陈晓东,赵毅,张杰等.高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究.地球物理学报,2012,55(2):702-708,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.034.

Chen X D, Zhao Y, Zhang J, et al. The applications of HTc SQUID magnetometer to TEM. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2):702-708,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.034.

高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究

陈晓东[1],赵　毅[2],张　杰[2],吕国印[2],马　平[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　通过对高温超导磁强计的不断完善,研制出了适合在瞬变电磁法中使用的高温超导磁强计,实现了在瞬变电磁法中直接测量磁场的目的.同时开展了瞬变电磁法感应磁场的数据处理与解释技术研究,开发了瞬变电磁法感应磁场的电性成像软件,可以对使用高温超导磁强计作传感器测得的瞬变电磁感应磁场数据进行处理与电性成像.野外实验表明:高温超导磁强计工作稳定,在瞬变电磁法中使用高温超导磁强计比使用感应线圈做传感器提高了勘探深度.

关键词　高温超导磁强计,瞬变电磁法,电性成像

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.034　　**中图分类号**　P631　　**收稿日期** 2011-03-03,2012-01-16 收修定稿

The applications of HTc SQUID magnetometer to TEM

CHEN Xiao-Dong[1], ZHAO Yi[2], ZHANG Jie[2], LÜ Guo-Yin[2], MA Ping[1], DAI Yuan-Dong[1]

1 *Department of Physics, Beijing University, Beijing* 100871,*China*

2 *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang Hebei* 065000,*China*

Abstract　HTc SQUID magnetometer is characterized by low noise, high sensitivity, wide dynamic and frequency ranges and can be used as a B field sensor. Theoretically, the HTc RF SQUID magnetometer has superiority over conventional inductive coil in TEM application. Since 1989, Bejing University and IGGE have been developing HTc SQUID magnetometers for geophysical exploration. We have manufactured the HTc SQUID magnetometer adapted to several commercial TEM system, and realized measuring magnetic field directly in TEM. IGGE also have studied the data processing and interpretation technology and have developed resistivity imaging software for the data acquired with HTc SQUID magnetometer. The results of the field tests show that larger detection depth could be expected in TEM survey by using HTS RF SQUID magnetometer.

Keywords　HTc SQUID magnetometer, Transient electromagnetic method, Resistivity image

1　引　言

在传统的瞬变电磁测量中,磁场信号的测量是采用感应线圈探头,测量的信号是磁场随时间变化而产生的感应电动势,即 $s\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$ (s 是感应线圈的有效面积),然而,如 Spies 所指出,在瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method 简称 TEM)中心回线装置中,用感应电动势定义全区视电阻率,存在明显的假

基金项目　国家高技术研究发展计划项目(2007AA03Z213);地质大调查项目(1212010560302)资助.

作者简介　陈晓东,男,1966 年生,1990 年毕业于长春地质学院,主要从事高温超导在地球物理中的应用研究工作.
E-mail: chenxiaodong@igge.cn

极值，有多解或无解现象；直接测量磁场感应强度 $B(t)$，用磁场定义的全区视电阻率响应是单值的，而且不存在假极值[1-2]. 另一方面，瞬变电磁法的磁场理论指出，在测量的晚期，磁场 $B(t)$ 按 $t^{-\frac{3}{2}}$ 衰减，感应电动势正比于 $\frac{dB}{dt}$，因而感应电动势按 $t^{-\frac{5}{2}}$ 衰减[3-5]，即磁场信号在晚期的衰减比感应电动势要慢，也就是说如果直接测量磁场，则比较容易测到延时更长的晚期信号，这意味着能够得到离地表更深处的电阻率信息，因而在瞬变电磁法中测量磁场有重要意义.

超导量子干涉器（Superconducting quantum interference devices—SQUID）是一种借助超导宏观量子干涉效应工作的极灵敏的磁场测量器件，以 SQUID 为传感器的磁强计可以成为大地电磁测量中高性能的磁场探头. 20 世纪 80 年代，人们已开始使用工作在液态氦温度（4.2K）的低温超导量子干涉器（LTc SQUID）磁强计作为磁场探头进行了大地电磁测量实验研究，但由于使用液态氦技术复杂，使用不方便，该项研究未能前进[6]. 高温超导体发现以后，人们很快研制出工作在液态氮下的高温超导量子干涉器（HTc SQUID），液态氮不仅使用方便，价格也很便宜，这为 HTc SQUID 的推广应用创造了良好的条件[7-8].

