

# 天线结构模态分析\*

唐宝富

(南京电子技术研究所 210013)

**【摘要】** 本文介绍了天线结构模态分析常用的两种方法——有限元法 FEM 和模态试验法, 重点叙述了有限元法分析的特点和应用, 并进行实例分析, 为天线结构设计提供参考。

**关键词** 天线结构 模态分析 有限元法 模态试验

## The Modal Analysis of Antenna Structure

**[Abstract]** This paper introduces two usual methods of the modal analysis of antenna structure, FEM and modal testing. It puts emphasis on the features and applications of FEM, and gives an application sample of modal analysis. The suggestions are provided for the design of antenna structure.

**Key Words** Antenna structure Modal analysis FEM Modal testing

### 1 引言

天线在通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥测和射电天文等领域有广泛的应用, 凡利用电磁波来传递信息和能量的都离不开天线。天线的形式与种类繁多, 常用的是各种线天线与面天线以及它们的组合和阵列。大型天线的尺寸可以长到几公里, 高达几百米, 而小的天线也可以短到几毫米。

天线结构指的是天线本身和支持天线的结构物。天线结构与一般结构具有共同的问题, 但也有其特殊性——天线结构的唯一作用是实现天线的电性能, 它的设计首先必须满足电性能的要求, 其次是工作状态、机械性能、可靠性和加工工艺等方面的要求。

对天线结构来说, 满足电性能的要求就是保证反射面、馈源或天线单元间距、高度(对阵列天线而言)等的精度, 也就是天线工作时天线结构在静、动载荷作用下的变形量必须在允许范围内(天线结构精度还包括加工、测量等误差的影响)。因此, 天线应具有足够的刚度, 同时还得具有足够的强度, 保证在各种载荷作用下不发生破坏。

由于天线的工作环境多种多样, 如地面、车辆、舰船、飞机、卫星等, 因而天线所受载荷情况也就各不相同, 既有自重、温度、冰雪及惯性等静载荷, 也有风荷、地震、伺服系统振动、武器发射和爆炸冲击等动载荷。以往在天线结构设计时常常只考虑静载荷和静特性, 只在天线加工出来后再作动载荷和动特性的测试, 如有不合要求的, 采用局部补救措施。这种设计路线简称静态设计、动态校核。即使考虑动载荷, 也大都是把动载荷等效为静载荷进行静力分析。这种方法往往误差较大, 容易造成结构笨重或重大返工。随着天线精度要求的提高, 大荷重比天线(如相控阵天线)的出现和对天线重量要求的提高, 静态设计法已难以满足设计要求, 有必要进行动态设计, 提高产品的设计水平, 从而保证天线性能, 减轻重量, 降低成本, 达到理想的性能价格比。

结构的模态分析就是寻求结构的动力特性, 而动力特性可用固有频率、固有振型和阻尼来确定, 即所谓的结构模态参数。目前常用的动力特性评价方法有经验法、全息照相法、理论计算法和试验法等。这些方法各有优、缺点, 实际应用中可以相互补充验证。

## 2 有限元理论分析法

一个实际结构的振动,除随机振动外,一般由不同频率的简谐波组合而成,且主要是由前几阶或十几阶低频谐振波组成,高频谐振波所占的成分很小(因为高频谐振波受阻尼影响较大,大都较快衰减),这是实际的无穷多自由度系统之所以能简化为有限多自由度系统的依据。至于某一具体结构究竟简化成几个自由度为合适,将视具体结构特点和解题精度的要求而定。

对天线这样的复杂结构的理论分析,最常用的方法是有限元法。有限元法就是将实际连续的结构离散为有限数量的具有一定质量和力学性质的单元体(这些单元体彼此仅在节点上相连),基于变分原理进行数学运算的分析方法。

