

电场抑制与磁场防护的共性技术研究

张海鹏^{1,2}, 陈新刚¹, 龚文超²

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 为提高舰船电场特征信号的探测水平并研究科学的舰船电场防护方法, 系统研究了电场和磁场产生机理的共性特点, 分析了磁、电场对战斗力影响共同点, 研究了磁、电场分析理论的相通之处; 分析发现舰船磁场和电场的分析方法和为抑制舰船磁场或电场而采用防护策略也很相似; 研究表明舰: 船磁场和电场的防护技术是相通的, 可以互相借鉴相似的研究方法, 利用相同的研究和实验资源, 互相促进, 共同研究。

关键词: 舰船; 电场防护; 磁场防护; 抑制技术; 共性

本文引用格式: 张海鹏, 陈新刚, 龚文超. 电场抑制与磁场防护的共性技术研究[J]. 四川兵工学报, 2015(1): 8-12.

Citation format: ZHANG Hai-peng, CHEN Xin-gang, GONG Wen-chao. Research on Generic Technology Between Electric Field Suppression and Magnetic Field Protection[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(1): 8-12.

中图分类号: TM154.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2015)01-0008-05

Research on Generic Technology Between Electric Field Suppression and Magnetic Field Protection

ZHANG Hai-peng^{1,2}, CHEN Xin-gang¹, GONG Wen-chao²

(1. Navy Equipment Research Institute, Beijing 100161, China;

2. Navy Submarine College, Qingdao 266042, China)

Abstract: In order to improve the level of ship electric characteristic signal detection and to study scientific protection methods of ship electric field as well as the mutual mechanism of electric field and magnetic field, the common characters of magnetic and electric were researched. Similarities in theory of magnetic and electric field were probed. Analysis shows that the analyzing methods of ship magnetic field and electric field and the protecting method of curbing the ship magnetic field or electric field are similar. Studies indicate that the ship protection technology of magnetic and electric fields are mutual, which means each of them can draw lessons from the other, and can be studied together and can promote each other by using the same researches and experimental materials.

Key words: ship; electric field protection; magnetic field protection; suppression technology; similarity

随着降噪技术和消磁技术的快速发展, 舰船已变的越来越安静, 为探测噪声已降的很低的舰船, 需要寻找新的可被远程探测的舰艇特征信号。舰船电场成为了舰船探测技术关注的一种显著的新型舰船特征信号容易被用来对舰船进行探测、跟踪、定位和打击^[1-3]。俄、美、英和加拿大等发达国家已在舰船电场研究领域取得了相当的成就, 特别是敌方对舰船电场的探测与识别技术, 更是目前我舰船面临的重大挑战^[4-6]。我国舰船隐身技术主要集中在磁场、声场和水压

场的研究上, 尤其是在磁场隐身研究领域, 投入了巨大力量, 亦获得了显著成果并应用于装备^[7]。但在舰船电场研究领域却研究力量薄弱、投入不足、起步较晚, 导致该领域的研究还是一片空白, 它在很大程度上削弱了我消磁领域研究成果的效能和作用。舰船电场抑制技术已经成为我舰船隐身技术亟待解决的重要问题。然而, 电场和磁场就像一个硬币的两面, 二者相互依存, 不可分割, 舰船电场的研究, 在很大程度上可以参考和借鉴我国磁场的研究成果。

收稿日期: 2014-10-21

作者简介: 张海鹏(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要从事精密仪器及机械研究。

本文在广泛分析磁场和电场特性的基础上,系统的研究了电场和磁场在产生机理、对舰船影响、分析理论、分析方法、抑制技术等方面的共性特征,找出其共同点和相似点,以指导我国电场抑制技术的研究。这对于借鉴磁场研究成果,开展电场研究,具有重要作用。

1 舰船磁、电场产生机理的共性分析

由于舰船的存在,在它的周围会出现不同物理性质的场,目前已知的有磁场、电场、声场、水压场、热场、重力场、光场、宇宙射线场等。舰船的磁场和电场是对舰船特征信号影响最大的两个物理场^[1,3]。

