

# 有限元原理与 ~~粤~~ ~~杂~~ ~~再~~ ~~杂~~ 应用指南

商跃进摇主编

清华大学出版社  
北摇京

## 内 容 简 介

本书深入浅出地介绍了工程中常用的数值模拟方法,即有限单元法的基本原理,在此基础上通过大量的实例,全面、系统地介绍了国际上流行的集结构分析、热分析、流体分析等为一体的大型通用数值模拟软件 ANSYS 的使用方法。内容包括结构静力分析、动力学分析、非线性结构分析、热分析、计算流体力学分析、耦合场分析、优化设计、可靠性分析等 ANSYS 高级分析及 ANSYS 的基本使用方法等。

本书可作为高等院校力学、机械、土木等相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习有限单元法和掌握 ANSYS 软件的教材和参考书,也可作为从事核工业、铁道、机械、交通、土木工程、航空航天等领域科学研究及产品开发的工程技术人员使用有限单元法进行设计的参考书。

版权所有 翻印必究。举报电话:010-62786544 邮购:010-62786545

图书在版编目(CIP)数据

有限元原理与 ANSYS 应用指南 杨跃进主编 北京:清华大学出版社,1998  
ISBN 7-302-02100-0

I 鄧有...摇 II 鄧商...摇 III 鄧有限元分析 原应用程序, ANSYS 摇 IV 鄧结构力学

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1998)第 10000 号

出版者:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

邮 编:100084

社总机:010-62770175

客户服务:010-62776969

责任编辑:曾摇洁

版式设计:肖摇米

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市化甲屯小学装订二厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:16 开 印张:16 摇字数:24 千字

版 次:1998 年 远月第 员版摇 1998 年 远月第 员次印刷

书 号:ISBN 7-302-02100-0 摇 C·源摇

印 数:员~ 猿千册

定 价:猿.80 元



摇摇有限元法是计算机诞生以来,在计算数学、计算力学和计算工程科学领域内诞生的最有效的计算方法。它不但可以解决结构分析问题,而且,也成功地解决了其他领域的问题。目前,许多通用的有限元计算软件将有限元分析、计算机图形学及优化设计相结合,形成了完整的计算机辅助分析系统,显著地提高了产品的设计性能,大幅度地缩短了设计周期,极大地增强了产品的市场竞争能力。

目前,在有限元理论方面的优秀教材一般讲授的起点都比较高,主要讲解有限元的理论思想,且大多数需要读者自己按照有限元原理编写程序,使读者很难在短期内掌握有限元分析方法。另外,现有的许多介绍 ANSYS 等大型通用有限元软件的书籍又都是从软件应用的角度出发,只介绍软件命令的操作规则,很少介绍工程背景知识和有限元相关的概念,这又使得有限元知识欠缺的读者,只知仿照书中提供的例题进行类似问题的分析,即只知其然,而不知其所以然,因而限制了读者对有限元分析方法的拓展使用能力的提高。为此,本书从有限元法的实际工程应用出发,按照从理论到实践的原则将两者相结合。在介绍每种类型的有限元分析时,先以一些浅显易懂的问题为例,简明扼要地讲述相关问题的理论基础。然后,再结合具体的工程应用实例,以循序渐进的方式,通过利用大型通用有限元分析软件 ANSYS 进行分析,加深对有限元原理的理解,并掌握 ANSYS 的分析过程。从而使读者能在相对较短的时间内,既知其然,又知其所以然,真正掌握有限元分析方法,并在工程实际中灵活运用。

本书共分为 12 章。第 1 章介绍了数值模拟技术的工程应用及有限单元法基本思想,并通过一个完整的例子介绍了 ANSYS 软件的特点及使用方法;第 2 章介绍了杆系结构、二维平面问题、三维空间问题及疲劳等结构静力分析的原理和步骤,并对实际结构的载荷和约束的处理方法进行了论述;第 3 章介绍了模态分析、谐响应分析、瞬态分析和谱分析等动力学分析的原理及分析步骤;第 4 章介绍了非线性问题分析步骤;第 5 章介绍稳态和瞬态热分析的原理与步骤;第 6 章介绍了流体动力学中的流动分析、热分析和换热器多组分问题分析的原理和步骤;第 7 章介绍了 ANSYS 耦合场分析的步骤;第 8 章介绍了优化设计的原理和步骤;第 9 章介绍了拓扑优化、可靠性分析和单元生死等 ANSYS 高级分析功能的应用。此外,附录中详细介绍了 ANSYS 的主要功能及一些特殊约束与载荷的处理技巧,并给出了一些 ANSYS 操作命令的训练例子。