### 2.1 有限元模型的建立

如何将一个实际结构合理地简化为有限元模型是分析成败的关键,若模型建立不正确,计算结果将与实际相距甚远。有限元建模,目前是尚没有普遍适用的规律及有效的方法。它象一门艺术,是对工程理论和判断的巧妙运用,主要依靠丰富的实践经验。

#### 2.1.1 删减细节

实际结构往往是复杂的,在建立模型时常常将构件或零件上的一些细节加以忽略而删除,例如:反射面上的小孔,骨架上小的节点板,用于安装电子设备的基座、连接件等。删除细节的指导思想是“抽取主干,去除枝叶”,尤其对于动力分析,细部结构对整体刚度影响很小,在求整体结构的固有频率时完全可以忽略,只保留对结构刚度有重要贡献的构件,这样可大大简化模型的复杂程度,其计算结果与实际测试相差不多,可为工程设计所接受。

#### 2.1.2 结构对称性的利用

利用结构的对称性,可以显著降低结构有限元模型的计算规模,但是必须正确地利用结构对称性,否则可能导致错误的结果。天线结构大都具有对称性,一些影响结构对称性的局部结构,若对问题的求解没有大的影响,可以忽略,这样天线结构就可以认为是对称的(注意:边界条件也必须是对称的)。

与静力分析不同,具有对称性结构的固有振型

有两种形式:一种是对称于对称平面的振型;一种是反对称振型。因此,在利用对称性取结构的一半进行动力分析时,必须分别计算对称与反对称形式的振型及相应的固有频率,然后将两次计算结果按其固有频率由小到大顺序统一排列就得到原结构固有频率和振型的序列。对于具有两对称面的结构,固有振型有四种形式,可取结构的1/4建模,经四次计算,然后将结果组合。

#### 2.1.3 减维

任何构件都是三维的,在建立模型时可适当减维,以简化计算。天线结构以空间桁架、板梁、箱体结构为主,一般用一维杆、梁单元,二维膜、壳单元来模拟。如:刚架用梁单元模拟,桁架用杆单元模拟(如计及次应力,也可用梁单元)。天线反射面的加强筋、结构中的连接螺栓、轴销等可用梁单元模拟。天线反射面板、箱形梁、箱体骨架、支承件等的壁板可简化为板件,若板件仅受面内载荷,处于平面应力状态,可用膜单元模拟;如板件受面外载荷或考虑受压稳定性,则可用壳单元模拟。

#### 2.1.4 有限元网格划分

在结构模态分析时,一般应选择较为均匀的网格分布,这是因为结构的固有频率和振型与结构总体的质量分布和刚度分布有关;另一方面,均匀的网格分布可使结构刚度矩阵与质量矩阵中各元素值的大小相差不大,有利于减小数值分析的误差。

大型天线结构的固有频率较低,其低阶振型表现为整体运动,高阶振型表现为局部运动。一般仅要求解最低一阶或几阶固有频率和振型,可选择较稀疏的网格和较大的单元,这样能节省计算时间。但网格过稀会影响计算精度,通常对网格再细分后得到的结果与细分前相差不大,误差在允许范围内,则认为网格疏密合适。如果对高阶固有频率和振型感兴趣,则应选择较小的单元和较密的网格。

#### 2.1.5 集中质量

固有频率和振型是天线结构的本身特性,它只跟其本身的质量分布和刚度分布有关,与外载荷无关。在单元划分之后,单元体的质量可以简单地平均向邻近堆聚即可。建立模型时被忽略的结构的质量和安装在天线上的设备质量(静力分析时,作为外载荷)作为集中质量附着到相应节点上(注意质量与重量的区别)。

## 2.2 有限元计算

有限元具有精度高,适用性强以及计算格式统一等优点,适合于计算机编程计算。随着计算机技术的发展和软、硬件环境的不断完善,现在已有很多商品化的大型通用有限元分析软件可资利用,如:NASTRAN、ADINA、ANSYS、SAP等,这些软件都具有前后处理功能,可以非常轻松直观地构造所要分析的模型。能按用户的需求生成各种各样的后期动静态效果图,如用动画的方法来显示振型,形象生动。这在相当程度上实现了科学计算可视化。网格自动生成,数据文件自动生成和计算结果整理的自动化、形象化,使人工的工作量大大减少。

