

海陆电磁噪声与淮海大地 电磁测深研究

李桐林 林 君 王东坡 著
刘福春 曾孝箴

(北京)

3

地质出版社

目 录

绪论	(1)
第一章 滩海阵列大地电磁测深仪及其在 50 万 V 超高压输电线产生的电磁噪声研究中的应用	(9)
§ 1.1 海洋 MT 的仪器	(9)
§ 1.2 超高压输电线所产生的电磁场的测量	(14)
§ 1.3 超高压输电线所产生的电磁场的规律分析	(16)
§ 1.4 50 万 V 高压输电线电磁场理论规律研究	(37)
§ 1.5 小结	(44)
第二章 海洋的电磁效应	(45)
§ 2.1 高导海水对电磁场的吸收	(45)
§ 2.2 运动海水产生的电磁场	(47)
§ 2.3 海岸效应	(64)
§ 2.4 结论	(65)
第三章 滩海大地电磁测深的理论和技术及数据处理	(66)
§ 3.1 海洋大地电磁测深的原理	(66)
§ 3.2 滩海 MT 的海上作业方法	(70)
§ 3.3 海洋 MT 的数据处理与解释方法	(71)
§ 3.4 大地电磁测深资料的解释方法	(77)
§ 3.5 小结	(78)
第四章 辽河滩海大地电磁测深地质解释	(79)
§ 4.1 研究区概况	(79)
§ 4.2 辽河滩海大地电磁测深地质解释	(82)
结束语	(93)
英文摘要	(95)
参考文献	(97)

绪 论

地球表面的四分之三被海洋覆盖。在海洋,尽管石油只产于相对浅的陆架区,但其储量却是十分巨大的,对于固体矿产除锰结核、富含金属的卤水外,人们一度认为海底是贫瘠的,然而最近人们发现洋中脊的热液活动的规模和多金属硫化矿床的丰度是十分可观的。一些方法可以定位这些硫化物矿床,却不能用于判定它们的延伸和储存其地质体的性质,海底电磁法填图是适用于这一目的的很少方法之一。

在海洋寻找石油过程中,地震勘探的作用是不言而喻的,但在某些时候该方法却受到了一些限制,如遇到碳酸岩礁、火山岩盖等散射体时。海洋电磁法可以成为一种补充的技术方法应用于这些地区。

我国是一个海洋大国,海岸线长达 18000 km,渤海、黄海、东海和南海的总面积相当于我国陆地面积的三分之一。辽阔的海域下埋藏着丰富的固体矿产和油气资源。随着陆上资源的日趋枯竭,开发和利用海洋资源对我国国民经济的发展具有深远的意义。另外,由于我国的 4 大海域地处太平洋西侧的边缘海,为维护海洋国土权益,确定对海洋专属经济区的划分等,均迫切需要先进的海底勘探方法与技术手段。正如宋瑞祥部长在 1997 年末召开的全国海洋地质科技工作会议上所作报告中指出的那样:“今后一个时期内,海洋地质工作的指导思想是坚持以国家权益、矿产资源、地质环境为中心,近海与远洋并举,以近海为主,积极开拓新矿种和后备矿产资源基地的调查与评价,尽快提高我国管辖海域的地质调查程度,提高我国海洋地质工作的研究水平,不断扩大国际合作,在维护国家主权权益,提供可利用矿产资源、保护海洋环境、推动地球科学发展方面发挥重要作用”。

目前我国用于海洋地质研究的物探方法,主要有高精度航磁测量、声波探测技术、海洋油气地震探测技术、高精度重磁探测技术。这些技术已经在海洋地质调查中发挥了重要作用,但是与陆地上的勘探方法一样,在海域盆地中火山岩分布广泛的地区,地震勘探的效果受到了一定的限制,重磁勘探体积效应严重,纵向分层能力有限,而大地电磁测深(MT)方法是对上述物探方法的有效补充。陆上 MT 资源勘探已成为一项成熟的技术,无论是在深部地质与区域地质调查,还是油气勘探中,都取得了显著成效。由于 MT 法是利用频谱丰富、能量巨大的天然场源,具有很大的探测深度,且成本低,对环境无污染,若将该方法用于海洋地质勘探,将是一种快速有效的探测手段,另外,由于地球物理方法内在的多解性,也需要用基于不同物性参数的方法互相补充,相互约束,提高解释的可靠性。原地质矿产部已把海底大地电磁测深列入地质矿产部海洋地质工作“九五”计划和 2000 年至 2010 年规划。国家“863”计划也将海洋大地电磁测深列入海洋高科技发展之列。

在陆上,电磁法能够较好地给出地球内部电性结构的信息,是一种较为成熟和有用的地球探测方法,但该方法从前却很少被用于海上。主要有两种原因,其一,地震勘探能成功地描述海底地质结构;其二,人们普遍对高导海水不利于电磁法应用的想法深信无疑,然而,近年来随着仪器和海洋地质学的发展,海洋电磁法取得了实质性的进步,目前已发展的方法有海

海底大地电磁测深、直流电阻率法、磁电阻率法、自然电位法和时域频域可控源法,其中的海洋大地电磁测深法是目前较为成熟的方法。

在原理上,海洋大地电磁测深同陆地大地电磁测深相同。由于海洋环境的特殊性,使海洋大地电磁测深也具有其自身的特点,主要表现在海洋的电磁噪音、仪器及装置和解决地质问题的能力方面。海洋环境的特殊性表现在如下几个方面:①海底上覆盖着一层高导电液体——海水,它的电导率约为 $3\sim 5\text{ S/m}$,同下伏的地壳有较大的差别,海水最深处达 11 km ;②海水是流动的导电介质,且其流动规律非常复杂;③海底与陆地地壳的地质结构不同;④海水具有动能;⑤海底的压力高;⑥无特殊设备,不易接近海底;⑦海面气候条件较恶劣。其中环境特殊性①导致了海底高频信号的衰减,对仪器的分辨率提出更高的要求,降低了解决浅部地质问题的分辨率;环境特殊性②导致运动的海水同地球磁场的作用产生海洋内部成因的干扰电磁场;环境特殊性③与①共同决定了大地电磁测深响应函数的各向异性(海岸效应),使资料的解释更加复杂;环境特殊性①④⑤⑥对仪器的密封、承压、定位、调平、供电、海上仪器投放和回收作业等都提出了严格的要求,因此海洋大地电磁测深是一项集海洋物理、高精度弱磁弱电测量技术、传感器技术、无线电技术、声学定位技术、仪器仪表制造技术于一体的综合的高新探测技术。

