

## 一种改进型的基于 Stokes 一阶波的海浪磁场模型

费春娇<sup>\*①②③</sup> 吴佩霖<sup>①②③</sup> 张群英<sup>①②</sup> 方广有<sup>①②</sup> 朱万华<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(电磁辐射与探测技术院重点实验室 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100190)

**摘要:** 海洋磁场测量是海洋科学观测、海底资源勘探、国防安全等领域的基本手段之一。研究海浪等海水运动的磁场噪声机理、预测模型及抑制方法对于提高海洋磁测精度具有重要的意义。该文在分析一阶 Stokes 波浪运动方程的基础上, 提出一种改进型的海浪磁场模型, 并推导出深海和浅海条件下的简化公式。为了验证模型的有效性, 在 2015 年第 15 号台风“天鹅”过境期间, 对我国南海某海域的海洋环境磁场进行了观测, 并将该文模型和经典的 Weaver 模型分别与测试结果进行了对比。结果表明, 该文提出的改进型模型能够更加准确地预测海浪磁场大小, 预测精度比 Weaver 模型提高了近一个量级, 可为海洋磁场测量的噪声抑制提供一种更加有效的工具。

**关键词:** 海洋磁场测量; 海浪磁场模型; 海洋深度; Weaver 模型

中图分类号: O441.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-2007-07

DOI: 10.11999/JEIT161123

## Improved Model of Ocean Wave Induced Magnetic Field Based on the First Order Stokes Equations

FEI Chunjiao<sup>①②③</sup> WU Peilin<sup>①②③</sup> ZHANG Qunying<sup>①②</sup> FANG Guangyou<sup>①②</sup> ZHU Wanhua<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Marine magnetic survey is one of the basic methods for oceanographic observation, seabed resource prospection and national defense security. Learning about the mechanism of the wave induced magnetic field, the prediction model and the methods of noise suppression are of great importance for improving the measurements accuracy. On the basis of analysing the first order Stokes wave motion equations, this paper proposes an improved model of the ocean wave induced magnetic field, together with simplified formulas for the deep and shallow water conditions. In order to verify the validity of the model, an observation was done in the South China Sea in 2015. By comparing the proposed model with the classic Weaver's model and the test results, it is shown that the proposed modified model can make an accurate prediction which is nearly an order of magnitude higher than Weaver's model on the ocean wave induced magnetic field. This makes the proposed model a more effective tool of noise suppression for Marine magnetic field measurement.

**Key words:** Marine magnetic survey; Ocean wave induced magnetic field model; Ocean depth; Weaver model

### 1 引言

海洋磁场测量(简称“海洋磁测”)是海洋科学观测、海底资源勘探、国防安全等领域的基本手段之一<sup>[1-4]</sup>。不同类型海水运动产生了大量的磁场

噪声, 极大地限制了海洋磁测的精度, 研究海浪等海水运动的磁场噪声机理、预测模型及抑制方法对于提高海洋磁测精度具有重要的意义<sup>[5-10]</sup>。

自 20 世纪 60 年代起, 众多学者对海浪运动产生的磁场噪声机理和模型进行了深入研究。文献[10]和文献[11,12]给出了单频点海浪磁场的理论模型, 证明海浪运动产生的磁场与海浪振幅、周期以及地磁场的大小和方向有关, Podney<sup>[13]</sup>通过推导速度势函数的傅里叶积分以及 Maxwell 方程, 得出了在平坦、层状海洋中行进的海浪产生的电磁场由横向电场、横向磁场和静电场构成, 场强随海水深度以

收稿日期: 2016-10-21; 改回日期: 2017-04-24; 网络出版: 2017-05-26

\*通信作者: 费春娇 irisclia@163.com

基金项目: 国家深度资源勘探的关键设备和技术研究(ZDYZ2012-1-03)

Foundation Items: The R&D of Key Instruments and Technologies for Deep Resources Prospecting (The National R&D Projects for Key Scientific Instruments) of China ( ZDYZ2012-1-03)

指数衰减的规律。Maclure 等人<sup>[14]</sup>、Fraser<sup>[15,16]</sup>、Kozlo 等人<sup>[17]</sup>测量了海洋表面波产生的磁场,量级在几个 nT 范围内; Lilley 等人<sup>[18]</sup>通过实验指出海浪磁场的峰值频率一般在 0.077 Hz 附近。上述学者通过实验获得了比较精确的海浪磁场量级和频率特性,且与模型预测结果相近,进一步验证了 Weaver 等学者模型的有效性。

