第4卷 第2期 西北地震学报 Vol.4,No.2 1982年6月 NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL June, 1982

地球物理问题中电磁感应的

实验室模拟模型研究

Service States

朱佐全 郭守年

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

在地球物理问题中,有两种方法通常用于解释地磁和地电异常,这就是数 字模型技术和实验室模拟模型法。实验室模拟模型对于分析不易求得数学解的 问题非常有用,并且已经广泛用于研究复杂的地球物理问题。

本文评述了国外特别是加拿大开展模拟模型研究的情况;描述了平面波、 线电流、磁偶极等各种类型的场源模型;给出了该法在研究海岸效应、岛陆通 道电流、海浪电磁效应和各向异性导体等方面的应用。模拟模型测量和数字计 算的比较结果显示了非常好的一致性,这就进一步证实了模拟模型法对于研究 复杂二维和三维感应问题的可靠性。该项研究工作对于了解天然电磁场源的性 质、进行地球物理勘探以及研究地球地壳和地幔的电性结构都十分有益。

一、引、白、言

在地球物理学中,以被研究系统与模型之间的数学、物理等相似为基础的模型研究是一 个重要而又引人入胜的课题。其原因之一当然是由于迄令为止人们所能直接观察和接触的仅 是几公里以上的地球浅层,地球深部的状况如何,只能借助间接的方法。而且,研究工作有 时是在场源和地下构造均系未知的条件下进行的(这正如大地电磁测深中的那样),这也使 人们不得不引入某些数学、物理等方面的假设。而模型则可以以一定的方式反映对象或过程 在原型中的情况,在非单值多解的情况下,模型研究有助于我们选择合适的方案。

基于岩石电性差异的各种电磁方法给我们带来了地球内部的信息,这些在地表附近观测 到的电磁现象通常决定于场源的特征和地球内部的构造。为了分析研究并解释所得的资料, 一般有两种方法可供选择,模拟模型实验和理论模型计算。近年来,关于各种二维模型和某 些三维模型的理论研究正在迅速发展。这些计算需要大型电子计算机成本很高,而且数学计 算往往需要高度简化电导率分布和场源的特征。模拟模型实验对于不易获得数学解的研究问 题提供了一种非常有用的手段,该法不必严格地高度简化二维问题,可以方便地应用于相当

(8)

复杂的二维和三维问题中。而且模型解有时会更为真实。

A. 51

根据现有资料,加拿大、美国和印度的一些科学家曾协作开展过电磁感应的模拟模型研究工作,德国有研究报告发表,苏联也曾报道过电解槽模拟模型试验,然而以加拿大在该方面的研究工作最为系统和出色。加拿大维多利亚大学和伦多大学设有专门的电磁感应实验室,开展天然场源和人工场源的模拟模型研究。从模型技术的改进、测量系统的自动化、计算机和微处理机的应用、各种地质构造体的模拟以及不同场源电磁效应的研究等方面都做了大量的工作,取得了多方面的成果。电磁感应的模拟模型研究被认为是一种十分有效并有待于进一步发展的实验室地球物理研究方法。

二、数学分析

为了给出模型问题的简要数学推演。我们从麦克斯韦方程组出发,来研究电磁感应问题。 当使用高斯单位制,电导率表示为电磁单位(e.m.u.)时,考虑均质导体的麦克斯韦方程 组可写为⁽¹⁾

$$\nabla \times \vec{E}' + \frac{\mu}{c} \quad \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0, \qquad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H'} - \frac{\varepsilon}{c} = \frac{\partial \vec{E'}}{\partial t} - 4 \pi \sigma c \vec{E'} = 0$$
 (2)

将方程(1)、(2)变换成无量纲形式,为此令

• •

$$E' = e_0 E, \qquad H' = h_0 H, \qquad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 K_c, \qquad \mu = \mu_0 K_m, \qquad (4)$$

$$d = d_0 D, \qquad t = t_0 T, \qquad \sigma = \sigma_0 S \qquad (5)$$

其中, E、H、Ke、Km、D、T、S为无量纲数, 而 eo、ho、eo、μo、do、to、σo 分别为 单位电场、磁场、介电常数、磁导率、长度、时间和电导率。如将(3)、(4)、(5) 式代入(1)和(2)式, 则得到

$$\nabla \times \vec{E} + \alpha \frac{\partial \vec{H}}{\partial T} = 0$$
, (6)

$$\Delta \times \vec{H} - \beta \frac{\partial \vec{E}}{\partial T} - \gamma \vec{E} = 0 \qquad (7)$$