20世纪60年代,国际上一些著名的地球物理学家和海洋地质学家就开始了海洋电磁场理论与仪器研制,并开始在海上实验。Filloux, J. H. (1973)、Bennett, B. R. 和 Filloux, J. H. (1975)、Filloux, J. H. (1980)、Chave, A. D.、Alan, D. 和 Filloux, J. H. (1984)、Law, L. K. (1984)对各时期的海洋MT法的进展进行了及时的总结。到1984年已进行了包括MODE实验(Mid Ocean Dynamic Experiment 1973)的海洋MT法十多项研究。1984年开始了著名的岩石圈和软流圈电磁研究,该项工作在海洋大地电磁学理论、仪器、海洋电磁噪音和海洋MT法的应用等方面都取得了重大的进展,标志着海洋MT法技术已日趋成熟。

一、海洋MT法的理论进展

对于近场源及远场源在导电介质中产生的电磁场相关的理论,Ward, S. H. 和 Hohmann, G. (1988)给出了很好的综述。从计算的角度及反映物理实质的角度来看,人们都选用了一维模型。由一维导电介质产生的电磁场可以分解成两个独立的涡旋场(TM和PM模式)。TM模式同包含垂直轴方向的电流有关,不产生垂直的磁场分量,而PM模式是由水平方向的电流产生的,不产生垂直方向电场分量。TM模式和PM模式对电性结构的灵敏度不同,TM模式受高层层的影响较大,不能充分穿透高层层,而PM模式由于感应对这种结构并不敏感。海洋MT法主要利用这两种模式来讨论流动海水产生的电磁场噪声规律。

二、仪器进展

海底MT法的仪器研制与实验始于20世纪70年代,可查到的文献有Cox, C. S. (1971)、Filloux, J. H. (1973, 1974, 1980)、Segawa, J. et al. (1982)、Wess, S. C. et al. (1985)等人的著作,Filloux, J. H. (1987)对仪器装置的进展进行了广泛的综述。目前,对海底电场和磁场的测量各有两种方式,并且电磁测量采用了分离仪器,仪器装在可承压 $10\sim 100\text{ MPa}$ 的密封容器内。两种磁测量方式分别用悬丝式磁力仪和磁通门磁力仪,两种电场测

量方式分别用盐水电桥和长导线。Filloux, J. H. 测磁使用了其自行研制的悬丝式磁力仪。1979年澳大利亚的 White, A., 1981年加拿大的 Law, L. K. 和 Greenhouse, J. P., 1982年日本的 Segawa, J. 等先后研制出海底磁通门磁力仪, 测量精度达 0.1 nT 。测量海底电场的一种方法是 Woods Hole 海洋研究所 Webb, C. S. 等提出的长导线(200~1000m)法, 电极之间较大的距离增强了信号强度, 从而提高了信噪比, 但该方法施工困难, 方位及距离较难控制。由 Filloux, J. H. 设计的海底电场测量装置——盐水电桥, 只有几米长, 有效地抑制了电极与海水作用产生的噪声, 但盐桥只适合测量频率小于 0.01 Hz 的低频海底电场, 因为在高频段盐桥的约瑟芬(Johnson)噪声相当严重。海底电极采用稳定的银-氯化银不极化电极。EMSLAB 研究中使用的是经过改进的磁通门磁力仪和盐水电桥装置, 其性能有了较大提高。现在, 国际上具有海洋大地电磁探测能力的国家和较著名的机构有美国加州大学的伯克利分校、美国的 Scripps 海洋研究院和 Woods Hole 海洋研究院(Institute)、加拿大多伦多大学、日本东京大学的海洋研究所和海洋科学技术中心、法国的国家科学研究中心以及澳大利亚的 Flinders 大学等。国外尚没有商业化的海洋大地电磁测深仪产品。

三、海洋的电磁效应

海洋的电磁效应主要有三种。一是其对外源电磁场的趋肤效应, 特别是对高频电磁场的衰减; 二是流动海水产生的电磁噪音; 三是海水及海陆地壳的电性结构差异形成的“海岸效应”。

1. 趋肤效应

海底被海水覆盖着。海水的电导率约为 5 S/m , 当海底的沉积物中包含水时, 其电导率约为 $0.1 \sim 1 \text{ S/m}$ 。在大陆架区, 该值随着固结成岩作用的加强(孔隙度降低)而减小。大陆架深部的电导与陆壳的电导相同。深海的沉积物很少超过几百米, 下伏着基性岩壳和橄榄岩地幔, 它们的电导率由上面的 0.1 S/m 到地下 10 km 的 0.0001 S/m 。

高导海水对电离层和磁层产生的电磁场作用很像一个低通滤波器。大于 1 Hz 的海底电磁场很弱。海水的滤波效应可以通过一个较简单的模型刻画。考虑一个厚度为 H 、电导率为 σ_0 的一层海水, 覆盖在地球模型之上, 其上为绝缘空气层。固有频率为 ω 在海面上很远的垂直磁偶极源产生的入射电磁波, 在海面上可看成是平面波。Chave, A. L. 和 Filloux, J. H. (1984) 给出了海底对海面的水平电场和磁场的表达式。理论研究表明, 海底对海面的水平电场的比值对其下的电导率变化不敏感, 并且只有当 $\gamma_0 H \gg 1$ 时, 才明显衰减。这里, $\gamma_0 = (i\omega\mu_0\sigma_0)^{1/2}$ 。比较而言, 海底对海面的水平磁场的比值对地壳的电导性很敏感, 并且在较长周期就开始衰减。

