第 49 卷 第 6 期：2598-2606 高电压技术 Vol.49, No.6: 2598-2606
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220885

基于特征模理论的输电线路铁塔无源干扰研究

黄　力[1,2]，唐嘉晖[1]，唐　波[1]，张建功[2]，赵志斌[3]，陈新宇[1]
（1. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002；2. 中国电力科学研究院有限公司电网环境保护国家重点实验室，武汉 430074；3. 华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206）

摘　要：输电线路铁塔作为大型金属导体会对邻近的无线电台站产生干扰现象，其主要是由输电线路铁塔受无线电激励在金属表面产生感应电流，进而形成电磁散射场引起。为了抑制输电线路铁塔的无源干扰影响，提出使用特征模理论对输电线路铁塔进行分析。首先根据特征模理论计算，得到若干个特征模式。然后依据特征模式的模式显著性提出对特征模式的模式选择方法，采用矩量法与该方法的计算结果对比，验证了所提方法的可行性。最后通过特征模式电流密度的分布情况，对鼓型塔的全横臂细节锥形模型横担半径、横担长度、塔身半径等本体结构特征与无源干扰之间的关联特性进行分析。结果表明，鼓型塔的结构特征中对无源干扰影响最大的是塔基座、中间塔杆和低处横担，调整结构前后使得观测点处无源干扰大小减小了 17%，抑制了输电铁塔的无源干扰能力。论文为输电线路的主动防护措施的制定提供指导和理论依据。

关键词：特征模理论；模式选择；模式电流；无源干扰；结构特征；输电线路铁塔

Research on Reradiation Interference of Transmission Line Tower Based on Characteristic Mode Theory

HUANG Li[1,2], TANG Jiahui[1], TANG Bo[1], ZHANG Jiangong[2], ZHAO Zhibin[3], CHEN Xinyu[1]
(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract：As a large metal conductor, transmission line tower will cause interference to the adjacent radio stations, because the transmission line tower can be excited by the radio to generate an induced current on the metal surface, forming an electromagnetic scattering field. In order to suppress the reradiation interference effect of transmission line towers, the characteristic model theory is proposed to analyze transmission line towers. Firstly, according to the characteristic mode theory, the correlation coefficients of several characteristic modes are obtained. Then, the mode selection method of the characteristic mode is proposed by using the mode significance of the characteristic mode. The feasibility of the proposed method is verified by comparing the calculation results of the method of moments with the method. Finally, Through the distribution of the characteristic mode current density, the correlation characteristics between the reradiation interference and the body structure such as the crossarm radius, the crossarm length and the tower body radius of the tapered model of the full crossarm detail model of the drum tower are analyzed. The results show that the tower base, middle tower, and lower cross arm among the structural characteristics of drum tower have the greatest impact on reradiation interference. After adjusting these structures, the reradiation interference at the observation point is reduced by 17% compared with that before changing the structure, which inhibits the reradiation interference ability of the transmission tower. This paper provides guidance and theoretical basis for the formulation of reradiation interference active protection measures for transmission lines.

Key words：characteristic mode theory; mode selection; mode current; reradiation interference; structure characteristics; transmission line towers

基金资助项目：国家自然科学基金联合基金(U20A20305)；电网环境保护国家重点实验室开放基金(GYW51202001549)。
Project supported by Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U20A20305), Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection (GYW51202001549).

0　引言

输电线路铁塔作为一个大的金属导体会对空间的无线电信号产生电磁散射，从而对线路周边的各类无线电设备(如数码电视广播台，军用雷达等)产生无源干扰。因此高压输电线路对重要无线电设施的电磁影响与防护问题，成为电力系统电磁兼容领域的重要内容[1-3]。

国内诸多研究者针对输电线路造成的无源干扰问题，从电磁波的能量传输角度，对不同的无线电台提供了准确的防护间距解决此问题[4-6]。但由于这种方法过于被动，无法从根本上解决输电线路的无源干扰问题。继而研究方向转到对输电线路无源干扰的关联性研究[7-8]，试图从根本上解决高压输电线路无源干扰问题。输电线路主要由导线、地线、绝缘子、铁塔、线路金具，接地装置等部分组成，其暴露在地面上的金属部分主要是铁塔、导线和地线。对于输电线路导线与输电铁塔由绝缘子连接，所以一般不考虑导线所产生的无源干扰。IEEE 认为输电线路无源干扰谐振机理有两种情况[9-11]：第 1 种情况是认为铁塔和架空地线没有绝缘时，架空地线将相邻的输电铁塔连接起来，铁塔和地线对地的镜像组成“环形天线”会产生无源干扰。且当“环形天线”长度等于整数倍的波长时，会产生干扰谐振现象，从而对无线台站将产生极大的干扰[12-14]；第 2 种情况是认为铁塔和架空地线绝缘时，认为所产生的无源干扰主要与铁塔的本体结构相关[15-16]。对于第 1 种情况，随着分段绝缘地线的广泛应用，“环形天线”无源干扰的影响有了较好的解决方法，而对于输电线路铁塔结构与无源干扰之间的关联性缺少诠释。

目前，对于输电线路无源干扰的分析求解方法，早期 IEEE 明确提出使用矩量法对输电线路无源干扰进行数值求解。矩量法的计算结果最为精准，但随着研究的深入，其计算量大大增加导致求解过程越为复杂，以至于当前计算机硬件资源无法满足求解[17-19]。为此引入了 UTD 方法，MBPE 技术，迭代物理光学法(iterative physical optics，IPO)与大面元物理光学法(large element-physics optics，LE-PO)对输电线路无源干扰问题进行求解[20-21]。但这些方法各有缺陷，如计算的误差不能达到标准的需求，不能对输电线路铁塔结构无源干扰的关联性进行诠释，因此本文引入特征模理论算法。

