

运动舰船切割地磁场在海水中产生的电场计算

孙明, 龚沈光, 周骏, 卢新城

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

摘要: 根据经典的 Sommerfeld 赫兹矢量分别推导出了空气和海水中水平直流电流元的电磁场表达式. 在此基础上, 根据瞬态连续性原理, 推导出了运动舰船切割地磁场磁力线而产生的感应电场. 以日本宙斯盾导弹驱逐舰“金刚”号为例, 计算了它的感应电场大小及空间分布情况. 结果表明, 航速 20kn 时在离船壁 5m 左右能产生几个毫伏/米的感应电场, 在目前的检测技术下该电场是完全可测的, 并且该电场在空间分布有明显的特征.

关键词: 感应电场; 运动舰船; 赫兹矢量; 地磁场

中图分类号: TM151 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0464-04

Calculation of the Electric Field Generated by Vessel Moving Across Geomagnetic Field in Seawater

SUN Ming, GONG Shen-guang, ZHOU Jun, LU Xin-cheng

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: According to typical Sommerfeld Hertz vector, the electromagnetic field expressions are derived when horizontal DC current element is located in air half-space and seawater half-space respectively. Based on the result, the induced electric field of vessel moving across geomagnetic field is derived on the basis of transient state continuity theory. Take one Japanese missile destroyer for example, the magnitude and spatial distribution characteristics of its induced electric field are analyzed. The result indicates that the magnitude of electric field is several millivolt per meter at about five meters from hull when the vessel sails at a velocity of 20kn. According to the analysis, the induced electric field of vessel moving across geomagnetic field can be measured for certainty and its spatial distribution has apparent characteristics.

Key words: induced electric field; moving vessel; Hertz vector; geomagnetic field

1 引言

舰船电场是舰船的一个重要目标特性,早在五六十年代,前苏联就装备了利用舰船电场作为控制场的水雷非触发电引信,如 1957 年装备的 型锚雷、1960 年装备的 型深水锚雷和 1965 年装备的 -2 型反潜锚雷都是水下电场引信水雷;美国、英国和加拿大等国海军,也已经把消除舰船电场列入其舰船建造规范^[1],而国内对舰船电场的研究才刚起步,还没有达到实用阶段.

无论是运动还是静止着的舰船周围,都存在着舰船电场.产生电场的因素较多,但占主导成分的是舰船腐蚀电场和由电磁感应作用产生的舰船电场^[2].只要舰船运动,由电磁感应产生的电场就必然存在,它是舰船很难隐藏的目标特性.由于舰船是由钢铁建造而成的,当它以一定的速度航行时其金属船体必将切割地磁场磁力线而产生电动势,这一电动势将在空间产生电场,该电场是电磁感应产生电场的重要组成部分.下面根据提出的赫兹矢量方法对舰船切割地磁场磁力线产生的电场进行理论计算,这将为建立完整的舰船电场等效模型

打下基础.

2 水平电流元产生的电磁场

对于水平电偶极子的辐射场的研究工作最早始于 Sommerfeld (1906). 其后,很多学者在不同条件下对水平电偶极子的辐射场做了进一步的研究.其中, J R Wait (1961) 对水平电偶极子和场点同时位于导电媒质中和空气中这两种情况下,偶极子产生的电磁场进行了推导^[3]; P R Bannister 和 R L Dube (1978) 利用改进的镜像理论推导了水平电偶极子和场点同时位于导电媒质中以及水平电偶极子在导电媒质中而场点在空气中这两种情况下,偶极子产生的电磁场^[4].我们感兴趣的是直流水平电流元分别位于空气和海水中时,在海水中产生的电磁场的分布情况.当然,我们可以利用 Wait 和 Bannister 的方法来得到,但推导过程比较复杂.经分析发现,对于直流电流元,我们可以根据经典的 Sommerfeld 赫兹矢量直接推导出它在空间的电磁场分布,该方法既简洁又直观.

2.1 水平电流元位于水面以下 ($z > 0, h = 0$)

假设海水为均匀媒质,电导率为 σ ,介电常数为 ϵ ,并且

占据半空间 $z > 0$. 空气的介电常数为 ϵ_0 , 并且占据半空间 $z < 0$. 整个空间的磁导率为 μ_0 , 电流元沿着 x 轴方向位于 $(0, 0, h)$ 处. 根据 Sommerfeld 给出的水平电偶极子赫兹矢量^[3], 可得到上述坐标系中直流电流元的赫兹矢量为:

$$x^{wdl} = \frac{Idl}{4} \left[\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} + e^{-\gamma(z+h)} J_0(\gamma R_0) \right] d \quad (1)$$

$$y^{wdl} = 0 \quad (2)$$

$$z^{wdl} = \frac{Idl \cos \phi}{4} e^{-\gamma(z+h)} J_1(\gamma R_0) d \quad (3)$$

