



# 海洋电磁学及其应用

陈 芸 吴晋声

(青岛海洋大学, 青岛 266003)

海洋电磁学是海洋物理学的一个分支, 是电磁学和海洋学的交叉学科, 研究海洋中与电磁有关的问题, 主要研究海洋的电磁特性、海洋中频率低于红外的电磁场运动的形态和规律。它是在电磁波和天然电磁场应用于海洋通讯和海洋探测研究过程中逐步形成和发展起来的一门新兴学科。

## I. 海洋的电磁特性

### I.1. 海水电磁参数<sup>[1]</sup>

海水电磁参数包括磁导率  $\mu$ 、电导率  $\sigma$  和介电常数  $\epsilon$ 。它们与海水的盐度、温度、密度有关。海水为非铁磁性物质, 其磁导率  $\mu$  用真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  表示。海水电导率一般在  $3 \sim 5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。温度为  $17^\circ\text{C}$  时, 标准海水的电导率为  $4.54 \sim 4.81 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。海水电导率公式是应用德拜-休克尔-盎萨格强电解质理论得出的, 他们假定离子周围有按玻尔兹曼分布的异号离子云, 还考虑在电场中运动时受电泳力和弛豫力的影响。实际使用的是 Weyl (1964) 建立的海水电导率与盐度和温度关系的经验公式及其他经验公式。经验公式和理论公式完全不同, 这说明还有可能运用物理中液体的现代理论, 重建强电解质和海水电导率的理论公式。

海水介电常数理论是采用克劳休斯-莫索缔-德拜介电常数理论公式, 但和实验结果相差甚远。Legrand 和 Dorsey 分别建立了两个经验公式, 但也只表示相对介电常数与温度、密度的关系, 并没有包含频率, 只适用于低频。对高频还要加频率改正。这些说明也有可能运用

物理中液体的现代理论, 重建海水介电常数理论。温度为  $17^\circ\text{C}$  时, 标准海水低频相对介电常数约为 80.5。

### I.2. 海洋电磁场<sup>[2]</sup>

海洋电磁场包括天然电磁场和感生电磁场。天然电磁场主要是穿过海洋的地磁场, 在两极约为  $(6 \sim 7) \times 10^4 \text{nT}$ , 在赤道约为  $(3 \sim 4) \times 10^4 \text{nT}$ 。其日变值可达数十个 nT, 随纬度和季节有所不同。一般在下午 3 时左右达到极值。季节变化约为  $15 \sim 30 \text{nT}$ , 年变化可达  $100 \text{nT}$ 。短周期  $0.2 \sim 600 \text{s}$  变化约为百分之几到几个 nT。

当波高为 1m、周期 9s 或波高为 0.5m、周期为 3s 时, 感生磁场约为 1nT。潮汐感生的磁场约为  $20 \sim 30 \text{nT}$ 。宽 60km, 最大厚度为 300m 的半椭圆截面的海流, 当流速为  $0.514 \text{m/s}$  (1kn) 地磁场垂直分量为  $4.8 \times 10^4 \text{nT}$  时, 感生磁场约为 37nT。由感生磁场可以算出感生电场。

海水与海底接触处的电化学反应, 海底的电场可达  $100 \mu\text{V/m}$ ,  $15 \sim 20 \text{m}$  深处的浮游植物和细菌聚集区, 垂直方向的电势变化可达  $4 \text{mV}$ 。

大气电离层发生的各种动力学过程, 包括来自太阳的等离子流和地球高空磁层, 电离层的相互作用, 不断产生频率范围很宽的电磁波。其中周期为数分钟以上的, 能够穿过海水达到海底, 再穿过海底沉积层, 到达上地幔岩石圈, 甚至更深处。

### I.3. 电磁波在海水中的传播

电磁波在海水中传播时, 电场产生传导电

流。电磁场能量通过电流转化为热能,致使电磁场的振幅减小,频率愈低衰减愈慢传播愈远。MHz 以上的电磁波,在海水中其振幅衰减为原来的  $\frac{1}{e}$  的传播距离小于 25cm,海水对于高频电磁波成为很强的屏蔽层。而频率低于 10Hz/h 的极低频电磁波,在海水中其振幅衰减为原来的  $\frac{1}{e}$  的传播距离可达 5km,海水就成为可穿透的了。

