通过褶积的方法完成,我们提倡采用后一种方法。汉宁窗口是一个比较理想的空间域低通滤波器,其公式如下:

$$h(x) = \begin{cases} (1 + \cos 2\pi x/W) & |x| \leq W/2 \\ 0 & |x| > W/2 \end{cases} \cdots\cdots\cdots (6)$$

W 为窗口宽度,与趋肤深度 δ 呈正比,有: $W = C \cdot \delta$

$$1 \leq C \leq 3 \cdots\cdots\cdots (7)$$

由于趋肤深度随频率而变,所以窗口宽度也是频率的函数,故 $h(x)$ 又称为自适应空间滤波器。设 E 为滤波后的电场,则有:

$$\cdots\cdots\cdots (8)$$

式(8)为 CEMP 滤波处理使用的最终公式,其中积分项为汉宁窗口在 MN_i 区间内的面积。

3 野外工作方法

3.1 仪器装备

CEMP 勘探主要使用加拿大凤凰公司最新推出的 V5 - 2000 系统。信号采用 24 位 A/D 转换,大大地提高了数字化精度。限波、滤波均以数字电路实现。信号实时处理提高了对勘探精度的监督能力。

3.2 数据采集

- (1)采用 '十' 字布极。以测线方向为 X 轴,即 E_x 和 H_x 沿测线方向布设, E_y 和 H_y 垂直于测线方向布设。见插图 1。
- (2)每个排列布设多个测点(一般为 5 个),各测点 MN 首尾相接,覆盖整条剖面。
- (3)电极、磁棒布设,采用经纬仪或森林罗盘仪定向、测距。通过多极并联和加水等方法改善接地条件,降低接地电阻。
- (4)采用 1-8-5 记录格式。根据不同的干扰背景,设置低、中或高增益以及弱或强滤波等参数,视勘探深度进行不同时长的采集。
- (5)测点进行 RUBOST、远参考处理。理论、实践证明,远参考能够明显改善数据采集质量。

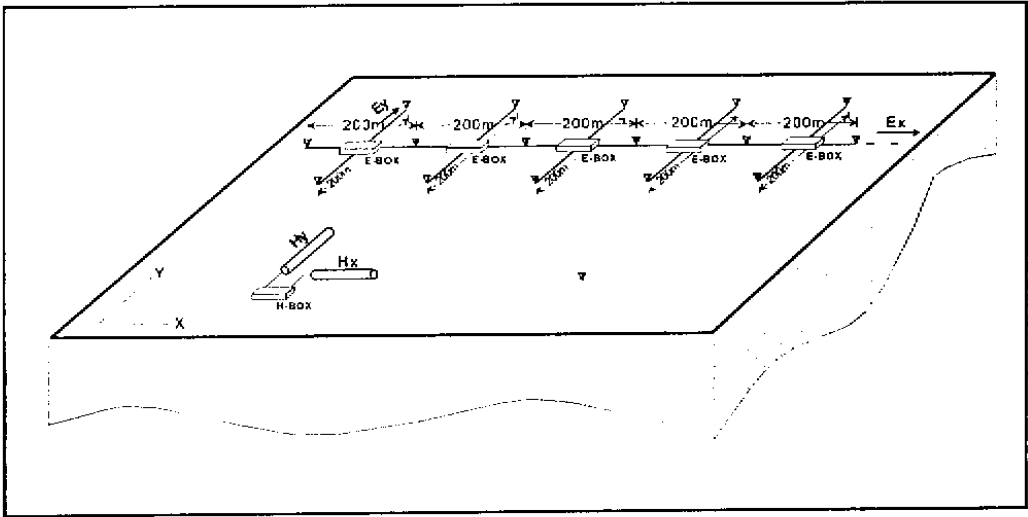


图 1 排列布置示意图

Fig.1 Diagram showing of installation arrangement

4 资料处理

4.1 极化模式判别

由于勘探区地下地质构造的非一维性,使得不同方向的实测视电阻率相互有差异。CEMP 勘探的野外处理中通常会把所测的原始资料采用张量旋转方法变换到电性主轴上,但电性主轴可能与实际地质构造走向一致,也可能相互垂直,为了便于资料的处理解释,必须进行模式判别,统一解释资料的方向,使实测的 ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 分别判别归位成 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 。

4.2 去噪处理

在 CEMP 勘探中由于各种电磁噪音的存在,不可避免地给实测资料带来一定的误差,严重时使曲线的形态发生变化,所以在资料解释前必须进行去噪处理。

4.2.1 噪音识别

从实测数据曲线中识别有噪数据是极其容易的,其方法及原理如下:

(1)CEMP 勘探中的体积效应,使实测资料中相邻频点数据相关性很强,所以曲线上的突变点则是有噪音的数据。

(2)由 CEMP 方法勘探原理可以证明,视电阻率随频率的变化在双对数坐标中,曲线的变化率不应超过 $\pm 45^\circ$ 。

(3)均方差大的数据是有噪数据。

4.2.2 去噪方法

去噪分两步进行,首先剔除噪音严重的频点数据,尔后采用样条插值法恢复该频点的数据。

4.3 静态校正

4.3.1 静态效应

在 CEMP 勘探中,当地表存在有局部电性不均匀体时(大小尺度小于最高频的勘探尺度),在电流流过不均匀体界面时,形成界面积累电荷,由此产生一个与外电场成正比的附加电场,给大地电磁测深响应带来畸变,这种影响称为静态效应。

4.3.2 静态校正

静态效应的校正是 CEMP 资料处理中的关键问题,如果校正不当,会使后续的反演解释得出错误的结果。所以对静态校正国内外大地电磁工作者曾先后提出了一系列方法和技术,其中张量阻抗分解法逐渐得到普遍的认可。但经张量阻抗分解后计算的视电阻率 ρ_a' 与真正的视电阻率 ρ_a 仍存在如下关系:

$$\rho_a(\omega) = C\rho_a'(\omega) \dots\dots\dots (9)$$

其中 C 是与频率 ω 无关的常数。

对此我们采用了如下识别与校正方法:

(1)静态识别

①单点静态识别

在大地电磁测深法中,频率是调节勘探深度及勘探范围的参数,随着频率的增高勘探范围缩小。所以高频资料反映的是近测点周围的电性变化,应具有一维特征,两支曲线在高频段应该是重合的,否则,说明该测点的资料受到了静态干扰。

②沿剖面的静态识别

由于 CEMP 勘探的体积效应,在同一构造单元内各测点的曲线连续可比,不应发生大幅度的跃变,当某一测点视电阻率曲线与前后点的形态相似而整体有平移现象时,判别该点有静态干扰。

(2)校正方法

依据上述对静态的分析与识别,静态校正的方法及步骤是:

①单点曲线平移法:

采用人机联作的方法将单一测点的实测曲线放在整条剖面上进行整体的比较分析,在剖面上对与前后测点曲线特征相同或相似,而整体视电阻率曲线幅值有突变的个别测点进行平移校正,以消除突变点。

②剖面汉宁相关滤波法:

由于静态效应主要是受近地表介质电性的影响,一般情况下表现为随机性,呈高频特征。对此采用了汉宁低通滤波法,同时在汉宁滤波过程中增加了相关判别,给与邻近点相关性比较好的测点加重权系数,反之削弱权系数,这样在消除静态的同时也保留了由于实际地质构造变化所引起的突变点,而不致于丢掉有用信息。

图 2 是某线静态校正前后视电阻率(15~25 号频点数据几何平均值)沿剖面的变化曲线,静态校正前有许多突变点,给解释带来困难,校正后的曲线消除了高频成分的静态噪声而呈连续变化。