其中: $R_0^2 = x^2 + (z-h)^2$ (偶极子到场点的距离), $R_1^2 = x^2 + (z+h)^2$ (镜像偶极子到场点的距离), ϕ 为场点在 xoy 平面内投影点的象限角, $J_0(\gamma R_0)$ 、 $J_1(\gamma R_0)$ 分别为零阶、一阶贝塞尔函数. 对于直流电流元, 其电磁场与赫兹矢量有如下关系表达式:

$$E = \nabla \nabla \cdot \quad (4)$$

$$H = \nabla \times \quad (5)$$

只讨论感兴趣的电场情况, 根据式(4)可得各分量电场表达式如下:

$$E_x^{wdl} = \frac{Idl \cos \phi}{4} \left[\frac{3x^2}{R_0^5} + \frac{3z^2}{R_1^5} - \frac{1}{R_0^3} - \frac{1}{R_1^3} \right] \quad (6)$$

$$E_\phi^{wdl} = \frac{Idl \sin \phi}{4} \left[\frac{1}{R_0^3} + \frac{1}{R_1^3} \right] \quad (7)$$

$$E_z^{wdl} = \frac{3 Idl \cos \phi}{4} \left[\frac{z-h}{R_0^5} + \frac{z+h}{R_1^5} \right] \quad (8)$$

2.2 水平电流元位于空气中 ($z > 0, h > 0$)

同理, 根据给出的 Sommerfeld 赫兹矢量可得到直流电流元的赫兹矢量为:

$$x^{adl} = \frac{Idl}{4} e^{-\gamma(z-h)} J_0(\gamma R_0) d = \frac{Idl}{4} \quad (9)$$

$$y^{adl} = 0 \quad (10)$$

$$z^{adl} = \frac{Idl \cos \phi}{4} \left[1 - \frac{z-h}{R_0} \right] \quad (11)$$

直流电流元的各分量电场表达式如下:

$$E_x^{adl} = \frac{Idl \cos \phi}{2} \left(\frac{3x^2}{R_0^5} - 1 \right) \quad (12)$$

$$E_\phi^{adl} = \frac{Idl \sin \phi}{2} \frac{1}{R_0^3} \quad (13)$$

$$E_z^{adl} = \frac{3 Idl \cos \phi (z-h)}{2} \frac{1}{R_0^5} \quad (14)$$

3 运动舰船产生的感应电场

舰船是由钢铁建造而成的, 当它航行时将切割地磁场磁力线产生感应电场. 现在假设舰船航行时的海况为低级海况, 舰船的吃水线相对固定, 也不考虑舰船的横摇、纵摇等情况产生的涡流电场的影响, 同时还假设舰船的防护涂层完好, 也就是说防护层没有脱落也没有渗水. 因为海水是导体, 运动船体切割地磁场磁力线产生的电势差, 在没有防护涂层的情况下, 将会在海水中产生传导电流, 水下船体表面上任一点都会有电流流向周围的海水, 因而在船体内形成一不均匀电流, 显然

此时舰船在空间产生的电磁场和有防护涂层时的情况是不一样的. 本文主要对防护涂层完好的舰船切割地磁场产生的感应电场进行理论计算. 我们先认为舰船为钢铁实体, 当舰船在地磁场运动时, 很快能达到静电平衡状态, 在舰船两舷有电荷积累形成电势差 $B_z v$, 现假设舰船的运动速度突然变为零, 积累的电荷在瞬间仍然存在, 将会在舰船内形成短暂的放电电流, 电流密度为 $\gamma B_z v$, 而在速度从 v 变成零的这一瞬间舰船周围的电场是不会突变的, 因而舰船在空间产生的电磁场就等价于船体内体电流密度为 $\gamma B_z v$ 的电流所产生的电磁场.