本文通过求解一阶 Stokes 波浪运动方程<sup>[19]</sup>,得到了波浪运动速度势函数的一般形式,结合 Maxwell 方程,提出了一种改进型的海浪磁场模型,又推导出深海和浅海条件下的简化磁场公式。为了验证该模型的有效性,本文利用一个置于海底的 3 分量磁测系统对中国南海某海域的海洋环境磁场进行了观测,得到了不同海面风速条件下的海洋环境磁场<sup>[20]</sup>,并将本文模型和经典的 Weaver 模型的预测结果分别与实验结果进行了对比。结果表明,该模型的通用性更强,可以更加准确地预测海浪磁场大小,并为海洋磁场测量数据的解释、反演和噪声抑制提供一种更加有效的工具。

## 2 基于 Stokes 一阶波的海浪磁场模型

Stokes 一阶波浪方程假设如下:波浪在传播过程中形态不变且不受海流影响,重力是唯一的外力;液体自由表面上的压强等于大气压强;海底为水平的固体边界;波幅(或波高)相对于波长是无限小,流体质点的运动速度缓慢。建立如图 1 所示的坐标系,令  $x$  轴为海水水平前进方向,  $z$  轴竖直向上,  $x, y, z$  满足右手螺旋关系。其中,  $z = \eta = a \cos(kx - \omega t)$  为自由水面方程,  $a$  为波浪竖直方向振幅,波数  $k = \omega/c$ 。因此可以得到线性波浪运动的基本方程和边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \\ u_z|_{z=-d} &= \frac{\partial \phi}{\partial z}|_{z=-d} = 0 \\ \eta &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial z}|_{z=0} \\ \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \Big|_{z=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

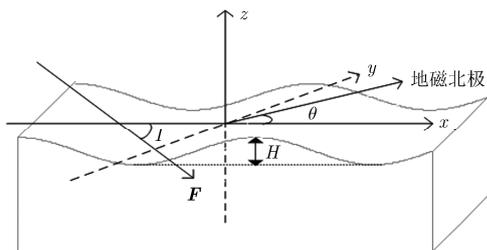


图 1 海浪运动产生感应磁场的数学模型

Stokes 一阶波描述的是波浪运动的力学方程,假设自由水面的海浪运动满足 Stokes 一阶波的限定条件,考虑将海浪运动速度引入 Maxwell 方程中,以求解海浪感应磁场的解析式。

### 2.1 通用海浪磁场模型

图 1 中,令  $i, j, k$  分别为 3 个坐标轴的单位矢量,  $I$  为磁倾角,  $\theta$  为海浪前进方向与地磁北极的夹角,海浪高度  $H = 2a$ ,  $u$  为海浪的运动速度矢量,  $F = F(\cos I \cos \theta i + \cos I \sin \theta j - \sin I k)$  为地磁场的方向矢量<sup>[21]</sup>。联立方程组(1)可得

$$\phi = \frac{ga}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

由于  $u = \nabla \phi$ , 可以推导出海浪运动的速度为

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} i + \frac{\partial \phi}{\partial z} k = \frac{2\pi a}{T \sinh(kd)} [\cosh k(z+d) i + j \sinh k(z+d) k] \exp(j\omega t - jkx) \quad (3)$$

由于海浪运动产生的感应电场  $E$ 、感应磁场  $H$  满足 Maxwell 方程<sup>[22]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

海水磁导率  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m, 空气的介电常数  $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  F/m, 海水介电常数  $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  ( $\varepsilon_r = 78$ )。海水电流密度可以表示为  $J = \sigma[u \times (F + \mu H)] \approx \sigma(u \times F)$ 。由于海水是无旋流体,且满足  $\nabla \cdot H = 0, \nabla \cdot u = 0$ 。将式(4)合并可得到

$$\nabla^2 H - \sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ -\sigma(F \cdot \nabla)u, & z > 0 \end{cases} \quad (5)$$