与感应探头相比，HTc SQUID 磁强计有一个很大的优点，它对磁场的响应与信号频率无关. 感应线圈探头对磁场的响应正比于频率，因而，随频率的降低，其灵敏度下降很快，所以对于低频信号的测量采用 HTc SQUID 磁强计比采用感应探头更具有优越性，而越低频率的信号可以反映离地表越深的信息. 过去，为了探测深部的金属矿床，煤田、地下水、地热、油气等资源和研究深部地质结构，在瞬变电磁法中人们是通过增大发射线框和增加发射电流的方法来增加发射磁矩 M，然而，增加发射磁矩使测量系统的体积和重量迅速增大，按照 TEM 理论，随发射磁矩的增大，采用感应探头测量感应电动势时探测深度按 $M^{\frac{1}{5}}$ 增大，如果直接测量磁场，则探测深度按 $M^{\frac{1}{3}}$ 增大，并且勘探深度不受浅部低阻覆盖层的影响[1,4,9]，由此可知，采用 HTc SQUID 磁强计直接测量磁场可以提高瞬变电磁法的勘探深度. 尤其是在低阻覆盖区，传统的 TEM 勘探深度较浅，采用 HTc SQUID 磁强计直接测量磁场的优势会更加明显.

由于 HTc SQUID 在大地电磁测量应用中有许多优点，加拿大、德国、澳大利亚、日本等发达国家相继在地质仪器领域，以 HTc SQUID 磁强计的研究为突破口，对 HTc SQUID 磁强计的应用开展了广泛的研究，并且在实际的地质勘探中开始尝试使用 HTc SQUID 技术. 其中有代表性的工作是澳大利亚在 20 世纪 90 年代开始的 HTc SQUID 磁强计在地球物理中的应用研究，开展了 HTc SQUID 磁强计在地面、航空瞬变电磁法中的应用实验；1994 年，德国与中国（包括北京大学、中国地质科学院物化探研究所、中国科学院物理所）合作，开展了 HTc SQUID 磁强计在大地电磁测量中的应用研究[10-16].

2　HTc SQUID 磁强计

HTc SQUID 磁强计由工作在液氮环境的 HTc SQUID 器件和室温电子线路构成. 其工作原理不再赘述[17]. HTc SQUID 磁强计具有直接测量磁场、噪声低、频带宽、低频响应好的特点. 其磁场噪声已优于 100×10^{15} T/$\sqrt{\text{Hz}}$（在白噪声段），已可以在地球物理探测中应用，我们研制的 HTc SQUID 磁强计系统的幅频特性和噪声曲线如图1和图2. 由于作

