第 23 卷 第 2 期
2002-04/179-182

地 球 学 报
ACTA GEOSCIENTIA SINICA

Vol. 23 No. 2
Apr. 2002/179-182

高温超导磁强计的研制及在 TEM 上的野外试验

陈晓东 赵 毅 王赤军 吕国印 李汝传 张 杰

(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 文中介绍了高温超导磁强计的工作原理、特点、所研制的高温超导磁强计的性能指标以及在研制高温超导磁强计的过程中所解决的关键问题,定性地分析了高温超导磁强计在瞬变电磁法(TEM)上应用的优势。在河北固安以高温超导磁强计做探头和使用传统感应线圈做探头在瞬变电磁法(TEM)上进行了野外对比试验。试验结果表明,把高温超导磁强计应用于瞬变电磁法(TEM)上能够加大勘探深度。

关键词 射频超导量子干涉器 磁强计 瞬变电磁法

The Development of HTc RF SQUID Magnetometer and Its Field Test in TEM

CHEN Xiaodong ZHAO Yi WANG Chijun LÜ Guoyin LI Ruchuan ZHANG Jie

(*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei*, 065000)

Abstract The principles, features and key techniques of HTc RF SQUID magnetometer are given in this paper. The authors deal theoretically with the advantages of applying HTc RF SQUID Magnetometer in Transient Electromagnetic method(TEM). The correlation investigation in the field shows that HTc RF SQUID magnetometer can detect deeper information than conventional TEM.

Key words Radio Frequency Superconducting Quantum interference Device magnetometer Transient Electromagnetic method

在地球物理勘探中电磁法占有极重要的位置,特别是瞬变电磁法,它是一种人工场源的电磁法,相对天然场源的电磁法,其探测精度高,在地球物理勘探中起着非常重要的作用。瞬变电磁法应该测量的参数是磁感应强度 B,但是,目前瞬变电磁法使用的探头(传感器)都是感应线圈,而测量的是感应电动势,即 $S\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$。原因是没有可直接测量磁场的磁探头。自 20 世纪 80 年代发现高温超导材料后,随即研制出块材高温超导射频量子干涉器(简称 RF SQUID)器件,以高温超导射频量子干涉器为传感器的磁强计研制工作也随之展开,在此所讲的高温超导磁强计是指高温超导射频量子干涉器磁强计的简称。由于高温超导量子干涉器在液氮温度(77 K)下工作,氮资源丰富,且液氮低温技术相对简单。特别是 90 年代中期高温超导专家们研制出了薄膜高温 RF SQUID 和高温超导共面谐振器,大大地提高了高温超导 RF SQUID 的稳定性,因此,在中国进行高温超导量子干涉器在地球物理勘探上的应用研究的技术障碍已不存在。1989 年开始进行高温超导磁强计在地球物理上的应用研究工作,分别在 MT、TEM、LOTEM 上做了大量的应用研究❶(王赤军等,1995)。先后研制出载波电流频率为 30 MHz 的适用于块材 RF SQUID 磁强计、载波电流频率达 1 000 MHz 的薄膜 RF SQUID 磁强计(陈晓东等,1997,He D F 等,1998)。

1 高温超导磁强计的原理及特点

1.1 高温超导磁强计的原理

高温超导磁强计包括探头、低噪声前置放大器、控制电路等,原理如图 1。

工作原理:当有外磁场通过超导环时,加在与超

本文由国家重大基础研究项目(973)"隐伏大矿-巨矿的综合定位方法"(G1999043214)资助。
改回日期:2002-2-19;责任编辑:宫月萱。
第一作者:陈晓东,男,1966 年生,高级工程师,主要从事物探仪器的研制与开发;电话:0316-2212732。
❶ 王赤军,陈庆数,赵毅等. 1994. HTCSQVID 在 TEM 上的应用研究. 全国超导薄膜和超导电子等学术讨论会文集,106~107.

万方数据

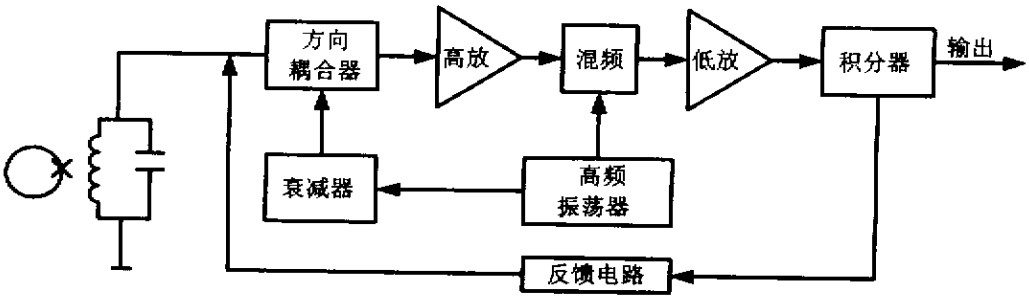

图 1 高温超导磁强计原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of RF SQUID magnetometer