令  $M = kF \frac{2\pi a}{T \sinh(kd)}, N = \cos I \cos \theta, R = \sin I$  化简可得  $(F \cdot \nabla)u = M \cdot \exp(j\omega t - jkx) \cdot K_1$ , 其中, 由于  $u$  是时间  $t$  和坐标  $x$  的谐波函数,  $K_1 = \{-jN \cosh k(z+d) - R \sinh k(z+d)\} i + [N \sinh k(z+d) - jR \cosh k(z+d)] k$ , 因此海浪运动产生的磁场信号也应该是相似的谐波形式, 有

$$H = h \cdot \exp(i\omega t - jkx) \quad (6)$$

其中,  $h$  是关于  $z$  的函数。考虑到  $\nabla \cdot H = 0$ , 即  $h = h_x i + h_y j + h_z k$  满足  $\frac{dh_z}{dz} = jkh_x, h_y = 0$ , 令  $\gamma = \sigma\omega$ , 则有

$$\frac{d^2 h}{dz^2} = \begin{cases} (k^2 + j\omega\gamma)h - \sigma MK_1, & z < 0 \\ k^2 h, & z > 0 \end{cases} \quad (7)$$

考虑到实际环境中, 当  $z \rightarrow \pm\infty$  时,  $h_z = 0$ 。对式(7)进行分解有

$$\frac{d^2 h_z}{dt^2} = \begin{cases} (k^2 + j\omega\gamma)h_z - \sigma M [N \sinh k(z+d) \\ - jR \cosh k(z+d)], & z < 0 \\ k^2 h_z, & z > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{d^2 h_x}{dt^2} = \begin{cases} (k^2 + j\omega\gamma)h_x - \sigma M [-jN \sinh k(z+d) \\ - R \cosh k(z+d)], & z < 0 \\ k^2 h_x, & z > 0 \end{cases} \quad (9)$$

求解式(8)对应的关于  $h_z$  的二元齐次微分方程, 得到

$$h_z = \begin{cases} P \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) - \frac{\sigma M(jN + R)}{2\mu\gamma} \\ \cdot e^{kd} \cdot e^{kz}, & z < 0 \\ Qe^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $P, Q$  为待定系数。由于磁场垂直分量和水平分量在空气-海水分界处是连续的, 满足

$$\left. \begin{aligned} h_{z,z<0}|_{z=0} &= h_{z,z>0}|_{z=0} \\ h_{x,z<0}|_{z=0} &= h_{x,z>0}|_{z=0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(8), 式(9)代入式(11), 可以解得

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\sigma Mk(jN + R)e^{kd}}{\mu\gamma(k + \sqrt{k^2 + j\mu\gamma})} \\ Q &= \frac{\sigma Mk(jN + R)e^{kd}}{\mu\gamma(k + \sqrt{k^2 + j\mu\gamma})} - \frac{\sigma M(jN + R)e^{kd}}{2\mu\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

因此将  $P, Q$  代回式(10), 即可得到一定深度条件下海浪产生的垂直方向磁场表达式。由于水平磁场

$h_x = \frac{1}{jk} \cdot \frac{dh_z}{dz}$ , 得到

$$h_x = \begin{cases} \frac{1}{jk} \left[ P \sqrt{k^2 + j\mu\gamma} \cdot \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) \right. \\ \left. - \frac{\sigma Mk(jN + R)}{2\mu\gamma} \cdot e^{kd} \cdot e^{kz} \right], & z < 0 \\ jQe^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \quad (13)$$

将式(10), 式(13)代入式(6), 即可得到通用海浪感应磁场  $\mathbf{H}$  的理论公式。

## 2.2 深水波条件下海浪磁场模型

当海水深度  $d$  与波长相比足够大时, 满足  $d/T > 0.5$  或  $d/gT^2 > 0.0792$ , 此时海底不再影响海浪, 有限水深情况下的波浪速度势函数式(2)可以简化为  $\phi = \frac{ga}{\omega} \cdot e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t)$ , 代入  $\mathbf{u} = \nabla\phi$ , 得到海水运动的速度分量为  $\mathbf{u} = u_x \mathbf{i} + u_z \mathbf{k} = a\omega e^{kz} \cdot \cos(kx - \omega t) \mathbf{i} + a\omega e^{kz} \sin(kx - \omega t) \mathbf{k}$ , 依据以上海浪

磁场计算方法, 同样可推导出深海条件下:

$$h_z = \begin{cases} -\frac{2kA}{\mu k + \mu\sqrt{k^2 + j\mu\gamma}} \cdot \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) \\ + \frac{A}{\mu} e^{kz}, & z < 0 \\ \frac{A\sqrt{k^2 + j\mu\gamma} - Ak}{\mu\sqrt{k^2 + j\mu\gamma} + \mu k} e^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\gamma = \sigma\omega$ ,  $A = akF(\sin I + i \cos I \cos \theta)$ 。