本书编写分工如下:商跃进编写第 1 章、第 2 章和附录,并负责全书的统稿和审阅工

作,王红编写第 员章和第 圆章,丁旺才编写第 猿章和第 源章,曹茹编写第 缘章、第 远章和第 苑章。

兰州交通大学孟广浦教授仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵的意见和建议。另外,在本书编写过程中还得到了一些网友和兰州交通大学老师的关心和支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

圆 缘 年 员 月 于 兰 州



# 目录

## 有限元原理与 ANSYS 应用指南

第 1 章 绪论	1
1.1 有限元技术及其应用	1
1.1.1 有限元的概念	1
1.1.2 有限元法概述	1
1.2 有限元法基本构成	2
1.2.1 有限元法常用术语	2
1.2.2 有限元法分析过程	2
1.2.3 有限元程序分析三部曲	2
1.2.4 误差分析	2
1.3 有限元分析概述	2
1.3.1 有限元分析简介	2
1.3.2 有限元分析基本操作	2
1.3.3 典型的有限元分析过程	2
1.3.4 有限元分析实例	2
第 2 章 结构静力分析	3
2.1 结构分析	3
2.1.1 结构分析概述	3
2.1.2 有限元静力分析的求解步骤	3
2.2 杆系结构分析	3
2.2.1 杆系结构有限元分析原理	3
2.2.2 杆系结构有限元分析简例	3
2.2.3 杆系结构有限元求解实例	3
2.3 二维实体分析	3
2.3.1 二维实体模型	3
2.3.2 平面应力问题的有限元分析	3
2.3.3 二维问题求解实例	3
2.4 空间问题分析	3
2.4.1 空间问题的有限元分析原理	3

圆源圆 空间问题求解实例 .....	缘
圆源圆 疲劳分析 .....	远
圆源圆 疲劳分析概述 .....	远
圆源圆 疲劳分析的基本步骤 .....	远
圆源圆 疲劳分析实例 .....	远
圆源圆 结构有限元工程应用 .....	苑
圆源圆 工程应用基础 .....	苑
圆源圆 支撑与载荷处理 .....	苑
圆源圆 货车转向架有限元分析 .....	愿
第 猿章 动力学分析 .....	愿
猿源 动力学有限元分析原理 .....	愿
猿源圆 振动基本方程 .....	愿
猿源圆 动力学分析类型 .....	愿
猿源 模态分析 .....	愿
猿源圆 模态分析的过程 .....	愿
猿源圆 模态分析实例 .....	愿
猿源 谐响应分析 .....	愿
猿源圆 谐响应分析的过程 .....	愿
猿源圆 谐响应分析实例 .....	愿
猿源 瞬态动力学分析 .....	愿
猿源圆 瞬态动力学分析的过程 .....	愿
猿源圆 瞬态动力学分析实例 .....	愿
猿源 谱分析 .....	愿
猿源圆 谱分析的过程 .....	愿
猿源圆 谱分析实例 .....	愿
第 源章 非线性结构分析 .....	愿
源源 非线性结构分析原理 .....	愿
源源圆 非线性结构分析概述 .....	愿
源源圆 非线性问题分析过程 .....	愿
源源圆 非线性问题分析实例 .....	愿
源源 几何非线性分析 .....	愿
源源圆 几何非线性基本概念 .....	愿
源源圆 几何非线性分析实例 .....	愿
源源圆 屈曲分析 .....	愿
源源 弹塑性分析 .....	愿
源源圆 弹塑性分析基本概念 .....	愿

源源源弹塑性分析实例.....	员缘
源源源接触分析 .....	员园
源源源接触分析概述.....	员园
源源源接触分析过程.....	员园
源源源接触分析实例.....	员元
第 缘章 热分析 .....	员怨
缘缘缘有限元热分析原理 .....	员怨
缘缘缘热分析概述.....	员怨
缘缘缘热分析经典理论.....	员园
缘缘缘分子的热分析 .....	员袁
缘缘缘稳态传热分析 .....	员苑
缘缘缘稳态热分析的基本过程.....	员苑
缘缘缘稳态热分析实例.....	员怨
缘缘缘瞬态热分析 .....	员怨
缘缘缘瞬态热分析的基本过程.....	员怨
缘缘缘瞬态热分析实例.....	圆员
缘缘缘相变问题分析.....	圆员
第 远章 计算流体动力学分析 .....	圆原
远缘缘云端计算分析基础.....	圆原
远缘缘云端计算分析概述 .....	圆原
远缘缘云端计算基本原理 .....	圆缘
远缘缘云端计算层流和湍流分析.....	圆苑
远缘缘层流和湍流分析概述.....	圆苑
远缘缘层流和湍流分析实例.....	圆源
远缘缘云端计算热分析.....	圆苑
远缘缘云端计算热分析概述 .....	圆苑
远缘缘云端计算热分析实例 .....	圆苑
远缘缘云端计算多组分传输分析.....	圆园
远缘缘多组分传输分析概述.....	圆园
远缘缘两组分换热分析实例.....	圆家
第 苑章 耦合场分析.....	圆苑
苑苑缘耦合场分析概述 .....	圆苑
苑苑缘耦合场分析的定义.....	圆苑
苑苑缘耦合场分析的类型.....	圆苑
苑苑缘耦合场分析过程.....	圆愿

