

DOI: 10.7652/xjtuxb201806015

不同工况对甚低频发射天线电性能影响的分析方法

严亚龙, 柳超, 董颖辉, 吴华宁

(海军工程大学电子工程学院, 430033, 武汉)

摘要: 为了研究甚低频发射天线在不同工况下的结构变形对其电性能的影响,提出了一种基于有限元法和矩量法的天线结构与电性能协同分析方法。首先在保证天线安全性系数满足要求的条件下,通过零阶优化算法对天线幕进行优化找形,生成一个理论上电性能较优的天线幕结构形态;然后在提取天线节点信息的基础上,通过一种文件格式转换的新方法将优化后的天线幕结构模型转换为可用于矩量法分析的电气模型;最后对该电气模型进行后处理,分析不同覆冰量和不同风速对天线电性能的影响。采用该方法分析了一个甚低频 T 形发射天线在不同工况下的电性能,分析结果表明,在各工况下天线的辐射电阻和损耗电阻均会发生变化,且天线辐射效率会发生不同程度的降低。所提出的方法对其他类型复杂结构线网形天线的结构与电性能协同分析具有一定的指导意义。

关键词: 甚低频发射天线;工况;优化找形;损耗电阻;辐射效率

中图分类号: TN827.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)06-0098-08

An Analysis Method for the Electrical Performance of Transmitting Antennas with Very-Low-Frequency under Different Working Conditions

YAN Yalong, LIU Chao, DONG Yinghui, WU Huaning

(School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A cooperative analysis method of antenna structures and electrical performance based on the finite element method and the moment method is proposed to study the influence of structure deformation on the electrical performance of the very low frequency (VLF) transmitting antennas under different working conditions. Firstly, the antenna curtain is optimized by the zero order optimization algorithm under the condition that the safety factor of the antenna meets the requirements, and an antenna curtain structure form with theoretical better electrical performance is generated. Then, the antenna node information is extracted, and a new method of file format conversion is used to transform the optimized antenna curtain's structure model to an electrical model for moment analysis. Finally, the electric model is processed to analyze the effects of different ice coverages and wind speeds on the electrical performance of the antenna. The method is used to analyze the electrical performance of a VLF T-type transmitting antenna under different working conditions. It is found that the radiation resistance and loss resistance of the antenna change under different working conditions, and the radiation efficiency of the antenna has

different degrees of reduction under ice and winding state. The proposed method has a certain guiding significance for the cooperative analysis of the structure and electrical performance for other types of complex structured wire mesh antennas.

Keywords: very low frequency transmitting antennas; working condition; optimized shape finding; loss resistance; radiation efficiency

甚低频发射天线一般占地面积较大,结构组成复杂,例如甚低频 T 形天线、甚低频伞形天线以及甚低频山谷天线等。以甚低频 T 形天线为例,它由支撑塔、下引线、地网、平衡塔、天线幕以及其他附加部件组成^[1]。天线幕是由在单根或多根单极子直立天线的顶端加一个(或数个)对称或非对称的、水平的终端开路的顶容线组成,以此来改善天线直立部分的电流分布,从而提高天线的辐射效率^[2]。每根顶容线的垂度、形态由于气象条件改变而发生变化时,天线的电性能指标也会随之变化。所以在不同工况下对该类型天线电性能研究是十分必要的。

关于不同工况对甚低频发射天线结构影响的研究较多,并得到了一些有意义的结论^[3-5],但鲜有各工况下天线结构变化导致其电性能变化的报道。目前,天线结构与电性能协同分析研究主要集中在反射面天线上,文献[6]研究了表面纹理对反射面天线电性能的影响,文献[7-8]就随机表面误差对反射面天线电性能的影响做了研究,文献[9]研究了冲击波与破片联合毁伤对反射面天线电性能的影响。但目前的文献均没有对甚低频发射天线的结构变化对其电性能的影响进行研究。

本文通过采用基于有限元法的通用有限元分析软件 ANSYS 对天线结构性能进行分析,采用基于矩量法的电磁仿真软件 FEKO 对天线的电气性能进行分析,同时引入一种针对天线节点信息的提取及转换方法,并结合模型转换后的后处理工作,完成对甚低频发射天线结构与电性能的协同分析。与现有分析方法相比,本文方法可以克服在天线结构模型转换为电气模型时网格不匹配的问题^[10-11],进一步可以跳过编写异构系统集成数据接口的步骤,为甚低频发射天线在不同工况下的电性能分析开辟了一种更为简洁、快速的研究途径。

