DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.090

基于 MATLAB/GUI 的笼型天线力学分析 的可视化界面设计与实现

宋宗凤,李 丹,刘 毅,弓永明 袁英光

(中国电波传播研究所,山东 青岛 266107)

摘 要:通过力矩平衡和荷载等效法,建立了柔索的状态方程,对笼型天线的安装状态和受风荷作用后的工况进行 了分析.基于上述方法设计开发了一套笼型天线力学分析的 GUI 界面,包括初始参数、程序操作和计算结果模块, 提供天线幕安装状态和受风荷载作用下的力学分析,有助于设计人员根据笼型天线电气设计接口,快速得出满足 电气和结构性能的天线幕的设计尺寸、材料类型和规格.通过上述计算方法和可视化界面的力学分析,可提高设计 人员在笼型天线力学分析和结构设计选材及最终尺寸确定过程中的建模效率.通过算例验证了文中模型及分析方 法的合理性和有效性,适用于工程应用.

关键词:笼型天线;力矩平衡;荷载等效;状态方程;风荷分析;可视化设计 中图分类号:TN821.6 文献标志码:A 文章编号:1006-6578(2025)01-0090-06

Design and implementation of a visual interface for mechanical analysis of cage antenna based on MATLAB/GUI

SONG Zong-feng, LI Dan, LIU Yi, GONG Yong-ming, YUAN Ying-guang (China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: This paper establishes the state equation of cable through the method of torque balance and load equivalence, and analyzes the installation state of the cage antenna and the working condition under wind loads. A GUI interface for mechanical analysis of cage antennas has been developed, including initial parameter, program operation and calculation result modules, providing mechanical analysis during installation of the antenna curtain and under wind load. This new interface can help designers quickly determine the design dimensions, material types and specifications of the antenna curtain that meet electrical and structural performance requirements based on the electrical design interface of cage antennas. By using the above calculation methods and visual interface for mechanical analysis, the modeling efficiency of designers in the mechanical analysis, structural design material selection, and final size determination process of cage antennas can be improved. The rationality and effectiveness of the model and analysis method were verified through numerical examples, which are suitable for future engineering applications. **Key words:** cage antenna; torque balance; load equivalence; state equation; wind analysis; visual design

线天线的柔索分析是线天线工程实施过程中 的难点,线天线的风荷分析计算结果是天线的结构 设计、支撑塔设计的基础,也是天线所用材料选择的 理论基础,精确的力学计算结果对天线结构的安全 性、可靠性设计及经济性具有重要的意义.目前国内 在线天线结构力学分析方面的研究相对较少,因此,

收稿日期: 2023-08-28.

基金项目:基础性军工科研院所稳定支持课题资助项目(A132304295-006).

作者简介:宋宗凤(1982一),女,山东莒县人,博士,正高级工程师,主要从事结构设计与仿真分析研究.E-mail: anybody_szf@163.com

对该项工作的开展具有重要的实际工程应用价值.

近年来,关于线天线结构以及相关的索网结构 的分析已有一些研究成果,如邵天晓^[1]、沈世钊^[2]对 单根悬索结构进行了详尽的分析;Andre 等^[3]采用 非线性有限元方法对索网结构设计中的预拉力优化 配置问题进行了研究;郭伟^[4]在假设引下线垂度的 条件下对T形天线进行了结构分析;宋宗凤等^[5]对 燕尾型天线进行了分析计算;刘涛等^[6]和侯健^[7]采 用参变量变分有限元法对索网天线结构进行了非线 性有限元分析;宋宗凤等^[8-10]分别对结构形式相对 简单的T型天线和垂直对数周期天线进行了成形 和风荷载分析.本文以笼型天线为研究对象,对笼型 天线结构的安装状态及受风荷作用下的受力情况进 行分析.

