

# 基于 ANSYS 的天线杆屈曲分析\*

余娟 余朋友 金建伟 宋若愚  
(空军预警学院 武汉 430019)

**摘要** 论文介绍了屈曲分析的定义和屈曲分析有限元分析法,采用有限元分析软件 ANSYS 建立了天线杆的有限元模型,然后对天线杆进行了线性屈曲分析和非线性屈曲分析,分别求出了屈曲模态及临界载荷,并将分析结果进行对比。对不同的初始缺陷的情况进行屈曲分析,得出临界载荷随初始缺陷的变化规律,分析结果为结构的优化设计提供了理论基础,对类似结构的屈曲分析提供了参考依据。

**关键词** 屈曲分析; 天线杆; 初始缺陷; 屈曲模态

**中图分类号** TU313 **DOI:** 10.3969/j.issn1672-9722.2013.09.035

## Buckling Analysis of Antenna Mast Based on ANSYS

YU Juan YU Mingyou JIN Jianwei SONG Ruoyu  
(Air force Early Warning Academy, Wuhan 430019)

**Abstract** Definition and finite analysis of the buckling analysis are introduced. The ANSYS finite element software is applied for establishing finite element model, carrying out liner and no-liner buckling analysis, finding out buckling modality and critical load and comparing with the analytic results. Under the different initial faultiness, it reaches the change regulation of critical load by buckling. The result provides the theoretical basis for the structure's optimal design and reference frame for analogous buckling analysis.

**Key Words** buckling analysis, antenna mast, initial faultiness, critical load

**Class Number** TU313

## 1 引言

在无线电通信、雷达、导航、电子对抗、遥感等工程系统中,天线设备是必不可少的,它主要是利用电磁波来传递信息和能力<sup>[1]</sup>。天线可以分为很多类,按结构形式可以分为线天线和面天线。天线结构除了满足天线设备的电性能,还应该满足机械性能<sup>[2]</sup>。天线杆是天线设备的支撑结构,其稳定性和寿命会影响到整体性能,因此对天线杆进行屈曲分析是十分重要的,可以采用有限元分析软件 ANSYS 来实现。ANSYS 软件是一个集结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件<sup>[3]</sup>,该软件很好地实现了前、后处理,分析求解及多场耦合分析统一数据库功能。

## 2 屈曲分析的理论基础

结构在压缩载荷或其它载荷作用下,在某一位置保持平衡,这一平衡位置称为平衡构形。在载荷达到一定的数值时,结构存在直线和屈曲两种平衡构形,在任意微小的外界扰动下,平衡构形由直线转为弯曲的过程称为屈曲<sup>[4]</sup>。屈曲容易使结构失效,往往具有突发性,因此在结构设计中需要认真考虑。ANSYS 提供了线性屈曲分析和非线性屈曲分析两种方法。

### 2.1 有限元法的简介

有限元法是随着电子计算机的发展而迅速发展的现代

计算方法,其基本思想是将复杂的问题简单化后再求解<sup>[5]</sup>。有限元法除了用于结构分析,还可用于归结为场问题的工程问题。有限元分析软件有很多种,如 MSC/Nastran、MSC/Dystran、MSC/Marc、ANSYS、ADINA 和 ABAQUS 等,其中 ANSYS 已成为最有效和通用的有限元软件,ANSYS 分析的类型包括结构分析、热分析、电磁场分析和流体动力学分析。

### 2.2 线性屈曲分析的有限元法

线性屈曲分析又称为特征值屈曲分析,是一种传统的弹性屈曲分析方法。研究线性屈曲分析问题时,结构的力与位移的关系可表示为

$$[K_E] + [K_o]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

其中,  $[K_E]$  为结构的刚度矩阵;  $[K_o]$  为几何刚度矩阵,  $\{\delta\}$  为位移向量;  $\{F\}$  为载荷向量。在扰度较小的情况下,  $[K_o]$  与  $\{F\}$  为线性关系,  $\{F\}$  增加  $\lambda$  倍时,  $[K_o]$  也增加  $\lambda$  倍, 则平衡方程变为