其中,

$$x = \frac{d_0 \mu_0 Km}{ct_0} \left(\frac{h_0}{e_0} \right)$$

$$\beta = \frac{d_0 \varepsilon_0 K_e}{c t_0} \left(\frac{\varepsilon_0}{h_0} \right)$$
 (9)

$$\gamma = 4 \pi c d_0 \sigma_0 S \left(\frac{e_0}{h_0} \right)$$
 (10)

在(8)、(9)、(10)式中,出现的线性尺度量d₀,其意可以理解为,当电磁扰动的频 率发生变化时,如电导率等条件不变,则为使方程(6)、(7)的解不变,必然应有线性 尺度上的变化。可以看出,方程(6)、(7)无量纲且与原始方程具有相同的形式。如果 无量纲系数α、β、γ不变的话,则当尺度发生变化时,这些方程的解将会不变。因而有可能. 设计一种真实地球物理电磁问题的尺度化模型。

如果我们把注意力放在ε和μ具有自由空间值的问题上,且令D=T=S=1,由(8) --(10)式消去e₀/h₀,那么在尺度发生变化时,这些方程解不变的必要而充分的条件为

$$d_0/t_0 = 常数, 或 d_0 f_0 = 常数$$
 (11)

其中,f。为频率。如果我们让下标g表示地球物理尺寸,下标m表示模型尺寸,则方程(11)、(12)可表示为

$$d_m f_m = d_g f_g \tag{13}$$

$$\mathbf{d}_{\mathbf{m}}\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{m}} = \mathbf{d}_{\mathbf{g}}\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{g}} \tag{14}$$

结合(13)、(14)式可以得到

$$\sigma_{m} f_{m} d_{m}^{2} = \sigma_{g} f_{g} d_{g}^{2}$$
 (15)

方程(15)表明了,为了使真实的地球物理问题和它的尺度化模型具有相同解,则包含 在这两类问题中的电导率、频率和线性尺寸之间,必须存在着关系式(15)。这样实际地球 物理场量的振幅和相位之间的关系,就可以借助于尺度化的模拟模型来加以研究了。

三、模型描述

基于数学上的推演,为了在实验室内将地表附近所观测到的电磁现象加以模型模拟,必 须精心设计模型和进行测量。下面分别叙述几种基本的模拟模型。

1.平面波模拟模型[2][8]

平面波模拟模型是最基本的模型。

图 1 为实验装置示意图。为了产生一平面波场,安装了水平排列的黄铜线,其发射能量 由一功率放大器供给。在功率放大器的输出端并一电容,构成谐振回路,以使线圈中的电流 最大。平行导线所构成的水平电流薄层距其下箱体中盐水液面1.15米高。木制模型箱内装盐 液为61厘米深。为了减小混凝土地板和地球的影响,箱体底部衬以 5 厘米的石墨层。

图 2 为模型测量系统。水平磁场检测器由一对线圈组成,安装在一根1.19厘米直径、35 厘米长的有机玻璃管的密封端,每个线圈0.67厘米长,直经0.57厘米。一根70厘米长的电缆 连接检测器和差分放大器,放大器的输出通过一根 9 米长的双芯屏蔽电缆送到示波器进一步 放大,其输出振幅用交流数字电压表加以测定,同时相角由数字相位计算机和直流数字电压



图 1 平面波模拟模型和坐标系



图 2 模型测量系统

12.2

表加以测定。一个恒相位参考信号由安装在场源附近固定位置的一小线圈提供。

垂直磁场检测器线圈轴的取向应在垂直方向。这些磁场检测器均用一350型贝尔高斯计在1-30千赫的频率范围内加以标定。

沿盐液表面的平均水平电场是通过测定相距1.48厘米两点间的电位差来测定的。电场检测器由安装在一根1.91厘米直径、35厘米长的有机玻璃管的密封端的三根探针组成,针尖刚 好穿过密封管底部与盐液表面保持接触。靠外的两根探针相距1.48厘米,相应于电极距。位 于中点的第三根探针与屏蔽层相接,提供了一个供差分放大器输入的共同的参考电位。其振振和相位测量过程同于磁场的信号。

