

高压密封舱与磁场传感器的综合频响变异及其实验验证

邓明^{1,2}, 魏文博^{1,2}, 金胜^{1,2}, 叶高峰^{1,2}, 张启升^{1,2}, 景建恩^{1,2}

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 大地电磁测深在陆地上的方法技术成熟, 但将其移植到海洋中却遇到了较多的技术问题. 其中之一是如何将磁场传感器运抵海底实施测量. 为抵御海水的侵蚀和抗衡海下的环境压力, 需要研发装载磁场传感器的密封舱. 该舱体需满足测磁的技术要求, 即制造材料的非磁性, 且兼顾海洋作业设备轻便的特点. LC4超硬铝合金在可选的材料中性价比居高, 然而用它制成的高压密封舱并非十分完美. 因它的弱磁性, 使得磁场传感器装入舱体后, 整体频率响应发生了部分变异. 这种变异虽不影响磁场传感器的使用, 但要对其规律特征予以测定, 方能剔除由此产生的对磁场测量的不良影响. 在所构思的实验装置中, 通过人为产生扫频磁场, 对密封和非密封条件下的磁场传感器进行激励. 在响应输出端, 测取幅频特性和相频特性, 获得归一化的对比资料和频响异常曲线, 从而对密封前后磁场传感器的性能变化有较清楚的认识. 实验结果揭示, 由高压密封舱引起的频响变异发生在中高频区段. 实验数据可作为标定资料, 对海底大地电磁探测的实测信号进行校正后, 即可还原出真实的海底场源信息.

关键词: 海底大地电磁; 磁场传感器; 高压密封舱; 频率响应; 实验测试.

中图分类号: P631.3

文章编号: 1000-2383(2007)04-0453-08

收稿日期: 2007-04-12

Experimental Verification and Research for the Distortion in the Integrated Frequency Responses of the Sealed Pressure Case and Magnetic Field Sensor

DENG Ming^{1,2}, WEI Wen-bo^{1,2}, JIN Sheng^{1,2}, YE Gao-feng^{1,2},
ZHANG Qi-sheng^{1,2}, JING Jian-en^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; Geodetection Laboratory of the Ministry of Education, Beijing 100083, China

2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Although the magnetotelluric sounding method applied to land is mature, many technical problems arise when they are transplanted into the seafloor environment, one of which is how to put magnetic field sensors down to the seafloor to complete measurements. To protect magnetic field sensors from intense erosion and high pressure, suitable sealed pressure cases must be designed. Considering the magnetic measurement and seafloor operation, the sealed pressure case should be nonmagnetic and transportable. Among all optional materials, LC4 super-hard aluminum alloy has the highest performance to price ratio. However, it doesn't mean that the sealed pressure case made by LC4 will be perfect in performance. In fact, because of its weak magnetism, the pressure case made by LC4 has distorting effect on frequency responses of the magnetic field sensors sealed in it. This distorting effect doesn't affect the use of the magnetic field sensor, but if we want to eliminate its impact, we should study it through experimental measurements. In our experimental tests, we used frequency swept magnetic field as excitation signal, and then measured responses of the magnetic field sensor before and after being loaded in-

基金项目: “十·五”国家 863 计划课题(No. 2002AA615020); “十一·五”国家 863 计划重大项目课题(No. 2006AA09A201); 北京市重点学科“地球探测与信息技术(No. XK104910598)”资助.

作者简介: 邓明(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋电磁探测技术与仪器的研发. E-mail: dengming@cugb.edu.cn

to the sealed pressure case. Ultimately, we obtained normalized abnormal curves for the frequency responses, through which we could reveal how the sealed pressure case impacts the responses of the magnetic field sensor. Experiment results suggest that the response distortion induced by the sealed pressure case appears in the mid and high frequency area. Using experiment results as standardized data, the frequency responses collected by seafloor magnetotelluric measurements can be corrected to produce authentic information about the seafloor field source.

Key words: marine magnetotellurics; magnetic field sensor; sealed pressure case; frequency response; experiment test.

0 引言

海底大地电磁探测(Marine MT)已成为当前解决海洋地学问题的高新技术(魏文博等, 2001)。由于对海洋电磁的学术认识以及海底测量的实现难度等原因,这方面的研究步伐曾远滞后于海洋人工地震、海洋重磁等地球物理方法。尽管海洋 MT 的起步较晚,但近几年的发展进程明显加快,并在大洋基础地学研究 and 海底矿产资源调查中发挥出了巨大作用。东南太平洋洋中脊底界非对称壳幔结构的电性成像(Evans *et al.*, 1999)、Okak 海湾的音频大地电磁研究(Jones and Garcia, 2003)、墨西哥湾海区大型油储构造的发现(Key *et al.*, 2006)等学术成果,使得电磁方法在海洋高科技领域占据了重要的席位。正因如此,在 2005 和 2006 年的美国地球物理年会上,海洋电磁均成为了热点话题(Jonny and Mikhail, 2005; Summerfield and Gale, 2005; Peter and Yves, 2006; Dirk *et al.*, 2006)。

