

高温超导磁强计在电偶源瞬变电磁法中的应用

陈晓东¹, 赵毅², 林天亮², 杨涛¹, 戴远东¹

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 研制了适用于电偶源瞬变电磁法中直接测量磁感应强度 B 的高温超导磁强计, 并进行了电偶源瞬变电磁法大地电磁测量野外实验。测量结果表明了高温超导磁强计明显优于常规感应线圈探头, 可以得到更深的探测深度。

关键词: 电偶源瞬变电磁法; 高温超导磁强计; 接收传感器; 勘探深度

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)01-0065-04

电偶源瞬变电磁法(亦称长偏移瞬变电磁法, 简称 LOTEM)具有工作效率高, 对地电断面分辨能力强, 比其他人工源电磁法的勘探深度大(可达 $n \times 10^2 \sim n \times 10^3$ m), 在深部金属矿勘查、油气田、煤田、地热和地壳深部勘探方面有重要作用。目前, 电偶源瞬变电磁法普遍使用感应线圈做接收传感器, 为了提高灵敏度, 只能提高接收面积, 主要是使用多匝大回线做传感器。感应线圈接收的是感应电动势 $V_z(t)$, 用 $V_z(t)$ 计算全区视电阻率往往在某些值域会出现无解现象, 一般要由垂直磁场 $H_z(t)$ 计算全区视电阻率, 这样就必须要将测量的 $V_z(t)$ 转换成 $H_z(t)$, 以便做定性和定量解释。在转换中采用积分运算, 由于初始值难以选定, 所以不可避免的存在误差, 特别是反映深部信息的晚期道信号误差更大^[1-3]。过去由于使用灵敏度较低的感应线圈做接收传感器, 发射机功率又较小, 在距离较远时很难接收到信噪比较好的信号, 在对信噪比较差的信号进行积分转换成磁场的过程中误差就会更大。而高温超导磁强计可以取代感应线圈, 作为电偶源瞬变电磁法的接收传感器直接测量磁场, 高温超导磁强计灵敏度高, 可较大地提高远距离接收信号的信噪比, 所以, 随着国产大功率发射机和高灵敏度高温超导磁强计的研制成功, 电偶源瞬变电磁法必将成为深部找矿的有效方法之一。

1 高温超导磁强计

高温超导磁强计可直接测量磁场, 具有噪声低、频带宽、低频响应好的特点, 它的灵敏度从 0 Hz 到

系统最高频率, 整个范围内是一致的, 且灵敏度也比较高^[4-6], 适合做电偶源瞬变电磁法的接收传感器, 与感应线圈做传感器相比有以下优点。

(1) 高温超导磁强计直接测量磁场, 避免了感应电动势 $V_z(t)$ 到垂直磁场 $H_z(t)$ 转换时引入人为的计算误差。

(2) 高温超导磁强计频带宽、低频响应好, 测量信号的信噪比高。感应线圈的灵敏度随频率的变化而变化; 高温超导磁强计的灵敏度从直流到系统截止频率范围内为固定值, 低频信号信噪比高是超导磁强计的突出特点。电偶源瞬变电磁法发射的频率就很低, 一般接收二次场的时间窗口范围为 $10^{-5} \sim 10^2$ s, 所接收的二次场中有丰富的低频信号, 因此使用高温超导磁强计做传感器能够提高测量信号的信噪比。

(3) 勘探深度大。电偶源感应探头为了提高灵敏度, 使用多匝大回线做传感器, 它频带窄, 自身的过度过程很大, 丢失了很多早延时的信息。高温超导磁强计的频带很宽, 用高温超导磁强计做电偶源电磁法的传感器可获得较可靠的早、晚延时信号。根据电磁理论, 在一次场激发下, 地下良导体上引起的二次场的磁场衰减较慢, 磁场变化率很小, 用感应线圈测量的感应电动势信号较弱。但晚延时仍有较强的瞬变磁场响应, 用高温超导磁强计可获得较可靠的晚延时瞬变磁场响应。因此, 在电偶源电磁法中用高温超导磁强计做传感器提高了电偶源电磁法的早、晚期信号的信噪比, 可增大勘探深度。

