

基于等效电动势法的线天线耦合度研究

黄麟舒 段富强 项顺祥

(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

摘要: 在舰艇有限空间中, 密集的电子设备天线之间的互耦是不可忽视的问题。而耦合度可通过互阻抗和自阻抗来计算。本文将天线视为两端口网络, 基于感应电动势法, 计算了对称振子的平行距离和高度差与耦合度的关系, 并得到曲线图, 计算结果说明, 合理设计天线的相对位置和排列阵式是减小相互干扰的方法之一。

关键词: 电磁兼容; 天线; 互耦; 感应电动势

Abstract: The method of calculating antenna coupling is discussed in the paper. All methods can be based on calculating mutual-impedance and self-impedance. The coupling can be gained based on the method of induction-electromotive force. The calculating result have some guidance and reference to antenna configuration.

Keyword: EMC;antenna; coupling ;induction-electromotive force

1 引言

飞机或舰船上不同功能天线的互耦是属于独立天线间的互耦问题, 显然, 降低这种耦合的有效措施很多是增大天线间距^{[1][2]}。由于舰艇或飞机空间有限, 表明以往的这种方法仍无法将干扰降低到允许的范围。但可以通过合理的设计天线布局以大大减小这种干扰^[2]。因此研究天线之间的互耦对于舰载、机载设备的效能研究有很重要的意义。

2 耦合度的定义和原理

天线之间的耦合度是一个非常重要的参数, 特别是要使接收系统不受邻近的发射机影响时这个参数就显得更为重要了。常用耦合度来表征天线耦合的强弱^[3], 它定义为一个天线接收的功率与另一个天线所发射的功率之比。天线耦合度数据计算方法包括: 近似法, 互阻抗或互导纳法、口面场法、几何绕射理论法、混合法、FDTD 法等^[3]。

表征耦合特性的参数是互阻抗或互导纳。对于线天线, 互耦最初用感应电动势法来求解。一个天线的输入阻抗与邻近天线对它形成的负载阻抗有关, 所以天线之间的相互影响使天线的阻抗计算变得相当复杂。耦合问题可通过以下方法来研究: 首先把两耦合天线视为两端口网络, 计算出它们的自阻抗和互阻抗, 那么两天线之间的最大隔离度为^[4]:

$$G_{MAX} = \frac{1}{L} [1 - (1 - L^2)^{1/2}] \quad (1)$$

式中 $L = \frac{|Y_{12} Y_{21}|}{2 \operatorname{Re}(Y_{11}) \operatorname{Re}(Y_{22}) - \operatorname{Re}(Y_{12} Y_{21})}$, 与互导纳 Y_{xy} 、自导纳 Y_{xx} 相关。

天线 2 对应的负载导纳为

$$Y_L = \left[\frac{1-\rho}{1+\rho} + 1 \right] \operatorname{Re}(Y_{22}) - Y_{22} \quad (2)$$

式中 $\rho = \frac{G_{MAX}(Y_{12}Y_{21})^*}{|Y_{12}Y_{21}|}$.

而天线 1 对应的输入导纳为：

$$Y_{IN} = Y_{11} - \frac{Y_{21}Y_{12}}{Y_L + Y_{22}} \quad (3)$$

则可以看出这种方法求解天线之间的耦合最主要的是求两天线的自阻抗与互阻抗，可用等效电动势法求解阻抗^[4]。

$Z_{12} = 1/Y_{12}$ 、 $Z_{21} = 1/Y_{21}$ 称为归于输入电流的互阻抗。可知，由于 $Z_{12} = 1/Y_{12}$ 的积分项中感应电动势 Ez_{12} 正比于 I_2 ， I_{21}^* 正比于 I_1^* ，因此阻抗实际上与输入电流无关，仅是两天线的相对位置、天线形状尺寸及波长的函数。又由互易原理有：

$$Z_{12} = Z_{21} \quad (4)$$

3 对称振子之间的耦合度的计算实例

下面用等效电动势法计算两平行等长振子的互阻抗，然后在此基础上利用（1）式计算耦合度。

图 1 是相距为 d 、高度差为 H 的两平行等长对称振子。这里假设振子上电流分布为正弦函数，利用等效电动势法可求互电阻 R_{12} 与互电抗 X_{12} 分别为：