既然海洋电磁测量存在着技术难度,那究竟难在哪里?本文要指出的其中一个难点是:探测设备必需被运载至海底进行数据采集,采集完成后又能受控返回海面(邓明等, 2004)。这与上面列举的除电磁以外的其他地球物理方法存在着明显的技术差别。人工地震和重磁等,仅需在海面或船上布设仪器,就可实现信号观测。而电磁方法则不同,由于海水层对电磁信号产生衰减,在海面上不可能观测到来自海底的电磁信息。由此引发的难题是,怎样确保电场和磁场的探测器件在海底能正常地工作。显然,复杂的海底环境构成了技术障碍,表现在:海水的侵蚀、海下巨大的压力以及底流的曳引等。相关实验已证明,每增加 10 m 水深,将增加一个大气压(宋金明, 2000)。倘若处在 1 000 m 水深处,环境压力即为 10.132 5 MPa,这相当于陆上气压的百倍。为跨越上述技术障碍,必需对场源探测器件进行承压密封。但对电场传感器和磁场传感器而言,两者的密封技术完全不同。关于前者,拟另文讨论,而对于磁场传感

器,要解决其抵达海底的问题,实用的办法是将其置入高压密封舱内。需要指出的是,这不是一种一般的密封舱,而是一种具有特殊要求的舱体。特殊性在于:其一,舱体材料的非磁性;其二,材料的强度;还有第三点,就是尺寸大小必须与磁场传感器紧密配合。这样一种舱体,没有现成的产品,需要自主研发。

依据可靠性设计原则(王少萍, 2000),所设计的高压密封舱为圆柱形。考虑到非磁性和强度,选择了 LC4 超硬铝合金作为舱体材料。LC4 的优点是比重轻,比较适合海上作业对设备轻便性的要求。然而,它也有其弊端。由于要获得足够的机械强度,在 LC4 中掺有 Mn、Zn、Cr、Si 等微量元素,这使得它并不是完全非磁性。如何评价其对测量磁场信号的影响程度,有必要开展相关的实验,获取有说服力的科学数据。

1 实验原理

为探讨磁场传感器嵌入密封舱体后对外部磁场的频率响应规律,需构思一套实验装置,用以观察在宽频带范围内,究竟在哪一频段上磁场传感器与密封舱体出现了综合的频响异常。这是一种对比实验,对比的方式是:在同一频率信号的激励下,分别测量磁场传感器在密封和非密封条件下各自的幅频响应和相频响应,尔后对实测资料进行整理归纳,从中提取出有价值的信息。

1.1 实验装置设计

实现上述测量,应满足如下 3 个基本实验条件:

条件 1: 人为产生宽频带的谐变磁场,对密封和非密封的磁场传感器进行扫频激励。这种磁场的矢变方向,应与磁场传感器圆柱体外形的轴心线平行。因为,沿该轴方向,磁场传感器内部缠绕着数万匝感应线圈,当激励信号穿过这些感应线圈时,整个磁场传感器会产生频率响应。上面所提及的自主研制的高压密封舱外形尺寸为 $\Phi 96 \times 1560$ mm,因而,要实现激励,就应设法在这样一个有限空间内,提供量值与频点均可人为自动调节的磁场。

条件 2: 屏蔽外部的背景干扰. 自然条件下, 各种干扰磁场的场源无处不在. 有天然形成的, 如大地电磁场; 也有人工形成的, 如通讯、导航等信号组成的传播磁场. 虽然大地电磁场是课题的研究对象, 但在这一实验里, 它暂时成为了干扰. 被测的磁场传感器灵敏度达 0.3 V/nT . 如果在背景干扰较大的环境下进行实验, 将得不到令人信服的测试数据. 而要屏蔽外部干扰, 就应设法提供一个零磁空间, 将被测的磁场传感器置入该空间内, 从而营造出一种有利的实验环境.

条件 3: 具备高精度的测量手段. 激励场源导入零磁空间后, 磁场传感器就会有输出响应. 对该响应进行观测, 除遵循电子学的测量理论, 还需拥有相关的测量仪器, 且具备分辨率高、自动检测与记录等技术性能. 从实验的专一性考虑, 完全外购测试设备并不现实, 而自主研发部分测试仪器, 更有利于实验的开展.

根据以上的基本实验条件, 所设计的装置如图 1 所示.