1.1 舰船电场来源分析

舰船电场主要来源于以下6个方面:由船体腐蚀产生的静电场;由船体腐蚀防护CP系统形成静电场;车载电力系统设备辐射电磁波进入海水形成的交变电场;轴系运动、桨叶旋转运动调制的交变电场;CP系统控制单元和CP电源滤波不够等引起的交变电场;磁性舰船运动所感应的电场。

1.2 舰船磁场来源分析

舰船磁场主要来源于以下4个方面:舰船主要是由钢铁结构组成的,钢铁本身就属于磁性材料,带有一定的磁性;地磁场的磁化,钢铁中的磁畴在地磁场的影响下很容易扭转达到方向一致,从而增加磁性;舰船中电力系统设备会辐射磁场;雷达、通信等设备会辐射电磁波;

1.3 舰船磁场产生机理共性分析

由舰船电场来源和磁场来源可以看出其产生机理的共性特点:

1) 无论舰船电场还是舰船磁场都是只可消减,不可彻底消除。即使作战时关掉CP系统,做好了绝缘设计,从热力学原理讲,腐蚀产生的电场也不可避免,从运动磁体的角度讲,也会产生感应的电场。同时,为了提高腐蚀防护能力,无论是牺牲阳极法还是外加电流法,舰船CP系统都为舰船提供了一个电流供给系统,在船体附近形成一个稳恒电流形成的电场。同样的,舰船的钢铁结构不会改变,由其产生的磁场就会存在,电力系统必须持续工作,辐射的磁场就不会消失。

2) 舰船电场和舰船磁场互相联系,互相影响。一方面,有些来源是相同的,如车载电力系统,既能辐射电场,又能辐射磁场;另一方面,舰船电场产生的电流本身就能生成磁场,同样的舰船磁场感应出的感生电动势,也会产生电场。

2 舰船磁、电场的影响共性分析

2.1 对隐蔽性的影响

磁场和电场对于舰船隐蔽性,具有重大的影响。近年来,一方面,由于技术原因和对隐蔽性的认识还存在不足,另一方面,敌对势力的侦查探测能力建设逐步得到加强,导致近些年来我舰船暴露率,特别是潜艇暴露率有增高的趋势。磁场和电场对于隐蔽性的影响,在潜艇中的体现更为集中、

更为典型。

潜艇电场隐身技术目前尚处于起步阶段,基础薄弱,应加强科研投入,采取有效手段减小腐蚀防护形成的静电场,抵消轴频电场,消除工频电场,达到舰船电场隐身的目的。

2.2 对引信技术的影响

舰船在海水中产生的磁场和电场,都具有波形特征明显、区域性强、传播距离远等特点。随着现代电子技术、传感器技术和信号处理技术的发展,舰船在海水中产生的磁场信号和电场信号,都很容易被检测到,从而成为水中兵器的非触发型信号源^[8,9]。

目前的水雷引信主要是磁引信、声引信和水压引信及其组合。由于舰船电场在舰船周围数十米内达到数十甚至上百 $\mu\text{V}/\text{m}$ 的量级,而且存在着从准直流到上百赫兹的丰富的信号成分,因此完全可以用作控制水雷爆炸的近炸引信的信号源。与水雷磁引信相比较,电场信号还具有在水雷晃动下受到的干扰相对较小的优点,因此对于反潜锚雷,使用电引信将比使用磁引信更为优越。图1为水雷引信系统的基本组成图。