除了由多索(Dosso)设计的上述模型外,尼内伯(Nienaber)、多索和劳(Law) 等人还在1976年研究岛一陆海洋通道的电磁感应时运用了下述平面波模型(图3)^[4]。相 当均匀的平面波场也可由两根载流平行导线提供。平行于y方向的箱体衬以无应力钢材,其 间用粗铜线在箱体外部相联,以减小箱壁的边缘效应。测量水平和 垂 直 磁 场分量的线圈为 0.1厘米长,直径0.64厘米。水平电场检测器的极距1.48厘米。其它系统与图1、图2类似。

1980年10月,加拿大多伦多大学的爱德华兹(Edwards)提出了一种用于产生视平面 电磁波的接地垂直长导线源系统(图4)^[5]。图5给出了图4中所示尺寸下磁场分量Bx的等



平面波模拟模型和坐标系

图 4 半 无限垂直长导线源的平面波模拟 模型和坐标系。阴影部分为模型化区,模 型箱体内装有表示基质地球的导电液体。

第4卷

1 . .

di n

值线图,可以看出在图中尺寸为d×3d/2的阴影区内,Bx显然基本恒定不变,可以产生比 相应的一对赫姆霍茨线圈更加均匀的场。该系统较水平电流源系统的主要优点是技术比较简 单,不必象后者那样要在箱体的端部之间外部附加连线以形成感应电流回路。而且只要其矩 形尺寸与电解液的趋肤深度比较很大,则卡尼亚(cagiard)的大地电磁关系式⁽⁶⁾无论在 电解液表面和内部都是满足的。

2.线电流模拟模型[7] 一口:"这些事实,就是我们的事实。"

为了研究不同场源条件下模型的电磁效应,多索和雅可布斯(Jacobs)设计了图6所示的线电流模拟模型。线电流场由一根10米长的水平铜棒产生,距盐液液面高1.25米。其他





图 5 导电液体表面磁场分量Bx等值线图 Bx用导线排列的中心处值的百分比表示



方面与水平平行线平面波模型基本相同。模型实验结果表明,在某些情况下线电流模型结果 与平行线平面波模型结果相差很大,这意味着场源的性质在确定场分量的特征中可能起着重 要的作用。

3. 磁偶极模拟模型(8)(9)

图 7 为上悬磁偶极源模型装置示意图。一个直径为10厘米的小电流环代表磁偶极场源, 环中心高于液面1.2米,以使环径与环到液面任意一点的距离之比都远小于1。借助这一模型,汤姆森(Thomson)等人用以模拟局部的电离层电流系统,研究了海陆交接带不同地 方海岸效应的特征。

介于勘探工程和水下通讯等方面的实际需要,磁偶极埋入难导电的基质地球内以及埋入 易导电的海水内的电磁效应问题受到了广泛的重视,许多研究者计算了不同的数学模型。为 了利用模拟模型进行研究,拉玛斯瓦米(Ramaswamy)等人设计了模拟模型(图8)。 该模型中,偶极场由一直径为2.5厘米的载流环形线圈提供。图7、图8所示模型的其它参 数亦基本与平面波模型相同。

4. 海浪电磁效应模拟模型[10][11][12]

当做为电性导体的海洋受波浪的作用力而切割地球磁力线运动时,就在运动的海水中产 生感生电流,这些电流又会产生二次磁场。为了研究海浪的电磁效应和对地磁场的影响,加 拿大有关单位近年来研究了海浪电磁效应模拟模型(图9)。

模拟模型采用了可产生垂直磁场的"磁盒",磁盒由两块水平放置的软铁板组成。选用

· · · ·

二个每一磁场强度为 10³ 高 斯 的永久磁体,在磁盒内的一个 椭 圆 形 区 域内(15×20×20 厘米³),磁场是垂直的,且均匀度在10%以内,在其中心区,场强为 66 高斯。在这一中心 区放置一个25×37×10厘米³的木盒,内装 2 厘米深的水银。