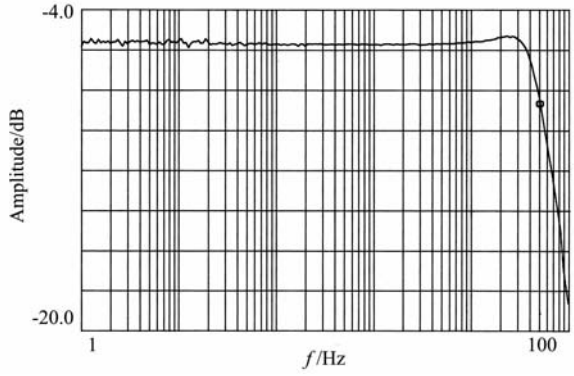

图 1　高温超导磁强计的幅频特性曲线

Fig. 1　Frequency-amplitude response curve of the HTc SQUID magnetometer

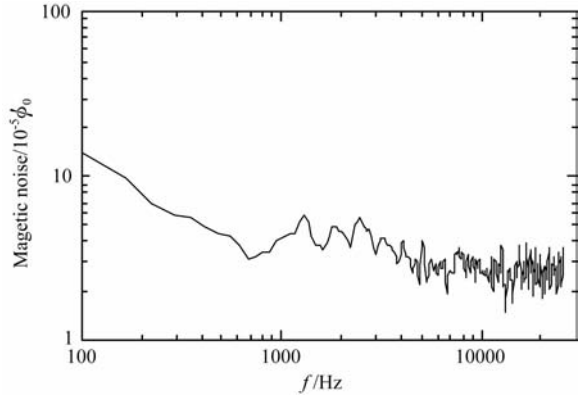

图 2　高温超导磁强计的噪声曲线

Fig. 2　B- field noise of the HTc SQUID magnetometer

者测量手段的限制,HTc SQUID磁强计系统的幅频特性低频只测量到1Hz,HTc SQUID磁强计系统可以响应直流信号即0 Hz.

在国际上,HTc SQUID磁强计在心磁测量、无损检测、大地电磁测量等领域的应用研究已开展不少,在瞬变电磁法测量中所使用的HTc SQUID磁强计除要求灵敏度高之外,还有较特殊的要求.由于在TEM中发射的一次场很强,野外环境干扰有时也很大,而待测的二次场晚期信号很弱,为此要求系统有很大的动态范围、很快的响应速度和较强的抗干扰能力.

在高温超导磁强计野外测量实验中发现,高温超导磁强计在某些测量点存在失锁现象,即无法正常工作.这种工作状态的不稳定制约了高温超导磁强计的推广应用.为此开展了提高HTc SQUID强计野外工作稳定性研究,通过实验发现:在野外某个测量点HTc SQUID磁强计工作不正常后,在该点前后左右移动它都能很好地工作,但就是这一点始终不能工作,分析后认为,出现这种现象的原因可能是周围的高频干扰在这一点形成干涉,加强了干扰,干扰信号通过前置放大器和连接电缆干扰了HTc SQUID器件.因为HTc SQUID磁强计是十分灵敏的磁测仪器,SQUID器件的射频激励信号很小,在50Ω系统中一般为−90 dBm,折合成电压为7.1 μV.较强的射频干扰信号很容易通过辐射耦合到HTc SQUID传感器上,干扰系统的正常工作.为此需要专门设计高频屏蔽,对前置放大器、连接电缆、SQUID器件一起屏蔽,提高系统的抗干扰能力.

根据理论,电磁屏蔽是利用电磁感应现象在屏蔽壳体(良导体)表面所产生涡流的反磁场来达到屏蔽的目的.假设屏蔽体与干扰源的耦合为M,干扰源电流为$\boldsymbol{I}$,扰源电流的角频率为ω,屏蔽体的电阻为r_s,电感为L_s,则感应涡流$\boldsymbol{I}_s$为:

$$\boldsymbol{I}_s = \frac{\mathrm{j}\omega M \boldsymbol{I}}{r_s + \mathrm{j}\omega L_s}, \tag{1}$$

在高频情况下,

$$r_s \ll \omega L_s, \text{则 } \boldsymbol{I}_s \approx \frac{M\boldsymbol{I}}{L_s}, \tag{2}$$

从公式中也能看出,为了减小屏蔽体的低频屏蔽效果,保证正常信号通过,使屏蔽有较宽的带宽,需增加r_s,使屏蔽低频的涡流减小,不影响测量信号,从而需要减小屏蔽良导体的厚度.

据以上理论,采用的屏蔽方法是在一直径25 cm,高50 cm,壁厚2 mm的环氧树脂筒上使用厚度300A的真空镀铝薄膜缠绕八层做成屏蔽筒,将盛有液氮的杜瓦、SQUID器件、前置放大器一起放入屏蔽筒中屏蔽.