1 天线结构与电性能分析方法

1.1 有限元法

甚低频发射天线的结构性能可以采用有限元法进行计算,本文采用的 ANSYS 软件的内核是求解结构偏微分方程近似解来代替其真解的有限元法。

有限元法求解天线结构参数的基本原理为^[12]:将连续的求解域离散为一组单元的组合体,用在每个单元内假设的近似函数来分片表示求解域上待求的未知场函数,近似函数通常由未知场函数及其导数在单元各节点的数值插值函数来表示,从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。本文中的天线模型结构分析,采用有限元法求解,其步骤和方法已由文献[13]给出。

1.2 矩量法

甚低频发射天线的电性能可以采用矩量法进行计算^[14],本文采用的仿真软件 FEKO 的内核是求解电场积分方程的矩量法,基函数采用分段正弦函数,这种基函数对线结构特别是长线结构具有较快的收敛性^[15],为了获得准确有效的数值计算结果,在对建立的天线计算模型进行剖分时要求段长与波长之比小于 0.1,结合甚低频的波长,天线每一段的剖分长度不能太小。若段长太小,电流展开式中的常数项和余弦项会出现简并,即两者之间不再有明显的差别,从而导致计算结果精度不高,故分段的尺寸不能小于 0.001λ 。

2 天线结构建模及优化

2.1 天线建模方法

本文所研究的甚低频发射天线,其天线幕由多根顶容线和吊索构成,由于单根顶容线或吊索的两端由桅杆型支撑塔固定,所以可以采用抛物线形式对其进行建模,单根顶容线或吊索的结构如图 1 所示。

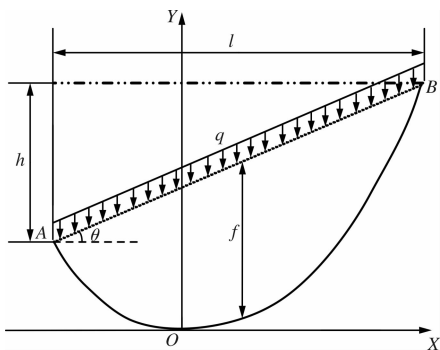


图 1 单根顶容线或吊索的结构示意图

单根顶容线或吊索的变形曲线可以表达为^[16]

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2} + \frac{h}{l}x \quad (1)$$

式中: f 为顶容线或吊索的垂度; l 为顶容线或吊索的跨距; h 为顶容线或吊索两端的高程差。

索跨中垂度与水平张力的关系为

$$H = \frac{ql}{8f\cos\theta} \quad (2)$$

式中: q 为顶容线或吊索的荷载(自重); θ 为顶容线或吊索两端点连线与水平方向的夹角。

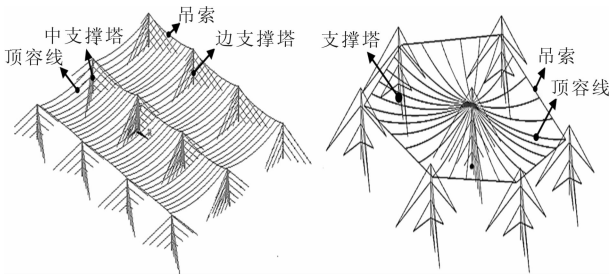
索长近似值为

$$S = l\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{l}\right)^2 + \frac{8}{3}\left(\frac{f}{l}\right)^2\right] \quad (3)$$

索的最大张力近似值为

$$T = H\sqrt{1 + 16\frac{f^2}{l^2} + \frac{h^2}{l^2} + \frac{8fh}{l^2}} \quad (4)$$

建立单根顶容线后,可以通过多根顶容线组成用于增强天线辐射能力的天线幕,不同顶容线的组合形式可构成不同类型的甚低频发射天线。图 2 分别给出了甚低频 T 形天线和甚低频伞形天线的结构示意图,从图中可以看出,当顶容线平行排列时,形成的是甚低频 T 形天线;当顶容线以中心塔为圆心,按辐射状构成时,形成的是甚低频伞形天线。



(a)甚低频 T 形天线 (b)甚低频伞形天线

图 2 甚低频发射天线结构图

由于天线结构庞大,构成复杂,一般在有限元分析软件 ANSYS 中采用分离建模,然后组装的方法对甚低频发射天线进行建模。共分为 3 个部分对天线进行建模:中支撑塔,边支撑塔,天线幕,天线幕结构采用直接由定义节点生成单元的方法建模。在建模过程中,需要设定吊索和顶容线的材料、弹性模量和线膨胀系数,因素单元只能承受拉力,故在选取单元类型时采用 ANSYS 软件中的 Link10 单元来模拟索单元^[17]。