笼型天线是由若干条排在圆柱面上的导线构成 振子,形状像笼子而得名.天线面悬挂于两座塔桅之 间的一种偶极天线^[11],如图1所示.天线面上的笼 型振子线通过两端尾线悬挂于两座高度相等的塔桅 顶部,振子线中部的悬挂点有引下线垂直拉至地面 上支座固定或是由平衡锤来调节.天线安装架设成 型后,要求天线面的尺寸要符合电气设计要求,天线 幕还要成形美观,且能满足抗风要求.这就要求结构 设计人员在进行结构设计时,能够计算出天线幕在 安装状态和风荷作用下的结构变形、内力及悬挂点 坐标,确定出满足天线幕受力的各柔索的设计尺寸.

本文通过力矩平衡和荷载等效法及柔索的状态 方程对笼型天线的安装状态和受风荷作用后的工况 进行了分析,并且还将计算方法编制成了可视化程 序界面,有助于设计人员在已知天线幕基本参数的 情况下,得出满足电气和结构性能的天线幕的设计 尺寸及材料类型和规格.

1 荷载计算

1.1 风荷载计算

垂直作用于柔索表面单位面积上的风荷载标准 值按照 GB 50545-2010《110 kV~750 kV 架空输电线 路设计规范》^[12]中的规定取值,按下面公式计算:

$$\omega_{\rm k} = \alpha \omega_0 \mu_{\rm z} \mu_{\rm sc} \beta_{\rm c} \sin\theta$$

$$\omega_0 = \frac{v^2}{1.600} \tag{1}$$

 $0 \cdot 0^2$

式中: ω_k 为垂直于柔索方向的水平荷载标准值, kN/m^2 ,按风向投影; ω_0 为基本风压, kN/m^2 ,其取值 不得小于 0.35 kN/m^2 ; α 为风压不均匀系数; μ_z 为 z 高度处的风压高度变化系数; μ_{sc} 为柔索的体型系数; β_{c} 为柔索风荷载调整系数; θ 为风向与柔索方向之间 的夹角,度;v为基准高度为10 m的风速,m/s.

按照 GB50545-2010《110 kV~750 kV 架空输 电线路设计规范》中的规定,分别确定风压高度变化 系数 μ_z 和体型系数 μ_{sc} 、风压不均匀系数 α 和导线 或地线风荷载调整系数 β_c ,经计算得到风荷载标准 值 ω_k . ω_k 乘以柔索的受风面积即可得到柔索的风荷 载值. 通过上面公式计算出风载荷标准值 ω_k 之后,即 可求出 n_1 根振子线的均布风荷 qw_1 ,kg/m.

$$qw_1 = \omega_{k1} \cdot n_1 \cdot d_1 \tag{2}$$

式中: ω_{k1} 为振子线的风载荷标准值, kN/m^2 ; n_1 为笼型天线幕振子线的根数; d_1 为单根振子线的直径,m.

 n_2 根端吊索的均布风荷 qw_2 , kg/m

$$qw_2 = \omega_{k2} \bullet n_2 \bullet d_2 \tag{3}$$

式中: ω_{k2} 为端吊索的风载荷标准值, kN/m^2 ; n_2 为笼 型天线幕端吊索的根数; d_2 为单根端吊索的直径,m.

 n_3 根垂直下引变阻线的均布风荷 qw_3 , kg/m.

$$w_3 = \omega_{\mathbf{k}3} \cdot n_3 \cdot d_3 \tag{4}$$

式中: ω_{k3} 为垂直下引变阻线的风载荷标准值, kN/m^2 ; n_3 为下引线的根数; d_3 为单根垂直下引线的直径,m.

1.2 荷载等效

笼型天线幕上存在均匀的自重荷载和笼圈、绝 缘子等集中荷载,为了后期计算方便,可先求出等效 荷载,然后按照只受到沿跨度均匀分布的荷载作用 时导线的计算方法进行计算.采用力矩相等将集中 荷载等效为均匀荷载,等效荷载为和实际荷载产生 同样最大垂度的荷载.

$$g_{\text{$\#\%$}} = \frac{8}{l^2} M_{\text{max}} \tag{5}$$

$$\gamma_{\text{\mathcal{B}}\underline{\%}} = \frac{g_{\text{\mathcal{B}}\underline{\%}}}{F} \tag{6}$$

式中:g^{等效}为等效线密度;l为笼型天线幕换算等效 荷载部分的跨度;M_{max}为最大弯矩;γ_{等效}为等效荷 载;F为有效横截面积.