对屏蔽筒的屏蔽效果和它对测量结果的影响进行了野外实际测试.测试方法是:在野外电磁干扰比较小的地方,分别使用屏蔽和不屏蔽的高温超导磁强计作瞬变电磁法的接收传感器,使用无线对讲机做干扰源.测试采用瞬变电磁法中心回线装置,发射线框100×100 m,发射电流10A.在实验过程中,无论高温超导磁强计屏蔽与否都能正常工作,图3是高温超导磁强计使用屏蔽和不是有屏蔽时的瞬变电磁响应曲线,可以看出屏蔽筒不影响测量信号.表1是测量数据误差统计表.但是,如果近距离使用对讲机,如果不采取屏蔽措施,高温超导磁强计出现失锁现象,工作不稳定;而使用屏蔽以后高温超导磁强计系统非常稳定,不受对讲机发出的高频信号的影响.实验结果说明高频屏蔽提高了HTc SQUID强计的工作稳定性,同时又不影响测量结果.

通过对系统的优化,研制出了具有动态范围达到±1500 nT,摆率(响应速度)优于1 mT/s,适合在TEM中应用的抗干扰能力强的HTc SQUID磁强计.

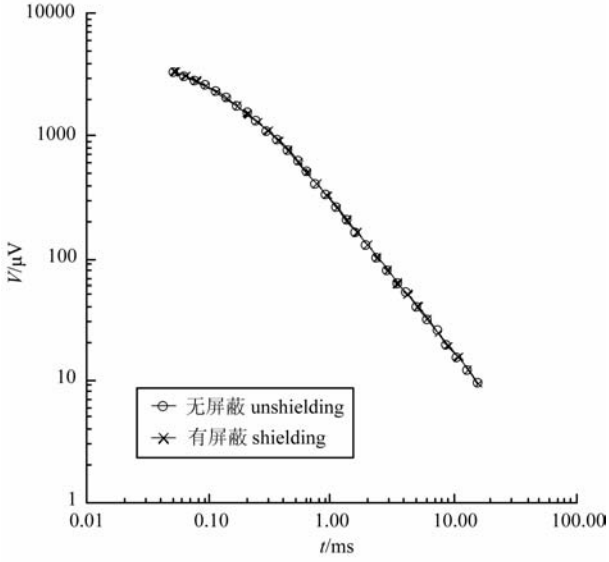

图3 屏蔽和不屏蔽高温超导磁强计测量的曲线

Fig. 3 TEM data obtained with shielding and unshielding HTc SQUID magnetometer

3 瞬变电磁法感应磁场数据处理方法与解释技术研究

在瞬变电磁法中使用高温超导磁强计测量的磁

表 1　使用屏蔽和无屏蔽高温超导磁强计测量数据误差统计表

Table 1　Error of TEM data obtained with shielding and unshielding HTc SQUID magnetometer

采样道号	相对误差(%)	采样道号	相对误差(%)
1	0.70	17	0.89
2	0.72	18	0.92
3	0.65	19	0.52
4	0.85	20	0.64
5	0.68	21	0.60
6	0.71	22	0.48
7	0.59	23	0.55
8	0.64	24	0.22
9	0.67	25	1.22
10	0.64	26	2.27
11	0.54	27	0.92
12	0.69	28	0.42
13	0.71	29	1.09
14	0.67	30	0.92
15	0.64	31	0.92
16	0.73		

场和使用感应线圈测量的感应电动势是两个反映电磁场同一特性、不同表现形式关系密切的物理量,因此,在数据处理方法上是相近的,主要包括强干扰信号的剔除、滤波、装置自耦合效应和固有过渡过程的校正、后沿改正等方面,这里不再赘述,主要说明瞬变电磁感应磁场拟二维电性成像方法.

瞬变电磁感应磁场拟二维电性成像方法是:首先依据感应磁场全域电阻率公式计算视电阻率,再根据"烟圈"理论的涡流扩散速度计算视深度,然后利用剥皮法,对所得视电阻率和视深度值进行修正,最后将横向同深度层的介质分成若干块有限长度的厚板状导电介质进行正演拟合,反复进行深度、电阻率校正,得到最终的深度—电阻率地电断面,确定地下电性结构分布. 程序流程图见图 4.