导环耦合线圈上的射频信号被调制,被调制的信号经放大器放大后送入混频器检波,经积分器积分后,得到一个与磁通变化量成比例关系的电压值,这个电压值经过电阻反馈到与超导环耦合的线圈上,在超导环内产生一个与外磁通变化量大小相等、方向相反的磁场,使超导环内的磁通变化为零。积分器输出的这个电压值就反应了通过超导环的磁通变化量的大小,经过标定,就可对应得到磁场值(陈文升,1988)。

1.2 高温超导磁强计的特点

高温超导磁强计具有直接测量磁场、低噪声高灵敏度、频带宽低频响应好的特点。目前,主要用于高温超导磁强计在瞬变电磁法(TEM、LOTEM)上的应用研究。

1.3 解决的关键问题

在研制高温超导磁强计的过程中提高高温超导磁强计的灵敏度、摆率、稳定性和抗干扰能力是关键问题。

具体采取的措施是:降低高频放大器的噪声、增加高频放大器的增益;设计好线路布局,做好印制线路板;采用先进的元器件,讲究安装工艺;采取严格的屏蔽措施,抑制电路内部串扰和外部干扰等(王赤军等,2001)。

1.4 高温超导磁强计的技术指标

高温超导磁强计系统的技术指标主要包括磁场灵敏度、摆率、带宽等,这些技术指标受很多因素的影响,如 SQUID 器件、电子线路、对微波场的屏蔽等(He D F 等,1998;Rillo,1987)。目前研制的磁强计系统的指标是:

磁场灵敏度:100 $fT/\sqrt{\mathrm{HZ}}$

摆率:$1.25\times10^5\Phi_0/\mathrm{s}$

带宽:20 kHz

万方数据

2 高温超导磁强计在瞬变电磁法(TEM)上应用的优势

瞬变电磁法(TEM)是利用不接地回线向地下发送一次脉冲磁场,即在发射回线上供一个电流脉冲方波,方波后沿下降的瞬间,将产生一个能向地下传播的一次磁场,在一次磁场激励下,地质体将产生涡流。涡流的过度过程,即二次磁场的衰减过程,同时也向地表传播,在地表我们就能测量这个二次磁场,并用该二次场的强弱变化来判断地下电阻率的分布情况,为地质找矿服务。方波下降沿频谱信息非常丰富,所以地质体感应的二次场频谱也非常丰富。在瞬变电磁法上,早期道数据中高频成分占主导,反映浅部信息;晚期道数据中低频成分占主导,反映深部信息。

综合瞬变电磁法原理和高温超导磁强计的特点在理论上认为,高温超导磁强计在瞬变电磁法上应用具有优势:

(1)高温超导磁强计能直接测量磁场,提高信号的信噪比,从而提高勘探精度;感应线圈测量的是感应电动势,需要进行积分运算算出磁场值,积分运算需要用到晚期道的数据,而晚期道的数据信噪比不高,所以算出的磁场晚期道数据误差大。使用高温超导磁强计测得的数据就是磁场,没有上述问题,可以提高勘探深度和精度。

(2)频带宽、低频响应好,提高晚期道信号的信噪比,提高勘探深度和精度;感应线圈的灵敏度随频率的变化而变化,频率越高灵敏度越高,而高温超导磁强计的灵敏度从直流到系统最高频率的整个频率范围内是固定的,且灵敏度较高。这必然提高测量数据中的低频信号的信噪比,即提高晚期道数据的信噪比,提高勘探深度和精度。

(3)根据理论二次场的磁场信号比感应电动势

衰减慢,信噪比好,所以用高温超导磁强计直接测量磁场可以提高勘探深度和精度。

3　在瞬变电磁法(TEM)上的野外试验

3.1　地点及实验地点的地质概况

野外试验地点选在河北省固安县窦家铺以北 500 m 的永定河干涸的河床上进行。

地质概况为 800 m 以上的地层为第四系和上第三系。表层覆盖着亚砂土加沙层、泥层。第四系全新统底界埋深为 20～40 m,主要由亚砂土构成,局部夹泥质粘土,上新统底深为 120～170 m,主要岩性为亚粘土、亚砂石、细砂,局部夹淤泥层;中更新统底深为 200～350 m,由亚粘土夹砂层、砂砾层组成;下更新统底界为 350～500 m,岩性以粘土、亚粘土夹砂砾层组成;第三系上新统由粉砂岩、细砂岩、泥质岩组成,中新统底界埋深约为 800 m,岩性为泥岩、砂岩、含砾砂岩组成。