## 2.3 计算结果分析

应用有限元法计算得到的结果只是近似值,它的可靠度如何是我们所关心的。而计算结果是否正确,最终只能通过实物或模型的工程实验来证明,也可以说这是唯一的检验标准。但由于条件的限制,不可能对所有结构都做实验,而且在产品设计阶段往往不具有工程实验的条件,这就需要工程技术人员本身的经验与判断力了。

首先,看程序运算是否正确。有限元分析程序都有规定的建立模型和求解的方法,我们必须按其固定模式去做,否则就会出错。比较常见的问题有:

(1) 特性值有遗漏,表明所需要的特性值在指定的迭代次数内没有达到指定的收敛精度,此时可增加迭代次数。

(2) 机器溢出,计算失败。很可能是有限元模型某部分刚度相差悬殊,计算求解时引起联立方程解造成。其原因:一是模型建立错误,如使用刚度太高的边界单元等,需修正模型;二是结构中某一部分或某一构件比周围构件刚度大很多,或某一构件在某些方向上刚度大很多。如是结构本身不合理则对结构进行调整;如结构确实需要,则对该部分进行主从处理,将其刚性化。

(3) 振型中某一点或几点振幅很大,而其余部分振幅很小。原因可能是该处质量过大、刚度过差或模型复合时节点不重合,需对模型进行检查修正。

其次,程序运算正确后,对得到的结果进行分析。一般先与类似结构进行比较,目前一些广泛应用的结构已积累一定的经验,可用来借鉴。如果没有类似的结构可以借鉴,则要分析结果是否符合常

理,尤其是振型能否合理解释,同时可广泛征求具有丰富经验的工程师的意见。

再次,可变换计算方法进行验证。如:用不同的单元、不同的网格划分重新建立模型,使用另一种有限元分析程序等。

## 3 模态试验分析法

模态试验分析法是直接利用结构的输入和输出信息来研究结构的动力特性。它一方面是用来检验理论计算结果的重要手段,另一方面可以根据识别出的模态参数,修正有限元计算模型,进行结构的优化设计。这也是近年来发展的有限元理论与模态试验分析技术耦合的综合技术。

### 3.1 模态试验分析的基本原理

一般结构系统可离散为一种具有N个自由度的线弹性系统,其运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中[M]、[C]、[K]分别为质量、阻尼、刚度矩阵。

方程(1)两端经傅氏变换可得:

$$(j\omega)^2[M]\{x(\omega)\} + j\omega[C]\{x(\omega)\} + [K]\{x(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (2)$$

式中:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt, \quad X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt$$

令:

$$\{H(\omega)\} = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])^{-1}$$

则(2)式可化简为:

$$\{X(\omega)\} = \{H(\omega)\}\{F(\omega)\} \quad (3)$$

$\{H(\omega)\}$ 为传递函数矩阵。

对系统P点进行激励并在L点测响应,可得到传递函数矩阵中第P行第L列元素为:

$$H_{lp} = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_{li}\varphi_{pi}}{-\omega^2 M_i + j\omega c_i + K_i} \quad (4)$$

式中 $\varphi_{li}\varphi_{pi}$ 为L、P点振型元素,从而对结构上一点激励,多点测量响应,即可得到传递函数矩阵的某一列,进而计算出模态参数。

### 3.2 测试方法

采用单点激励,多点测量响应的方法。首先在天线结构上合理布置测点,此时可参考有限元理论分析所得到的振型。测量时将传感器吸附在测点处,检测响应信号。其次应合理选择激振点,以确保