模拟海浪可以这样产生:即将一水平放置的有机玻璃棒(12厘米长,直径1.3厘米)从 1 厘米高处落入水银之中,于是波在垂直于水平圆柱棒轴线的方向传播。测量设备框图示于 图10。利用这种模型和测量系统,所得记录的信噪比大于10²。



示波器波形

四、应 用

1.海岸效应的研究[13]

导电海洋对地表观测到的地磁变化存在着大的影响。大量的实测结果表明,当从大陆一侧靠近海洋时,磁场垂直分量H₄与水平分量Hy之振幅比增大,这种现象通常称为"海岸效应",一般归因于海洋和大陆物质之间电导率的差异。

在研究海岸效应时,通常可以这样选择模型参量。由(13)、(14),对于一实际地球 物理问题的参量和模型问题的参量有共同解的必要而充分的条件可变换成下面形式

$$\left(\frac{f_{m}}{f_{g}}\right)\left(\frac{d_{m}}{d_{g}}\right) = k$$
(16)

$$\left(\frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm g}}\right)\left(\frac{\rm d_{\rm m}}{\rm d_{\rm g}}\right) = \frac{1}{\rm k} \tag{17}$$

式中, (f_m/f_g)、(d_m/d_g)、(σ_m/σ_g)和k = (E_{xm}/H_{ym})/(E_{gx}/H_{gy})分别为频率、 长度、电导率和阻抗的尺度化因子。如果对阻抗尺度化因子不感兴趣,可由(16)、(17) 式消去k,可得到

$$\left(\frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm g}}\right)\left(\frac{f_{\rm m}}{f_{\rm g}}\right)\left(\frac{d_{\rm m}}{d_{\rm g}}\right)^2 = 1 \tag{19}$$

它与(15)式完全相同。同时可由(16)、(17)得到视电阻率的尺度化因子

$$\frac{\rho_{am}}{\rho_{ag}} = \left(\frac{f_g}{f_m}\right) k^2 = \frac{\sigma_g}{\sigma_m}$$
(19)

一般理论数字计算时选择海水电导率为 0.8×10^{-11} e.m.u., 陆地电导 率为 2.1×10^{-15} e.m.u.。如果感应场的频率为0.3赫,则模拟模型的尺度化因子可选择为 $\sigma_m/\sigma_g = f_m/f_g = 10^5$, $d_m/d_g = 10^{-5}$, k = 1, $\rho_{*m}/\rho_{*g} = 10^{-5}$ 。此时电导率为 0.8×10^{-6} e.m.u.的石墨可模拟海洋,电导率为 2.1×10^{-10} e.m.u.(21欧姆⁻¹米⁻¹)的盐液可模拟 陆地,频率为30千赫的感应场可模拟0.3赫的天然场源。显然此时模型中的1厘米表示实际地球物理问题中的1公里。

通过对垂直的大陆海洋界面、截顶圆锥界面、以及有上地幔高导层界面的模型研究,多 索等人认为,一般来讲观测到的海岸效应不仅起因于海陆的电性差异,而且与海洋下面上地 幔导电物质的上涌有关。利用磁偶极场源模型对海岸效应的研究表明,在感应场与被感应场 之比很大的地方,海岸效应就很显著(即在大陆一侧)。

2.场源对大地电磁测深等电磁感应问题影响的研究[2][7][14]

地球天然电磁变化的研究给出地球内部构造的情报,电磁场的特征取决于地球的电性特征和场源的性质。不幸的是地球内部电导率的分布和电磁变化场源的性质都未能了解得十分 清晰,以确定到底是由场源还是由电导率分布引起的变化。模拟模型研究对不同的场源条件 下水平层状均匀地球、具有间断面或在水平方向有电导梯度的构造提供了一种有用的研究方法。