为了验证拟二维感应磁场成像算法的实用性,首先用我们开发的感应磁场三维正演程序对已知模型进行数值模拟,然后用模拟值进行拟二维感应磁场反演成像,将反演成像结果与模型对比以验证其效果. 验证结果表明:研发的瞬变电磁法感应磁场拟二维电性成像的算法和程序正确.

4　野外实验

近几年,通过不断完善高温超导磁强计,其抗干

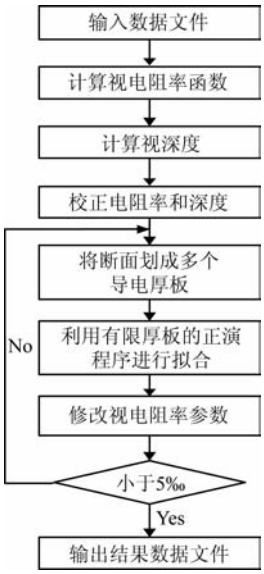

图 4　程序流程图

Fig. 4　Flow diagram of the software

扰能力和稳定性明显提高,在河北、新疆、内蒙等地开展了大量的野外应用实验,野外实验的目的是检验高温超导磁强计在瞬变电磁法中应用的优势和高温超导磁强计野外工作稳定性. 以在内蒙西乌旗和内蒙某铜矿区的实验为例介绍高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究结果.

4.1　在内蒙西乌旗的实验

在内蒙西乌旗的实验采用的仪器是美国 ZONGE 公司的 GDP32 多功能电法仪器. 采用电偶源装置,发射极距 1.5 km,发射电流 20A,发射频率 1 Hz. 分别使用高温超导磁强计和 ZONGE 的 TEM-3 感应线圈作瞬变电磁法的接收传感器,TEM-3 是灵敏度较高的感应线圈传感器,等效面积达 10000 m^2. 实验的主要目是为了验证高温超导磁强计在电偶源瞬变电磁法中应用是否具有优势.

由于电偶源瞬变电磁法要求发射功率大,而本次试验发射功率较小,为了能够测量到理想的信号,所以实验由接收距离从近到远依次进行. 分别测量了接收距离发射中心 5、7、9 km 的电偶源瞬变电磁场信号. 图 5 是在接收距离 5 km 时对比曲线.

从图 5 中可以看出:感应线圈测量衰减信号的信噪比很差,这样的信号已经无法进行数据处理了;使用高温超导磁强计测量的衰减信号在 60 mS 以内信噪比较好,这说明了在电偶源瞬变电磁法中使用高温超导磁强计作传感器具有明显的优势. 按电偶源瞬变电磁法的测深理论,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)的最大距离的三分之一. 由此估计在电偶源瞬变电磁法中用

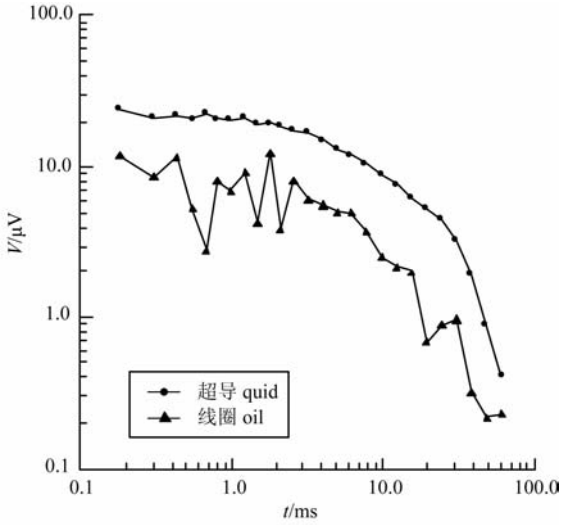

图5 高温超导磁强计和感应线圈测量的曲线

Fig. 5 LOTEM data obtained with HTS RF SQUID magnetometer and the data obtained with induction coil

该高温超导磁强计直接测量磁感应强度B可得到超过1000 m的探测深度.随着我国自主研发大功率发射机和高温超导磁强计的投入使用,电偶源瞬变电磁法将在深部资源勘探中将发挥重要作用.

