



普通高等学校“十四五”规划机械类专业精品教材

有限元基本理论及应用

YOUXIANYUAN JIBEN LILUN JI YINGYONG

(第二版)

主 编 龚曙光 边炳传



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

本书以工程应用为背景,系统地介绍了有限元法所涉及的基础理论知识,以及 ANSYS 软件的基本操作与分析步骤。

全书共分为 9 章,主要介绍了弹性力学理论基础、杆梁结构的有限元分析、平面问题的有限元分析、三维问题的有限元分析、接触问题的有限元分析、温度场的有限元分析、机械动力学的有限元分析、电磁场问题的有限元分析,以及利用 ANSYS 软件开展有限元分析的基本步骤及建模过程。结合 ANSYS 软件每章均给出了分析实例,详细列出了实例的分析过程和求解步骤,还给出了每个实例的 APDL 命令流源代码和注释,同时在第 2~8 章后给出了习题,供读者在学习时练习,以巩固所学的内容。

本书可作为理工科相关专业的本科生、研究生学习有限元基本理论及使用 ANSYS 软件的教材,也可作为工程技术人员从事工程应用、科学研究的主要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

有限元基本理论及应用/龚曙光,边炳传主编.—2 版.—武汉:华中科技大学出版社,2022.5
ISBN 978-7-5680-8068-2

I. ①有… II. ①龚… ②边… III. ①有限元分析 IV. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 049696 号

有限元基本理论及应用(第二版)

龚曙光 边炳传 主编

Youxianyuan Jiben Lilun ji Yingyong(Di-er Ban)

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘 飞

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉市洪林印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.25

字 数:479 千字

版 次:2022 年 5 月第 2 版第 1 次印刷

定 价:54.80 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

再版前言

本书第一版自 2013 年出版以来,获得了不少读者的青睐,但随着社会经济和科学技术的发展,工程企业对产品的创新性提出了更高的要求,使得高校的理工科学生、企业工程技术人员需要更好地掌握有限元方法这门数值仿真技术;同时随着 ANSYS 软件的升级,第一版教材中算例的分析过程与操作步骤也有部分内容发生了变化。为了使读者能够系统地学习有限元方法的基本理论,并将理论分析与现有相关版本的软件平台进行有机结合,特对第一版教材进行了如下修订。

(1) 主要对第 3 章杆梁结构的有限元分析、第 4 章平面问题的有限元分析的内容进行了梳理,对其理论体系进行了重新编排;将第 5 章中的屈曲分析单独构成了一节。其他章节也进行了部分内容的调整和编排,使内容前后之间的衔接更加连贯,读者学习起来更加顺畅。

(2) 在各章节中对理论体系阐述后,增添了相应的理论计算与工程应用的算例,部分算例的结果与 ANSYS 软件的分析结果进行了对比,实现了理论分析与软件分析的有机结合。同时,每个仿真分析算例均给出了 APDL 命令流源代码及其注释,可通过微信扫描算例二维码获取,对学习并利用 APDL 命令流开展仿真分析的读者有很好的帮助。

(3) 除第 1 章和第 9 章外,其他各章均增添了习题,习题中既有理论分析,也有工程应用案例。读者通过完成章节后的习题,一方面能够加深对有限元法基础理论的理解,另一方面能够熟悉 ANSYS 软件的操作界面,以及利用 ANSYS 软件完成相关领域数值仿真的过程与步骤,为熟练掌握有限元的分析过程和步骤打下良好的基础。

(4) 所有仿真分析算例均在 ANSYS21 版上调试通过,以满足读者对该软件升级后的使用。

本书第 1、2、5、8 章由龚曙光执笔,第 3 章由翁剑成执笔,第 4 章由王明旭执笔,第 6 章由张国智执笔,第 7 章由许振保执笔,第 9 章由边炳传执笔。本次修订工作主要由龚曙光执笔完成。

由于修订时间仓促,书中难免存在缺点和不足,殷切希望广大读者批评指正,也欢迎业内人士共同探讨。

编者

2021 年 10 月于湘潭大学

E-mail:gongsg@xtu.edu.cn

二维码资源使用说明

本书配套数字资源以二维码的形式在书中呈现,读者用智能手机在微信端扫码成功后提示微信登录,授权后进入注册页面,填写注册信息。按照提示输入手机号后点击获取手机验证码,在提示位置输入验证码,按要求设置密码,点击“立即注册”,注册成功(若已经注册,则在“注册”页面底部选择“已有账号?绑定账号”,进入“账号绑定”页面,直接输入手机号和密码,提示登录成功)。接着提示输入学习码,需刮开教材封底学习码的防伪涂层,输入13位学习码(正版图书拥有的一次性使用学习码),输入正确后提示绑定成功,即可查看二维码数字资源。手机第一次登录查看资源成功,以后便可直接在微信端扫码登录,重复查看本书所有的数字资源。

友好提示:如果读者忘记登录密码,请在PC端输入以下链接<http://jixie.hustp.com/index.php?m=Login>,先输入已注册的手机号,再单击“忘记密码”,通过短信验证码重新设置密码即可。

