

# 特高压角钢铁塔无源干扰计算的三维面模型

唐波<sup>1</sup>, 文远芳<sup>1</sup>, 赵志斌<sup>2</sup>, 张小武<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003; 3. 国网电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430074)

## Three-dimensional Surface Computation Model of the Reradiation Interference From UHV Angle-steel Tower

TANG Bo<sup>1</sup>, WEN Yuanfang<sup>1</sup>, ZHAO Zhibin<sup>2</sup>, ZHANG Xiaowu<sup>3</sup>

(1. College of Electric and Electronic, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China;  
2. College of Electric and Electronic, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;  
3. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** A three-dimensional surface simulation computation model of reradiation interference on radio station from ultra high voltage (UHV) angle-steel tower was designed intending to offer higher accuracy in the assessment of passive interference protecting distance between radio station and UHV transmission lines. Based on the wire and surface electric field integral equations of reradiation interference, the equivalent principle and the reasons for the increased error at high frequency were analyzed. In order to assure the continuity of induced current on steel tower and embody the structure of angle-steel effectively, three-dimensional surface simulation model with and without auxiliary angle-steel based on triangular element were presented. With the RWG base function and Galerkin's method, method of moments was applied to calculate the reradiation interference level of surface model, and the result was compared with that of wire model. The result shows that the values drawn from wire model and surface model have the same trend and the error gradually increases with the increase of frequency. To 0.1 dB as the deviation allowable value, the surface model should be used when the frequency is over 16.7 MHz.

**KEY WORDS:** ultra high voltage (UHV) angle-steel tower; reradiation interference; method of moments; auxiliary angle-steel; wire model; surface model

**摘要:** 为更准确地计算特高压输电线路对各类无线台站的无源干扰防护距离, 提出建立单基角钢铁塔无源干扰三维面模

型的方法。依据输电线路无源干扰的线、面电场积分方程, 分析已有铁塔线模型的等效依据和高频段误差增大的原因。为保证铁塔感应电流的连续性, 有效体现角钢的局部特征, 提出基于三角面元的铁塔有(无)辅材的三维面模型。选择RWG(rao-wilton-gisson)基函数和伽略金检验, 采用矩量法计算铁塔面模型无源干扰水平, 并与线模型计算结果进行比较。结果表明, 随着计算频率的增高, 铁塔线模型与面模型的计算结果变化趋势相同, 数值差异逐渐增大。如以0.1 dB为偏差允许值, 建议在16.7 MHz以上频率采用更能模拟实际情况的特高压铁塔面模型。

**关键词:** 特高压角钢铁塔; 无源干扰; 矩量法; 铁塔辅材; 线模型; 面模型

## 0 引言

特高压架空输电线路对无线台站可能形成的干扰分为有源干扰和无源干扰<sup>[1-2]</sup>。最早研究输电线路铁塔对无线台站无源干扰的方法是建立一定缩小比例的铁塔模型进行实验测量<sup>[3]</sup>。C. W. Trueman和S. J. Kubina<sup>[4]</sup>首先对高压架空输电线路对附近中波广播发射台站的影响进行了仿真计算, 仿真中将输电线路的铁塔和架空地线作为一个整体, 且将整基铁塔等效为一根细线模型, 利用矩量法和NEC程序计算了输电线路对中波发射台的无源干扰。M. M. Silva等人<sup>[5]</sup>继续使用铁塔的细线模型, 用矩量法研究了输电线路对调幅广播电台的无源干扰, 并通过实验对计算模型进行了验证。C. W. Trueman和S. J. Kubina在后续的研究<sup>[6-13]</sup>中, 根据铁塔的结构, 将计算模型中的铁塔横担和塔身分别用不同直径的圆柱体代替。M. A. Tilston和K. G. Balmain<sup>[14-15]</sup>

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A09); 国家电网公司科学技术项目(SG0925)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006BAA02A09); S Project Supported by Science-technology Research Foundation of State Grid Corporation of China (SG0925).

也对输电线路无源干扰模型进行了研究, 由于计算机计算能力的限制, 模型仍为等效线模型, 同时研究的频率最高为 1.58 MHz。

IEEE 根据上述研究给出了关于中波发射台的二次辐射计算导则<sup>[16]</sup>。但该标准是 1996 年在上述作者研究成果的基础上归纳出的, 相关规范仅针对中波广播电台, 提出的适用频率为 535~1 705 kHz, 显然该标准相关规定并不适用于输电线路对更高频率的测向台、导航台等无线台站的影响研究。

