

## 桅杆天线基座整体提升施工风稳定性分析

陈 燊<sup>1</sup>, 郭建斌<sup>2</sup>, 卓 文<sup>3</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 林业部设计院厦门分院, 福建 厦门 361012;  
3. 福建省广播电视工程处, 福建 福州 350014)

**摘要:** 对桅杆结构风载作用下静力整体稳定进行非线性分析, 研究桅杆天线基座整体提升施工的风稳定性. 基于桅杆结构的非线性平衡方程, 应用 ANSYS 软件进行结构分析. 采用特征值屈曲方法求得桅杆失稳载荷的数值解上限后, 以此作为非线性屈曲分析的给定载荷, 在渐进加载达到此载荷前, 求得非线性失稳临界解, 即该基座整体提升时的稳定安全系数, 及其后屈曲路径.

**关键词:** 桅杆天线; 整体提升; 风稳定性; 屈曲; 非线性分析

**中图分类号:** TU763.1

**文献标识码:** A

### Wind stability analysis for tall antenna mast in integral-lift-base construction

CHEN Shen<sup>1</sup>, GUO Jian-bin<sup>2</sup>, ZHUO Wen<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Forestry Designing Institute, Xiamen, Fujian 361012, China; 3. Fujian BC-TV Engineering Section, Fuzhou, Fujian 350014, China)

**Abstract:** Nonlinear analysis of static integral stability of mast structure under wind load is done for a tall antenna mast in integral-lift-base construction. Based on the nonlinear equilibrium equations, the software ANSYS has been used to analyze the structure. First of all to find up-bound of numerical solution about mast buckling load by an eigenvalue method, and then to take the solution as a given load for analysis of nonlinear buckling. When arriving to the load in loading step by step, a critical coefficient of nonlinear buckling, that is to say the safety factor for the integral-lift-base construction, is found. Meanwhile, the post-buckling behavior is known.

**Keywords:** antenna mast; integral-lift; wind stability; buckling; nonlinear analysis

桅杆结构主要由单根矗立的杆身和数层斜拉的纤绳组成, 它是一种高柔结构, 在稳定和振动分析中必须考虑几何非线性的影响. 由于纤绳与杆身的非线性耦合作用, 在风荷载不大的情况下, 可能产生大幅度振动干扰, 并引起桅杆结构杆件及其局部区域失稳, 从而导致整个结构的失稳破坏.

桅杆结构的稳定问题主要是指压屈稳定. 作为弹性体的结构物在轴向压力或其它外力作用下发生较大变形而形成临界状态. 桅杆结构有局部稳定问题和整体稳定问题. 整体稳定是由于某一节间或跨间丧失稳定而退出工作, 引起内力重分布或过大变形, 导致整个结构丧失其承载能力.

在桅杆结构的整体稳定分析中, 临界力法是用各种精确、近似的方法求其临界力; 极限位移法也就是杆身采用梁元法和杆元的矩阵位移法, 利用迭代求解得出失稳前荷载-位移关系, 但无法分析结构失稳前后的整个变形路径. 本文基于桅杆结构非线性稳定空间杆索有限元理论<sup>[1]</sup>, 应用 ANSYS 有限元软件对桅杆结构基座整体提升中风稳定性进行分析, 并研究桅杆结构屈曲前和屈曲后的性能.

## 1 桅杆计算模型

### 1.1 工程实例

福建省广电局某发射塔使用边宽 500 mm 三角形圆桁架塔节(每节 4 m 高)安装而成, 总高为 76 m, 靠

收稿日期: 2006-10-27

作者简介: 陈 燊(1948-), 男, 教授, 博士生导师.

三方 5 层纤绳固定. 因地表水接近天线发射体, 每逢雨季经常使高压跳闸, 严重威胁电台安全优质播出, 要彻底消除隐患, 只有提高发射塔基座(图 1). 为了避免拆除铁塔、重浇塔基后再安装塔身的常规施工法造成长时间停播的不良后果, 采用了基座整体提升的施工方法<sup>[2]</sup>. 该塔桅共有 15 道纤绳(拉索), 提升时拟将拉索初拉力调低至 1kN. 就拉索放松前后, 基座整体提升过程的风稳定进行非线性分析(放松拉索后, 压屈稳定安全系数  $K > [K] = 1.5$  即可满足工程要求).