## 2.3 浅水波条件下的海浪磁场模型

当海水深度  $d$  与波长相比较小, 即  $0 < d/T < 0.04$  或  $0 < d/gT^2 < 0.00155$  时, 速度势函数式(2)可以简化为  $\phi = \frac{ga}{\omega} \sin(kx - \omega t)$  根据  $\mathbf{u} = \nabla\phi$ , 同样可以推导得到

$$h_z = \begin{cases} P_1 \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) + \frac{A_1 \gamma k z}{k^2 + j\mu\gamma} \\ + \frac{A_1 \gamma k d + j\gamma B_1}{k^2 + j\mu\gamma}, & z < 0 \\ Q_1 e^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $A_1 = (aF \cos I \cos \theta)/d$ ,  $B_1 = (aF \sin I)/d$ ,  $P_1 = -\frac{A_1 \gamma k^2 d + jk\gamma B_1 + A_1 \gamma k}{[k + \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}] \cdot (k^2 + j\mu\gamma)}$ ,  $Q_1 = -P_1 + \frac{A_1 \gamma k d + j\gamma B_1}{k^2 + j\mu\gamma}$ 。

综上所述, 本文中所建立的海浪磁场模型不仅考虑了海浪自身特性(浪高  $H$ 、频率  $f$  以及海水运动速度  $\mathbf{u}$ )的影响, 还给出了以海水深度  $d$  为依据的模型应用判定条件, 建立了一个通用的海浪磁场模型。

## 3 结果分析

海浪运动产生的磁场与海浪的周期、振幅、海水深度以及地磁场的幅值和方向均有关。为了验证本文模型的有效性, 2015年8月19日至25日在我国南海三亚某海域进行了海浪磁场的观测, 同时根据实验当天测得的海浪特性参数和环境参数对本文模型和 Weaver 模型的预测结果进行了比较。

### 3.1 模型预测结果分析

本文模型参数采用实验测量值, 所用磁测仪封装于海底, 海水深度  $d$  为 180 m。根据当前地磁场模型 IGRF2015<sup>[23]</sup> 计算得到实验期间(以 2015年8月20日为例)实验区域的地磁场幅值和方向如表 1 所示, 由于实验持续时间相对较短, 地磁场的扰动微小, 可忽略不计。

根据表 1 所示, 选取仿真参数时, 令  $F = 43333.7$  nT,  $\theta = -1^\circ 27' 6''$ ,  $I = 23^\circ 47' 7''$ 。一般情况下波浪的色散关系  $\omega^2 = gk \tanh kd$  是超越方程, 利用

表 1 地磁场模型 IGRF2015 计算得到的 2015 年 8 月 20 日实验区域地磁场参数表

分量	磁偏角 (+E -W)	磁倾角 (+D -U)	水平强度	北向分量 (+N -S)	东向分量 (+E -W)	垂直分量 (+D -U)	总场
计算结果	-1°27'6"	23°47'7"	39653.0 nT	39640.3 nT	-1004.5 nT	17476.9 nT	43333.7 nT

直接迭代法，解得  $k = 0.0018$ 。考虑到后续进行的实验测得的海浪频谱中心频率为 0.06866 Hz，因此在仿真过程中选取频点  $f = 0.06866$  Hz 的海浪波。取海水深度  $d = 180$  m，根据表 1 中本文模型表达式分别给出浅海、一定深度以及深海环境中位于 180 m 深度处的海浪磁场预测结果，同时给出无限深度条件下 Weaver 模型的预测结果。图 2 是海浪高度  $H$  为 0.5 m 和 1.0 m 情况下各模型磁场的预测值。

从本文模型的预测结果可以看出，海浪产生的磁场与海浪振幅高度  $H$  成正比，与海水深度  $d$  成反比，且随探测深度 ( $|z|$ ) 的增加迅速衰减。在不考虑海水深度的情况下 (即深海条件) 预测得到的海浪磁场相比一定深度海水条件下的值会有所减小。

图 3 中给出了海上不同探测深度  $|z|$  情况下垂直方向磁场  $H_z$  随海水深度  $d$  的变化关系曲线，从图中可以看出，海水深度相同时，海浪垂直方向的磁场

随着探测深度增大而逐渐减小；当探测深度相同时，浅海环境中海水深度  $d$  对于海浪磁场影响较大，随着海水深度的增加磁场值迅速衰减，在深海环境中，磁场随深度的增加其变化率趋于平缓，当深度  $d$  超过一定值时，可不考虑海洋深度对海浪的影响。