GB 7495—87 架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距<sup>[17]</sup>, 根据有源干扰确定各电压等级的输电线路与各无线台站间的防护距离, 涉及的最高电压等级为 500 kV, 对无源干扰没有讨论<sup>[18]</sup>。随着中国输电线路的电压等级逐步提高, 线路铁塔也变得更高, 新修建的特高压线路对周边各类无线台站的无源干扰影响也日趋明显。近年来中国开始进行 1 000 kV 特高压交流输电线路对无线电台无源干扰方面的研究。文献[2,19]较为详细地论述了特高压交流输电线路无源干扰的理论模型, 该模型依据细直导线的 Pocklington 电场积分方程求解输电线路铁塔对无线台站的无源干扰问题。依据该模型, 文献[20-22]、[23-24]、[25-26]分别研究了 1 000 kV 特高压交流输电线路对调幅广播收音台、航空无线电导航台和短波测向台的影响问题。通过缩比模型试验可知, 文献[2]提出的铁塔线模型适用于 16.7 MHz 以下频率的线路无源干扰问题。若要更为准确地求解输电线路对高频无线台站的影响, 还需要更为完备且更为合理的线路无源干扰模型。

## 1 高压输电线路的无源干扰

### 1.1 高压输电线路无源干扰的机理

高压输电线路主要由导线、地线、绝缘子串、线路金具、铁塔、基础以及接地装置等部分组成, 其暴露在地表面以上的金属部分主要是铁塔、导线和地线。从电磁学观点看, 输电线路的铁塔、导线和地线不过是无数带电粒子的集合, 各无线台站发出的入射电磁波与输电线路暴露在地面以上各组成部分中的带电粒子相互作用, 产生新的等效电荷、电流、磁荷、磁流, 或者说产生了新的场源<sup>[27]</sup>。随着入射电磁场的交变, 输电线路各导体部分产生的感应电流也是交变的, 并在输电线路附近的空产生新的电磁场, 即二次辐射场。二次辐射场强度取决于导体位置、激发场的强弱以及导体本身的物

理属性等。

处在电磁场中的输电线路, 除受激发产生二次辐射外, 还对电磁波产生反射作用, 形成反射电磁场。反射场的强度与入射场的强弱、反射体的性质、反射体的大小和反射面的特性等有关。处于无线台站附近的输电线路金属部件属于二次辐射体和反射体(它自身不是辐射源, 即无源), 因外部电磁场激发产生再辐射或反射电磁波。这些电磁波和原入射电磁波叠加, 改变了原入射电磁波的幅值和相位, 从而在无线台站的接收点对要接收的信号产生干扰, 造成测量误差。

在这种情况下, 电磁场所遵循的基本定律还是原来自由空间中的场定律, 只是应该将输电线路铁塔、导线和地线在入射电磁波作用下形成的等效宏观电荷、电流等, 也看作是处于原来自由空间中的电磁场源来处理。

### 1.2 输电线路无源干扰的电场积分方程

输电线路无源干扰可简化为如图 1 所示的数学模型。图 1 中有 2 个坐标系, 一个是直角坐标系  $(x, y, z)$ , 另一个是球坐标系  $(r, \theta, \varphi)$ 。设输电线路的铁塔、导线和地线为理想导体  $V$ , 位于坐标轴  $x$  上, 电磁波  $E_i$  以角度  $(\theta_i, \varphi_i)$  入射到输电线路, 而输电线路上任一点  $r'$  处, 即源点处的感应电流密度分布为  $J(r')$ , 向空间再辐射。设感应电流产生的散射电场为  $E_s$ , 无线电接收台站位于场点  $r$ 。

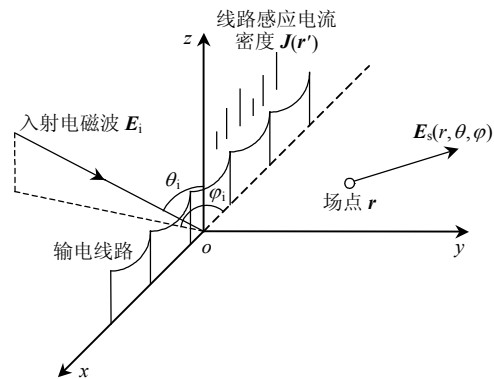


图 1 输电线路无源干扰的基本数学模型

Fig. 1 Mathematical model of reradiation interference from power transmission line

对于均匀媒质空间, 根据矢量波动方程和并矢格林函数, 可得到图 1 中场点  $r$  处的电场积分方程 (electric field integral equation, EFIE)<sup>[27]</sup>为

$$E_s(r) = j\omega\mu \int_V dr' g(r, r') J(r') - \nabla \frac{1}{\epsilon} \int_V dr' g(r, r') \rho(r') = j\omega\mu \int_V dr' G_c(r, r') J(r') \quad (1)$$

式中:  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  为格林函数,  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$ ;  $k$  为波数,  $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ ;  $\mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  为电场并矢量格林函数,  $\mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\hat{\mathbf{I}} + \frac{\nabla\nabla}{k^2})g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ ,  $\hat{\mathbf{I}}$  为单位算子。

将式(1)中的体积分变为面积分, 可得到新的电场积分方程:

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = j\omega\mu \int_S g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' - \frac{1}{j\omega\varepsilon} \nabla \int_S g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' \quad (2)$$

设线路金属部分为理想导体, 在其表面应用切向电场的边界条件, 有

$$\mathbf{t} \cdot (\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_i(\mathbf{r})) = 0 \quad (3)$$