2.2 天线幕优化找形方法

因天线幕中顶容线和吊索的初始参数均根据经验选取,存在较大的结构安全冗余度,所以该初始模

型的电流分布并不是理论上的最佳状态,因此在模型建立后,要对天线幕的特定参数进行优化。以天线幕的垂度为例,在保证安全的条件下,要尽量减小天线幕的垂度进而提高天线的有效高度,从而提高天线的辐射效率。作者通过 ANSYS 软件中的零阶优化算法对天线幕的垂度进行优化。如线长、顶容线截面积等天线幕的其他参数优化也可按此方法操作。

在保证安全的条件下,以天线幕中每根顶容线或吊索的垂度最小为优化目标,建立天线幕优化找形模型如下

$$\text{find } \mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_N)^T \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} &\min f \\ &\text{s. t. } 0 \leq T_{\max} \leq \frac{T_p}{K_c} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $s_i (i=1, \dots, N)$ 为组成天线幕的每根顶容线或吊索的线长; $T_{\max}$ 为每根顶容线或吊索在弧垂最低点的最大张力; T_p 为每根顶容线或吊索的拉断力; K_c 为顶容线或吊索的设计安全系数。

3 天线结构与电性能协同分析方法

3.1 天线设计工况

结合某地的气象数据,分别考虑了自重工况、覆冰工况(不同厚度)、强风工况、暴风工况及覆冰伴随暴风工况对甚低频发射天线电性能的影响,给出具体工况参数取值如表 1 所示。表中 12 m/s 风速对应 6 级强风,30 m/s 风速对应 11 级暴风^[18]。

表 1 天线设计工况表

工况名称	风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	覆冰厚度 / mm	温度 / $^{\circ}\text{C}$
工况 1(自重)	0	0	10
工况 2(覆冰)	0	10	-5
工况 3(覆冰)	0	30	-5
工况 4(强风)	12	0	10
工况 5(暴风)	30	0	10
工况 6(覆冰+暴风)	30	30	-5

通过在 ANSYS 中对天线幕施加风荷载和覆冰荷载来模拟实际情况中的覆冰和吹风工况。施加的风荷载为^[18]

$$W_x = \alpha W_0 \mu_z \mu_{sc} \beta_c d L_p B \sin^2 \theta \quad (7)$$

$$W_0 = V^2 / 1\,600 \quad (8)$$

式中: W_x 为垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值; α 为风压不均匀系数; W_0 为基准风压标准

值; μ_z 为风压高度变化系数; μ_{sc} 为导线或地线的体型系数; β_c 为风荷载调整系数; d 为导线或地线的外径或覆冰时的计算外径; L_p 为杆塔的水平档距; B 为覆冰时风荷载增大系数; θ 为风向与导线或地线方向之间的夹角; V 为基准高度为 10 m 的风速。设定风向始终与顶容线或吊索方向垂直。

施加的覆冰荷载在不考虑高度变化时,可以按照自重荷载考虑,表达如下^[19]

$$G = q_1 L \tag{9}$$
$$q_1 = \gamma A = \gamma \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) \tag{10}$$

式中: G 为覆冰荷载自重; q_1 为单位长度上的覆冰荷载; L 为导线的长度; γ 为覆冰重度^[18]; A 为覆冰截面面积; D 为覆冰后的导线外径; d 为导线的直径。

上述参数均按设计规范^[18]和表 1 中的相关参数取值。

3.2 不同工况下天线电性能的分析方法

不同工况下天线电性能的分析方法如图 3 所示。该方法的关键步骤在于如何将天线在不同工况下的结构模型转换为可用于电磁仿真软件分析的电气模型。本质上,这是一个异构系统集成问题。文献[10-11]通过编写异构系统数据集成程序实现了反射面天线的结构与电气模型的转换,但由于结构和电气模型中存在的网格形式不匹配问题(结构模型常采用四边形网格,电气模型需为三角形网格),所以在实现系统集成前,还需使用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 编程,以对网格进行转换,该过程较为繁琐。

本文通过一种更为简便,高效的方法实现了模型的转换,这种方法可直接提取不携带网格信息的结构模型实体信息,所以在将天线模型导入 FEKO 前无需进行网格转换。

本文方法表述如下:首先在 ANSYS 软件中分别对天线施加自重荷载和其他工况荷载,生成带有自重状态和变形状态的天线节点坐标信息对应的表单元代码(inp)格式文件;其次将 inp 格式文件重写为可被 ANSYS 系统读取的日志(log)格式文件,具体做法是在模型的 inp 文件中分别添加模型各节点坐标和节点对应位置关系的标注符号 k 和 LSTR,该过程可在 Excel 软件中处理;最后在 ANSYS 中将 log 文件转化为初始化图形交换规范(IGES)格式文件,通过 FEKO 软件中的 Import-Geometry 功能将 IGES 格式文件导入 FEKO 软件。