为满足条件 1, 专门制作了一个螺线管, 管壁材料为聚丙烯, 外形尺寸为 $\Phi 150 \times 2020 \text{ mm}$. 沿管外壁用铜线绕制螺线圈, 使整个外壁被铜螺线包裹. 当螺线管被接通交变电流时, 根据电磁学的右手螺旋法则, 管内便会形成一个与自身同心轴平行的交变磁场, 其量值大小由通过螺线管的电流值决定. 在实验过程中, 为使磁场传感器始终架设在螺线管的中心线上, 专门加工了一些塑料圆环, 起支撑作用. 圆环的大小与管内的可用空间紧密配合, 使携带和不携带高压密封舱的两种实验条件下, 不同尺寸的塑料圆环都可支撑磁场传感器处在同心轴位置. 为满足条件 2, 在螺线管外, 罩上了 5 层坡莫合金筒. 因其具有良导磁特性, 使大部分外部辐射的磁场沿筒壁旁路, 从而减小了筒内的辐射强度. 经 5 层屏蔽, 在最内层, 即螺线管内, 就形成了一个零磁空间. 事实上, 绝对的零磁空间难以实现, 但上述的措施对于本实验, 可基本满足测试要求. 为满足条件 3, 配备了相应的测量仪器, 其中扫频信号源和数字相位计为外购设备, 属 TD4010 型系列产品. 为配合本实验, 对它们进行了部分改装. 而数字幅度计、计算机控制软件及数据存储接口电路等为自主研发的产品. 测量仪器的技术指标: 扫频信号源的最小频点间隔为 0.0001 Hz ; 数字相位计的精度为 $\pm 0.1^\circ$; 数字幅度计的灵敏度为 $0.6 \mu\text{V}$; 闪存电子盘的存储空间

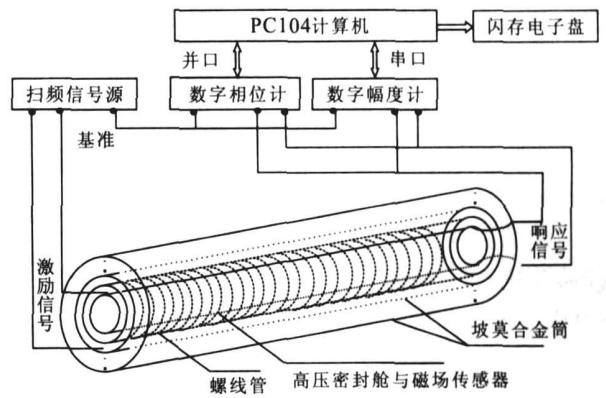


图 1 密封或非密封条件下磁场传感器在零磁空间内的频响实验原理图

Fig. 1 The experimental diagram for frequency response of magnetic field sensor in pressurized or no pressurized zero-magnetic volume

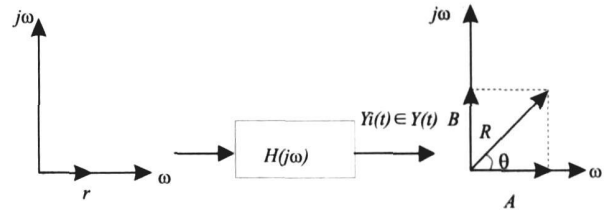


图 2 系统频率响应测量示意图

Fig. 2 The diagram of measuring system frequency response

为 1G . PC104 计算机通过并口和串口分别与数字相位计和数字幅度计进行通讯, 实现测量的全程控制及数据存储. 所有实验条件具备后, 测量便可正式展开.

1.2 系统频率响应的相关滤波测量方法

被测对象可看作为一个系统(郑君里等, 2000), 该系统的传递函数为 $H(j\omega)$. 在频率域内, $H(j\omega)$ 对应于不同的频点 $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表现出系统的特性. 为考察系统在某一带宽内的频响规律, 可逐频点地将 ω_i 通过被测系统. 而在系统的输出端, 观测其响应信号, 从而获得系统整体的频率特性. 图 2 是这种测量方法的图示说明.

对照图 2, $X_i(t)$ 为激励信号, 当改变激励频率时, 对应着就有 $X_1(t)X_2(t), \dots, X_n(t)$ 等. 而在输出端, 希望提取到对应当前激励频点的 $Y_i(t)$. 通常情况下, $Y_i(t)$ 并非容易获得. 系统的输出信号中, 包含了部分噪声. 虽然来自外部的噪声已在实验装置设计中设法避免, 但来自系统本身的噪声和信号源的噪声自然会带到输出端, 应在测量技术中将其去除. 从图 2 还可清楚看出, 激励信号是没有相移的信号,

其相角为零、幅值为 r 。通过系统后, 由于系统自身的特性, 不但使得输出信号幅值发生了变化, 相角也出现了偏移。测量的目的就是要去识别幅值 R (其对应的虚分量为 B 和 A) 和相角 θ 随不同激励频点的变化趋势。

为准确观测 $Y_i(t)$, 在测量仪器内部, 采用了相关滤波技术(程佩青, 1995)。图 2 示意, 有用信号 $Y_i(t)$ 存在于包含噪声 $N(t)$ 的输出信号 $Y(t)$ 中。因而 $Y(t)$ 的表达式为:

$$Y(t) = Y_i(t) + N(t) = A_i \cos \omega_i t + jB_i \sin \omega_i t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \omega_n t + jB_n \sin \omega_n t \quad (i \neq n), \quad (1)$$

