

海洋电磁学

陈 芸

(青岛海洋大学海洋物理系)

海洋电磁学研究海洋中与电磁有关的问题。它是在电磁波和天然电磁场应用于海洋通信和海洋探测的研究过程中逐步形成和发展起来的,是一个新兴的交叉学科。本文简要地介绍了海洋电磁学的历史、现状和存在的问题。

海洋电磁学是海洋物理的一个分支学科,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形态和规律及其应用。

一、简 史^[1]

海水中的各种盐类几乎完全离解成为正负离子,海水靠这些离子导电而成为导体。1832年,法拉第发现电磁感应定律的第二年,就想到在地磁场中运动的海水象在磁场中运动的导线,也会产生感应电动势。他在泰晤士河做实验,由于当时仪器的精度差、距离短、电压小,未能测出结果。但他指出,在英吉利海峡必定能测出。1851年,C·渥拉斯顿在横过英吉利海峡的海底电缆上检测出和海洋潮汐周期相同的电势变化,证实了法拉第的想法。从此,引起人们对研究海洋中电磁现象的兴趣。

钢铁船舰在地磁场中被磁化,成为一大块磁铁,海底水雷靠舰船磁场触发,这在第二次世界大战中普遍使用。这也就促使人们研究地磁场和舰船磁场在海洋中的分布。

在海面下行进的鱼雷,靠伸出海面的鱼雷天线用无线电制导,这就促使人们研究电磁波沿水面的传播、反射和透射。飞机对水下潜艇的长波、超长波无线电通信,促使人们研究电磁波在海水中的传播。

美国已经建成了陆地基地和大洋中核潜艇的单向极长波无线电通信,其天线阵面积达 $100 \times 100\text{km}^2$,耗资10亿美元。它采用极低频

电磁波沿电离层和海面之间传播,然后透入海洋。这项工程的巨大投资,带动了海洋电磁学的许多研究课题,如海水电磁参数、海洋中的电磁噪声等等。

贴水面飞行的空对舰、舰对舰导弹,用微波探测它自己和海面的距离,以便保持适当的距离,这促使人们研究存在很大浪花和水雾弥漫情况下海面上电磁波的传播和反射问题。

70年代以来,已经开始用极长电磁波探测研究海底岩石圈的地质构造和探矿,并已经能用计算机配合绘制出海底地质构造剖面图。

海洋中的天然电磁场和海水在地磁场中运动时产生的感应电磁场,都会对水下电磁波通信和探测造成干扰,这又促使人们对海洋中的天然电磁场和感生电磁场进行更深入、更细致的研究。

微波遥感已经是海洋遥感的主力。因为微波对云雾的穿透力比可见光和红外强得多,因而促使人们研究海面对微波的散射、反射和透射。

二、海水电磁参数

海水电磁参数^[2]包括磁导率 μ 、电导率 σ 和电容率(介电常数) ϵ ,它们与海水的盐度、温度以及电磁场的频率有关。海水为非铁磁性物质,其磁导率 μ 就用真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 。海水电导率一般在 $3-5(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ 。温度为 17°C 时,标准海水的电导率为 $4.54-$

$4.81(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 是铜的 10^{-7} 倍, 玻璃的 10^{12} 倍, 比一般湖水、河水大千倍以上. 温度为 17°C 时, 标准海水低频相对电容率(相对介电常数)约为 80.5.

海水中各种盐类几乎完全离解, 因此海水是强电解质. 海水电导率公式是应用德拜-休克尔-查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两种摩擦阻力, 得出了强电解质电导率公式, 它包含各种盐类的浓度. 但实际使用的是 Weyl (1964) 建立的海水电导率与盐度和温度关系的经验公式, 还有其他人的经验公式. 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.

海水电容率(介电常数)理论公式是采用克劳休斯-莫索蒂-德拜公式, 但和实验结果相差甚远. Y. Legrand 和 Dorsey 分别建立了两个经验公式, 但它们只表示相对电容率(介电常数)和温度的关系, 并没有包含与频率的关系. 它们只适用于低频. 对高频, 还要加上频率改正. 这些说明也还有可能运用物理中液体的现代理论, 重建海水电容率(介电常数)的理论公式.

三、海洋电磁场^[3]

海洋电磁场包括天然电磁场和感应电磁场两大类.

海洋中的天然电磁场主要是地磁场. 在两极, 它的值约为 $7-8 \times 10^4 \text{ nT}$, 在赤道约 $3-4 \times 10^4 \text{ nT}$, ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$), 日变值达数十个 nT , 季节(主要是温度)变化约 $15-30 \text{ nT}$. 年变化可达 100 nT , 短周期 ($0.2-600 \text{ s}$) 变化约为百分之几到几个 nT .