电偶源瞬变电磁法与磁偶源电磁法相比, 发射

频率较低,一次记录所需要的时间长;接收距离较远,一般都在几公里以外接收,信号非常弱,所以接收的是低频弱磁信号。电偶源瞬变电磁法对高温超导磁强计的要求与磁偶源电磁法对高温超导磁强计的要求不同,除要求高温超导磁强计具有低噪声、高摆率外,还要求长时间稳定性,频带宽度一般要求5 kHz 或以下。为此专门研制了高温超导磁强计,主要原理框图见图1。

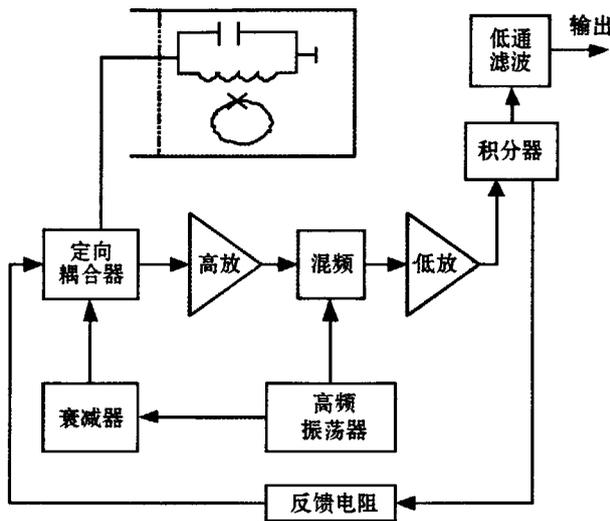


图1 高温超导磁强计原理

高温超导磁强计主要由工作在液氮环境的高温超导量子干涉器(Superconducting quantum interference devices, SQUID)器件和室温电子线路构成。高温超导磁强计的主要技术指标为:噪声—100 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,摆率—1 mT/s,灵敏度—6.25 mV/nT,带宽—5 kHz,动态范围—100 dB,工作环境温度—20 ~ 50 ℃,电源— ± 12 V。在电偶源瞬变电磁法的野外实验中,高温超导磁强计作为磁场探头能长期稳定地工作。

2 电偶源瞬变电磁法的磁场响应

如果均匀大地的电阻率为 ρ ,电偶源发射极距为 L ,发射电流为 I ,当发射电流关断以后,在大地表面距离电偶极子中心 r 处的感应电动势响应为^[7]

$$V_z = \frac{3SpM}{2\pi r^4} \left[\phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \left(1 + \frac{u^2}{3} \right) e^{-\frac{u^2}{2}} \right] \sin\phi, \quad (1)$$

式中, S 是接收线圈的面积; $M = I \cdot L$,是电偶极矩; ϕ 是 r 和 L 的夹角; $u = r / \sqrt{2\rho t / \mu_0}$; t 为发射电流关断后的时间, μ_0 为真空磁导率; $\phi(u)$ 为概率积分,

$$\phi(u) = \sqrt{2/\pi} \int_0^u dx e^{-x^2/2}.$$

对式(1)进行积分可得

$$B_z(t) = \frac{3\mu_0 M}{2\pi r^2} \sin\phi \int_0^u dx \left[\frac{1}{x^3} \phi(x) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{x^2} e^{-\frac{x^2}{2}} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \right] = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^2} \sin\phi \left[\left(1 - \frac{3}{u^2} \right) \cdot \phi(x) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{3}{u} e^{-\frac{x^2}{2}} \right]. \quad (2)$$

初始时刻 $t=0$, u 趋于无穷大,此时式(2)变为

$$B_z(0) = (\mu_0 M) / (4\pi r^2) \cdot \sin\phi, \quad (3)$$

式(3)即为距电偶极中心 r 处的磁场(一次场)。

在早期, $B_z(t) \approx \frac{\mu_0 M}{4\pi r^2} \left(1 - \frac{3}{u^2} \right);$

在晚期, $B_z(t) \approx \frac{\mu_0^{5/2} r M}{60\pi^{3/2} \rho^{3/2} t^{3/2}} \sin\phi, \quad (4)$

$$V_z(t) \approx \frac{\mu_0^{5/2} S r M}{40\pi^{3/2} \rho^{3/2} t^{5/2}} \sin\phi. \quad (5)$$