根据地质情况和其它物探资料认为,在实验点附近地下电阻率一般为低阻区,在几百米范围内变化不大。

3.2　野外试验的目的

此次野外试验的目的:① 与传统的感应线圈做对比实验,验证使用高温超导磁强计做探头取得的数据是否真实;② 考察高温超导磁强计工作的稳定性,主要考察其抗干扰能力和仪器的摆率;③ 考察使用高温超导磁强计是否能提高晚期道数据的信噪比。

3.3　试验方法

试验采用中心回线法,发射线框为 200 m×200 m,发射电流从 5 A 依次加大到 15 A。

4　试验结果

(1)在发射电流为 4 Hz、5 A、占空比 50% 时高温超导磁强计能够稳定地工作。图 2 是用示波器记录的高温超导磁强计接收到的信号,这个信号是一次场和二次场的叠加信号,从图中可以看出,所接收到的波形正负对称,上升沿与下降沿完好,接收到的信号频率与发射信号频率一致,说明高温超导磁强计工作正常。

(2)发射电流在 15 A 的情况下,高温超导磁强计能稳定地工作,说明它的摆率已经满足一般人为干扰小的野外实际应用的要求。瞬变电磁法所发射的方波的上升沿和下降沿比较陡,一般为几十微秒

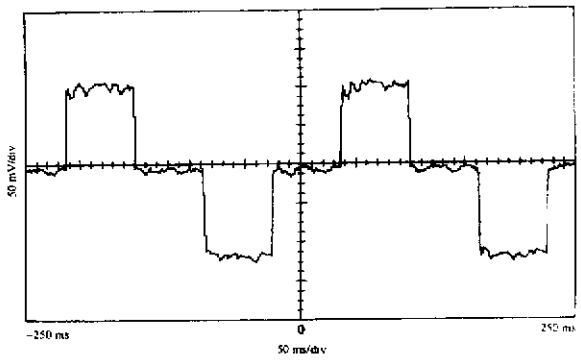

图 2　高温超导磁强计接收的信号

Fig. 2　Signal received by HTc RF SQUID magnetometer

到一、二百微秒,这对高温超导磁强计的要求较高,在试验中所使用的发射机最大发射电流为 15 A。

(3)图 3 是分别用高温超导磁强计和感应线圈做探头,瞬变电磁仪记录的原始曲线。通过图 3 可以清楚地看到:用感应探头记录的数据在 4×10^3 μs 左右信噪比就已经变坏,在数据处理时,4×10^3 μs 以后的数据就无法使用,只能算出 4×10^3 μs 数据对应深度的电阻率;高温超导磁强计做探头取得的数据一直到将近 30×10^3 μs,从信号信噪比的角度看还可以继续记录数据,由于仪器限制只采集到此,在数据处理时就能算出 30×10^3 μs 数据对应深度的电阻率。从瞬变电磁法原理可以看出使用高温超导磁强计将加大勘探深度。

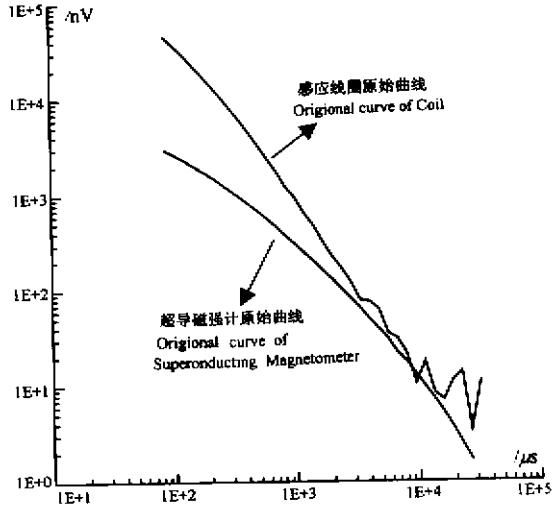

图 3　磁感应强度和感应电动势衰减曲线

Fig. 3　Signal of magnetic induction intensity and induced electromotive force

(4)图 4 是把使用高温超导磁强计测得的数据进行微分与使用感应线圈测得的数据统一量纲后的

万方数据

对比曲线。从图中可以看出:早期道数据一致性很好,晚期道由于感应探头数据的信噪比不够,用高温超导磁强计测得的数据要大大地优于感应测得的数据。这两条曲线进一步说明:用高温超导磁强计测得的数据是真实的;用高温超导磁强计测得的晚期道数据大大地优于感应测得的数据,无疑会加大勘探深度。