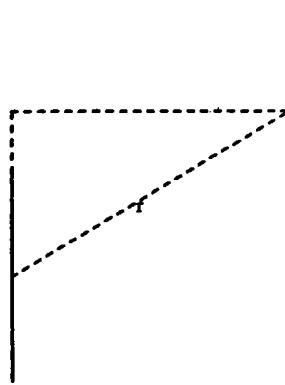


图 1 相距为 d 、高度差为 H 的两平行等长对称振子

互电阻 $R_{12} = 15 * (\cos(k * (l1-h+l2)) * (ci(k0) + ci(k1) - ci(k4) - ci(k5) - ci(M0) - ci(M1) + ci(M4)) + \sin(k * (l1-h+l2)) * (-si(k0) + si(k1) + si(k4) - si(k5) + si(M0) - si(M1) - si(M4) + si(M5)) + \cos(k * (l1-h-l2)) * (ci(k2) + ci(k3) - ci(k4) - ci(k5) - ci(M2) - ci(M3) + ci(M4) + ci(M5)) + \sin(k * (l1-h-l2)) * (-si(k2) + si(k3) + si(k4) - si(k5) + si(M2) - si(M3) - si(M4) + si(M5)) + \cos(k * (l1+h+l2)) * (ci(F0) + ci(F1) - ci(F4) - ci(F5) - ci(H0) - ci(H1) + ci(H4) + ci(H5)) + \sin(k * (l1+h+l2)) * (-si(F0)$

$$+si(F1) +si(F4) -si(F5) +si(H0) -si(H1) -si(H4) +si(H5)) +cos(k^*(l1+h-l2)) * (ci(F2) +ci(F3) -ci(F4) -ci(F5) -ci(H2) -ci(H3) +ci(H4) +ci(H5)) +sin(k^*(l1+h-l2)) * (-si(F2) +si(F3) +si(F4) -si(F5) +si(H2) -si(H3) -si(H4) +si(H5))) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{互电抗 } X_{12} = & 15 * (\cos(k^*(l1-h+l2)) * (-si(k0) -si(k1) +si(k4) +si(k5) +si(M0) \\ & +si(M1) -si(M4) -si(M5)) \\ & +\sin(k^*(l1-h+l2)) * (-ci(k0) +ci(k1) +ci(k4) -ci(k5) +ci(M0) -ci(M1) -ci(M4) \\ & +ci(M5)) +\cos(k^*(l1-h-l2)) * (-si(k2) -si(k3) +si(k4) +si(k5) +si(M2) +si(M3) \\ & -si(M4) -si(M5)) +\sin(k^*(l1-h-l2)) * (-ci(k2) +ci(k3) +ci(k4) -ci(k5) +ci(M2) \\ & -ci(M3) -ci(M4) +ci(M5)) +\cos(k^*(l1+h+l2)) * (-si(F0) -si(F1) +si(F4) +si(F5) \\ & +si(H0) +si(H1) -si(H4) -si(H5)) +\sin(k^*(l1+h+l2)) * (-ci(F0) +ci(F1) +ci(F4) \\ & -ci(F5) +ci(H0) -ci(H1) -ci(H4) +ci(H5)) +\cos(k^*(l1+h-l2)) * (-si(F2) -si(F3) \\ & +si(F4) +si(F5) +si(H2) +si(H3) -si(H4) -si(H5)) +\sin(k^*(l1+h-l2)) * (-ci(F2) \\ & +ci(F3) +ci(F4) -ci(F5) +ci(H2) -ci(H3) -ci(H4) +ci(H5))) \end{aligned} \quad (6)$$