### 3.2 实验结果分析

实验中的三分量海底磁测仪使用的是 Bartington 公司生产的 Mag-03 磁场传感器<sup>[24,25]</sup>，利用低功耗的 MCU+CPLD 作为采集电路的主控制部分，加上调理电路，构成了一套 3 分量磁测系统，其噪声水平约为  $10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ Hz}$ ，采样频率 500 Hz。图 4 展示了 Mag-03 磁通门传感器及其封装情况。

实验进行时正值 2015 年第 15 号台风“天鹅”在南海生成，生成后经历了 3 次增强 3 次减弱，且 3 次增强 (17 日上午、19 日晚上和 23 日晚上) 均达

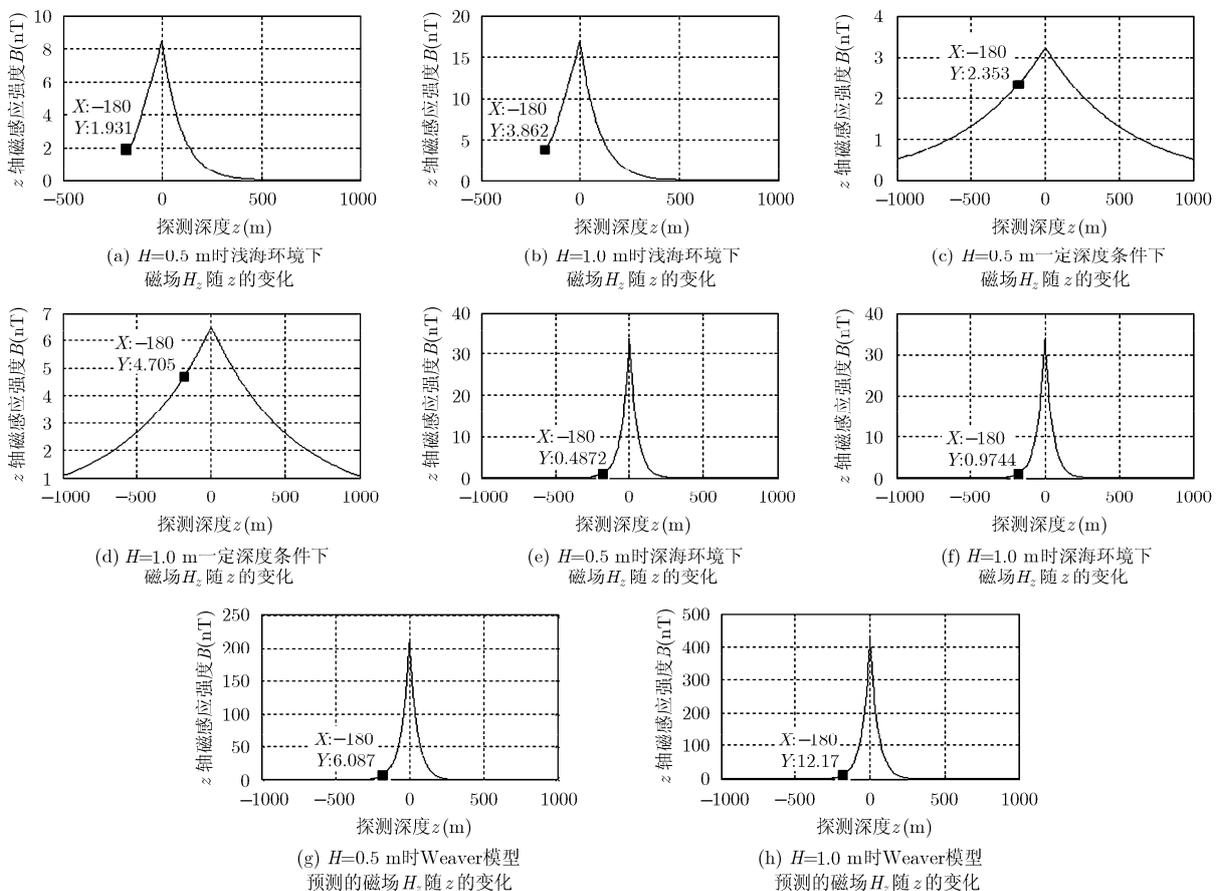


图 2 深度  $d=180$  m，海浪高度分别为  $H=0.5$  m 和 1.0 m 情况下各模型预测的磁场值

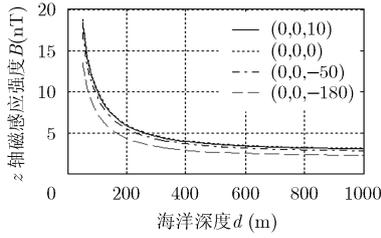


图 3 海上不同探测深度垂直方向磁场  $H_z$  随海洋深度  $d$  的变化



(a) Mag-03 三轴磁场传感器



(b) 磁测仪的封装实物图

图 4 Mag-03 磁场传感器实物图及其封装情况

到了超强台风级别，中心附近最大风力均曾达到 16 级，图 3-图 5 给出了在 8 月 21 日至 25 日每天上午 6:00 根据卫星数据预测的南海区域海浪高度、风速以及台风路径<sup>[26]</sup>。