目前特征模理论广泛应用于指导天线的设计[22]。根据理论分析结果，对天线的结构或激励源进行设计，使天线功能满足需求。由此本文引入了特征模理论对输电线路铁塔结构同干扰问题进行关联性分析研究。特征模理论解析本征模理论求解电磁问题，具有更为清晰的物理意义。可对输电线路铁塔的横担半径、横担长度、铁塔高度等本体结构特征与无源干扰之间的关联性进行诠释，从而对输电线路铁塔的无源干扰问题进行研究。本文基于特征模理论提出了简化计算和分析的特征模式选择准则。同矩量法计算结果比较进行验证其可行性。最后，应用特征模理论和特征模式选择准则，研究了鼓型铁塔本体结构与无源干扰之间的关联性。结果表明鼓型铁塔的本体结构中塔基座、中间塔杆和低处横担 3 处结构与铁塔造成的无源干扰关联最为密切。通过改变这 3 处结构的特征，达到了抑制输电铁塔的无源干扰的目的。可为从输电线路铁塔结构出发，解决输电线路的无源干扰提供解决方案和理论依据。

1　输电线路铁塔无源干扰

1.1　输电线路铁塔无源干扰的机理与评估

输电线路铁塔主要由角钢、钢板、螺栓部件组成。根据电磁场传播理论，任何一个载流导体都是一个辐射源。当输电线路铁塔处于信号场中时，相当于接收天线，入射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{i}}$ 会在其金属表面产生与电场强度呈正比的感应电流密度 $\boldsymbol{J}$。相当于产生了新的场源，此时输电线路铁塔相当于发射天线，会在周围形成电磁场 $\boldsymbol{E}(r)$即二次散射场。同时输电线路铁塔还会对到达的电磁波产生反射和散射作用，形成反射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{r}}$ 和散射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$。反射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{r}}$ 和散射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$ 的场强大小与输电线路金属导体的形状、尺寸等密切相关。

产生的散射效应和原入射电磁波叠加，改变了原入射电磁波的幅值和相位。从而在无线电台站的接收点对要接收的信号产生干扰，造成误差。

当前，无源干扰的评估通常是比较有无输电线路时，在无线电台处测量的电场差异。具体的无源干扰的计算方法[6]如下。

$$S = 20\lg\frac{\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{y}}\right|}{\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{n}}\right|} \tag{1}$$

式中：S 表示无源干扰影响大小；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{y}}$ 表示考虑输电线路影响以后观测点的空间电场强度；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{n}}$ 表示无输电线路时观测点的空间电场强度。

1.2 无源干扰的矩量法求解思路

输电线路铁塔无源干扰模型如图 1 所示，图中含有两个坐标系分别是直角坐标系(x, y, z)与球坐标系(r, θ, φ)。设输电线路铁塔为理想导体 V_1，位于坐标轴 x 上，电磁波 E_i 以角度(θ_i, φ_i)入射到输电线路铁塔上，输电线路铁塔上任一点 r'处的感应电流密度分布为 $\boldsymbol{J}(r')$向空间产生二次散射电场，在位于场点 r 处的无线电台产生的散射电场为 $\boldsymbol{E}_s$。

在输电线路铁塔的理想导体边界面上根据电场切向分量的连续性条件，可以建立入射电场与散射电场关联方程。进一步其散射电场 E 可由铁塔表面的感应电流密度 $\boldsymbol{J}$ 表示。矩量法求解的思路，是利用三角形单元对铁塔表面进行离散，然后在剖分三角单元上利用 RWG 基函数，求解出在输电线路铁塔上的感应电流密度，继而可以求解铁塔造成的无源干扰大小。在矩量法求解过程中选取 RWG 基函数作为检验函数，采用 Galerkin 法进行测试，可以得到如下矩阵方程[16]

$$\boldsymbol{ZI}=\boldsymbol{V} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{Z}$ 称为阻抗矩阵，其为对称矩阵，根据 RWG 基函数计算得到；$\boldsymbol{V}$ 称为激励向量，代表入射的无线信号；$\boldsymbol{I}$ 称为感应电流，代表在散射体表面分布的电流。由于电流的分布与所剖分的三角面元位置密切相关，并不能直观的体现出输电铁塔的结构特征与无源干扰之间的关联特性，为分析输电铁塔无源干扰的主要影响因素带来困难。

2 特征模理论算法

考虑到输电线路铁塔的各部件具有近似相互垂直的特点，为此将铁塔表面的电流密度分解为一系列相互正交的电流密度叠加，从而突出铁塔的各结构特征在每种电流模式中造成的影响，最终得到输电线路铁塔结构与无源干扰之间的关联性。由此引入了特征模理论对其的关联性进行研究。特征模理论广泛适用于任意的金属物体研究分析。其推导出的特征模式是一种与外加激励无关，仅和目标结构自身形状以及材料有关的固有模式。这与它是根据式(2)中的阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 进行推导相关，其可以揭示结构本身的固有电磁特性，为研究输电线路铁塔的结构与无源干扰的关联特性提供了新方法。由于阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 为对称矩阵，则其矩阵的实部 $\boldsymbol{R}$ 与虚部 $\boldsymbol{X}$ 可由埃尔米特理论写为：