2. 流动海水产生的电磁噪音

各种力的作用使海水处于永恒的运动之中。这些力包括: 万有引力和地球自转产生的旋转效应, 它们作用于整个海洋; 热力作用, 比如辐射传输、加热和冷却等, 它们主要发生在海面; 海面风应力和大气压力; 海底的局部热流、火山喷发、地壳的运动等地应力。在这些强迫力的作用下海水发生了运动, 并出现多种多样的波动。波动的时空尺度变化范围很大, 周期从数年到数秒, 波长从数千公里到厘米级。运动的海水同地磁场相互作用产生的洛伦兹力形成了海洋内部成因的干扰电磁场。Cox, C. S., Filloux, J. H. 和 Larsen, J. C. (1971)、Sanford, T. B. (1971)、Larsen, J. C. (1973)、Filloux, J. H. (1980)、Chave, A. L. (1983)、Chave,

A. L. 和 Filloux, J. H. (1984), Chave, A. L. 和 Filloux J. C. (1985), Lilley, F. E. M. (1986), Chave, A. L. (1989), Luther, D. S. et al. (1987, 1990) 等对海水运动成因的电磁场进行了专门研究。

对于长周期(大于 1 小时)的深海海底电磁场, 3~5 天的长周期对应中等尺度的涡流活动和一背景正压流(速度与深度无关), 它们产生很大的海底电流和适度的海底磁场, 这一现象在大洋盆地的西侧表现得非常明显, 另外, 洋潮也产生可观的电磁场。因此, 周期大于几天的外部电磁场信号不能用于地球结构的研究。随处可见的海洋内波(斜压流, 流速与深度有关)将产生 1~4 h 周期的磁场, 该磁场取决于地磁场的活动和纬度。

对深海的正压流, Pedlosky, J. (1979) 给出了长波正压流的动力学方程。Larsen, J. C. (1971), Chave, A. D. 和 Filloux, J. H. (1984) 给出了其产生电磁场的描述与模拟。在简化的海洋模型假设条件下, 即: ①流速场水平尺度较海水深度大, 且为正压流; ②垂向速度较水平分量要小; ③海水的自感不大; ④地磁场简化成地心磁偶极。理论推导表明, PM 模式的源电流同水平速度场和垂直磁场的水平散度有关, 而 TM 模式的源电流同由速度场的旋度和垂直的电流分量有关。这表明 TM 模式的电流源同科里奥利力有关, 且其在与地球自转周期相当的周期范围内起主要作用。在较短周期, 当扰动形成水平速度场的散度时, PM 模式的源将起主要作用。介于如上两种情况之间的周期, PM 模式和 TM 模式对总场的贡献相当。

对深海区, 长周期的水平电场近似解为

$$E_A = CF_z \hat{z} \times \langle V_A \rangle^* + N, \quad (1)$$

这里

$$\langle V_A \rangle^* = \frac{1}{\sigma H} \int_H^0 dz' \sigma(z') V_A(z'),$$

$\langle V_A \rangle^*$ 是电导率加权垂向积分水平速度场, C 是一常数, F_z 是磁场的垂直分量, N 是一近似误差项。从(1)式我们不难发现, 水平电场正比于地磁场垂直分量和垂向电导率加权的速度场。对于垂直电场

$$E_z(z) = [V_A(z) \times F_A] \hat{z}, \quad (2)$$

即垂向电场正比于水平向速度场和水平地磁场。

在北半球, 由(1)和(2)式可以看出, 电场北向分量是东西向速度场的反映。电场的东西向分量是南北向速度场的反映, 垂直电场 E 主要反映东西向流速场。研究表明: 比例系数 C 取决于海底电导率结构并且当海底高阻时接近于 1; 水平电场更具局部性, 通常是海水深度几倍范围内速度场的反映, 并可通过测量电场获得海水的流速场; 磁场则是较大范围速度场的平均, 且不可能通过测量磁场获得海水的流速场。在陆上, 外部成因的电磁场, 电场较磁场更具局部性; 在海底, 流动海水成因的电磁场同样电场较磁场更具局部性。

Garrett, C. 和 Munk, W. H. (1972, 1975) 对海洋的内波的频谱给出了描述, Phillips (1977) 给出了内波的支配方程, Podney, W. (1975) 开始对内波产生的电磁场规律的研究, Chave, A. L. 和 Filloux, J. H. (1984) 进一步研究了内波产生的电磁场, 并指出内波所产生的电磁场在海洋 MT 中必须要认真对待, 另外, 海底电磁场的成因也不限于如上形式的两种海水运动。

在大陆架地区, 由于海底地形复杂, 海水运动更加复杂, 海水运动的能量和复杂的海底地形加剧了干扰场的复杂性和局部性。海水运动本身的动力学特点还没有被很好地理解。

Cox, C. S. (1971) 讨论了与局部扰动有关的电磁干扰, 认为对电场的扰动具有局部性, 而对磁场的扰动可以忽略。

在高频范围内, 表面重力波、微震、风浪和涌浪均在海底产生速度, 压力起伏, 并诱导出局部电磁场。当周期大于 40 s 时, 表面重力波甚至在深海也产生噪音频谱。测量表明, 外源场在海底通常起支配作用, 表面重力波成分作为其背景。在 10~40 s 间, 当表面重力波减弱时, 海底电场的波谱也降低, 但不明原因的噪音电场分量依然存在 (Webb, C. S. 和 Cox, C. S., 1986)。