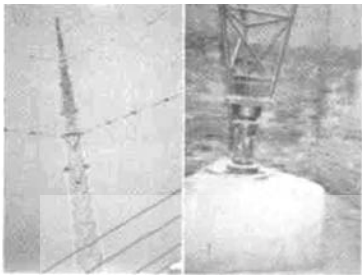


图 1 发射塔  
Fig. 1 Transmitting tower

1.2 计算参数

桅杆杆身弦杆和腹杆分别为  $\phi 28\text{ mm}$  和  $\phi 26\text{ mm}$  钢材, 钢材弹性模量  $E = 2.1 \times 10^8\text{ kN/m}^2$ ; 纤绳采用镀锌钢丝绳, 上层直径  $d_2 = 9.0\text{ mm}$ , 最下层直径  $d_1 = 7.8\text{ mm}$ ; 纤绳弹性模量  $E_k = 1.2 \times 10^8\text{ kN/m}^2$ , 纤绳初应力上层  $\sigma_2 = 77\text{ N/mm}^2$ , 最下层  $\sigma_1 = 76\text{ N/mm}^2$ ; 放松后, 纤绳应力上层  $\sigma_2 = 16\text{ N/mm}^2$ , 最下层  $\sigma_1 = 21\text{ N/mm}^2$ . 假定杆身受 4 级风荷载  $v_0 = 10\text{ m/s}$ (超过 4 级则停止施工), 顺风向垂直于杆身平面.

1.3 结构模型的建立

忽略桅杆和纤绳之间的螺栓连接, 直接在节点处连接. 桅杆结构采用 618 个节点, 1 728 个单元, 其中纤绳用只能承受单向拉伸或单向压缩, 特有双线性刚度矩阵的 LINK10 三维杆单元. 模型立面图、平面图、三视图如图 2 所示.

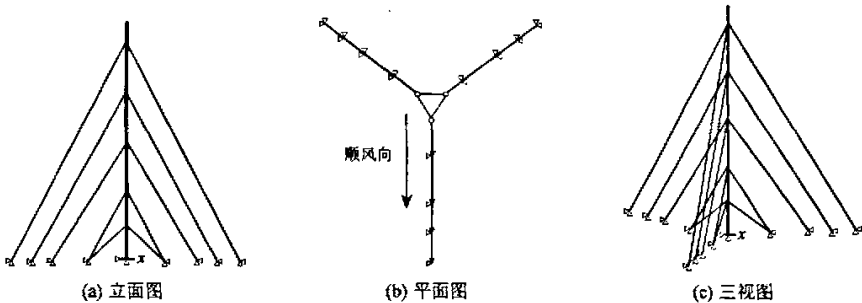


图 2 模型视图  
Fig. 2 Model views

1.4 荷载模型

对于比较规则的高耸结构, 如本文沿高度质量和外形规则的桅杆结构, 可将风振系数的计算进一步简化. 进行模态分析, 沿顺风向结构前 3 阶频率及振型如图 3 所示.

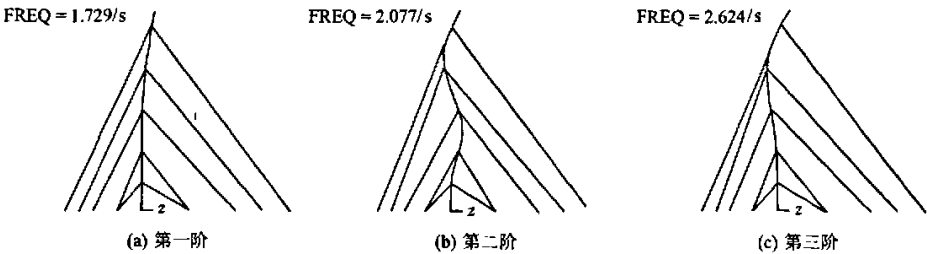


图 3 频率及振型曲线  
Fig. 3 Frequencies and modes

由于第一振型的顺风向位移占主要部分, 静动力风荷载一般只考虑第一振型的贡献, 将静力风荷载按第一振型分解, 风振系数为一常数<sup>[3]</sup>. 顺风向第一振型风振力沿高度分布如图 4 所示.

## 2 计算理论

### 2.1 桅杆结构的非线性静力平衡方程

根据修正的总体 Lagrangian 坐标描述法, 杆单元的增量平衡方程<sup>[4]</sup>

$$([K_L] + [K_\sigma])\{\Delta u\} = \{F^{(n+1)}\} - \{R^{(n)}\} \quad (1)$$

式中:  $[K_L]$  为线刚度矩阵;  $[K_\sigma]$  为初应力刚度矩阵.

假定  $\{f_i\}$  和  $\{f_{wi}\}$  分别为索元  $i$  自重和风力引起的节点荷载,  $g$  为索元的均布竖向重力荷载,  $W$  为作用在索元上的风压引起的总风力, 可以导出桅杆结构的非线性静力平衡方程

$$[K]\{\Delta u\} = \{F^{(n+1)}\} - \{R^{(n)}\} + \sum_{i=1}^n [A]_i \{f_i^{(n+1)}\} + \sum_{i=1}^n [A]_i \{f_{wi}^{(n+1)}\} \quad (2)$$

式中:  $[K]$  为杆元和索元的组合刚度矩阵;  $[A]_i$  为第  $i$  个索元的交换矩阵.