4.2 在内蒙某铜矿区的实验

在内蒙某铜矿区实验采用的仪器是加拿大CRONE地球物理勘探公司生产的Digital PEM型瞬变电磁仪.分别使用高温超导磁强计和感应线圈作瞬变电磁法的接收传感器,采用磁偶源中心回线装置,发射线框200×200 m,发射电流15 A,发射频率6.25 Hz,测量点距50 m.主要目的是为了验证高温超导磁强计在瞬变电磁法中应用的稳定性,同时为数据处理与解释方法技术研究提供剖面测量数据,检验瞬变电磁法感应磁场拟二维电性成像算法和程序的正确性.

由于高温超导磁强计在磁偶源瞬变电磁法中的应用实验较多,技术比较成熟,工作效率较高,已能开展剖面测量,所以在试验区共布置了6条剖面,每条测线长1.4 km.共测量174个测点,检查点26个,对检查点与原始测量数据对比做误差统计,高温超导磁强计测量的数据早期道最大相对误差为6.45%,晚期道绝对误差为3.86pT.图6、7是异常比较明显的第2条剖面分别使用高温超导磁强计和感应线圈作瞬变电磁法的接收传感器测量的剖面曲线,图8、9分别是使用上述数据经拟二维电性成像得到的视电阻率断面图.从图中可以看出:使用高温超导磁强计测量的磁场数据和使用感应线圈测量的感应电动势数据反演,浅部低阻体的形态与位置基本相同,而使用高温超导磁强计测量的数据反演深度达到1200 m,使用感应线圈测量的数据只反演到800 m,使用高温超导磁强计测量勘探深度提高了50%.

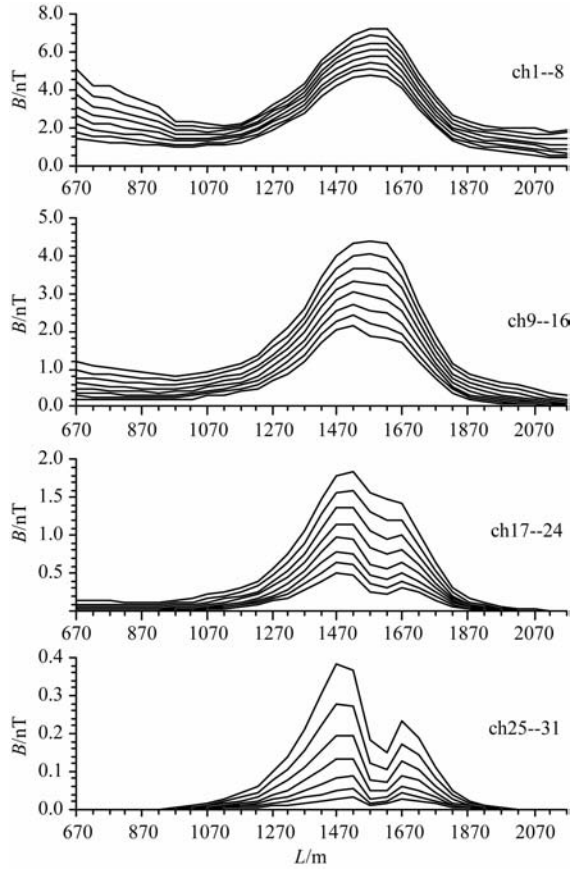

图6 2线TEM中心回线感应磁场剖面曲线

Fig. 6 B-field response profile curves of the line 2 with HTc SQUID magnetometer for the TEM in- loop configuration

5 结 语

通过不断的探索,研制出了能够在瞬变电磁法中应用的高温超导磁强计,实现了在瞬变电磁法中直接测量感应磁场的目的,在瞬变电磁法中应用高温超导磁强计提高了瞬变电磁法的勘探深度,把高温超导这项高技术在地球物理中转化成生产力,推动瞬变电磁法的进步,为我国寻找深部的矿产资源提供高技术手段,无论在电偶源还是磁偶源瞬变电磁法中高温超导磁强计将有很好的应用前景.

参考文献(References)

[1] Spies B R, Eggers D E. The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *Geophysics*, 1986, 51(7): 1462-1471.