2 架空线的状态方程

下面简要介绍状态方程.状态变化与应力变化 之间的关系叫做状态方程.

本文中的笼型天线属于两端悬挂点等高的情

况.按平抛物线方程导线的弧线长度可按下式计算:

$$L = l + \frac{8f^2}{3l} = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma_0^2}$$
(7)

式中:L为悬挂点等高时弧线长度;l为跨距;f为弧 垂即垂度值.

由物理方面考察,索段的伸长由弹性变形和温 度变形引起,如下式:

$$L_1 - L_0 = \frac{T_1 - T_0}{EF} L_0 + \alpha (t_1 - t_0) L_0$$
 (8)

将抛物线线长 L 代入上式,可导出状态方程如下:

$$\left(l_1 + \frac{\gamma_1^2 l_1^{3}}{24\sigma_1^2} \right) - \left(l_0 + \frac{\gamma_0^2 l_0^{3}}{24\sigma_0^2} \right)$$

$$= \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_0)}{E} + \alpha (t - t_0) \right] \left(l_0 + \frac{\gamma_0^2 l_0^{3}}{24\sigma_0^2} \right)$$
(9)

其中,
$$l_1 = l_0 = l$$
, $\frac{\gamma_0^2 l_0^3}{24\sigma_0^2}$ 为小项,上式简化为:
 $\sigma_1 - \frac{\gamma_1^2 l^2 E}{24\sigma_1^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 l^2 E}{24\sigma_0^2} - \alpha E(t_1 - t_0)$ (10)

3 安装时天线幕受力分析(下引线无 预拉力)

在安装状态下,振子线受到自身重力的均布荷 载和下引线作用在中间处的集中荷载,建立以振子 线左端悬挂点 A 为坐标原点 O,沿着弦长方向为 X 轴,A 点塔桅向下为 Y 轴,利用右手定则确定 Z 轴 方向,如图 1 所示.



图1 笼型天线示意图

Fig. 1 Diagram of cage antenna

表1 笼型天线幕参数

即两支点的跨距,m; tp_1 为A端吊索的重量; tp_2 为 A端棒形绝缘子的重量; tp_3 为A端放笼振子的重 量; tp_4 为A端笼圈的重量; tp_5 为A端水平振子和 笼圈的重量; tp_6 为A端靠近中间笼圈的重量; tp_7 为A端收笼振子的重量;GH为垂直下引线及其附 件产生的集中荷载; $x_1 \sim x_8$ 分别为对应 $tp_1 \sim tp_7$ 、 GH集中荷载点到坐标原点(支座A设为原点O)的 距离;Ra 和 Rb分别为支座A与支座B的支反力; Ta和Tb分别为天线在支座A与支座B端的吊索 张力,H为天线的水平张力.

图 1 中, l 为天线支座 A 与支座 B 的水平距离,

计算时需要的笼型天线幕参数如表 1.

Table 1 Parameters of cage antenna 名称 振子 端吊索 垂直下引线 柔索数量/根 n_1 n_2 n_3 线径/m d_1 d_2 d_3 橫截面积/m² F_1 F_2 F_3 线密度/(kg/m) q_1 q_3 q_2 破断力/kg TP_2 TP_3 TP_1 弹性模量/Pa E_1 E_2 E_3 线膨胀系数 α_1 α_2 α_3

假定笼型天线振子的初始垂度值 f₀,GH₀为垂 直下引变阻线的垂直荷载(安装时,下引线的张力等 于 0,故 GH₀为下引线及其附件的自重),利用力矩 公式计算出笼型天线的最大力矩 M_{0max}.