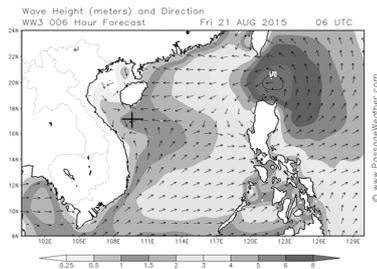
从图 5 中可以看出，实验海域因受台风不断增强或减弱的影响，海浪振幅在 0.5~3.0 m 之间波动变化。图 6，图 7 分别显示了 8 月 21 日和 25 日磁测仪在 180 m 深的海底所测得的垂直方向的磁场及其功率谱密度。8 月 21 日海浪高度为 1.0~1.5 m，海面风速约为 10~15 m/s，8 月 25 日，此时海浪高度为 0.5~1.0 m，海面风速约为 5~10 m/s。本次实验中磁测仪水平方向未采用角度计进行校正，相应的  $x, y$  方向指向不能确定，因此选用  $z$  轴数据进行分析。将磁测仪所采集到的海洋环境磁场信号经过 0.01~1 Hz 的带通滤波器，从而可以滤除包括海流、内波等带外干扰。

根据以上模型预测和实验结果，列表 2 进行对比。

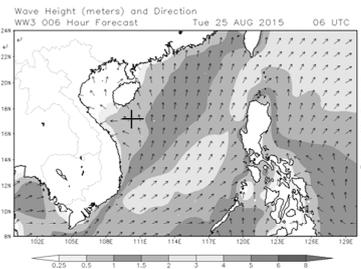
从以上实验结果可以看出，海浪产生的磁场中心频率在 0.068 Hz 附近，8 月 21 日当台风运动到距离实验海域最近位置时，所测得海浪磁场的时域值量级在 3.0 nT 范围内，当 8 月 25 日台风离开南海海域所测得的时域值量级在 1.5 nT 范围内，海浪磁场的时域信号与振幅高度成正比。考虑到实验中的海洋深度  $d$  适用于深海条件下的海浪磁场模型，相应的预测结果比 Weaver 模型减小了近一个量级，更接近实验测试结果，因此可以为海洋环境磁场源识别提供一种有效的参考。

### 4 结束语

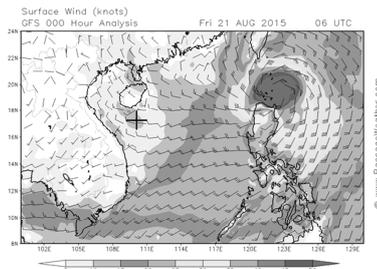
本文在一阶 Stokes 波浪运动方程的基础上，提出了一种改进型的海浪磁场模型，且通过简化海水速度势函数重新推导出深海和浅海条件下的海浪磁场适用公式，模型表明：浅海条件下海浪磁场随着海水深度的增加迅速衰减，当探测距离相同时，海洋深度越深，海浪运动产生磁场值越大，当深度  $d$



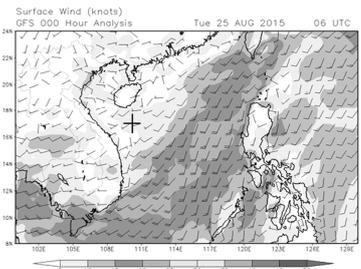
(a) 8月21日上午06:00卫星数据预测的海浪高度和方向



(b) 8月25日上午06:00卫星数据预测的海浪高度和方向



(c) 8月21日上午06:00预测的海面风速和方向图



(d) 8月25日上午06:00预测的海面风速和方向图

图 5 实验时间、地点以及当时海面浪高和风速图(十字标注的是实验地点)