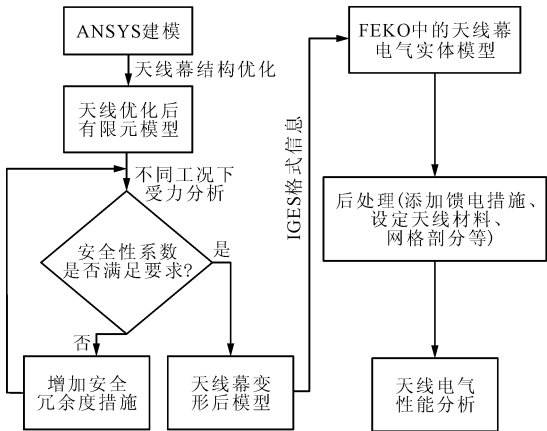


图 3 不同工况下天线的电性能分析方法

4 计算实例及分析

4.1 天线结构与电性能协同分析过程

以一个甚低频 T 形发射天线为例,按照图 3 中的协同分析流程,对天线在不同工况下进行电性能分析。

4.1.1 结构建模 甚低频 T 形发射天线的单组天线幕由 11 根顶容线和 3 根吊索构成,其结构如图 4 所示,各根顶容线和吊索的参数如表 2 所示。

图 4 中 N1 为中吊索,N2 为边吊索,N3~N7 为中顶容线,N8 为边顶容线,顶容线间距设定为 50 m。吊索和顶容线的材料设定为铝,弹性模量为 78.9 GPa,线膨胀系数为 $2.02 \times 10^{-5} / \text{K}$ ^[20]。该 T 形天线阵顶负载(天线幕)由 3 组相同大小的面天线依次排列组成,这 3 组天线幕由 12 根支撑塔支撑。在建模时忽略了实际天线结构中用于馈电和辐射的下引线和保证安全的平衡装置,在受力分析时用力来等效上述天线部件即可。

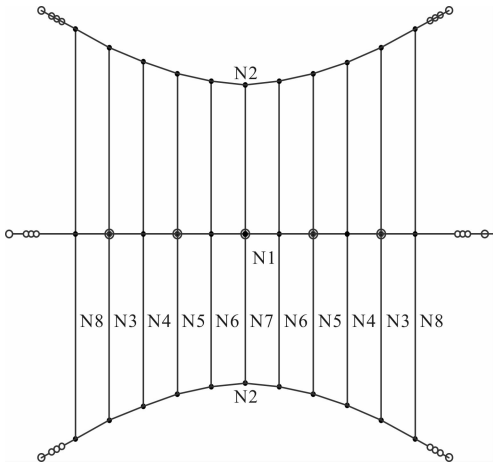


图 4 单组天线幕的结构投影图

4.1.2 天线幕垂度优化 模型建立后,通过第 1.2

表 2 单组天线幕初始状态的顶容线及吊索参数

编号	长度/m	垂度/m	最大张力/kN	计算截面/mm ²
N1	510	53.48	256.466	970
N2	510	0.00	266.794	970
N3	620	67.67	10.526	339
N4	620	72.63	11.304	339
N5	620	84.55	12.018	339
N6	620	86.63	12.451	339
N7	620	87.86	12.546	339
N8	620	41.52	13.022	451

节提出的方法对该天线幕的垂度进行优化,天线幕的安全系数应不小于 2.5^[17],由于天线幕由柔性索组成,考虑天线的应力松弛,将安全系数乘以折减系数 0.95,得出天线幕的真实安全系数为 2.375。根据顶容线和吊索的材料特性,其最大拉断力取 137.5 kN 和 1 181 kN^[18],故根据式(4),可求得顶容线和吊索在弧垂最低点的最大张力应分别小于 57.89 kN 和 497.26 kN。经过优化程序计算和反复迭代,得到天线幕中各根顶容线和吊索的线长和垂度优化结果表 3 所示。由表 3 可以看出在自重状态下各顶容线和吊索的最大张力均符合材料强度要求。通过对比表 2 与表 3 中的数据,可以计算出在顶容线和吊索长度变化较小的情况下,原天线幕的平均垂度为 73.48 m,优化后的天线幕的平均垂度为 48.98 m,优化前后的天线幕平均垂度提高了 24.49 m。

表 3 单组天线幕优化后状态的顶容线及吊索参数

编号	长度/m	垂度/m	最大张力/kN
N1	533.045	21.36	263.433
N2	490.372	4.21	274.696
N3	601.173	54.90	11.433
N4	593.257	50.95	13.016
N5	588.340	51.95	13.628
N6	586.413	46.10	14.754
N7	585.297	45.45	14.993
N8	613.873	44.55	15.233