$$M_{0\max} = \sum_{i=1}^{7} t p_i \times x_i + G H_0 \times x_8 \qquad (11)$$

则安装状态时笼型振子的水平张力 H。

$$H_0 = \frac{M_{0\text{max}}}{f_0} \tag{12}$$

安装状态时笼型振子等效线密度 $g_{0,9,\%}$ 和应力 σ_0 按下式计算:

$$g_{0 \text{\#} \underline{\aleph}} = \frac{8}{l^2} M_{0 \text{max}} \tag{13}$$

$$\sigma_0 = \frac{H_0}{n_1 F_1} \tag{14}$$

等效换算荷载如下式:

$$\gamma_{0\%\%} = \frac{g_{0\%\%}}{n_1 F_1} \tag{15}$$

笼型振子+吊索+附件的总长度L₀:

$$L_0 = l + \frac{8f_0^2}{3l} \tag{16}$$

4 安装完成后天线幕受力分析(下引 线有预拉力)

安装完成后假设垂直下引变阻线的拉力为 P₀,则该状态下垂直下引变阻线的荷载:

$$GH_1 = GH_0 + P_0 \tag{17}$$

则可计算出笼型振子水平方向的最大力 矩 *M*_{1max}:

$$M_{1\max} = \sum_{i=1}^{7} t p_i \times x_i + G H_1 \times x_8 \qquad (18)$$

安装后笼型振子等效线密度按下式计算:

$$g_{1 \circledast \chi} = \frac{8}{l^2} M_{1 \max} \tag{19}$$

$$\gamma_{1 \circledast \underline{\aleph}} = \frac{g_{1 \circledast \underline{\aleph}}}{n_1 F_1} \tag{20}$$

以安装时的 σ_0 和 $\gamma_{0\%\%}$ 作为初始条件,根据下 面的状态方程,可计算安装后笼型振子的应力 σ_1 :

$$\sigma_{1} - \frac{\gamma_{1 \circledast \%}^{2} l^{2} E}{24 \sigma_{1}^{2}} = \sigma_{0} - \frac{\gamma_{0 \circledast \%}^{2} l^{2} E}{24 \sigma_{0}^{2}} - \alpha E(t - t_{0})$$
(21)

因此,安装后振子的水平张力 H1:

$$H_1 = \sigma_1 n_1 F_1$$
 (22)
安装完成后振子的垂度 f_1 :

$$f_1 = \frac{M_{1\text{max}}}{H_1} \tag{23}$$

由于该笼型天线左右对称,故吊索两端垂直方

向支反力:

$$Ra_{1} = Rb_{1} = \frac{\sum_{i=1}^{r} tp_{i} + GH_{1}}{2}$$
(24)

因此,安装完成后端吊索的张力为:

$$Ta_1 = Tb_1 = \sqrt{Ra_1^2 + H_2^2} \tag{25}$$

5 风荷载作用时天线幕受力分析

已安装完成后垂直下引变阻线的 $\sigma_{1\pm}$ 和 $\gamma_{1\pm}$ 作 为初始条件,计算大风时笼型振子的应力 $\sigma_{2\pm}$.

$$\sigma_{2\pm} - \frac{\gamma_{2\pm}{}^{2} l^{2} E}{24 \sigma_{2\pm}{}^{2}} = \sigma_{1\pm} - \frac{\gamma_{1\pm}{}^{2} l^{2} E}{24 \sigma_{1\pm}{}^{2}} - \alpha E(t-t_{0}) (26)$$

通过上面公式计算出的 $\sigma_{2\pm}$,可得出垂直下引 变阻线的拉力 P_1 .

