

# 铁塔对 T 形面型天线电气性能影响的研究

张自侦 周文飞 张大奎 罗建新

(中国船舶重工集团公司第 722 研究所, 武汉 430079)

**摘要:** 大型 T 形面型天线多采用接地铁塔。本文根据静电学理论结合矩量法, 提出了接地铁塔及其拉线对 T 形面型天线电抗影响的计算方法, 分析了其对天线带宽、电流、效率等电气性能的影响。计算的电抗值与实际测量值吻合, 计算结果表明: 铁塔及其拉线增大了天线总电流, 增加了调谐电感损耗, 从而降低了天线效率。

**关键词:** 甚低频; T 形面型天线;

## Research of the Electric Effect for iron tower on VLF T-type Antenna

Zi-zhen Zhang Wen-Fei Zhou Da-Kui Zhang Jian-Xin Luo

(Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan, 430079, China)<sup>1</sup>

**Abstract:** The Great T-type antenna often uses grounded iron tower. In this work, an analytical formula of the reactance for the iron tower on T-type antenna is proposed. And the effect of the antenna bandwidth, current and radiation efficiency is analyzed respectively. The result show that the grounded iron tower increases current and reduces efficiency.

**Keywords:** VLF; T-type antenna

## 1 引言

T 形面型天线是一种常用的大功率甚低频发射天线, 它具有结构形式简单明了、不限地形等优点。T 形面型天线一般采用铁塔支撑。由于大型铁塔绝缘难度大, T 形面型天线一般采用接地铁塔。传统的甚低频发射天线设计方法<sup>[1,2]</sup>, 都只考虑了天线体本身顶线和下引线的静电容, 并以此计算天线输入电抗, 而没有定量考虑铁塔对天线电气性能的影响。一般甚低频发射天线实际效率均比设计效率低很多, 没有定量考虑铁塔对天线电气性能的影响是原因之一。

本文研究了 T 形面型天线的电抗特性, 根据静电学理论和传输线方法<sup>[3]</sup>, 结合矩量法<sup>[4,5]</sup>, 提出了天线与铁塔之间电抗计算方法, 并比较了计算结果与实测值<sup>[6]</sup>。同时, 本文还分析了天线带宽、电流的变化。

## 2 天线模型

考虑如图 1 的 T 形面型天线, 由天线导线和接地铁塔组成。天线导线包括天线障和下引线, 下引线悬挂在天线障下面, 相当于电气短天线, 天线障相当于顶部加载电容。天线障通过横索悬挂在接地铁塔上, 接地铁塔与横索之间通过绝缘子连接。

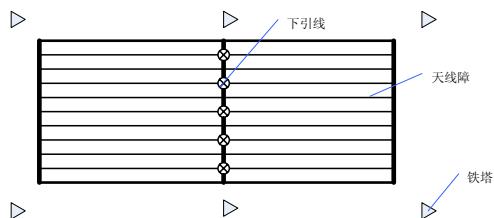


图 1 T 形面型天线示意图

在图 1 中, 从发射机输入的电流存在两个回路: 回路一: 通过天线到大地, 再从大地回到发射机;

回路二：通过天线到铁塔，然后进入大地后回到发射机。

假定天线与大地之间阻抗为  $Z_A$ ，天线与铁塔之间的阻抗为  $Z_T$ ，若不考虑大地的损耗，则其等效电路图如图 2。

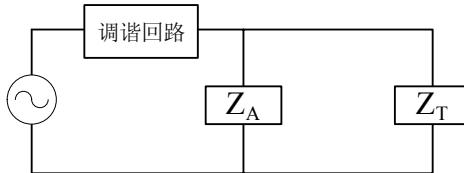


图 2 等效电路图

可见，铁塔的影响相当于在天线上并联了一个阻抗。

$Z_A$  即为通常的天线阻抗，其计算方法参考文献[1]，本文只介绍天线与铁塔之间的阻抗  $Z_T$  的计算方法。

### 3 天线与铁塔之间的阻抗计算方法

在甚低频段，可以通过静电学理论结合矩量法进行计算静电容。

为简化计算，可以假设单根直线上线电荷密度相同。根据静电学理论，带电量为  $q$  的点电荷产生的电位

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon R} \quad (1)$$

其中  $R$  为距离点电荷的距离。

直线  $L_1$  在直线  $L_2$  上任一点产生的电位

$$\varphi_{21} = \frac{1}{L_1} \int_{L_1} \frac{Q_1}{4\pi\epsilon R} dl_1 \quad (2)$$