$$([K_E] + \lambda[K_o])\{\delta\} = \lambda\{F\} \quad (2)$$

假设结构屈曲时遭遇平衡的虚位移为  $\Delta\delta$ , 则平衡方程也可表示为

$$([K_E] + \lambda[K_o])\{\delta + \Delta\delta\} = \lambda\{F\} \quad (3)$$

为了同时满足式(1)与式(3), 则

$$([K_E] + \lambda[K_o])\{\Delta\delta\} = 0 \quad (4)$$

由式(4)可以推出屈曲判断的准则可表示为

\* 收稿日期: 2013 年 3 月 3 日, 修回日期: 2013 年 4 月 27 日

作者简介: 余娟, 女, 助教, 研究方向: 机械电子工程。余朋友, 男, 硕士, 研究方向: 机械电子工程。金建伟, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 电力电子工程。宋若愚, 男, 助教, 研究方向: 电子信息工程。

$$|[K_E] + \lambda[K_s]| = 0 \quad (5)$$

由以上可知屈曲分析求解的对象是特征值,计算最小的稳定安全系数才有实际意义,即上式的最小特征值  $\lambda_c$ ,而临界载荷为  $\lambda_c P_0$ ,  $P_0$  为初始外力。

用 ANSYS 软件进行线性屈曲分析的步骤如下:建立模型,获得静力学解,获得特征值求解,查看结果。

### 2.3 非线性屈曲分析的有限元法

非线性屈曲分析的基本思想是将屈曲分析的特征问题与非线性分析的有限元法相结合<sup>[6]</sup>。目前非线性分析的有限元法包括增量法、迭代法和最小化方法三种。

增量法是把总载荷分成很多个增量步,将刚度方程线性化,即一个载荷增量中,刚度都是不变的。先给出初始载荷和初始位移,每次增加一个载荷量,再由载荷增量求解位移增量。迭代法是将全部载荷作用于结构上,然后进行迭代计算,逐步计算位移增量,直到基本方程到底容许的近似满足<sup>[7]</sup>。最小化方法是将结构的平衡问题等同于求解结构的总势能的驻值问题。增量法的计算方法简单,但是精度较低,迭代法能很好地控制计算精度,最小化法适用于自由度较低的结构,本文中选用的是迭代法。

用 ANSYS 软件进行非线性屈曲分析时,与线性屈曲分析相比,需要施加初始缺陷。

## 3 有限元模型的建立

天线杆是由三段钢管焊接而成,配置了三层拉线,每层 120°分布。在天线杆结构的力学模型中,天线杆底端绞支,拉线简化为具有水平约束的线弹簧约束。有限元模型的单元类型选用 BEAM188。BEAM188 单元是二节点的三维线性梁,具有六个自由度<sup>[8]</sup>。利用梁单元来建立天线杆的有限元模型,截面形式为圆环形。定义单元材料的属性,弹性模量为  $2.06 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比为 0.3。

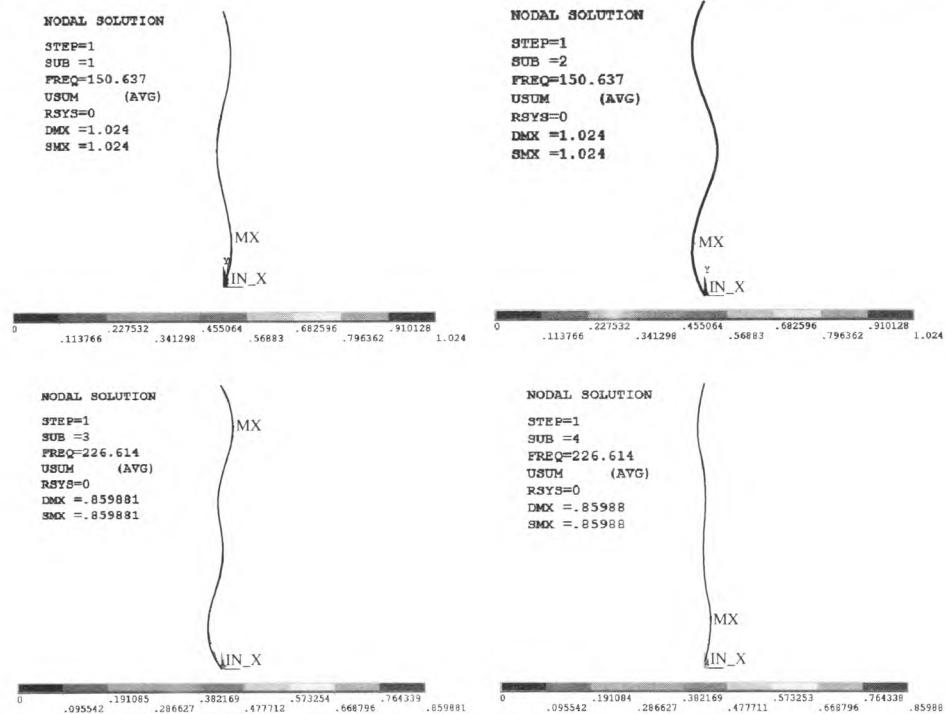


图 1 天线杆的前 4 阶屈曲模态

(下转第 1528 页)