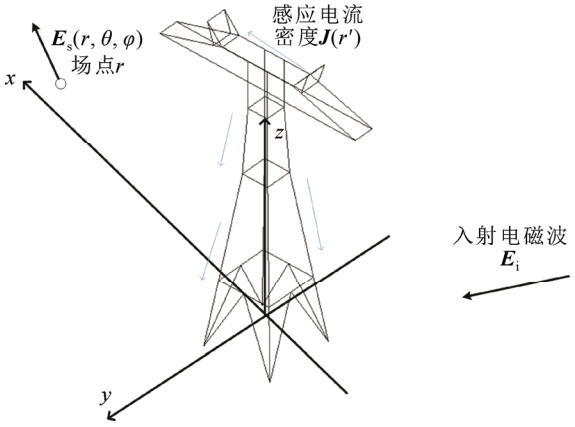


图 1 输电线路铁塔无源干扰模型

Fig.1 Model of reradiation interference from power transmission line

$$\boldsymbol{R}=\frac{1}{2}(\boldsymbol{Z}+\boldsymbol{Z}^*) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{X}=\frac{1}{2\mathrm{j}}(\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{Z}^*) \tag{4}$$

考虑到 $\boldsymbol{Z}$ 为对称矩阵，可构建如下的加权特征值方程

$$\boldsymbol{ZJ}_n=v_n\boldsymbol{WJ}_n,\ n=1,2,3,\cdots,N \tag{5}$$

式中：N 为阻抗矩阵的阶数；$\boldsymbol{J}_n$ 表示第 n 个模式对应的特征电流密度；v_n 是与 $\boldsymbol{J}_n$ 相关联的特征权重值；$\boldsymbol{W}$ 为可任意构建的对称矩阵。

对于任意的对称矩阵 $\boldsymbol{W}$，阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 均可实现对角化。但当且仅当 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{R}$ 时才能保证模式远场的正交性。因此当选取 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{R}$ 且 $v_n=1+\mathrm{j}\lambda_n$ 时，λ_n 为 $\boldsymbol{Z}$ 矩阵的求解的若干特征值，可以得到如下的广义特征值方程

$$\boldsymbol{ZJ}_n=\left(1+\mathrm{j}\lambda_n\right)\boldsymbol{RJ}_n \tag{6}$$

进一步化简得到广义的特征模方程

$$\boldsymbol{XJ}_n=\lambda_n\boldsymbol{RJ}_n \tag{7}$$

因为 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{X}$ 都是实对称矩阵，所以求解上述广义特征值方程所得的 $\boldsymbol{J}_n$ 和 λ_n 都是实数。为了消除奇异样本数据导致的不良影响，对特征电流密度 $\boldsymbol{J}_n$ 归一化处理，即假设所有特征电流密度具有单位量辐射功率。求解的特征电流密度是相互正交的，因此满足如下正交特性

$$\begin{cases} <\boldsymbol{J}_m,\boldsymbol{RJ}_n>=\delta_{mn} \\ <\boldsymbol{J}_m,\boldsymbol{XJ}_n>=\lambda_n\delta_{mn} \\ <\boldsymbol{J}_m,\boldsymbol{ZJ}_n>=\left(1+\lambda_n\right)\delta_{mn} \end{cases} \tag{8}$$

其中

$$\delta_{mn}=\begin{cases}1, & m=n\\ 0, & m\neq n\end{cases} \tag{9}$$

金属体表面的感应电流密度可由特征电流密度的加权叠加所表示，即

$$\boldsymbol{J}=\sum_{n=1}^{N}a_n\boldsymbol{J}_n \tag{10}$$

式中 a_n 代表模式加权系数。

将式(10)展开的感应电流密度带入电场积分方程，引入阻抗算子 $\boldsymbol{Ł}$，可得

$$\sum_{n=1}^{N}a_n\boldsymbol{Ł}\boldsymbol{J}_n=\boldsymbol{E}_{\tan}^{\mathrm{i}} \tag{11}$$

对式(11)两边，利用电流密度 $\boldsymbol{J}_m$ 同时取内积可以得到下式

$$\left\langle\sum_{n=1}^{N}a_n\boldsymbol{Ł}\boldsymbol{J}_n,\boldsymbol{J}_m\right\rangle=\left\langle\boldsymbol{E}_{\tan}^{\mathrm{i}},\boldsymbol{J}_m\right\rangle \tag{12}$$

根据特征电流密度之间的正交性关系可知，只有在 $m=n$ 时，式(12)等号的左边项才存在，所以可以进一步简化为

$$a_n\left(1+\mathrm{j}\lambda_n\right)=\left\langle\boldsymbol{E}_{\tan}^{\mathrm{i}},\boldsymbol{J}_n\right\rangle \tag{13}$$

则模式展开系数可以表示为

$$a_n=\frac{V_n}{1+\mathrm{j}\lambda_n} \tag{14}$$

分子的内积被称作模式激励系数 V_n，而分母则可用来定义模式显著性 M_{S} 即：

$$V_n=\left\langle\boldsymbol{E}_{\tan}^{\mathrm{i}},\boldsymbol{J}_n\right\rangle \tag{15}$$

$$M_{\mathrm{S}}=\frac{1}{\left|1+\mathrm{j}\lambda_n\right|} \tag{16}$$

模式激励系数 V_n 表示外在激励源和模式之间的耦合关系，其取决于激励的位置、幅度、相位和极化等。M_{S} 表示模式显著性(modal significance, MS)，是模式的固有属性仅与模型的结构相关，与激励无关。当 MS 值越接近 1 时，代表该模式越容易被激励，当 MS 值越接近 0 时，则代表该模式越不容易被激励。模式显著性和模式激励系数一起表征了外在激励下不同模式对总电磁散射的贡献。

