

# 基于目标静电场的水中兵器制导方法研究

张 华<sup>1</sup>,王向军<sup>1</sup>,单潮龙<sup>1</sup>,张 树<sup>2</sup>,周思宁<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学电气与信息工程学院,湖北武汉 430033;2. 海军 91061 部队,海南三亚 572000;  
3. 海军 91287 部队,上海 200000)

**摘 要:** 如何在敌方目标的电场等效模型和所在海域深度未知的情况下,获得目标的速度和位置信息是当前水中兵器制导技术的一个难题.根据目标静电场的基本特性,提出了一种在目标静电场模型未知条件下求解运动目标速度和方向的方法.通过分析模型未知的目标的混合电偶极子电场分布,发现任意目标对称面上电场法向值为零,因此可以通过寻找此平面来实现对模型未知目标的制导.1:100 的船模实验表明,此方法能够较为精确的确定未知模型目标的运动速度和方向,即使引入地形误差,精度也可达到 97% 以上,能够满足水中兵器制导的要求.

**关键词:** 静电场; 目标; 电偶极子; 制导; 水中兵器

**中图分类号:** TM15      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0470-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.009

## Research of Guidance Method Based on the Electrostatic Field of Target for Underwater Weapon

ZHANG Hua<sup>1</sup>, WANG Xiang-jun<sup>1</sup>, SHAN Chao-long<sup>1</sup>, ZHANG Shu<sup>2</sup>, ZHOU Si-ning<sup>3</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;  
2. The Navy Unit No. 91061, Sanya, Hainan 572000, China; 3. The Navy Unit No. 91287, Shanghai 200000, China)

**Abstract:** How to obtain target speed and location in the case of unknown equivalent electric model and unknown model number of layers of the environment is a difficult problem of the current water weapon guidance technology. Through the analysis of the basic characteristics of the target electrostatic field, a way to obtain the motional target speed and direction in case of the unknown target equivalent electric model is proposed. Through the analysis of the electrical field distribution produced by mixture electric dipole of unknown equivalent model, the electric field normal value of the target symmetrical plane was found to be zero. Therefore, we can achieve model unknown target guidance by finding this plane. 1:100 ship model was used in laboratory experiment, and the results of the experiment shows that the target speed and direction of the unknown model can be obtained in this way. The accuracy reached more than 97%, even if the terrain error was introduced, which can meet the requirements of engineering applications.

**Key words:** electrostatic field; goal; electric dipole; guided; water weapons

### 1 引言

由于现代舰船在消磁、消声方面的进展,利用声场、磁场探测舰船越来越困难,因而对舰船电场的探测目前受到许多国家的关注<sup>[1,2]</sup>,俄、美、英、法、瑞典等国较早地开展了对舰船电场探测技术的研究,并将研究成果应用于反潜时的潜艇探测,以及设计电场引信水雷,当水雷传感器探测到舰船电场并进行判断后动作爆炸<sup>[3,4]</sup>,但公开发表的资料很少,已有的文献主要集中于舰船电场模型的探索<sup>[5,6]</sup>.

目前国内将电场应用于水下水中兵器制导方面还没有研究成果公开发表,与之相近的研究成果主要有根据轴频电场对目标进行识别和定位:文献[7]建立了轴频与目标类型的关系数据库,得到了利用轴频电场可以实现目标识别的结论,但要准确实现目标识别,必需建立数据丰富又准确的舰船轴频与类型的关系数据库,而且在目标采取了对抗措施,如减速通过布雷区时,所得到的识别结论是不准确的.文献[8]提出了在准近场条件下,只需在水中布置两个双轴电场传感器测得相应位置的电场强度,运用所提出的反演定位方法和迭代算

法,就能精确地确定偶极子在海水中的位置,但该方法只能运用在空气、海水两层模型时,即深海条件下,且目标模型必须为已知电偶极距的水平偶极子.但是实际中往往是,敌方目标的电场等效模型和所处环境的模型层数未知,要使得电场信号应用于军事领域,必须解决上述条件下的水中兵器实现制导的技术难题.

