

文章编号:1007-6492(1999)04-0062-03

## 机械结构非线性动力有限元分析

施力<sup>1</sup>, 朱明霞<sup>1</sup>, 黄祖璠<sup>2</sup>

(1. 郑州工业大学数理力学系, 河南 郑州 450002; 2. 郑州机械研究所, 河南 郑州 450052)

**摘要:**有限元结构分析通用软件已普遍应用于机械产品的分析计算, 在进行动力分析计算时, 研究对象的模型简化、网络划分以及某些参数的输入十分关键。总结了各种类型机械产品的工程实例计算中的经验, 指出使用通用软件进行频率求解、动力响应分析、稳定性分析以及接触应力分析时应注意的问题, 并给出边界元的简化方法以及参数输入的技巧。

**关键词:**有限元法; 频率; 响应分析; 稳定性分析

**中图分类号:** O 242 **文献标识码:** A

### 0 引言

运用有限元法对机械产品进行结构分析, 已取得了显著的成果, 出现了一批功能齐全的大型结构分析通用程序。使用这些通用软件进行静力分析比较容易掌握, 但在动力分析时则有一定的难度, 往往由于不了解一些输入参数的实际意义而导致较大的误差。在此探讨在各种类型机械产品的分析计算中应注意的问题。

### 1 固有频率和模态分析

在计算固有频率时网格划分不必太细, 有时要适当简化。例如齿轮轴的频率计算, 不必一个齿一个齿地划分, 只需按以节圆半径构成的圆柱体来计算即可。又如计算机车的整机固有频率<sup>[1]</sup>, 可将发动机简化为一个箱体, 如发动机内部不均匀, 可以在箱体内加实体。结构上的螺钉、焊接时的焊条的总重量有时多达数千公斤, 这些重量要分散地加在结构上。总之, 结构的总重量要完全相等地加在模型上。在满足这一前提下, 网格可以尽量地粗分, 精度不受影响。在使用某些通用软件时, 网格可实现自动划分, 也不可划分过细, 因为过细的划分使得有些部分无法用六面体或四边形单元, 而改为四面体或三角形, 反而影响精度。

### 2 动力响应分析

#### 2.1 结构的瞬态响应分析

结构随机振动有 2 个主要特征。第一个特征是不可重复性, 也就是不可预测性。由于随机振动不能用一个确定函数来描述, 因此, 无法预测在记录时刻之外的任一时刻将取得怎样的值。第二个特征是具有一定的统计规律性。相关函数给出随机振动在时差域的统计特性, 随机振动还需从频率域进行描述, 用功率谱密度函数可以描述随机振动的频率结构。在进行响应分析时, 最好选用振型叠加法。如用直接积分法求响应分析太费时, 步长的选取取决于随机函数的情况, 一般可选用最高峰周期的 1/5 或 1/10。

#### 2.2 结构的基础响应分析

考虑基础运动对结构的影响时, 有两种情况。第一种情况是考虑基础沿某方向作谐运动, 可以用数学函数来描述, 这时直接输入有关数值即可。第二种情况是通过实测记录用积分的方式近似表示(如地震谱), 这时应把实测记录进行处理, 将所得曲线的坐标值输入程序中。求解步长应是每个周期的 1/10 或 1/20。求解 50~100 周以后才可以看到稳定的位移、速度及加速度曲线。

#### 2.3 谐振动响应分析

对于旋转机械, 如电机、齿轮传动机构等, 其激振力均为谐函数; 对于电机, 激振力频率可取转速; 对于齿轮传动机构, 可取为转速与齿数的乘积。

收稿日期: 1999-04-20; 修订日期: 1999-07-11

基金项目: 机械工业部自然科学基金资助项目(93207501)

作者简介: 施力(1963-), 女, 山西省寿阳县人, 郑州工业大学讲师, 主要从事计算力学方面的研究。

谐振动由两部分组成:自由振动和受迫振动,因此响应也分为两部分.由于阻尼的存在,第一部分很快衰减,衰减的过程称为过渡过程或瞬态过程,这一过程通常是短暂的,以后系统基本上按第二部分即受迫振动规律进行振动.过渡过程之后的这段过程称为稳态过程,我们只需研究稳态过程的响应分析.那么什么时间结构进入了稳定响应呢?对于不同的结构,受到不同频率的激振力,其稳定的时间不同.一般而言,结构自振频率低,不稳定时间短,30~50周后可以稳定.计算时逐步试算,取结构上的某一节点,绘出该点在30~35周的图形,观察是否稳定,若不稳定,再增加计算周期.当受到多个激振力的作用时,不稳定的时间更长,如多轴齿轮箱结构的振动分析.

### 3 稳定性分析

SAP 5 程序由北京大学增加了稳定性分析,ADINA,ANSYS 等程序均有屈曲分析的功能.我们曾用 ADINA 软件对三峡黄柏河特大跨度拱桥进行了稳定性分析,计算结果与大桥施工后测得的数据相符,从中总结了经验.

稳定性分析要分2次求解.第一次求解载荷步只取一步,求解静力平衡方程的响应,载荷根据时间函数确定.基于这一次的计算结果,选择适当的迭代步数及最大位移量不完备节点(即首先发生失稳的节点).在此基础上进行第二次稳定分析.在第二次分析中可选择自动步长增量法进行平衡迭代,迭代方法采用改进的牛顿迭代法,这种方法的特点是外加载荷水平可由程序自动调整.在用自动步长增量法进行平衡迭代的过程中,屈曲不完备位移值的输入非常关键,这要由结构形式和第一次的计算结果中分析判断,在第二次求解时求出屈曲问题的特征值,同时计算出屈曲荷载以及相应的模态.