$$P_1 = \sigma_{2 \pm} n_3 F_3 \tag{27}$$

则大风状态下垂直下引变阻线的荷载为:

$$GH_2 = GH_0 + P_1 \tag{28}$$

则可求出振子垂直方向和水平方向的最大力矩 M_{2 ymax}、M_{2 ymax}

$$M_{2ymax} = \sum_{i=1}^{7} t p_i \times x_i + G H_2 \times x_8 \qquad (29)$$

$$M_{2wmax} = \sum_{i=1}^{8} p w_i \times x_i \tag{30}$$

式中, pw_1 为A端吊索的风荷载; pw_2 为A端棒形 绝缘子的风荷载; pw_3 为A端放笼振子的风荷载; pw_4 为A端笼圈的风荷载; pw_5 为A端水平振子的 风荷载; pw_6 为A端靠近中间笼圈的风荷载; pw_7 为A端收笼振子的风荷载; pw_8 为中间附件及垂直 下引变阻线的风荷载.

大风时笼型振子等效线密度按下式计算:

$$g_{2 \circledast \chi} = \frac{8}{l^2} M_{2 \max} \tag{31}$$

$$\gamma_{2\notin\underline{\otimes}} = \frac{g_{2\notin\underline{\otimes}}}{n_1 F_1} \tag{32}$$

以安装后笼型振子的 σ_1 和 $\gamma_{1 \neq \chi}$ 作为初始条件,根据下面的状态方程,可计算大风时振子的应力 σ_2 :

$$\sigma_{2} - \frac{\gamma_{2 \circledast \Re}^{2} l^{2} E}{24 \sigma_{2}^{2}} = \sigma_{1} - \frac{\gamma_{1 \circledast \Re}^{2} l^{2} E}{24 \sigma_{1}^{2}} - \alpha E(t - t_{0}) \quad (33)$$

因此大风时振子的水平张力 H₂ 为:

$$H_2 = \sigma_2 n_1 F_1 \tag{34}$$

大风时振子的垂度 f2 及其分量 y、z:

$$y_2 = \frac{M_{2ymax}}{H_2} \tag{35}$$

$$z_2 = \frac{M_{2umax}}{H_2} \tag{36}$$

$$f_2 = \sqrt{y_2^2 + z_2^2} \tag{37}$$

由于该天线左右对称,因此吊索两端垂直方向 和水平方向的支反力分别为:

$$Ra_{2} = Rb_{2} = \frac{\sum_{i=1}^{l} tp_{i} + GH_{2}}{2}$$
(38)

$$RaH_2 = RbH_2 = \sum_{i=1}^{8} pw_i/2$$
 (39)

因此,端吊索的张力为:

$$Ta_2 = Tb_2 = \sqrt{Ra_2^2 + RaH_2^2 + H_2^2} \qquad (40)$$

6 可视化设计

为了使设计人员在已知电气设计师给出的初步 设计参数时,能够快速计算出既满足结构性能要求 又符合电气性能要求的结构材料类型和尺寸规格, 因此将上面的计算方法和流程采用 MALAB 语言 将其编制成了可视化界面的程序,可视化界面如 图 2所示.



图 2 笼型天线幕力学分析计算界面

Fig. 2 Mechanical analysis and calculation interface of cage antenna

7 算 例

采用上面所述方法,对某笼型天线进行找形和 风荷作用下的力学分析.振子线、引下线和端吊索选 材如表 2.

表 2	材料参数表
Table 2	Material parameter

Table 2 Material parameter						
名称	d/mm	线密度/ (kg/m)	<i>E</i> /GPa	计算横截 面积/mm ²	破断力/ kg	
振子线	4	0.106	120	12.57	1 024	
端吊索	8	0.258	120	34.39	4 260	
下引线	4	0.106	120	12.57	1 024	

将该笼型天线的相关参数代入上述过程,计算 得出在风速 32 m/s风荷载作用下,该笼型天线幕吊 索张力为1 977 kg<4 010 kg,安全系数为2.028; 振子张力为1 618 kg/8<1 024 kg,安全系数为 4.143;垂直下引线张力为253.5 kg/2<1 024 kg, 安全系数为8.078.