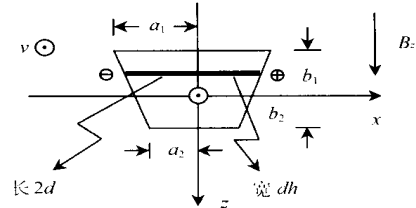


图 1 舰船坐标系

首先, 我们来建立舰船的坐标系, 为了便于建模, 近似假设舰船为横截面为等腰梯形的柱体, 为了计算方便, 现规定坐标系为: x 轴为横轴, 平行于甲板面且垂直于首尾线, 指向左舷为正; y 轴为纵轴, 平行于首尾线, 指向船首为正; 垂直方向为 z 轴, 它垂直于甲板面, 向下为正; xoy 平面为吃水面. 图 1 给出规定坐标系中沿 y 轴负方向的舰船纵向往视图, 设水上船长平均值为 $2c$, 水下船长平均值为 $c + c_1$, 不考虑航速与航向的夹角. 对于密度为 $\gamma B_z v$ 的体电流可将它分成许多厚为 dh 的面电流, 面电流密度为 $\gamma B_z v dh$, 再将面电流分成许多与 x 轴平行宽为 dw 的线电流, 线电流密度为 $\gamma B_z v dh dw$, 线电流长度为 $2d$, 在吃水线以上 d 为 $a_1 - (b_1 + h)(a_1 - a_2)/(b_1 + b_2)$, 在吃水线以下 d 为 $a_2 + (b_2 - h)(a_1 - a_2)/(b_1 + b_2)$, 下面分两部分来讨论船体切割磁力线产生的感应电场.

3.1 水下船体产生的感应电场

对于水下船体所划分的任意线电流, 中心点位置为 $(0, w, h)$, 可利用前面对水下水平电流元的讨论结果, 得到它在水下产生的电场表达式, 将任意线电流电场对 w 进行积分求得任意面电流产生的电场, 再将任意面电流电场对 h 进行积分才能求得水下船体的电场, 下面直接给出推导结果.

$$E_x^w = \frac{\gamma B_z}{2} \int_{h=0}^{h=b_2} \int_{w=-c}^{w=c_1} \left[\frac{(\frac{s8}{s10})^3 - \frac{s8}{s10} + (\frac{s9}{s11})^3 - \frac{s9}{s11}}{s1 - 4hz} + \frac{(\frac{s8}{s12})^3 - \frac{s8}{s12} + (\frac{s9}{s13})^3 - \frac{s9}{s13}}{s1 + 4hz} \right] dh dw \quad (15)$$

$$E_y^w = \frac{\gamma B_z}{4} \int_{h=0}^{h=b_2} \int_{w=-c}^{w=c_1} (\sin \phi - w) \left(\frac{1}{s10} + \frac{1}{s12} - \frac{1}{s11} - \frac{1}{s13} \right) dh dw \quad (16)$$

$$E_z^w = \frac{\gamma B_z}{4} \int_{h=0}^{h=b_2} \int_{w=-c}^{w=c_1} \left[(z-h) \left(\frac{1}{s10} - \frac{1}{s11} \right) + (z+h) \left(\frac{1}{s12} - \frac{1}{s13} \right) \right] dh dw \quad (17)$$

其中: $s_1 = 2h^2 + 2w^2 + 2z^2 + 2 - 2\cos(2\phi) - 4w \sin \phi$,
 $s_3 = s_2 + 2hz$, $s_5 = s_2 - 2hz$, $s_2 = d^2 + h^2 + w^2 + z^2 + 2 - 2w \sin \phi$,

$$s_8 = d - \cos \phi, s_9 = d + \cos \phi, s_{10} = \sqrt{s_5 - 2d \cos \phi},$$

$$s_{11} = \sqrt{s_5 + 2d \cos \phi}, s_{12} = \sqrt{s_3 - 2d \cos \phi},$$

$$s_{13} = \sqrt{s_3 + 2d \cos \phi}, d = a_2 + (b_2 - h)(a_1 - a_2)/(b_1 + b_2)$$

3.2 水上船体产生的感应电场

同样,我们利用前面推导的空气中水平电流元的讨论结果,得到水上船体产生的感应电场表达式如下:

$$E_x^a = \int_{h=-b_1}^{h=0} \int_{w=-c}^{w=c} \frac{2vB_z(s_8^3/s_{10}^3 - s_8/s_{10} + s_9^3/s_{11}^3 - s_9/s_{11})}{s_1(s_1 - 4hz)} dh dw \quad (18)$$

$$E_y^a = \int_{h=-b_1}^{h=0} \int_{w=-c}^{w=c} \frac{2vB_z(\sin \phi - w)}{2s_1} (\frac{1}{s_{10}^3} - \frac{1}{s_{11}^3}) dh dw \quad (19)$$

$$E_z^a = \int_{h=-b_1}^{h=0} \int_{w=-c}^{w=c} \frac{2vB_z}{2s_1} (z - h) (\frac{1}{s_{10}^3} - \frac{1}{s_{11}^3}) dh dw \quad (20)$$

式中 $s_1, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}$ 的表达式同前,其中 d 的表达式现在为 $a_1 - (b_1 + h)(a_1 - a_2)/(b_1 + b_2)$.

