

船舶磁防护与电场防护耦合性分析

耿攀¹, 王向军¹, 王建勋², 左超²

(1. 海军工程大学; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要 根据船舶电磁场综合防护需求,对磁场防护和电场防护的耦合性进行了研究,总结了11种电磁场产生来源,分析了不同电磁场源产生的磁场和电场的耦合关系。基于磁场和电场耦合性分析数学模型,仿真分析了磁场和电场耦合特性,指出了需结合多种控制措施实现船舶磁场和电场的综合防护。

关键词 磁场; 电场; 电磁耦合; 综合防护

中图分类号 U665.18; U674.7 **文献标识码** A

Analysis on Coupling Characteristics of Ship's Magnetic Protection and Electric Field Protection

GENG Pan¹, WANG Xiangjun¹, WANG Jianxun², ZUO Chao²

(1. Naval University of Engineering;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract According to the demand of comprehensive protection of ship's electromagnetic field, this paper studies the coupling characteristics of magnetic field protection and electric field protection. Eleven sources of electromagnetic field are summed up, and the coupling relations produced by various electromagnetic field sources are analyzed. Based on the mathematical analysis models of coupling of magnetic field and electric field, the coupling characteristics of magnetic field and electric field are simulated and analyzed. This paper points out that comprehensive protection of ship's magnetic field and electric field should be implemented by combining all kinds of control measures.

Key words magnetic field; electric field; electromagnetic coupling; comprehensive protection

0 引言

由于磁性材料的使用、腐蚀及防腐作用等因素,船舶会在其周围海水和空气中激发磁场和电场。随着非声探测技术手段的发展,磁场和电场信号日益成为威胁船舶安全的重要信号源。船舶的磁场和电场特征可能带来3方面威胁:空中电磁探测、水下电磁探测、水中电磁场引信武器。如不采取相关措施对船舶的磁场和电场特征进行有效抑制,我国船舶将面临极大的被探测和攻击风险。

基于船舶磁场和电场防护需求,亟需针对船舶

的磁场和电场分布特性开展深入的研究。考虑到磁场和电场存在强烈的耦合性,常常同时产生,因此需对磁场防护和电场防护的耦合性进行研究,为磁场和电场防护论证提供参考,为电磁场综合防护装备研制提供技术基础保障。

1 船舶磁场与电场产生来源

船舶处于海洋环境中,无论是处于静止状态还是运动的状态,其周围海水中都存在有磁场和电场。

研究表明,船舶电磁场按产生机理的不同可大

体分为磁性源和电性源两种。磁性源主要与磁性材料相关,包括固定磁场、感应磁场和磁性船体运动产生的感应电场 3 种。电性源主要与腐蚀防腐、通电设备泄漏电流相关、通电设备向船外电磁辐射、切割地球磁场运动以及其他相关,共 8 种:腐蚀电磁场、防腐电磁场、泄漏电流电磁场、杂散电磁场、金属船体运动感应电磁场、旋转转子感应电磁场、尾流电磁场、以及摩擦电磁场^[1]。

按频段划分,船舶电磁场大体可分为静磁场、静电场和低频交变电磁场,其中低频交变电磁场还可细分为轴频及其倍频电磁场和工频及其倍频电磁场。静磁场来源于固定磁场、感应磁场、金属船体运动感应磁场(准静磁)、尾流磁场(准静磁)、摩擦磁场(准静磁),以及腐蚀电流、防腐电流、泄漏电流和杂散电磁场中的直流成分。静电场来源于金属船体运动感应电场(准静电)、磁性船体运动感应电场(准静电)、尾流电场(准静电)、摩擦电场(准静电),以及腐蚀电流、防腐电流、泄漏电流中的直流成分。轴频电磁场来源于旋转转子感应电磁场,以及腐蚀电流和防腐电流中的轴频及其倍频成分^[2-7];工频及其倍频电磁场来源于防腐电流、泄漏电流和杂散电磁场中的工频及其倍频成分。

2 船舶磁场与电场耦合来源

根据麦克斯韦方程可知,电流和变化的电场产生变化的磁场(对应麦克斯韦-安培定律),变化的磁场产生变化的电场(对应法拉第电磁感应定律)。由于海水是导体,海水中的电场将以传导电流的形式存在,只要有电流存在的地方就必定存在着磁场^[8],因此电性源必将在海水中同时产生电场和耦合磁场,而磁性源中只有磁性船体运动引发感应电场。具体到船舶,其电磁耦合来源可总结为以下几个方面:

- 1) 船舶磁性船体(与固定和感应磁性有关)运动引起周围空间磁场变化产生的感应电场和耦合感应磁场,为准静电场和准静磁场;
- 2) 船舶周围形成的腐蚀电流会产生静电场及其耦合静磁场、轴频及其倍频电磁场;
- 3) 船舶周围形成的防腐电流会产生静电场及

其耦合静磁场、轴频及其倍频电磁场、工频及其倍频电磁场;