作为导体的海水, 在地磁场中运动, 感生电磁场. 周期为 $16-17 \text{ s}$ 、波高为 1 m 时其感生磁场约为 1 nT . 潮汐感生的磁场约 $20-30 \text{ nT}$. 宽 60 km 、厚 300 m 的半椭圆截面的海流, 流速为

1 n mile/h (节), 在地磁场垂直分量为 $4.8 \times 10^4 \text{ nT}$ 时, 感生磁场约为 37 nT .

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

大气电离层中发生的各种动力学过程, 包括来自太阳的等离子流和地球磁层及电离层的相互作用, 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, 达到上地幔岩石圈, 甚至更深处.

四、电磁波在海水中的传播^[2]

电磁波在导电的海水中传播时产生传导电流, 致使电磁波的能量急剧衰减, 频率愈高, 衰减愈快. 由麦克斯韦方程组可得到电磁波振幅衰减为原来 $1/e$ 时的传播距离为

$$d_{1/e} = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma f}} = \frac{250}{\sqrt{f}} \text{ (m)}, \quad (1)$$

其中 f 为电磁波的频率. 兆赫以上的电磁波在海水中的 $d_{1/e}$ 小于 25 cm , 海水对这种高频电磁波就成为很强的屏蔽层, 而频率低于 $2.78 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ 的极低频电磁波, 在海水中的 $d_{1/e}$ 可达 5000 m , 海洋就成为完全可穿透的了.

值得注意的是, 电磁波在海水中的传播速度 v 与频率有关, 由麦克斯韦方程组可以得到

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

频率愈低传播速度愈慢(见表 1).

表 1

$f(\text{Hz})$	$d_{1/e}(\text{m})$	$d_{1/100}(\text{m})$	$v(\text{m/s})$
1	250	1160	1.8×10^3
10^2	25	116	18×10^3
10^6	0.25	1	2×10^6

其中 $d_{1/100}$ 为电磁波振幅衰减为原来的 1% 的传播距离.

五、海洋电磁波通信

飞机用频率为 30kHz (波长为万米) 电磁波可以和水下 30m 深处的潜艇通信。美国用面积为 $100 \times 100\text{km}^2$ 的天线阵发射的极长电磁波(波长在百万米), 沿地表和海面与电离层所构成的两个同心反射层之间传播, 然后垂直透入海面, 能向全球大洋深处的核潜艇下达指令。使用超长和极长电磁波与潜艇通信, 其优点不仅能穿透海洋, 而且不受磁暴、核爆炸和太阳黑子的影响。潜艇与潜艇之间联络通信, 也可用电磁波。

六、海底电磁波地质勘探^[4]

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两个数量级以上, 这可以用电磁波探测到。海底岩石圈的电导率与它的物理化学性质、温度和含水量等均有关系。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性质, 可用以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。美国斯克里普斯海洋研究所把极低频电磁波发射器放置海底, 采用可散布在海底的接收器来测量从地层反射回来的电磁波, 提供了海底 30km 以上岩层的电导率结构模型。现在已经用计算机配合, 绘制海底地层剖面图。对深部海底岩石圈性质的探测, 尚无其他有效手段, 故海洋电磁学在这方面的研究, 就显得更加重要。

七、电磁波探测海面

海浪的不同振幅和波长散射微波的能量不同, 用微波对海浪扫描, 接收散射的微波能量, 可以得出海浪振幅和波长的统计分布。微波还可以探测海水污染、海温、海流、海雾、海冰、海风(通过海面粗糙度)。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, 并且

物理

具有全天候、全天时, 因而微波卫星遥感能同时测量全球海况, 成为海洋遥感的主力。

世界上许多国家为了和潜艇通信、导航, 设置强功率长波无线电台, 其发射频率一般在 15—25kHz, 属甚低频(VLF)电磁波。接收从长波台发射到海面, 再从海面反射的电磁波, 从中可以分析出海面状况的信息。我国可以利用的长波台有: 日本爱知县的 NDT 台, 其频率为 17.4kHz, 功率为 500kW; 澳大利亚西北角的 NWC 台, 其频率为 15.5kHz 和 22.3kHz, 功率为 1000kW; 以及其他台。将接收天线方向对准发射台时, 收到的信号最强。为此, 可将接收机安放在汽车内, 接收天线安装在车顶上, 汽车沿海滨公路奔驰, 接收天线随时转动对准发射台方向, 边跑边接收。这样测到的是以发射台为顶点, 以公路为底边的三角形面积所覆盖的海域的海洋表面状况。

八、海洋磁探测

钢铁潜艇和沉船在海洋地磁场中被磁化成一块大磁铁, 探测它在海面的磁场, 即测量分析海面的磁异常, 可推断它的存在。但潜艇、沉船在海洋中的深度愈深, 它在海面的信号就愈弱。为了识别被测信号和干扰信号(包括海水在地磁场中运动感生的电磁场), 编制相应的计算机软件在海洋磁探测中就显得特别重要, 这已成为海洋电磁学的重要研究课题。

