第 23 卷 第 2 期　　低　温　物　理　学　报　　Vol. 23, No. 2
2001 年 5 月　　CHINESE JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS　　May, 2001

HTc SQUID 用于瞬变电磁法大地测量时的测深估计

戴远东　谢飞翔
人工微结构和介观物理国家重点实验室;北京大学物理系,北京　100871*

本文对将高温超导 SQUID 系统应用于瞬变电磁法大地测量和传统方法进行了比较,推导了使用 SQUID 时的测深公式,并探讨了进一步的实验方案.

1 引　　言

高 T_c SQUID 磁强计的应用中,一个很有吸引力的领域是地球物理探测[1]. 其中包括自然场源和人工可控场源方法的大地电磁测量,通过地表测得电磁信号反演地下电阻率分布,由此推断大地构造和矿床. 大地电磁测量所涉及到的频率范围约为 10^{-4} 到 10^{4} Hz,越低频率的信号反应了深度越深的信息. 现在在地球上大多数地区,几公里以上的地表层信息大多已经查明,人们希望探测的是 3～5 公里以下更深的地层. 特别是在石油、天然气探测中所用的传统人工场源地震探测,由于地下坚硬岩石层对地震波的反射,在硬岩石层下面的石油、天然气矿床难以发现. 几公里以下的深层信息对应于 1Hz 以下的电磁信号. 传统的大地电磁测量方法中用感应线圈测量在线圈中的感应电动势. 然而感应线圈在 1Hz 以下的低频段的灵敏度按 $1/f^{3/2}$ 随频率降低,因而其低频段段灵敏度很低. 超导量子干涉仪(SQUID)有很高的灵敏度,特别是在低频段,其灵敏度按 $1/\sqrt{f}$ 规律随频率改变,因而对于深层的大地电磁测量,SQUID 有十分明显的优越性.

实际上,在 70 年代末和 80 年代初,低 T_c SQUID 已非常成功地应用于自然场源大地电磁测量并已经完成了商品化[1]. 然而由于野外使用和运输液氦的技术困难和高昂的价格,以及石油降价引起石油勘探资金投入的减少,使该工作中断. 液氮的使用,使高 T_c SQUID 克服了使用液氦的技术困难,费用大为降低,为 HTc SQUID 在地球物理探测中的应用创造了十分有利的条件. 因而自高 T_c SQUID 研制成功以来,将它用于大地电磁测量的研究引起了人们的极大兴趣. 我们早期用块材 HTc rf SQUID 与地矿部廊坊物探化探研究所进行了天然场源大地电磁测量的实验. 近几年来又合作进行了人工场源大地电磁测量(瞬变电磁法大地电磁测量)的研究[2],并与德国合作进行了两次野外实验. 到目前为止,上述工作的重点是验证 HTc SQUID 的可靠性,即在野外有一定自然环境干扰和人工场源发射过程中 HTc SQUID 能

* 国家超导中心和国家重点基础研究专项经费资助项目,项目号 NKBRSF-G19990646.
收稿日期:2001-01-02

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

否正常工作及探测到的数据是否可信.对于使用 HT_c SQUID 在探测深度(或灵敏度)方面与常规感应线圈探头的对比还未作深入、系统的实验.本文的目的是根据 HT_c SQUID 现有的技术指标,对上述问题先作理论上的估算,为进一步的实验方案提供必要的参考数据.

2 瞬变电磁法大地电磁测量简介

瞬变电磁法大地电磁测量是用人工方法发射一个电磁脉冲,当脉冲关断后测量由地下涡流产生的场在地表的衰减.为了提高信噪比,一方面用正负脉冲信号叠加消除单方向的外界干扰,另一方面用多周期的多次测量消除外界的随机干扰.

最常用的瞬变电磁法大地电磁测量分两大类,一类是磁偶极源法(TEM 法).发射源为一个方形线筐.一般是 100 ×100m^2 或 200 ×200m^2,用发射机向其发射脉冲电流,为 8～20A(视探测深度而定).接收探头放在线筐中心.另一种方法是电偶极源法(LOTEM 法),发射源是一根长为 2～3km 的直线置于地表,两端埋于地中.用发射机通过该导线向地下发射脉冲电流,一般是 8～20A,最高可达 30～35A.探测线圈放在数公里外的远处,其距离与探测深度有关.若探测越深,探头到发射源的距离越远.这两种方法中,TEM 法探测深度较浅,但其几何定位精度较高,LOTEM 的探测深度较大,但几何定位精度要差一些.