式中  $\mathbf{t}$  为单位切向矢量。

将式(3)代入式(2), 得到输电线路表面电流的EFIE为

$$j\omega\mu \mathbf{t} \cdot \int_S g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' - \frac{1}{j\omega\varepsilon} \mathbf{t} \cdot \nabla \int_S g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' = -\mathbf{t} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) \quad (4)$$

为简化计算量, 考虑到线路上导线、地线的横向尺寸远小于轴向尺寸, 可看作细线导线结构; 而线路铁塔上钢制主材和辅材的横向尺寸也比轴向尺寸要小, 也可近似将铁塔上的各角钢看成细线结构。则线路上的感应电流  $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$  只是轴向变量的函数, 即  $\mathbf{J}(\mathbf{r}') = \mathbf{J}(l')$ , 因此, 将式(1)中的体积分变为线积分, 可得

$$-\mathbf{l} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = j\omega\mu \int_L \mathbf{l} \cdot \mathbf{l}' g(\mathbf{r}, \mathbf{r}'(l')) \mathbf{I}(l') dl' - \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{d}{dl} \int_L g(\mathbf{r}, \mathbf{r}'(l')) \frac{d\mathbf{I}(l')}{dl'} dl' \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{l}$  为沿等效细导线轴线方向上的单位矢量;  $\mathbf{I}(l')$  为沿着等效细导线轴线方向上的线电流密度,  $\mathbf{I}(l') = 2\pi a \mathbf{J}(l)$ ,  $a$  为细导线半径。

当细导线为直线时, 式(5)可转化为 Pocklington 积分方程。

## 2 输电线路无源干扰的模型及其求解方法

### 2.1 高压输电线路无源干扰线模型

#### 2.1.1 线模型的等效要求

特高压输电线路铁塔为大量不等长的角钢铆接而成空间桁架结构, 若要将铁塔各段角钢等效为细导线模型, 则可通过 Hallen 方法<sup>[28]</sup>, 将角钢模型进行转换。

Hallen 方法研究了截面为正方形和条形的导体

等效成线模型的问题, 并要求等效后的细导线模型为无限细长导线, 即天线的半长度  $l$  远大于天线的半径  $a$ 。根据 R. King 和 C. W. Harrison. Jr. 的研究<sup>[29]</sup>, 随着入射波波长的减小, 即随着频率的增加, 长径比较小 ( $l/a=75$ ) 的等效圆柱天线上的电流和理想无限细天线 ( $l/a=\infty$ ) 上的电流有着越来越大的差别, 二次辐射场强差值也会相应越来越大; 当天线等效细线模型超过入射波全波长 ( $2l > \lambda$ ) 时, 天线中感应电流的相位将产生突变, 出现驻波。因此, 若采用细直线模型, 则要求模型每段长度最大不能超过全波长, 同时还必须保证较大的长径比 ( $l/a$ )。

#### 2.1.2 线模型的偏差分析

从当前国内外研究情况看, 目前对输电线路无源干扰的主要求解方法为采用矩量法求解输电线路直线模型的 Pocklington 电场积分方程。求解中, 按照激励电磁波 0.1 倍波长对线模型分段, 基函数为脉冲基函数, 检验函数为 Dirac  $\delta$  函数。这种线模型方法具有计算速度快、存储量少的优点, 但随着计算频率的增高, 线模型的误差会显著增大。文献[2]采用缩比模型实验, 得到了线模型计算值与实测值比较, 如表 1 所示。

表 1 文献[2]的实测值与仿真计算值  
Tab. 1 Measured values and computed values proposed by reference [2] dBV/m

实验模型与发射天线距离/m	项目	频率/MHz				
		11.7	13.3	16.7	20.0	26.7
50	测量值	-0.40	-0.60	-0.30	-0.90	-0.70
	计算值	-0.34	-0.57	-0.42	-0.75	-0.60
	误差	0.06	0.03	0.12	0.15	0.10
70	测量值	-0.40	-0.60	-0.30	-0.90	-0.70
	计算值	-0.32	-0.54	-0.28	-0.76	-0.43
	误差	0.08	0.06	0.02	0.14	0.36

为大幅度提高计算效率, 线模型根据输电线路金属架构的特点作了一定的简化假设: 首先从脉冲基函数的选择上定义了输电线路各部分分段单元上的感应电流不连续, 即认为分段单元中心电流为常数, 而分段的边界处电流为 0, 这与实际感应电流分布的连续性存在一定差异; 随着激励电磁波频率的升高(波长减小), 过多的分段将影响线模型的长径比, 造成不满足线模型等效要求的分段数增多, 即出现驻波电流的分段数增加, 使得计算结果偏差逐步增大。

另外, 从式(5)的推导过程可以看出, 采用线模型的前提是认为输电线路各导体的感应电流都完全集中在导线轴线上, 且只沿轴向方向分布, 这和实际情况有一定差异。

## 2.2 角钢铁塔无源干扰面模型

### 2.2.1 面模型的等效依据

文献[30-31]最早提出了用面模型求解复杂物体的电磁计算方法。文献[32-33]研究了线(面)模型的等效性问题，认为根据波长对线模型划分单元后，单元的长度和半径之比不能小于 8，否则线模型计算结果将不准确，建议仿真模型考虑用面模型进行计算。