(1)式表示的物理意义为, 输出信号中出现了与激励频率 ω_i 不同的其他谐波成分, 这些谐波均为干扰噪声。采用相关滤波方法, 可将噪声滤除。

为实施滤波, 对 $Y(t)$ 的实部, 乘以 $\cos \omega_i t$ 并在一个信号周期内积分, 即

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \text{Re}[Y(t)] \cdot \cos \omega_i t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} [A_i \cos \omega_i t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \omega_n t] \cos \omega_i t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} A_i \cos^2 \omega_i t dt = A_i, \quad (2)$$

以上算式中利用了

$$\int_0^{2\pi} \cos \omega_i t \cdot \cos \omega_n t dt = 0 \quad (i \neq n), \quad (3)$$

同理, 对 $Y(t)$ 的虚部, 乘以 $\sin \omega_i t$, 以同样的算法, 得到的结果为 B_i 。

采用了相关滤波之后, 可提取出各频点激励下系统输出的实部和虚部的幅频响应 A_i 和 B_i , 并通过

$$\theta_i = \text{tg}^{-1} \frac{B_i}{A_i}, \quad (4)$$

得到各频点的相位响应。

可见测量仪器的硬件结构由扫频信号发生器、加法器、乘法器、积分器、主控计算机以及存储介质等单元电路组成。实际测量过程已实现全智能化。还应指出, 上述数理推导中, 一个积分周期就可滤除全部噪声, 这仅是理论观点。但从工程效果看, 需多个积分周期方能达到较好的压制噪声的目的。

2 过程及结果

扫频测量的高频点从 900 Hz 开始, 至低频点 0.0016 Hz 结束, 频带宽度约跨 6 个数量级。这一频带是海洋电磁探测感兴趣的范围。为了后续在对数

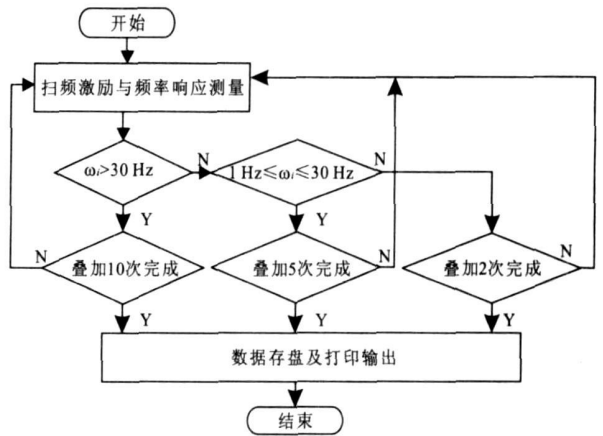


图 3 扫频测量实验过程运行图
Fig. 3 The flow chart of scanning frequency experiment

坐标上绘图方便, 并考虑频点密度分布和频点均匀分布的合理性, 选择频点跳变间隔为 1.08 倍。兼顾测量质量和效率, 在 30 Hz 以上, 选取积分周期为 20, 即进行 10 次叠加运算, 以获得较高的信噪比; 在 1~30 Hz 之间, 进行 5 次叠加; 而在 1 Hz 以下, 只取 2 次叠加。按以上的选择, 进行一次全频段的扫频测量, 完成时间约需 10 h。测量运行过程如图 3 所示。实测数据的例子展示于表 1 和表 2, 该例子对应的扫频激励信号功率为 0.2 V、0.1 mA。

对实测数据进行整理绘图, 分析得到图 4 和图 5, 各反映了幅频响应、相频响应和对比差异的表现规律。应说明, 图 4 和图 5 是对大量实测数据做归一化处理综合得出的, 实测数据来源远远超出了表 1 和表 2, 只是为了简明起见, 仅列它们作为例子展示。

对比磁场传感器有无密封情况的测试结果, 频率特性的差异主要出现在中高频部分。在 200 Hz 附近, 带密封舱的磁场传感器幅度响应比无密封情况降低了 5 dB, 约为 2 倍。这说明, 密封条件下, 磁场传感器在高频区段的灵敏度将有所降低。当频率小于 0.4 Hz 时, 无论是幅频或相频特性, 其产生的偏差都较小。密封舱造成的高频区段灵敏度降低和相位偏差增大等问题会给海底大地电磁信号采集结果带来某些影响。这些影响因素应在后续资料处理中予以考虑。

仔细观察图 4 和图 5 的对比曲线, 还可看到一个细节: 在不太光滑的曲线上出现了若干小锯齿。它们是 50 Hz 工频及其倍频的背景噪声。这一现象至少说明两点事实: 其一, 实验环境的磁场干扰很大。虽采取了屏蔽措施, 仍未能把干扰完全排除, 但对于本

表1 密封条件下磁场传感器的幅频和相频响应测试数据

Table1 The measuring data of amplitude & phase frequency response to pressurized magnetic field sensor