## 2 基于镜像法的水中目标混合电偶极子模型的电场分布

目标的任意模型的电场分布,都可以由场源处的水平和垂直电偶极子的电场叠加来表示<sup>[9,10]</sup>,在空气、海水、海床三层模型中,采用圆柱坐标 $(O, \rho, \varphi, z)$ ,以 $z=0$ 为海平面,区域 $0 < z < D$ 为海水,区域 $z > D$ 为海床.偶极子源位于点 $S(0,0,h)$ 处,且 $h < D$ .设 $S$ 点处的水平电偶极子的偶极矩大小为 $P_1$ ,方向沿 $x$ 轴正向,垂直电偶极子的偶极矩大小为 $P_2$ ,方向沿 $z$ 轴正向.测量点位于 $M(\rho, \varphi, z)$ 处,且 $z < D$ ,如图1所示:

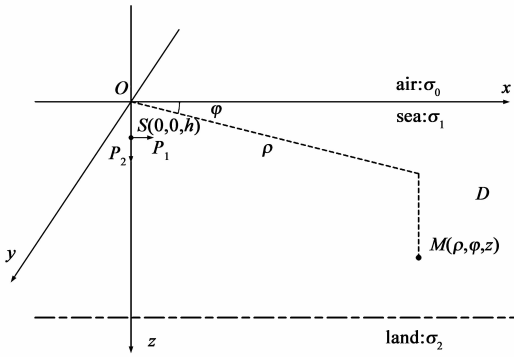


图1 三层模型中的测量点位置

根据镜像法原理,三层模型中电偶极子的电场等于无穷多个镜像位置的电偶极子电场的叠加,在图1中,源点 $S(0,0,h)$ 处的电偶极子 $P_1$ 与 $P_2$ 在场点 $M(\rho, \varphi, z)$ 产生的电场 $E_1$ 与 $E_2$ 分别为<sup>[11,12]</sup>:

$$E_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_{1n} [(2 - 3\sin^2\varphi)\rho^2 - l_{zn}^2]}{4\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \mathbf{a}_x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3P_{1n}\rho^2\sin 2\varphi}{8\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \mathbf{a}_y + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3P_{1n}\rho\cos\varphi l_{zn}}{8\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \mathbf{a}_z \quad (1)$$

$$E_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3P_{2n}\rho l_{zn}\cos\varphi}{4\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \mathbf{a}_x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3P_{2n}\rho l_{zn}\sin\varphi}{4\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \mathbf{a}_y + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_{2n}(2l_{zn}^2 - \rho^2)}{4\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \mathbf{a}_z \quad (2)$$

其中 $l_{z0}$ 为源点 $S$ 与场点 $M$ 在 $z$ 轴方向上的垂直距离, $l_{zn}$ 为第 $n$ 个镜像位置的电偶极子与场点 $M$ 在 $z$ 轴方向上的垂直距离, $P_{1n}$ 与 $P_{2n}$ 分别为第 $n$ 个镜像位置的水平与垂直电偶极子的偶极矩大小, $\sigma_1$ 为海水电导率.

## 3 目标运动速度及方向的确定

设目标速度为 $v'$ ,方向沿 $x$ 轴正向.将编号为 $M_1$ 到 $M_9$ , $C_1$ 到 $C_9$ 的18个三分量传感器排成两行,行距为 $L$ ,相邻两传感器间的距离为 $l$ ,置于深度为 $z$ 的平面上,传感器所成直线与 $x$ 轴正向的夹角为 $\theta$ ,如图2所示:

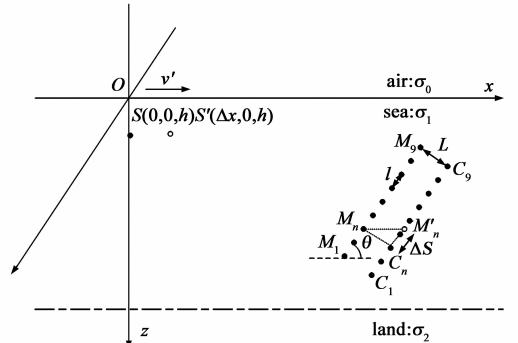


图2 传感器的位置分布示意图

当目标在深度为 $h$ 的水平面上运动时,由于空气与海床,海床与海水的分界面均为无限大,故其电场分布只与测量点和目标的相对位置有关,而与目标所处位置无关,假设以运动目标为原点的局部坐标系中静电场满足函数 $E(\rho, \varphi, z, t)$ .当 $t=0$ 时,目标在 $S$ 点,测量点 $M_n$ 在以 $S$ 为原点的坐标系中的坐标为 $(\rho_n, \varphi_n, z_n)$ .则按照假设,点 $M_n$ 的电场 $E_n = E(\rho_n, \varphi_n, z_n, 0)$ .根据几何原理,一定存在一个时刻 $t=t'$ ,此时目标运动到了 $S'$ 点,必然存在 $C_1$ 到 $C_9$ 所在直线上的一点 $M'_n$ ,在以 $S'$ 为原点的坐标系中的坐标为 $(\rho_n, \varphi_n, z_n)$ ,按照假设,点 $M'_n$ 的电场 $E'_n = E(\rho_n, \varphi_n, z_n, t')$ .因为静电场不随时间变化,故 $E_n = E'_n$ .即目标从 $S$ 点以速度 $v'$ 移动到 $S'$ 的过程中和 $M_n$ 点电场值相同的点将以相同的速度沿线段 $M_nM'_n$ 移动,最终会移动到 $M'_n$ 点,任意一点 $M_n$ 都存在这样的一点 $M'_n$ .换言之,如果将传感器的 $C$ 行和 $M$ 行编号作为横坐标,测量得到的电场某一任意方向上的分量作为纵坐标,并对离散点进行插值绘图,可以发现传感器 $C$ 行所得图形,在某一时刻 $t=t'$ ,和 $M$ 行所得图形形状相同,但存在一个大小为 $\Delta S$ 的平移.所绘图形与目标速度大小 $v'$ 以及速度方向和 $x$ 轴正向的夹角 $\varphi$ 的关系为:

$$v' = \frac{\sqrt{\Delta S^2 + L^2}}{t'} \quad (3)$$

$$\varphi = \theta - \arctan \frac{\Delta S}{L} \quad (4)$$

根据相对运动原理,当传感器阵列以速度  $v_0$  运动时,所求得速度  $v'$  为相对速度,此时的目标速度  $v$  为:

$$v = v_0 + v' \quad (5)$$

由以上讨论可知,目标速度  $v$  的获得,与目标静电场分布函数  $E(\rho, \varphi, z)$  无关,与所处的环境是浅海模型以及深海模型无关,因此此方法具有很大的应用范围.且水中兵器或者发射平台的形状往往是近似圆柱形,可以很容易的将两行传感器阵列布置在上面.

#### 4 基于电场的水中兵器制导实现

假设目标的电场模型为前面所述的混合电偶极子模型,目标速度为  $v'$ ,水平电偶极子  $P_1$  方向沿目标速度方向,将目标速度方向设为  $x$  轴正向,坐标原点固定在运动目标上,建立坐标系.将编号为  $M_1$  到  $M_9$ ,  $C_1$  到  $C_9$  的 18 个三分量传感器沿水中兵器两侧排成两行.如图 3 所示:

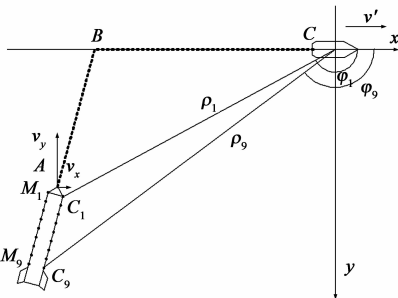


图3 水中兵器制导路线图

水中兵器的制导分为  $AB$ 、 $BC$  两段,刚开始水中兵器在  $A$  点静止,由式(3)、(4)方法,可获得目标的相对于水中兵器的速度  $v'$  的大小和方向.此时可以将水中兵器指向垂直于速度  $v'$  的方向,然后根据  $C_1$  和  $C_9$  两个传感器的电场测量值的大小,来确定攻击方向是  $y$  轴正向还是负向.设  $C_1$  的测量值为  $E_1(\rho_1, \varphi_1, z)$ ,  $C_9$  的测量值为  $E_9(\rho_9, \varphi_9, z)$ ,由于  $\rho_1, \rho_9$  远远大于水中兵器的尺寸,故  $\varphi_1 = \varphi_9$ ,所以离目标较近的一端测量值的绝对值较大.可以根据测量值判断攻击方向,如图 3 所示,当  $|E_1| > |E_9|$  时攻击速度  $y$  轴分量  $v_y$  沿  $y$  轴负向,当  $|E_1| < |E_9|$  时攻击速度  $y$  轴分量  $v_y$  沿  $y$  轴正向.为了防止目标突然加速水中兵器脱离有效电场区域,攻击时水中兵器不仅在垂直于速度  $v'$  的方向有速度,在沿速度  $v'$  的方向也有速度  $v_x = v' + \Delta v$ ,  $\Delta v$  的值为一个较小正值.此时水中兵器将沿  $AB$  段进行攻击,在前进过程中可以根据测得的相对速度  $v'$ ,实时对水中兵器前进方向进行调整.并将传感器测得电场值  $E$  分解到垂直于  $v'$  的方向上.由式(1)、(2)可以求得垂直于  $v'$  的方向上的电场分量值为:

$$E_y = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3P_{1n}\rho^2 \sin 2\varphi}{8\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3P_{2n}\rho l_{zn} \sin \varphi}{4\pi\sigma_1(\rho^2 + l_{zn}^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (6)$$

