

机载天线电磁兼容技术分析

袁旭猛, 王 浩

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 随着机载天线的广泛应用, 电磁兼容问题的分析非常重要。针对机载天线的特点, 首先对机载天线电磁兼容的核心问题和主要解决途径进行了简要介绍, 论述了机载天线隔离度的定义及计算方法, 对常用的有限元法、物理光学、几何光学和几何绕射理论等天线电磁兼容技术分析方法进行了比较, 最后结合飞机系统的具体情况提出采用混合方法分析机载天线电磁兼容技术问题。

关键词: 机载天线; 电磁兼容; 数值计算法; 有限元法; 高频方法

中图分类号: TN828

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2011)04-40-3

Analysis of Electromagnetic Compatibility Technique for UAV Airborne Antenna

YUAN Xu-meng, WANG Hao

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract: With the wide application of airborne antennas, it's becoming more and more important to analyze the electromagnetic compatibility of airborne antenna. Considering airborne antenna's characteristics, first this article introduces the core problems and key solutions of the electromagnetic compatibility of airborne antenna; discusses the definition and calculation method of the airborne antenna isolation; then compares several methods for analyzing the antenna electromagnetic compatibility, such as finite element method, physics optics, geometrical optics and geometrical theory of diffraction. Finally, based on the airplane's practical situation, this article proposes a combined method to solve the problems of the electromagnetic compatibility of airborne antenna.

Key words: airborne antenna; electromagnetic compatibility; numerical method; finite element method; high frequency method

0 引言

随着电子信息技术的发展, 飞机载体上的天线类型和数量不断增加, 造成飞机内部及其周围空间的电磁环境越来越复杂, 从而导致电磁兼容的问题日益突出。作为直接影响和制约系统电磁兼容性的天线, 其电磁兼容问题越来越受到重视^[1]。

1 机载天线特点

机载天线对整个系统的电磁兼容性能影响非常明显。这主要因为天线具有如下 2 个特点:

① 天线的功能是完成电磁能量从“场”到“路”的双向转换, 即将空间中的电磁场能量接收至传输线内成为导波, 或将传输线内的导波辐射至空间形成电磁场;

② 多数天线辐射能量大、接收灵敏度高。相对导线、设备孔缝等无意辐射源, 天线辐射能量要大若

收稿日期: 2011-05-27

作者简介: 袁旭猛(1977—), 男, 工程师。主要研究方向: 电子系统工程、测控技术。

干个数量级^[2]。

2 电磁兼容核心问题

从本质上而言, 天线的电磁兼容与设备电磁兼容概念相通, 都由 2 个核心问题组成: ① 辐射限制; ② 抗扰度限制。

具体说就是限制无用辐射的幅度上限以免干扰其他设备或天线; 同时保证在一定强度的电磁环境下正常工作的能力。

3 解决方法分析

解决机载天线电磁兼容主要从 2 方面着手:

① 电磁兼容实现手段; ② 电磁兼容效果计算分析。

3.1 电磁兼容实现手段

目前实现天线之间电磁兼容的主要手段, 是通过增加天线之间的隔离度削弱天线间的相互影响, 而衡量天线之间互相影响强度的指标即天线隔离度, 机载天线之间的隔离度是描述天线之间耦合的一种方式, 它充分反应了天线的方向性、增益、极化

状态、带内带外特性和天线之间的空间对收发天线间能量耦合的贡献。为准确表达天线间的隔离程度,将发射天线的发射功率 P_{ta} 与接收天线所接收的功率 P_{ra} 比值定义为天线隔离度(P_{ra} 为 P_{ta} 经过各种衰减后被接收天线所接收的功率值),通常在工程应用中,以 dB 为单位表示,即:

$$L(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_{ta}}{P_{ra}}; \quad (1)$$

当 2 个天线均处于彼此远区的情况下,其能量耦合主要通过辐射场实现。

设发射天线发射功率为 P_{ta} ,增益为 $G_t(\theta_t, \varphi_t)$,接收天线的接收功率为 P_{ra} ,增益为 $G_r(\theta_r, \varphi_r)$;接收天线与发射天线间的距离为 D ,一般情况下,收发天线直视时的天线隔离度可由公式(1)所表达的物理意义求解。当收发天线外形尺寸与 D 相比较小时,收发天线均可近似被认为是具有一定方向性的点源,则发射天线发出的电磁波可被近似为球面波,且在接收天线处可视作平面波,此时天线隔离度可表示为:

$$\begin{aligned} L_{\text{antenna}}(\text{dB}) &= L_d - G_t(\theta_t, \varphi_t) - G_r(\theta_r, \varphi_r) = \\ &20 \lg \left[\frac{4\pi D}{\lambda} \right] - G_t(\theta_t, \varphi_t) - G_r(\theta_r, \varphi_r); \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $L_d = 20 \lg \left[\frac{4\pi D}{\lambda} \right]$ 为收发天线直视情况下的空间隔离, L_d 由收发天线间的距离 D 和分析波长 λ 等因素决定; $G_t(\theta_t, \varphi_t)$ 为发射天线在接收方向的天线增益,应根据收发天线的相对位置从机载发射天线增益方向图中读取; $G_r(\theta_r, \varphi_r)$ 为机载接收天线在发射方向的天线增益,应根据收发天线的相对位置从天线增益方向图中读取。

当收发天线之间的极化不完全匹配时,还要考虑极化失配带来的隔离度 L_p 这一项,即总的天线隔离度为:

$$\begin{aligned} L_{\text{antenna}}(\text{dB}) &= L_d - G_t(\theta_t, \varphi_t) - G_r(\theta_r, \varphi_r) + L_p = \\ &20 \lg \left[\frac{4\pi D}{\lambda} \right] - G_t(\theta_t, \varphi_t) - G_r(\theta_r, \varphi_r) + L_p. \end{aligned} \quad (3)$$

如果天线不能同时满足位于彼此的远区,则 2 天线之间的相互干扰主要不是通过辐射场进行的,而是通过近区束缚场或近区感应场。

工程上圆极化对垂直或水平极化的失配损耗为 3 dB(3~4 dB),垂直极化和水平极化间的失配损耗为 20~35 dB,由于机身表面天线的安装方位比较复杂,极化失配损耗要比以上 2 个值小。

天线布局优化是天线兼容性的基本内容之一^[3]。调整多个天线的姿态及安装位置,使这些天线之间的隔离度满足要求,从而使多个天线达到兼

容状态的过程,就是天线布局优化。它主要是通过在飞机上可放置天线的范围内调整各天线的安装位置和姿态,分析不同布局情况下各机载天线与其他天线间的隔离度,根据天线隔离度数据判断天线间的兼容情况;最终找到一种能够使所有天线兼容工作的天线布局状态。

布局设计首先是天线自身的仿真与设计,其性能指标以能否满足应用要求为先决条件。在此基础上,将天线配置到载体上,其阻抗特性和辐射特性可能会因为载体的存在而有程度不等的恶化,必须对天线进行必要的修改,有时甚至需要重新进行方案论证与选择。然后再将多个天线同时设置于载体上,调整至每个天线均能够按照指标要求工作,布局优化结果确定后,各种天线性能指标和电磁兼容性就基本确定了。

3.2 电磁兼容效果计算分析

机载天线的电磁兼容实施过程中一个重要的环节,就是以计算机为工具,利用电磁场理论和计算电磁学的相关知识,对天线电磁兼容性的效果进行仿真计算和分析。通常情况下,对单个天线结构阻抗特性和辐射特性的分析,往往采用数值方法;而对于天线之间耦合特性(隔离度)的分析(该文中仅指远场情况下),往往采用高频方法。

3.2.1 数值计算技术

随着计算机性能的快速提高,电磁场数值计算技术日益成为应用电磁学领域内的一个研究热点。由于数值计算方法直接以数值的形式代替解析表达式描述和求解电磁场问题,故在理论上只要计算机配置足够高,等待足够的时间,可以得到以任意精度逼近准确值的几乎所有电磁场问题的解答。常用的数值计算技术包括有限元方法(FEM)、时域有限差分方法(FDTD)和矩量法(MOM)等。

有限元法是非常具有代表性、应用范围广泛的频域数值方法。该方法以变分原理和剖分插值为基础,能处理任意形状场域、多介质和复杂交界面等情况。所形成的代数方程系数矩阵对称、正定和稀疏,因而收敛性好,容易求解。由于具有这些优点,有限元法成为国内外学者的一个研究热点。

有限元方法的引入极大的提高了这项技术的性能。完全匹配层技术(PML)在有限元方法中的成功应用使得有限元也能方便的处理具有开放结构的问题,有限元方法还可以与矩量法结合起来处理具有复杂的具有开放结构的问题。经过近 30 年的发展,随着计算机速度的提高、软件技术的成熟,在国内外