在以上的结构动力分析计算中,结构固有频率的计算精度很高.但在响应分析时则有一定的误差,特别是机械产品的响应分析,这是因为阻尼系数定性很困难,振幅改变阻尼也随之变化,而非线性影响因素太多,如温度变化引起的间隙变化,有些零部件的松动,滑移的不可预测等,也就是计算模型和实际情况的差别.同一机械产品冬季和夏季的测试结果相差较大,这些误差是随机的,不可修正的,如热膨胀,腐蚀,磨损等情况.尽管如此,用有限元进行动力响应分析还是有意义的.因为相对值是可信的.例如改变什么边界条件,引起

什么样的变化.这样,我们就可以选出一组工况进行计算,然后用多组计算结果来研究发展趋势,同时借助试验结果修正边界条件以接近试验数据,在此边界条件下可以对多组方案进行比较.

### 4 求非线性方程方法的选择

目前国际上优秀的有限元软件都有非线性分析的内容<sup>[2]</sup>,扩大了应用领域.不管多大的应用范围,最终都归结为非线性方程的求解,如几何非线性、材料非线性、稳态瞬态温度场分析、磁场分析、接触分析等.关于非线性方程的求解其具体实现,就是将系统的平衡方程根据系统的非线性特征不断的进行修正,求平衡方程的增量解,经过多次迭代求解,满足一定的精度而终止.常用的迭代方法有以下4种<sup>[3]</sup>.

#### 4.1 完全的牛顿迭代法

在每一个新的时间步长和迭代步中都要重新形成和分解刚度阵,花费机时多,收敛性好,适用于接触分析,如齿轮啮合等.

#### 4.2 修正的牛顿迭代法

在迭代过程中刚度阵保持不变,只修正右端项,无需重新形成和分解刚度阵,从而大大减少了计算量,但又带来了收敛速度和发散的问题.因此一般有限元软件又对此方法加入了加速收敛和对发散的采取措施.

#### 4.3 BFGS 法

实际上是上述2种方法的折衷.

#### 4.4 自动步长增量法

迭代中自动选取步长.一般用于动力分析.用于稳定性分析的第二次求解,第一次求解寻找屈曲点时,最好选用完全的牛顿迭代法.

### 5 接触问题分析

接触分析为非线性问题.迭代方法的选取很重要,可选用完全的牛顿迭代法.接触表面的主动点和被动点要选择正确.接触对之间的摩擦方式的选取也极为关键,是粘滞、滑动还是应力释放,要针对实际受力情况分析.二维接触应力分析时,计算结果大多较为理想.三维接触问题从理论上讲只是二维问题的扩展,但实际情况较复杂,难以达到理想的结果.以圆弧锥齿轮啮合中的接触分析为例,首先网格划分不可能达到光滑连续的程度,边界坐标误差较大(相对变形而言),加之多对接触点同时接触,在计算中往往不收敛,所以在进行三维锥齿轮接触分析时,可考虑简化为直齿锥

齿轮的接触问题,或对单个锥齿轮进行分析,这对于研究局部的应力集中是可行的。

如果研究高速齿轮,齿轮对接触时引起多轴振动问题,研究目标发生变化,此时的接触对可用杆单元连接即可<sup>[4]</sup>,对轴的分析成为主要研究目的,接触对之间只存在压应力,用约束方程使接触对之间的变形与规定的运动方向一致即可,对计算影响不大。

## 6 结束语

用有限元法求解动力问题需要一定的技巧。在某些领域有限元计算方法目前还不完善,如接触问题,计算出的应力有一定的误差,但应力分布规律和实际情况是一致的。进行动力求解时,网格划分不可太细,结构可适当简化,但要保证计算模

型与原结构的质量是相等的。应用结构分析通用程序对机械产品进行动力分析,只要掌握了输入参数的实际意义以及一些技巧,就可以得到准确的结果。

## 参考文献:

- [1] 龚培康.汽车拖拉机有限元法基础[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 蒋友谅.非线性有限元方法[M].北京:北京工业学院出版社,1988.
- [3] 巴特 K J,威尔逊 E L.有限元分析中的数值方法[M].林公豫,罗 恩,译.北京:科学出版社,1985.
- [4] 陈秋波,王守信.用等参数体元解算机床大件的三维接触问题[A].杜庆华.力学与工程应用[C].北京:中国林业出版社,1998.74-77.

## Finite Element Analysis of Nonlinear Dynamic Problems in Mechanical Structure

SHI Li<sup>1</sup>, ZHU Ming-xia<sup>1</sup>, HUANG Zu-ai<sup>2</sup>

(1. Department of Mathematics, Physics & Mechanics, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Finite element analysis is widely applied to mechanical product analysis and computation with the aid of software. In dynamic analysis and computation, the model simplification of the object, mesh generation and data input are key points. By summarizing the experience of computation of various projects, this paper focuses on the points on the solution of frequency, analysis of dynamic response, stability and contact stress by finite element method, together with simplified method of boundary condition and the technique of data input.

**Key words:** method of finite element; frequency; response analysis; stability analysis