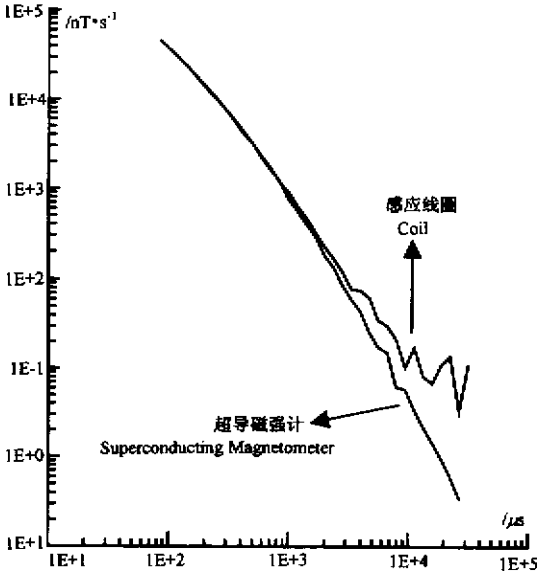

图 4 磁感应强度微分和感应电动势衰减曲线

Fig. 4 Signal of magnetic induction intensity differential and induced electromotive force

(5)图 5 是通过简单计算得到的电阻率测深曲线。通过电阻率测深曲线,可以看出使用高温超导磁强计做探头比感应线圈做探头探测得深,在河北固安窦家铺这种地质条件下可以加大勘探深度约 50%,将为深部隐伏矿的寻找提供一种新的方法。

5 小结

在河北固安窦家铺进行的高温超导磁强计和感应线圈野外对比试验的结果表明:①高温超导磁强计在人文干扰小的地方能够稳定工作;②用高温超导磁强计取得的信号是真实的,并且晚期道的数据大大地优于感应探头,在固安窦家铺这种地质条件下加大了约 50%的勘探深度。

然而,目前在瞬变电磁法上正式使用的数据处理软件都是从感应电动势入口进行数据处理的,直接从磁场入口进行数据处理的软件刚刚进行研制,过去人们对从磁场入口进行数据处理的研究非常少,经验也少,所以数据处理软件有待进一步完善。

万方数据

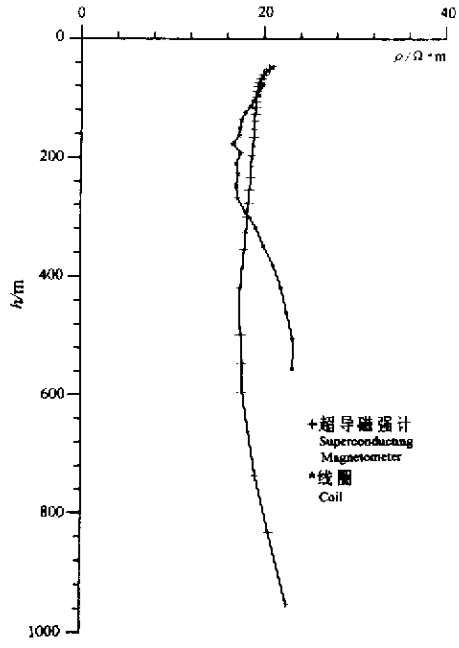

图 5 电阻率曲线(晚期)

Fig. 5 Resistively curve (late time)

致谢 研究中使用的高温超导量子干涉器件是北京大学物理系提供的,在项目进行过程中得到了戴远东教授、谢飞翔博士等人的大力帮助;同时地球物理地球化学勘查所的黄利军等同志在做试验的过程中给予了积极的支持;在成文的过程中得到了吕古贤研究员的无私帮助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

陈文升. 1988. 超导地球物理仪器原理. 北京:地震出版社.

陈晓东. 1997. VHF SQUID 磁强计前置放大器研制. 地学仪器,(4):11~14.

王赤军,陈晓东,赵毅等. 1995. 高 Tc RF SQUID 磁强计在 LOTEM 上应用存在的诸多问题及解决途径. 低温物理学报,17(增刊下卷):426~428.

王赤军,陈晓东,赵毅等. 2001. 高灵敏度、高温低噪声超导量子干涉器磁强计的研制. 中国地球物理学会年刊,昆明:云南科技出版社,162.

References

Chen Wensheng. 1988. The principle of supercondcuting geophysical instrument, Beijing: Seismogaphic Press (in Chinese).

Chen Xiaodong. 1997. Delelopment of VHF SQUID Preamplifier, Geoscience Instrument, (4): 11~14 (in Chinese).

He D F, Zeng X H. 1998. Radio frequency SQUIDs operating at 77 K with 1 GHz lumped-element tank circuit. Appl. Phys. Lett. 72: 969.

Rillo C, Veldhuis D, Flokstra J. 1987. Optimization of the dynamic rehavior of a SQUID system using an electronic simulation. IEEE Trans. Istu. Meas, IM-36. (3): 770~774.

Wang Chijun, Chen Xiaodong, Zhao Yi et al.. 1995. Probloms and solved method of High Tc RF SQUID Magnetometer in LOTEM, Journal of Low Temperature Physics, 17: 426~428 (in Chinese).