频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 (°)	频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 (°)	频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 (°)
900.0	0.011	44.9	10.330	0.780	338.2	0.1259	0.856	39.6
833.2	0.013	59.7	9.566	0.785	339.4	0.1166	0.807	43.0
771.5	0.017	69.4	8.857	0.803	339.7	0.1080	0.777	45.6
714.3	0.022	82.2	8.200	0.798	339.9	0.1000	0.743	47.5
661.3	0.026	92.1	7.592	0.809	341.6	0.09258	0.712	49.7
612.3	0.032	104.4	7.030	0.817	341.0	0.08572	0.679	51.4
566.9	0.037	118.5	6.508	0.834	341.2	0.07937	0.645	53.8
524.9	0.044	128.6	6.026	0.842	342.1	0.07348	0.613	56.3
486.0	0.050	139.0	5.579	0.858	342.4	0.06803	0.579	58.2
450.0	0.057	149.9	5.166	0.869	342.9	0.06299	0.547	60.2
416.6	0.066	159.6	4.783	0.884	343.3	0.05832	0.514	61.9
385.7	0.073	168.2	4.428	0.896	343.7	0.05400	0.486	64.2
357.1	0.082	176.5	4.100	0.911	344.9	0.05000	0.453	65.6
330.6	0.090	183.7	3.796	0.924	344.9	0.04629	0.425	67.0
306.1	0.102	191.2	3.515	0.939	345.6	0.04286	0.399	68.5
283.4	0.109	198.5	3.254	0.957	346.1	0.03968	0.373	70.2
262.4	0.121	205.9	3.013	0.970	346.8	0.03674	0.336	73.6
243.0	0.133	211.5	2.789	0.983	347.5	0.03401	0.323	72.7
225.0	0.157	223.4	2.583	1.001	348.2	0.03149	0.302	73.9
208.3	0.157	223.4	2.391	0.990	349.0	0.02916	0.280	75.6
192.8	0.171	229.7	2.214	1.020	349.4	0.02700	0.260	76.7
178.5	0.183	234.3	2.050	1.020	351.0	0.02500	0.244	77.0
165.3	0.200	238.4	1.898	1.030	352.2	0.02314	0.226	78.0
153.0	0.214	243.3	1.757	1.030	352.8	0.02143	0.209	79.2
141.7	0.234	248.2	1.627	1.050	354.0	0.01984	0.195	79.9
131.2	0.251	252.4	1.506	1.060	354.6	0.01837	0.197	80.7
121.5	0.270	256.0	1.394	1.060	355.7	0.01700	0.167	80.7
112.5	0.291	260.3	1.291	1.070	356.7	0.01574	0.155	82.2
104.1	0.312	264.3	1.195	1.070	357.8	0.01458	0.144	82.8
96.44	0.335	267.9	1.107	1.080	358.4	0.01350	0.133	83.1
89.29	0.349	271.1	1.025	1.090	359.4	0.01250	0.123	83.9
82.67	0.375	275.3	0.9491	1.080	0.0	0.01157	0.114	84.0
76.54	0.401	277.5	0.8787	1.090	1.0	0.01071	0.105	85.1
70.87	0.423	282.3	0.8136	1.090	2.0	0.00921	0.098	85.3
65.61	0.434	285.7	0.7533	1.090	3.0	0.009185	0.091	85.6
60.75	0.454	289.2	0.6974	1.090	4.1	0.008504	0.084	85.9
56.25	0.498	292.7	0.6457	1.090	5.2	0.007874	0.077	86.3
52.08	0.486	293.2	0.5979	1.080	6.3	0.007290	0.072	86.8
48.22	0.588	293.2	0.5535	1.080	7.3	0.006750	0.067	87.4
44.64	0.571	302.3	0.5125	1.080	8.9	0.006250	0.054	90.0
41.33	0.579	304.9	0.4745	1.080	10.5	0.005786	0.057	87.0
38.27	0.596	308.2	0.4393	1.080	10.5	0.005357	0.053	87.8
35.43	0.615	311.0	0.4068	1.070	12.3	0.00496	0.049	87.7
32.80	0.626	313.4	0.3766	1.070	13.4	0.004592	0.045	87.4
30.37	0.639	316.6	0.3487	1.050	15.3	0.004252	0.042	88.6
28.12	0.662	318.6	0.3228	1.040	16.6	0.003937	0.039	88.5
26.04	0.672	320.9	0.2989	1.040	18.3	0.003645	0.036	88.4
24.11	0.684	323.2	0.2767	1.030	19.8	0.003375	0.034	90.0
22.32	0.700	325.5	0.2562	1.020	21.7	0.003125	0.031	88.1
20.66	0.707	326.8	0.2372	1.013	23.7	0.002893	0.028	90.0
19.13	0.717	328.7	0.2196	0.980	25.7	0.002678	0.026	90.0
17.71	0.725	330.4	0.2034	0.970	27.6	0.002480	0.024	90.0
16.40	0.733	331.8	0.2000	0.977	27.9	0.002296	0.023	90.0
15.18	0.742	333.1	0.1851	0.961	30.0	0.002126	0.021	90.0
14.06	0.747	334.4	0.1714	0.938	31.8	0.001968	0.019	90.0
13.01	0.756	335.5	0.1587	0.815	34.2	0.001812	0.018	90.0
12.05	0.765	336.4	0.1469	0.884	36.3	0.001687	0.016	90.0
11.15	0.771	337.4	0.1360	0.867	38.3			