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 有限元法概况	(1)
1.2 有限元法的应用	(2)
1.3 ANSYS 软件操作简介	(4)
第 2 章 弹性力学理论基础	(17)
2.1 基本假设和基本概念.....	(17)
2.2 弹性力学的基本方程.....	(19)
2.3 轴对称问题的基本方程.....	(33)
2.4 有限元法的理论基础.....	(36)
2.5 习题.....	(43)
第 3 章 杆梁结构的有限元分析	(45)
3.1 杆梁结构的直接刚度法.....	(45)
3.2 杆件系统的有限元分析.....	(52)
3.3 梁的有限元分析.....	(68)
3.4 习题.....	(80)
第 4 章 平面问题的有限元分析	(82)
4.1 有限元分析的基本步骤.....	(82)
4.2 三角形常应变单元.....	(84)
4.3 等参数单元与数值积分.....	(98)
4.4 平面问题的高阶单元	(105)
4.5 典型算例及分析	(110)
4.6 习题	(120)
第 5 章 三维问题的有限元分析	(122)
5.1 轴对称问题的有限元法	(122)
5.2 空间问题的有限元法	(134)
5.3 屈曲分析	(148)
5.4 有限元分析中几个问题的讨论	(158)
5.5 习题	(163)
第 6 章 接触问题的有限元分析	(166)
6.1 接触边界的有限元算法	(166)
6.2 ANSYS 软件中的接触算法	(169)
6.3 接触对生成与参数设置	(175)
6.4 赫兹接触理论	(190)
6.5 接触分析实例	(191)
6.6 习题	(203)

第 7 章 温度场的有限元分析	(204)
7.1 稳态温度场分析	(204)
7.2 瞬态温度场分析	(216)
7.3 热应力的有限元分析	(226)
7.4 习题	(235)
第 8 章 机械动力学的有限元分析	(236)
8.1 动力学方程	(236)
8.2 结构动力响应的有限元分析	(243)
8.3 ANSYS 软件的动力学分析	(247)
8.4 典型算例及详解	(255)
8.5 习题	(265)
第 9 章 电磁场问题的有限元分析	(266)
9.1 电磁场基本理论	(266)
9.2 二维静态磁场分析	(271)
9.3 二维谐性磁场分析	(275)
9.4 电场分析	(281)
参考文献	(286)

第 1 章 概 述

1.1 有限元法概况

1.1.1 引言

对于大多数的工程技术问题,由于物体的几何形状和载荷作用方式是很复杂的,除了方程性质比较简单、几何边界相当规则的少数问题可用解析法求解外,其求解过程是非常困难的,有些甚至是不可能的,唯一的途径是应用数值法,以求得问题的近似解。有限元法(finite element method, FEM)是工程技术中对连续物理系统进行分析、设计、试验的一种高效能、常用的数值计算方法,它特别适合于求解几何、物理条件比较复杂的问题。

有限元法起源可以追溯到 20 世纪 40 年代——Courant(柯朗,1943)将最小势能原理与现代有限元中的三角形单元结合起来求解了 St. Venant 弹性扭转问题,但当时没有得到足够的重视。1956 年,由 Clough 等人首次将有限元法用于飞机机翼的结构分析,并于 1960 年发表了一篇论文《平面应力分析中的有限单元》,从此有限元法第一次被正式提出。此后,有限元法的理论得到了迅速发展,并应用于各种力学问题和非线性问题,成为分析大型、复杂工程问题的强有力手段。我国的力学工作者也为有限元方法的初期发展做出了许多贡献,其中比较著名的有:陈伯屏(结构矩阵方法),钱令希(余能原理),钱伟长(广义变分原理),胡海昌(广义变分原理),冯康(有限单元法理论)。

同时随着计算机技术的发展,有限元法中的大量计算工作就由计算机来完成,从而也就促进了各种商业有限元分析(finite element analysis, FEA)软件的产生。如:1966 年,由美国国家航空航天局(NASA)提出了世界上第一套泛用型的有限元分析软件 Nastran;1969 年,由加州大学 Berkeley 分校的 Wilson 教授开发出线性有限元分析程序即 SAP;1969 年,John Swanson 博士开发了 ANSYS 软件。进入 20 世纪 70 年代后,随着有限元理论的成熟,CAE(computer aided engineering, 计算机辅助工程)技术进入了蓬勃发展的时期,并出现了大型商用 CAE 软件,如:20 世纪 70 年代初由 Marcal 等推出的商业非线性有限元程序 MARC;由 Hibbitt、Bengt Karlsson 与 Paul Sorenson 于 1978 年共同推出的 ABAQUS 软件。

在国产有限元软件方面,1964 年初,崔俊芝院士研制出国内第一个平面问题通用有限元程序,解决了刘家峡大坝的复杂应力分析问题;70 年代中期,在著名计算力学专家冯钟越的带领下,成功开发了航空结构线性分析有限元程序系统 HAJIF-I;1981 年,大连理工大学研制出了 JEFIX 有限元软件,实现了有限元分析与优化设计的集成,并成功应用于重庆长江大桥的分析和设计中;1983 年中科院梁国平开始研究有限元程序自动生成系统 FEPG,即目前的 pFEPG 软件,它在耦合方面具有特有的优势,能够实现多物理场任意耦合,且在有限元并行计算方面处于领先地位;80 年代中期,北京大学的袁明武教授研制出了 SAP-84,并应用到长江三峡大坝的初步设计、黄河小浪底枢纽工程抗震分析等重大工程中。进入 21 世纪后,CAE 技术得到了长足的发展,据不完全统计,全球有超过 200 种仿真分析软件被企业所使用。

