

机载甚低频双拖曳天线辐射特性的计算

魏亮 柳超

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘 要 机载甚低频天线系统中的双拖曳天线是用于对潜通信 VLF/LF 的发射天线。本文参考文献[1]中双拖曳天线的一个三维数学模型, 用脉冲基、点选配的矩量法, 基于 MATLAB 平台, 对该模型的辐射特性进行数值分析计算; 并用 NEC2 软件对同一模型重新计算, 将两种计算结果进行分析比较, 从而验证了该方法的正确性, 并进而得到了一些结论。

关键词 双拖曳天线 矩量法 输入阻抗

Analysis the impedance of the Dual Trailing Wire Antenna (DTWA) on an Aircraft

WEI Liang LIU Chao

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract The Dual Trailing Wire Antenna (DTWA) on an Aircraft antenna system is used to transmit VLF/LF messages to submarines. Firstly, the characteristic of the DTWA such as the current and the impedance is discussed by using the Moment of Method (MoM), which uses the pulse function as the base one, and the δ -function as the weighting function. Secondly, NEC2 is used to compute the same model. And then in order to prove the validity of the first method, the two results are compared and analyzed, and some conclusions are obtained.

Key words DTWA MoM Input Impedance

1 引言

在机载甚低频对潜通信中, 主要依靠甚低频双拖曳天线发射信号。机载双拖曳天线(DTWA)由一条短天线(STWA)和一条长天线(LTWA)共同组成, 短天线(STWA)与发射机相连, 长天线(LTWA)与机身相连, 两条天线的总长度为半个波长。

在我国, 机载甚低频拖曳天线的研究尚处于起步阶段, 研究工作主要还集中在理论研究方面。文献^[1]中 Bickel 等人计算了天线辐射电阻与天线模型中心高度的关系, 仅给出了一个拖曳天线的线形模型, 并未对该模型的电气性能进行计算; 文献^[2]提供了美国海空军发展中心在 28.5kHz 和 17kHz 两个频率上针对几种不同长短天线比的半波机载拖曳天线的电气性能的计算结果, 却未给出详细的天线数学模型。而目前还未见建立机载拖曳天线的物理模型并计算其电气性能这一完整的研究工作的相关报道, 因此这方面的研究是很有意义的。

2 双拖曳天线的辐射特性计算

机载双拖曳天线的激励源并不在天线的中心, 属于非对称激励源天线, 而且飞机在空中作圆周飞行, 天线的瞬间运动状态是个螺旋线, 因此它是一个非对称激励的、半径变化的螺旋半波偶极子天线。本文采用矩量法对其辐射特性进行分析计算。

2.1 矩量法分析

对于线式天线问题, 位函数的算子方程可写为:

$$-\vec{E}_l^i = -j\omega\vec{A}_l - \frac{\partial\phi}{\partial l}\vec{l}, \quad (1)$$

式中, \vec{A}_l 为矢位, ϕ 为标位, \vec{E}_l^i 为外加的入射场。本文采用脉冲基函数, 点选配法对天线的电特性进行计算。电流 $\vec{I}(l)$ 的离散化形式为:

$$\vec{I}(l) = \sum_{n=1}^N I(n) f_n \Delta \vec{l}_n \quad (2)$$

其中, f_n 是弯曲的脉冲函数, 有

$$f_n = 1 \quad \Delta l \in \Delta l_n$$

$$f_n = 0 \quad \Delta l \notin \Delta l_n$$

对方程(1)点选配之后, 将电流展开式代入进行离散化, 就得到了一个矩阵方程,

$$[Z][I] = [V]$$

此即为矩量法中的广义欧姆定律, 其中

$$Z_{mn} = j\omega\mu\Delta\vec{l}_m \cdot \Delta\vec{l}_n \varphi_{mn} + \frac{1}{j\omega\epsilon} [\varphi_{m^+n^+} - \varphi_{m^+n^-} - \varphi_{m^-n^+} + \varphi_{m^-n^-}] \quad (3)$$