从式(4)、式(5)可以看出,感应磁场按 $t^{-3/2}$ 衰减,感应电动势按 $t^{-5/2}$ 衰减,所以在晚期感应电动势比磁场衰减快。

在发射极距 $L = 1\ 500$ m,发射电流 $I = 20$ A 保持不变的情况下,图2为按照式(2)计算的、距电偶极中心7 km时的不同大地电阻率的磁场衰减曲线,图3为按照式(2)计算的、大地电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 时的距电偶极中心不同距离的磁场衰减曲线。

高温超导磁强计在野外背景噪声较小的地方,如内蒙草原,记录精度一般能够达到3 pT。从图2可以看出,在大地电阻率分别为1 500、1 000、500、200、100、50 $\Omega \cdot \text{m}$ 时,在离电偶极中心7 km处,可以记录到30 ~ 1 000 ms时间段内的信号;从图3可以看出,在大地电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 时,在距电偶极中心分别为2、4、5、6、7 km处,可以记录200 ~ 500 ms时间段内的磁场衰减信号。这样的数据记录长度在用感应线圈作探头的电偶源瞬变电磁法中是无法得到的。

3 野外实验与讨论

高温超导磁强计在电偶源瞬变电磁法中应用实验是用高温超导磁强计和感应线圈分别作接收传感器。初期的野外实验使用仪器为加拿大凤凰公司的V8多功能电法仪器,发射极距为1 500 m,发射电流11 A,发射频率0.25 Hz。由于发射电流很小,为了接收到一定强度的二次场信号,选择接收距离为600 m。此次野外试验采用定点试验的办法。

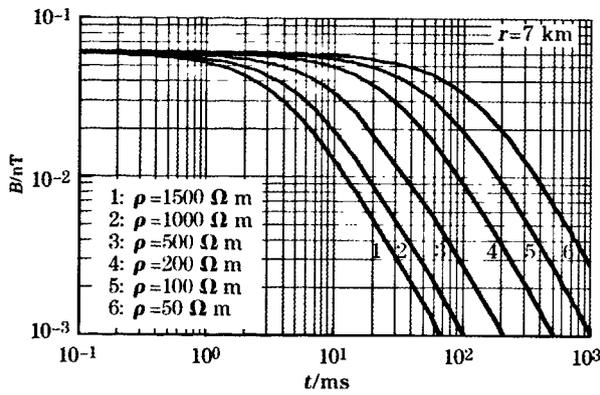


图2 不同大地电阻率的电磁场信号的响应曲线

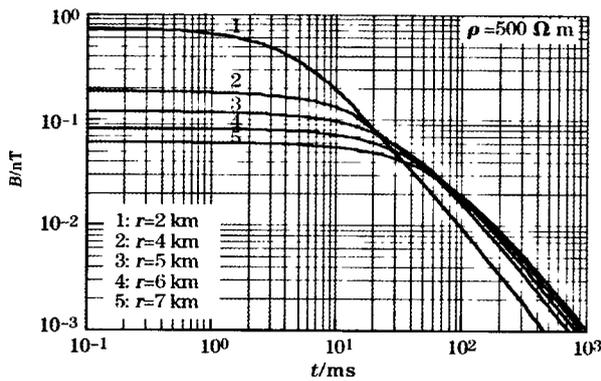


图3 不同接收距离的电磁场信号的响应曲线

图4 是使用高温超导磁强计测量的电偶源瞬变电磁法感应磁场响应的衰减曲线。实线表示两次测量的结果,虚线为两次测量的平均值。对原始测量数据对比做误差统计,早期道取相对误差,晚期道取绝对误差。早期道最大相对误差为 2.759%,晚期道绝对误差为 0.21 pT。