苑 苑 苑 间接分析法 .....	苑 苑 苑
苑 苑 苑 直接分析法 .....	苑 苑 苑
苑 苑 苑 物理环境法 .....	苑 苑 苑
苑 苑 苑 焊接残余应力分析实例 .....	苑 苑 苑
第 愿 章 粤 粤 粤 优化设计 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 优化设计引例 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 苑 优化设计概念 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 苑 粤 粤 粤 的优化过程 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 粤 粤 粤 优化设计基础 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 苑 优化设计术语 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 苑 选择优化变量 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 苑 优化设计的步骤 .....	苑 苑 苑
愿 苑 苑 苑 优化设计实例 .....	苑 苑 苑
第 怨 章 粤 粤 粤 高级分析技术 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 可靠性分析 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 苑 可靠性分析过程 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 苑 可靠性分析实例 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 拓扑优化 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 苑 拓扑优化分析过程 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 苑 二维多载荷拓扑优化设计实例 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 单元生死及其应用 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 苑 单元生死的概念 .....	苑 苑 苑
怨 苑 苑 苑 单元生死应用实例 .....	苑 苑 苑
附录 粤 粤 粤 粤 粤 粤 基本操作 .....	苑 苑 苑
粤 苑 苑 粤 粤 粤 使用概述 .....	苑 苑 苑
粤 苑 苑 前处理 .....	苑 苑 苑
粤 苑 苑 加载与求解 .....	苑 苑 苑
粤 苑 苑 后处理 .....	苑 苑 苑
粤 苑 苑 粤 粤 粤 分析训练 .....	苑 苑 苑
参考文献 .....	苑 苑 苑



# 绪论

## 计算机辅助制造技术及其应用

### 计算机辅助制造的概念

计算机辅助制造是现代工业的进步,完全得力于计算机科技的突飞猛进,将计算机硬件和软件用于产品的开发、设计、分析与制造,已成为近代工业提升竞争力的主要方法。企业要在激烈的市场竞争中立于不败之地,就必须不断进行产品创新。计算机辅助制造是实现创新的关键手段,计算机辅助制造是实现创新设计的技术保障。

- 计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)是用计算机软件直接从事图形的绘制与结构的设计。
- 计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)是用工程上分析的过程及计算方法来辅助工程师作设计后的分析或进行同步工程。
- 计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)是直接利用计算机来辅助操纵各式各样的精密工具机器以制造出不同的零部件。

传统的工业产品皆依据个人的经验设计而成。一般先以经验做出初步的设计,再由此初步的设计去做出原始模型,最后做出成品,成品完成以后,进行实验以确保产品的可靠性。这种方法基本上是试误法(Trial and Error),即初级成品经测试不能满足工程或品质上的需求时,再回去修改原设计图,重新做出试件,然后再进行测试。此方法费时且成本相当高。若使用计算机辅助制造,则在设计图完成后,可连接计算机进行各式各样的分析,并且可导入最优化模块(Optimization),在短时间内完成产品设计。

计算机辅助制造技术的发展动力是计算机辅助制造技术水平和应用水平的提高,其发展条件是计算机及图形显示设备的推出,其核心内容是计算机模拟与仿真,其理论基础是有限元法(Finite Element Method, FEM)、边界元法(Boundary Element Method, BEM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)等现代力学方法。

### 有限元法概述

#### 有限元法的概念

有限元法最初被用来研究复杂的飞机结构中的应力,它是将弹性理论、计算数学和计算机软件有机地结合在一起的一种数值分析技术。后来由于这种方法的灵活、快速和有

效性,迅速发展成为求解各领域数理方程的一种通用的近似计算方法。目前,它在许多学科领域和实际工程问题中得到广泛的应用,因此,在工科院校和工业界受到普遍的重视。

在求解工程技术领域的实际问题时,建立基本方程和边界条件还是比较容易的,但是由于其几何形状、材料特性和外部载荷的不规则性,很难求得解析解。因此,寻求近似解法就成了必由之路。经过多年的探索,近似算法有许多种,但常用的数值分析方法是差分法和有限元法。