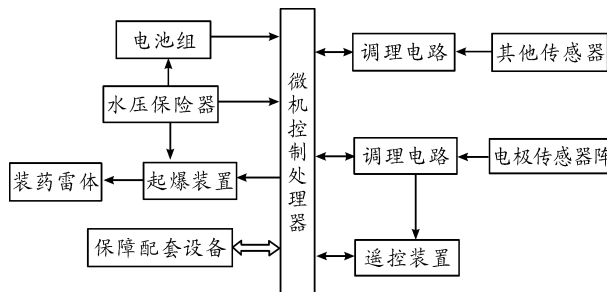


图1 引信系统组成框图

2.3 对隐身技术的影响

有矛就有盾,磁性水雷的出现促进了消磁系统的发展,同样,电场水雷、电场探测系统的出现,也会促进消除电场系统的发展,舰艇在设计时要考虑减少电场,并安装消除电场的装置,这是舰船电场研究的又一个重要方面。此外,目前各国岸基对潜通讯主要依靠长波通讯,而潜艇产生的极低频电场对长波通讯特别是极长波的通讯无疑是一种干扰,因此研究潜艇电场隐身技术,不仅对于潜艇反探测,而且对于提高潜艇通讯质量也具有重要的意义。

3 磁场理论与电场分析理论的共性分析

磁场与电场的密切关系在麦克斯韦方程组中得到了充分的体现,麦克斯韦总结了时变电磁场的普遍规律,并将这些规律用一组数学公式完整的表示出来,将磁场和电场的本质特性统一在同一组方程组里,这就是为宏观电磁理论的发展做出了里程碑式贡献的麦克斯韦方程组^[10]。

3.1 麦克斯韦方程组

3.1.1 积分形式

麦克斯韦方程组包括4个方程,其积分形式如下:

第一方程又称为安培定律,也称为全电流定律:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{s}$$

第二方程又称为法拉第定律,也称为电磁感应定律:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

第三方程又称磁场连续性定律:

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

第四方程又称高斯定律:

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{l} = \int_V \rho dV$$

2.1.2 微分形式

麦克斯韦方程组得积分形式定量的给出了场量之间在较大范围内的相互关系,但在实际的电磁问题中,人们往往更需要了解诸场量在场中每一点上的定量关系,需要将麦克斯韦方程组的积分形式转化为麦克斯韦方程组的微分形式。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

其中, ∇ 为哈密顿算子,在直角坐标系中

$$\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$$

2.1.3 连续性方程

在时变电磁场中,除了麦克斯韦的4个方程之外,连续性方程也是一个十分重要的基本方程。连续性方程来自电荷守恒定律,是一条既适用于恒定场又适用于时变场的基本定律。其积分形式为

$$\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d}{dt} \int_V \rho dV$$

微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

2.1.4 结构方程

麦克斯韦以及连续性方程联立,有 E, D, H, B, J, ρ 5个矢量及一个标量 ρ , 即有16个未知数,以上方程不能完全确定整个电磁场的分布。要想完全求解得出所研究电磁场的整个分布,还需要3个矢量方程,研究媒质特征参数,可得与其有关的结构方程如下:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.2 恒定场方程

当单独研究和分析舰船磁场或电场时,这些场实际上是时变电磁场在某些常量不随时间而变化,或者变化很小可近似忽略条件下的特例。如果令诸场量随时间的变化率为零,便可直接从麦克斯韦方程组及其边界条件导出恒定场的基本方程。

2.2.1 恒定电场的基本方程

当导体中的电流为不随时间而变化的恒定电流时,导体中运动着的电荷处于动态平衡状态,其电荷分布不随时间而变化。这种恒定电荷分布在导体外部,所产生的恒定电场与静止电荷所产生的静电场相同。因此,在分析电场特性时,可以把恒定电流中运动着的电荷等效为等量静止电荷。

当导体内部流过恒定电流时,导体内部的电荷密度和电流密度均不随时间而变化,导体内部的电场为无旋场,导体内部的体电流密度的散度为零,导体内部的电流密度和电场强度服欧姆定律。