## 4 天线杆的屈曲分析

### 4.1 天线杆的线性屈曲分析

与一般的静力学相比,线性屈曲分析的过程中需要注意的是,为了计算结构的应力刚度矩阵,必须打开预应力开关;必须为结构施加单位载荷;采用凝聚法时,不能接受非零约束。在天线杆顶端的节点施加竖直方向的单位载荷,对结构进行静力学分析,然后指定特征值分析选项,扩展前 20 阶的屈曲模态,进行特征值屈曲求解。求解结果包括各阶的特征值屈曲载荷值、屈曲模态图、位移云图和相应的应力云图。前 4 阶的屈曲模态图如图 1 所示。

进行线性屈曲时,特征值屈曲载荷值的最小值为结构的临界载荷<sup>[9]</sup>。天线杆的线性屈曲分析结果中,天线杆结构第 1 阶和 2 阶的特征值屈曲载荷相等,第 3 阶和第 4 阶相等,依次类推。该结构的截面是圆环形,两个方向的惯性矩是相等的,因此只用考虑奇数阶。第 1 阶屈曲模态的屈曲载荷值最小,由分析结果可读出结构的临界载荷为 150.64KN,最大的模态位移为 1.024m,发生在第一节杆的中心处。

### 4.2 天线杆的非线性线性屈曲分析

天线杆的运输和安装过程中,可能会使用有初始弯曲的钢管,会导致实际值与理论值存在较大的误差,无法判断实际的屈曲状态,非线性屈曲分析中考虑到了结构的初始缺陷。用 ANSYS 软件进行非线性屈曲分析时,首先应该提取线性分析中第 1 阶的屈曲载荷值和屈曲模态的横向位移最大值,然后施加初始缺陷<sup>[10]</sup>,其方法是使用结果文件更新模型的节点,放大的倍数为横向位移最大值乘以初始缺陷。初始缺陷施加完毕后,重新施加载荷来求解稳定极限载荷,施加的载荷应该大于估计的载荷,一般采用第 1 阶的屈曲载荷的足够大的倍数。最后进行非线性迭代运算,当迭代运算无法收敛时,系统求解会自动结束。

- LUO Xingbai, LIU Guoqing. Efficiency analysis of land force weapon system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [9] 炮兵装备技术研究所. 高射炮射击理论[M]. 北京: 炮兵装备技术研究所, 1976: 577-581.
- Institute for Artillery Technology. Theory of anti-aircraft batteries firing[M]. Beijing: Institute for Artillery Technology, 1976: 577-581.
- [10] 陶俊, 尹勇, 廉静静. 航海模拟器中船舶进港训练评估系统的

研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(2).

TAO Jun, YIN Yong, LIAN Jingjing. Research on Assessment of Ship Entering Port in Navigation Simulator[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(2).

- [11] 段群杰, 张铭钧. 基于减法聚类和自适应模糊神经网络方法的运动规划器设计[J]. 兵工学报, 2007, 28(12): 1533-1536.
- DUAN Qunjie, ZHANG Mingjun. Design of motion planner based on subtraction clustering and adaptive fuzzy neural network[J]. Acta Armamentaril, 2007, 28(12): 1533-1536.