4.1.3 增加安全冗余度措施 得到天线在自重工况下的结构优化模型后,对其施加表 1 中 2~6 工况下的等效荷载,得出天线变形后的结构模型。值得注意的是,在工况 5、6 下,天线边吊索的安全系数分别降至 1.97 和 1.83,不能满足天线安全系数为 2.375 的条件,此时应该采取增加安全冗余度的措

施。针对甚低频 T 形发射天线而言,一般的做法为分别架设下引线平衡锤和支撑塔平衡锤,使平衡锤在大风等极端工况下自启动,减小吊索或顶容线上的最大应力。天线平衡系统的示意图如图 5 所示。在图 5 中,设定平衡锤的质量为 40 t,当点 A 或点 B 的承重质量超过 40 t 时,平衡锤启动,吊索或顶容线伸长,天线幕和下引线结构再次达到自平衡状态时平衡锤停止运行。当极端工况消失时,平衡锤下降至原始状态,天线结构也恢复至原始状态。在对该平衡装置进行受力分析时,采取的做法是在极端工况下观察 A 点和 B 点的受力情况,若受力超出平衡锤的重量,放长顶容线或吊索,直至两点的安全性系数达到 2.375 时停止放长,此时得出的顶容线或吊索的线长即为该工况下的实际线长。计算得出边吊索在工况 5、6 下需分别放长 3.5 m 和 4.1 m,其安全系数可重新达到 2.375。

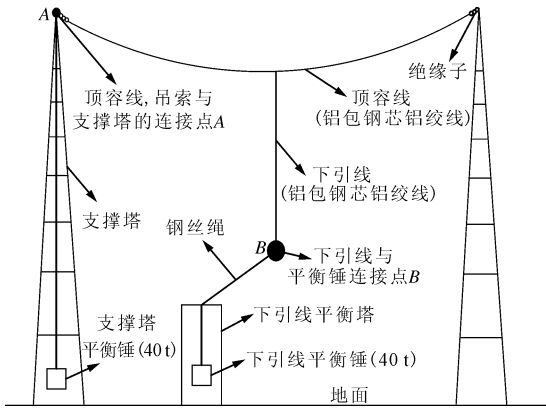


图 5 天线幕平衡装置结构示意图

4.1.4 模型导入及后处理 按照第 2.2 节所述方法将天线幕在不同工况下的结构模型对应的 IGES 格式文件导入 FEKO 软件,生成天线幕的电气模型,在此基础上对其进行后处理。重新设定天线幕的材料(铝),取其相对磁导率 $\mu_r = 1$,电导率 $\sigma = 3.54 \times 10^7 \text{ S/m}$ ^[21],并按表 2 中的参数设定顶容线和吊索的计算截面积。为天线幕添加用于馈电的下引线,每组天线幕添加 5 根下引线,设定每根下引线的高度为 200 m,馈电点激励电压为 1 V,仿真频率范围为 15~30 kHz。

天线场地面选为常规地面,设定其电导率 $\sigma = 0.025 \text{ S/m}$,介电常数 $\epsilon_r = 4$ ^[15]。并在地面上铺设辐射状地网,地网由 48 根铜制导线组成,半径为 1 000 m,埋深 0.3 m。天线剖分的分段长度设定为 150 m。图 6 代表性地给出了天线在初始状态、天线幕垂度经过优化后状态、工况 5、工况 6 下的电气模型

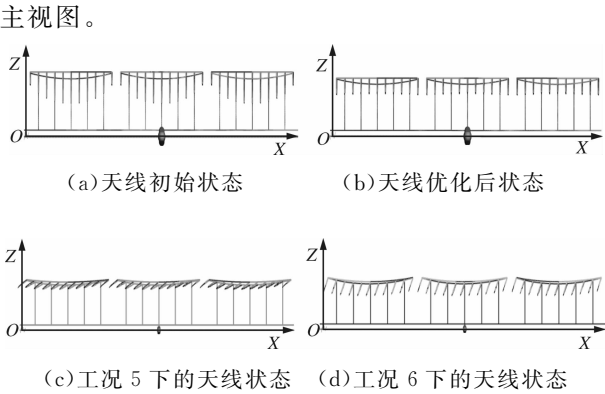


图 6 不同状态下的天线电气模型主视图

4.2 仿真结果与分析

为了验证第 1.2 节中进行天线幕垂度优化的必要性和有效性,对图 6a、b 中的天线电气模型进行仿真,得出天线在优化前后的辐射电阻与辐射效率的对比如图 7、8 所示。可以发现优化后比优化前的天线辐射电阻平均提高了 0.03 Ω,辐射效率平均提高了 12.8%,证明了对天线幕垂度进行优化是必要的。为了进一步对比优化后天线与实际天线的电性能优劣,采用前期针对某甚低频 T 形发射天线的实际测试数据与优化后天线的辐射效率进行对比,测试的具体做法为在单组馈电方式下,选取 15、18.5、19.5、20.5、25、30 kHz 这 6 个频率点作为测试频率点,测试天线的远场场强,天线的辐射效率可由下式计算得出