由电磁场理论可知，作为良导体的钢的电磁场主要集中在导体表面很薄的薄层内，即导体的趋肤效应。良导体趋肤深度  $\delta$  的计算公式为

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (6)$$

式中： $f$  为电磁波频率，Hz； $\mu$  为磁导率， $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ； $\sigma$  为电导率，角钢电导率  $\sigma = 1.92 \times 10^6 \text{S/m}$ 。

若取频率 1 MHz 为研究对象，计算得到电磁波在角钢导体内传播的趋肤深度为 0.36 mm，相对于 2.4 cm 的角钢厚度来说，可认为中短波及以上频率的铁塔无源干扰问题均可采用三维面模型。

对于特高压输电线路来说，处于地面以上的金属构件主要为铁塔、导线和地线，其中铁塔为多段角钢相互铆接而成的空间桁架结构。因此，在入射电磁波的作用下，只需分析出铁塔、导线和地线等金属部分表面的电流分布，就可得到输电线路的电磁场特性，也即求解面积分方程(4)。

### 2.2.2 矩量法求解面积分方程

采用矩量法求解面积分方程时，根据矩量法的基本原理，需要将铁塔角钢表面划分为许多小的子区域。此时，若采用脉冲基函数，会造成表面各子区域的边界处电流产生跃变，破坏感应电流的连续性和微分特性。因此，选择采用三角面元的 RWG 基函数。如图 2 所示的三角平面单元对中，在与第  $n$  条边(内边)相对的一对三角单元  $T_n^-$  和  $T_n^+$  上分别建立与边  $l_n$  相关的基函数。为了使 2 个三角单元内的电流能共用一个展开系数，在三角单元  $T_n^+$  上取由顶点  $O^+$  指出的位置矢量  $\rho_n^+$ ，在三角单元  $T_n^-$  上取指向顶点  $O^-$  的位置矢量  $\rho_n^-$ ，建立与边  $l_n$  相关的 2 个三角单元上的基函数<sup>[30]</sup>：

$$f_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & r \in T_n^+ \\ -\frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & r \in T_n^- \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

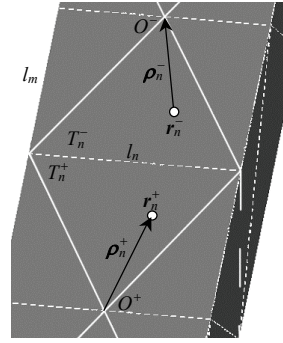


图 2 相邻三角面元对的几何关系  
Fig. 2 Geometric relationship of adjacent triangular elements

式中： $A_n^-$  和  $A_n^+$  分别为三角单元  $T_n^-$  和  $T_n^+$  的面积； $l_n$  为第  $n$  条边的边长。

采用 RWG 基函数对输电线路各组成部分表面的感应电流进行离散后，电流基函数  $f_n$  总是与面元对间的公共边  $l_n$  相关，因此铁塔面模型表面上的未知电流可用基函数展开：

$$J_s = \sum_{n=1}^N I_n f_n(\mathbf{r}) \quad (8)$$

式中  $N$  为整个铁塔面模型划分三角面元后，三角面元对之间边的总边数。每一个三角单元内的电流由 3 条边上的基函数加权组成。由于角钢建模后的面模型截面为“L”的开放型，即边界上的面元不能构成面元对(如图 2 中的边  $l_m$ )，则需要将该边的法向电流强加为零，即角钢面模型的边界边不存在法向电流。因此，在建立线性方程组时，只需要考虑内边(除边界边外)的法向电流。

将式(8)代入式(4)后，根据伽略金检验方法，选取基函数为检验函数  $f_m$ ，即加权系数为边界上电流值，可得到矩阵方程：

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_{im}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中：

$$Z_{mn} = j\omega\mu \int_S \int_{S'-r} [f_m(\mathbf{r}) \cdot f_n(\mathbf{r}') - \frac{1}{k^2} \nabla_S \cdot f_m(\mathbf{r}') \nabla'_S \cdot f_n(\mathbf{r}')] G_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' dS \quad (10)$$

$$V_{im} = \int_S \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) f_m(\mathbf{r}) dS \quad (11)$$

将式(7)代入式(10)和(11)，用三角形数值积分方法进行数值积分，则可求解式(9)。

## 3 特高压角钢铁塔线(面)模型无源干扰的比较

### 3.1 单基铁塔无源干扰数学模型

本文编制的电磁场计算程序以矩量法程序

NEC 为基础, 对其源代码改进, 计算面模型时以 RWG 基函数代替脉冲基函数对铁塔感应电流进行离散展开。模型以  $\pm 800\text{ kV}$  向家坝-上海特高压直流输电线路 ZP30101 型典型铁塔为例进行相关仿真计算, 该铁塔实际尺寸如图 3 所示。