Cox, C. S. (1978) 进行了对微震产生电磁场的理论和实验研究。实验表明: 由作用于表面重力波列产生的干涉所形成的微震, 可产生海水的水平运动并进而产生周围的电磁场, 在 0.1~0.3 Hz 范围内, 峰值较背景高出 1 到 30 倍; 由远处暴雨和当地风力及近岸反射作用产生的涌浪也产生多个峰值。Cox, C. S. (1986) 进行了暴雨过程中微震电磁场的测量。Webb, C. S. 和 Cox, C. S. (1982, 1986) 开展了海底声学 and 地震电磁扰动研究。他们描述了面波共鸣在海底产生的电磁峰值。在这些窄带的电磁干扰中间的背景可能是由小尺度的干扰涡流 (0.1 m) 产生的 (Cox, C. S., 1978)。必须一提的是, 高频端的背景噪声很复杂, 虽然还没有被很好地理解, 但与海况及局部地质情况紧密相关。

3. 海岸效应

由于海水和陆地的电导率存在巨大的差异及海洋岩石圈上部可能存在的高阻物质, 外源电流场在海陆边界产生“海岸效应” (Cox, C. S. (1980), Ranganayaki, R. P. 和 Madden, T. R. (1980), Chave, A. L. 和 Cox, C. S., 1983)。该模型引出各向异性 MT 响应函数。垂直于海岸的电流分量通过边界充电进入高阻的陆地或者偏向洋壳。横向效应的宽度非常重要。其宽度可表示为 $L = \sqrt{P_1 / \Sigma_0}$ 。这里 P_1 是海水电导的积分, Σ_0 是基底到某一深度 (典型深度为 30~50 km) 的电阻率的积分。设海水深度为 5 km, 基底电阻明显变低的深度为 30 km, 海水的电导率为 3.2 S/m, 基底的电阻率变化范围为 100~1000000 $\Omega \cdot m$, 则 L 对应为 200~2000 km。在实际观察中, 人们发现实际的宽度最大也就是几百公里, 加上 Cox, C. S. (1986) 的可控源结果 (海底为高阻), 人们认为在海洋中可能存在导电通道, 或是洋壳热或是陆缘区存在充水带。这种“海岸效应”问题, 在深海处并不严重, 但在海岸附近大陆架区却非常重要, 它建议我们应利用二维模型进行解释。

解释时对于 TE 和 TM 模式的选择问题, 过去人们一直认为选用 TE 模式较合理。实际上当沿走向存在不均匀性时, 利用一维解释将具有较大偏差。在二维解释时, 利用 TM 模式更加合理。这一点早被 Wannamaker, P. E. (1984) 和 Bostick (1986) 认识。在 EMSLAB 的二维解释中均选用了 TM 模式。

四、海洋 MT 的数据处理

海洋 MT 法与陆地 MT 法的原理相同, 因此, 它们的数据处理流程也基本相同。但由于海洋环境产生了不同于陆地上的干扰电磁场, 且海洋 MT 多为阵列观测, 故使其在噪声识别和滤波等方面有其自身的特点。

1. 电磁响应函数的稳健 (Robust) 估计

在大地电磁观测中, 由于各种噪声的存在, 使得阻抗, 即地球的电磁响应函数的估计不可避免地产生产误差。传统的阻抗获取方法是基于电磁场的误差符合高斯分布, 利用频率分析

及最小二乘回归。Sims, W. E. (1971)、Vozoff, K. (1972)将回归的方法扩展到有限频带。该方法的主要优点是运算简单快捷,在满足条件的前提下,效率最高。但是大地电磁资料误差分析的统计研究表明,各数据道的误差并不相对独立也不完全遵从某一正态分布。在大地电磁实际观测中,大多数数据中都含有少量的异常数据点叠加在正常高斯分布背景之上。在这种情况下,若仍采用常规最小二乘方法进行处理,势必造成阻抗的严重分散或偏离,甚至使阻抗特征产生强烈的畸变,给大地电磁资料的解释工作带来困难。

为解决上述问题,国内外专家发展了许多新的处理技术,如根据相干性对数据段进行加权及选择,用远参考道技术消除相关噪声等,这些在一定程度上改善了大地电磁测深的阻抗的质量,但也都有各自的局限性。

Robust 统计学(或称稳健统计学)在过去 20 多年里受到人们的注目,并得到了迅速发展,它是研究实际模型与理想模型有微小偏离,或当实际分布与理想分布在形状上有偏离时对这种偏离不敏感或相当不敏感的统计学方法。近年来, Egbert, G. D. 和 Booker, J. R. (1986)、Chave, A. L. (1987)以及 Sutarno 和 Vozoff, K. (1989)等将稳健统计学应用于地球电磁场响应函数的研究中。该方法根据观测误差的剩余功率谱的大小对数据加权,注重未受干扰的数据(假定其为正态分布)降低飞点的作用,从而改善了阻抗估算的特性。在 EM-SLAB 研究中,稳健统计学的有效性得到了充分的证明。

2. 阵列数据的分析方法

利用阵列观测技术,通过比较海-海、海-陆同步电磁场信号、进行海-海和海-陆电磁分量之间的相关分析,可以发现海洋内部成因的电磁噪声的频率范围和其强弱。阵列 MT 数据的多变量统计方法由 Egbert, G. D. 和 Booker, J. R. 提出(1987, 1989)。阵列中所有测量分量的互功率谱矩阵的特征向量(对应于矩阵递减的特征值)代表着阵列的响应函数。这种分析方法可以说明传统统计学方法用于解释 MT 时间序列的合法性,并可作为噪声的发现和信号利用的一种直接方法。

