

# 舰船单鞭天线的近远场仿真分析及机理研究

李文兴<sup>1</sup>, 曹国光<sup>1</sup>, 李 思<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212000)

**摘 要:**采用矩量法计算线天线的电流分布和输入阻抗, 根据电流分布, 采用了在原有天线的目标位置放置测试偶极子的方法来计算线天线周围任意点的场强, 并以 7.5 MHz, 长度为 10 m, 发射功率为 1 kW 的舰船单鞭天线为例, 求解线天线的近场和远场. 采用 Matlab 编程, 计算得出了不同位置的方向图以及场强变化曲线, 根据文献数据对比得到了安全距离范围. 结果表明, 该方法能够计算线天线中任意一点的场强, 是处理天线近区场强以及电磁兼容问题的一种很好的方法.

**关键词:**线天线; 矩量法; 近场; 单鞭天线

中图分类号: TN828

文献标识码: A

文章编号: 1672-0946(2010)05-0573-04

## Near and far field simulation and mechanism analysis of wire antenna

LI Wen-xing, CAO Guo-guang, LI Si

(1. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** This paper takes the method of moment to calculate the wire antenna's current distribution and input impedance. According to the current distribution, makes a proposal that the test dipole at the original spot of the antenna could be placed to calculate field strength of the wire antenna. And takes the Single-whip antenna which is 7.5 MHz, 10 m in length, whose transmitting power is 1kW as an example to calculate the near-field and far-field of the antenna. Also this paper gets the pattern of different positions and field strength curve by using Matlab. According to historical data, gets a safe distance. As the result shows, the method could calculate the field strength of Arbitrary point of the wire antenna. It's a really good method of dealing with the problem that is concerned with field strength and electromagnetic compatibility.

**Key words:** wire antenna; method of moment; near field; single-whip antenna

随着现代电子设备激增, 在各种舰船平台上, 众多天线和通信设备同时工作在一个空间有限的工作平台上. 天线与设备之间彼此离得很近, 相互之间受到的电磁干扰非常严重. 为了使天线性能正常发挥, 实现良好的电磁兼容性, 对天线近场的分析尤为重要, 本文先以矩量法计算天线电流分布, 而后采用测试偶极子替代方法求解单鞭天线的任

意一点场强, 并对结果加以分析.

## 1 矩量法及线天线电流求解

矩量法<sup>[1]</sup> (MoM) 是计算电磁学中最常用的方法之一, 也是将线性算子方程转化为矩阵方程的方法.

$$\vec{L} \cdot \vec{f} = \vec{g}, \quad (1)$$

收稿日期: 2009-11-01.

作者简介: 李文兴(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 数字通信系统与软件无线电技术.

将  $\bar{f}$  在  $\bar{L}$  的定义域内展开成  $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_N$  的线性组合  $\bar{f} = \sum_{n=1}^N a_n \bar{f}_n$ , 进而得到  $\sum_{n=1}^N a_n \bar{L} \cdot \bar{f}_n = \bar{g}$ . 再选取一个  $\bar{w}_N$  称为权函数或检验函数. 与上式做内积得到

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle \bar{w}_m, \bar{L} \cdot \bar{f} \rangle = \langle \bar{w}_m, \bar{g} \rangle, \quad (2)$$

其中,  $m=1, 2, \dots, N$ . 上述方程可以简洁地写为矩阵形式

$$[\mathbf{Z}_{mn}][\mathbf{a}_n] = [\mathbf{b}_m], \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{Z}_{mn} = \langle \bar{w}_m, \bar{L} \cdot \bar{f} \rangle$ ,  $\mathbf{b}_m = \langle \bar{w}_m, \bar{g} \rangle$ . 然后通过矩阵求逆的办法可以对未知函数进行求解. 下面针对我们关心的线天线电流分布问题建立积分方程, 并进行求解. 现选择滞后位积分作为分析工具, 在已知外加场的作用下, 设在导体  $S$  上的电荷密度为  $\sigma$ , 电流密度为  $\mathbf{J}$ . 用滞后位积分来表示  $\sigma$  和由  $\mathbf{J}$  产生的散射场  $\mathbf{E}^s$ , 并应用在  $S$  上的边界条件<sup>[2]</sup>.

$$\hat{n} \times (\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s) = 0, \quad (4)$$