这样,导体内部恒定电场基本方程可以表示为

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

应用斯托克斯定理和高斯散度定理,可将微分基本方程可以转换为积分形式:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

$$\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

而此时,静电场的基本方程成立:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

而且,当导电媒质是线性和各向同性的均匀媒质时:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

2.2.2 恒定磁场的基本方程

类似于恒定电场,在麦克斯韦方程组中,令所有场量对时间的偏导数均等于零,则得出恒定磁场的场量满足的积分方程为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

上述两式分别是安培环路定律和磁介质中的磁通连续性定律。用斯托克斯定理和高斯散度定理将积分形式基本方程转换成微分形式:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

类似于电场欧姆定律考虑磁导率,式中: $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 。

2.3 电场与磁场分析理论的应用分析

2.3.1 进行电场与磁场的本质探讨

电场方程和磁场方程形式相似,统一在同一个麦克斯韦方程组中,这种数学关系从理论上严格证明了磁场和电场的特性是相通的,为磁场和电场采用相似的分析、计算方法提供了理论依据。

在电场和磁场关系中,相似性是主要方面,但也有两个区别。一是在恒定磁场方程中,第一个方程描述了恒定磁场的旋度特性。它表明在空间的任一点上,磁场强度的旋度等于该点的恒定电流密度,即恒定磁场是一个有旋场。而在静电场中,电场强度的旋度处处为零,是一个无旋场。二是恒

定磁场第二个基本方程描述于恒定磁场的散度特性。它表明,在空间的任一点上,磁感应强度的散度都等于零,即恒定磁场是一个无源场。而在静电场中,电位移的散度等于该点的体电荷密度,是一个有源场。也就是说,在静电场中,电力线起于正电荷止于负电荷,是一些有头有尾的曲线。在恒定磁场中,不存在作为“源”的磁荷,磁力线是一些无头无尾的闭合曲线。

为了更好地掌握和发挥电场和磁场的共性特点,必须处理好其间的差异,从而使二者能够更好的结合,在分析方法和工程处理策略上,互为启发,互相借鉴。

2.3.2 确定电场与磁场的整体特性

麦克斯韦的电磁场理论,用严密的数学关系,完整的描述了电场和磁场的空间定量特性。从理论上说,麦克斯韦方程组能够让我们严格计算出空间任意点的场量分布;反过来,如果要进行电场或磁场的防护,我们也可以严格计算出产生反向场需要的场源大小、分布、形态等特点。

总之,麦克斯韦方程组提供一种方法,可以严格计算磁场和电场的产生、传播和空间分布,为电场和磁场防护提供了坚实的理论支持。

3 磁场与电场分析方法的共性分析

电场方程和磁场方程本质的相似,决定了磁场和电场的分析、计算方法也是相似的。

相对于磁路来说,电路在人们生活中的应用非常广泛,给人的感觉也更直观,人们对电路的分析和计算方法也更熟悉。长期实践发现,电路的基本定律是欧姆定律和基尔霍夫定律,常用的基本分析方法有支路电流法、电路等效变换法、叠加原理、戴维南定理等^[2,10-11]。磁路的分析计算要更比电路更复杂,这是因为:磁通量在传递的过程中,会有漏磁,特别是在一些导磁特性不佳的材料中,漏磁会更严重,这就使得磁路的分析计算时,带有较大的误差,从而使得磁路的许多传导规律和特性的不确定性增加,其准确计算变得更复杂;相反的,电流在传递过程中,几乎不会产生漏电流,因而其计算公式和定理,基本不需要考虑漏电流的影响,所以其表达方式更简洁,更准确。

但是,磁场和电场毕竟在本质上是相通的,所以磁场的特性也必然和电场有很多相似之处。实际上,如果忽略漏磁的影响,或者利用优质的导磁物质组建磁路,可以将电路的基本定律和基本分析方法,直接套用到磁路中,表1所示的是磁路和电路中常用概念和定理的对比。