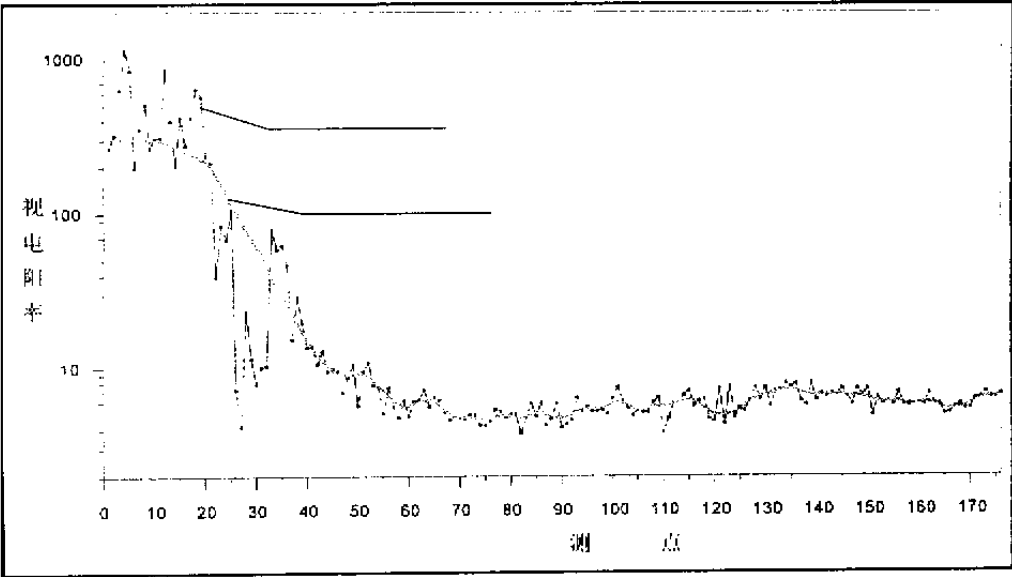


图 2 XX 线静态校正前后视电阻率变化剖面图

Fig.2 Apparent resistivity change profile before and after static correction of traverse No. xx
(点线为校正前视电阻率曲线、实线为校正后视电阻率曲线)

4.4 曲线类型分析

在 CEMP 法中,对实测曲线类型的分析、比较是资料定性认识解释及准确地获得测区地质信息的重要组成部分。曲线类型定性地反映出了地下电性层的分布特征,如电性层数、相对埋深和各电性层间电阻率的相对变化情况。特别是通过对测区内曲线类型的分析比较,

可对测区的地质构造单元进行划分与归类,给出测区地质构造的定性概念。更重要的是可以帮助我们选择和制定定量解释的步骤、方法和参数,有效地克服资料解释过程中的多解性问题,提高地质解释的准确性。

4.5 总纵向电导(s)

测点的总纵向电导定义为从地表到某一深度的电导之和,写为:

$$S = \int_0^H \sigma(H) dH \dots\dots\dots (10)$$

上式说明在勘探深度范围内电阻率越低其总纵向电导则越大,同时低阻地层越厚其总纵向电导也越大。在地质解释上,由于沉积岩电阻率较低,对总纵向电导有所影响,且厚度越大,影响越大,对基底而言,理论上可认为电阻率趋于无穷大,电导为 0,对 S 值没有影响,所以通常用总纵向电导划分沉积岩盖层厚度,圈定基底埋深。

经公式推导总纵向电导是按下式计算的。

$$S = 520 \sqrt{\frac{1}{\rho_{min} \cdot f_{min}}} \dots\dots\dots (11)$$

式中 ρ_{min} 为视电阻率曲线 45°抬升前的极小值($\Omega \cdot m$)。

f_{min} 为 ρ_{min} 所对应的频率(Hz)。

S 为总纵向电导,单位为西门子。

由于总纵向电导值越大,说明盖层越厚,基底埋深越大。为直观起见,在总纵向电导剖面图的绘制时有意将 S 值坐标作了反向处理,大值在下方,小值在上方。

4.6 视电阻率 – 频率断面

视电阻率 – 频率断面是 CEMP 资料分析解释中最基本的一种图件,横坐标为测线方向,标出了测点位置及点号,纵坐标为频率,按对数坐标表示,由上而下频率变低,以各测点相应频率上的视电阻率值勾绘等值线,则得到视电阻 – 频率断面。

分析视电阻率 – 频率断面,可以定性地了解测线上的电性分布、基底的起伏、断层的分布、电性层的划分等断面特征。

一般而言,在深部(低频)高视电阻率等值线的起伏形态与基底起伏相对应,而视电阻率等值线密集、扭曲和畸变的地方又往往与断层有关,断层越浅,这种特征越明显。在剖面中,岩层电阻率差别越大,视电阻率断面图的效果也越明显。

4.7 博斯蒂克(Bostick)反演

Bostick 法是一种一维大地电磁测深曲线的近似反演法,由于它求得模型并不能拟合实测数据,因此,有的学者又把它称为半定量解释方法。Bostick 认为,任何一条一维大地电磁测深视电阻率曲线上的任何点,都可看成 $\rho_2 = \infty$ 和 $\rho_2 = 0$ 两条视电阻率曲线尾支渐近线之交点,由此理论推导可得深度(H)的电阻率(ρ)为:

$$\rho(H) = \rho_a \cdot \frac{\frac{d \log \rho_a}{d \log \omega} - 1}{\frac{d \log \rho_a}{d \log \omega} + 1} \quad H = 356 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \dots\dots\dots (12)$$

Bostick 反演结果精度尽管不高,但其运算简便快捷,解释具有唯一性,不存在人为因素,能较好地反映地电断面的基本特征,是 CEMP 资料反演工作过程中必经的一步工作。