且有

$$\varphi_{mn} = \frac{1}{\Delta l_n} \int_{n^-}^{n^+} \frac{e^{-jkR_{mn}}}{4\pi R_{mn}} dl \quad (4)$$

求解该矩阵方程就可得到天线的展开系数, 进而可得到天线上的电流、输入阻抗、方向图等参数。

2.2 机载双拖曳天线的矩量解

参考文献^[1]中双拖曳天线的数学模型 1, 如图 1 所示, 天线半径为 0.002m, 总长度约为半波长, $L=7520.422\text{m}$, 则波长 $\lambda=15040.844\text{m}$, 对应的频率 $f=19.945\text{kHz}$ 。短天线长度 $l_s=615\text{m}=0.0408\lambda$, 长天线长度为 $l_l=6905.422\text{m}=0.4592\lambda$ 。长天线的垂直度约为: 79.65%。

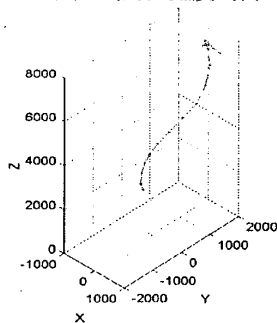


图 1 双拖曳天线的数学模型

(1) 天线模型的分段

天线模型总共由十四条线段组成, 总长约为 7520 米, 先对各长线段进一步细分, 尽量使各大段均分后的小线段长度相差小一些, 同时所有参数对波长 λ 进行归一化。分段时注意, 天线首尾两端需留出半段——从物理意义上表示零电流(不做展开函数)。如图 2 所示,

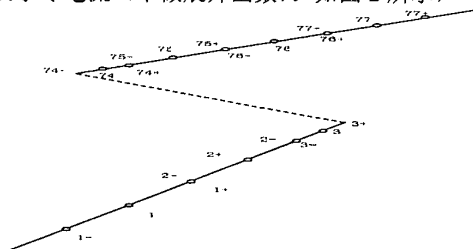


图 2 天线数学模型的分段

(2) 阻抗矩阵的求解

由(3)式可知, 阻抗矩阵的计算最关键的就是位函数 φ_{mn} 的计算。计算 φ_{mn} 时我们应该注意:

a. 参数在模型本身各线段所在的大坐标系与建立的 Δl_n 本地座标之间转换; 只有充分了解各参数在模型中的物理意义, 计算时才不容易出错。如: 参数 R_{mn} 、 z 、 ρ , 这几个参数在不同情况下需要作不同的推导。

b. 端点处理问题。求位函数时，有 φ_{mn} 、 $\varphi_{m^+n^+}$ 、 $\varphi_{m^+n^-}$ 、 $\varphi_{m^-n^+}$ 、 $\varphi_{m^-n^-}$ 五种情况。 m 代表源点， n 代表场点，当场点与源点在同一条直线上，就应按照源点所在的直线，进行自作用公式计算，否则求解端点处的 Z_{mn} 时，就会出错。

3 机载拖曳天线的计算结果分析

3.1 用脉冲基、点选配方法计算的结果

频率为 19.7kHz，激励源在第十二段上，天线的电流分布图如图 3 所示。

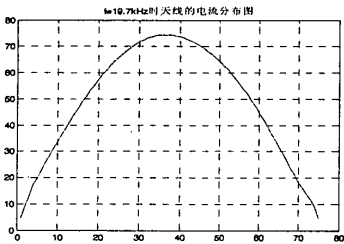


图 3 f=19.7kHz 时天线的电流分布图

输入阻抗 $Z_{in}=849-j341.9$

辐射效率 $\eta=88.5\%$

不同频率下的计算结果如表 1 所示

频率 f (kHz)	阻抗 $Z_{in}(\Omega)$	电流 $I_{max} (A)$	效率 $\eta (%)$
19.7	849.0-j341.9	74.30	88.50
19.8	954.1-j171.5	74.28	88.57
19.9	1078.0+j12.0	71.90	88.69
20.0	1226.6+j211.9	65.90	88.75