3.3 整个船体产生的感应电场

将水上和下水船体在海水中产生的感应电场进行迭加,就得到在我们所规定的坐标系中整个船体切割地磁场磁力线而产生的感应电场 E . 而习惯的坐标系规定为: x 轴为纵轴,平行于首尾线,指向船首为正; y 轴为横轴,平行于甲板面且垂直于首尾线,指向右舷为正;垂直方向为 z 轴,它垂直于甲板面,向下为正; xoy 平面为吃水面. 为了符合习惯,将 E 转换到我们习惯的坐标系中,得到感应电场 E . E 实际上是假定舰船为钢铁实体模型时的电场,因而需将其结果乘以一比例系数,这样处理后的结果才是实际舰船产生的电场. 比例系数定义为:

$$= \frac{\text{建造舰船实际使用钢铁的体积 } V_1}{\text{把实际舰船看作钢铁实体模型时的体积 } V_2}$$

因此,实际求得的舰船感应电场为:

$$E_x = \alpha \times (E_x^a + E_x^w) \quad (21)$$

$$E_y = \alpha \times (-E_y^a - E_y^w) \quad (22)$$

$$E_z = \alpha \times (E_z^a + E_z^w) \quad (23)$$

4 舰船感应电场的数值计算结果

下面以日本宙斯盾导弹驱逐舰“金刚”号为例来计算它的感应电场大小. 如前所述,为了简化模型,将“金刚”号驱逐舰近似看作截面为等腰梯形的柱体,根据“金刚”号驱逐舰的性能参数^[5],计算出简化模型中的各参数值为:

$$a_1 = 10.5(\text{m}), b_1 = 5.8(\text{m}), c = 77.75(\text{m}), v = 20(\text{kn})$$

$$c_1 = 66.37(\text{m}), a_2 = 8.5(\text{m}), b_2 = 3.6(\text{m}), \alpha = 2.06\%$$

$$\beta_1 = 2.02 \times 10^4(\text{A} \cdot \text{m})^{-1}, B_z = 5 \times 10^{-5}(\text{T}), \beta_2 = 5(\text{A} \cdot \text{m})^{-1}$$

下面给出电场各分量在 $z = 12(\text{m})$ 平面内的分布情况,如图 2 所示,从图中可看出电场的空间分布有明显的特性. 图 2 中, (a) 为舰船 x 分量电场的分布,在舰船的两头形成比较大的正负峰,峰值位于船体下部接近舰的两头 ($x = \pm 65.5\text{m}$),最大值为 1.6mV/m ,中间位置有一些小的正负峰出现. 另外,该电场分布以 $y = 0$ 为对称平面成反对称分布,沿 y 轴方向,相同正横距离处,电场值大小相等方向相反. 我们来定性说明计算出的该电场分布特性是否符合实际情况. 在假定地磁场方向垂直向下的情况下,舰船左舷积累正电荷,右舷积累负电荷,单个电偶极子在舰船左舷船首区域产生的分量 x 电场沿 x 轴正方向,在舰船左舷船尾区域产生的 x 分量电场沿 x 轴负方向,右舷的情况和左舷相反. 所以,迭加结果使得在左舷船首区域形成较大的正的 x 分量电场,在左舷船尾区域形成较大的负的 x 分量电场,在中间区域,由于正负电场的抵消使得电场峰值变小. 由于船体以中剖面为对称面对称分布,所以右舷和左舷成反对称分布. 所以,图 2(a) 的电场分布特性是和实际情况相符的. 为了能更清楚描述电场分布情况,图 2(b) 给出舰船 $-E_y$ 分量电场的分布,从图中可以看出,该分量电场关于 $y = 0$ 平面成对称分布;船体下方,离船壁 3m 左右的正横距离区域内电场为正值,最大峰值为 7.7mV/m ;离船壁 3m 左右的正横距离以外区域电场变为负值,大约在正横距离 20m 处电场值达到负的最大. 同样地,在舰船左舷积累正电荷,右舷积累负电荷的情况下,单个电偶极子在其下部及稍靠外的区域将产生沿 y 主轴正方向的电场分量,出现正的最大值. 而在电偶极子两端稍远的区域产生沿 y 轴负方向的电场分量,出现负的最大值. 电偶极子电场的迭加结果使得船体下方及稍靠外区域形成正的 y 分量电场,在离两舷稍远的