另外,从 Bostick 反演公式可知,在求取深度 H 的电阻率时,进行了视电阻率对频率的导

数运算,从滤波的观念而言,导数运算是一种高通算子,所以在 Bostick 反演断面中,放大了原始资料中的误差,所显示的电阻率比较零乱,这一点在资料分析中是必须注意的。

4.8 一维连续介质反演

一维连续介质反演是假设地下介质的电性随深度连续变化,对单点实测资料的一种曲线拟合反演方法,虽然这种反演法的分层性不太明显,但就单从地球物理的角度考虑是合理的,其成果可作为进一步解释的依据。

一维连续介质反演视电阻率断面图所反映的基本电性特征与 Bostick 反演结果是一致的,但一维反演结果使深度与电阻率的对应关系更加准确,特别是在深部,两者的差异比较大。另一方面,从曲线的拟合角度来讲,整个过程具有低通特征,所以该反演结果压制了原始资料中的干扰成分。

4.9 二维反演

由于实际地电断面并非处处都是一维的,这样一维反演结果与真实地电断面并不完全一致,所以要进行二维反演。

二维反演考虑了剖面的横向变化,对整条剖面资料进行反演。首先根据一维反演的结果和所了解的其它信息,设计初始参数,而后通过反复迭代断面的视电阻率和厚度,直到正演的各点视电阻率与实测的视电阻率的均方差达到最小,将其确定为最佳解。

5 勘探实例

5.1 准噶尔盆地西缘区块 CEMP 勘探

工区位于准噶尔盆地西南缘,布设二条近南北向的 CEMP 测线。主要地质任务为 确定基底性质与形态 地层格架及空间展布 断裂的特征 指示有利勘探区段。

工区地表分成多个不同地质单元,从南部的依林黑比尔根山到北部的扎伊尔山工区内依次为山前砂砾石、戈壁、沼泽、盐碱地、沙地,中部为兵团农场。312 国道、乌鲁木齐—阿拉山口铁路横贯工区南部,山间河流(如古尔图河)建有电站,山地地形较陡。

针对地表特征引起的接地电阻大、山地布极困难,以及地表及地下地质条件复杂(特别是山前地带)等采集、处理困难,通过采用填土浇水以减少接地电阻,增加观测时间提高信噪比,远参与 Robust 处理及对比编辑圆滑,多参数互相参考佐证等一系列手段,多种解释方法互约,无论是野外还是解释都取得了较好的效果。

5.2 青海柴达木盆地阿尔金斜坡 CEMP 勘探

为查明柴达木盆地阿尔金山前斜坡带构造特征,投入 CEMP 勘探工程,共计测线 9 条,长 300 km。

该测区位于盆山接触带,山高坡陡,接地条件差 盆地边部砂砾遍地,岩石风化剧烈,给施工与解释均带来一定困难。施工过程中采取深挖坑、浇水、垫土等办法,改善接收条件,保证了测点采集一级品率为 90%。

经多种方法的资料处理,并综合重磁资料解释,查明阿尔金山老变质岩以近 45° 角度逆冲于盆地之上,盆地边缘分布有一条与逆冲断层配套的凸起带,并发现了一批可能有利于油气储集的局部构造。

5.3 新疆塔西南克里阳地区 CEMP 勘探

工区位于新疆塔里木盆地西南的克里阳地区,为昆仑山山前复杂构造带,地层倾角大,

断裂发育,地表戈壁砾石覆盖厚,地形恶劣,地震难以取得有效信息。为此投入 CEMP 法十字剖面 76 km。通过采集高质量的数据,建立与地层系统相对应的电性层,特别是对资料进行了多种方法的 CEMP 处理,探索该区地电剖面的结构特征与变化规律,为地质解释提供可靠的地球物理依据。

由图可见,二维反演地电断面展布特征反映出克里阳地区具有油气远景的深层断展背斜特征,进一步证实了该地具有典型的前陆盆地三角带构造模式,成功地剖析了昆仑山前复杂构造带,揭示了深层地质结构的面貌。查明该区为昆仑山前典型的‘对冲构造’体系,浅层与深层均发现有背斜构造,具有油气远景(图 3)。