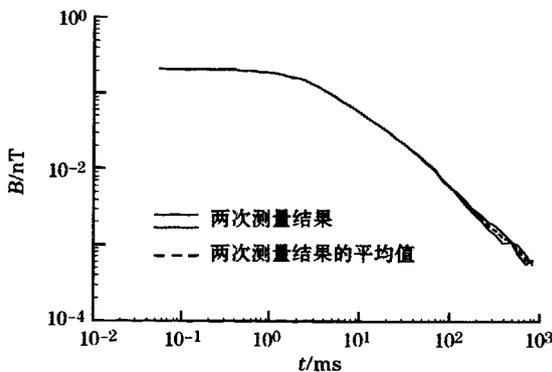


图4 高温超导磁强计初期实验结果

初期实验成功后,开展了垂直于发射线的多点测量实验。实验使用美国 ZONGE 公司的 GDP-32 多功能电法仪器,发射极距为 1 500 m,发射电流 20 A,发射频率 1 Hz。试验从接收距 1 km 开始,分别测量了接收距为 1 km 和 3 ~ 12 km 测量点的

LOTEM 数据。同时,在接收距 1 km 处做了高温超导磁强计与感应线圈在电偶源瞬变电磁法中应用的对比试验,结果表明在接收距 2 km 以后,感应线圈无法接收到电偶源瞬变电磁二次场信号。由于发射电流较小,当接收距为 5 ~ 6 km 时,电偶源瞬变电磁感应二次场信号已经很弱,接收距 7 km 以后的数据波动较大,噪声较大,信噪比低。

图5 是在电偶源瞬变电磁法中使用高温超导磁强计测量的感应磁场和用感应线圈测量的感应电动势响应的衰减曲线,每种方法测量 2 次。为了对比 2 种方法的测量结果,将高温超导磁强计所测的电压值通过格值(灵敏度)转换成磁场,把二者所测量的衰减曲线画在了同一个坐标系中。图中可以看出,感应线圈在 4 ms 以前记录的数据信噪比较好,而高温超导磁强计在 40 ms 前记录的数据信噪比较好。所以使用高温超导磁强计提高了电偶源瞬变电磁晚期信号的信噪比,将大大地提高勘探深度。

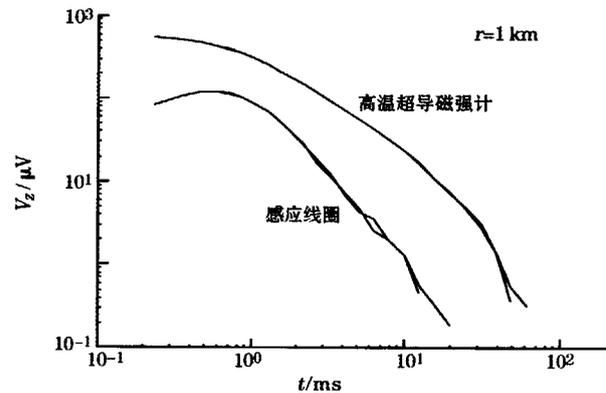


图5 两种装置垂直于发射线的多点测量实验结果

对使用高温超导磁强计测量的电偶源瞬变电磁法感应磁场原始测量数据对比做误差统计,早期道最大相对误差为 3.37%,晚期道绝对误差为 0.045 pT。

图6 为不同接收距时高温超导磁强计测量的电偶源瞬变电磁法感应磁场衰减曲线,可以看出在 4 pT 以下待测信号已被无规噪声淹没。可以认为,4 pT 就是此次测量的噪声电平(包括环境噪声和所用的高温超导磁强计的噪声),4 pT 以上的数据,包括在 6 km 所测得的结果都有很高的信噪比。按电偶源瞬变电磁法的测深理论^[8],此方法的探测深度约为可探测到二次场信号(有足够的信噪比)的最大距离的 1/3。由此估计,在电偶源瞬变电磁法中用该高温超导磁强计直接测量磁感应强度 B,可得到超过 2 km 的探测深度。