我们已经研究过在这两种方法中用 SQUID 测量磁场 $B(t)$ 和用感应线圈测量感应电动势 $V = S\dot{B}(t)$ (S 为感应线圈的有效面积)的对比,并计算了在均匀大地电阻率假设下的半空间模型中,当人工场源关断后 $B(t)$ 和 $V = S\dot{B}(t)$ 随时间的变化[3],并已指出,对于电偶极源大地电磁测量(LOTEM 法)而言,按现在 HT_c SQUID 所达到的灵敏度,比起目前使用的常规感应线圈探头,HT_c SQUID 可以探测到衰减时间(t)更长的信号,这实际反映了 HT_c SQUID 在低频下的灵敏度优于常规感应线圈探头.

3 用 HT_c SQUID 的测深估计及其与常规感应线圈探头的对比

在瞬变电磁法大地电磁测量中,实际探测深度取决于所用测量仪器灵敏度和测点的噪声强度.理论上估计测量深度时,常采用二层地电模型[4],即假设大地为电阻率不同的两层结构.上层电阻率为 ρ_1,下层为 ρ_2,两层分界面的埋深为 d.计算此两层结构下场的衰减曲线,并与电阻率为 ρ_1 的均匀大地的衰减曲线作比较,求得两条曲线彼此分离的时间 t,由此可求得分离点深度 d.详细的论证可参考文献[4].

按照上述理论分析,对于磁偶极源的 TEM 法,用感应线圈探测感应电压时的探测深度

$$d_{B_Z} = 0.55\left(\frac{IA\rho_1}{\eta_V}\right)^{1/5} \tag{1}$$

其中 I 为发射电流,A 为发射线筐面积,η_V 为总的噪声电压(包括各种噪声),单位是伏/平方米.而使用 SQUID 直接测量磁场时,探测深度的表达式为

$$d_{B_Z} = 2.8 \times 10^{-3}\left(\frac{IA}{\eta_B}\right)^{1/3} \tag{2}$$

式中 η_B 为磁场测量中的总噪声,单位是特斯拉.理论上说,在磁偶极源瞬变电磁法大地电磁测量中,增加发射电流 I 和加大发射线筐面积 A 可增加探测深度,但用常规感应线圈探头

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时,探测深度与(IA)1/5 正比.而用 SQUID 直接测量磁场 $B(t)$ 时,探测深度与(IA)1/3 正比,因而随 IA 的增大,后者比前者的探测深度增长更快.

在电偶极源瞬变电磁法(LOTEM)中,用感应线圈测量感应电动势时,探测深度可表示为

$$d_{B_Z} = 0.28\left(\frac{I\overline{AB}\rho_1}{\eta_V}\right)^{1/4} \tag{3}$$

其中$\overline{AB}$为发射线长度.上述结果均可在文献[4]中查到,该文献未给出直接测量磁场 B_Z 时的测深估计公式.在瞬变电磁法大地测量中,电偶极源法(LOTEM)属远区测量,收发距 a 应大于探测深度 d 的 3 倍.文献[4]给出的此条件下用感应线圈时的测深估计方法如下:根据发射电流 I,电偶极源电场$\overline{AB}$,大地电阻率 ρ_1 和电压噪声 η_V,估计出可以探测到发射信号的最大距离 a_m(此时接收到的信号幅度与噪声电平 η_V 相等),最大探测深度即为 $d = a_m/3$,(3)式就是按此法求出的.由相同的方法我们可以推出用 HT$_c$ SQUID 测量磁场时的最大探测深度.在 LOTEM 中,当收发距为 a 时,SQUID 探测到的磁场最大值是早期的平台值[3]

$$B_Z = \frac{I\overline{AB}\mu_0}{4\pi a^2} \tag{4}$$

令 B_Z 等于磁场噪声 η_B,即可求得最大探测距离 a_m.令 $d = a_m/3$,即可求得最大探测深度

$$d_{B_Z} = 1.05\times10^{-4}\left(\frac{I\overline{AB}}{\eta_B}\right)^{1/2} \tag{5}$$

由(3)式和(5)式可知,当增大发射电流和发射线长时,感应线圈探测深度随$(I\overline{AB})^{1/4}$增大,但用 SQUID 测量磁场的探测深度按$(I\overline{AB})^{1/2}$增大,因而应用 SQUID 更为有效.这与磁偶极源的 TEM 法是相同的.

在测深估计的公式中,η_V 和 η_B 为总噪声,包括探测仪器的噪声和环境噪声.在很安静的条件下,环境噪声较小,η_V 和 η_B 主要由仪器噪声决定.研究探测方法的优缺点时,我们关心的是仪器的性能,因而认为 η_V 和 η_B 为探测仪器的噪声.