4) 船舶内通电设备泄漏电流在海水中产生的漏电场和漏磁场,为静电场及其耦合静磁场、工频及其倍频电磁场;

5) 船舶内通电设备会向船外辐射产生静磁场、工频及其倍频电磁场;

6) 船舶金属船体运动切割地磁场将在船体和海水中产生感应电流,从而产生感应电场和耦合感应磁场,为准静电场和准静磁场;

7) 船舶旋转转子切割地磁场会在转子和海水中产生感应电流,从而产生感应电场和耦合感应磁场,为轴频倍频电磁场;

8) 船舶尾流切割地磁场引起感应电场和耦合感应磁场,为准静电场和准静磁场^[9];

9) 船舶船体与海水摩擦产生的电场和耦合和磁场,为准静电场和准静磁场。

综上所述,磁场和电场耦合主要来源于电性源。

3 船舶磁场与电场耦合性分析数学模型

船舶磁场与电场耦合性分析数学模型可分别通过静态磁场等效模型或静态电场等效模型推导得出。常用的磁场等效模型有旋转椭球体模型、旋转椭球体阵列模型、磁偶极子阵列模型以及椭球体和磁偶极子阵列组成的混合模型,主要用来分析静态磁场。常用的电场等效模型有水平电偶极子模型和时谐偶极子模型等,可用来分析静电场、耦合静磁场和交变电磁场。对于这些已采用的静态模型不再一一列举,这里主要介绍将静态等效模型转换为动态等效模型的方法。对于磁场动态等效模型,可以计算磁性船体运动产生的感应电场以及磁场通过特性;对于电场动态等效模型,则可以计算各种电性源产生的耦合动态磁场。

动态耦合模型可基于电磁场相对论得出^[10]。以磁场动态等效模型为例,在船舶磁性状态已知的情况下,考虑其运动状态下磁通的空间突变所产生的感应电场。可假设 2 个惯性坐标系 K 和 K' ,其中 K 系为船舶坐标系,其相对 K' 系以速度 V 沿 x

轴方向作匀速运动,在 t 为 0 时刻,2 个坐标系的原点重合。根据相对论的电磁变换式,可知静止坐标系 K' 中任意处的电场和磁场,即感应电场和磁场为

$$\begin{cases} E'_x = E_x \\ E'_y = \gamma(E_y + VB_z) \\ E'_z = \gamma(E_z - VB_y) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} B'_x = B_x \\ B'_y = \gamma(B_y - \frac{V}{c^2}E_z) \\ E'_z = \gamma(B_z + \frac{V}{c^2}E_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, $\beta = V/c$, c 为光速。一般 $V \ll c$, $\beta \ll 1$,所以有

$$\begin{cases} E'_x = E_x \\ E'_y = VB_z \\ E'_z = -VB_y \end{cases} \quad (3)$$

上式表明,只要船舶处于静止状态时的周围磁场分布特征已知,即可由磁场分布计算运动时产生的感应电场。同理,也可由静态电偶极子耦合磁场分析模型推出耦合动态磁场。

4 船舶磁场防护与电场防护耦合性分析

结合仿真分析,我们对长约 100 m 排水量达 5 000 t、航速 20 kn 的船舶各种电磁场源进行了总结,得出在距船舶 10~20 m 左右处的主要磁场与电场耦合频率和量级大小如表 1 所示,同时列出其主要防护手段。

表 1 船舶各类电磁场强度及频率特征对比

Table 1 Features comparison of intensity and frequency of all kinds of electromagnetic fields

序号	场源类型	电场量级/ ($\mu\text{V}/\text{m}$)	磁场量级/ nT	频率范围	特性	防护措施
1	磁性材料固定 磁场和感应磁场	无	10^4	直流	与外界环境、船体材料磁特性和地磁背景环境相关	固定消磁、消磁系统、低磁材料
2	磁性船体运动 引起的感应电场	10	0.01	极低频	大小与航速和磁性状态相关	固定消磁、消磁系统、低磁材料
3	腐蚀电磁场	10^3	1	直流	大小与腐蚀电流相关,由于无频率特征,易被背景淹没	静电场优化设计,电场补偿
		10	0.01	轴频及其倍频	大小与防腐电流相关,频率特征明显易被识别,相关频率与轴的转速、工艺相关	轴接地,电场补偿
4	防腐电磁场	10^4	10	直流	大小与腐蚀电流相关,由于无频率特征,易被背景淹没	静电场优化设计,电场补偿
		100	0.1	轴频及其倍频	大小与防腐电流相关,频率特征明显易被识别,相关频率与轴的转速、工艺相关	轴接地,电场补偿
		1~100	≤ 0.1	工频及其倍频	具体频率和大小与电源制式和纹波系数(占直流百分比)相关	电源优化设计
5	泄漏电流电磁场	1~100	≤ 0.1	直流、工频及其倍频	具体频率和大小与电网结构、设备分布密切相关	电网优化设计
6	杂散电磁场	1~100	≤ 0.1	直流、工频及其倍频	具体频率和大小与电网结构、设备分布相关	电磁屏蔽设计
7	金属船体运动 感应电磁场	≤ 1	≤ 0.001	极低频	与航行速度相关	船体绝缘设计
8	旋转转子运动 感应电磁场	≤ 1	≤ 0.001	轴频及其倍频	与旋转转子航行速度相关	转子绝缘设计
9	尾流电磁场	≤ 100	≤ 0.1	极低频	与船体流线和航行速度相关	尾流防护
10	摩擦电磁场	≤ 1	≤ 0.001	极低频	与船体流线相关和航行速度相关	尾流防护