差分法计算可给出模型基本方程的逐点近似值(差分网格上的点),但对于不规则的几何形状和不规则的特殊边界条件差分法就难以应用了。

有限元法把求解区域看作由许多小的在节点处互相连接的子域(单元)构成,其模型给出基本方程的大单元近似解。由于单元可以被分割成各种形状和大小不同的尺寸,所以它能很好地适应复杂的几何形状、复杂的材料特性和复杂的边界条件,再加上有成熟的大型软件系统支持,它已成为一种非常受欢迎的、应用极广的数值计算方法。

#### 有限元法的发展概况

有限元法分析的概念可以追溯到 19 世纪 90 年代。1873 年,克雷蒙纳第一次在他的论文中,取定义在三角形片上的连续函数,利用最小势能原理研究了薄板弯曲的扭转问题。此方法发展很慢,过了近十年才再次有人用这些离散化的概念。1895 年,柯西和普朗特在他们的经典论文中第一次给出了用三角形单元求得的平面应力问题的真正解答。他们利用弹性理论的方程求出了三角形单元的特性,并第一次介绍了今天人们熟知的确定单元特性的直接刚度法。他们的研究工作随同当时出现的数字计算机一起打开了求解复杂平面弹性问题的新局面。

“有限元法”这个名称,第一次出现在 1956 年,当时 冯·诺依曼在一篇平面弹性问题的论文中应用过它。工程师们开始认识了有限元法的功效,此后有限元法在工程界获得了广泛的应用。到 20 世纪 60 年代以后,随着计算机和软件技术的发展,有限元法也随之迅速地发展起来,发表的有关论文犹如雨后春笋,期刊、专著也不断出现,学术交流频繁,可以说进入了有限元法的鼎盛时期。该时期对有限元法进行了全面而深入的研究,涉及的内容有:

- 有限元法在数学和力学领域所依据的理论;
- 单元的划分原则、形状函数的选取及协调性;
- 有限元法所涉及的各种数值计算方法及其误差、收敛性和稳定性;
- 计算机程序设计技术;
- 向其他各领域的推广。

到目前为止,有限元法已被应用于固体力学、流体力学、热传导、电磁学、声学、生物力学等各个领域,能进行由杆、梁、板、壳、块体等各类单元构成的弹性(线性和非线性)、弹塑性或塑性问题的求解,包括静力和动力问题,能求解流体场、温度场、电磁场等场分布问题的稳态和瞬态问题,还能求解水流管路、电路、润滑、噪声以及固体、流体、温度相互作用的问题。

## 5.1 有限元软件简介

### 5.1.1 有限元软件分类

有限元分析离不开计算软件。有限元计算软件一般分为三类：大型通用软件、专用软件和自编特殊软件。

(1) 大型通用软件。其特点就是“通用性”。单元库内一般常用单元齐全,如杆单元、梁单元、膜单元、板单元、壳单元、轴对称单元、实体单元、边界元等。功能库内分析模块众多,有静力分析、固有特性分析、动态响应分析等。应用范围广泛,可涉及连续体分析、流体分析、热传导分析、电磁场分析、线性与非线性分析、弹塑性分析、复合材料分析等。通用有限元软件一般都有较方便的前、后处理功能,汇集了各种通用的标准子程序,组成了一个庞大的程序群。当然,不同的通用软件都具有各自的特点,有的软件主要用于静态分析和固有特性分析,有的软件以动态分析见长,而有的软件则非线性功能很强,也有的软件以方便的前、后处理而著称。大型通用软件的数据文件一般可相互转换。对于使用者而言,在选定并熟练掌握某一软件后,除非功能短缺或其他不能容忍的弱点,一般是不愿换用别的通用软件的,当然这中间也有大型通用软件价格昂贵的原因。

(2) 专用软件。它是为解决某一类学科问题,如接触问题、优化问题、弹塑性问题等,或是解决某一类产品基础件的计算分析问题,如起重机的臂架结构分析系统等而发展起来的。其规模一般比较小,解决问题比较专一,适合在小型及微型计算机上运行,在工厂企业结合产品解决实际问题中最为有效。