3　特征模理论的模式选择及验证

3.1　特征模理论的模式选择准则

根据式(7)可知所求解得到的特征模式电流数量同阻抗矩阵的阶数相关联。当所分析的物体尺寸远大于波长时，在物体表面剖分的三角网格将越细密，从而导致计算得到的阻抗矩阵阶数很大。此时，应用特征模理论求得的特征模式电流数量很多，若直接对求解得到的特征电流逐个进行分析，将十分困难。通过研究特征电流对应的特征模式系数 V_n 与 MS，发现其中有许多对总电磁散射贡献特别小的特别模式。对这些模式进行研究，发现其对计算分析的结果影响特别小。因此本文提出了一个筛选特征电流模式的准则用于简化分析与计算的过程。当在某一频率下对模型进行特征模理论分析时，根据 MS 系数仅与模型结构相关，当结构确定时各个特征模式的 MS 系数也是固定的。从而通过比较特征模算法与实际结果的误差，以 0.1 dB 作为偏差允许范围，确定计算误差。具体选择方法是对分析模型的特征模式 MS 系数进行排序后，选择 MS 系数最大值的十分之一(0.1max(M_{S})作为筛选标准来进行筛选。

3.2　特征模理论的模式选择准则验证

使用单根输电铁塔简易模型[23]，对特征模理论的模式选择准则进行算例验证。根据文献[4]所述，输电线路无线电干扰的测量天线位于地面 2 m 高处，观测场点距离输电线路中心线的垂直距离为 2000 m，选取观测点 P 坐标为(2000,0,2)。采用垂直极化平面波进行激励，激励电磁波以与 x 轴正方向夹角为 φ 入射，入射角度 φ=180°。图 2 为简易铁塔模型示意图。

在短波的频率范围(3 MHz~30 MHz)内，选择在 3 MHz、8 MHz、15 MHz 3 个频率下对该模型进行研究，通过特征模理论分析得到简易铁塔各个频率下 MS 系数最大的 40 个特征模式如图 3 所示。

图 3 只给出了 MS 系数较大的前 40 个特征模式，实际的特征模式数量有成千上万个，与对模型剖分的 RWG 网格数量相关。随着研究频率的增加，在模型上分割的三角单元格越细致，所得到 MS 系数大的特征模式数量也越来越多，所以需要模式选择准则对其进行简化。应用模式选择准则筛选后，

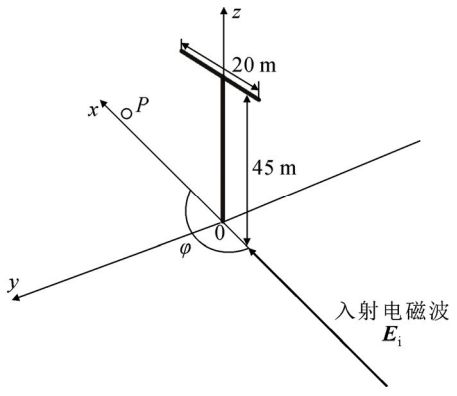


图 2　简易铁塔模型示意图

Fig.2　Schematic diagram of a simple tower model

在 3 MHz 下可以只考虑前 3 个特征模式，在 8 MHz 下可只考虑 18 个特征模式，在 15 MHz 下可只考虑 36 个特征模式，其余的模式均可忽略。从而可以大大缩减使用特征模理论计算与研究分析的工作量。式(10)中可以看出，参与计算的特征模式电流数量逐步增加，所计算的结果将越精确。逐步增加计算的特征模式电流数量，与采用矩量法计算的结果进行比较，其之间的误差如图 4 所示。使用相对误差式(17)进行计算。

$$\delta=\frac{|\boldsymbol{E}_1-\boldsymbol{E}_2|}{|\boldsymbol{E}_2|}\times 100\% \tag{17}$$

式中：E_1 为使用特征模理论计算观测点的电场；E_2 为使用矩量法计算观测点的电场。

根据计算结果误差图 4 可知，根据特征模式显著性大小逐步增加参与计算的特征模式的个数，特征模算法计算的结果与矩量法结果越来越接近。当参与计算的特征模式到达一定数量后，继续增加参与计算的特征模式，对使用特征模理论计算的结果影响微乎其微。由此提出上述模式筛选准则，根据上述准则对该模型的模式进行筛选后，同计算结果误差图 4 进行对比分析。当满足上述的筛选方法时，3 MHz 频率下，计算的误差已经达到 0.77%；8 MHz 频率下，计算的误差已到达 0.13%；15 MHz 频率下，计算的误差已达到 0.65%。以 0.1 dB 作为误差允许范围，此时的误差影响可忽略不计。因此可应用筛选模式准则，忽略还未参与计算的特征模式，不但可以提高计算的速度，也可缩小对模型特征模式分析的范围。通过上述的数据验证了特征模式选择准则的正确性，同时也验证了特征模理论应用于输电线路铁塔的可行性。

4 输电线路铁塔的特征模理论分析

对鼓型塔的全横臂细节锥形杆塔模型[24]，进行特征模理论的应用。选择观测点 $P(2000,0,2)$进行输电线路铁塔结构无源干扰分析应用。仍然采用垂直极化平面波进行激励，设置激励电磁波的入射角度 φ 为 0°到 360°。在仿真的模型中，假设大地与杆塔模型均为理想电导体。图 5 所示为全横臂细节锥形杆塔的结构示意图，表 1 为杆塔尺寸参数。