当运动到  $B$  点时,  $\varphi = \pi$  故  $E_y = 0$ .即存在一个  $E_y = 0$  的平面,可以根据  $E_y$  值由正变负或由负变正判断水中兵器到达  $B$  点.

当水中兵器运动到  $B$  点以后,测量相对速度  $v'$ ,并将水中兵器速度方向指向相对速度  $v'$  的方向,此时水中兵器将沿  $BC$  段前进.在沿  $BC$  段前进过程中,当目标速度突然变化时,可以通过式(3)、(4)方法,实时测得目标相对与水中兵器在  $y$  轴方向的相对速度  $\Delta v'_y$ ,可以根据相对速度  $\Delta v'_y$  调节水中兵器速度方向,使得水中兵器始终沿  $BC$  段前进.由电场知识可知,电场线总是由目标发出或者指向目标,在  $BC$  段上有  $E_y = 0$ ,故电场线是沿  $BC$  段的,此时将水中兵器速度指向电场线方向,也能实现制导.当水中兵器偏离  $BC$  段一个较小的量  $\Delta y$  时,代入模型可以求得当  $\Delta y > 0$  时  $E_y > 0$ ,当  $\Delta y < 0$  时  $E_y < 0$ ,且  $|\Delta y|$  越大  $|E_y|$  越大,这样便可将  $E_y$  作为控制量,对水中兵器位置形成负反馈的闭环控制系统,实现精确打击.

#### 5 目标速度获得实验

无磁性实验水池的尺寸为长 20m、宽 20m、深 1.5m,实验所用船模依据某型舰船按 1:100 比例缩小制造,按照式(3)、(4)的方法对速度及方向进行求解,以验证此方法的可行性.设  $t = 0$  目标位于坐标系的原点,目标速度  $v'$  为 2m/s,方向沿  $x$  轴正向.将编号为  $M_1$  到  $M_9$ ,  $C_1$  到  $C_9$  的 18 个三分量传感器排成两行行距为  $L$  为  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  m,相临两传感器间的距离  $l$  为  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  m,置于深度为  $z$  为 1.5m 的平面上,传感器所成直线与  $x$  轴正向的夹角为  $\theta = 45^\circ$ ,  $M_1$  坐标为 (10, 10, 1.5),如图 4 所示:

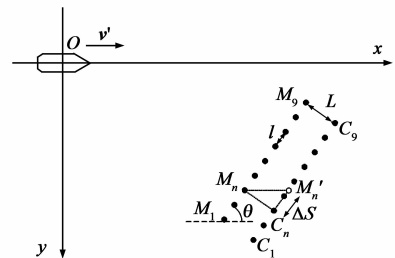


图4 目标速度获得实验示意图

可设测量值  $E_M(n, t)$  表示  $t$  时刻  $M$  列编号为  $n$  的传感器的电场测量值大小,则  $M$  列的传感器  $t$  时刻测量值按其编号  $n$  形成一数列  $E_M(n, t)$ ,  $n = 1, 2, \dots, 9$ ,对数列按三次样条插值公式进行插值<sup>[13~15]</sup>,如下式(7):

$$E_M(x, t) = \frac{[x - (n+1)]^3}{6} m_n + \frac{(x - n)^3}{6} m_{n+1}$$

$$-(E_M(n, t) - \frac{m_n}{6})^{x-n-1} + (E_M(n+1, t) - \frac{m_{n+1}}{6})^{x-n},$$

$$x \in [E_M(n, t), E_M(n+1, t)] \quad (7)$$

其中  $m_n (n=1, 2, \dots, 9)$  为带入自然边界条件可计算得到的三次样条插值系数. 将插值后的函数绘图, 虚线为  $M_1$  到  $M_9$  号传感器  $t=0$  时刻静电场值(此值为任意方向电场分量均可, 这里取  $x$  轴方向分量), 实线为  $C_1$  到  $C_9$  号传感器不同时刻时静电场的值, 如图 5 所示:

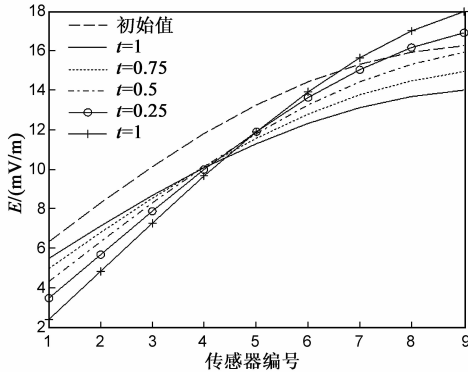


图5 M或C列传感器各时刻测量值曲线

由前文讨论可知, 只需找出各实线中和虚线最相似的曲线, 并求出曲线的平移量  $\Delta S$  和最相似曲线出现的时间  $t'$ , 便可求得目标速度. 取虚线图形横坐标为  $[3, 7]$  的一段为相似性比较基准, 比较时间间隔为  $0.01s$ , 每次比较的平移量为  $0.01l$ , 相似性比较公式如下:

$$e(k, t) = \int_3^7 [E_C(x - 2l + 0.01kl, 0) - E_M(x, t)]^2 dx \quad (8)$$

根据目标速度的可能范围, 确定  $t, k$  的范围, 这里  $t = 0, 0.01, 0.02, \dots, 1, k = 1, 2, 3, \dots, 400$ , 带入数据可以求得当  $t = 0.49, k = 297$  时,  $e(k, t) = 0.71$  值最小, 相似性最大, 此时  $\Delta S = -2l + 0.01kl = 0.97l$ . 按式(3)、(4)可以求得  $v = 2.015m/s$ , 方向  $\varphi = 0.872^\circ$  和目标的真实速度相比求解出的速度具有很高的准确度, 其精度达到 99% 以上. 对各种水面水下目标模型进一步的实验表明, 即使在船模下方池底放置  $3m \times 3m \times 0.1m$  的尼龙板模拟地形微弱变化而引起的误差, 其精度也达 97%, 因此提出的方法对引入的地形误差及不同参数模型有很高的鲁棒性. 对于文献[8]中求解目标位置信息的方法, 用水平电偶极子在深海条件并引入相同的地形误差时 Ansoft 的电场仿真值, 对其进行定位, 通过两次定位求解目标速度, 其它条件与前文实验相同. 表 1 所示为不同实验条件、不同制导方式所求得结果误差.

由上表可知, 当环境模型变化时, 文献[8]中定位方法的误差急剧增大, 其对环境参数改变的鲁棒性不高. 通过实验可知文献[8]所述方法鲁棒性不如本文所

述方法.

表 1 不同实验条件、不同制导方式所求得结果误差对比表

目标电场源	求解方法	引入地形误差	速度大小真实值(m/s)	速度大小计算值(m/s)	速度方向真实值(°)	速度方向计算值(°)	速度大小相对误差(%)
I型水面船模	本文	否	2	1.960	0	1.169	2
II型水面船模	本文	否	2	2.015	0	0.872	0.7
I型水下船模	本文	否	2	1.990	0	1.469	0.5
I型水面船模	本文	是	2	2.060	0	-0.567	3
Ansoft 模拟水平偶极子	文献 [8]	是	2	1.761	0	27.343	11.9

## 6 结论

通过前文中的理论推导和实验分析可知, 文中所提出的目标速度和方向的求解方法是完全可行的, 通过实验发现其精度达到 99% 以上, 且通过多次求解平均值的方法可进一步提高精度. 进一步的模型实验表明, 即使引入微小地形误差, 精确度也达到 97% 以上. 且无论目标是水平还是垂直电偶极子, 无论它们如何叠加, 所在海域是浅海还是深海模型, 所提出的基于速度求解方法的制导方法均适用, 因而在敌方目标电场模型未知的情况下, 文中所述制导方法能够达到预期目的. 但是实际海洋电场环境干扰类型复杂, 海底地形性千差万别, 实际水中目标并非完全左右对称, 因此使用本文方法对真实目标进行制导的有效性, 还需进一步的研究与实验.