则可以将这些归纳成:

$$\mathbf{E}^i = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\varphi, \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \mu_0 \oint \frac{\mathbf{J} e^{-jkR}}{4\pi R} d\mathbf{s}, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{1}{\epsilon} \oint \frac{\sigma e^{-jkR}}{4\pi R} d\mathbf{s}, \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{j}{\omega} \nabla \cdot \mathbf{J}, \quad (8)$$

$$\text{在 } S \text{ 上 } \hat{n} \times \mathbf{E}^s = -\hat{n} \times \mathbf{E}^i. \quad (9)$$

对于细导线, 可作如下近似: 假定电流只是沿着导线轴的方向流动; 只对导线表面上的轴向分量使用边界条件. 按照这两点假设, 根据矩量法, 采用脉冲基函数做电流展开, 检验函数选择狄拉克函数, 由此可得到矩阵方程:

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] = [\mathbf{V}]. \quad (10)$$

再对  $[\mathbf{Z}]$  求逆运算, 可得  $[\mathbf{I}] = [\mathbf{Z}^{-1}][\mathbf{V}]$ , 其中为  $[\mathbf{Z}]$  阻矩阵,  $[\mathbf{V}]$  为电压矩阵,  $[\mathbf{I}]$  为所求的电流矩阵, 从而得到电流分布.

以频率为 7.5 MHz, 长度为 10 m, 发射功率为 1 kW 的舰船单鞭天线为例, 采用上面讨论过的方法仿真计算, 得到如图 1 所示的电流分布. 为减小计算量, 假设舰船平面为无限大导体平面, 根据镜像原理, 单鞭天线可以看成是半波阵子天线的上半部分, 所以其电流分布为正弦曲线的一半, 与已知知识相吻合. 用馈电点电压除以电流, 得到输入阻抗为  $74.6295 + j42.2394\Omega$ .

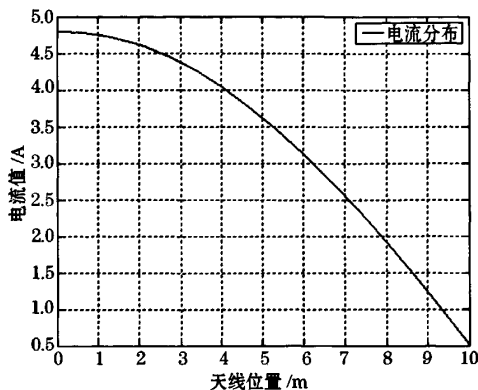


图1 天线电流分布

## 2 基于测试偶极子替代方法的近远场计算

由于半波阵子天线的电流上面已经求得, 并得到下面矩阵:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_N \end{bmatrix}. \quad (11)$$

为了测试近场中某点的电场, 把一个小测试偶极子  $\Delta l$  置于所要分析的位置上, 这样加上原线天线  $N$  段共  $N+1$  段, 把此  $N+1$  段统一起来可以得到一个扩展矩阵:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdots \\ V_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1(N+1)} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2(N+2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{(N+1)1} & Z_{(N+1)2} & \cdots & Z_{(N+1)(N+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_{N+1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由于测试天线是开路的, 即  $I_{(N+1)} = 0$ , 因此

$$V_{N+1} = \sum_{M=1}^N Z_{(N+1)K} I_M, \quad (13)$$

其中:  $V_{N+1}$  为测试偶极子上的电压,  $Z_{(N+1)K}$  为线天线上第  $M$  段与测试偶极子之间的互阻抗,  $I_M$  为线天线上第  $M$  段电流. 由于测试偶极子很短, 则可以近似认为线天线在测试偶极子上产生的场强不变, 即:

$$V_{N+1} = -E_i \Delta l, \quad (14)$$

代入得 
$$E_l = -\frac{1}{\Delta l} \sum_{M=1}^N Z_{(N+1)K} I_M \quad (15)$$

由此可以计算出测试偶极子所在点的场强,随着测试位置的不同,即可得到任意点的场强,值得注意的是  $E_l$  为电场在  $l$  方向上的场强值,若要计算总场强值,可调整测试偶极子分别沿  $x, y, z$  方向,即可分别得到  $E_x, E_y, E_z$  的值. 还要说明的一点是式(12)中矩阵中的最后一行仅仅是为了计算某一个特殊点的场强才计算的,而不是原天线的阻抗矩阵,对于不同的点,这一行都要重新计算.