根据鼓型塔的全横臂细节锥形杆塔模型的适用频率范围，选择在 3 MHz 频率下对全横臂细节锥形杆塔模型应用特征模理论进行分析研究。对鼓型

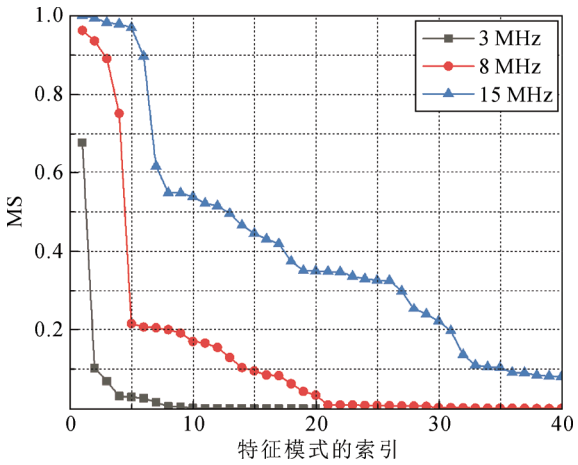


图 3 简易输电杆塔的 MS 曲线

Fig.3 MS curve of simple transmission pole tower

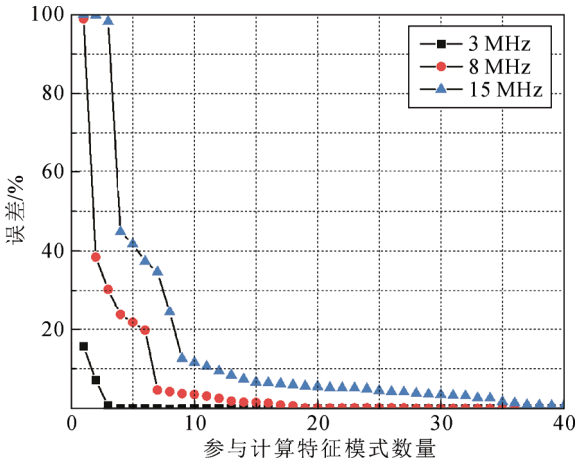


图 4 计算结果误差

Fig.4 Calculation result error

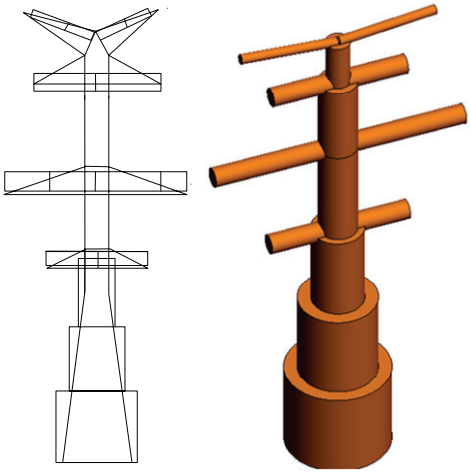


图 5 全横臂细节锥形杆塔模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of tapered stem tower model with full crossarm detail

塔进行特征模求解得到的 MS，选择特征模式中 MS 最大的 15 个特征模式，其绘制的 MS 曲线如图 6 所示。

根据图 6 的 MS 曲线进行模式筛选，筛选结构表明，仅需分析特征模式中前 3 个特征模式即可。通过特征模理论可以计算这 3 个特征模式的电流密度分布情况，通过式(18)计算其远场分布情况，得到的结果如图 7 与图 8 所示。

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}(r)=-\mathrm{j}\frac{\omega\mu_0}{4\pi r}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}\iint_{s'}\mathrm{d}s'(\boldsymbol{J}(r')-(\boldsymbol{J}(r')\cdot)\boldsymbol{k}_{\mathrm{s}})\mathrm{e}^{\mathrm{j}kr'\boldsymbol{k}_{\mathrm{s}}} \tag{18}$$

式中：μ_0 为自由空间的磁导率；k 为自由空间的波数；$\boldsymbol{k}_{\mathrm{s}}$ 为散射电场的传播矢量。

观测这 3 个特征模式在输电线路铁塔上的电流密度分布，其主要的分布情况如表 2 所示。

表 1　全横臂细节锥形杆塔

Table 1　Tapered stem model with full crossarms

名称	长度/m	半径/m
塔基座下部	8.63	5.12
塔基座中部	8.53	3.84
塔基座上部	8.63	2.56
低位置横担	7.00	0.96
低位置塔杆	10.00	1.92
中间位置横担	12.70	0.96
中间位置塔杆	8.00	1.92
顶部位置横担	6.80	0.96
顶部位置塔杆	4.80	1.20
地线横担	10.10	0.48
总高度	50.00	