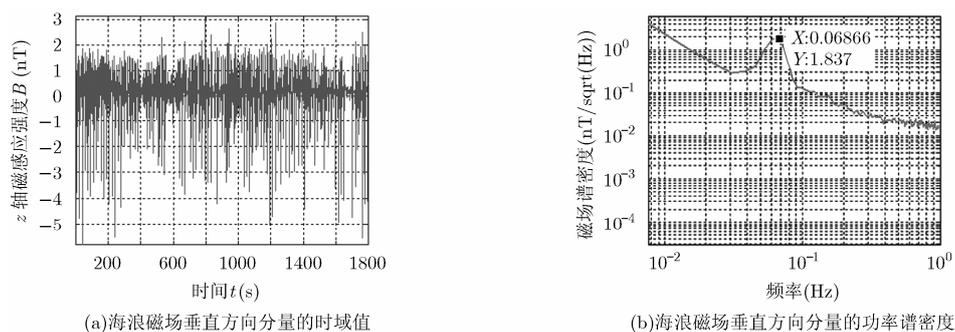


图 6 磁测仪在 8 月 21 日 6:00~6:30 所测得的海浪磁场量级

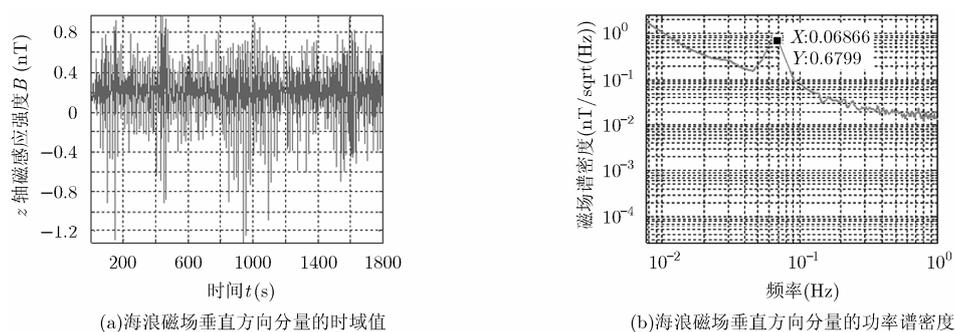


图 7 磁测仪在 8 月 25 日 6:00~6:30 所测得的海浪磁场量级

表 2 模型预测值与实际测量结果对比

时间	浪高(m)	仿真结果(nT)				实际测量值(nT)
		浅海	有限深度	深海	Weaver 模型	
21 日	1.0~1.5	3.862	4.705	0.9744	12.240	1.8370
25 日	0.5~1.0	1.931	2.353	0.4872	6.122	0.6799

超过一定值时,磁场的变化率趋于平缓,即深海环境中深度对海浪磁场不再产生影响。为了验证模型的有效性,在台风过境期间,利用 3 分量磁测系统对我国南海某海域的海洋环境磁场进行了观测,将本文模型、经典的 Weaver 模型和测试结果进行了对比。结果表明,本文提出的改进型模型能够更加准确地预测海浪磁场大小,预测精度比 Weaver 模型提高了近一个量级,通用性更强,这对于研究海洋地磁场研究具有重要意义。由于该模型在浅海和一定深度条件下预测结果比实测值大,考虑到该模型建立在简化了的线性速度势波基础上,因此下一步计划在模型中引入风力、波动的自由液面非线性等实际环境因素制约,以得到更加精确的模型,并进行实验验证。

### 参考文献

- [1] NABIGHIAN M N, GRAUCH V J S, HANSEN R O, *et al.* The historical development of the magnetic method in exploration[J]. *Geophysics*, 2005, 70(6): 33ND-61ND. doi: 10.1190/1.2133784.
- [2] 丁鸿佳, 刘士杰. 我国弱磁测量研究的进展[J]. *地球物理学报*, 1997, 40(s1): 238-248.  
DING Hongjia and LIU Shijie. Progress in the study of weak magnetic measurement in China[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 1997, 40(s1): 238-248
- [3] BIAN Gang, XIA Wei, JIN Shaohua, *et al.* Research on the design of survey lines in a marine magnetic survey[J]. *The International Hydrographic Review*, 2014(11): 31-48.
- [4] PONCE D A, DENTON K M, and WATT J T. Marine magnetic survey and onshore gravity and magnetic survey, San Pablo Bay, northern California[R]. US Geological Survey, 2016.
- [5] DOU Z, HAN Q, and NIU X. An aeromagnetic compensation coefficient-estimating method robust to geomagnetic gradient[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(5): 611-615. doi: 10.1109/LGRS.2015.2512927.
- [6] DOU Z, HAN Q, and NIU X. An adaptive filter for aeromagnetic compensation based on wavelet multiresolution analysis[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,