低频电磁波在海水中按扩散-热传导方程运动,由下式:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \partial \mathbf{D} / \partial t \approx \mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{E}$$

即,  $\nabla \times \mathbf{B} = \sigma \mu_0 \mathbf{E}$

由  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \sigma \mu_0 \nabla \times \mathbf{E} = -\sigma \mu_0 \partial \mathbf{B} / \partial t$

即,  $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = -\sigma \mu_0 \partial \mathbf{B} / \partial t$

得,  $\nabla^2 \mathbf{B} - \sigma \mu_0 \partial \mathbf{B} / \partial t = 0$

对一维情况,若  $x = 0$ ,  $\mathbf{B}(x, t) = \mathbf{B}_0 e^{-i\omega t}$ , 解为:

$$\mathbf{B}(x, t) = \mathbf{B}_0 e^{-x\sqrt{\frac{1}{2}\omega\sigma\mu_0}} e^{-i\omega(t-x/\sqrt{2\omega\sigma\mu_0})}$$

因此

$$d = (\pi\sigma\mu_0 f)^{-\frac{1}{2}} \approx 250/f^{\frac{1}{2}}(\text{m})$$

$$v = (4\pi f/\sigma\mu_0)^{\frac{1}{2}}$$

其中  $d$  为振幅衰减  $\frac{1}{e}$  的传播距离,  $v$  为传播速度。

#### 1.4. 海洋磁流体动力学方程

海水中的离子在地磁场中运动受洛伦兹力的作用 ( $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ), 其中  $\mathbf{J}$  为电流密度, 海水动力学方程还要加上洛伦兹力, 即:

$$(\rho d\mathbf{v}/dt) = -\nabla P + \mathbf{f}_v + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

其中,  $\rho$  为海水的质量密度;  $v$  为海水运动速度;  $P$  为压力, 它是面力, 变为单位体积的力时出现梯度, 负号表示净压力方向与压力梯度的方向相反。  $\mathbf{f}_v$  为单位体积受到的地转力、重力、粘滞力。海水运动较慢, 因此,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t) \approx \mu_0 \mathbf{J}$$

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \mu_0^{-1}(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

$$= \mu_0^{-1}[(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - \nabla(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B})/2]$$

由  $\nabla \cdot (\mathbf{B}\mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + (\nabla \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B}$

$$= (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$$

得,

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \mu_0^{-1}[\nabla \cdot (\mathbf{B}\mathbf{B}) - \nabla B^2/2]$$

因此,

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = (\nabla \cdot \mathbf{B}\mathbf{B} / \mu_0) - \nabla(P + B^2/2\mu_0) + \mathbf{f}_v$$

其中,  $P + B^2/2\mu_0$  相当于压力。

由

$$\iiint (\nabla \cdot \mathbf{B}\mathbf{B} / \mu_0) d\mathbf{v} = \iint (\mathbf{B}\mathbf{B} / \mu_0) \cdot d\mathbf{s}$$

可知,  $\mathbf{B}\mathbf{B} / \mu_0$  相当于单位面积受到的磁场张力。

## II. 应用

### II.1. 在海洋水文测量中的应用<sup>[2]</sup>

海水在地磁场中运动时, 单位体积受到的电磁力

$$\mathbf{f} = (\mathbf{F}/\rho) = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

产生的电流密度为:

$$\mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{f} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

若地磁场强度为  $\mathbf{H}_0$ , 感生磁场强度为  $\mathbf{H}$ , 则

$$\nabla \times (\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}) = \mathbf{J}_f + \partial \mathbf{D} / \partial t$$

$$\approx \mathbf{J}_f = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$= \sigma[\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mu_0(\mathbf{H}_0 + \mathbf{H})]$$

因此,

$$\nabla \times \mathbf{H}' \approx \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mu_0 \mathbf{H}_0) \quad (1)$$

由

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H}' \approx \sigma[\nabla \times \mathbf{E} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mu_0 \mathbf{H}_0)]$$

得,

$$\nabla^2 \mathbf{H}' \approx \sigma[\mu_0 \partial \mathbf{H}' / \partial t - \mu_0 \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{H}_0)]$$