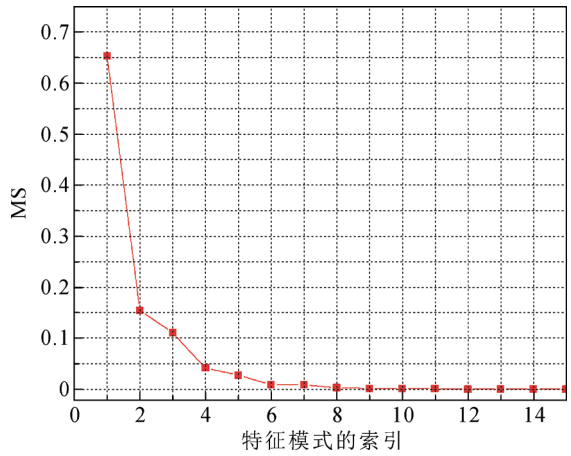


图 6　全横臂细节锥形杆塔 MS 曲线

Fig.6　Tapered stem tower model with full crossarm detail MS curve

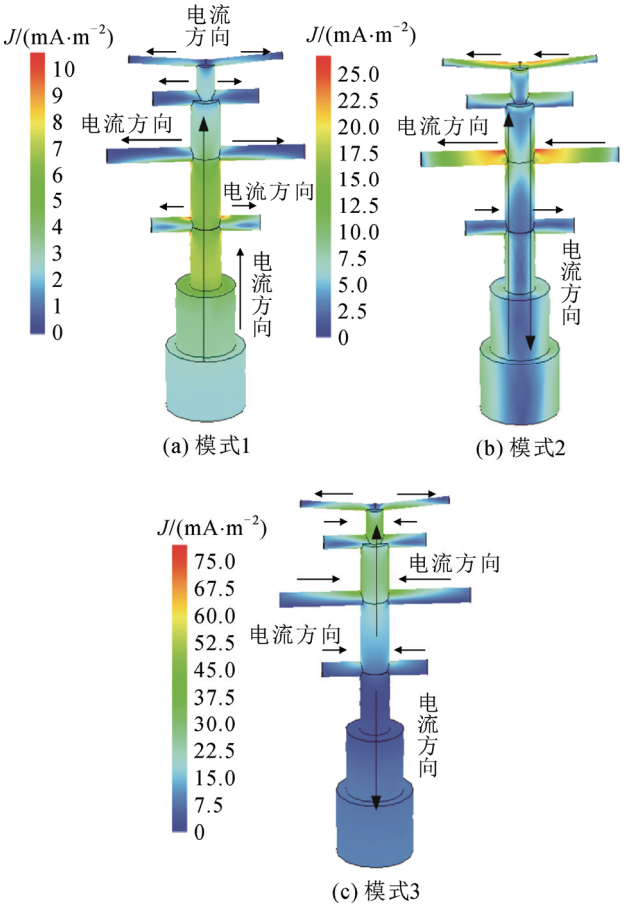


图 7　全横臂细节锥形杆塔的特征模式电流密度分布情况

Fig.7　Tapered stem tower model with full crossarm detail characteristic modes of current density distribution

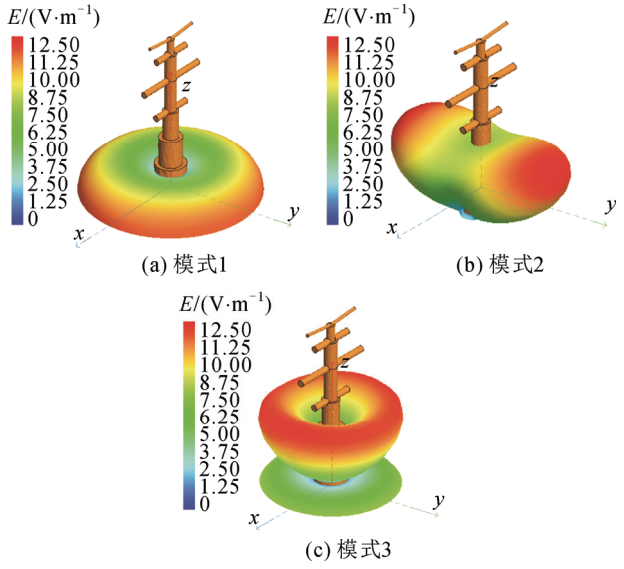


图 8　全横臂细节锥形杆塔 3 个特征模式的远场分布情况

Fig.8　The far-field distribution of three characteristic modes of tapered stem tower model with full crossarm detail

表 2 特征模式电流密度分布情况

Table 2 Characteristic mode current density distribution

模式	电流密度较大的结构位置	电流密度方向
模式 1	中间塔杆，塔基座	垂直分布
	低处横担	水平分布
模式 2	地线横担	水平分布
	中间横担	水平分布
模式 3	顶部塔杆	垂直分布
	地线横担	水平分布

使用控制变量法对每种模式进行结构改造，使其对应的 MS 系数减小。根据特征模理论推导的特征模式电流密度具有的正交特性，只需对输电线路铁塔模型的各个特征模式电流密度大的结构特征处进行调整即可。模式 1 的电流密度大的结构位置主要是在铁塔模型的中间塔杆、塔基座和低处横担上垂直分布。因此使铁塔的中间塔杆长度缩减 1 m，将塔基座半径缩减小 0.5 m，其高度增加 1 m，低处横担两端缩减 1 m。模式 2 的电流密度大的结构位置主要是在地线横担和中间横担上水平分布。因此使铁塔的地线横担与中间横担两端缩减 1 m。模式 3 的电流密度大的结构位置主要是在顶部塔杆与地线横担，因此使铁塔顶部塔杆半径缩减 0.3 m,地线横担两端缩减 1 m。记录分别以各个特征模式为目标模式，改变结构后模式的 MS 系数与改变结构前 MS 系数的减小比例如图 9 所示，具体的数据大小如表 3 所示。

由上图表可知，输电线路铁塔每个结构所对应的特征模式并不是唯一的。当根据其中一个特征模式的电流密度分布情况改变铁塔结构的同时也会引起其它模式 MS 系数的变化，但变化最为显著的任是选择的目标模式。因此在改变目标模式的 MS 系数时，可以相对忽略其它的特征模式 MS 系数的变化。