海洋磁探测用的精密仪器有: 质子旋进式磁力仪, 其精度可达 0.1nT, 每 1—3s 测一个点; 光泵磁力仪, 其精度可达 0.01—0.005nT。

九、海洋感生电磁场方程^[3]

作为导体的海水在地磁场中运动能感生电磁场, 由麦克斯韦方程组推出

$$\nabla \times \mathbf{H}' = \mathbf{J}_t + \partial \mathbf{D} / \partial t \approx \mathbf{J}_t - \sigma \mathbf{F}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{H}' 为感生磁场, 位移电流 $\partial \mathbf{D} / \partial t \ll \mathbf{J}_t$ (传导电流密度)。因为海水运动速度小, $\partial \mathbf{D} / \partial t$ 也小。由洛伦兹力可得到每单位电荷所受到的力

F 为

$$F = \frac{f}{e} = E + v \times B, \quad (4)$$

其中 E 为电场强度, B 为磁感强度, $H' \ll H_0$ (地磁场), 可得

$$\nabla^2 H' = \sigma \left[\mu_0 \frac{\partial H'}{\partial t} - \mu_0 \nabla \times (v \times H_0) \right], \quad (5)$$

若将 H' 作傅里叶展开, 取其任一频率 ω , 可得

$$\nabla^2 H' - k^2 H' = -\mu_0 \sigma \nabla \times (v \times H_0), \quad (6)$$

其中

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

由上式解出 H' , 再代入

$$\nabla \times H' = \sigma(E + v \times \mu_0 H_0), \quad (7)$$

可得出感生电场 E .

由探测感生电磁场, 可以得到海洋中浪、潮、流、内波和风暴潮的许多参数。

十、海水-磁场流体动力学方程

海水中的离子在地磁场中运动, 受洛仑兹力 $J \times B$ 作用, 其中 J 为电流密度, 海水动力学方程还要加上这一项, 即

$$\rho \frac{du}{dt} = -\nabla P + f_v + J \times B, \quad (8)$$

其中 ρ 为海水质量密度, u 为海水运动速度, P 为压力, 化为每单位体积的力时, 变为梯度, 负号表示净压力方向与压力梯度方向相反。 f_v 为每单位体积受到的重力、粘滞力等。由

$$\nabla \times B = \mu_0(J + \partial D/\partial t) \doteq \mu_0 J, \quad (9)$$

可得

$$\rho \frac{du}{dt} = \nabla \cdot \frac{BB}{\mu_0} - \nabla \left(P + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) + f_v, \quad (10)$$

其中 $P + B^2$ 相当于压力, 由

$$\iiint \nabla \cdot \frac{BB}{\mu_0} dV = \iint \frac{BB}{\mu_0} \cdot ds \quad (11)$$

可以看出, BB/μ_0 相当于海水单位面积所受到的磁场张力。

通过对磁波的探测, 可以得到海洋中浪、潮、流、内波和风暴潮的一些参数。苏联海洋物理学家认为, 在大洋磁流体力学领域内进行理论和实验研究是分析和建立海流和波浪过程运动学的最新有效方法和手段。

- [1] 陈芸等, 中国大百科全书, 海洋科学卷, 中国大百科全书出版社(1987), 320.
- [2] P. Halley 著, 陈芸、张复立编译, 海洋译丛, No. 1 (1983), 26.
- [3] B. 索切尔尼科夫著, 陈芸译, 海洋中天然电磁场理论基础, 海洋出版社, (1987)1; 213.
- [4] 陈芸, 中国科学技术协会成立卅周年纪念论文集, 海洋出版社, (1988), 788.

高温超导体的好消息

高温超导材料在应用上的主要困难是临界电流密度太低。问题在于混合态时材料中磁通线所受的钉扎力较弱, 稍大一点的电流通过会引起磁通线的运动, 从而产生电阻破坏超导电性, 早些时候, 很多人认为这个缺点很难甚至不可能被克服。

1989年, 中子辐照 $YBa_2Cu_3O_7$ 样品对临界电流影响方面的实验给人们以希望。例如贝尔实验室 Bruce Van Dover 等人进行的辐照实验, 辐照前, 77K 下 $YBa_2Cu_3O_7$ 晶体最大的临界电流密度为 $6500A/cm^2$, 辐照后, 提高到 $620000A/cm^2$ 。也许是辐照产生的小缺陷成

为磁通线的钉扎中心。

临界电流密度提高 100 倍的结果只在一个晶体上看到, 还要研究怎样才能得到重复的好结果。对于商业生产, 这种方法也不实际, 还要寻找产生缺陷的其他方法。当然还有其他问题要解决, 如材料的脆性。总之, 这个工作并不表明高温超导材料马上就能用, 只是意味着低临界电流密度的问题可以解决。这显然是个好消息。

(阎守胜根据 *Science* 1989 年第 246 卷第 755 页编译)