表 2 非密封条件下磁场传感器的幅频和相频响应测试数据

Table 2 The measuring data of amplitude & phase frequency response to no pressurized magnetic field sensor

频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 (°)	频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 (°)	频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 (°)
900.0	0.599	184.5	10.330	1.39	358.8	0.125 90	0.92	48.0
833.2	0.641	194.9	9.566	1.38	357.9	0.116 60	0.88	50.0
771.5	0.72	204.9	8.857	1.39	360.0	0.108 00	0.84	52.7
714.3	0.79	215.2	8.200	1.39	359.2	0.100 00	0.80	54.1
661.3	0.87	224.5	7.592	1.42	359.6	0.092 580	0.750	56.3
612.3	0.94	234.4	7.030	1.38	359.6	0.085 720	0.726	58.6
566.9	1.01	243.7	6.508	1.39	359.2	0.079 370	0.687	60.3
524.9	1.08	252.2	6.026	1.40	360.0	0.073 480	0.646	62.2
486.0	1.12	260.3	5.579	1.39	0.0	0.068 030	0.607	64.1
450.0	1.16	268.5	5.166	1.38	0.4	0.062 990	0.572	65.7
416.6	1.19	274.4	4.783	1.40	0.4	0.058 320	0.535	67.3
385.7	1.22	281.7	4.428	1.38	0.8	0.054 00	0.501	68.7
357.1	1.25	287.1	4.100	1.39	1.2	0.050 00	0.468	70.4
330.6	1.27	293.0	3.796	1.40	1.2	0.046 290	0.432	71.6
306.1	1.28	297.9	3.515	1.40	1.2	0.042 860	0.408	72.9
283.4	1.30	303.0	3.254	1.40	1.2	0.039 680	0.379	74.2
262.4	1.31	307.5	3.013	1.40	1.6	0.036 740	0.352	75.3
243.0	1.32	311.5	2.789	1.39	2.0	0.034 010	0.329	76.3
225.0	1.31	314.3	2.583	1.40	2.4	0.031 490	0.304	77.1
208.3	1.34	318.0	2.391	1.39	2.4	0.029 160	0.273	74.7
192.8	1.33	322.0	2.214	1.39	2.8	0.027 00	0.264	78.8
178.5	1.32	325.1	2.050	1.30	3.0	0.025 00	0.245	79.6
165.3	1.34	326.6	1.898	1.38	3.7	0.023 140	0.225	80.8
153.0	1.36	330.0	1.757	1.38	4.1	0.021 430	0.209	81.2
141.7	1.34	331.5	1.627	1.39	4.4	0.019 840	0.194	81.7
131.2	1.35	334.2	1.506	1.39	4.9	0.018 370	0.180	82.3
121.5	1.37	335.8	1.394	1.38	5.3	0.017 00	0.167	83.1
112.5	1.36	337.6	1.291	1.39	6.1	0.015 740	0.156	83.4
104.1	1.37	339.0	1.195	1.38	6.5	0.014 580	0.143	84.0
96.44	1.36	341.2	1.107	1.38	7.0	0.013 50	0.134	84.0
89.29	1.37	343.0	1.025	1.38	7.4	0.012 50	0.123	84.4
82.67	1.37	343.5	0.949 10	1.37	7.9	0.011 570	0.114	85.5
76.54	1.39	345.1	0.878 70	1.37	8.7	0.010 710	0.107	85.7
70.87	1.36	346.0	0.813 60	1.37	9.5	0.009 210	0.098	85.9
65.61	1.40	346.4	0.753 30	1.36	10.5	0.009 185	0.091	86.2
60.75	1.37	346.5	0.697 40	1.36	11.3	0.008 504	0.084	86.6
56.25	1.39	347.9	0.645 70	1.36	12.2	0.007 874	0.077	87.0
52.08	1.35	357.4	0.597 90	1.35	13.1	0.007 290	0.072	86.8
48.22	1.51	357.7	0.553 50	1.34	14.2	0.006 750	0.067	87.4
44.64	1.42	351.5	0.512 50	1.33	15.1	0.006 250	0.062	87.2
41.33	1.38	351.2	0.474 50	1.34	16.3	0.005 786	0.057	87.9
38.27	1.37	352.9	0.439 30	1.32	17.5	0.005 357	0.052	87.8
35.43	1.40	353.5	0.406 80	1.31	19.0	0.004 960	0.049	88.8
32.80	1.38	353.8	0.376 6	1.30	20.2	0.004 592	0.045	88.7
30.37	1.39	353.8	0.348 7	1.28	21.9	0.004 252	0.043	90.0
28.12	1.36	354.9	0.322 8	1.27	23.5	0.003 937	0.039	88.5
26.04	1.37	355.0	0.298 9	1.25	24.9	0.003 645	0.036	88.4
24.11	1.39	355.9	0.276 7	1.23	26.9	0.003 375	0.036	85.2
22.32	1.39	355.9	0.256 2	1.21	28.4	0.003 125	0.030	88.1
20.66	1.38	355.8	0.237 2	1.19	30.5	0.002 893	0.028	90.0
19.13	1.40	356.7	0.219 6	1.17	32.4	0.002 678	0.026	90.0
17.71	1.39	357.1	0.203 4	1.14	34.6	0.002 480	0.024	90.0
16.40	1.39	357.1	0.200 0	1.13	34.9	0.002 296	0.022	90.0
15.18	1.39	357.9	0.185 1	1.10	37.2	0.002 126	0.021	90.0
14.06	1.40	357.9	0.171 4	1.07	39.3	0.001 968	0.019	90.0
13.01	1.39	358.4	0.158 70	1.04	41.4	0.001 812	0.018	90.0
12.05	1.38	358.4	0.146 90	0.99	43.7	0.001 687	0.016	90.0
11.15	1.39	358.4	0.136 00	0.96	45.8			