建立如图 4 所示的单基铁塔对观测点的无源干扰数学模型。其中, 铁塔位于坐标系原点, 输电线路方向为坐标系  $y$  轴方向。根据规程<sup>[34]</sup>, 输电线路无线电干扰测量天线在距地面 2 m 的高处, 因此取观测点  $P$  坐标为  $(2000, 0, 2)$ , 其中,  $P$  点的  $x$  方向坐标 2000 m 为假定的防护间距。由于铁塔可看作垂直金属接地体, 因此考虑铁塔对无线电干扰最严

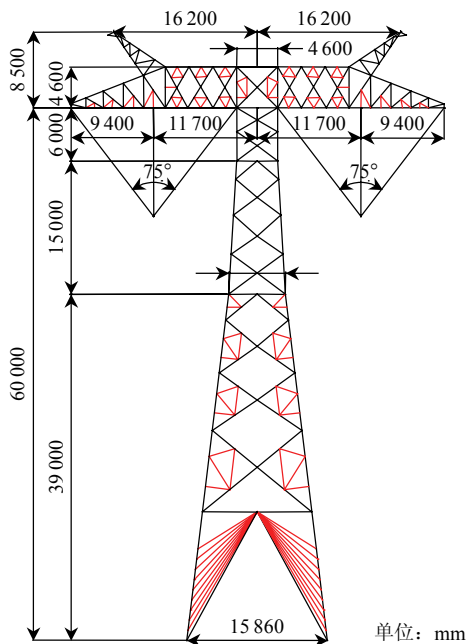


图3 ZP30101型铁塔外形尺寸

Fig. 3 Outline dimension of tower type ZP30101

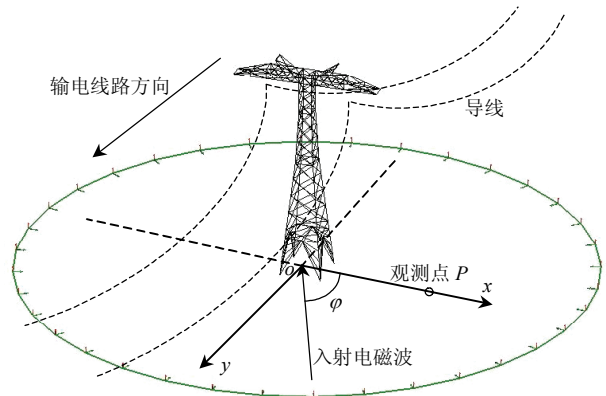


图4 单基铁塔的无源干扰数学模型

Fig. 4 Mathematical model of reradiation interference from single tower

重的情况, 即采用垂直极化平面电磁波对模型施加激励。激励电磁波以与  $x$  轴正方向夹角为  $\varphi$  入射,  $\varphi = 0^\circ \sim 360^\circ$ , 计算有输电线路存在时的  $P$  点归一化空间电场强度。模型中, 假定大地为理想电导体。

为考虑铁塔辅材的影响, 分别建立有(无)辅材铁塔的线、面模型, 如图 5 所示。在建立角钢铁塔面模型时, 根据工程实际, 按照角钢规格为 L120 和 L150 建立角钢辅材面模型, 按照角钢规格为 L200 建立角钢主材面模型, 即角钢边宽分别为 12、15 和 20 cm。为保证模型和实际铁塔一致, 建模时需注意组装铁塔时的角钢凹口朝向地面。图 5(e)、(f)是局部放大后的铁塔塔头面模型示意图, 从图中可以清晰地看出角钢的凹口都是面向地面, 且角钢连接结构与实际铁塔一致。

### 3.2 单基铁塔线(面)模型无源干扰比较

#### 3.2.1 无源干扰水平的计算方法

对发射天线或接收天线的无源干扰电磁干扰影

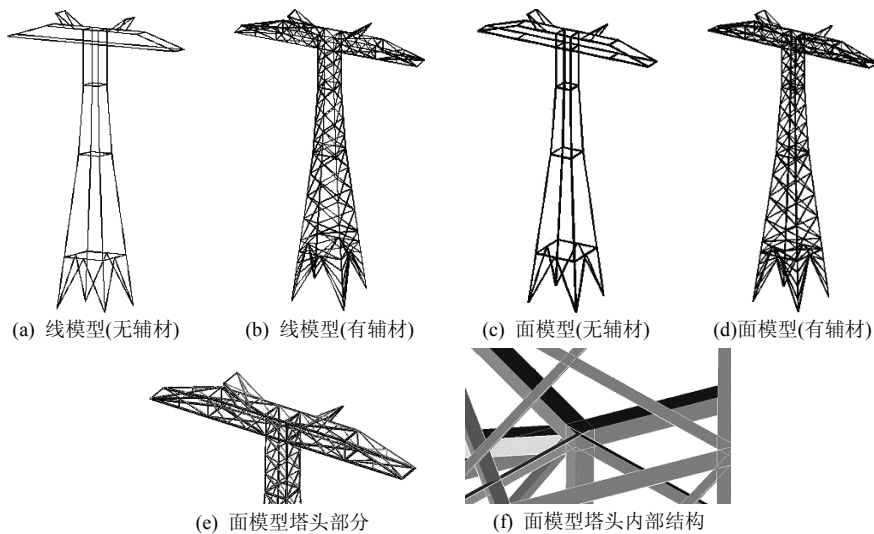


图5 单基铁塔的有(无)辅材线、面模型三维图

Fig. 5 Wire model and surface model of single tower with (without) auxiliary angle-steel