(3) 自编特殊软件。此类软件主要应用在科研和教学上。如在工程起重机臂架系统变幅运动动态分析中,根据结构运动特点,需要采用“运动弹性动力非线性分析”的方法,这种理论是近几年发展起来的,在工程实际分析中的应用以前未见报道。自然,在各通用软件、专用软件中不可能包含此方法,只能自编软件研究分析。当这类软件研制成功并经实际应用验证成功后,一般就发展成为专用软件。在有限元教学中,为了说明有限元原理,或者为了说明某一结构件的分析方法,常常自编一些小程序。这类程序不用特别技巧,只要说明问题即可,规模不大。

有限单元法发展至今,各种通用软件、专用软件求解功能齐全,前、后处理方便,绝大部分机械和汽车结构的有限元静态分析、固有特性分析、动态分析等,都可应用这些通用软件、专用软件来分析计算。特别是对于初学者,主要是应用有限单元法求解工程实际问题,没有必要再费时费力去自编程序。

### 5.1.2 有限元软件选用原则

在选用有限元软件时,应该考虑以下几方面的因素:

(1) 软件的功能。这是首要的问题,应透彻了解软件是否具备所需要的功能。

(2) 单元库。有限元软件一般都具有常用单元,主要是看一些辅助单元,如边界元、缆索元、间隙元等是否具备。

(3) 前、后处理功能。这是很重要的,关系到是否易于操作,一定程度上也是计算成功与否的重要决定因素。

(4) 软件所要求的环境及计算机配置。这也是软件正常运行所必需的,当然,软件

的价格也要加以考虑和比较。

选定软件后,在正式应用于求解实际问题前,必须要充分熟悉软件。首先要对软件使用说明和计算例题进行分析研究,这是十分重要的。若有条件阅读所使用软件的使用手册,将对正确使用该软件有很大帮助。

对初次使用有限元软件及初学者,还要做到以下几点:

(员) 首先应通过软件使用说明中的例题和为计算自行配备的验证题,来检验软件以及对软件理解的正确性。为了检查软件意料之外的变化,可以随机算一组或几组验证题。

(圆) 输入时的数据应该由软件与计算结果一起输出,以作校对之用,并和计算结果一起保存在文件中,以备以后再对某项提出疑义时查阅。

(猿) 利用有限单元法计算一个有精确解答的验证题或实际问题时,其计算结果与精确解答或真实解答比较,一般总会存在一定的误差。应对此进行分析,明确是由错误引起的还是方法本身的离散误差或计算误差,这对软件使用者是很有帮助的。

(源) 当使用通用软件计算工程实际问题时,必须按软件用户手册的使用要求认真地准备数据、信息及操作。如果因不注意而在这方面出现错误,又不仔细检查,有可能将错误的结果认为是计算误差而忽略。除了对输入数据要认真检查外,对输出的计算结果,也必须进行仔细检查。通常的检查方法是把计算结果与简化的解析模型、试验、对类似问题已有的经验和工程判断或常识性的概念所得的结果加以比较。一般,对于一个题目的计算结果用另一独立无关的、最好是以不同分析方法为基础的计算结果证实后,才算有效的。

有限元软件发展很快,我国已引进的主要软件有:粤杂再,杂孕,粤杂再,酝杂再,晕杂再,粤杂再,酝杂再,晕杂再等(参见表 员圆),许多软件具备了前、后处理功能,这不仅提高了解题速度,还极大地方便了使用者,对有限元法的普及与应用起了很大的促进作用。

表 员圆 常用的有限元软件及其功能

软件名称 软件功能	粤杂再	粤杂再	杂孕	酝杂再	晕杂再	粤杂再
非线性结构分析	√	√	√	√	√	√
塑性分析	√	√	√	√	√	√
断裂力学分析	√	√	√	√		√
热应力和蠕变	√	√	√	√		√
管道系统	√			√		
焊接接头				√		
粘弹性材料分析	√	√	√	√		√
结构优化分析	√					
热分析	√	√	√	√	√	√
复合材料分析	√	√		√		√
流体动力学分析	√	√		√		

## 1.1 有限元法基本构成

### 1.1.1 有限元法常用术语

有限元法的基本思路是“化整为零,积零为整”。它的求解步骤是:将连续的结构离散成有限多个单元,并在每个单元中设定有限多个节点,将连续体看作是只在节点处相连接的一组单元的集合体,然后选定场函数的节点值作为基本未知量,并在每一单元中假设一个近似的插值函数以表示单元中场函数的分布规律,进而利用力学中的变分原理建立以求解节点未知量的有限元法方程,从而将一个连续域中的无限自由度问题化为离散域中的有限自由度问题。求解结束后,利用解得的节点值和设定的插值函数确定单元上以至整个集合体上的场函数。