五、海洋 MT 实验与应用

随着海洋 MT 技术的日趋成熟,国内外对海洋 MT 的兴趣越来越大。国际上除 80 年代完成的著名的 EMSLAB 外,近几年,美国等发达国家仍在继续进行着各种海洋实验研究工作。实验主要有两个领域,一是对海洋岩石圈的结构研究,二是对海上油气资源的勘探与评价。前者多在洋中脊地区进行,后者多在浅海大陆架进行。

EMSLAB 将实验场地选在了美国西北陆地区及临近的 Juan de Fuca 海区,在这一较小的地理区域内,具有洋中脊、带有现代火山弧的俯冲带和由地体拼贴形成的大陆。利用 MT 确定的电性结构对该区的大陆增生和构造活动过程给出了令人满意的结果。新近(1995 ~ 1997)进行的 MELT 计划(地幔电磁层析成像),包括了地震和大地电磁测深,目的是通过地壳和上地幔成像,了解在洋中脊快速扩张地区海洋岩石圈的生成机制。由美国 Woods Hole 海洋研究所和澳大利亚、法国、日本等国研究机构共投放了 32 个大地电磁测深点,1997 年 6 月进行了仪器回收。

在海洋油气资源探测方面,美国加州大学伯克利分校曾对墨西哥湾中的岩盐构造做了深入的大地电磁数值模拟工作。这些模型研究的成果说服并争取了美国能源部和石油公司资助在墨西哥湾(GOM)进行大范围的海上大地电磁勘探。在 GOM 的两个测区中,由伯克

利分校和 Scripps 研究所共同完成 30 个海底大地电磁测站的数据采集和资料反演解释。此外, Scripps 研究所还先后为 AGIP 公司在地中海分别完成了 20 个测站和 100 个测站的勘查工作。这些勘查资料的反演解释结果,清楚地反映出海底以下 2~8km 深度的地质构造轮廓。

在我国,海洋 MT 引起人们的关注只是近年的事情。1994 年 4 月同济大学海洋地质系采用加长电极电缆,在水中布电极岸上布磁道的方法,在太湖做过 3 个水下测深点实验。1994 年浙江石油勘探处利用西德进口仪器,在太湖水域做了 17 个测点长达 50km 的一条水中剖面。1994 年 12 月国家自然科学基金资助同济大学海洋地质系开展海洋电磁法研究项目。国内还有其他单位也进行了水下 MT 实验,为海洋 MT 积累了一定的经验。鉴于水下测量磁场、方位及调平的困难,目前国内水域大地电磁测深基本上采用磁电分离测量技术。这种方法基于大地磁场在数百至上千公里范围内变化不大,反应地下电性结构的主要是电场这一理论。在陆上某一点测量磁场,而在海中利用长导线只测量电场。

1996 年,在长期从事陆上大地电磁测深仪研究的基础上,长春科技大学地球物理仪器研究室在曾孝熾教授的带领下,利用全球定位系统(GPS)提供的高精度同步时钟,成功地研制了基于电磁分离测量的阵列式海洋大地电磁测深仪,为我国海洋 MT 进行了开拓性的研究工作。王东坡教授积极促成了海洋大地电磁测深同辽河油田的合作研究项目。1996 年 11 月,受吉林省地震局的委托,我们在长春郊区开展了 50 万 V 超高压输电线的电磁场规律的研究,同时对海洋阵列 MT 仪器的软硬件进行了陆上的测试和完善工作。1997 年 3 月初,我们在吉林省长岭县进行了磁电分离可行性的实验研究。同年 3 月末到 7 月中旬,在辽河油田的大力支持下,开始了辽河油田滩海区域的 MT 实验研究。

滩海区域是大陆架上水体较浅的部分,与大陆相连或本身就是大陆的一部分,陆上河流在这里入海,水下河道发育,往往发育水下河口扇,海底地形复杂,海水动力学较深海复杂,各种现象更具局部性。

我国东部和南海滩海区的地质构造同陆上的地质构造有着一致的发展演化历史,因此该海域的盆地具有良好的油气远景。中国东部的中生代和新生代地层中普遍发育有火山岩,且盆地一般也较深,它们都限制了地震勘探方法的应用。海洋 MT 在解决含油气盆地的构造,海陆地质界限,海域盆地的构造单元划分可发挥重要作用,具有良好的发展前景。

滩海区的 MT 海上作业是相对容易进行的,在这里我们可以积累海上的工作经验,摸索海洋 MT 有关仪器和各种噪声问题,为进行浅海大陆架和深海 MT 进行准备,其研究方法、技术和研究成果具有借鉴意义。

本文就是在上述野外工作的基础上,参阅了大量国内外资料进行研究的工作总结。

主要成果如下:

(1)全面系统地综述了国内外特别是国外海洋 MT 的理论、方法、仪器和海洋大地电磁测深的应用等问题的发展现状。

(2)研制了阵列大地电磁测深仪的数据采集、图形显示、数据处理与解释等软件。

(3)在陆上对阵列大地电磁测深仪进行了全面的测试,利用其对 50 万 V 高压输电线产生的电磁场进行了野外数据采集。

(4)对高压输电线的电磁场规律进行了研究,并进一步从理论上推导了高压输电线电磁场的理论公式。电磁场的水平分量随与高压线距离的 3 次方衰减,磁场的垂直分量为 4 次方

衰减。

(5) 高压线所产生的电磁场主要为 50 Hz 及其高次谐波。负载变化一般仅产生围绕 50 Hz 的分量,即低频影响不大,除非负载变化非常迅速。

(6) 距离高压线 2.6 km 以外,高压输电线产生的电磁场已同天然背景场难以分清。

(7) 对磁电分离的可行性给出了理论推导和实验论证。

(8) 系统地推导了流动海水产生的电磁场公式,对公式给出了明确的物理意义。

(9) 进行了为期近 3 个月的海上实验,在滩海 MT 的噪声压制技术、测点布设与仪器回收等海上作业程序方面积累了丰富的经验,获得了大量的第一手资料。

(10) 通过海陆阵列同步观测,利用频谱分析、极化方向分析和波形对比分析,确定了滩海区流动海水的电磁场主要是几秒钟的周期信号。该噪声主要由风浪和涌浪产生。利用平滑滤波和方向滤波在一定程度上可消除该噪声。