$$\eta = \frac{P_r}{P_{in}} \tag{11}$$

$$P_r = \frac{E_z^2 d^2}{90} \tag{12}$$

式中: P_r 为天线的辐射功率; P_{in} 为天线的输入功率,其数值可以在发射天线机房中读出。 E_z 为测量的远场场强; d 为天线与测试点之间的距离。

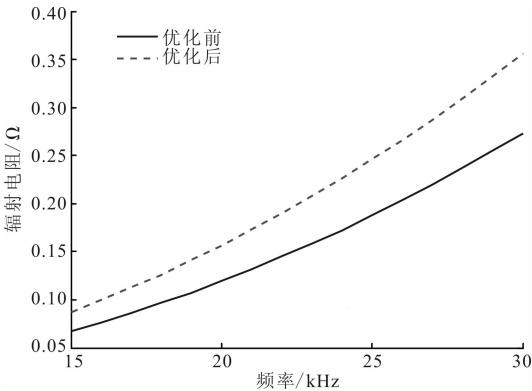


图 7 天线幕优化前后的天线辐射电阻对比

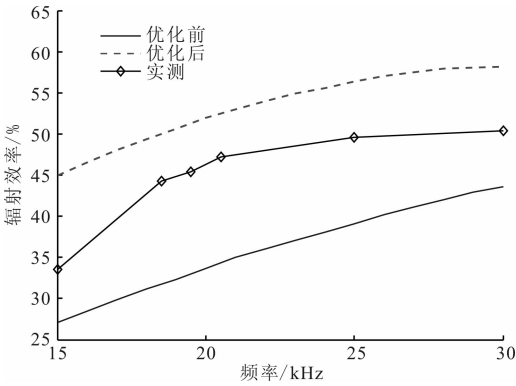
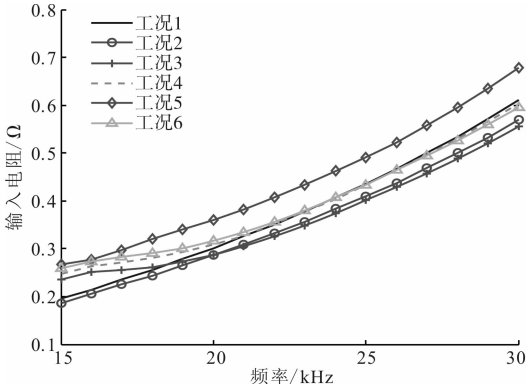


图 8 天线幕优化前后与实测数据的辐射效率对比

由图 8 可以得出与实际天线相比,优化后的天线的辐射效率平均提高了 9%,由此可以证明第 1.2 节中提出的天线幕垂度优化方法的有效性。

证明提出的天线幕垂度优化方法有效可行后,对各工况下的天线模型进行电性能计算,分别得到其输入电阻、辐射电阻、损耗电阻以及辐射效率的对比数据如图 9 所示。值得注意的是,天线辐射电阻和辐射效率的关系并不是对应的,在天线辐射电阻较大的工况下,其辐射效率可能较小。原因在于不同工况下天线的损耗电阻不同(图 9c),造成这种损耗电阻不同的原因在于由于组成天线幕的顶容线和吊索为柔索形结构,在吹风、覆冰的影响下,天线的顶容线和吊索的长度会发生不同程度的变化,这种变化分为平衡锤不启动和启动时的长度变化两种情况,在工况 1~4 下,平衡锤不启动,天线幕的变化主要是顶容线或吊索自身的柔性变化。在平衡锤启动时(工况 5、6),边吊索的物理长度发生了变化,所以损耗电阻的增加程度较为明显。