学者的共同努力下,电磁场有限元数值计算方法不断完善并且得到了广泛应用。

有限元法虽然是一种有很大灵活性的电磁场的数值计算方法,但它只适合于最大尺寸约为几个波长以下的物体。

3.2.2 高频近似技术

由于机载天线工作频率一般很高,而飞机一般有十几米到几十米长,因此机载天线系统是电大尺寸系统,对此系统的分析需要应用高频近似技术。

高频近似技术是在相当严格的理论基础上发展的一系列近似方法和渐进的高频解析方法,一般可归纳作 2 类:一类基于射线光学,包括几何光学(GO)、几何绕射理论(GTD)以及在基础上发展的一致性绕射理论(UTD)等;另一类基于波前光学,包括物理光学(PO)、物理绕射理论(PTD)、等效电磁流方法(ECM)以及增量长度绕射系数法(ILDC)等^[4]。

物理光学法是通过对表面感应场的近似和积分求解散射场的,克服了平表面和单弯曲表面出现的无限大的问题。由于感应场保持有限,散射场也就同样有限。

几何光学是研究射线传播的一种理论,它是适用于计算电磁场零波长近似的高频方法。但是几何光学只研究直射、反射和折射问题,它无法解释绕射现象^[5]。当几何光学射线遇到任意一种表面不连续,例如边缘、尖顶,或者在向曲面掠入射时,它将不能进入到阴影区。按几何光学理论,阴影区的场应等于零,但实际上阴影区的场并不等于零。为了解除几何光学场的不连续性问题,并对几何光学场计为零的场区中作出适当修正,引入了一种新的射线—绕射线,其对应理论即几何绕射理论。

Keller 在 1951 年前后提出了一种近似计算高频电磁场的新方法。他把经典几何光学的概念加以推广,引入了一种绕射射线以消除几何光学阴影边界上场的不连续性,并对阴影区内的场进行适当的修正。Keller 的这一方法称为几何绕射理论。绕射射线产生于物体表面上几何特性或电磁特性不连续之处。例如,物体的边缘、尖顶和光滑凸面上与入射射线相切之点。绕射射线既可以进入照明区,也可进入阴影区。因为几何光学射线不能进入阴影区,故阴影区的场就完全由绕射射线来代表。这样,几何绕射理论就克服了几何光学在阴影区的缺点,也改进了照明区的几何光学解。几何绕射理论的基本概念可以归结为以下 3 点:

① 绕射场是沿绕射射线传播的,这种射线的轨

迹可以用广义费马原理确定;

② 场的局部性原理:在高频极限情况下,反射和绕射这一类现象只取决于反射点和绕射点临近域的电磁特性和几何特性;

③ 离开绕射点后的绕射射线仍遵循几何光学的定律。

Keller 导出的 GTD 基本算式(绕射系数),在亮区和阴影区几何光学阴影边界两侧的过渡区内失效,70 年代 Pathak 和 KovyoumJian 等又将之发展成为一致性 UTD, UTD 克服了 GTD 的缺点,较好地解决了电磁波在阴影边界上的连续问题。UTD 在几何光学阴影边界过渡区有效,在阴影边界过渡区以外,则自动转化为 GTD 算式。

虽然现在已有许多求解电磁辐射和散射问题的高频近似方法,但实际上没有一种方法是“万能”的,每种方法都有其使用范围。例如,纵然几何绕射理论及其一致性形式能准确地计算出大多数电大尺寸辐射和散射系统的高频电磁场,但由于现在各种典型几何体的绕射系数太少,有些大尺寸复杂目标的局部构形,如飞机机身和机翼的结合部,还没有可利用的绕射系数。所以,单纯用几何绕射理论及其一致性形式不能解决所有的高频电磁辐射与散射问题。

4 结束语

数值计算技术能精确地分析电小尺寸系统,高频近似技术则适合分析电大尺寸系统。飞机上装载的天线种类繁多,建议采用 2 种技术混合方法分析电磁兼容问题,在处理特定电磁问题时通过有机结合取长补短,如 MoM - 格林函数混合方法、MoM - FD 混合方法和 FEM - BEM 混合方法等^[6]。当然,这些分析方法需要在实际工程中进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 林泽祥, 兰强. 天线的电磁兼容技术[J]. 电波科学学报, 2007, 22(1): 170 - 173.
- [2] 林泽祥, 张永库. 宽带舰载收发天线的隔离[J]. 电子对抗, 1988(2) :126 - 128.
- [3] 何小祥, 徐金平. 改进的 IPO 与 TEM 混合法分析复杂电大腔体电磁散射[J]. 电波科学学报, 2004, 19 (5): 607 - 612.
- [4] 陈晨. 机载天线辐射特性及耦合研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [5] 谭远洋. 应用 GTD、UTD 方法分析飞行器天线的辐射特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
- [6] 吕文安. 机载天线的优化布局[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.

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>