3 数值结果分析及近场机理研究

仍然以舰船常用的频率为 7.5 MHz, 长度 10 m 的短波单鞭天线为例, 结合已经计算出来的电流分布和前面介绍的替代方法, 分别计算得到距离天线 12、16、20、40、100 m 的归一化  $E$  面方向图, 由于单鞭天线只是对称阵子的上半部分, 所以方向图也只有甲板以上部分存在.

3.1 仿真结果分析

从图 2 中可以看出近场和远场有明显的区别, 当距离很小时, 近场最大方向出现在天线轴向位置, 随着距离的增大, 轴向位置的场强逐渐减小, 过渡到远区场后, 轴向位置场强为零, 场强最大位置出现在垂直方向上. 而且从图中还可以看出, 近场方向图是随距离变化而变化的, 当距离很大时, 变为远场, 且远场中方向图不随距离而变, 这些和文献[3]所述完全吻合.

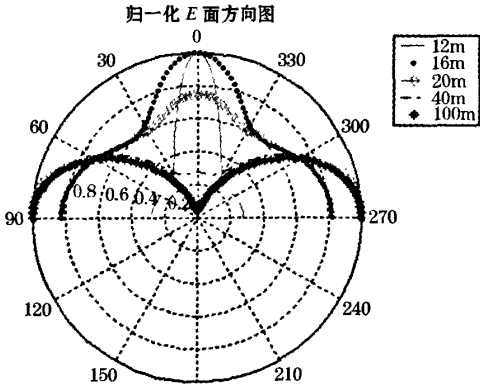


图 2 不同位置的天线场方向图

根据文献[4]可知, 舰船允许的暴露电平的电场强度平方为  $4\,000(900/f^2)(V/m)^2$ , 计算得到当  $f=7.5\text{ MHz}$  时, 容许暴露的最小电场强度为  $80\text{ V/m}$ , 通过图 3 曲线可知, 在与天线垂直平面 2 m 以内, 电场强度大于容许暴露的最小场强限值, 所以

处在这个区域内, 人员和武器装备都存在很大危险性, 应该尽量避免敏感设备处于其中. 当然实际的舰船上会有许多上层建筑, 其真实场强情况会更复杂<sup>[5-6]</sup>.

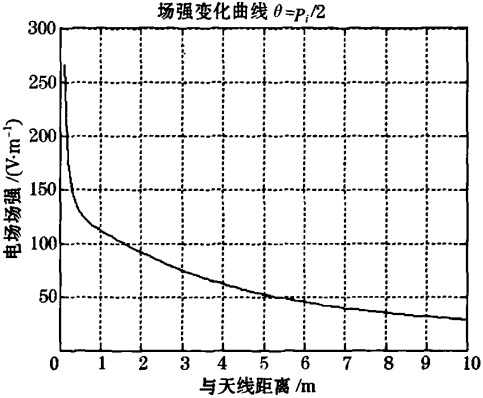


图 3 天线场强随距离变化曲线

图 4、5 是近场和远场的空间方向图.