反过来,相同表达形式的定律和分析方法,同时成功的应用在磁路和电路中,也进一步证明了磁场和电场具有很多共性。

舰船电场和磁场的变化缓慢,在分析和计算时,可以转化为静态电场和磁场问题。由于磁场和电场的本质、基本定理、基本分析方法和描述方程的形式都基本相同,所以二者方程的解法也是相同的。

表1 磁路和电路的类比关系

磁路	电路
磁动势 F	电动势 E
磁场强度 H	电场强度 E
磁位 Ω	电位 V
磁通量 Φ	电流 I
磁通密度 B	电流密度 J
磁极密度 ρ_m	电荷密度 ρ_m
磁导率 μ	导电率 σ
磁阻 R_m	电阻 R
磁导 λ	电导 G
欧姆定律 $\Phi = F/R_m$	欧姆定律 $I = E/R$
基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$	基尔霍夫第一定律 $\sum I = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum Ni = \sum Hl = \sum \Phi R_m$	基尔霍夫第二定律 $\sum e = \sum IR$

求解静态和准静态的电场及磁场,主要有两种方法:解析方法和数值方法。解析方法中包括镜像法、分离变量法、保角变换法、罗果夫斯基法和罗兹法等;数值方法中包括松弛法、迭代法等,有时也用到统计方法(蒙特-卡罗方法)。

目前,一般来说,对于电场或磁场的定量计算,人们更习惯于应用数值方法,而对于定性分析,则更倾向于解析方法。

4 磁场与电场抑制技术共性分析

4.1 抑制策略的共性分析

磁场和电场的具体抑制技术,从表面上看,好像差别很大:它们利用不同的设备、关注不同的参数、采用不同的操作流程、实现不同的工作方式。但实际上,磁场和电场抑制技术在策略上是相同的^[6,11-12]。其主要的抑制策略有2个:

一个策略是反向抵消。采用有效的设备产生一个与原电场或磁场大小相等、方向相反的新物理场,使得两个场相互抵消,达到抑制的目的。在实际运用中舰船磁场和电场常常是时变的,由多种场源产生,且影响因素众多,因此试图通过预测舰船电场的强度来调整抵消电流的参数来产生抵消电场是困难的。这时,可以考虑两个途径,一个是自适应抵消,实时地获得舰船电场的强度,通过即时反馈来控制抵消电流的输出,以抵消舰船电场;另一个是抓住主要矛盾,只把影响最大的几个磁场源或电场源产生物理场抵消掉。

另一个策略是消除源头。采用有效手段,消除装备中产生该电场或磁场的源头,使得原电场或磁场无从产生,从而达到抑制的目的。但大部分情况下,装备中产生电场或磁场源头的设备,都是必须运行、无法消除的。此时,可以考虑尽量减少或者用相同功能的设备替代能够产生电场或磁场的设备。

4.2 反向抵消策略分析

电场抵消的基本工作流程:测量模块测得海水中的电场值,输入控制模块,控制模块通过抵消算法输出抵消电流,抵消电流通过输出模块导入海水,产生抵消电场。例如图2所示为俄罗斯现代级驱逐舰上装备的消电场系统,其中就包含了电场抵消系统。图2中海水中带箭头的实心曲线表示舰船正常运行产生的电流和电场,而带箭头的虚线曲线则表示补偿系统产生的电流和电场。合理的调整补偿系统,就可以有效的降低或消除原电流和电场的影响。

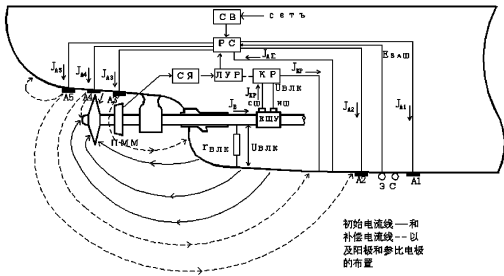


图2 俄罗斯现代级驱逐舰上装备的消电场系统

同样的,磁场的反向抵消也采取相似的做法,只是利用的设备、方式等不同。图3简单示意了舰船磁场分布特点,图中虚线表示舰船自身产生的磁场,为了反向抵消该磁场,采用通电线圈,产生图中所示的实线表示的反向磁场。