响用分贝表示，即定义为

$$S = 20 \lg(E_u / E_w) \quad (12)$$

式中： $E_u$  为考虑输电铁塔影响后观测点的空间电场强度，即求解式(4)后得到的结果； $E_w$  为无输电铁塔时观测点的空间电场强度，即归一化的入射电磁波场强。

采用图 4 所示的数学模型，改变入射电磁波的入射角度，得到各种频率下有(无)辅材的单基铁塔线、面模型无源干扰数值。为方便比较，将 4 种模型的仿真结果绘于同一张图中，如图 6 所示。各频

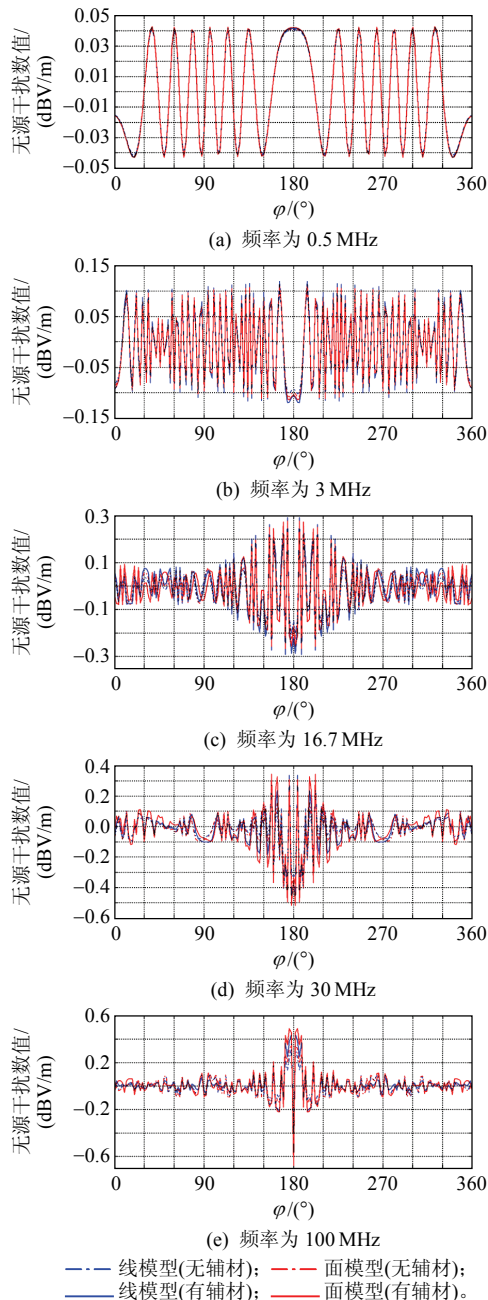


图 6 基铁塔有(无)辅材的线、面模型无源干扰值

Fig. 6 Reradiation interference from single tower calculated by wire and surface model with (without) auxiliary angle-steel

率下 4 种模型无源干扰极值如表 2 所示。

表 2 各频率点无源干扰极大值  
Tab. 2 Maximum of re-radiation interference at different frequency

频率/MHz	线模型		面模型	
	无辅材	有辅材	无辅材	有辅材
0.5	-0.0417	-0.0427	-0.0422	-0.0431
3	-0.1018	-0.1199	-0.1085	-0.1144
16.7	-0.2126	-0.2926	-0.2401	-0.2877
30	-0.3351	-0.4622	-0.3809	-0.5180
100	-0.4087	-0.5981	-0.4868	-0.6794

### 3.2.2 单基铁塔的无源干扰特性

从图 6 可以看出，在甚高频以下的电磁波激励下，无论是否考虑铁塔辅材，铁塔对入射电磁波无源干扰的方向趋势始终相同。这是由于，即使频率达到 100 MHz，入射电磁波波长仍有 3 m，而此时的铁塔角钢主材宽 0.2 m，远小于波长，所以铁塔可以用线模型近似反映其无源干扰特性。干扰沿数学模型 x 轴对称，即沿线路垂直方向对称，但由于铁塔本身形状并不规则，造成了无源干扰出现多个峰值的情况。从不同入射角度的无源干扰数值来看，随着频率的增加，铁塔无源干扰水平的极大值和极小值之差也增大，这与文献[3]的试验研究结果一致。