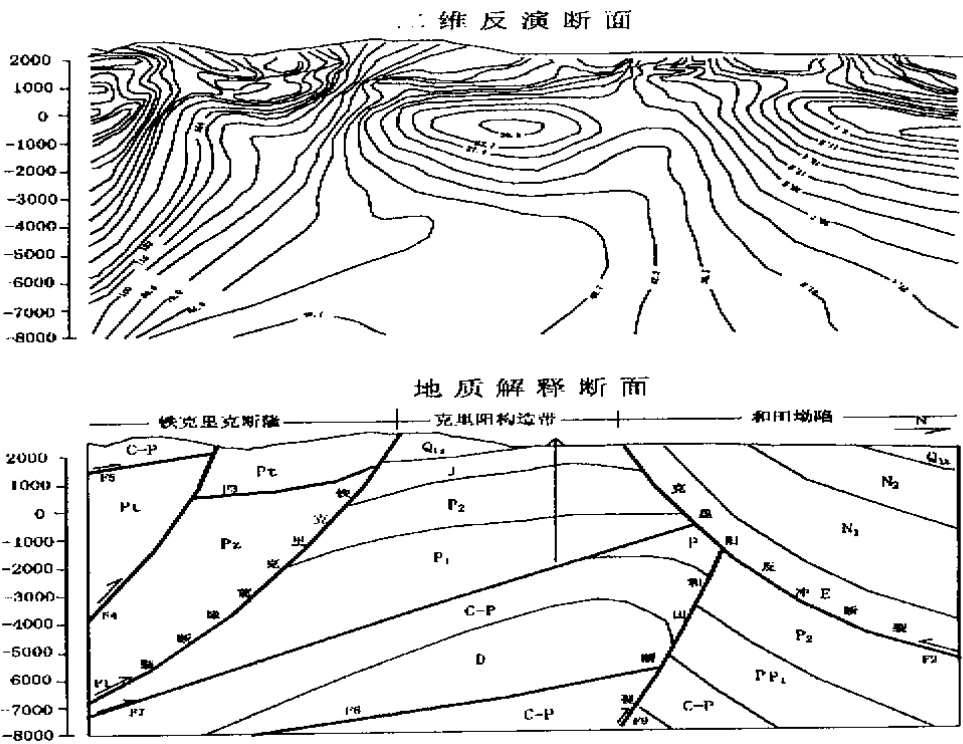


图 3 塔里木盆地西南地区 × × 测线 CEMP 解释剖面图

Fig.3 CEMP interpretation profile map of traverse No. xx in southwest area of Talimu basin

6 结语

- (1) CEMP 法最大限度地提取了勘探区内的地电信息,能够压制、消除浅部电性不均匀性和局部地形起伏造成的静态影响,提高勘探精度。
- (2) CEMP 法勘探费用较地震低,特别随着勘探仪器轻便化、高精度化以及较好的地质效果,尤其在地震勘探工作的前期或地震难以获得较好资料的地区,广泛地获得应用。
- (3) CEMP 法与 MT 法一样,受人文及工业干扰的影响较大,故避开或压制干扰仍是取得高质量资料的关键,这在外业采集尤为重要。

(4)在 CEMP 处理中,汉宁窗口宽度的选择是关键,太小可能难以压制静态影响,太大又会降低分辨能力。具体处理应根据工区地质特征和噪音特点因地制宜,确定最佳参数。

本文将 CEMP 方法及其在石油勘探中的应用进行了系统地分析,因笔者水平有限,文中不足之处在所难免,敬请指正。

参考文献

- [1] 杨生. EMAP 处理方法在 CSAMT 勘查中的应用[J]. 有色金属矿产与勘查,1993,3(12)
- [2] 王家映. 石油电法勘探[M]. 北京 石油工业出版社,1992

The application of continuous electromagnetic profiling method to the oil exploration

ZHANG Quan – sheng, YANG Sheng, LIU Shen – heng

(814 Team of East – China Nonferrous Geological Exploration Bureau, Zhenjiang 212005, China)

Abstract

The basic principle, data acquisition and data processing of the continuous electromagnetic profiling method (CEMP) and the function and property of v5 – 2000 system are minutely introduced in this paper. The satellite synchronization technology is used in v5 – 2000 system in order that the data acquisition of EM components is carried out simultaneously. So the efficiency of fieldwork is improved greatly. On one hand, the multi – channel electrical components along the profile are simultaneously measured with an array of electrical dipoles which are placed end – to – end along a traverse line. In this way, the information can be greatly expanded comparing to that in traditional MT method. So that, the electrical section can be provided more in detail. On the other hand, using the low pass filtering in the data processing can be restrained the disturbing from the conductive inhomogeneity near the surface to MT effectively. Therefore the results from CEMP will be more reliable. Three CEMP exploration projects in Zhungaer, Chaidamu, Talimu basins have been proved to be effective.

Key words CEMP method ; data acquisition ; data processing ; exploration example ; geological effect