通过图 9 可以得出以下几点结论:①在吹风、覆冰、吹风伴随覆冰工况下,天线的辐射效率相比与原始状态均有所降低,各工况下天线平均辐射效率的



(a)输入电阻

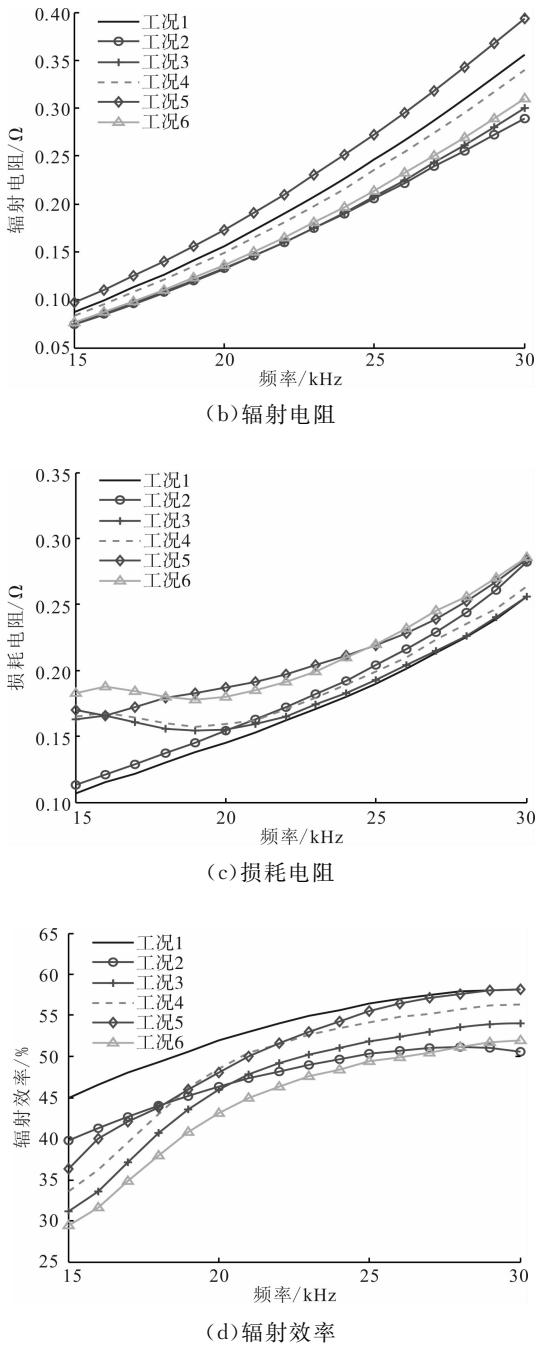


图 9 不同工况下的天线电性能参数对比

对比如表 4 所示;②在工作频率低于 20 kHz、10 mm 厚度覆冰时的天线辐射效率大于 30 mm 厚度覆冰时天线的辐射效率;工作频率高于 20 kHz、10 mm 厚度覆冰时的天线辐射效率小于 30 mm 厚度覆冰时天线的辐射效率;③在 30 m/s 风速下的天线辐射效率在大部分频带(15~18 kHz,22~30 kHz)内大于 12 m/s 风速下的天线辐射效率,但是以牺牲天线的安全性系数为代价的;④吹风(风速为 30 m/s)伴随覆冰(厚度为 30 mm)工况下的天线辐射效率最低。

表 4 不同工况下的天线平均辐射效率对比

工况	1	2	3	4	5	6
辐射效率/%	53	47	47	49	51	44

5 结 论

本文提出了一种甚低频发射天线结构与电性能协同分析方法。通过提出的一种异构系统集成综合分析的新方法对天线的结构和电气模型进行协同分析。以一个甚低频 T 形发射天线为算例,分析了不同工况对天线电性能的影响。结果表明,吹风、覆冰等工况均会使该类型天线的辐射效率发生不同程度的降低。这种分析方法可以对甚低频发射天线在实际工况下各项电性能指标的预测提供参考依据,同时也对其他类型的大型线网结构天线,例如甚低频伞形天线、网状反射面天线在不同工况下的电性能分析具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] LIU C, LIU Q Z, ZHENG L G, et al. Numeric calculation of input impedance for a giant VLF T-type antenna array [J]. Process in Electromagnetics Research, 2007, 75(2): 1-10.

[2] 董颖辉, 柳超, 代甘来, 等. 改进加顶结构的甚低频发射天线阻抗特性分析 [J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 763-768.

DONG Yinghui, LIU Chao, DAI Ganlai, et al. Study of VLF transmit antenna impedance characteristic based on top-load configuration [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(4): 763-768.

[3] DAVID L H. Wideband VLF and LF systems [C]// 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1479-1480.

[4] MARSHALL R A, ADACHI T. Rare examples of early VLF events observed in association with ISUAL-detected gigantic jets [J]. Radio Science, 2014, 49(1): 36-43.