当 $l_1=l_2$, $H=0$, 距离 d 趋近于零时, 以上两式可化简为对称振子自阻抗的计算公式, 即

$$R_{11}=30\{2[C+\ln(2kl)-ci(2kl)]+\sin(2kl)[\sin(4kl)-2si(2kl)]+\cos(2kl)$$

$$[C+\ln(kl)+ci(4kl)-2ci(2kl)]\}$$
 (7)

$$X_{11}=30\{2si(2kl)+\sin(2kl)[C+\ln(kl)+ci(4kl)-2ci(2kl)-2\ln(1/a)]$$

$$+\cos(2kl)[2si(2kl)-si(4kl)]\}$$
 (8)

这里 C 为欧拉常数, 即 $C=0.5772$ 。

在得到了振子的自阻抗和互阻抗以后, 就可以根据 (1) 式来计算耦合度了。要注意的是, 在互耦条件下, 电流为正弦分布的假设并非总成立, 当上四式用于半波振子时, 将产生不同程度的误差, 但还是能达到工程所要求的精度^[5]。

4 计算结果和分析

耦合度的计算是一个较复杂的过程, 在计算中, 以达到工程所需的精度为前提, 可采取一定的近似。下面给出用等效电动势法所计算出的不同距离和高度差的对称振子间的耦合度曲线。

由图 2 和 3 可看出: 高度差不变时, 随着距离 d 的增大耦合度逐渐减小; 距离不变时, 随着高度差 H 的增大耦合度逐渐减小。而且共线排列要比平行排列耦合度减小的速度快, 而且整体上要比平行排列耦合度小得多。

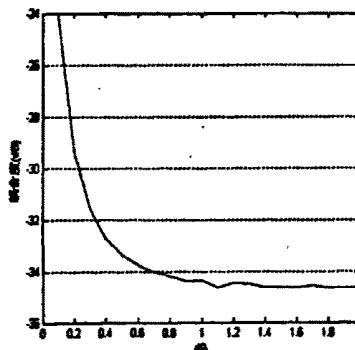


图 2 高度差为 0 的半波振子不同距离下的耦合度 (平行排列)

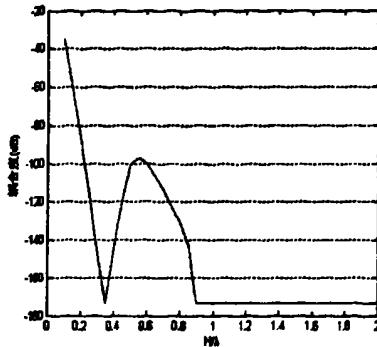


图3 距离为0的半波振子在不同高度差下的耦合度(共线排列)

5 结论

本文讨论了在舰艇、潜艇或飞机上电子设备的电磁兼容及预测问题，即电磁耦合通道中的关键环节——天线的互耦效应。计算仿真结果说明不同的天线排列阵式和距离有不同的互耦效应。在实际中应考虑电子设备天线相对位置和排列，以避开互扰的峰值，得到较好效果。

参 考 文 献

- [1] 王清斌,刘萍.电磁干扰与电磁兼容技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [2] Dockey R W,German R F. New Techniques for Reducing Printed Circuit Board Common-Mode Radiation [C]Proceeding of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[R], New York,1993
- [3] 魏文元,宫德明,陈必森.天线原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- [4] Patrik Persson,Lars Jesefsson. Calculating the Mutual Coupling Between Apertures on a Convex Circular Cylinder Using a Hybrid UTD-MoM Method[J].IEEE Transactions on Antenna and Propagation,49 (4),2001.
- [5] 陈顺生.天线原理[M].南京:东南大学出版社, 1988:242-246.

作者简介:

黄麟舒(1975-),女,讲师,海军工程大学电子工程学院。研究方向:电磁数值分析和通信相关技术。

通讯地址: 武汉解放大道 717 号海军工程大学电子工程学院通信系 430033

电话: 027-62121812 E-mail: seakeke@163.com

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、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)，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>