求解式(2)时, 首先分析在纤维初拉力和自重作用下桅杆受力状况, 之后在风荷载的一系列增量作用下, 采用弧长法计算结构的荷载一位移曲线和非线性稳定极限承载力.

### 2.2 特征值屈曲

研究特征值问题:

$$([K] + \lambda[S])\{\psi\} = 0 \quad (3)$$

式中:  $[K]$  为刚度矩阵;  $[S]$  为应力刚度矩阵;  $\{\psi\}$  为位移特征矢量;  $\lambda$  为特征值(也称比例因子或载荷因子).

利用上式可确定结构的分叉点, 分叉点是指 2 条或多条载荷-变形曲线的相交点. 具有分叉屈曲的结构在达到屈曲载荷之前, 其位移-载荷曲线表现出线性关系, 达到屈曲载荷后, 曲线将沿其它路径.

特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度(歧点). 但初始缺陷和非线性使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲, 因此, 特征值屈曲分析经常产生非保守结果. 由于特征值屈曲不考虑任何非线性和初始扰动, 因此它只是一种理论解, 利用特征值屈曲分析可以预测出屈曲载荷的上限.

### 2.3 非线性屈曲

非线性屈曲分析是在大变形影响开关打开的情况下(NLGEOM, ON)所作的一种静力分析, 该分析过程一直进行到结构的限制载荷或最大载荷出现<sup>[5]</sup>.

用修正的 Newton-Raphson 迭代法, 逐渐增加载荷步的非线性静力分析技术来求得结构开始变得不稳定时的临界载荷. 非线性屈曲分析比线性屈曲分析更适用于对实际结构进行设计或估计.

在载荷增量步长自动控制的有限元法求解中, 修正的 Newton-Raphson 迭代算式如下:

$$K_\sigma \Delta a^{(n)} = \Delta Q^{(n)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

$$\Delta Q^{(n)} = {}^{i+\Delta t}Q^{(n+1)} - {}^{i+\Delta t}Q_i^{(n)} \quad (5)$$

$${}^{i+\Delta t}Q_i^{(n+1)} = {}^{i+\Delta t}Q_i^{(n)} = ({}^{i+\Delta t}p^{(n)} + \Delta p^{(n)})Q_0 \quad (6)$$

$${}^{i+\Delta t}Q_i^{(n)} = \sum_e \int_{V_e} B^T \sigma^{(n)} dV \quad (7)$$

其中,  $\Delta Q_i^{(n)}$  是  $n-1$  次迭代后得到的  ${}^{i+\Delta t}p^{(n)}Q_0$  构成的不平衡节点力向量,  $p^{(n)}$  是  $n$  次迭代中由下列约束条件来确定的载荷因子增量  $\Delta p$  的第  $n$  次修正量.

计算过程还采用弧长法. 弧长法一般限于仅具有渐进加载方式的静态分析. 程序由第一个子步的

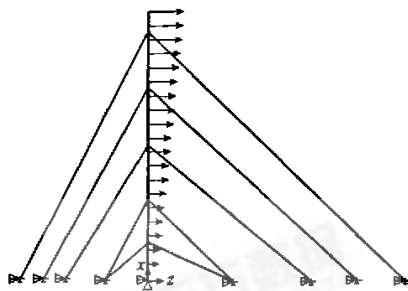


图 4 第一振型风振力沿高度分布

Fig. 4 First mode wind load

第一次迭代的载荷(或位移)增量来计算初参考弧长半径:

参考弧长半径 = 总体载荷(或位移)/NSBSTP

其中, NSBSTP 是子步数. 控制载荷因子增量的约束条件为:

$$[\alpha({}^{t+\Delta t}p^{(n)} - {}^tp) + \Delta p(n)]^2 + [({}^{t+\Delta t}a^{(n)} - {}^ta) + \Delta a(n)]^T [({}^{t+\Delta t}a^{(n)} - {}^ta) + \Delta a(n)] = (\Delta l)^2 \quad (8)$$

式中:  $\Delta l$  为弧长;  $n$  为迭代次数;  $t$  表示时刻;  $p$  为载荷因子;  $a$  为位移因子;  $\alpha$  为比例因子, 由它来调节载荷增量和位移增量在弧长  $\Delta l$  中的作用.

3 非线性稳定分析

3.1 特征值屈曲解

桅杆沿顺风向第一振型风振力荷载转换为相应节点上的压力. 采用 Block Lanczos 法进行计算, 提取特征值数目为 1, 所得特征值见表 1, 模态形状如图 5 所示.