多索等人用一立方体形导电石墨浸入盐水中表示各向异性地球介质,利用模拟模型对水 平电流源、线电流源、垂直和水平磁偶极源条件下的测量结果进行了对比研究。通过改变

导电石墨的浸入深度和场源距导电石墨的距离,其所得结果表明,大地电磁场比(E_x/H_y) 强烈地受到地球电性各向异性的影响,而只微弱地受到场源形式的影响,因而恰当地解释大 地电磁测深结果将能获得地球电性各向异性的信息。所得结果还表明,H_x/H_y更多地表征 着场源的特征。

基于垂直断层和岩脉情况下的模拟模型研究,发现场的极化在确定电磁变化的特性时起 着重要的作用。电场的特性在浅构造时对H极化非常易于变化,而对E 极化变化极不敏感。 另一方面,磁场的特性E极化较H极化对于断面更为敏感。而且在深垂直断层 断 面处,对E 极化来讲,可以予期H₂/H₂取得大的比值(其值可能大到1)。研究场源的这些极化特性, 有益于在测深工作中选择畸变较小的解释曲线。

3. 海浪电磁效应和岛陆电流通道的研究 [4] [15] [16]

海浪电磁效应的研究前已谈及,近年来尼内伯等人又用尺度化模拟模型研究了位于大陆附近浅海处岛屿的电磁效应。他们证明确实存在着海峡电流通道。所得结果表明,对不同的海峡宽度来讲,大陆的存在都有助于岛屿海岸线处场分量的增强,而仅当海峡非常狭窄(等于或小于岛屿宽度的一半)时,岛屿才影响大陆海岸线处场量的增强,但是它并不影响大陆海岸线处的水平和垂直磁场之比。而且,一般来讲岛屿的形状对大陆海岸线处的场影响不大。然而在岛上,圆形岛上场的空间变化较方形岛上要小得多。

4.各种二、三维地质构造体的模拟模型研究

这是模拟模型实验开展得最为广泛的研究内容之一。用石墨模拟良导体,用混凝土模拟 绝缘体,用盐水模拟基质地球,可以研究各种类型的各向异性构造。这些对于研究地表附近 的各种电磁现象、解释地球物理勘探成果以及探明构造活动区深部电性构造都具有重要意 义。

模拟模型研究已发展到全球的许多地区并有不同的模型设计。罗顿(Roden)运用加工 成形的尺度化铜片代表日本海岸,发现海岸效应与实际观测到的日本电磁异常密切相关^[17]。 赫尔曼斯(Hermance)用铜片,上的洞模拟冰岛,并利用其模拟结果对冰岛深部电阻率 的研究结果做了海岸效应校正^[18]。劳奈(Launay)基于电磁镜象理论,运用模拟模型研 究了海岸效应。该模型用两块铜片,一片代表海洋,另一片在其下h深处代表无限深导电地 幔。模型场源由一大螺线管中的交变电流提供。然后将其模型结果与加利福尼亚和澳大利亚 海的野外实测结果进行了比较,发现了好的一致性^[13]。布朗(Brown)和甘盖(Gangi) 在实验室中用铝板代表高导电的地幔,用盐液代表岩石圈(低电导的地球外层结晶构造), 研究了电磁波在岩石圈中的传播^[19]。此外,埋在导电介质中磁偶极的模拟模型测量已经同 水下通讯、矿岩中的通讯以及海底电导率的探测研究工作密切地结合起来了^[9]。

五、模拟模型研究中的几个问题

41

模拟模型研究的优点前已谈及、然而其不足之处是对于复杂的二维三维问题只能得到测 显结果而不能给出解析解答,因而应在可能的情况下将模型测量的结果与数字计算结果以及 野外实测结果加以对比研究。

1.模型设计和测量技术的改进

在进行模拟模型设计和测量时,研究者们都十分注意改进和完善工作。为了避免场源与

前置放大器的相互影响,必须对放大器加以良好的电磁屏蔽。为了减小混凝土地板和地球的 影响,在模型箱体底部衬以5厘米厚的石墨。为了减小边缘效应,在箱体的垂直端(与源电 场相垂直的端部)用石墨构成石墨墙,其效应相于当使箱体更大些。如果没有石墨墙,电场 距箱体30厘米处即开始变弱且在接近箱体边缘时急剧下降。为了使大的构造具有足够的空间 又避开相位反相区,可把箱体转动90°,这时箱体尺寸可选为2米长,1.7米宽。