1.1.2 有限元法的分类

(1) 从选择基本未知量出发,有限元法可分为三类,具体如下。

①位移法——选取节点的位移作为基本未知量,它的理论基础是最小势能原理。

②应力法——选取节点的应力作为基本未知量,它的理论基础是最小余能原理。

③混合法——一部分选取节点位移而另一部分则选取节点的应力作为基本未知量,其理论基础为混合变分原理,如 Hellinger-Reissner 变分原理的混合板单元。

在结构静力分析中,对大多数问题,位移法要比应力法简单得多,从而得到了最广泛的应用和发展。本书中只讨论有限元位移法。

(2) 按求解问题,有限元法可分为线弹性有限元法和非线性有限元法,其中线弹性有限元法是非线性有限元法的基础。

线弹性有限元法主要包括弹性静力学分析和动力学分析。它是理想弹性体为研究对象,建立在小变形假设的基础上,须满足:材料的本构关系为线性,应变与位移的一阶导数呈线性,微元体的平衡方程为线性,边界条件为线性。

非线性有限元法主要涉及:材料非线性问题、几何非线性问题和状态非线性问题。其中,材料的非线性即其本构关系呈现非线性,主要有非线性弹性、弹塑性、黏弹性及蠕变等;几何非线性有小变形非线性(如薄板的大挠度问题等)和有限变形(或大应变)几何非线性(如橡胶制件等);状态非线性即两个结构物的接触边界随加载和变形而改变引起的接触非线性,也包括非线性弹性地基的非线性边界条件和可动边界问题等,如齿轮啮合、冲压成型等,接触边界属于高度非线性边界。实际的非线性问题也可能是上述两种或三种非线性的综合,其求解需采用迭代求解,且比线弹性问题更加复杂、费用更高和更具有不可预知性。

1.2 有限元法的应用

有限元法首先是为了解决固体力学问题而出现的,最初主要用于航空航天领域的强度、刚度计算。随着有限元法理论的日趋成熟和计算机应用技术的发展,有限元法的应用已由固体力学领域推广到温度场、流体场、电磁场和声学等其他连续介质领域。总之有限元分析经历了从线性到非线性、多物理耦合的发展过程,现已应用于机械、土建、水工、桥梁、电机、冶金、造船、飞机、导弹、宇航、核能、地震、物探、气象、渗流、水声、力学、物理学等,几乎所有的科学研究和工程技术领域。

有限元法在结构分析中的应用如图 1-1 所示。

有限元法在场分析中的应用如图 1-2 所示。

有限元法不仅具有开展结构、流体、热、电磁场的单场分析功能,而且随着多学科交叉研究的需要,能够开展多物理场的耦合分析,如:热/结构耦合分析、流体/结构耦合分析、静电/结构耦合分析、静磁/结构耦合分析、声学/结构耦合分析、热/电耦合分析、热/高-低频电磁耦合分析、流体/热耦合分析、流体/电磁耦合分析、压电分析、机电耦合电路模拟。

