

# 用有限元方法分析雷达天线的动态特性

曹继光, 周思柱 (江汉石油学院机械工程系, 湖北 荆州 434023)

陈蔚茜 (中原石油勘探局机械制造总厂, 河南 濮阳 457001)

〔摘要〕探讨了用有限元方法进行结构动态分析的过程, 给出了雷达天线结构的动力平衡方程式。以某单位雷达天线模型为例, 对其结构进行了分析, 对其固有频率进行了计算, 并对其振型进行了讨论。

〔关键词〕雷达天线; 动态特性; 固有频率; 有限元法

〔中图分类号〕 TN956

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-9752 (2002) 01-0086-02

## 1 用有限元方法进行结构动力学计算

### 1.1 动态平衡方程

用数值方法分析结构体系的特征问题, 需将系统离散化, 作为多自由度系统进行求解。与有限元方法进行静力问题分析相似, 可以将速度、加速度以单元节点的位移来表示。同时假设可以用节点位移表示单元的速度、加速度, 且其所采用的位移模式与单元位移中的相同<sup>[1,2]</sup>。

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e, \quad \{\dot{f}\} = [N]\{\dot{\delta}\}^e, \quad \{\ddot{f}\} = [N]\{\ddot{\delta}\}^e. \quad (1)$$

式中,  $\{f\}$ ,  $\{\dot{f}\}$ ,  $\{\ddot{f}\}$  分别为单元内任一位置的位移、速度、加速度;  $\{\delta\}$ ,  $\{\dot{\delta}\}$ ,  $\{\ddot{\delta}\}$  分别为单元各节点的位移、速度、加速度。

在动态结构问题中, 外力、位移都是时间  $t$  的函数。根据达朗伯原理, 考虑惯性力和阻尼力, 同样可以用静力平衡方法来分析动力学问题。在一个有限单元内, 若其质量密度为  $\rho$ , 则其分布惯性力为  $-\rho\{\ddot{f}\}$ ; 若阻尼与速度成正比, 则阻尼力为  $-\mu\{\dot{f}\}$ ,  $\mu$  为比例系数。则体积力的等效节点力为

$$F^e = \iiint [N]^T (\mu\{\dot{f}\} + \rho\{\ddot{f}\}) dV. \quad (2)$$

式中,  $F^e$  为单元上的外力。记

$$[c] = \iiint [N]^T \mu [N] dV, \quad [m] = \iiint [N]^T \rho [N] dV. \quad \text{则式(2)可写为 } F^e = [c]\{\dot{f}\}^e - [m]\{\ddot{f}\}^e. \quad \text{而体积力又等于} \\ [k]\{\dot{f}\}^e, \quad \text{于是可得到单元动力平衡方程}$$

$$[m]\{\ddot{f}\}^e + [c]\{\dot{f}\}^e + [k]\{\dot{f}\}^e = F^e. \quad (3)$$

将各单元进行组集, 得到整体动力平衡方程

$$[M]\{\ddot{f}\} + [C]\{\dot{f}\} + [K]\{\dot{f}\} = F. \quad (4)$$

式中,  $[m]$  为单元质量矩阵;  $[c]$  为单元阻尼矩阵;  $[k]$  为单元刚度矩阵;  $[M]$  为整体质量矩阵;  $[C]$  为整体阻尼矩阵;  $[K]$  为整体刚度矩阵。

### 1.2 特征值求解

雷达天线结构在固有频率下的振动认为是无阻尼自由振动。动力平衡方程式为

$$[M]\{\ddot{f}\} + [K]\{\dot{f}\} = 0, \quad (5)$$

由此可得特征方程为  $\det([K] - \omega^2[M]) = 0$ , 化为标准特征方程式为

$$([A] - \lambda[I])\{x\} = 0. \quad (6)$$

式中,  $[I]$  是单位矩阵;  $\lambda$  为特征值;  $\omega$  为固有角频率,  $\lambda = \omega^2$ 。

因此, 固有频率的求解化为了特征值的求解。求解特征值的方法很多, 有李兹法、雅可比法、H-QR 法及迭代法等。而用于有限元动力学计算中的常用方法有逆迭代法、行列式搜索法和子空间迭代法。

## 2 算例及结果讨论

某雷达天线模型如图 1 所示。塔体处于中心位置, 两侧对称分布, 侧臂用于信号接收, 同时侧臂上、下层之间也具有对称性, 塔体转动带动整体的转动。塔体由塔 1、塔 2、塔 3、塔 4 组成。塔 1 结构较复杂, 其横截面为正方形, 但上部面积小于底部面积, 其目的是为了起到良好的支承作用。其他各层塔均为简单的柱体形式, 用以连接侧臂各部分。

下面介绍用有限元法对该天线动态特征的分析过程。准备有限元梁单元网格, 绘制模型, 不作任何简化, 集中力作用点、焊接连接点等都布置节点。将天线与底座连接处 4 点作为固定的铰支座, 即在天线塔的 4 个角处的  $X, Y, Z$  方向上的平动、转动自由度都被约束<sup>[3]</sup>。