测量技术也在不断改进。增加了由马达带动的自动滑轮系统,可以自动连续记录 y方向 的场强和相位并通过绘图仪绘出图形。计算机系统也与测量系统相连接,能够很快处理观测 结果和绘出三维立体图形。在多伦多大学,新建的电磁感应模拟模型实验装置在 x 和 y 两个 方向均可连续自记,并输入微处理机进行处理,直接获得结果。

2.模型测量的可靠性。这些问题,这些正式。2000年10月

检查模拟模型测量可靠性的方法之一就是将其结果与数学方法计算同一模型的结果进行 对比。各种场源条件下对均质导体、二层导体的对比研究结果极为一致。对于包含横向电性 变化的较复杂的问题,加拿大从事模拟模型研究的多索和从事数学模型计算的琼斯等人共同 进行了对比研究^[20]。

图11示出了两种方法所得的E_x、H_z、H_y、ρ_a、H_z/H_y的 对比 情况。图中ρ_a=(20f) |E_x/H_y|², 尺度化因子为10⁵, 其余单位在图中示出。可 以 看出, 总的来讲, 对(a)和(b) 两个板状模型, 两者的一致性非常好。然而对于劈状模型(c), 一致性在某种程度 上变坏。 研究者认为, 这是因为在数字计算中模型是用一矩形网格来表征, 其劈状模型的倾斜部份被 小的阶梯所近似, 因而造成了"理论"和模拟结果较大的差异。



图11 几种情况下场的模拟模型测量和数字结果的对比 (a)高导板模型,(b)有覆盖层的高导板模型,(c)高导劈状模型

由于近期的模拟模型研究已发展到基本模拟实际情况的岛、陆形状,例如对不列顶岛屿 地区和北美东海岸地区的测量就是这样⁽²¹⁾⁽²²⁾,因而有可能开展模拟模型、数字计算和野外 实测结果三者的对比研究。对温哥华岛地区进行这样对比的结果表明⁽²³⁾,模型测量结果与

1

野外实测结果具有好的一致性。

总之, 做为地球物理学基础性实验方法的电磁感应模拟模型研究工作, 是一项应用广泛 而富有成效的研究课题。在有条件开展此项研究的地方, 进行该项研究是必要和有益的。 (本文1981年6月15日收到)

参考文南

- 1. Dosso, H.W., 1966, A Plane-wave analogue model for studying electromagnetic variations, Can. J. Phys., V.44, P.67-80.
- 2. Dosso, H.W., 1966, Analogue model measurements for electromagnetic variations near vertical faults and dykes, Can.J.Earth Sci., V. 3, P. 287-303.
- 3. Dosso, H.W., 1966, Analogue model measurements for electromagnetic variations near a coastline, Can.J.Earth Sci., V.3, P.917-936.
- 4. Nienaber, W., Dosso, H.W., Law, L.K., Jones, F.W. and Ramaswamy, V., 1976, An analogue model study of electromagnetic induction for island-continent ocean channels, Phys. Earth Planet Inter., V.13, P.169-183.
- 5. Edwards, R.N., 1980, A grounded vertical long wire source system for plane wave magnetotelluric analog modeling, Geophysics, V. 45, P. 1523-1529.
- 6. Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting, Geophysics, V. 18, P.605-635.
- 7. Dosso, H.W. and Jacobs, J.A., 1968, Analogue model measurements of electromagnetic variations in the near field of an oscillating line current, Can.J.Earth Sci., V. 5, P.23-29.
- 8. Thomson, D.J., Ramaswamy, V.and Dosso, H.W., 1972, Model measurements of electromagnetic variations near a coastline for localized source fields, J.Geomag. Geoelectr., V.24, P.317-336.
- 9. Ramaswamy, V. and Dosso, H.W., 1978, Analogue model measurements for a horizontal magnetic dipole embedded within a conducting medium, Phys. Earth Planet. Inter., V.17, P.295-299.
- 10. Miles, T., Dosso, H.W. and Ng, T.P., 1977, An analogue model for studying magnetic variations induced by ocean waves, Phys. Earth Planet. Inter., V.14, P.137-142.
- 11. Miles, T. and Dosso, H.W., 1979, A laboratory analogue model study of ocean-wave induced magnetic fields for cases of non-uniform depths and sea-land interfaces, Phys. Earth Planet.Inter., V.19, P.12-20.
- 12. Miles, T. and Dosso, H.W., 1980, An analogue model study of oceanwave induced magnetic field variations near a coastline, J.Geomag. Geo-

第2期 朱佐全等:地球物理问题中电磁感应的实验室模拟模型研究

electr., V.32, Suppl, 1, Sl 151-Sl 154.