(11) 针对海洋中噪声的特点,在阻抗分析中实现了稳健分析(ROBUST)方法,改善了噪声频率段的阻抗估计的质量。

(12) 根据辽河油田滩海区的实测大地电磁测深资料,结合该区原有的地质、地震、重磁和钻井资料,利用二维有限元方法,进行了地质解释。推断了深部地层中生界,中新元古界和断层的分布,并推断了滩海地区的壳、幔高导层的分布。为盆地分析和油气预测提供了有用信息。

部分工作成果已在 1997 年全国大地电磁测深会议上进行了交流,辽河油田滩海地区 MT 实验研究报告已于 1997 年 11 月通过了由辽河油田组织的专家验收。

第一章 滩海阵列大地电磁测深仪及其 在 50 万 V 超高压输电线产生的 电磁噪声研究中的应用

§ 1.1 海洋 MT 的仪器

1.1.1 阵列 MT 仪器的研制

本次野外测量采用长春科技大学研制的 GEM 系列海洋阵列大地电磁测深仪。该系列仪器的研制始于 1984 年,仪器的核心部件采用德国生产的 KIM78XX 三分量磁探头。1985 年完成了 GEM-1 型仪器的研制工作,1986 年 4 月通过了地矿部鉴定,达到国内先进水平。1987 年被评为地矿部科技进步二等奖,1988 年评为国家经委技术开发优秀成果奖。1990 年完成 GEM-2 型仪器的研制工作,1991 年通过地矿部鉴定,1994 年获国家教育委员会科技进步二等奖。GEM 系列仪器问世以来已在东北、华东、西北、西藏等地区进行了数百个物理点的石油地质勘探和深部地球物理工作,在科研和生产中发挥了积极的作用。1995 年,曾孝箴教授在前述大量工作的基础上,瞄准海洋大地电磁测深研究方向,查询国内外有关技术信息,构想和酝酿研制海洋阵列 MT 大地电磁测深仪。1996 年初研制了仪器的主体关键部分,并进行了测试。在承担辽河油田滩海大地电磁测深研究工作任务后,加快了对仪器的改进和完善的步伐,仪器于 1996 年 10 月基本定型,结合吉林省地震局“50 万 V 高压输电线对电磁测量的影响规律”工作,在吉林省长春市郊区进行了全面的陆上实验,完成试验点 30 余个,获得了令人满意的效果。1997 年 3 月在吉林省长岭县同国外仪器测量结果进行对比,并进行电磁分离可行性的实验研究。在海上工作之前,又对仪器的密封进行了细致深入的研究。1997 年 3 月末,开始海上实验工作。

1.1.2 仪器的组成

本仪器由一台主机和四台独立分机组成阵列仪。主机测量两个电场分量和三个相互垂直的三分量磁场。电场采用 L 方式布线,因此有 3 个电传感器和三个磁传感器。电传感器经过较长时间的抗干扰试验,选择了稳定性较好的 Pb-PbCl₂ 固体不极化电极。主机的磁探头有两个,分别为高、低频探头。分机只进行了电场测量,因此只有 3 个电传感器。为提高信噪比,采用分频段测量技术,共分 4 个频段,各档与对应的频率范围及采样间隔、叠加次数列于表 1.1.1,磁场测量 4、5 档使用同一高频探头(传感器),2、3 档使用同一低频探头。

主机和分机分别装配有 GPS 全球定位系统,主要用于主机和分机的高精度同步。仪器方框图如图 1.1.1。

表 1.1.1

档号	采样间隔/ms	叠加次数	频率范围/Hz	采样点数	块数
2	250	5	0.01 ~ 1	4096	8
3	25	1	0.1 ~ 1	4096	10
4	2.5	1	1 ~ 100	4096	15
5	500	1	10 ~ 1000	4096	15
1		1	0.001 ~ 0.1	4096	4



图 1.1.1 仪器方框图

1.1.3 仪器的特点

- (1) 宽频带 0.0001~1000 Hz。
- (2) 采用瞬时浮点放大器,16 位 A/D 转换器,动态范围 138 dB。
- (3) 完善的自检系统,包括开机自检、全通道和分段检测、通道幅频特性和相位特性,形成永久的年检、自检报告,以保证仪器在使用期间测量结果的可靠性。
- (4) 完善的数据处理软件包,包括频谱分析、阻抗变换、极化分析、图形显示、数据回放、一维、二维正反演等。

(5) 独立阵列观测 仪器独立,使之不同于一般电磁阵列(EMAP),避免了相关噪声;阵列观测方式使仪器更利于研究随空间位置变化的各种效应,如陆上各种输电线的电磁场规律、海陆大地电流场的差别、海水对不同位置环境的电磁场的影响等。此外,对电磁信号识别、校正都将起到决定性的作用。

(6) 高精度的同步技术 基于 GPS 同步系统,使各站仪器的同步精度小于 100ns,且时间无误差累积。

(7) 电磁测量分离 减少了施工难度,提高了工作效率。

(8) 仪器沉于海底,电极及导线经过特殊加工,降低了海水的波浪的影响。

(9) 仪器密封采用较为严格的气密。

工作方式可采用严格同步启动和轮回作用两种方式,降低了对野外通讯的要求,提高了工作效率。图 1.1.2~图 1.1.5 为仪器部分滤波特性曲线。图 1.1.6~图 1.1.7 为表明仪器一致性的时间域信号对比曲线。