## 参考文献

- [1] AYDIN A, STIFFEL P B, et al. High sensitivity calibrated electric field meter based on the electric potential sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(12): 1190 - 1194.
- [2] WU Ifong, ISHIGAMI Shinobu, et al. Calibration of electric field probes with three orthogonal elements by standard field method[J]. Electronics Express, 2009, 6(14): 1032 - 1038.
- [3] U W Sdalcof. Theory of Automatic Control of Mine-counter Mine Weapons [M]. St. Petersburg, Russia: Naval Institute, 2005. 192 - 217. (in Russian)
- [4] A. W. Kalalof. Theory of Sweeping Weapons [M]. St. Peters-

- burg, Russia: Naval Institute, 2005. 241 – 257. (in Russian)
- [5] RIAH Z, BAUDRY D, et al. Post-processing of electric field measurements to calibrate a near-field dipole probe[J]. Measurement and Technology, 2011, 5(2): 29 – 36.
- [6] MACH D M, KOSHAK W J. General matrix inversion technique for the calibration of electric field sensor arrays on aircraft Platforms[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, 24(9): 1576 – 1587.
- [7] 陈雪 ■, 程锦房. 基于舰船轴频电场的目标识别[J]. 水雷战与舰船防护, 2005, 2(3): 38 – 42.
- [8] 卢新城, 龚沈光, 等. 海水中时谐水平电偶极子的准近场定位[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(3): 331 – 334.
- LU Xin-cheng, GONG Shen-guang, et al. Quasi-near field localization of a time-harmonic HED in sea water[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science&Engineering), 2005, 29(3): 331 – 334. (in Chinese)
- [9] 卢新城, 龚沈光, 等. 深海中极低频时谐垂直电偶极子电磁场的解析解[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 6(6): 746 – 749.
- LU Xin-cheng, GONG Shen-guang, et al. Analytical solutions of electromagnetic fields produced by an ELF time-harmonic VED in deep sea[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2003, 6(6): 746 – 749. (in Chinese)
- [10] 毛伟, 张宁, 等. 在三层介质中运动的时谐水平偶极子产生的电磁场[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2077 – 2081.
- Mao Wei, Zhang Ning, et al. The EM fields produced by a moving horizontally-directed time-harmonic dipole in three-layer medium[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 2077 – 2081. (in Chinese)
- [11] 刘胜道. 舰船水下电场的测试技术与电偶极子模型研究[D]. 武汉, 海军工程大学, 2002.
- LIU Sheng-dao. Research on Measuring Technique and Electric Dipole Model of Ship's Underwater Electric Field[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2002. (in Chinese)
- [12] 陈聪, 李定国, 等. 基于拉氏方程的舰船静电电场深度换算[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2025 – 2029.
- CHEN Cong, LI Ding-guo, et al. Research on the extrapolation of the static electric field of ships based on Laplace equation [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2025 – 2029. (in Chinese)
- [13] 李根强. 基于三次样条插值的采样数据光滑曲线形成法[J]. 计算技术与自动化, 2001, 20(1): 59 – 62.
- LI Gen-qiang. Smooth curve output for dynamic process sampling data based on cubic polynomial interpolation[J]. Computing Technology and Automation, 2001, 20(1): 59 – 62. (in Chinese)
- [14] 高小科, 邓子辰, 等. 基于三次样条插值的精细积分法[J]. 振动与冲击, 2007, 26(9): 75 – 77.
- GAO Xiao-ke, DENG Zi-chen, et al. A high precise direct integration based on cubic spline interpolation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(9): 75 – 77. (in Chinese)
- [15] 陈涌频, 聂在平, 等. 高效求解任意非常规目标电磁散射的修正电场积分方程方法[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 562 – 565.
- CHEN Yong-pin, NIE Zai-ping, et al. Improved electric field integral equation method for efficiently solving electromagnetic scattering from arbitrary irregular targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 562 – 565. (in Chinese)

#### 作者简介



**张 华** 女, 1984 年 2 月出生于湖北省黄冈市, 现为海军工程大学在读博士, 主要研究方向为电磁环境与防护工程。

E-mail: zhhiman@163.com



**王向军** 男, 1973 年出生于河北省唐山市, 现为海军工程大学副教授, 博士后, 主要研究方向为电磁环境与防护工程。



**单潮龙** 男, 1964 年出生于浙江省临海市, 现为海军工程大学教授, 博士, 主要研究方向为电力系统电磁兼容技术。

**张 树** 男, 1987 年 1 月出生于四川省宜宾市, 硕士, 主要研究方向为电磁环境与防护工程。

**周思宁** 女, 1984 年 5 月出生于江西省九江市, 硕士, 主要研究方向为微波材料。