同时有限元法还能够与优化技术相结合,开展尺寸优化(见图 1-3)、形状优化和拓扑优化(见图 1-4)。

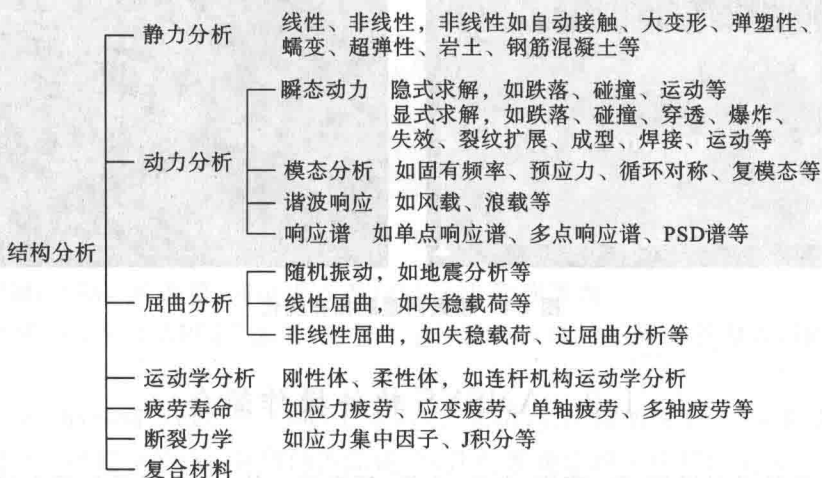


图 1-1 有限元在结构分析中的应用

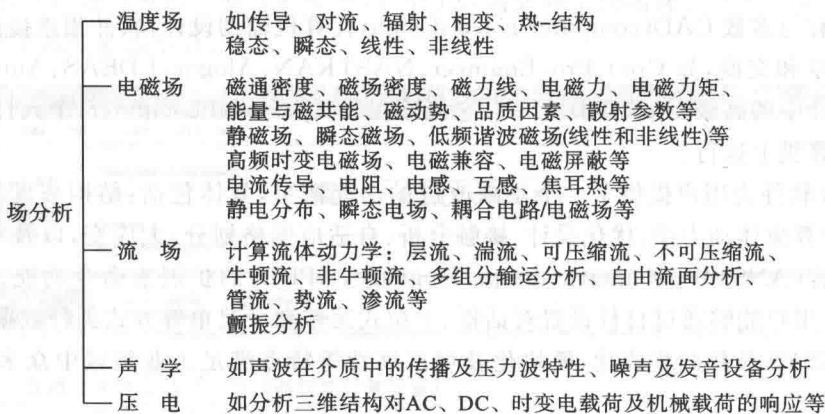


图 1-2 有限元在场分析中的应用

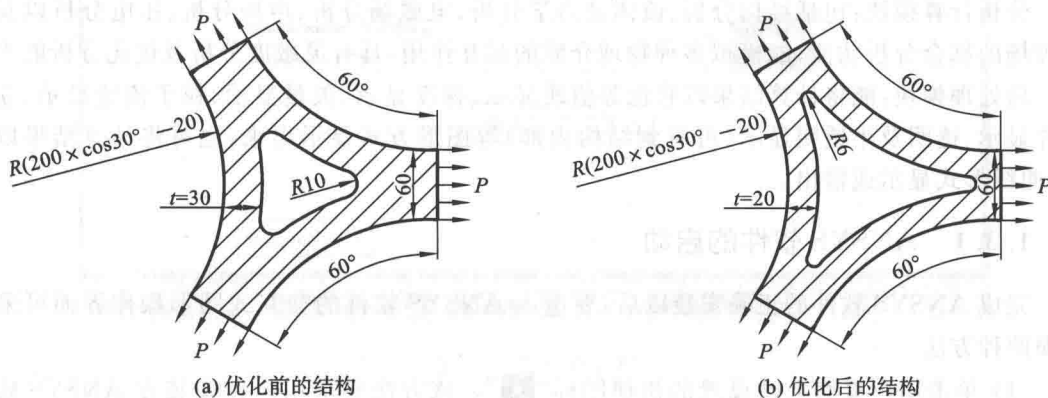


图 1-3 三角形零件的尺寸优化

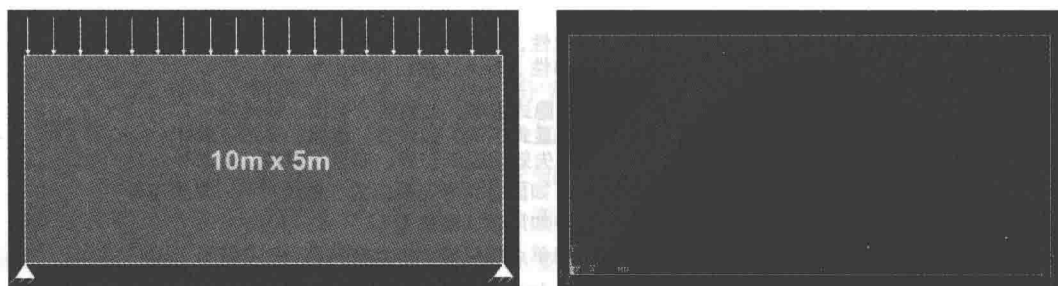


图 1-4 桥梁问题的拓扑优化

1.3 ANSYS 软件操作简介

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学、压电于一体,以有限元分析为基础的大型通用 CAE 软件。该软件可广泛应用于机械制造、石油化工、轻工、造船、航空航天、汽车交通、电子、核工业、能源、土木工程、水利、铁道、家用电器、生物医学、微机电系统等众多工业领域及科学研究。它有与多数 CAD(computer-aided design, 计算机辅助设计)软件相连接的接口,以实现数据的共享和交换,如 Creo、Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD 等,是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。它能够在 PC(personal computer, 个人计算机)、工作站或巨型计算机上运行。

ANSYS 软件为用户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、计算流体动力学、优化设计、接触分析、自适应网格划分、大应变,以及利用 ANSYS 参数设计语言(ANSYS parametric design language, APDL)的扩展宏命令功能。基于 Motif 的菜单系统,用户能够通过自行设置对话框、下拉式菜单和子菜单等方式进行数据输入和功能选择等。ANSYS 软件的集成化、模块化及可扩展性等特点满足工业领域中众多行业的仿真需求。

ANSYS 软件主要包括三个部分:前处理模块、分析计算模块和后处理模块。


前处理模块:用于实体建模及网格划分,以生成有限元模型。

分析计算模块:包括结构分析、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析功能,能模拟多种物理介质的相互作用,具有灵敏度分析及优化分析能力。