上述各条曲线说明,阵列大地电磁测深仪性能稳定,一致性很高,可以获得很好的观测结果。

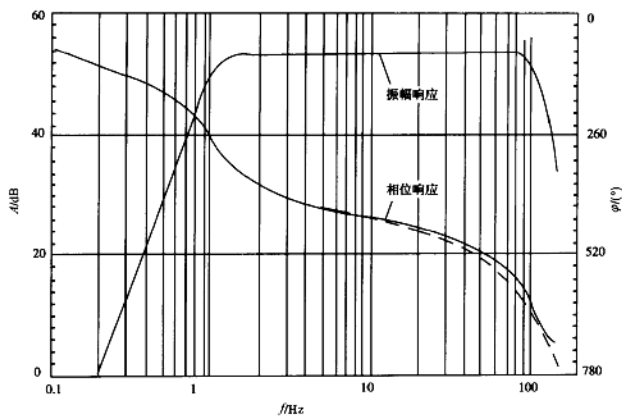


图 1.1.2 S3 仪器 4 档滤波特性曲线

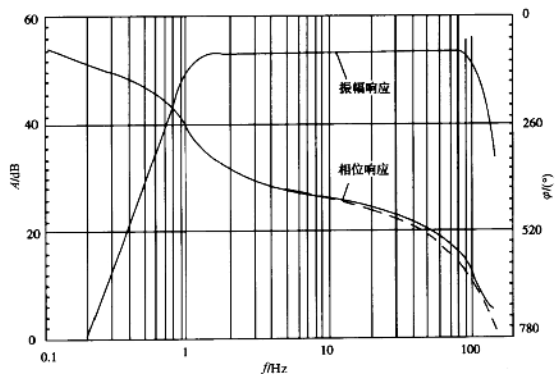


图 1.1.3 S4 仪器 4 档滤波特性曲线

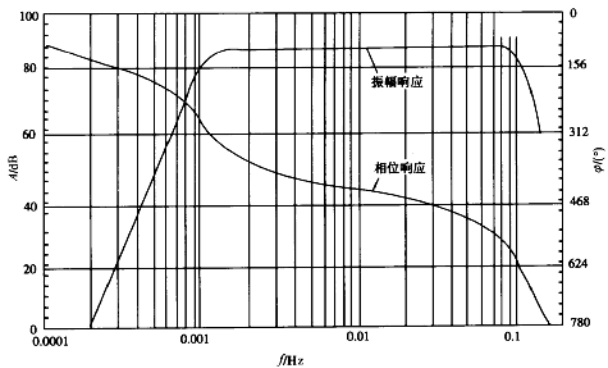


图 1.1.4 S4 仪器 1 档滤波特性曲线

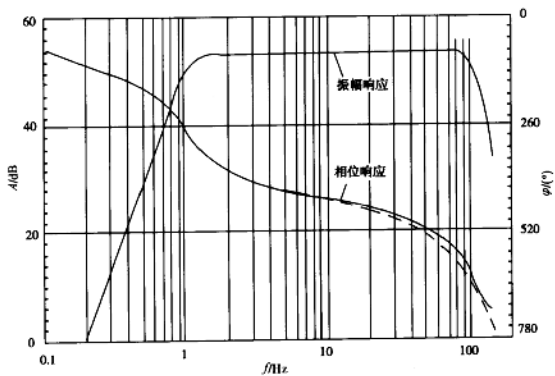


图 1.1.5 S2 仪器 4 档滤波特性曲线

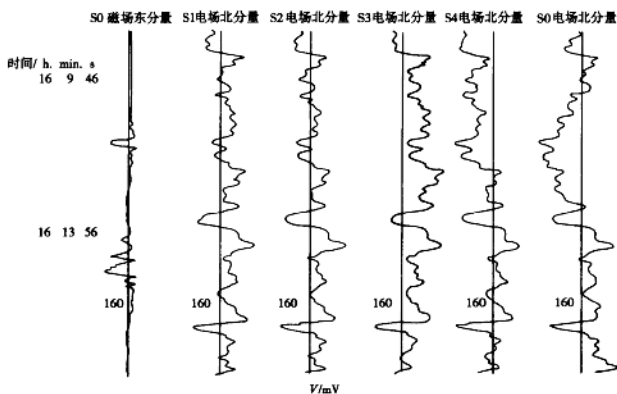


图 1.1.6 5 台仪器 1 档的时域曲线一致性对比
图中数字是各道的显示放大倍数

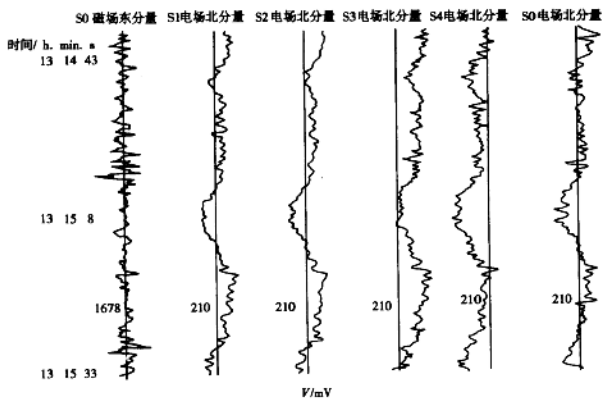


图 1.1.7 5 台仪器 2 档的时域曲线一致性对比
图中数字是各道的显示放大倍数

§ 1.2 超高压输电线所产生的电磁场的测量

1.2.1 问题的提出

随着国民经济及现代化的突飞猛进,我国的电力和通讯事业已得到了蓬勃发展,使得空间、地下的电磁波越来越复杂。野外大地电磁测深已很难回避各种规模电网的影响。同时这种电网也在影响着以观测地磁、地电信息进行地震预测的地震台站的测量工作。长春—哈尔滨 50 万 V 超高压输电线因接近吉林省地震局的地震台站便产生了此类问题。各种输电线产生的电磁场规律如何,无论是对大地电磁测深野外的施工、资料处理和解释,还是对地震预报等工作都具有重要意义。由于高压输电网负载的变化,使输电线的电流发生变化,由其所产生的电磁场也是变化的,因此用单台仪器研究超高压输电线所产生的电磁场的规律是困难的。阵列大地电磁测深仪的研制成功,为这一问题的解决提供了有利的研究手段。为此,我们承担了吉林省地震局关于“50 万 V 高压输电线的电磁场规律的研究”项目,对 50 万 V 高压输电线产生的电磁场进行了观测和分析,并对阵列大地电磁测深仪的软硬件进行了全面的野外测试。