将  $\mathbf{H}'$  作傅利叶展开, 取其任一角频率  $\omega$ , 即

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H}_0 e^{-i\omega t}$$

可得,

$$\nabla^2 \mathbf{H}' - k^2 \mathbf{H}' = -\mu_0 \sigma \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{H}_0) \quad (2)$$

其中,

$$k^2 = -i\omega \mu_0 \sigma$$

由式(2)及边条件可以解出  $\mathbf{H}'$ , 代入(1)式可求出感生电场  $\mathbf{E}$ , 测  $\mathbf{H}'$  的大小和分布可知  $\mathbf{v}$

的大小和分布。苏联学者最近认为,在大洋磁流体力学领域内进行理论和实验研究,可以建立分析海流和波浪过程运动学的最新有效方法和手段。并可用于研究表面波和内波在沿岸楔和大陆架出口后的变形以及内波场和海流参数的统计特征值。并认为在可建立潮汐发电站的地方,可以利用电磁法确定进水量及能量的估算。

自 60 年代以来许多学者对线性波动、内波海流等感生电磁场进行研究,给出解析解。我们用 Languet-Higgins 海浪模型,得出了感生电磁场的解析解,并利用海浪感生电磁场的磁场强度分量的时间序列,估计海浪的能谱和方向谱<sup>[1]</sup>。

## II.2. 海洋电磁波通讯

飞机用频率约为 30kHz (波长为  $10^4\text{m}$ ) 的电磁波,可以将指令下达水下 30m 深处的潜艇。美国在地面上建成面积为  $100 \times 100\text{km}^2$  的天线阵,发射极长电磁波(波长大于  $10^6\text{m}$ )。电磁波在地表海面与电离层所构成的两个同心反射层之间传播,垂直透入海面。它能向全球大洋深处的核潜艇下达指令。使用超长波空对潜艇和极长波地对潜艇通讯的优点不仅能穿透海水,而且不受磁爆、核爆炸和太阳黑子的影响。缺点是发射天线太长,只能单向通讯。

## II.3. 海底电磁波地质勘探<sup>[2]</sup>

海底岩石的电导率与它的物理化学性质、温度和含海水量均有关,裂隙中充满海水的岩石或硫化矿物,都能使岩石的电导率增加 2 个数量级以上,这可以用电磁波探测到。从海底发射,接收从地层反射回来的电磁波,推断海底上下地幔岩石圈的电磁性质,可用于研究海底岩石圈的结构、热力学过程和海底岩基的运动以及海底矿床的形成和分布。这项新方法、

新技术的继续发展,有可能解决其他海洋地质调查方法所不能解决的一系列海洋地质和地球物理问题。对深部海底岩石圈性质的探测尚无其他有效手段时,海洋电磁学在这方面的研究就显得突出。

## II.4. 海洋磁探测

钢铁沉船、潜艇在海洋地磁场中被磁化成为磁铁,探测它在海面的磁场,可推断其存在。虽然它在海面的磁场强度与它在水下深度的 3 次方成反比,但直径为 50m 的铁球,在水下 75m 处,它在水面的磁场的最大值仍能达到 50nT。但随着它在海洋中深度的增加,在海面的磁场强度将逐渐减弱。海水在地磁场中运动感生的电磁场作为干扰信号,如何编制计算机软件加以识别,就愈显得重要,这已成为海洋电磁学的重要研究课题。

## II.5. 微波探测海洋

海浪不同的波高和波长相当于海面具有不同的粗糙度,对微波能量的散射不同。用微波对海浪扫描,接收海浪对微波散射的能量,可以得出海浪波高和波长的统计分布。微波还可以探测海污、海温、海流、海雾、海冰和海风(通过海面的粗糙度)。海面水汽大、云雾重、可见光和红外遥感受限制,微波却能穿透,具有全天候、全天时的优点,因而卫星微波遥感能同时测量全球海况,成为海洋遥感的主力。

## 参考文献

- [1] P. Halley 著,陈芸译,1983. 海洋电磁学导论. 海洋译丛 1: 26~37.
- [2] B. 索切尔尼科夫著,陈芸译,1987. 海洋中天然电磁场理论基础. 海洋出版社. 第 98 页.
- [3] 陈芸,1987. 从海底发射接收电磁波进行海洋地质探测. 海洋科学 1: 59~62.
- [4] 吴晋声,陈芸,利用海浪在地磁场中感生的电磁场研究海浪. 海洋科学 (待发表).