后处理模块:能将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

1.3.1 ANSYS 软件的启动

完成 ANSYS 软件的正确安装以后,要进入 ANSYS 软件的交互式图形操作界面可采用下面两种方法。

(1) 单击用户桌面上已设置的快捷图标“”。该方法要求用户在安装完 ANSYS 软件后,采用“新建”的方法在桌面上建立 ANSYS 软件的快捷方式。

(2) 单击“开始”菜单,在“所有程序”子菜单中选择已安装的“ANSYS”。这时会出现一个下拉菜单,在该菜单中,用户可单击如图 1-5 所示的任何一个程序菜单均可进入 ANSYS 软件

相关的操作界面。

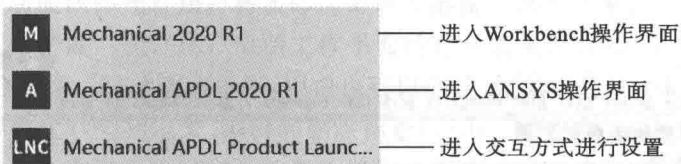


图 1-5 程序菜单

若单击“Mechanical”选项,即可进入 Workbench 操作界面。

若单击“Mechanical APDL”选项,则进入 ANSYS 软件的图形交互方式即图形用户界面(GUI)。

若单击“Mechanical APDL Product Launcher”选项,会出现如图 1-6 所示的对话框。在该对话框中,用户可进行 ANSYS 软件的产品模块(这些模块必须是用户已购买才会出现)的选择、工作目录的选择、工作文件名的设置、内存大小的设置、操作界面的选择以及参数化文件的设定等。在确定这些设置后,单击“Run”命令,就可进入 ANSYS 软件的用户操作界面,即可使用 ANSYS 软件进行分析。要注意的是,其中工作目录和文件名建议不要使用中文,可以是英文字母、数字或两者的组合。

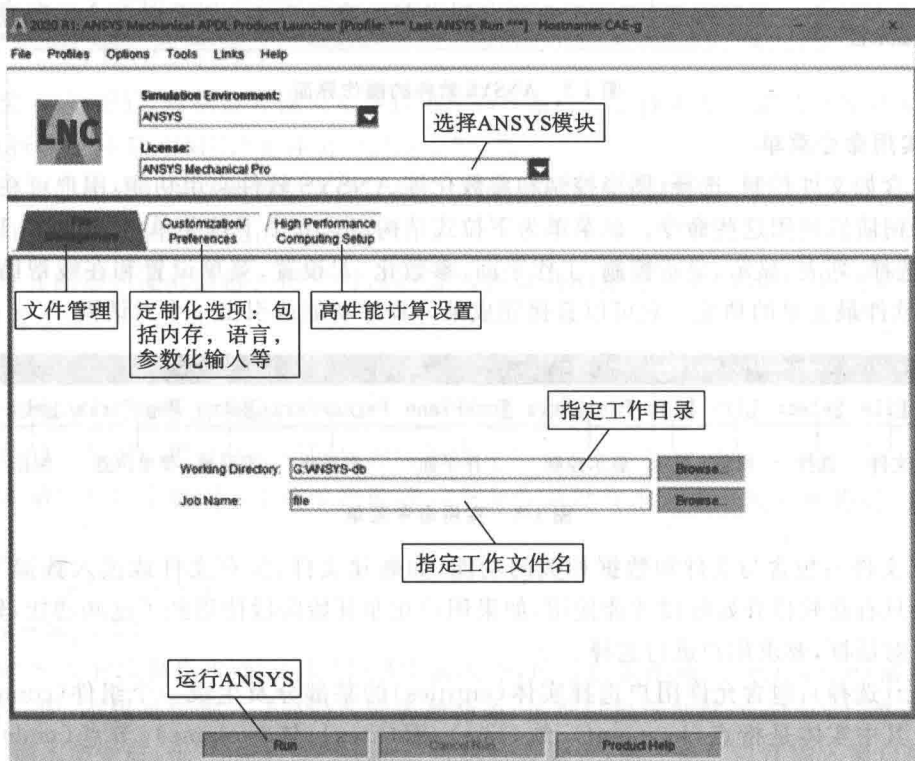


图 1-6 运行对话框

1.3.2 ANSYS 软件的操作界面

ANSYS 软件的操作界面如图 1-7 所示。它由实用命令菜单、快捷菜单、命令输入窗口、图

形输出窗口、工具栏、主菜单、信息输出窗口、状态信息显示栏和各种弹出式对话框(它们都可独立关闭)组成。



图 1-7 ANSYS 软件的操作界面

1. 实用命令菜单

它包含如文件控制、选择、图形控制和参数化等 ANSYS 软件实用功能,用户可在 ANSYS 软件的任何阶段使用这些命令。该菜单为下拉式结构,由 10 个下拉菜单组成,如图 1-8 所示,即文件、选择、列表、显示、显示控制、工作平面、参数化、宏设置、菜单设置和在线帮助,包括了 ANSYS 软件最主要的功能。它可以直接完成某一程序功能或引出一个对话框。



图 1-8 实用命令菜单

File(文件):包含与文件和数据相关的功能,如新建文件、保存文件或读入数据等。其中有些功能只有在软件开始阶段才能使用,如果用户在非开始阶段使用到了这些功能,软件将会出现一个对话框,要求用户进行选择。