考虑辅材后的铁塔无源干扰数值比不考虑辅材的铁塔大，而且随着频率的增加，两者差值逐步增大。这从电场叠加原理可以解释：在建立铁塔模型时，由于将铁塔各部分认为是理想导体，导体外(即铁塔外观测点)的总电场为入射场与铁塔各金属构件散射场的叠加。显然，由于角钢辅材对入射电磁波造成的散射场强的叠加影响，完整建模的单基铁塔无源干扰要大于仅对主材建模的铁塔。因此，不考虑铁塔辅材计算得到的结果，应该小于实际值。

### 3.2.3 线(面)模型的适用范围

根据表 2 的计算结果，特高压铁塔线模型与面模型在分别考虑有无辅材的情况下，反映无源干扰变化的趋势完全一致，但随着频率的增高，不同模型计算数值的差异逐渐增大。如以 0.1 dB 作为偏差允许范围，在大于 16.7 MHz 后的不同模型计算结果差异明显，这与文献[2]的实验结果一致。若以有辅材的面模型结果为基准，大于 16.7 MHz 的有辅材线模型偏差较小，无辅材的面模型和线模型偏差都较大。

从理论上讲，用根据铁塔实际结构建立的完整三维面模型计算得到的结果最能反映实际的干扰

情况,然而按实际结构建模的铁塔面模型随着频率的增大,其计算量也剧烈增加。如采用 HP XW9400 工作站计算入射波频率为 100 MHz 时有辅材的单基铁塔面模型无源干扰,耗时为 9.5 h,若研究铁塔成列后输电线路的无源干扰,计算量将成几何倍数增加。

根据以上分析比较,在具体应用时,特高压铁塔计算模型的选择应根据激励波频率、精度要求和计算量综合确定。例如,对无源干扰限值在 1 dB 以下的无线电台站,为达到 0.1 dB 的计算精度,在低于 16.7 MHz 的频段采用线模型即可满足要求,但更高频率时须结合有辅材的面模型计算。

为克服面模型计算量巨大的不足,在无源干扰防护计算中,可先使用线模型确定干扰最大的频率点和入射波方向,再使用面模型精确计算最大干扰数值。

#### 4 结论

为研究更高频率的特高压输电线路无源干扰问题,提出了建立角钢铁塔无源干扰的三维面模型,结合矩量法阐述了基于 RWG 基函数的三角面元铁塔面模型无源干扰求解方法,并与目前常用的铁塔线模型计算结果进行了比较。根据研究结果,建议如以 0.1 dB 作为偏差允许范围,频率大于 16.7 MHz 时应采用更能模拟实际情况的铁塔面模型。最后结合线模型和面模型的各自优点,提出了高效精确计算特高压输电线路对无线电波无源干扰水平的方法。

#### 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2006: 2-8.  
Liu Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economy Press, 2006: 2-8(in Chinese).
- [2] 邬雄, 万保权, 张小武, 等. 1000 kV 特高压交流同塔双回线路对无线电台站影响及防护研究[R]. 武汉: 国网武汉高压研究院, 2008.  
Wu Xiong, Wan Baoquan, Zhang Xiaowu, et al. Reradiation interference and protection on radio station from 1000 kV double-circuit power transmission line[R]. Wuhan: Wuhan High Voltage Research Institute of SGCC, 2008(in Chinese).
- [3] Toyada S, Hashimoto H. Scattering characteristics of VHF television broadcasting waves by steel towers of overhead power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1979, 21(1): 62-65.
- [4] Trueman C W, Kubina S J. Numerical computation of the reradiation from power lines at MF frequencies[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1981, 27(2): 39-45.
- [5] Silva M M, Balmain K G, Ford E T. Effects of power line re-radiation on the pattern of a dual-frequency MF antenna[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1982, 28(3): 94-103.
- [6] Trueman C W, Kubina S J, Belrose J S. Corrective measures for minimizing the interaction of power lines with MF broadcast antennas [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1983, 25(3): 329-339.
- [7] Trueman C W, Kubina S J, Madge R C, et al. Comparison of computed RF current flow on a power line with full scale measurements[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1984, 30(3): 97-107.
- [8] Trueman C W, Kubina S J. Initial assessment of reradiation from power lines[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1985, 31(3): 51-65.
- [9] Trueman C W, Kubina S J. Detuning power lines by isolating towers for the suppression of resonances[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1986, 32(3): 44-55.
- [10] Trueman C W, Kubina S J, Baltassis C. Ground loss effects in power line reradiation at standard broadcast frequencies[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1988, 34(1): 24-38.
- [11] Trueman C W, Roobroek T M, Kubina S J. Stub detuners for free-standing towers[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1989, 35(4): 325-338.
- [12] Trueman C W, Kubina S J. Power line tower models above 1 000 kHz in the standard broadcast band[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1990, 36(3): 207-218.
- [13] Trueman C W, Kubina S J. Scattering from power lines with the skywire insulated from the towers[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1994, 40(2): 53-62.
- [14] Tilston M A, Balmain K G. Medium frequency reradiation from a steel tower power line with and without a detuner[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1984, 30(1): 17-26.
- [15] Tilston M A, Balmain K G. A microcomputer program for predicting AM broadcast re-radiation from steel tower power lines[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1984, 30(2): 50-56.
- [16] IEEE. IEEE Standard 1260-1996, IEEE guide on the prediction, measurement, and analysis of AM broadcast reradiation by power lines[S]. New York: IEEE Inc., 1996.
- [17] 中华人民共和国广播电影电视部, 水利电力部. GB 7495—87 架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.  
State Administration of Radio Film and Television, State Administration of Hydraulic and Electric. GB 7495—87 The protecting distance between overhead power line and receiving station of AM broadcasting[S]. Beijing: Standard Press of China, 1987(in Chinese).
- [18] 万保权, 邬雄, 刘涤尘, 等. 西北 750 kV 输电线路的无线电干扰研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 41-44.  
Wan Baoquan, Wu Xiong, Liu Dichen, et al. Study on the radio interference of 750 kV northwest transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3): 41-44(in Chinese).
- [19] Zhang Xiaowu, Tang Jian, Zhang Huanguo, et al. Reradiation interference computation model of high voltage transmission line to the shortwave radio direction finding station[C]//20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Switzerland: IEEE Electromagnetic Compatibility, 2009: 309-312.
- [20] 干喆渊, 张小武, 张广洲, 等. 特高压输电线路对调幅广播台站