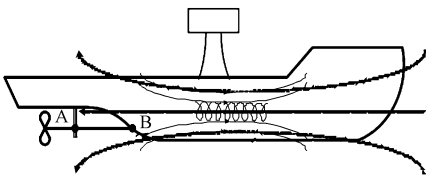


图3 舰船磁场分布示意图

由电场和磁场反向补偿方式,可以看出它们在实际运用该策略的时候,也有很多相似或相同的共性特点。舰船电场和磁场抵消系统的基本模型都包含3个部分:舰船电场或磁场测量模块、电场或磁场抵消控制模块、抵消电场或磁场输出模块。他们的运行方式也很相似:都是先测量原装备产生的电场或磁场值,输入控制模块,控制模块通过抵消算法输出抵消的电场或磁场量,抵消电场或磁场通过输出模块实现。

4.3 消除源头策略分析

消除物理场源头的方法对舰船的磁电场防护有重要作用。对于舰船电场,在可被利用的舰船水下静电场中,腐蚀防护电流产生的静电场是主要成分,对于安装有 ICCP 系统的舰船,由于防护电流很大,会在海水中产生较大的静电场,但在作战时,舰船隐身要比舰船防腐更为重要,而该静电场可通过切断防腐电源来完全消除。

对于舰船磁场,一个典型的例子是潜艇的消磁。目前,

我国的常规潜艇和核动力潜艇都未安装艇载消磁系统,仅通过临时线圈消磁。临时线圈消磁即可被看作是一种消除源头的方法,它是定期的在消磁站或通过消磁船在海上,由外界磁源产生一个强大的磁场,消减和降低舰船本身原有的磁场。临时线圈消磁之后,舰船自身的钢铁结构不再带有磁性,相当于消除了强大的磁源,由其产生的磁场会大幅降低。

5 结论

综上所述,舰船磁场和电场本质上是相通的,它们原理的数学描述统一在相同的麦克斯韦方程中,满足相同的基本定律,可以采用相同的分析方法和求解方法;本质的相通决定了舰船磁、电场具有相似的特性,都可作为舰船的重要目标特征,对舰船产生相似的影响;更为重要的是,舰船磁、电场抑制策略基本相同,可以在磁、电场防护技术上共同研究,采用相似的方法,利用相同的资源,互相借鉴,互相促进。

参考文献:

- [1] 林春生,龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京:兵器工业出版社,2007:233-256.
- [2] 孙明. 舰船感应电场和极低频电场研究[D]. 武汉:海军工程大学,2003.
- [3] 周士弘,孙玉兰,刘永志. 水中目标非声特性研究及其应用技术[C]//水中目标特性研究论文集(内部). 大连,2002:196-200.
- [4] Davidson S J, Rawlins P G. A multi influence range[Z]. Conf. Proc. UDT Europe 99,169-171.
- [5] Dymarkowski K, Uczciwek J. Ships detection based on measurement of electric field in disturbance existing region [Z]. Conf Proc UDT Europe,2000:554.
- [6] 李俊. 舰船电场隐身技术研究[D]. 武汉:海军工程大学,2010.
- [7] 林春生. 舰船磁场信号检测与磁性目标定位[D]. 武汉海军工程大学,1996:7-9.
- [8] 中国人民解放军海军司令部. 苏美水雷资料[Z]. 1975:43-45.
- [9] 傅金祝. 水雷技术发展研究[J]. 水雷战与舰船防护,2002(2):1-3.
- [10] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,2008:12-13.
- [11] 龚沈光,卢新城. 舰船电场特性初步分析[J]. 海军工程大学学报,2008,20(2):1-4.
- [12] 海军装备研究院舰船论证研究所. 舰船轴频电场抑制及评估技术研究[R]. 中国国防科学技术报告,2011.

(责任编辑 周江川)