单元可以设计成不同的几何形状以模拟和逼近复杂的求解域。显然,如果插值函数满足一定要求,随着单元数目的增加,解的精度会不断提高而最终收敛于问题的精确解。从理论上说,无限制地增加单元的数目可以使数值分析解最终收敛于问题的精确解,但是这却增加了计算机计算所耗费的时间。在实际工程应用中,只要所得的数据能够满足工程需要就足够了。有限元分析方法的基本策略就是在分析的精度和分析的时间上找到一个最佳平衡点。

(1) 单元。结构的网格划分中的每一个小的块体称为一个单元。常见的单元类型有线段单元、三角形单元、四边形单元、四面体单元和六面体单元几种。由于单元是组成有限元模型的基础,因此,单元的类型对于有限元分析是至关重要的。

(2) 节点。确定单元形状的点就叫节点。例如线段单元只有两个节点,三角形单元有三个或者四个节点,四边形单元最少有四个节点等。

(3) 载荷。工程结构所受到的外在施加的力称为载荷,包括集中载荷和分布载荷等。在不同的学科中,载荷的含义也不尽相同。在电磁场分析中,载荷是指结构所受的电场和磁场作用;在温度场分析中,所受的载荷则是指温度本身。

(4) 边界条件。边界条件是指结构边界上所受到的外加约束。在有限元分析中,边界条件的确定是非常重要的因素。错误的边界条件使程序无法正常运行,施加正确的边界条件是获得正确的分析结果和较高的分析精度的重要条件。

### 1.1.2 有限元法分析过程

应用有限元法分析的一般过程流程图如图 1-1 所示,图中指出了分析过程的主要步骤及其相互关系。

有限元分析中各主要步骤的主要工作如下。

(1) 研究分析结构特点。研究分析所求解对象的结构特点,包括形状、边界条件、工况载荷特点;初步建立物理力学模型,包括形状的简化、构件间连接的简化、支承的简化、材料的简化、截面特性的简化、载荷的分析等。这一步工作的好坏对整个计算影响很大。

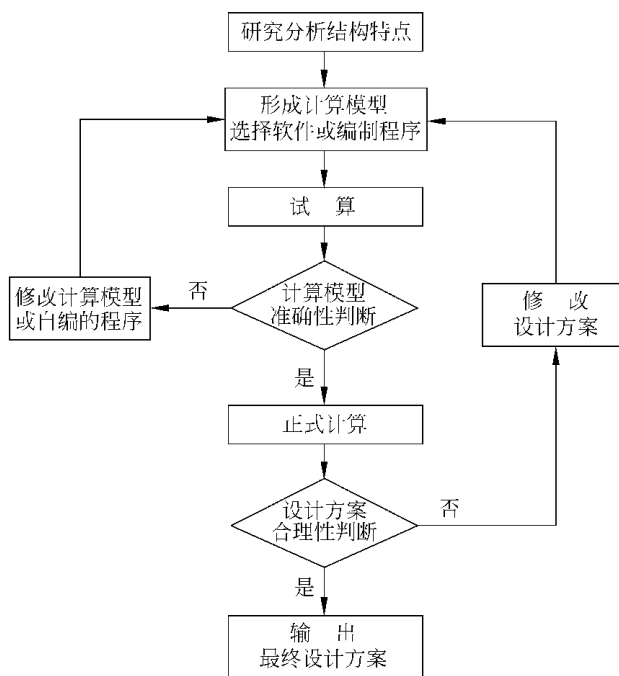


图 1-10 有限单元法分析的一般过程流程图

(圆) 形成有限元计算模型。根据结构特点,确定单元类型,选取节点,形成网格图,同时选定支承及边界条件以及决定载荷的处理,最终形成计算数据文件。这一步既对选择怎样的软件有影响,又受所选软件的限制和制约,因为选定所用的软件后,单元类型、单元数据、节点数据、边界与载荷的处理,以及最终的数据文件都要按软件规定处理。

(猿) 选择有限元软件或编制计算程序。根据结构的计算模型,选择或编制有限元计算软件。选定所用软件后,又要根据软件的要求修改计算模型。

(源) 上机试算。为了检验计算模型的正确性,同时熟悉所选定的软件,或者考核新编制的程序,一般要进行试算。试算时可在所形成的计算模型上加单位载荷,确认计算结果正确无误后,方可进入下一步。