- 的无源干扰[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 9-12.  
Gan Zheyuan, Zhang Xiaowu, Zhang Guangzhou, et al. Passive interference in receiving stations of am broadcasting caused by UHVAC transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 9-12(in Chinese).
- [21] 干喆渊, 张小武, 张广洲, 等. UHV 交流输电线路对调幅广播收音台防护间距[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 856-861.  
Gan Zheyuan, Zhang Xiaowu, Zhang Guangzhou, et al. Protected distance of AM receiving stations to UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 856-861(in Chinese).
- [22] Gan Zheyuan, Liu Xingfa, Zhang Guangzhou, et al. Research on protecting distance between AM receiving stations and UHV AC TL[C]//IEEE APEMC. Singapore: IEEE, 2008: 803-806.
- [23] 刘兴发, 干喆渊, 张小武, 等. 交流特高压输电线路对航空无线电导航台站的有源干扰计算[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 6-8.  
Liu Xingfa, Gan Zheyuan, Zhang Xiaowu, et al. Calculation of active interference in aeronautical radionavigation stations caused by UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 6-8(in Chinese).
- [24] 张小武, 刘兴发, 邬雄, 等. 特高压交流输电线路与航空中波导航台间防护距离计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1830-1835.  
Zhang Xiaowu, Liu Xingfa, Wu Xiong, et al. Calculation of radio interference from HV AC transmission line to aeronautical radionavigation stations[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1830-1835(in Chinese).
- [25] 张小武, 干喆渊. 输电线路对短波信号的二次辐射计算模型[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 861-865.  
Zhang Xiaowu, Gan Zheyuan. Reradiate Computation model of transmission line to the short wave[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 861-865(in Chinese).
- [26] 干喆渊, 张小武, 张广洲, 等. 特高压输电线路在短波段的二次辐射简化算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2283-2287.  
Gan Zheyuan, Zhang Xiaowu, Zhang Guangzhou, et al. Simplified calculation on UHV TL's reradiation at shortwave frequency[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2283-2287(in Chinese).
- [27] 何国瑜, 卢才成, 洪家才, 等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 104-112.  
He Guoyu, Lu Caicheng, Hong Jiakai, et al. Calculation and measurement of electromagnetic scattering[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006: 104-112(in Chinese).
- [28] Erik H. Admittance diagrams for antennas and the relation between antenna theories[R]. Boston, Massachusetts, USA: Cruft Laboratory, Harvard University, 1948.
- [29] Ronold K, Harrison C W. The distribution of current along a symmetrical center-driven antenna[J]. Proceedings of the IRE, 1943, 31(10): 548-567.
- [30] Rao S. Electromagnetic scattng and radiation of arbitrary shape surfaces by triangular patch modeling[D]. Mississippi: University of Mississippi, 1980.
- [31] Rao S, Wilton D, Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3): 409-418.
- [32] Ludwig A C. Wire grid modeling of surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas, 1987, 35(9): 1045-1048.
- [33] C W Trueman, Kubina S J. Fields of complex surfaces using wire grid modelling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(5): 4262-4267.
- [34] 国家电力公司. DL/T 691-19 高压架空送电线路无线电干扰计算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.  
State Grid. DL/T 691-19 Methods of calculation of radio interference from high voltage overhead power transmission lines[S]. Beijing: Standard Press of China, 1999(in Chinese).



唐波

收稿日期: 2010-08-09。

作者简介:

唐波(1978), 男, 博士研究生, 研究方向为高电压新技术和电磁兼容, tangboemail@sina.com;

文远芳(1945), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压新技术和电磁兼容, wenfy2002@163.com;

赵志斌(1977), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电磁场数值计算, zzb770917@163.com;

张小武(1977), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为超特高压输电技术和电磁兼容, xiaowu-zhang@sgcc.com.cn。

(责任编辑 张玉荣)