[5] ERIC C B, MICHAEL A R. Dual-frequency distortion predictions for the Culter VLF array [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 1016-1035.

[6] 李鹏, 郑飞, 李娜. 表面纹理对反射面天线电性能的影响 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2278-2282.

LI Peng, ZHENG Fei, LI Na. Effects of surface tex-

- ture on far field patterns of reflector antennas [J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2009, 31(9): 2278-2282.
- [7] 宋立伟, 段宝岩, 邓飞, 等. 表面误差对反射面天线电性能的影响 [J]. 电子学报, 2009, 37(3): 552-556. SONG Liwei, DUAN Baoyan, DENG Fei, et al. The effect of surface error on reflector antenna performance [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 552-556.
- [8] BAHADORI K, RAHMAT S Y. Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortions on membrane reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(9): 2782-2791.
- [9] 袁俊明, 张庆明, 刘彦. 冲击波与破片联合毁伤对反射面天线电性能影响的仿真计算 [J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 169-172. YUAN Junming, ZHANG Qingming, LIU Yan. Simulation on electric properties of parabolic reflector antenna damaged by fragments and shock wave [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(2): 169-172.
- [10] 兰佩锋. 基于异构系统集成的反射面天线机电综合优化 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 37-38.
- [11] 宗亚雳. 星载网状反射面天线随机结构因素对电性能影响分析与优化设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 47.
- [12] BRAESS D. Finite elements [M]. Beijing: Beijing World Publishing Corporation, 2012: 110-113.
- [13] LUDICK D J, BOTHA M M, MAASKANT R, et al. The CBFM-enhanced Jacobi method for efficient finite antenna array analysis [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2700-2703.
- [14] ZANG S R, BERGMANN J R. Analysis of omnidirectional dual-reflector antenna and feeding horn using method of moments [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(3): 1534-1538.
- [15] 柳超, 梁玉军, 刘其中, 等. 甚低频 T 形天线阵地网损耗电阻的分析与计算 [J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(6): 1026-1030. LIU Chao, LIANG Yujun, LIU Qizhong, et al. Analysis and calculation of ground loss resistance for a VLF T-type antenna array with the ground screen [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(6): 1026-1030.
- [16] BOAG A, LETROU C. Fast radiation pattern evaluation for lens and reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(5): 1063-1068.
- [17] 唐喜. 基于 ANSYS 参数化语言的索膜结构找形和荷载分析 [D]. 南京: 河海大学, 2005: 71-72.
- [18] 中华人民共和国建设部. 高耸结构设计规范: GB 50135—2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 17.
- [19] 宋宗凤, 梁汉新, 陈建军, 等. T 型线天线结构的找形与风荷载分析 [J]. 空间结构, 2012, 18(1): 66-70. SONG Zongfeng, LIANG Hanxin, CHEN Jianjun, et al. Form finding and wind load analysis of T-type antenna structure [J]. Spatial Structures, 2012, 18(1): 66-70.
- [20] TANAKA H. Design optimization studies for large-scale contoured beam deployable satellite antennas [J]. Acta Astronautica, 2006, 58(4): 443-451.
- [21] TAYLOR R L. The finite element method: its basis & fundamental [M]. 7th ed. Beijing: World Book Publishing Housing, 2015: 549-550.

【本刊相关文献链接】

- 俱莹, 殷勤业, 陈媛, 等. 发射聚焦式的多天线跳空安全通信技术. 2015, 49(06): 22-26. [doi:10.7652/xjtuxb201506004]
- 殷翔, 钱吉裕, 孔祥举, 等. 天线阵面沸腾换热的数值分析及优化. 2014, 48(11): 64-69. [doi:10.7652/xjtuxb201411011]
- 李晓峰, 王磊, 张晓阳. 获得天线选择分集的空移键控调制算法. 2013, 47(8): 98-103. [doi:10.7652/xjtuxb201308017]
- 殷勤业, 贾曙乔, 左莎琳, 等. 分布式多天线跳空收发技术 (I). 2013, 47(1): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201301001]
- 殷勤业, 张建国, 郑通兴, 等. 分布式多天线跳空收发技术 (II)——权值反馈型反向训练模式下的 0/1 式跳空技术. 2013, 47(06): 1-5.
- 廖学文, 董可, 高贞贞, 等. 一种超宽带系统中的多天线加权预处理方案. 2012, 46(8): 82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201208015]
- 李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 2011, 45(4): 60-66. [doi:10.7652/xjtuxb201104011]
- 杨继波, 李会勇, 陈客松, 等. 球面共形天线阵列的稀布优化方法. 2011, 45(4): 77-81. [doi:10.7652/xjtuxb201104014]

(编辑 刘杨)