测试质量,避免模态遗漏。可采用预试验法,调整寻找合适的激振点。试验一般采用锤击法激振,并根据分析频率带宽的要求,选择刚度适中的锤头,力锤中带有传感器,用于检测激励信号。为了消除噪声的影响,提高信噪比,每个测点的加速度响应信号,敲击3到5次,经平均处理,得到所要的变时基传递函数。

运用专用软件对获得的激励和响应信号进行分析,得到结构传递函数矩阵的若干行(或若干列),再分别对其进行模态拟合,振型编辑,得到结构的总体模态参数。

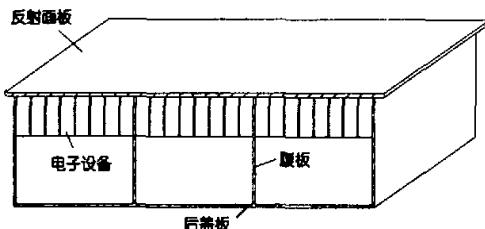


图1 某相控阵天线

#### 4 天线结构模态分析实例

图1所示是某试验相控阵天线,其骨架是由铝板焊接而成的薄壁箱形结构。天线通过周边法兰固定安装。笔者运用有限元方法对其进行了模态分析。根据天线结构的具体情况,用1723板壳单元来模拟实际结构,安装在骨架内的电子设备作为集中质量附着于相应的节点上,建立有限元模型。利用SAP91程序对其进行模态分析,得到前三阶段固有频率(见表1),图2是反射面板的第一阶计算振型。

表1

阶数	计算频率(Hz)	测试频率(Hz)
1	36.18	33.66
2	45.72	42.70
3	47.96	44.77

为了验证计算的准确性,与南京航空航天大学振动工程研究所协作对该天线进行模态试验分析。在天线反射面板上布置了77个测点,腹板上30个测点,后盖板上24个测点。试验结果见表1。图3是反射面板的第一阶试验振型。

由表1和图2、图3可以看出,计算和试验结果相差不大,相应的振型也相似。有限元计算得到的

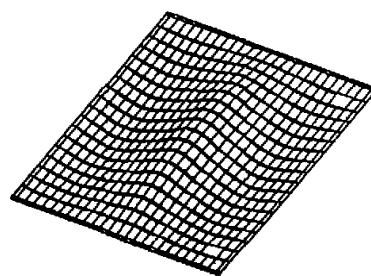


图2 反射面板的第一阶计算振型

固有频率比试验结果略高,是因为在理论分析中采用了理想化假设,实际结构中由于制造加工等原因产生的缺陷、对实际的边界条件等进行简化和忽略的影响没有计及,计算结果只能是个近似值。但对工程设计而言,这个计算结果应该是可靠的。

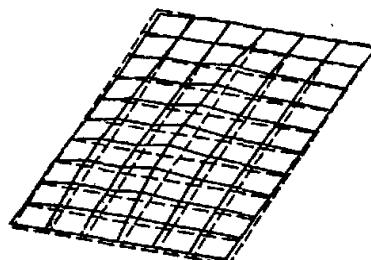


图3 反射面板的第一阶试验振型

#### 5 结束语

随着天线技术的发展,天线结构日趋轻薄,天线结构的动力分析也日渐受到人们的重视。模态分析是进一步进行动力响应分析的基础,也是进行动力优化设计的基础,同时还可以在某种程度上评估结构的加工质量或损伤程度,为对天线结构安全评估提供依据。有限元理论分析和模态试验分析的结合,为天线结构设计提供了重要方法。本文介绍了两种分析法的基本原理和应用,以及笔者在天线结构模态分析实践中的一些体会,对天线结构设计人员具有一定的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 段宝岩.天线结构分析、优化与测量.西安:电子科技大学出版社,1998
- [2] 应怀樵.现代振动与噪声技术.北京:航空工业出版社,2000

唐宝富 男,工程师,主要从事天线结构设计工作。

## 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>