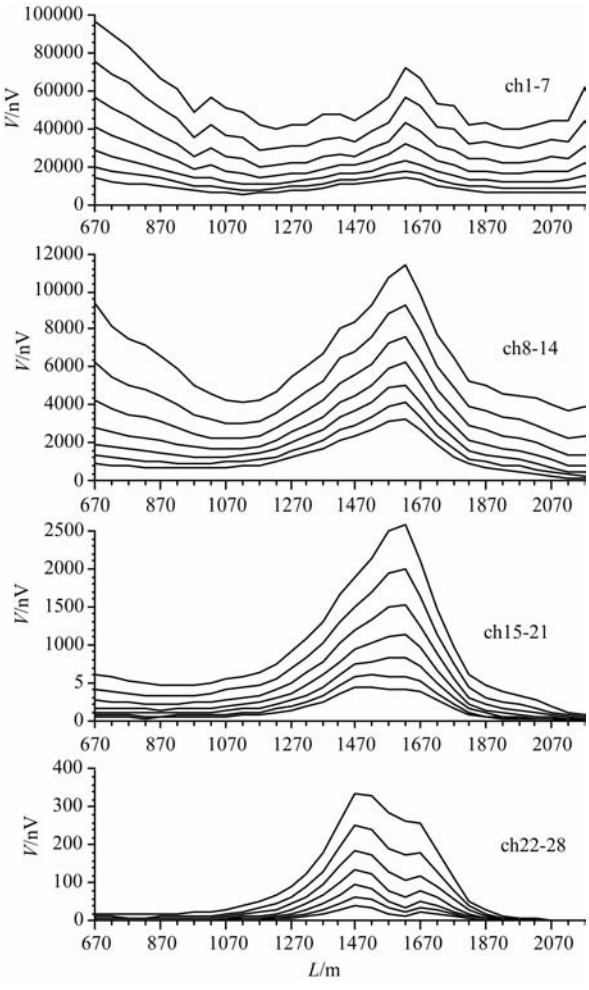

图 7　2 线 TEM 中心回线感应电动势剖面曲线

Fig. 7　Inductive voltage response profile curve of the line 2 with coil for the TEM in-loop configuration

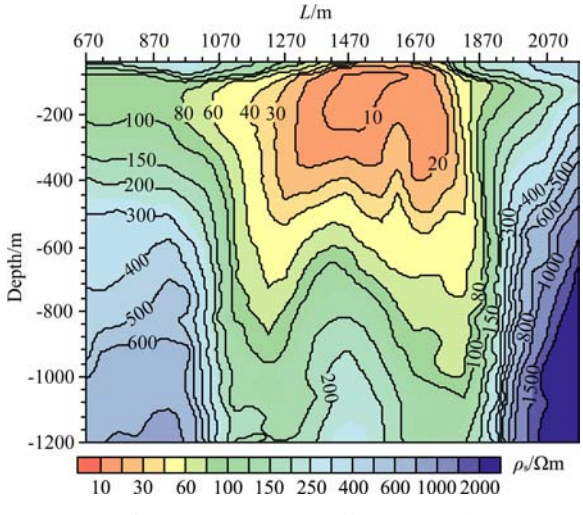

图 8　由感应磁场测量数据计算的视电阻率断面图

Fig. 8　Resistivity image section derived from the magnetic response profile data

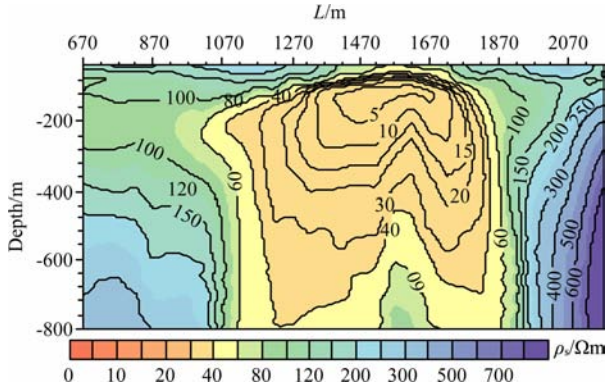

图 9　由感应电动势测量数据计算的视电阻率断面图

Fig. 9　Resistivity image section derived from the inductive voltage response profile data

[2] 白登海，Maxwell A M，卢 健等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算. 地球物理学报，2003，46(5)：697-704.