(缘) 计算模型准确性判别。试算顺利结束后,一定要根据试算结果判别计算模型是否准确,这是关系到有限元分析是否准确无误的关键。最常用的方法是将计算结果与通过试验测量的结果进行比较,如果两者之间的误差在工程允许范围内,则认为这个计算模型是准确的。判别的其他方法还有,根据理论计算结果(如果存在的话)及常识进行判别,或对同一问题用其他软件计算的结果进行分析比较。

(远) 修改计算模型或修改程序。当试算结果误差过大时,应重新修改计算模型,有时甚至要更新计算模型。修改计算模型可从单元的类型、节点与单元的划分和边界条件等着手。对自编程序,可以检查、分析程序的每一步骤,特别要注意数据的传递等,确保程序各方面无任何错误。如果使用的是通用软件,则可通过验证题、使用手册等途径进一步熟悉程序,理解输入、输出数据的确切含义。

(9) 正式计算以及计算结果整理。若结构的计算模型判别为是准确的,则可施加各工况载荷进行正式计算。计算完成后,要对计算结果进行整理,以得到结构的应力图、变形图或振型图等。

(10) 结构设计方案的判别。根据整理得到的计算结果,如应力图、变形图等,来判断设计方案是否合理。若得出结构的薄弱区域或者强度富裕区域等设计不合理之处,可对结构进行修改,并修改相应计算模型,重新计算。若设计方案合理,则输出最终较佳的设计方案。

## 有限元程序分析三部曲

从使用有限元程序的角度讲,有限单元法分析又可分成三大步,如图 1-1 所示。

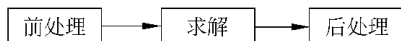


图 1-1 有限元程序分析的三个步骤

前处理实际上是对计算对象划分网格、形成计算模型的过程,包括单元类型的选择、节点和单元网络的确定、约束载荷的移置等。求解则是在形成总刚度方程并进行约束处理后求解大型联立线性方程组、最终得到节点位移的过程,解方程组的方法有很多种,通用软件根据自身特点选用一两种方法。后处理则是对计算结果的处理和数据的输出,包括各种应力、位移或振型的整理,形成等应力线、变形图、振型图等。

### 1.1 前处理

根据计算目的,前处理时将连续的实际结构简化为理想的数学模型,用离散化的网格代替,并最终形成计算数据文件。对每一个所分析的结构件都必须给出下列信息:节点空间位置(坐标值),单元信息(包括单元类型、组成节点号、截面特征),结构的材料特征参数,边界条件或约束信息,各类载荷。

在构成离散模型时,为了使模型较合理,还须遵循以下原则:

- 在不影响计算精度的前提下,尽量简化计算模型以减少计算时间和存储容量;
- 选择合理的单元类型;
- 在所关心的区域加密计算网格;
- 在编排节点时,尽量减少相关单元的节点号之差,减小带宽,以减少数据存储量。

### 1.2 求解

求解时将前处理得到的有关信息输入计算,运行有限元程序,进行分析计算。

### 1.3 后处理

有限元分析是一种大规模的科学计算,计算势必产生大量的数字信息。只有在对这些计算输出信息进行仔细分析、理解之后,才有可能掌握计算中出现的情况和问题,才有可能获得对被分析对象的认识和见解。

有限元分析输出的计算结果,包括以下三个基本类型:

- 节点类数据。直接给出模型节点处的结果(应力、位移、内力、温度值等)。
- 单元类数据。给出单元节点处或内部指定处的结果(各种应力分量、应力组合、等

位线等)。

- 整体类数据。通过对某些单元结果求和得到整个总体模型参数,通常用以检查模型的有效性或特定分析的精度等。

随着计算机技术的飞速发展,有限元的计算能力和图形处理能力都得到了很大提高,不但在工作站上,而且在微型计算机上都能够实现以下功能,使人们可以立即对计算结果用图像方式进行研究、分析,以获得正确结论。

- 具有二维乃至三维显示功能;
- 具有对图形进行交互缩放的功能,因为计算域往往很大,人们有时只关心局部区域;
- 可以动态地显示结果随时间的变化情况;
- 可视结果包含浓淡过渡的彩色色谱,准确显示足够多的细节,如位移分量、位移总量、应力分量、应力的组合、塑性区、等位线等,使人们能直观、清晰地定性或定量地获取部分区域或某些点上的某些物理量的值;
- 能实现实时交互地随视点位置变更而显示图形,这是增强结果显示三维效应的最好办法;
- 能交互地修改颜色对照表,并实时地改变图形颜色。

除此之外,后处理中一般还包含在当前流行的各种绘图仪和打印机上实现图形硬拷贝输出的驱动软件,以及与多种图形系统(如 AutoCAD、Pro/E、SolidWorks 等)、国际图形交换系统和数据库系统等字处理和桌面办公系统进行数据文件直接交换的接口,成为一种开放式系统。