由表 1 可知磁场防护及其电场防护耦合性具有以下特点:

1) 在总电场中,静电场能量所占比重最大,工频电场能量与轴频电场相当且比重较小。由于海

洋电场环境中背景电场以静电场为主,且量级与船舶静电场相当,不具有频率特征的静电场在远场将很难提取,静电场主要体现在近场威胁;在交变电场中,轴频及其倍频电场较工频及其倍频频率电场

衰减慢且幅值大,因此轴频电场最具远场威胁。

2)在总磁场中,静磁场能量所占比重远大于交变磁场。静磁场由于与地球背景磁场量级相当,近场威胁明显,同时因为地球背景磁场较为稳定,静磁场也有一定的远场威胁;交变磁场中,轴频电场特征同样具有很大远场威胁。

3)在静电场源中,防腐电磁场源对静电场的贡献比例最大,其次是腐蚀电磁场源,其他电磁场源如尾流电磁场源、泄漏电流电磁场、杂散电磁场源等普遍贡献较小,在近场的影响基本可以忽略;在远场需特别注意尾流电磁场源产生的准静电场,因尾流覆盖范围广,其在远处产生的电场与近场差别较小,可能成为最明显的船舶电场特征。

4)在静磁场源中,磁性材料固定磁场和感应磁场源对静磁场的贡献比例最大,其次是防腐电磁场源、腐蚀电磁场源等电性源,其他电性源的贡献较小,在近场的影响基本可以忽略;在远场需特别注意腐蚀和防腐电磁场源产生的静磁场,由于其衰减较慢,在远场磁性水平降到一定程度或采用了消磁技术后,该部分静磁场可能成为影响静磁场特征的最主要因素。在防护设计时,腐蚀和防腐电磁场源磁场特征控制需要结合电场特征控制同时考虑。

5)在交变电磁场源中,防腐电磁场源对交变电磁场的贡献比例最大,其次是腐蚀电磁场源、泄漏电流电磁场源、杂散电磁场源、旋转转子运动感应电磁场。由于交变频率下磁场和电场同时产生,因此需要在进行防护设计时要同时考虑磁场和电场防护。

5 结束语

从威胁角度考虑,在近场,需同时考虑静磁场、静电场、轴频电磁场和工频电磁场;在远场,需考虑静磁场和轴频电磁场,并特别注意尾流电磁场源产生的准静电场。

从电磁综合防护措施考虑,应对固定消磁和消磁系统应用后磁性船体运动耦合产生的感应电磁

场水平进行评估;在对腐蚀和防腐电磁场进行控制时同时考虑磁场和电场特征降低程度;在进行其他次要场源如泄漏电流电磁场、杂散电磁场控制、金属船体运动感应电磁场控制、旋转转子运动感应电磁场的控制时也需同时考虑磁场和电场特征降低程度;在进行尾流电磁场控制时还需考虑同时考虑尾迹防护。

参考文献

- [1] 郑军林,陈新刚,郑春兵,等.船舶电场防护技术[J].中国船舶研究,2006,1(4):48-51.
- [2] 毛伟,林春生.两层介质中运动水平时谐偶极子产生的电磁场[J].兵工学报,2009,30(5):556-560.
- [3] 毛伟,周萌,余刃.两层介质中运动垂直时谐偶极子产生的电磁场[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(5):1081-1085.
- [4] 毛伟,张宁,林春生.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.
- [5] 毛伟,周萌,周耀忠.浅海中运动时谐垂直电偶极子产生的电磁场[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(12):1580-1586.
- [6] 陈聪,李定国,龚沈光.浅海中静态电偶极子电场分布的镜像法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(4):716-720.
- [7] 陈聪,龚沈光,李定国.基于电偶极子的船舶腐蚀防腐相关静态磁场研究[J].兵工学报,2010,31(1):113-118.
- [8] 陈聪,李定国,龚沈光.镜像法求浅海中静态电偶极子在空气中的电磁场[J].地球物理学进展,2010,25(6):2214-2220.
- [9] 刘巨斌,郑学龄,杜先之.水下航行体尾流磁异常的计算方法[J].海军工程学院学报,1994(4):40-45.
- [10] 汪小娜,肖昌汉,王向军,等.沿任意方向运动的磁偶极子感应电场特性[J].舰船科学技术,2012,34(12):19-23.