- 2016, 13(8): 1069–1073. doi: 10.1109/LGRS.2016.2565685.
- [7] 吕金库. 海浪对有限深海水磁场影响的研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2012: 33–129.  
LÜ Jinku. Research on magnetic effect by waves at limited depth of the ocean[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2012: 33–129.
- [8] NELSON J B. Detecting wave-induced magnetic signals with an airborne magnetometer[R]. DRDC Atlantic TM, 2002: 209.
- [9] NELSON J B. Aeromagnetic noise during low-altitude flights over the Scotian Shelf[R]. DRDC Atlantic TM, 2002: 89.
- [10] WEAVER J T. Magnetic variations associated with ocean waves and swell[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(8): 1921–1929. doi: 10.1029/JZ070i008p01921.
- [11] LARSEN J C. An introduction to electromagnetic induction in the ocean[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1973, 7(3): 389–398. doi: 10.1016/0031-9201(73)90063-0.
- [12] LARSEN J C. The electromagnetic field of long and intermediate water waves[J]. *Journal of Marine Research*, 1971, 29: 28–45.
- [13] PODNEY W. Electromagnetic fields generated by ocean waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 2977–2990. doi: 10.1029/JC080i021p02977.
- [14] MACLURE K C, HAFER R A, and WEAVER J T. Magnetic variations produced by ocean swell[J]. *Nature*, 1964, 204(4965): 1290–1291. doi: 10.1038/2041290a0.
- [15] FRASER D C. Magnetic fields of ocean waves[J]. *Nature*, 1965, 206: 605–606. doi: 10.1038/206605a0.
- [16] FRASER D C. The magnetic fields of ocean waves[J]. *Geophysical Journal International*, 1966, 11(5): 507–517. doi: 10.1111/j.1365-246X.1966.tb03162.x.
- [17] KOZLOV A N, FONAREV G A, and SHUMOV L A. Results of observations of the magnetic field of sea waves[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 1972, 11(4): 633–634.
- [18] LILLEY F E M, HITCHMAN A P, MILLIGAN P R, *et al.* Sea-surface observations of the magnetic signals of ocean swells[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 159(2): 565–572. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02420.x.
- [19] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013: 10–36.  
WANG Shuqing and LIANG Bingchen. Wave Mechanics for Ocean Engineering[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013: 10–36.
- [20] 郑峰. 中国近海台风突然增强和衰亡的研究[D]. [博士学位论文], 北京: 中国气象科学研究院, 2015: 85–90.  
ZHENG Feng. A study of rapid intensification and dissipation of typhoons over coastal water of china[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015: 85–90.
- [21] 张自力. 海洋电磁场的理论及应用研究[D]. [博士学位论文], 中国地质大学, 2009: 45–119.  
ZHANG Zili. Theory research and application of ocean electromagnetic field[D]. [Ph.D. dissertation], China University of Geosciences, 2009: 45–119.
- [22] ZHU X and XIA M. Magnetic field induced by wake of moving body in wind waves[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 149: 109–118. doi: 10.2528/PIER14070706.
- [23] THÉBAULT E, FINLAY C C, BEGGAN C D, *et al.* International geomagnetic reference field: the 12th generation [J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, 67: 79. doi: 10.1186/s40623-015-0228-9.
- [24] DUFAY B, SAEZ S, DOLABDJIAN C, *et al.* Development of a high sensitivity giant magneto-impedance magnetometer: Comparison with a commercial flux-gate[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1): 85–88. doi: 10.1109/TMAG.2012.2219579.
- [25] CARUSO M J, BRATLAND T, SMITH C H, *et al.* A new perspective on magnetic field sensing[J]. *Sensors-Peterborough*, 1998, 15: 34–47.
- [26] BR Webworks, Status[OL]. <http://passageweather.com/>, 2006–2017.
- 费春娇: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为海洋环境磁场模型的建立以及噪声抑制方法.
- 吴佩霖: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为航空磁力仪运动平台校正及参数补偿方法.
- 张群英: 女, 1972年生, 研究员, 主要研究方向为微波遥感技术和信号处理技术.
- 方广有: 男, 1963年生, 研究员, 主要研究方向为超宽带电磁场理论及工程应用、超宽带雷达成像技术、微波成像新方法和新技术.
- 朱万华: 男, 1982年生, 副研究员, 主要研究方向为磁异常信号检测、磁场传感器关键技术.