8 结 论

本文方法适用于各种笼型或 T 型天线,如果天 线振子为多根振子或笼形,可通过力矩平衡和荷载 等效对天线幕振子和下引线的荷载等效为均布荷 载,再建立柔索的状态方程,然后对天线安装状态和 风荷载用下的情况进行结构找形和风荷分析.为方 便设计人员开展笼型天线的结构分析和设计工作, 基于 MATLAN/GUI 将文中方法编制成可视化程 序,已达到提高设计人员对笼型天线进行建模、设计 的效率的目的.

通过上述算例表明,本文采用方法和可视化界 面完全可以适用于工程应用,方法简单快捷.

参考文献

- [1] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 北京:中国电力出版社,2003: 59-179.
 SHAO Tian-xiao. Wire mechanics calculation of overhead transmission lines [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 59-179.
- [2] 沈世钊,徐崇宝,赵臣. 悬索结构设计[M]. 北京:中国建 筑工业出版社,1997: 67-80.
 SHEN Shi-zhao, XU Chong-bao, ZHAO Chen. Design of suspended cable structures[M]. BeiJing: China Architecture & Building Press, 1997: 67-80.
- [3] ANDRE A. U, GIL L, ROCA P. A new deformable catenary element for the analysis of cable net structures
 [J]. Computers & Structures, 2006, 84 (29-30): 1882-1890.
- [4] 郭伟.T型天线的二维平面结构分析法[J].科技创新导报,2008,(6):128-129.

GUO Wei. Two dimensional planar structure analysis method for T antenna [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, (6): 128-129.

- [5] 宋宗凤,梁汉新,陈建军.燕尾型天线悬索结构分析[J]. 科技导报,2011,29(25):71-74.
 SONG Zong-feng, LIANG Han-xin, CHEN Jian-jun. Structure analysis of cable on coattails logarithmic antenna [J]. Science & Technology Review, 2011,29 (25):71-74.
- [6] 刘涛,王碧,唐国安,等.索网天线找形分析的参变量变 分有限元法[J].计算力学学报,2021,38(1):73-77. LIU Tao, WANG Bi, TANG Guo-an, et al. Parametric

variational finite element method for the form-finding of

the cable-network antenna[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2021,38(1): 73-77.

- [7] 侯健. 索网天线结构基于参变量变分原理的非线性有限 元分析[D]. 大连:大连理工大学,2014:19-42.
 HOU Jian. The nonlinear finite element analysis for astro mesh antenna based on the parametric variational principle[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014:19-42.
- [8] 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 Zong-feng, LIANG Han-xin, CHEN Jian-jun, et al. Analysis of T antenna under wind load by ANSYS
 [J]. Spatial Structures, 2012,18(1):66-70.
- [9] 宋宗凤,梁汉新,陈建军,等. 垂直对数周期天线结构风 荷载作用下的静力分析[J]. 空间结构, 2014, 20(2): 83-88.

SONG Zong-feng, LIANG Han-xin, CHEN Jian-jun, et al. Static analysis of vertical logarithm period antenna under wind load[J]. Spatial Structures, 2014,20(2): 83-88.

[10] 宋宗凤,林立广,梁汉新,等.风荷载作用下垂直对数周 期天线的索力仿真分析与风洞试验研究[J].空间结 构,2019,25(4):86-90.

SONG Zong-feng, LIN Li-guang, LIANG Han-xin, et al. Simulation analysis and wind tunnel test of cable force for vertical logarithm period antenna under wind load [J]. Spatial Structures, 2019, 25(4): 86-90.

- [11] 邮电部北京设计所、天线和馈电线[M].北京:人民邮电出版社,1985:109-120.
 Beijing Design Institute of the Post & Telecommunication Ministry. Antenna and feeders [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1985: 109-120.
- [12] GB 50545-2010. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计 规范[S].北京:中国计划出版社, 2010.
 GB 50545-2010. Design specification for 110 kV~750 kV overhead transmission lines [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.