由于所研究的输电线路铁塔是对已知观测点的无源干扰数值分析，由此可对筛选后的特征模式再进行特征模式电场分布的选择。根据模式的电场远场分布情况图 8，参考观测点位于 x 轴正方位处，可看出对观测点影响最大的模式主要为模式 1，其余的模式在观测点产生的电场干扰影响相对较小。故在对输电线路铁塔结构进行调整时，可主要针对模式一的电流密度分布对铁塔结构进行改变。使用改变结构后的模型与改变结构前的模型分别计算在观测点产生的无源干扰大小，减小比例见图 10。

由图 10 可以看出，平面波从不同的角度入射至输电铁塔所造成的无源干扰大小，相比改变铁塔

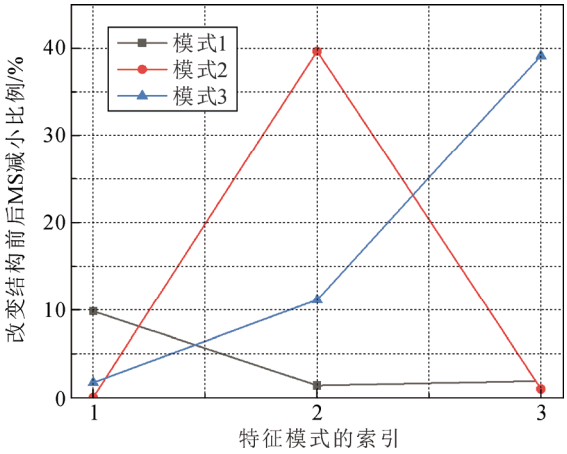


图 9 改变结构前后 3 个特征模式的 MS 减小比例

Fig.9 MS Reduction Ratio of three characteristic modes before and after changing Structure

表 3 改变结构前后 MS 值的变化

Table 3 Change in MS value before and after changing the structure

参数	模式 1	模式 2	模式 3
调整前 MS	0.653	0.154	0.110
调整模式 1 后 MS	0.589	0.152	0.099
调整模式 2 后 MS	0.653	0.093	0.109
调整模式 3 后 MS	0.642	0.137	0.067

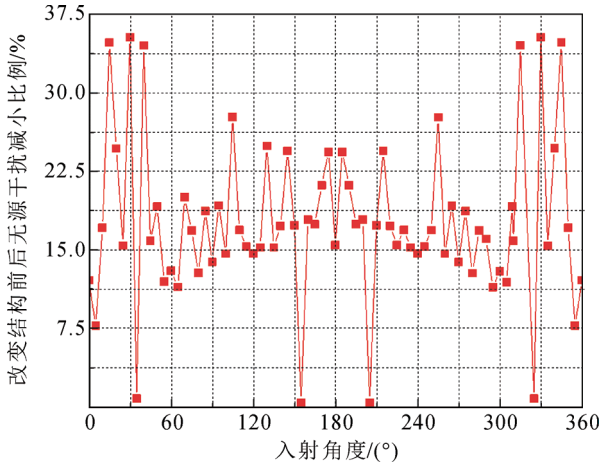


图 10 改变结构前后无源干扰值减小比例

Fig.10 Reduction ratio of reradiation interference value before and after changing structure

结构前，其值下降了约 17%。在应用特征模理论对输电线路铁塔结构进行指导调整后，在观测点处所测得的无源干扰大小与未改变结构前的大小相比有明显的减弱现象。从而，可以认为鼓型塔的中间塔杆、塔基座和低处横担结构是造成散射的主要部位；

当这些结构的特征发生变化时，鼓型塔的无源干扰能力会随之发生明显变化。

根据上述分析，在具体应用时，考虑到一条输电线路是由许多不同类型的铁塔共同构建，并且铁塔与观测点的相对位置是发生变化的，无线电波的入射角度也是发生变化的，则需要对各个铁塔逐个进行特征模理论分析。根据电场叠加原理，可以推测对各个铁塔的分析后，所叠加对观测点产生的无源干扰极大极小值缩减将更显著。

5　结论

1）对特征模理论应用在输电线路无源干扰过程提出了简化计算与分析的方法，并使用矩量法计算结果验证了该方法的正确性与可实施性。

2）采用特征模理论分析了输电线路铁塔的结构特征与无源干扰的关联特性。鼓型铁塔的结构中对无源干扰影响最大的是塔基座、中间塔杆和低处横担部分。对这些结构应用特征模理论进行指导调整，可以有效的抑制输电线路铁塔自身的无源干扰能力，从而达到抑制无源干扰的效果。

3）根据特征模理论得到的特征模式，在输电线路铁塔的设计过程中可以参考引用，为输电线路铁塔的结构设计给予理论基础。

考虑到输电线路铁塔的结构是由多种因数综合确定的，不能直接的对现已建成的输电线路铁塔结构进行任意改变。由此后续针对现建好的输电线路铁塔，采用特征模理论的分析结果利用其它方法(如绝缘横担，安装磁环等)抑制输电线路铁塔的无源干扰，制定更为有效的主动防护措施，是从根本上解决输电线路无源干扰的下一步研究方向。

参考文献　References

[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: China Economy Press, 2006: 2-8.

[2] 邬　雄，万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京：中国电力出版社，2009：83-94.
WU Xiong, WAN Baoquan. Electromagnetic environment of power transmission project[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2009: 83-94.

[3] 刘尚合，马贵蕾，满梦华，等. 电磁防护仿生研究进展[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1750-1762.
LIU Shanghe, MA Guilei, MAN Menghua, et al. Research progress of electromagnetic protection biomimetics[J]. High Voltage Engineer-ing, 2022, 48(5): 1750-1762.