今后随着上述功能的进一步增强,有限元分析模块将自然嵌入、衔接在图形系统中,从而为工程技术人员实现真正的、完全的计算机辅助设计提供更理想的前景。

## 有限元误差分析

如前所述,结构有限元分析得到的是一种近似数值解,它与精确解或真实解之间必然存在误差。分析理解误差产生的原因及其影响,对于深入理解、自如应用有限单元法有很大的帮助。有限元分析误差,一般分为两类:计算误差和离散误差。

(一) 计算误差。计算误差是指计算机在数值运算时产生的误差。引起的原因主要有两个:一是在某一计算阶段涉及大量的数值运算,如在解线性代数方程组的过程中,利用矩阵分块法的平方根,分解总刚度矩阵为三角阵的转置阵与读三角阵乘积时,要进行多次的乘法运算、幂运算。这些势必引起累积误差,从而导致产生计算误差。引起计算误差的另一重要原因是所谓“病态方程”问题。

(二) 离散误差。离散误差是由于连续体被离散化模型所代替并进行近似计算所带来的。引起离散误差的主要原因是,在一般情况下仅用具有有限个自由度的离散模型所假设的单元位移函数不可能精确表达连续体真实的位移场。此外,单元网格不可能精确地和结构的几何形状拟合,载荷的处理和边界条件的假设也不可能与实际情况完全符合等,这些都直接影响有限元法的离散误差。连续体有无限多个自由度,而有限元离散模型只有有限个自由度。如果增加离散模型的自由度数,使单元尺寸趋于零,则离散误差也会趋

于零,有限元的近似解将收敛到精确解。

通过上面初步介绍的计算误差和离散误差概念可知,在有限元分析中这两种误差总是存在的。有限元计算要进行大量的数值运算,计算误差就不可避免;同时网格划分时不可能都取成正三角形和正方形单元,离散误差也总是存在。有限元计算误差主要由离散误差引起。这主要是由于在离散化形成有限元计算模型时,采用了较多的假设,涉及的因素(单元种类、位移模式假设、载荷移置、边界条件引入等)多。其中任何一项的假设和近似所带来的误差都要比计算累计误差大得多。

为减小误差,可以采取如下措施:

- 在同一有限元计算模型中,尽量避免出现刚度过分悬殊的单元,包括刚度很大的边界元、相邻单元大小相差很大等(在有的有限元通用程序中,当两个刚度系数的比值超过一个很大值,如 1000 时,会提出警告,提示检查网格,重新计算)。

- 采用较密的网格分割,且注意采用较好的单元形态(即尽量采用接近等边三角形或正方形单元)。

需要指出的是:采用较密的网格分割能减少结果的离散误差,但单元多了,计算次数就会增加,相应计算误差也要增加;另一方面,如果取了不好的单元网格,计算误差更会增大(出现“病态方程”缘故)。通常,有限元分析的总误差主要由离散误差造成,所以加密网格分割,同时注意单元形态,将使有限元分析的总误差下降。

## 1.1 有限元分析概述

ANSYS 软件是一个功能强大而灵活的大型通用有限元分析软件。它融结构、热、流体、电磁、声学于一体,广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械工程、土木工程、汽车交通、能源、电子、国防、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究。该软件提供了一个不断改进的功能清单,具体包括:结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体动力分析、优化设计、接触分析、自适应网格划分、大应变有限转动功能以及利用 ANSYS 参数设计语言(APDL)的扩展宏命令功能。基于 ANSYS 的菜单系统使用户能够通过对话框、下拉式菜单和子菜单进行数据输入和功能选择。进行产品设计时,使用 ANSYS 软件对产品性能进行仿真分析,可以发现产品问题,降低设计成本,缩短设计周期,提高设计的成功率。

ANSYS 软件是现代产品设计中高级的 CAE 软件之一,它能与大多数 CAE 软件实现数据共享与交换,如 CATIA,Pro/ENGINEER,UG,AutoCAD 和 SolidWorks 等。由 CAE 软件生成的模型能与 ANSYS 软件共享数据接口的文件格式有 STL,IGES,STEP,Parasolid,IGES,IGES,IGES 和 IGES。

## 1.2 ANSYS 简介

### 1.2.1 ANSYS 发展过程

1971 年,John R. 博士洞察了计算机辅助工程商品化的发展,于是创建了 ANSYS 公司,总部设于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡,目前它是世界 CAE 行业最大的公