当用 SQUID 测量磁场时,η_B 为输出的总噪声磁场.若磁场噪声谱密度为 S_B(T^2/Hz),接收机带宽为Δf,则 $\eta_B = S_B^{1/2}\sqrt{\Delta f}$.我们研制的 HT$_c$ rf SQUID,其灵敏度已达到 $S_B^{1/2} = 50fT/\sqrt{Hz}$,1/$f$ 噪声拐点为 20Hz.在用感应线圈测量感应电压时,η_V 决定于接收机的电压测量精度(ΔV)和探测线圈面积,$\eta_V = \Delta V/S$.目前一般接收机的电压测量精度为 2μV.

下面我们给出对于现有实用装置的一些数值估计.要求探测深度较大的 TEM 装置中发射线筐为 200×200m^2,发射电流为 20A,接收线圈为与发射线筐平行的导线,即接收面积也为 200×200m^2.在电压测量精度为 2μV 的情况下,$\eta_V = 5\times10^{-11}$V/m^2.接收机带宽为 10kHz,用我们的 HT$_c$ rf SQUID 测量时,考虑了低频噪声后,$\eta_B = 5$pT.由式(1)和(2)可分别算出此时感应线圈和 HT$_c$ SQUID 的最大测深分别为 2.4km 和 1.52km.我们看到在 TEM 法中,需进一步提高 SQUID 的灵敏度在测深方面才有优势.

对于电偶极源装置的LOTEM 法,目前常用发射电流 $I = 20$A,导线长度$\overline{AB} = 2000$m.接收机灵敏度相同,仍约为 2μV,线圈采用 40×40m^2,共 32 圈,其面积为 51200m^2.此方法中带宽只需要 1kHz.用现在的 HT$_c$ rf SQUID,考虑了低频噪声后的磁场噪声 $\eta_B = 1.6$pT,按照(3)式和(5)式,可求得在现有装置的 LOTEM 法中,感应线圈和 HT$_c$ rf SQUID 的测深分别为 4.7km 和 16.6km.我们看到此时 HT$_c$ rf SQUID 的探测深度要大的多.由(4)式可知,当 $a = 20$km 时,$B(z)$ 为 10pT,比 HT$_c$ rf SQUID 的分辨率 1.6pT 大的多.由此也可知上述估算是正确的.这里

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我们想指出,上述估计是理想情况,由于环境干扰,实际的噪声 η_V 和 η_B 可能比上面估计的值要高,实际测深应当减少.

4 结　论

用我们研究成功的 H T_c rf SQUID 配上瞬变电磁法大地电磁测量的发射装置和接收机,在电偶极源的 LOTEM 法中,H T_c rf SQUID 的探测深度比现有的感应线圈深的多.按照瞬变电磁法测深理论,在这种远区测量方法中,收发距 a 应大于探测深度 3 倍以上,因而进一步的对比实验应使收发距 a 在十几公里以上.

上节计算也指出,在磁偶极源的 TEM 中,使用 H T_c rf SQUID 必须进一步提高其灵敏度,使其探测深度达到感应线圈水平.既使如此,按瞬变电磁法大地电磁测量专家的意见,直接测量 $B_Z(t)$ 也比测量感应电压 $\dot{B}(t)$ 有重要意义,因为用磁场 $B_Z(t)$ 计算大地视电阻率比用感应电压 $\dot{B}(t)$ 更为准确,因而在 TEM 法中用 H T_c SQUID 代替感应线圈仍是很有兴趣的.

本文的内容曾与国土资源部廊坊物探化探研究所蒋邦远院士、王赤军教授,和西安石油勘探仪器总厂研究所吴嘉谷教授作过有益的讨论,特此致谢.

[1] J. Clarke, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-**19**(1983), 288.
[2] S. G. Wang, L. H. Zhong, C. J. Wang and Y. D. Dai, *Physica C*, **411**(1997), 282-287.
[3] 戴远东,王世光,**低温物理学报**,**11**(1996), 18.
[4] 方文藻,李予国,李貅编著"瞬变电磁测深法原理",p118-121,西北工业大学出版社(1993).

EVALUATION OF DETECTION DEPTH OF APPLYING H T_c SQUID IN TRANSIENT ELECTROMAGNETIC GEOPHYSICAL SURVEYING

Y. D. Dai　　F. X. Xie
Mesoscopic Physics National Laboratory and Department of Physics, Peking University, Beijing 100871

(Received 2 January, 2001)

We discuss the application of high T_c SQUID in transient electromagnetic geophysical surveying, and compare the custom method and the use of SQUID. The detection depth formula using SQUID is deduced and further experiment plan is discussed.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net