接收距在 2 km 以后,使用感应线圈已经无法接

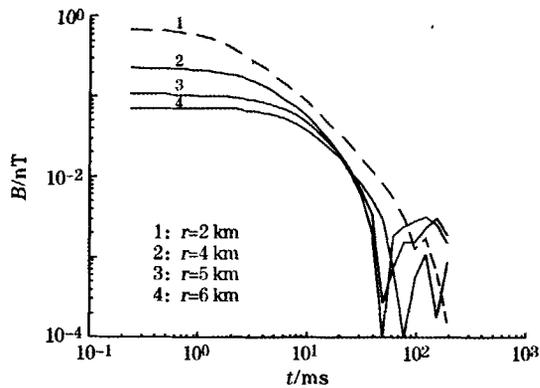


图6 不同接收距时高温超导磁强计的实验结果

收到有效的感应电动势信号,这说明了高温超导磁强计灵敏度更高,同时也说明感应磁场确实衰减较慢。所以,在电偶源瞬变电磁法中使用高温超导磁强计,不仅能够加大勘探深度,也使得发射场布设后可测量的区域更广,效率更高,具有明显的优势。

4 结论

为电偶源瞬变电磁法研制的高温超导磁强计野外工作稳定,工作效率满足电偶源瞬变电磁法野外工作要求,实现了在电偶源瞬变电磁法中直接测量磁场的目的。

理论计算和野外实验表明:使用高温超导磁强计作为电偶源瞬变电磁法的传感器直接测量磁场,

比使用感应线圈测量感应电压有更好的保真度和更高的测量精度,为寻找深部大矿、富矿以及油气藏等提供了新的地球物理仪器,对深部金属矿、油气田、煤田、地热等深部勘探有非常大的益处,将会大大推动电偶源瞬变电磁法技术的发展。特别是随着我国发射电流大于 50 A 的电偶源瞬变电磁仪器的研制成功,高温超导磁强计在深部找矿中必将发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 陈明生,田小波.电偶源瞬变电磁测深研究(2):瞬变磁场的求解方法[J].煤田地质与勘探,1999,27(2).
- [2] 陈明生,田小波.电偶源瞬变电磁测深研究(5):实测感应电压转换成垂直磁场[J].煤田地质与勘探,1999,27(5).
- [3] 黄力军.电偶源瞬变电磁测一维全区视电阻率解释方法研究[J].物探与化探,1995,19(5).
- [4] 陈晓东,赵毅,王赤军,等.高温超导磁强计的研制及在 TEM 上的野外实验[J].地球学报,2002,23(2).
- [5] 王赤军,陈晓东,赵毅.77K VHF SQUID 低噪声磁强计的研制[J].仪器仪表学报,1999,20(3).
- [6] Foley C P, Leslie K E, Binks R A, et al. Field Trials using HTS SQUID Magnetometer for Ground-based and Airborne Geophysical Applications[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 1999, 9.
- [7] 戴远东,王世光.在瞬变电磁法大地电磁测量中 HTc SQUID 探头与常规探头的比较[J].低温物理学报,1996,18(1).
- [8] 戴远东,谢飞翔.HTc SQUID 用于瞬变电磁法大地测量时的测深估计[J].低温物理学报,2001,23(2).

THE APPLICATION OF HTc SQUID MAGNETOMETER TO LOTEM

CHEN Xiao-dong¹, ZHAO Yi², LIN Tian-liang², YANG Tao¹, DAI Yuan-dong¹

(1. College of Physics, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: The HTc SQUID magnetometer is characterized by relatively low noise, wide frequency range, high-response to low frequency and can thus be used as a B field sensor in LOTEM. The results of the field tests of HTc SQUID applied in LOTEM show that the HTc SQUID magnetometer has superiority over conventional inductive coil. Applying the HTc SQUID in LOTEM will promote the depth of investigation, and it can thus serve as a new instrument in geophysical exploration of the deep resource.

Key words: Electric Dipole Source; HTc SQUID Magnetometer; receiving sensor; depth of Investigation

作者简介:陈晓东(1966-),男,教授级高级工程师,1990年毕业于长春地质学院。从事地球物理仪器研发工作。