(上接第 1524 页)

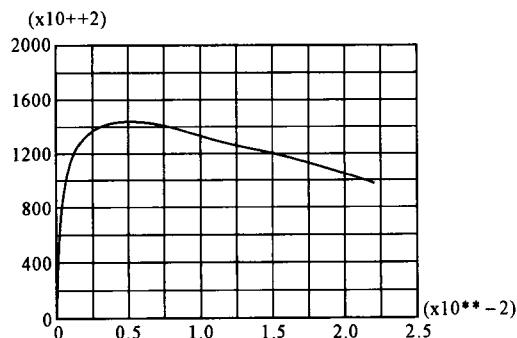


图 2 初始缺陷为 0.001 的位移载荷曲线

非线性屈曲分析计算时,需要定义材料的弹塑性属性,将切线模量定义为弹性模量的 1/1000。将杆高的 0.001 作为初始缺陷施加到模型中,分析计算后载荷曲线图如图 2 所示,横坐标表示即第一节杆的中点的位移,这是因为它是第 1 阶屈曲模态中横向变形量最大的节点,纵坐标表示天线杆底部的反作用力。载荷曲线图中的最大载荷值即为结构的临界载荷,由图可知结构的临界载荷为 143095N,并且当位移量很小时,位移与载荷为线性关系。

表 1 不同初始缺陷下的临界载荷

序号	初始缺陷	临界载荷/N
1	0.01	124894
2	0.02	107503.9
3	0.03	96264
4	0.04	88041.4
5	0.05	81752.6

为了研究初始缺陷对临界载荷的影响,本文分析计算了第一模态的初始缺陷为 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 时的临界载荷,计算结果如表 1 所示。

由表中分析结果可知,随着初始缺陷的增加,结构的临界载荷减少。当初始缺陷为 0.02 时,与线性屈曲载荷相比,其屈曲载荷减少了 28.6%,这是比较危险的。

## 5 结语

采用 ANSYS 软件通过对天线杆结构进行屈曲分析,发现非线性屈曲分析的临界载荷值小于线性屈曲分析的临界载荷值,这是因为非线性屈曲分析时考虑到了结构的初始缺陷和材料的非线性分析。因此,在对天线杆进行稳定性验算时,采用非线性屈曲分析更加安全。分析了不同初始缺陷下结构的临界载荷,分析结果表明初始缺陷对非线性屈曲分析的计算结果影响较大,当初始缺陷为 0.001 时,非线性分析计算结果的结果是线性分析计算结果的 95%,

当初始缺陷大于 0.02 时,非线性分析计算结果远小于线性分析计算的结果。因此,在安装设计天线刚结构时,应该考虑初始缺陷这个因素。

## 参 考 文 献

- [1] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002; 1.
- DUAN Baoyan. Antenna structure analysis, optimization and measurement[M]. Xi'an: Xidian University University press, 2002; 1.
- [2] 叶尚辉, 李在贵. 天线结构设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999; 2-4.
- YE Shanghui, LI Zaigui. The antenna structure design[M]. Xi'an: Xidian University University press, 1999; 2-4.
- [3] 王勘成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003; 10.
- WANG Xucheng. Finite Element Method[M]. Beijin: Tsinghua University press, 2003; 10.
- [4] 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 05-206.
- FAN Qinshan, YIN Yajun. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 205-206.
- [5] 张波, 盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005; 4-5.
- ZHANG Bo, SHENG Hetai. ANSYS Finite Element Numerical Analysis Theory and Engineering[M]. Beijin: Tsinghua University press, 2005; 4-5.
- [6] Nuno Silvestre, Dinar Camotim. Elastic Buckling and Second - Order Behaviour of Pitched Roof Steel Frames[J]. Journal of Constructional SteelResearch, 2007(63): 804-818.
- [7] 沈春根, 王贵成, 王树林. HSK 工具系统的屈曲响应计算和分析[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(1): 77-80.
- SHEN Chungen, WANG Guicheng, WANG Shulin. The Buckling Response Computing and Analysis of HSK Tool System[J]. Machine Design and Research, 2009, 25(1): 77-80.
- [8] 熊晓莉, 袁光. ANSYS 中 Beam189 单元的局限性初探[J]. 山西建筑, 2012, 38(6): 35-36.
- XIONG Xiaoli, YUAN Guang. Initial Inquiry on The Limitations of Beam 189 Unit in ANSYS[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(6): 35-36.
- [9] 黄敏. 基于 ANSYS 程序的结构屈曲分析[J]. 中国科技纵横, 2010(1): 95.
- HUANG Min. The Analysis of Shipping Box Stability by FEA [J]. China Science and Technology, 2010, (1): 95.
- [10] Zhang Chonghou, Liu Yansheng, oshiaki Goto. Plastic Buckling of Cylindrical Shells Under Transverse Loading[J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(2): 202-210.

## 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，一直致力于专注于微波、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>