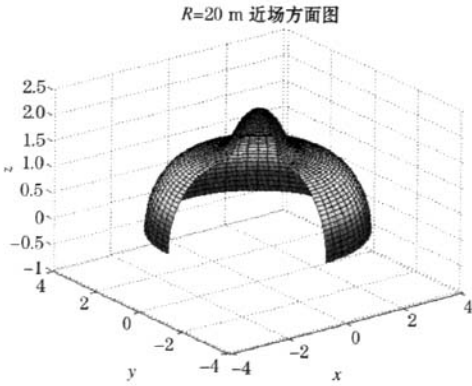


图 4 天线近场空间方向图

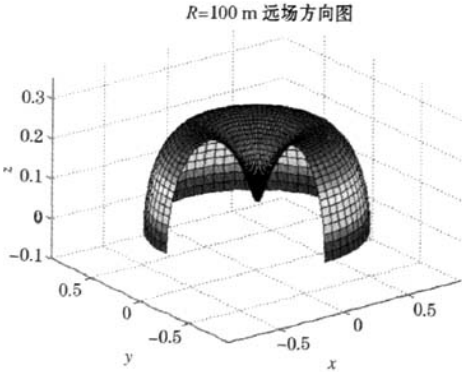


图 5 天线远场空间方向图

### 3.2 近场机理研究

从仿真结果中不难看出当距离很近时,天线的轴向位置( $\theta=0^\circ$ )场强很大,要仔细研究这个结果产生的机理,先从电偶极子入手,电偶极子可以看成是一对距离很近的电量大小相等的正负电荷,根据库仑定律不难得出,在轴向位置处,当场点距离偶极子很近时,由于两个源点到场点距离相差很大,使得两个电荷在场点产生的电场大小相差很大,尽管方向相反,但是总场强依旧很大.随着距离增大,场点与两个源点的距离越来越接近,所以场强逐渐变小,至无穷远处时,两个源点到场点距离可认为大小近似相同,方向相反,总场强为零.

在垂直位置( $\theta=90^\circ$ ),随着距离增加,正负电荷源产生的两个场强分量均在减小,所以叠加之后的合成场强值变得越来越小,即如图3所示.对半波阵子而言,由于其电流分布和电偶极子相近,所以其近场分布与变化情况与偶极子类似是不难理解的,即图2的仿真情况.

当然在研究近远场的时候,还应注意一点,场应该是连续的,而不是突变的,近远场只是一个渐变的过程,从图3中场强随距离的变化曲线中也可以看到这一点.

## 4 结 语

通过矩量法计算线天线电流,进而应用测试偶极子替代方法计算任意点场强,经过仿真验证,得出单鞭天线的近远场方向图,并对近场危害给出了预测,对电磁兼容分析提供保证.应用该方法,可以对线天线周围任意点场强进行精确计算,效果良好.

### 参考文献:

- [1] HARRINGTON R F. 计算电磁场的矩量法[M]. 北京:国防工业出版社, 1981.
- [2] HARRINGTON R F. Matrix methods for field problems[C]//Proc. IEEE, [S. l.]:[s. n.], 1967, 2:136-149.
- [3] WARREN L S, GARY A T. 天线理论与设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006.
- [4] JOHN D K, RONALD J M. 天线[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [5] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
- [6] 陈伟尚, 刘 斌. 基于矩量法的天线近场分析[J]. 舰船电子工程, 2008(11): 181-183.

(上接 569 页)

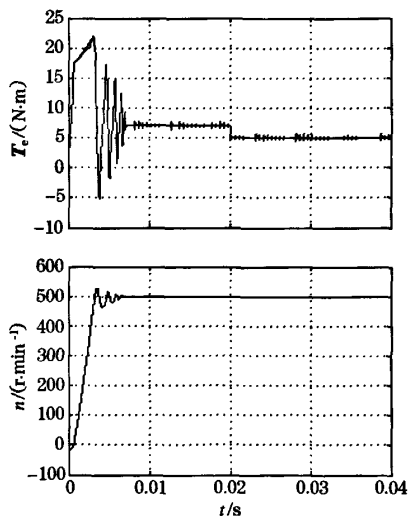


图14 减小负载时的转速、转矩响应曲线

上提出了基于 SVPWM 的永磁同步电动机直接转矩控制系统,并用 Matlab/Simulink 进行了仿真研究.仿真结果表明:波形符合理论分析,系统能够平稳运行,并具有较好的动、静态特性.

### 参考文献:

- [1] 王成元. 电机现代控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [2] 朱小鹏, 冯晓云. 永磁同步电机直接转矩控制系统研究与仿真[J]. 机电传动, 2005(3): 16-19.
- [3] 高晗璎, 杨贵娟. 基于 SVPWM 的永磁同步电动机直接转矩控制的仿真研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2008(4): 443-447.
- [4] CHRIS F, PAUL A. Direct Torque Control of Permanent Magnet Drives[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1996, 32(5): 1080-1088.
- [5] HABELTER T G, PROFUMO F. Direct torque control of induction machines using space vector modulation, IEEE Transaction on Industry Applications, 1992, 28(5): 1045-1053.
- [6] 高晗璎, 张小新, 王福家. 基于 DSP 的永磁同步电动机控制系统的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2008, 24(4): 335-338, 343.

## 5 结 语

本文在分析永磁同步电动机数学模型的基础

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>