- 13. Dosso, H.W., 1973, A review of analogue model studies of the coast effect, Phys. Earth Planet. Inter., V.7, P.294-302.
- 14. Dosso, H.W., 1969, Analogue model study of electromagnetic variations over an anisotropic conductor, J.Geomag.Geoelectr., V.21, P. 647-653.
- 15. Nienaber, W., Dosso, H.W., Law, L.K., Jones, F.W. and Ramaswamy, V., 1977, Studies of electromagnetic induction for island-continent ocean channels with applications to Vancouver Island, Acta Geodaet., Geophys.et Montanist. Acad. Sci. Hung., V. 12, P. 187-190.
- 16. Nienaber, W., Dosso, H.W., Law, L.K., Jones, F.W. and Ramaswamy, V., 1977, An analogue model study of electromagnetic induction for island-continent ocean channels for the H polarization, Phys. Earth Planet.Inter., V.15, P.69-76.
- 17. Roden, R.B., 1964, The effect of an ocean on magnetic diurnal variations, Geophys. J.R. Astron. Soc., V.8, P.375-388.
- 18. Hermance, J.F., 1968, Model studies of the coast effect on geomagnetic variations, Can.J.Earth Sci., V.5, P.515-552.
- 19. Brown, G.L. and Gangi, A.F., 1963. Electromagnetic modeling studies of lithosphere propagation, I.E.E.E.Trans. Geosci. Electr., Ge-I, P.17.
- 20. Dosso, H.W. and Ramaswamy, V., 1974, On the comparison of laboratory electromagnetic analogue model measurements and finite-difference numerical calculations, Phys. Earth Planet. Inter., V.9, P. 108-110.
- 21. Dosso, H.W., Nienaber, W.and Hutton, V.R.S., 1980, An analogue model study of electromagnetic induction in the British Isles region, Phys.Earth Planet.Inter., V.22, P.68-85.
- 22. Dosso, H.W., Nienaber, W., Wright, J.A., Greenhouse, J. P. and Bailey, R.C., 1980, An analogue model study of electromagnetic induction in the eastern coastal region of North America, Phys.Earth Planet. Inter., V.23, P.13-20.
- 23. Ramaswamy, V., Jones, F.W., Dosso, H.W. and Nienaber, W., 1980, A comparison of numerical, analogue model, and field-station vertical magnetic-fields for the Vancouver Island region, Phys.Earth Planet.Inter., V.22, P.60-67.

and a set of a section

4

Â

and the second second second second

LABORATORY ANALOGUE MODEL STUDIES OF ELECTROMAGNETIC

Zhu Zuoquan Guo Shounian

.

(Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau)

Abstract

In geophysical problems, two methods commonly used in the interpretation of geomagnetic and geoelctric field anomalies are numerical modelling techniques and laloratory analogue model methods. Laboratory analogue models are found to be very useful in analysing problems which do not yield really mathematical solution, and have been extensively used in studying complicated geophysical problems.

The present work reviews the development of analogue model method in the world, especially in Canada; describes various kinds of source field models, such as plane wave model, line current model, and magnetic dipole model; and shows the applications to studying the coast effects, island-continent ocean channels, electromagnetic effects induced by ocean waves, and anisotropic conductors. The results of comparison of analogue model measurements and numerical calculations indicate very good agreement, and confirm the validity of the analogue method for studying complex two-and three-dimensional induction problems. Such research work goes a long way in understanding the behaviour of natural electromagnetic field, carrying out geophysical prospecting, and investigating the electrical structures of the Earth's crust and mantle.