[4] 邹　军，吴桂芳，蒋陶宁，等. 空间谱估计测向算法计算高压直流输电线路对短波无线电测向台站无源干扰影响的研究[J]. 电网技术，2020，44(4)：1582-1588.
ZOU Jun, WU Guifang, JIANG Taoning, et al. Study on calculation of passive interference of HVDC transmission line to short-wave radio direction station with spatial spectral estimation direction finding algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1582-1588.

[5] 邬　雄，万保权，张小武，等. 1000kV 交流特高压试　验示范工程输电线路与无线电台间防护距离的研究[R]. 武汉：国网武汉高压研究院，2008.
WU Xiong, WAN Baoquan, ZHANG Xiaowu, et al. Protecting distance of reradiation interference between radio station and 1000kV UHVDC pilot demonstration project[R]. Wuhan, China: Wuhan High Voltage Research Institute of SGCC, 2008.

[6] 唐　波，文远芳，张小武，等. 中短波段输电线路无源干扰防护间距求解的关键问题[J]. 中国电机工程学报，2011，31(19)：129-137.
TANG Bo, WEN Yuanfang, ZHANG Xiaowu, et al. Key problems of solving reradiation interference protecting distance between power transmission line and radio station at MF and SF[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 129-137.

[7] 杨晓峰，唐　波，张建功，等. 短波频段高压输电线路的电磁散射场及其影响因子[J]. 南方电网技术，2021，15(10)：18-25.
YANG Xiaofeng, TANG Bo, ZHANG Jiangong, et al. Electromagnetic scattering field and influencing factors of high voltage transmission lines in shortwave frequency band[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(10): 18-25.

[8] 唐　波，郝　斌，张建功，等. 风电机叶片回波模拟及其多普勒特性分析[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3674-3684.
TANG Bo, HAO Bin, ZHANG Jiangong, et al. Echo simulation and Doppler characterization of wind turbine blades[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3674-3684.

[9] IEEE. IEEE guide on the prediction, measurement, and analysis of AM broadcast reradiation by power lines: IEEE Standard 1260—1996[S], 1996.

[10] 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, EMC-25(3): 329-339.

[11] TRUEMAN C W, KUBINA S J. Power lines: broadcasting's problem child[J]. IEEE Potentials, 1988, 7(2): 38-40.

[12] 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.

[13] TRUEMAN C W, MISHRA S R, KUBINA S J, et al. RCS of resonant scatterers with attached wires[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(3): 351-354.

[14] 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.

[15] 唐　波，郝　斌，张建功，等. 风电机叶片回波模拟及其多普勒特性分析[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3674-3684.
TANG Bo, HAO Bin, ZHANG Jiangong, et al. Echo simulation and Doppler characterization of wind turbine blades[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3674-3684.

[16] 干喆渊，王延海，张建功，等. 应用磁环抑制输电线路短波频段无源干扰[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1722-1728.
GAN Zheyuan, WANG Yanhai, ZHANG Jiangong, et al. Suppression of HF passive interference in transmission lines by using magnetic tube[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1722-1728.

[17] 王旭桐，刘　政，秦　锋，等. 球面波传播的电磁脉冲下的架空线缆响应[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2770-2775.

WANG Xutong, LIU Zheng, QIN Feng, et al. Response of over-head cable under the electromagnetic pulse of spherical wave propagation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2770-2775.

[18] 唐　波，文远芳，赵志斌，等. 特高压角钢铁塔无源干扰计算的三维面模型[J]. 中国电机工程学报，2011，31(4)：104-111.
TANG Bo, WEN Yuanfang, ZHAO Zhibin, et al. Three-dimensional surface computation model of the reradiation interference from UHV angle-steel tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 104-111.

[19] 唐　波，肖乔莎，刘兴发，等. 共享铁塔无源干扰水平的求解与分析[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3724-3732.
TANG Bo, XIAO Qiaosha, LIU Xingfa, et al. Calculation and analysis of passive interference level of shared tower[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3724-3732.

[20] 唐　波，郝　斌，张建功. 等基于电磁散射点间距的风电机雷达回波仿真[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2652-2661.
TANG Bo, HAO Bin, ZHANG Jiangong, et al. Simulation of wind turbine echoes based on electromagnetic scattering point spacing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2652-2661

[21] 张建功，干喆渊，赵志斌，等. 架空线路电磁散射的混合建模快速算法[J]. 高电压技术，2015，41(12)：4184-4190.
ZHANG Jiangong, GAN Zheyuan, ZHAO Zhibin, et al. Fast calculation hybrid modeling of scattering from overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4184-4190.

[22] 刘亚昆，贾　丹，杜　彪. 基于特征模理论的微带天线双线极化RCS 缩减设计[J]. 现代雷达，2021，43(5)：73-79.
LIU Yakun, JIA Dan, DU Biao. Dual-linear polarization RCS reduction for microstrip antenna based on characteristic mode theory[J]. Modern Radar, 2021, 43(5): 73-79.

[23] TRUEMAN C W, KUBINA S J. Initial assessment of reradiation from power lines[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1985, BC-31(3): 51-65.

[24] TRUEMAN C W, KUBINA S J. Power line tower models above 1000 kHz in the standard broadcast band[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1990, 36(3): 207-218.



黄　力
1980—，男，博士，讲师
主要从事超特高压输电技术和线路电磁环境方面的研究工作
E-mail: huangli@ctgu.edu.cn

HUANG Li
Ph.D.



唐嘉晖(通信作者)
1999—，男，硕士生
主要从事输电线路电磁环境的研究工作
E-mail: 545619399@qq.com

TANG Jiahui
Corresponding author

收稿日期　2022-06-02　修回日期　2022-10-20　　编辑　陈　蔓