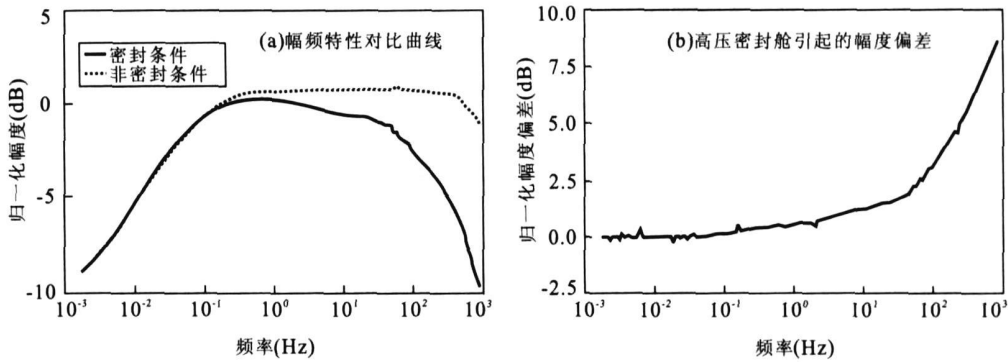


图4 幅频响应及其异常分析曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency response and bias analysis curve

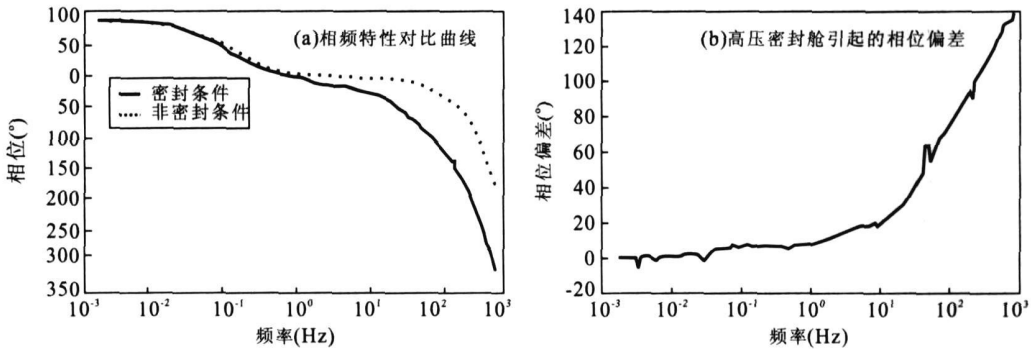


图5 相频响应及其异常分析曲线

Fig. 5 Phase-frequency response and bias analysis curve

实验的结论,这一问题已不显得重要;其二,被测的磁场传感器灵敏度高.很小的信号变化它都能捕捉到,正是依靠这种先进的磁场传感器件,使中国的海底大地电磁探测在近年成为了现实.

3 结论与建议

(1) 高压密封舱为抵达海底进行大地电磁探测的磁场传感器提供了安全的工作空间.但由于制造材料的弱磁性,当舱体内部嵌入了磁场传感器后,整个测量系统外部物理性能产生了变异.为研究其规律,需开展有针对性的实验.

(2) 实验内容主要探讨磁场传感器在密封和非密封两种情况下幅频与相频的响应特性.而要使实验顺利开展,则必需营造良好的实验氛围和提供精确的测试手段.为此,在所构思的实验方案中,包括了人工激励磁场的建立、干扰背景场源的排除以及信号观测技术的实现.

(3) 实验结果显示,高压密封舱与磁场传感器的综合频响变异从中频段开始,随频率升高,两组曲线

的分离趋势增大.究其原因,是当中频以上的磁场信号通过舱体时,稀量元素的导磁性开始显露,致使部分有用信号沿舱体外壁旁路.且频率越高,这种趋肤效应的表现越明显,有用信号的损失成分也随之增加.