1.2.2 实验区的选择和测点布设与测量技术

1. 超高压线概况

长-哈 50 万 V 高压线为 50 Hz 三相四线制交流输电网,每相由 4 根导线并成,三相共 12 根,导线及有关参数为:导线截面积 44.5 mm²,直径 27.5 mm,线重 1.49 t/km;塔重 6.8 t/个;导线平均高度 20 m,相间距离 11.8 m。在一般情况下,相电流的极大、极小和均值均为 650 A、40 A、300 A。

2. 电磁干扰场的相对概念

相对于电磁观测台站而言,电磁干扰场源可分为三大类:一是铁磁性物质构成的恒定场源(直流电磁场),其场强与物体的磁化强度和重量有关,如机械厂、铁路、铁塔等;二是大功率发电、变电设施及电器设备,如发电厂、高压线、变电所等;三是太阳物质活动及雷电等形成的天然电磁场。前两者是有限的局部干扰场,后者在很大空间内是相近的随机背景场。上述干扰中又可分为各场源直接干扰与由不同地质介质引起的感应电磁场的二次干扰。对本项实验,高压线电磁场为目标场,为此要求我们选择特定的空间范围,在该空间内 50 万 V 超高压输电线是惟一产生交变电磁场的场源,并且在宏观上,我们可以把占有一定空间的三相四线导线束视为 4 条无限长交变电磁场源。

3. 实验场地选择

实验场地的选取主要考虑空间环境、地质、地球物理环境及交通条件。

(1)空间环境要求 把超高压线产生的电磁场作为实验测试场源,按经验预测,该场源的最大影响半径 r 约为 5 km 左右,实验场地选取应满足在半径为 5 km 左右的空间区域内无其他电磁干扰源,对 5 km 以外的电磁干扰源的影响又未涉及本空间域内的各测点,即重要干扰源应距之 10 km 以外,使 50 万 V 高压线是产生和影响本区域内电磁场的惟一场源。为此,我们根据电力设计部门提供的高压线布局图件,沿长-哈 50 万 V 高压线两侧 10 km 范围内,对台隆、开安、前岗、鲍家及米砂子、朱城子等主要乡镇进行了调查(主要是变电所设施及容量,乡镇企业电器设备的功率及生产活动情况),最后选定农安县鲍家至德惠县朱城

子之间,约 12 km 的空间域为实验场地(图 1.2.1),需要跨高压线向西北延伸的剖面,选取在鲍家北,以避开鲍家镇的干扰,50 万 V 高压线在鲍家东侧约 1 km 处,NNE 向延伸,磁方位为 NE34°,高压线东侧距朱城子约 10 km。50 万 V 高压线西南侧距 NW 走向的 22 万 V 高压线约 10 km。该空间域内,50 万 V 高压线两侧半径 5 km 范围内,可视为无其他主要干扰场源的单场源空间,视为理想的实验区。鲍家虽为较大的乡镇,但除粮库外无变电所和可构成干扰的乡镇企业电器设施;实验区内一般村庄受地形地貌影响,多呈北东向线性排列,排列间距约 2 km 左右,沿走向间距为 0.5~1.0 km,村庄密度与大区域相同,布设任何直线型电磁观测剖面都无法完全避开村庄局部电网的干扰。实测结果分析中,明显存在村庄电网干扰点。

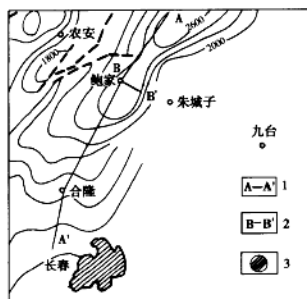


图 1.2.1 实验场地位置和白垩系地层等厚线
1—高压线;2—实验剖面;3—长春市

(2)地质及地球物理环境要求 不同的地质、地球物理环境对本区的电磁场有一定的影响,不仅构成不同的背景场,而且不同地质体和地球物理条件对交变电磁场的感应场也不同。因此,要求实验场地的地质及地球物理条件应与合隆地震台所处地质及地球物理环境相似或相近,其实验效果不但具有一般意义,而且对长春合隆国际资料交换台具有针对性。鲍家实验场地与合隆台相距 40 km 左右,所处地貌环境与大地构造单元相同,即地貌单元同属波状岗地,二者都位于松辽断陷盆地东南部斜坡带上,其弱磁性白垩系盖层厚度都在 2000 m 左右,基底性质相同(图 1.2.1)。长-哈 50 万 V 高压线的布线为本实验选择相似地质条件的场地提供了方便和可能。

(3)交通条件 交通条件虽为实验场选择中的次要条件,但它可为实验工作提供方便。实验场中心距公路约 15 km,非雨天仪器设备车、汽车可畅通无阻。

4. 测点布设

为避开鲍家—朱城子乡道上汽车对测量的干扰,我们选择 BB'剖面为大地电磁测量剖面,长 5 km,该剖面为综合对比剖面,点距为 100 m,内插标志 50 m,电磁测深点距为 200 m。实验结果表明,饱和区范围约为 500 m,故起测点记为 N005,第二点为 800 m 点,记为 N008,以后各点点距为 200 m,即分别记为 N010、N012、N014、N016、N018、N020、N022。根