Select(选择):包含允许用户选择实体(entities)的某部分及生成一个组件(components)等功能。其中实体是指点(keypoint)、线(line)、面(area)、体(volume)、节点(node)或单元(element)。

List(列表):允许用户将储存在 ANSYS 数据库中的任何数值项以文本方式列出,同时也可以得到在软件不同阶段的状态信息,列表出储存在用户系统中的文件内容。

Plot(显示):允许用户在图形输出窗口中显示出点(keypoint)、线(line)、面(area)、体(volume)、节点(node)和单元(element),以及其他能够用图形显示的数据。

PlotCtrls(显示控制):包含控制图形显示的视角(view)、类型(style)和其他的特色。它的硬拷贝(hard copy)功能能够允许用户将实体屏幕或图形窗口拷贝下来。

WorkPlane(工作平面):允许用户激活工作平面的打开或关闭,同时也可以对工作平面进行移动、旋转或其他操作。在这个菜单里,用户也可以创建、删除或转换坐标系。

Parameters(参数化):包括定义、编辑和删除标量(scalar)和数组(array)参数的功能。

Macro(宏设置):允许用户执行宏或数据块操作。用户也可创建、编辑和删除出现在工具栏上的缩写词。

MenuCtrls(菜单控制):允许用户对弹出对话框的颜色、字体进行设置。用户也可创建、编辑和删除出现在工具栏上的缩写词。用户一旦设置了一个喜欢的 GUI 方式,就可以使用“Save Menu Layout”功能将当前的 GUI 结构保存下来。


Help(帮助):引入一个 ANSYS 帮助系统。


2. 快捷菜单


它包含一组常用命令的按钮,如图 1-9 所示。





图 1-9 常用命令按钮


:创建一个新的分析。对已经存在的分析数据进行清除,重新开始一个新的分析,相当于执行命令:/CLEAR,START。

:读入 ANSYS 数据或者输入文件到 ANSYS 系统。文件类型决定着 ANSYS 的操作,相当于执行命令:RESUME,“文件名”“后缀名”“.”。

:将当前的分析保存到数据文件。相当于执行命令:SAVE。


:打开“Pan-Zoom-Rotate”对话框。


:打开图形捕捉对话框。用户可以设置将捕捉到的图形送入打印机,以文件方式存入或放在屏幕上。

:打开报告生成器对话框。

:显示 ANSYS 帮助系统。

:将隐藏的窗口提升到应用屏幕的最顶层。

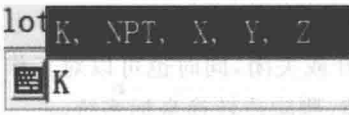
:在输出窗口中调用一个菜单拾取或一个命令而没有出现或者反应较慢时,重置拾取操作。

:打开接触对管理器。

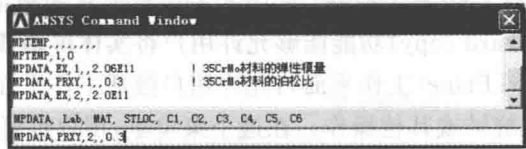
3. 命令输入窗口

在 ANSYS 软件操作中,除了采用 GUI 输入外,还可以采用命令(command)输入。在命令输入窗口中,不仅可以输入 ANSYS 的各种命令,还可以执行粘贴(Ctrl+V)、复制(Ctrl+C)操作。输入命令后,按“Enter”或“Return”可执行该命令,用户也可以在输入窗口的历史记录区中,对某一行的命令双击鼠标左键,就可以执行该命令。同时也可利用命令窗口来查看某个 ANSYS 命令的格式,如图 1-10 所示。

如果用户单击图 1-10(a)所示的键盘按钮,将弹出一个浮动命令窗口(见图 1-10(b)),它允许用户在输入复杂的命令流时对窗口进行缩放和移动操作,同时所有输入操作也都将保存在历史记录中。



(a) 命令的格式



(b) 输入命令

图 1-10 命令输入窗口

4. 图形输出窗口

可以在图形输出窗口中显示几何模型、网格、计算结果、云图、等值线等图形,用户可根据个人需求调整该窗口的大小,如图 1-11 所示。ANSYS 软件允许同时打开 5 个窗口,并可对每个窗口单独操作。