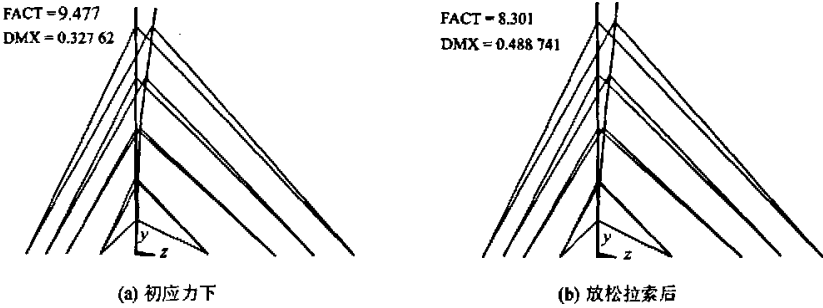


图 5 特征解模态形状

Fig.5 Mode shape of eigen - solution

3.2 非线性屈曲解

打开大变形效应选项 (NLGEOM, ON), 采用弧长法, 对模型施加比用特征值屈曲所预测载荷高出 10% ~ 15% 的载荷, 子步数为 100, 最大弧长倍数为 8, 可获得位移 - 载荷曲线. 非线性屈曲解可见表 1, 最上层纤绳与杆身相接处的位移 - 载荷曲线如图 6.

基座整体提升按子步 0.5m 的高度进行提升, 直至符合施工要求, 即 2m 处. 对桅杆结构在顺风向风振力作用下基座提升过程的非线性承载能力进行比较 (见表 2).

3.3 各种风向的非线性稳定极限承载能力比较

用上述归纳的步骤再对桅杆结构在 3 种不同风向, 放松拉索前后, 基座整体提升进行非线性屈曲分析, 见表 3 (角度以与 Z 轴正方向夹角为准, 见图 7).

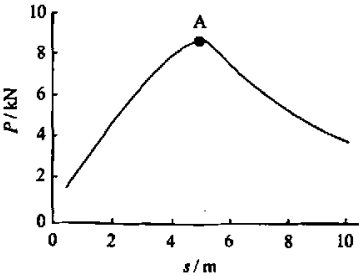


图 6 位移 - 载荷曲线

Fig.6 Deflection - load curve

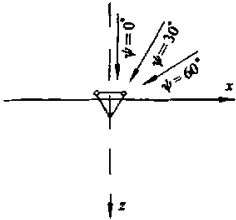


图 7 3 种风向示意图

Fig.7 Wind direction scheme

表 1 放松拉索前后的特征值屈曲与非线性屈曲

Tab. 1 Eigenvalue buckling and nonlinear buckling under inherent stress and relaxation

桅杆结构	未放松拉索(即初应力)情况	放松拉索后情况
特征值屈曲解	9.477	8.301
非线性屈曲解	8.703	8.172

表 2 基座整体提升后的特征值屈曲与非线性屈曲

Tab. 2 Eigenvalue buckling and nonlinear buckling after integral - lifting

$h_{\text{提升高度}} / \text{m}$	0.5	1	1.5	2
特征值屈曲解	8.158	8.018	7.879	7.744
非线性屈曲解	8.037	7.905	7.774	7.653

表 3 3 种风向桅杆结构的非线性屈曲解比较

Tab. 3 Comparison of nonlinear buckling under various wind direction

桅杆结构	未放松拉索(即初应力)情况			放松拉索后情况			基座整体提升后情况		
风向 $\psi / (^{\circ})$	0	30	60	0	30	60	0	30	60
特征值屈曲	9.477	10.466	16.068	8.301	9.196	11.283	7.744	8.587	10.184
非线性屈曲	8.703	9.835	15.402	8.172	8.727	10.567	7.653	8.336	9.542

#### 4 结语

1) 从图 6 看出,当达到风荷载的非线性屈曲解时,即 A 点时,桅杆开始失稳,此时的值就是所需要的临界载荷系数。

2) 在基座整体提升前后,整体稳定安全系数都远大于 1.5,因此在正常风载荷下,进行整体提升施工是安全、可行的。

3) 放松拉索后,由于初应力减小,杆身纵向力减小,但桅杆节点位移却增大,节点刚度的减小对整体稳定系数的影响大于纵向力的减小。因此放松拉索的整体稳定系数都小于在初始应力情况下的整体稳定系数。

4) 对不同风向进行比较,可以看出, $\psi = 0^{\circ}$ ,即顺风向为失稳最不利风向。

#### 参考文献:

- [1] 王肇民,王之宏,颜明忠.桅杆结构[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] 卓文.高耸塔桅天线基座整体提升简易施工法[J].福建建筑,2002(3):54-55.
- [3] 黄本才.结构抗风分析原理及应用[M].上海:同济大学出版社,2001.
- [4] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [5] 刘涛,杨凤鹏.精通 ANSYS[M].北京:清华大学出版社,2002.

(责任编辑:王阿军)

## 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，一直致力和专注于微波、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>