用有限元分析计算天线前 6 阶固有频率, 结果见表 1。各阶振型如图 2 所示 (图 2 (a) ~ (f) 分别为第 1 ~ 6 阶振型)。

第 1 阶振型, 即主振型, 产生共振时天线绕  $Z$  轴偏转, 其中心轴与天线工作中转动的中心轴相同。因此, 需要注意消除转动中因摩擦或其他方面原因造成转动时出现圆周方向周期性的作用力。

第 2 阶振型与第 3 阶振型较相似, 共振时都以塔 1 顶部为中心位置, 分别绕  $X, Y$  轴偏转。由此, 中心位置可以看出塔 1 具有较好的刚性, 上层塔架和侧臂由共振产生的变形明显大于塔 1。电机在  $X, Y$  方向上的水平振动将是产生这两阶共振的主要原因。

第 4 阶振型与第 5 阶振型的变形形式相同, 它们共同的偏转中心为侧臂上下层的对称轴, 不同的是第 4 阶的左右两部分在同一时刻的偏转方向相反, 而第 5 阶振型在同一时刻偏转方向相同。

第 6 阶振型情况下的变形比较不规则, 总体是绕  $X$  轴产生偏转, 中心轴与第 2 阶振型相同。随着阶数的增加, 变形情况将越来越不规则, 固有频率也不断增大, 实际工作中不易发生这种共振现象。因此取前 6 阶振型进行讨论即可。

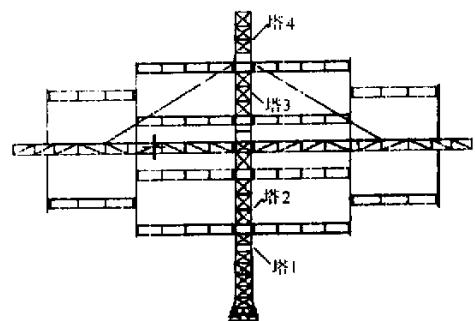


图 1 天线整体示意图

表 1 某天线前 6 阶固有频率

阶数	角频率 /rad · s <sup>-1</sup>	频率 /Hz	周期 /s
1	7.0253	1.1181	0.8944
2	15.9926	2.5453	0.3929
3	22.5037	3.5816	0.2792
4	32.8093	5.2218	0.1915
5	34.9021	5.5548	0.1800
6	46.7352	7.4381	0.1344

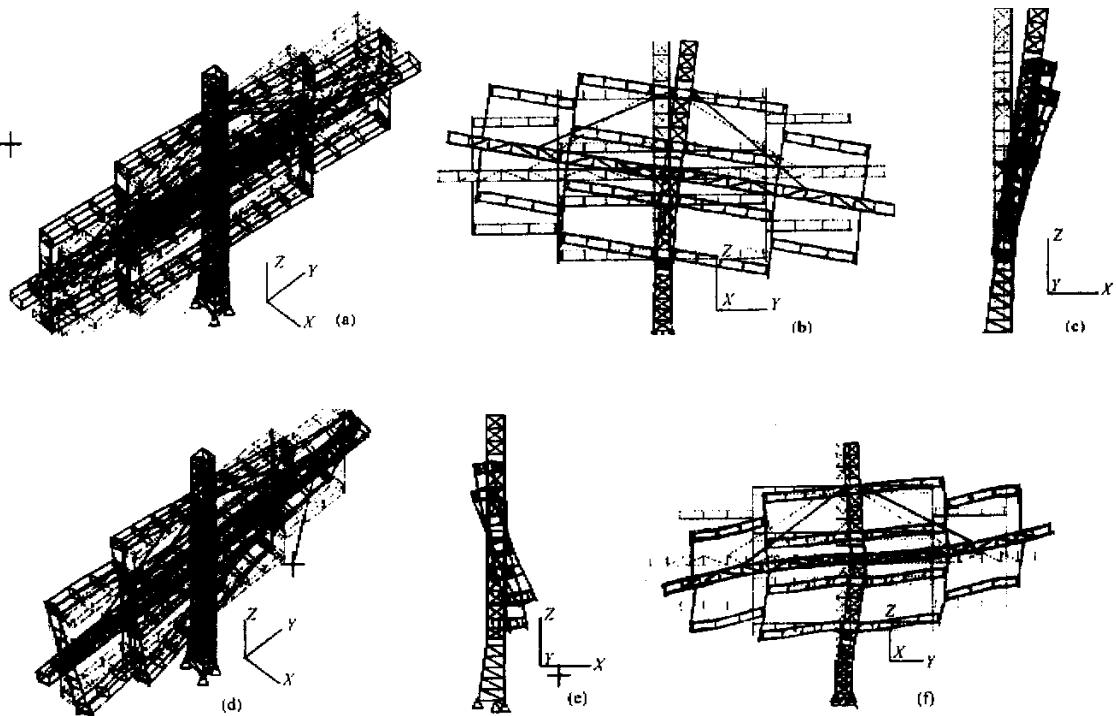


图 2 某雷达天线各阶振型

### 〔参考文献〕

- [1] 谢贻权, 何福保. 弹性和塑性力学中的有限单元法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 8.
- [2] 郭成壁, 陈全福. 有限元法及其在动力机械中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. 12.
- [3] Zhou Si-zhu. Safety analysis for a high pressure cylinder of an oilfield truck-mounted compressor [J]. Safety Engineering and Risk Analysis, 1997, (7): 17~21.

## 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>