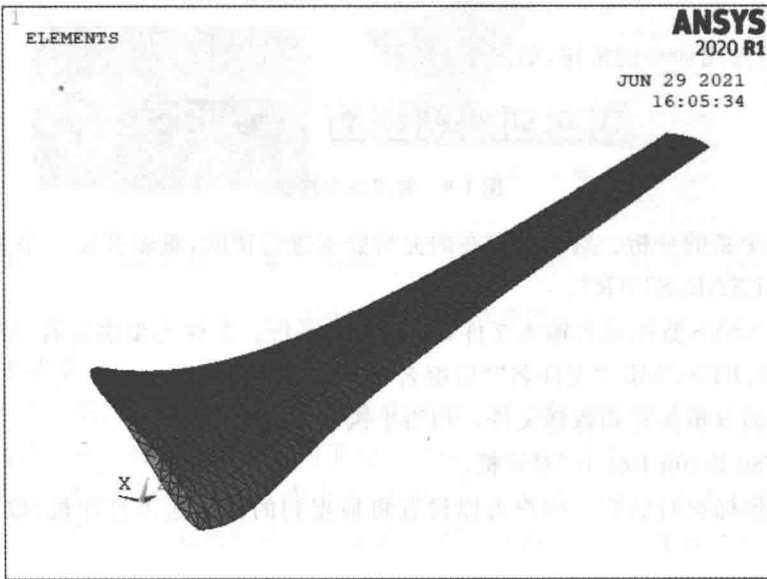


图 1-11 图形输出窗口

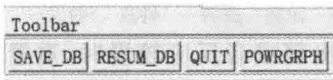


图 1-12 工具栏

5. 工具栏

工具栏主要用于存放一些快捷命令,用户可根据需要对快捷命令进行编辑、修改、删除等操作,只要用鼠标单击即可运行该命令,如图 1-12 所示。

6. 信息输出窗口

信息输出窗口用于显示 ANSYS 软件对已输入命令或已使用功能的响应信息,包括用户使用命令时的出错信息、警告信息、执行命令的响应、注意事项以及其他信息,如图 1-13 所示。它一般位于 GUI 窗口的下层。在 GUI 方式下,用户可随时访问该窗口。但要注意,若用户对该窗口使用了关闭操作,则整个 ANSYS 系统将会退出。

7. 主菜单

主菜单(Main Menu)为树形结构排列,包含 ANSYS 软件中的主要分析功能,按有限元分析过程的顺序排列,其中“田”表示可继续扩展菜单项,“回”表示回到其上级菜单项,“”表示将出现一个拾取框,“”表示将出现一个对话框,如图 1-14 所示。

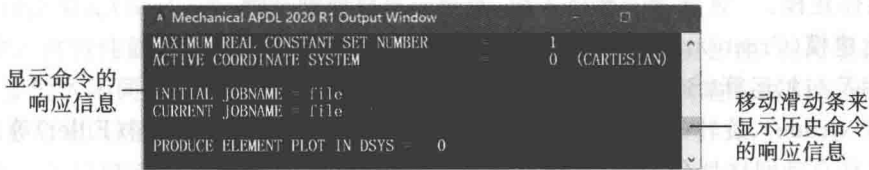


图 1-13 信息输出窗口

Preferences: 优先选择。它允许用户将与当前分析无关的选项过滤掉,以缩减菜单项。如选择结构分析,则只有与结构分析相关的菜单或命令出现,其他分析菜单或命令将被屏蔽。

Preprocessor: 前处理器。它包含建模、划分网格和施加载荷等功能。可以通过执行命令“/PREP7”进入。

Solution: 求解器。它包含指定分析类型和选项、施加载荷、载荷步设置,以及求解执行等功能。可通过执行命令“/SOLU”进入。

General Postproc: 通用后处理器。它包含结果数据的显示和列表等功能,可通过执行命令“/POST1”进入。它显示模型在某一时刻的结果。

TimeHist Postpro: 时间历程后处理器,显示时间历程变量浏览器。它包含变量的定义、列表和显示等功能,可通过执行命令“/POST26”进入。它显示模型中的某部分在一段时间内的结果。

RadiationOpt: 进入辐射矩阵生成器。可通过执行命令“/AUX12”进入。

Session Editor: 打开对话编辑框。

Finish: 结束当前处理器,系统回到开始状态。可通过执行命令“FINISH”替代。

8. 状态信息显示栏

如图 1-15 所示,状态信息显示栏显示用户操作所处的阶段状况,如材料类型(mat)、单元类型(type)、实常数(real)、坐标系(csys)、剖面号(secn),以及当前主菜单所在的模块。

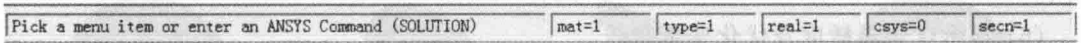


图 1-15 状态信息显示栏

1.3.3 ANSYS 软件的模块化与操作步骤

1. ANSYS 软件的模块化

ANSYS 软件采用模块化结构,并按照有限元分析的顺序来构造其模块,每个模块具有不同的功能。若按照有限元分析的基本功能分,它主要分成三个模块:前处理模块、分析计算模块和后处理模块。这三个模块之间有先后顺序,用户只有在完成前一个模块后,才能进入或使用后一个模块。