(4) 海底大地电磁探测所反映的深度与被测信号的频率有关(魏文博等, 2006). 频率从高往低顺序揭示海底岩石介质从浅至深的电性变化. 实验结果为海底大地电磁的数据处理提供了对磁场信号标定的依据. 从对比曲线所反映的规律可认为, 当处理海底深部岩层的电性信息时, 可不用考虑高压密封舱的影响. 而当处理浅部信息时, 应参考本实验的测试数据. 以便对资料解释做适当的校正.

(5) 我国的海底大地电磁探测已有了良好的开端(邓明等, 2006), 但它毕竟还仅属于天然场源的探测. 其精度对探测天然气水合物等浅薄构造, 还未能达到完善的程度. 为克服海水层对高频信号的屏蔽影响, 且提高宽频信号采集的信噪比, 实现从浅部到深部、从大构造到精细构造的高精度探测, 必须打开海洋电磁的另一扇技术大门——可控源海洋电磁探测, 即在海底设立大功率的人工电磁场源, 将宽频电

磁激发场导入海底, 测取被激发介质的电磁响应, 从而获得海底介质的精细电磁成像. 从方法原理看, 人工场源将补充天然场源在高频区段所缺损的信息. 这方面的研究已获得“十一·五”国家 863 计划的资助. 因而, 本实验的科学意义更在于对今后开展可控源海洋电磁探测提供了评价磁场测量结果的实验基础.

References

- Cheng, P. Q., 1995. Digital signals process tutorial. Tsinghua University Press, Beijing, 246—251(in Chinese).
- Deng, M., Du, G., Zhang, Q. S., et al., 2004. The characteristic and prospecting technology of the marine magnetotelluric field. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 25(6): 742—746 (in Chinese with English abstract).
- Deng, M., Liu, F. L., Zhang, Q. S., et al., 2006. Long span and multi-point synchronizing data acquisition for seafloor magnetotelluric based on union of marine and land. *Science & Technology Review*, 24(10): 28—32(in Chinese with English abstract).
- Dirk, S., Saad, S., John, V., et al., 2006. Recent controlled source EM results show positive impact on exploration at shell. SEG/ New Orleans 2006 Annual Meeting 3536—3541.
- Evans R. L., Tarits P., Chave, A. D., et al., 1999. Asymmetric electrical structure in the mantle beneath the East Pacific Rise at 17°S. *Science*, 286: 752—756.
- Jones, A. G., Garcia, X., 2003. Okak Bay AMT data-set case study: Lessons in dimensionality and scale. *J. Geophys.*, 68(1): 70—91.
- Jonny, H., Mikhail, B., 2005. The offshore EM challenge. SEG/ Houston 2005 Annual Meeting, 59—66.
- Key, K. W., Constable, S. C., Weiss, C. J., 2006. Mapping 3D salt using the 2D marine magnetotelluric method: Case study from Gemini Prospect, Gulf of Mexico. *Geophysics*, 71: 17—27.
- Peter, W., Yves, L., 2006. MultiLoop III—A significant step ahead in electromagnetic modelling. SEG/ New Orleans 2006 Annual Meeting, 3571—3578.
- Song, J. M., 2000. The technology of marine developing.

Shandong Science & Technology Press, Jinan, 13—14 (in Chinese).

- Summerfield, P. J., Gale, L. S., 2005. Marine CSEM acquisition challenges. SEG/ Houston 2005 Annual Meeting, 538—542.
- Wang, S. P., 2000. Engineering reliability. Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, Beijing, 51—52 (in Chinese).
- Wei, W. B., Deng, M., Tan, H. D., et al., 2001. Development of marine magnetotelluric prospecting technique in China. *Seismology and Geology*, 23(2): 131—137 (in Chinese with English abstract).
- Wei, W. B., Jin, S., Ye, G. F., et al., 2006. Features of the faults in Center and North Tibetan plateau: Based on the results of INDEPTH (III)-MT. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 257—265.
- Zheng, J. L., Ying, Q. H., Yang, W. L., 2000. Signals & systems(first volume). Higher Education Press, Beijing, 29—37(in Chinese).

附中文参考文献

- 程佩青, 1995. 数字信号处理教程. 北京: 清华大学出版社, 246—251.
- 邓明, 杜刚, 张启升, 等, 2004. 海洋大地电磁场的特征与测量技术. 仪器仪表学报, 25(6): 742—746.
- 邓明, 刘方兰, 张启升, 等, 2006. 海陆联合大跨度多点位海底大地电磁同步数据采集. 科技导报, 24(10): 28—32.
- 宋金明, 2000. 海洋开发技术. 济南: 山东科学技术出版社, 13—14.
- 王少萍, 2000. 工程可靠性. 北京: 北京航空航天大学出版社, 51—52.
- 魏文博, 邓明, 谭捍东, 等, 2001. 我国海底大地电磁探测技术研究的进展. 地震地质, 23(2): 131—137.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等, 2006. 西藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH(III)—MT 观测提供的依据. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 257—265.
- 郑君里, 应启珩, 杨为理, 2000. 信号与系统(上册). 北京: 高等教育出版社, 29—37.