Bai D H，Maxwell A M，Lu J，et al. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese)，2003，46(5)：697-704.

[3] Spies B R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*，1989，54(7)：872-888.

[4] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探. 北京：地质出版社，1998.

Jiang B Y. A Practical Near-Zone Magnetic Source Transient Electromagnetic Exploration (in Chinese). Beijing：Geological Publishing House，1998.

[5] 方文藻，李予国，李貅. 瞬变电磁测深法原理. 西安：西北工业大学出版社，1993.

Fang W Z，Li Y G，Li X. Principle of the Transient Electromagnetic Method (in Chinese). Xian：Northwestern Polytechnical University Press，1993.

[6] Clarke J. Geophysical applications of SQUIDS. *IEEE Trans Mag.*，1983，19(3)：288-294.

[7] 赵忠贤，陈立泉，杨乾声等. Ba-Y-Cu 氧化物液氮温区的超导电性. 科学通报，1987，32(6)：412-412.

Zhao Z X，Chen L X，Yang Q S，et al. Superconductivity of Ba-Y-Cu Oxide in liquid Nitrogen Temperature. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese)，1987，32(6)：412-412.

[8] Colclough M S，Gough C E，Keene M，et al. Radio-frequency SQUID operation using a ceramic high-Temperature superconductor. *Nature*，1987，328(6125)：47-48.

[9] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度. 石油地球物理勘探，2004，39(5)：575-578.

Xue G Q. On Survey depth by transient electromagnetic sounding method. *Oil Geophycical Prospecting* (in Chinese)，2004，39(5)：575-578.

[10] 王赤军，陈晓东，赵毅等. 77K SQUID 磁强计在 TEM 测量上的应用研究. 地球物理学报，1999，42(S1)：161-166.
Wang C J，Chen X D，Zhao Y，et al. Application of 77K SQUID magnetometer in TEM. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese)，1999，42(Supplement)：161-166.

[11] Foley C P，Leslie K E. Potential use of high Tc SQUIDs for airborne electromagnetics Exploration Geophysics，1998，29(2)：30-34.

[12] Foley C P，Leslie K E，Binks R A，el al. Field trials using HTS SQUID magnetometers for ground-based and airborne geophysical applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*，1999，9(2)：3786-3792.

[13] Zhang Y，Yi H R，Schubert J，et al. Operation of rf SQUID magnetometers with a multi-turn flux transformer integrated with a superconducting labyrinth resonator. *Apll. Supercond.*，1997，9(2)：3396-3400.

[14] 王赤军，陈晓东，赵毅等. 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，2001：162.
Wang C J，Chen X D，Zhao Y，et al. Development of High Sensitivity，High Temperature and Low Noise Superconducting Quantum Interference Device Magnetometer (in Chinese). Chinese Geophysics Proceedings，2001：162.

[15] 陈晓东，赵毅，王赤军等. 高温超导磁强计的研制及在 TEM 上的野外试验. 地球学报，2002，23(2) 179-182.
Chen X D，Zhao Y，Wang C J，et al. The development of HTc RF SQUID magnetometer and its field test in TEM. *Journal of Earth Science* (in Chinese)，2002，23(2)：179-182.

[16] 陈晓东，赵毅，邓晓红等. 高温超导磁强计研制及在瞬变电磁法中的应用. 物探与化探，2006，30(3)：229-232.
Chen X D，Zhao Y，Deng X H，et al. The development of the HTS RF SQUID magnetometer and its application to TEM. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese)，2006，30(3)：229-232.

[17] 陈文生. 超导地球物理仪器原理. 北京：地震出版社，1988.
Chen W S. Principle of the Superconducting Geophysical Instrument (in Chinese). Beijing：Seismological Press，1988.

(本文编辑 汪海英)