其中  $Q_1$  为导线  $L_1$  上的电荷； $R$  为直线  $L_1$  上点  $l_1$  与直线  $L_2$  上点  $l_2$  之间的距离。

直线  $L_1$  在直线  $L_2$  上产生的平均电位

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{21} &= \frac{1}{L_2} \int_{L_2} \left[ \frac{1}{L_1} \int_{L_1} \frac{Q_1}{4\pi\epsilon R} dl_1 \right] dl_2 \\ &= \frac{1}{L_1 \cdot L_2} \iint_{L_2 L_1} \frac{Q_1}{4\pi\epsilon R} dl_1 \cdot dl_2 \end{aligned} \quad (3)$$

用等效半径近似铁塔，则所有结构均为直线，每条直线上的电位由所有直线上电荷共同作用。

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= P_{11} \cdot Q_1 + P_{12} \cdot Q_2 + \dots + P_{1n} \cdot Q_n \\ \varphi_2 &= P_{21} \cdot Q_1 + P_{22} \cdot Q_2 + \dots + P_{2n} \cdot Q_n \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\varphi_i$  为各导线上的电位； $P_{ij}$  为电位系数，可由式 (3) 计算得到。

解方程组 (4)，可得导线组的电荷和电位，进而得到总电荷  $Q$  和总电位差  $U$ 。根据静电容公式

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5)$$

即可计算得到天线对铁塔的电容  $C_T$ ，则天线与铁塔之间阻抗

$$Z_T \approx \frac{1}{i\omega C_T} \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中  $f_0$  为天线与铁塔之间的谐振频率。

$C_T$  求解过程中，最困难的步骤是电位系数的计算，其需要进行二重积分运算。分析发现，在这里采用简单的高斯二重积分公式将产生较大的误差，需要采取其他更能控制精度的积分方法，如复化辛普生积分法等，但当导线数量较多时，计算量会变得很大。

### 4 铁塔对天线电气性能的影响分析

从上面的分析指导，铁塔对天线的影响相当于在天线上并联了一个阻抗  $Z_T$ ，其影响大小取决于  $\left| \frac{Z_A}{Z_T} \right|$ 。当  $\left| \frac{Z_A}{Z_T} \right|$  很小时，电流主要经天线到地，铁塔影响可以忽略；当  $Z_T$  与  $Z_A$  相当时，有一部分电流经天线到铁塔到地，铁塔的存在会导致天线输入阻抗明显变化；当  $\left| \frac{Z_A}{Z_T} \right|$  非常大时，电流主要经天线到铁塔到地，此时相当于天线被铁塔短路了。

按图 1 的天线模型，以铁塔高度为 300m，铁塔之间间距为 800m 为例进行分析，将铁塔等效为半径为 0.5m 的接地导线。图 3 为天线对地电抗、天线对铁塔电抗和天线对地对铁塔总电抗的计算结果，并与模型天线的实际测量结果进行了比较。

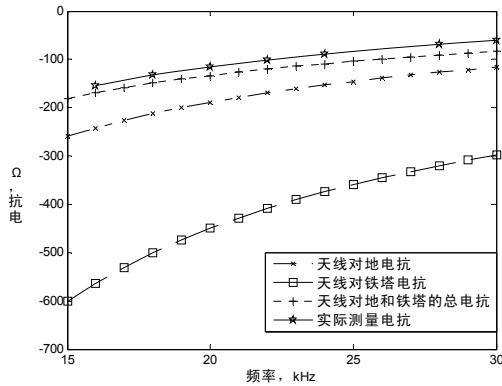


图 3 考虑铁塔时的电抗曲线

图 3 显示, 考虑铁塔后的计算结果更接近测量值, 但还是有较大误差。这是因为实际铁塔还包含铁塔拉线, 铁塔拉线比铁塔还长, 而且数量较多。图 4 是每座铁塔含三组共 15 根拉线时的电抗值。