1) 前处理模块

它为用户提供了一个强大的实体建模及网格划分工具,用户可以方便地构造有限元模型。软件提供了 100 种以上的单元类型,用来模拟工程中的各种结构和材料。

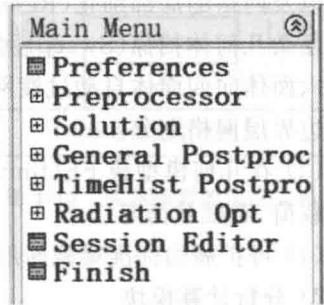


图 1-14 主菜单

(1) 实体建模。

参数化建模(Create)。

体素库及布尔运算(Booleans Operate)。

拖拉(Extrude)、旋转(Rotation)、拷贝(Copy)、蒙皮(Skinning)、倒角(Fillet)等。

(2) 多种自动网格划分工具,自动进行单元形态、求解精度检查及修正。

自由(Free)/映射(Mapped)网格划分、智能(Smartsize)网格划分、自适应(Adaptive)网格划分以及网格的局部细化(Refine)。

复杂几何体扫掠(Sweep)网格生成。

六面体向四面体自动过渡网格:金字塔形(Pyramid)。

边界层网格划分。

(3) 在几何模型或 FE(finite element,有限单元)模型上加载:点载荷、分布载荷、体载荷、函数载荷、温度载荷等。

(4) 可扩展的标准梁截面形状库。

2) 分析计算模块

该模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析,可模拟多种物理介质的相互作用,具有灵敏度分析及优化分析能力。

3) 后处理模块

该模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。具体如下。

(1) 计算报告自动生成及定制工具,自动生成符合要求格式的计算报告。

(2) 结果显示菜单:图形显示、抓图、结果列表。

(3) 图形:云图、等值线、矢量显示、粒子流迹显示、切片、透明及半透明显示、纹理。

(4) 对钢筋混凝土单元可显示单元内的钢筋、开裂情况以及压碎部位。

(5) 对梁、管、板、复合材料单元及结果按实际形状显示,显示横截面结果,显示梁单元弯矩图。

(6) 显示优化灵敏度及优化变量曲线。

(7) 各种结果动画显示,可独立保存及重放。

(8) 3D 图形注释功能。

(9) 直接生成 .bmp、.jpg、.vrml、.wmf、.emf、.png、.ps、.tiff、.hpgl 等格式的图形。

(10) 计算结果排序、检索、列表及再组合。

(11) 提供对计算结果的加、减、积分、微分等计算。

(12) 显示沿任意路径的结果曲线,并可进行沿路径的数学计算。

2. ANSYS 软件结构分析的步骤

ANSYS 软件有限元分析是一种模拟设计载荷条件,并且确定在载荷条件下产品设计响应的方法,是对真实情况的数值近似。ANSYS 软件有限元分析过程主要包括以下三个步骤。

1) 建立模型——前处理器(Preprocessor)

(1) 选择单元类型并确定单元的选项(Element Type)。

(2) 输入实常数(Real Constants):若选取的单元为质量单元(Mass)、杆单元(Link)、梁单

元(Beam)和壳单元(Shell)等,则必须根据单元特性,输入相关的实常数。

(3) 输入材料性能参数(Material Props),主要包括弹性模量、泊松比,同时根据分析问题的性质,还要输入不同的性能参数,如:要考虑自重或惯性力,则必须输入材料的密度;要分析热应力,则必须输入热膨胀系数等。

(4) 建立几何模型(Modeling):可以采用自顶向下、自底向上或两者相结合的方式建立几何模型。自顶向下和自底向上的意义如图 1-16 所示。

同时在 ANSYS 软件中已汇集了面、体等几何体素库,图 1-17 所示为面体素图元,图 1-18 所示为体素图元。

要得到一个复杂形状的几何图形,用户可以通过基本体素的布尔运算、拖拉和旋转实现。同时,为了提高建模的速度,用户也可以对已生成的几何体素进行移动、旋转、复制、删除、镜像、合并和修改等操作。

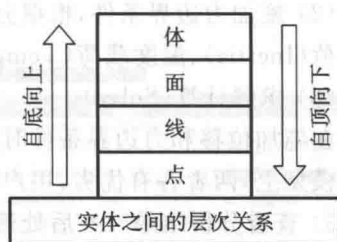


图 1-16 实体模型的层次关系

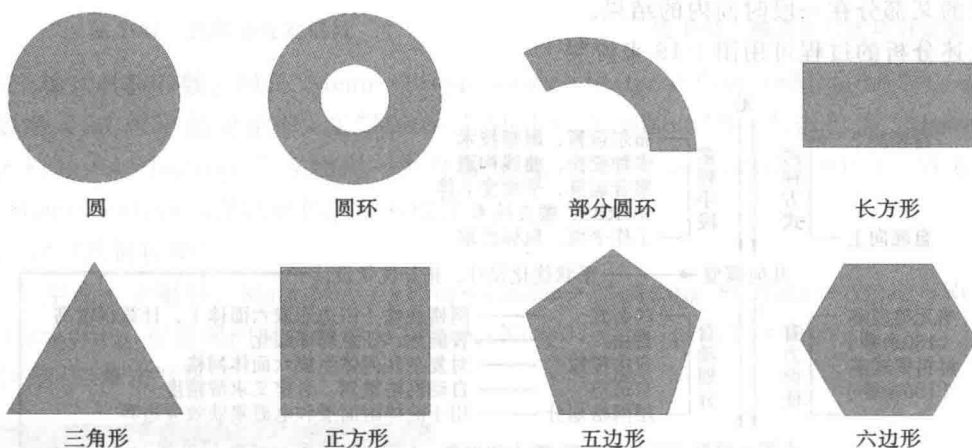


图 1-17 面体素图元



图 1-18 体素图元