表 1 脉冲基、点选配法计算结果

从表 1 我们可以看出，输入阻抗 Z_{in} 的电抗值在 19.8kHz 和 19.9kHz 之间经过零点，即天线的谐振频率在 19.9kHz 附近。

3.2 用 NEC2 软件计算的结果

NEC2 是基于正弦插值函数基、点选配的方法。计算模型与脉冲基、点选配所用模型相同，天线半径相同，而且各大段的分段也保持一致，激励源在第 12 段上。计算结果见表 2。

表 2 NEC2 的计算结果

频率 f (kHz)	阻抗 $Z_{in}(\Omega)$	电流 $I_{max} (A)$	效率 $\eta (%)$
19.7	811.5-j487.4	67.8	85.15
19.8	907.1-j352.0	69.6	85.25
19.9	1019.5-j207.3	68.9	85.35
20.0	1152.5-j53.2	65.9	85.45
20.1	1311.1+j110.6	61.5	85.54

3.3 两种计算方法结果的比较分析

通过表 1 和表 2 的数据比较，二者的阻抗变化趋势相同，点选配法与 NEC2 计算的谐振频率相差

约 0.1kHz 。

当 $f=19.7\text{kHz}$ 时, 用 NEC2 计算, $\eta=85.15\%$; 用脉冲基、点选配法计算, $\eta=88.50\%$ 。两种算法计算所得辐射效率比较接近。

文献^[2]提供了美国海空军发展中心在 28.5kHz 和 17kHz 两个频率上针对几种不同长短天线比的半波机载拖曳天线的电气性能的计算结果 (并未提供详细的数学模型), 如表 3 所示:

频率 数据 参数	28.5(kHz)				17(kHz)			
长拖曳天线	0.45λ	0.425λ	0.4λ	0.315λ	0.45λ	0.425λ	0.4λ	0.375λ
短拖曳天线	0.05λ	0.075λ	0.1λ	0.45λ	0.05λ	0.075λ	0.1λ	0.125λ
$R_a(\Omega)$	468.7	162.5	98.1	54	444.1	162.2	90.9	53.4
$R_L(\Omega)$	42.0	42.0	42.0	42.0	70.4	70.4	70.4	70.4
$R_a'=R_a+R_L$	510.7	204.5	140.1	96.0	514.5	232.6	161.3	123.8
$X_a(\Omega)$	-361.6	-474.7	-349.6	-362.3	-396.1	-491.3	-377.0	-376.6
η	92%	79%	70%	56%	86%	70%	56%	43%

表3文献MINNEC模式计算的飞机双拖曳天线的阻抗

尽管表 3 没有模型 1 的天线样式, 且工作频率也不相同, 但模型 1 的天线参数与表中长天线 $l_L=0.45\lambda$ 、短天线 $l_s=0.05\lambda$ 的情况相近, 将本文的计算结果与之进行对比后可以认为, 本文的计算结果是可信的, 尤其天线电阻和效率吻合较好, 天线电抗则存在一些差异。

4 结论

本文介绍了机载双拖曳天线辐射特性的一种数值计算方法。通过应用脉冲基、点选配的矩量法, 对天线的辐射特性进行了分析, 其计算结果与 NEC2 软件计算数据比较, 数据基本一致, 验证了该算法的正确性; 从本文计算结果与 NADC 计算结果的比较我们可以看出, 长天线与短天线的线长比例不同, 天线的输入阻抗、辐射效率等均不相同, 长天线与短天线的线长比例越大, 天线的辐射效率越高。这些为今后机载双拖曳天线辐射特性的研究提供参考借鉴价值。

参考文献

- [1] 梁昌洪, 杨德顺. 电磁场数值分析[M]. 西安: 西北电讯工程学院, 1986.
- [2] 胡家良, 蔡樱. 甚低频飞机拖曳天线[J]. 现代通信技术, 1999, 2: 37-45.
- [3] M. BakryEl-Arini, SamehA. Mitry, RichardLee. TACAMO antenna analysis for the new high power transmit set (HPTS) [J]. IEEE CH2831-6/90/1071-1079

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),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>