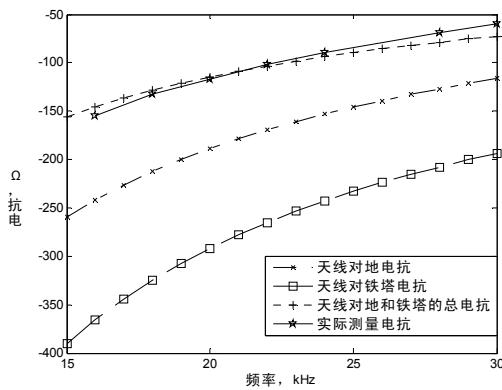


图 4 考虑铁塔及其拉线时的电抗曲线

在考虑铁塔及其拉线的影响后, 天线总电抗更接近实际测量值。

从图 4 还可以推出, 由于天线总电抗降低, 带宽应该能够提高, 其提高幅度与地损耗等多种因素有关, 这里不再详细讨论。

由图 2 可以看出, 铁塔及其拉线的存在必然增加系统总电流。由于在甚低频段, 天线电阻远远小于电抗, 电流增大比例可以近似计算为

$$\delta I \approx \left| \frac{Z_A}{Z_T} \right| \quad (7)$$

图 5 为电流增大比例曲线。可以看出, 由于铁塔及其拉线的影响, 天线总电流增大了约 60%! 此电流基本上不参与辐射, 而且要流经天线调谐回路, 增大了调谐电感的损耗, 从而导致天线效率降低:

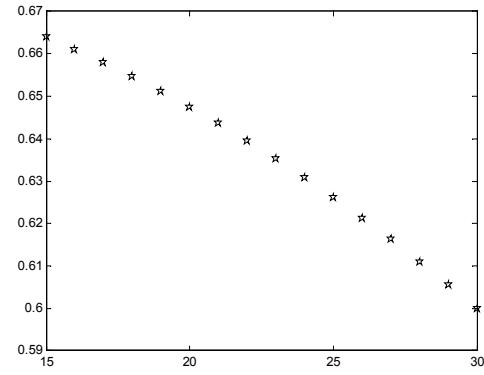


图 5 铁塔及其拉线导致的电流增大比例曲线

$$\delta \eta \approx \frac{R_r}{R_L + R_r + R_g} - \frac{R_r}{(1 + \delta I)^2 \cdot R_L + R_r + R_g} \quad (8)$$

其中  $R_r$  为天线辐射电阻;  $R_L$  为调谐电感损耗电阻;  $R_g$  为地损耗电阻。

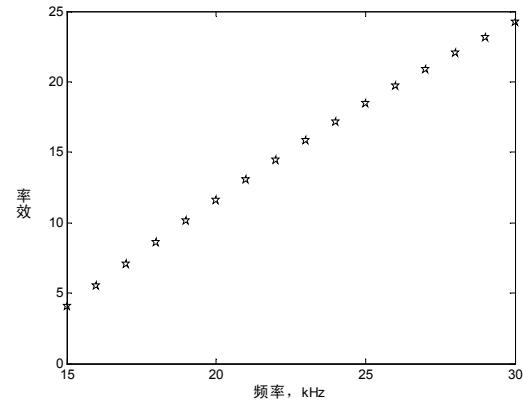


图 6 天线效率下降曲线

图 6 为天线按式 (8) 计算的天线效率下降曲线, 可见, 接地铁塔导致天线效率降低 5% 以上。因此, 有接地铁塔的 T 形面型天线其效率低于铁塔绝缘的 T 形面型天线。实际甚低频天线工程中已经证明了这一点。

## 5 结论

本文研究了铁塔及其拉线对 T 形面型天线电气性能的影响, 推导出其电抗的计算方法和公式, 分析了电抗、带宽、电流的变化, 分析结果表明: 铁塔及其拉线增大了天线总电流, 增加了调谐电感损耗, 降低了天线效率。因而, 在 T 形面型天线设计

中，在条件许可时，应对铁塔及其拉线采取对地绝缘措施。

本文的研究结果对 T 形面型天线的设计具有参考

意义，可作为天线铁塔及其拉线是否对地绝缘的依据之一。

## 参 考 文 献

- [1] J. R. Wait, VLF Radio Engineering, Pergamon Press, 1967.
- [2] 张大奎, 杨德川, 何治琳. 超长波发射天线的设计方法. 舰船无线电通信, 1980 年第二期.
- [3] Jin Au Kong, 电磁波理论. 电子工业出版社, 2003.
- [4] 康行健. 天线原理与设计. 北京理工大学出版社, 1993.
- [5] 谢处方, 王石安, 文希理. 加载与媒质中天线. 成都: 电子科技大学出版社, 1990.
- [6] 蒋宇中, 张曙霞, 韩郁. 强噪声环境下测量甚低频天线阻抗方法的研究, 电波科学学报, 2004 年第 5 期.

### 作者简介:

张自侦, 男, 工程师, 主要研究领域为低频、甚低频天线和电磁场等; 周文飞, 男, 工程师, 主要研究领域为低频、甚低频天线和电磁场等; 张大奎, 男, 研究员, 主要研究领域为天线和电磁场等; 罗建新, 男, 研究员, 主要研究领域为天线和电磁场等。

## 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](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>