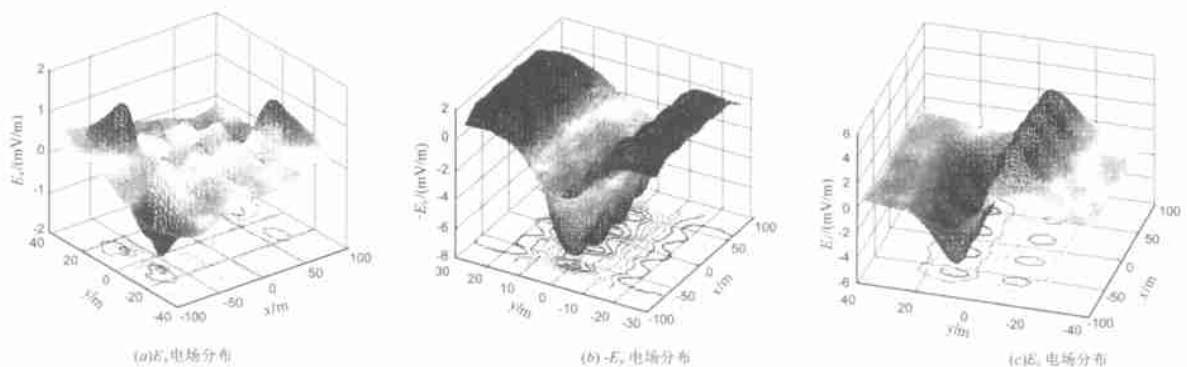


图 2 舰船感应电场各分量的分布情况

外部区域形成负的 y 分量电场. 由于左右船体的对称性, 使得 y 分量电场以中剖面为对称面对称分布. 所以, 图 2(b) 的电场分布特性也是和实际情况相符的. 图 2(c) 为 z 分量电场的分布情况, 该分量电场关于 $y = 0$ 平面成反对称分布, 舰船右舷区域电场值为负, 左舷区域电场值为正; 大约在正横距离 10.6m 处, 电场达到最大值 5.2mV/m. 同样, 根据单个电偶极子 z 分量电场的分布特性及船体结构的对称性, 可知道该电场的分布特性也和实际情况相同.

5 结论

本文根据经典的 Sommerfeld 赫兹势分别推导出了空气和海水水平直流电流元的电磁场表达式; 根据瞬态连续性原理, 推导出了运动舰船切割地磁场而产生的感应电场表达式; 以日本“金刚”号导弹驱逐舰为例, 对其航行时切割地磁场磁力线在海水中产生的感应电场进行了理论计算, 结果表明, 航速 20kn 时在离船壁 5m 左右能产生几个毫伏/米的感应电场; 对计算结果进行分析可知, 各分量电场的空间分布特性是和实际情况相符的, 计算结果的量级是合理的, 符合前苏联的实验结果; 计算结果具体数值的精度和等效实体模型的准确程度有关, 对于我们所建立的梯形柱体模型, 对那些菱形系数较大的船型, 计算结果将更精确; 根据理论计算, 该电场是完全能被检测到的, 并且在空间有明显的分布特征, 因而具有重要意义.

参考文献:

[1] 周骏. 海水中电磁场特性及舰船电磁场 [D]. 武汉: 海军工程大学, 1999.

- [2] 叶平贤, 龚沈光. 舰船物理场 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992. 289 - 293.
- [3] James R Wait. The electromagnetic fields of a horizontal dipole in the presence of a conducting half-space [J]. Canadian Journal of Physics, 1961, 39: 1017 - 1028.
- [4] Peter R Bannister, Rene L Dube. Simple expression for horizontal electric dipole quasi-static range subsurface-to-subsurface and subsurface-to-air propagation [J]. Radio Science, 1978, 13: 501 - 507.
- [5] 木津澈, 野木惠一. 日本宙斯盾导弹驱逐舰“金刚”号 [J]. 国外舰船工程, 1999, 3: 5 - 7.

作者简介:



孙 明 男, 1974 年 12 月出生于安徽巢湖, 硕士, 1996 年毕业于空军雷达学院, 现为海军工程大学博士生, 研究兴趣为: 雷达信号处理, 舰船物理场, 非触发引信.

龚沈光 男, 1939 年 7 月出生于上海, 1962 年毕业于哈军工, 现任海军工程大学教授, 博士生导师, 出版专著两部, 获国家科技进步奖、军队科技进步奖、全国科学大会奖等等奖项共 14 项, 主要研究领域为: 舰船物理场, 非触发引信, 现代信号处理等.

周 骏 男, 1961 年 2 月出生于湖北咸宁, 博士, 副教授, 1982 年毕业于海军工程大学, 发表学术论文数十篇, 主要研究领域为: 舰船物理场, 非触发引信, 现代信号处理等.